MASARYKOVA UNIVERZITA Přírodovědecká fakulta

ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalářská práce

Brno 2025

VÁCLAV CHMELAŘ

MASARYKOVA UNIVERZITA Přírodovědecká fakulta Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Hvězdy typu delta Sct s nízkými teplotami

Bakalářská práce Václav Chmelař

Vedoucí práce: Mgr. Marek Skarka, Ph.D. Brno 2025

Bibliografický záznam

| Autor: | Václav Chmelař Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky |
|-------------------|--|
| Název práce: | Hvězdy typu delta Sct s nízkými teplotami |
| Studijní program: | Fyzika |
| Studijní obor: | Astrofyzika |
| Vedoucí práce: | Mgr. Marek Skarka, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2024/2025 |
| Počet stran: | IX + 58 |
| Klíčová slova: | δ Scuti; TESS; světelné křivky; kontaminace |

Bibliographic Entry

| Author: | Václav Chmelař Faculty of Science, Masaryk University Department of theoretical physics and astrophysics |
|-------------------|--|
| Title of Thesis: | Delta Sct stars with low temperatures |
| Degree Programme: | Physics |
| Field of Study: | Astrophysics |
| Supervisor: | Mgr. Marek Skarka, Ph.D. |
| Academic Year: | 2024/2025 |
| Number of Pages: | IX + 58 |
| Keywords: | δ Scuti; TESS; light curves; contamination |

Abstrakt

Tato bakalářská práce ověřuje původ pulzací u deseti kandidátů na hvězdy typu δ Scuti s nízkou efektivní teplotou, identifikovaných v datech z družice *TESS*. Analyzovány byly světelné křivky a prostorové rozložení signálu, přičemž u čtyř objektů byly výsledky nezávisle ověřeny pomocí pozemské fotometrie.

Analýza ukázala, že ve většině případů byla proměnnost způsobena kontaminací světlem blízkých hvězd, jejichž teploty odpovídají typu δ Scuti, nebo kontaminací ze zákrytové dvojhvězdy. Předpokládané objekty tedy v těchto případech nejsou pulzující hvězdy typu δ Scuti. U dvou zbylých objektů se (za předpokladu spolehlivosti nástroje TESS LOCALIZE) potvrdilo, že pulzace pochází přímo z cílové hvězdy. Práce poskytuje přehled správně i chybně identifikovaných případů a propojuje družicová a pozemní data při studiu hvězdné proměnnosti.

Abstract

This bachelor thesis verifies the origin of pulsations in ten δ Scuti candidates with low effective temperature identified in *TESS* data. The light curves and the spatial distribution of the signal were analyzed, with four objects having their results independently verified by ground-based photometry.

The analysis showed that in most cases, the variability was caused by contamination from nearby stars whose temperatures correspond to the δ Scuti type, or by contamination from an eclipsing binary. Thus, the predicted objects in these cases are not pulsating stars of the δ Scuti type. For two remaining objects, it is confirmed (assuming the reliability of the TESS LOCALIZE tool) that the pulsation comes directly from the target star. This thesis provides an overview of the correctly and erroneously identified cases and links satellite and ground-based data in the study of stellar variability.

Z A D Á N Í B A K A L Á Ř S K É P R Á C E

Akademický rok: 2024/2025

| Ústav: | Ústav teoretické fyziky a astrofyziky | | |
|---------------|---------------------------------------|--|--|
| Student: | Václav Chmelař | | |
| Program: | Fyzika | | |
| Specializace: | Astrofyzika | | |

Ředitel ústavu PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s názvem:

| Název práce: | Hvězdy typu delta Sct s nízkými teplotami | | |
|-----------------------|---|--|--|
| Název práce anglicky: | Delta Sct stars with low temperatures | | |
| Jazyk práce: | čeština | | |

Oficiální zadání:

Někteří kandidáti pro hvězdy typu delta Sct mají povrchové teploty, při kterých by se tento typ pulzací neměl vyskytovat. Tito kandidáti byli identifikování v širokoúhlé přehlídce vesmírného teleskopu TESS s nízkým úhlovým rozlišením. Cílem práce je ověřit, že signál odpovídající pulzacím skutečně pochází z daného objektu a nejedná se tak o kontaminaci blízkou hvězdou.

Literatura:

CARROLL, Bradley W. a Dale A. OSTLIE. *An introduction to modern astrophysics*. 2nd ed. San Francisco: Pearson Addison-Wesley, 2007, 1 v. ISBN 9780321442840.

MIKULÁŠEK, Zdeněk a Miloslav ZEJDA. Proměnné hvězdy. ÚTFA PřF MU. Brno, 2009.

CATELAN, Marcio a Horace, A. SMITH. Pulsating stars. 2015. ISBN 978-3-527-40715-6.

| Vedoucí práce: | Mgr. Marek Skarka, Ph.D. |
|---------------------|--------------------------|
| Konzultant: | Mgr. Jakub Kolář |
| Datum zadání práce: | 3. 11. 2024 |
| V Brně dne: | 3. 3. 2025 |

Zadání bylo schváleno prostřednictvím IS MU.

Václav Chmelař, 14. 11. 2024 Mgr. Marek Skarka, Ph.D., 14. 11. 2024 RNDr. Luboš Poláček, 4. 12. 2024

Poděkování

Na tomto místě bych rád vyjádřil své upřímné poděkování vedoucímu mé bakalářské práce, Mgr. Marku Skarkovi, Ph.D., za jeho cenné rady, ochotu, trpělivost a vstřícný přístup, které mi poskytoval během celého procesu psaní této práce. Mé poděkování patří také konzultantovi Mgr. Jakubu Kolářovi za poskytnou pomoc při pozorování, rady ke zpracování dat a otevřenost v průběhu celé práce. Dále děkuji doc. RNDr. Miloslavu Zejdovi, Ph.D., za zaučení a za umožnění přístupu k dalekohledu ve Ždánicích. Zároveň bych chtěl poděkovat také Dr. Martinu Jelínkovi a Dr. Janu Štroblovi za poskytnutí naměřených dat z observatoře v Ondřejově, které významně přispěly ke zvýšení kvality této práce, a za jejich věnovaný pozorovací čas. V neposlední řadě děkuji své rodině a blízkým za jejich podporu a motivaci, kterou mi po celou dobu studia i při psaní této práce poskytovali.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Václav Chmelař

Brno 12.5.2025

Obsah

| Ú | od. | | 1 |
|----|-----|---|--------|
| 1. | Od | proměnných hvězd po pixely: teorie a pozorování | 3 |
| | 1.1 | Proměnné hvězdy | 3 |
| | | 1.1.1 Hvězdy typu δ Scuti | 4 |
| | | 1.1.2 K-mechanismus aneb proč je teplota klíčová pro pulzace | 5 |
| | | 1.1.3 Pás nestability a výskyt pulzujících hvězd v jeho okolí | 5 |
| | 1.2 | CCD měření a princip fotometrie | 6 |
| | | 1.2.1 Princip CCD a jeho role v astronomické fotometrii | 6 |
| | | 1.2.2 Základní korekce CCD snímků | 7 |
| | | 1.2.3 Diferenciální fotometrie | 8 |
| | | 1.2.4 Získávání světelných křivek | 10 |
| | | 1.2.5 Fázová křivka | 10 |
| | 1.3 | Družice TESS | 11 |
| 2. | Fot | ometrická data a jejich zpracování | 13 |
| | 2.1 | Výběr kandidátů | 13 |
| | 2.2 | Získání a analýza dat z <i>TESS</i> | 14 |
| | | 2.2.1 Frekvenční analýza – Periodogram | 15 |
| | | 2.2.2 Analýza pixelových dat – TPF PLOTTER | 17 |
| | | 2.2.3 Periodogramy v jednotlivých pixelech – TESS INTERACT | 19 |
| | | 2.2.4 Lokalizace původu signálu – TESS LOCALIZE | 20 |
| | 2.3 | Pozemní fotometrie | 21 |
| | | 2.3.1 Metodika pozemní fotometrie | 22 |
| | | 2.3.2 Oprava dat a diferenciální fotometrie | 22 |
| 3. | Ana | alýza a výsledky | 25 |
| | 3.1 | TIC 237217852 | 25 |
| | 3.2 | TIC 229795026 | 32 |
| | 3.3 | TIC 236885887 | 37 |
| | 3.4 | TIC 243280731 | 42 |
| | 3.5 | Ostatní kandidáti | 47 |
| | 3.6 | Zkoumané hvězdy v H-R diagramu | 53 |
| | | -x | ciii – |

| Závěr | 55 |
|---------------------------|----|
| Seznam použité literatury | 57 |
| Apendix | 59 |

Úvod

Studium proměnných hvězd je důležitým prostředkem pro zkoumání struktury a vývoje hvězd. Mezi často zkoumané typy patří hvězdy typu δ Scuti, které se vyskytují v oblasti teplot, kde jsou vhodné podmínky pro rozvinutí a stabilní udržení pulzací. Tato skupina je důležitá pro asteroseismologii, protože umožňuje studium vnitřní stavby hvězd prostřednictvím analýzy jejich pulzačních módů. V H-R diagramu se nachází v oblasti tzv. pásu nestability. Tyto hvězdy jsou obvykle středně hmotné s efektivními teplotami v rozmezí přibližně 7 000 – 10 000 K (Breger, 2000).

Některé nedávné studie, včetně práce Skarka et al. (2022), identifikovaly pomocí fotometrických dat z družice *TESS* (Ricker et al., 2015) kandidáty na δ Scuti hvězdy, jejichž efektivní teplota je nižší, než by bylo očekáváno pro výskyt tohoto typu pulzací, a proto je jejich zařazení mezi δ Scuti hvězdy z fyzikálního hlediska problematické.

Družice *TESS*, která provádí širokoúhlou přehlídku oblohy, využívá CCD kameru s poměrně nízkým úhlovým rozlišením. To v mnoha případech vede ke kontaminaci signálu z blízkých hvězd (tzv. blend), čímž může docházet k mylné identifikaci původu proměnnosti. Cílem této práce je ověřit, zda signál odpovídající pulzacím skutečně pochází z předpokládané hvězdy, nebo zda se jedná o kontaminaci světlem blízkého objektu.

V rámci práce byla analyzována *TESS* data pro vybrané kandidáty na δ Scuti hvězdy s podezřele nízkou teplotou. K ověření jejich proměnnosti byla využita i pozemní fotometrická data s vyšším úhlovým rozlišením. Analýza byla doplněna nástroji pro lokalizaci zdroje signálu, kontrolu okolních hvězd pomocí katalogů (*Gaia* DR3) a frekvenční analýzu.

Kapitola 1

Od proměnných hvězd po pixely: teorie a pozorování

1.1 Proměnné hvězdy

Jako proměnné označujeme hvězdy, u nichž se v průběhu času mění jejich jasnost. Je to široká skupina objektů zahrnující jednotlivé hvězdy, dvojhvězdy i vícenásobné hvězdné systémy. Původ i projevy proměnnosti jsou však velmi různorodé. Podle dřívějších odhadů mohlo vykazovat zjevnou proměnnost 10 procent hvězd, avšak v dnešní době je většina hvězd označena jako proměnné. To je způsobeno použitím lepších pozorovacích metod, jelikož s přesnějšími pozorováními roste i počet detekcí proměnnosti. Pokud uvažujeme i vlivy například hvězdných skvrn nebo struktury atmosfér, drtivá většina hvězd může být označena jako proměnné. S tím souvisí i v jakém rozsahu se proměnnost vyskytuje - od tisícin až po nižší desítky magnitud. Dalším důležitým parametrem u proměnnosti je i časový rozsah, ve kterém se proměnnost vyskytuje - od tisícin sekund až po miliardy let Mikulášek a Zejda (2013). Nabízí se tedy rozřazení časových škál souvisejících s vývojem hvězdy:

- Dynamická časová škála vyskytují se zde proměnnosti s časovými změnami v řádu minut až dnů. Původ těchto proměnností souvisí s narušením hydrostatické rovnováhy a dalších jevů (erupce, skvrny atd.).
- Kelvinova-Hemholtozva škála proměnnosti řadící se do této škály souvisí s vnitřní přestavbou jádra i obalu, avšak při zachování hydrostatické rovnováhy. Jedná se o proměnnost v řádu statisíců let.
- Jaderná časová škála typ proměnností vyskytující se v této časové škále úzce souvisí s jaderným vývojem hvězdy. Ačkoliv se rychlost jaderného vývoje zvyšuje s narůstající hmotností hvězd, jedná se i u nejhmotnějších zástupců o nejpomalejší typ proměnnosti pohybující se řádově v milionech až miliardách let.

Toto členění nepostihuje veškeré pozorované typy proměnnosti a slouží především k teoretickému pochopení stability a vývoje hvězdné struktury.

Možná ještě důležitějším rozřazením proměnných hvězd je podle mechanismu proměnnosti. Ten se dá nejobecněji přiřadit do jedné ze dvou kategorií Mikulášek a Zejda (2013):

- Geometrické u této skupiny hvězd se nemění fyzické vlastnosti hvězd a jejich zářivý výkon zůstává konstantní. Proměnnost je způsobena změnami pozorovací geometrie. Nejčastěji ve spojení s rotací samotné hvězdy se skvrnami a nebo oběhem jednotlivých hvězd ve dvojhvězdě, či vícenásobných systémech.
- Fyzické u této skupiny hvězd se skutečně mění zářivý výkon hvězdy v důsledku procesů souvisejících jak s blízkým okolím hvězdy (například přenos hmoty u dvojhvězd typu bílý trpaslík červený obr), tak i s vnitřkem hvězdy.

1.1.1 Hvězdy typu δ Scuti

Hvězdy typu δ Scuti jsou pulzující proměnné hvězdy, které se nacházejí na horní části hlavní posloupnosti (obrázek 1.1). Patří tedy do skupiny fyzicky proměnných hvězd. Zároveň se jedná o nejpočetnější skupinu hvězd v tzv. pásu nestability. Tento typ hvězd je charakteristický krátkými periodami pulzací (obvykle pod 0,3 dne) a změnami amplitudy do 0,9 magnitudy ve filtru V. Mají hmotnost v intervalu 1,5 až 2,3 hmotností Slunce (Pietrukowicz et al., 2020). Efektivní teplota hvězd typu δ Scuti se obvykle nachází mezi 7 000 K a 10 000 K. (Breger, 2000).



Obrázek 1.1: Poloha pásu nestability v H-R diagramu s vyznačenou polohou DSCT hvězd (wiki instability strip, 2023).

1.1.2 K-mechanismus aneb proč je teplota klíčová pro pulzace

Pulzace se mohou vyskytovat dvojího druhu - radiální a neradiální. Většina δ Scuti však pulzuje s oběma typy pulzací současně. Pro vznik pulzací u hvězd typu δ Scuti je klíčový κ -mechanismus, který je zodpovědný za periodické změny velikosti hvězdy a teploty povrchu.

Podstatou κ -mechanismu je měnící se opacita ve hvězdě (také označována jako κ), která určuje, jak moc lehké je pro záření uniknout z vnitřních vrstev hvězdy. Při dostatečné teplotě vzniká ve hvězdě vrstva právě s rostoucí opacitou, která způsobuje nahromadění vyzářené energie ze spodních vrstev. Tato akumulace energie způsobí zvýšení tlaku a následný pohyb vzhůru od jádra společně s rozpínáním této aktivní vrstvy. V této fázi může energie, která se hromadila, uniknout ven. Opacita poté postupně klesá do doby, než tíha tohoto materiálu převáží sílu směřující směrem od středu hvězdy (gradient tlaku) a hvězda se smršťuje. Smrštěním a poklesem této vrstvy se umožní, aby tato vrstva postupně znovu hromadila energii a cyklus pulzace začal znovu.

Samotná opacita úzce souvisí s ionizací vodíku a hélia. Pro δ Scuti je důležitější vrstva částečně ionizovaného hélia při teplotách okolo 40 000 K. Při částečné (He II) či úplné ionizaci (He III) vzniká pro záření takřka neprostupná vrstva s vysokou opacitou. Efektivita tohoto mechanismu záleží na hloubce umístění této aktivní vrstvy. Pokud je efektivní teplota hvězdy příliš nízká, aktivní vrstva se nachází hluboko natolik, že se pulzace nemají šanci projevit díky zanedbatelnému množství zadržené energie. Naopak pro příliš horké hvězdy se nachází vrstva příliš daleko od jádra pro udržení stabilních pulzací. Jde tedy o určitý balanc a umístění této aktivní vrstvy, která rozhoduje o tom, jaké hvězdy jsou schopné stabilně pulzovat. Všechny radiálně pulzující hvězdy musí mít tedy do určité míry podobné vlastnosti, především teplotu. Mohou se však lišit například ve střední hustotě, která rozhoduje o tom, jak hvězda pulzuje. V takovémto případě dává smysl zavést určitou oblast v H-R diagramu, která tyto hvězdy seskupuje - **pás nestability** (obrázek 1.1). Informace v textu výše byly značně čerpány ze skript Mikulášek a Zejda (2013).

1.1.3 Pás nestability a výskyt pulzujících hvězd v jeho okolí

Výskyt pulzací u hvězd mimo pás nestability je překvapivý, protože podle teoretických modelů by hvězdy s nízkou efektivní teplotou neměly vykazovat tuto formu proměnnosti v dlouhodobém měřítku, díky postupnému útlumu těchto pulzací. Pokud se u hvězd s nižšími teplotami objeví pulzace, může to být způsobeno:

- Kontaminací světelného signálu: Pokud se dvě nebo více hvězd nacházejí v těsné blízkosti a jejich světelné křivky se kombinují, může být signál špatně interpretován jako pulzace nesprávné hvězdy.
- "Setrvačností" hvězdy, která je krátkou dobu mimo pás nestability a pulzace se ještě zcela neutlumily. To je ale nepravděpodobné díky krátké relaxační době.
- Neobvyklými fyzikálními procesy: Existují i možnosti, že nějaké neznámé mechanismy umožní hvězdám mimo pás nestability s příliš nízkou teplotou vykazovat pulzace, i když se to očekává pouze u hvězd s vyššími teplotami.

Tento výskyt pulzujících hvězd je tedy důležité prověřovat, protože by mohl znamenat špatné naměření dat, chybné zpracování či neúplnou teorii o pulzujících hvězdách. Předmětem této práce jsou právě kandidáti vykazující tento typ pulzací, kteří se nacházejí mimo pás nestability v oblasti nízkých teplot.

1.2 CCD měření a princip fotometrie

Fotometrie je způsob pozorování, který se zabývá měřením intenzity světla objektů na obloze. V astronomii je fotometrie nezbytným nástrojem pro studium a analýzu různých astronomických jevů, včetně proměnných hvězd. Cílem fotometrie je získat světelnou křivku. Tato světelná křivka je následně analyzována, aby poskytla informace o fyzikálních procesech ve hvězdách a jevech ve vesmíru, např. o pulzaci hvězd, vícenásobných hvězdných systémech, transitech exoplanet nebo jiných typů proměnnosti. Světelné křivky se obvykle sestavují z měření intenzity světla, která jsou zaznamenávána v pravidelných časových intervalech, přičemž jedním z nejvýznamnějších nástrojů pro fotometrická měření je CCD kamera.

1.2.1 Princip CCD a jeho role v astronomické fotometrii

CCD (Charge-Coupled Device) je elektronický senzor, který převádí elektromagnetické záření na elektrický náboj, jež je následně zpracován a převeden na digitální signál. Od svého vzniku se CCD staly standardem pro detekci světla v moderní astronomii. Hlavní výhodou CCD technologie je její vysoká citlivost na světlo. Další výhodou je linearita a možnost získávat data z více objektů zároveň. Nevýhodou může být různá citlivost čipu v závislosti na vlnové délce dopadajícího záření, či dynamický rozsah, kvůli kterému je potřeba dávat pozor na saturaci pixelů u nejjasnějších objektů.

CCD detektor je tvořen maticí pixelů. Každý pixel je schopen zachytit fotony světla, které na něj dopadnou, a uvolnit elektrony pomocí fotoefektu, který lze popsat rovnicí

$$E = hf = hf_0 + E_{\max} \tag{1.1}$$

kde E je energie dopadajícího fotonu, h je planckova konstanta, f je frekvence dopadajícího světla, f_0 je minimální potřebná frekvence pro vyražení elektronu a E_{max} je maximální energie elektronu po vyražení.

Tyto elektrony jsou poté uchovávány v každém pixelu jako náboj, který je převeden na elektrický signál. Každý pixel si lze tedy představit jako potenciálovou jámu, která má konečnou kapacitu. Pokud se tato kapacita naplní, dochází právě k výše zmíněné saturaci a ta se může do snímků promítnout více způsoby, například ztracenou informací na pixelu či řadou pixelů. V horších případech může dojít i k trvalému poškození jednotlivých pixelů.

1.2.2 Základní korekce CCD snímků

Při fotometrických měřeních se vždy na snímcích s fotometrickými daty objeví různé nežádoucí jevy, které mohou ovlivnit přesnost měření. Existují ale metody, jak tyto nedokonalosti eliminovat, aby výsledky měření byly co nejpřesnější a byly co nejméně ovlivněny těmito nedostatky.

Jedním z hlavních problémů je temný proud, který vzniká v důsledku vlastní teploty CCD čipu. Množství temného proudu závisí tedy jak na teplotě, tak i na délce expozice. Proto je nutné CCD čip chladit. Jelikož ale vliv temného proudu nelze z podstaty věci zcela odstranit, je potřeba použít korekci pomocí dark snímků (Janík, 2021), tedy snímků, při kterých zcela odstraníme zdroj světla, při zachování stejné teploty a expozice, jako u snímků zkoumaného objektu. Pokud zkombinujeme několik takovýchto snímků pomocí váhovaného mediánu, dostaneme jeden snímek, který obsahuje potřebnou informaci o šumu způsobeného temným proudem - master dark viz obrázek 1.2a. Ten se následně odečte od snímků zkoumaného objektu.





(a) Master dark snímek.

(b) Master field snímek pro filtr G.

Obrázek 1.2: Ukázka korekčních snímků použitých v této práci při zpracování pozemní fotometrie.

Další problémy vznikají kvůli nerovnoměrné citlivosti pixelů nebo nepravidelnému osvětlení čipu. K tomu může dojít například kvůli nečistotám na optických součástech teleskopu nebo kamery. Pro odstranění těchto problémů je nutné pořídit snímek rovnoměrně osvětlené plochy, takzvaný flat field snímek (Janík, 2021). Flat field snímky se obvykle pořizují před východem nebo po západu Slunce, když nejsou na obloze vidět hvězdy a v rámci zorného pole kamery je obloha rovnoměrně osvětlená. Proto je teleskop nasměrován na opačný azimut než mělo Slunce při západu/východu. Délka expozice musí být velmi krátká (milisekundy až sekundy), aby se správně a rovnoměrně exponovaly snímky. Pro každý fotometrický filtr je také potřeba pořídit samostatné flat field snímky, protože každý filtr může mít jiné vlastnosti a na jeho povrchu mohou být přítomné prachové částice, které mají specifické rozložení pro každý filtr. Stejně jako u dark snímků se flat field snímky následně kombinují pomocí váhovaného mediánu do tzv. master flat.

Rovnoměrné osvětlení je ovšem stále ovlivněno termálním šumem, takže je nutné také odečíst master dark snímek od snímků flat field. Stejně jako u temného snímku se použije

vážený medián z více flat field snímků, čímž vznikne master flat frame (Obrázek 1.2b). Každý vědecký snímek se tímto master flatem podělí, aby se odstranily chyby v osvětlení a další nežádoucí artefakty.

Dalším důležitým problémem, který je třeba řešit při zpracování CCD snímků, je šum při čtení. Tento šum vzniká kvůli elektronickým komponentám kamery, jako jsou zesilovače a A/D převodníky, které mohou vnášet nežádoucí fluktuace do získaných dat (Janík, 2021). K eliminaci tohoto šumu se používá bias frame, což je snímek pořízený při nejkratší možné expozici (ideálně 0 sekund) s uzavřenou závěrkou, aby výsledný snímek primárně obsahoval informaci o vlivu čtecího šumu a ostatní vlivy se minimalizovaly. Bias frame se použije k odečtení šumu z každého snímku, čímž se získají korektní a čisté údaje.

Postup v praxi je následující. Při kalibraci CCD surových snímků se odečítá master dark snímek, který odstraní vliv temného proudu a zároveň i bias šumu. Následně se výsledný obraz normalizuje dělením master flat snímkem, jenž kompenzuje nerovnoměrnou citlivost pixelů a odchylky v osvětlení způsobené nečistotami na optice. Celý proces tak eliminuje potřebu samostatné bias korekce. Rovnicí by se tento proces dal zapsat jako

$$V = \frac{S - D_S}{F} \tag{1.2}$$

kde V je upravený snímek, S je surový snímek, D_S je master dark pro surový snímek a F je master flat. Je však potřeba pamatovat na to, že i od samotných flat snímků, ze kterých je master flat vytvořen, se musí odečíst odpovídající master dark snímek.

1.2.3 Diferenciální fotometrie

Po korekcích dark frame a flat field snímek stále obsahuje nejen signál objektu, ale i proměnlivé pozadí způsobené např. pohybem objektu nebo změnami atmosférického pohlcování, které je třeba odstranit. Nejčastěji se pro tento proces používá diferenciální fotometrie. Tento přístup je efektivní, protože eliminuje při splnění určitých podmínek vliv atmosférické extinkce (útlumu světla atmosférou). Hojně se používá i z důvodu, že se jedná o jednu z nejjednodušších metod, jak provést fotometrii.

Diferenciální fotometrie je metoda, která měří jasnost cílového objektu (například proměnné hvězdy) v relaci k jasnosti srovnávací hvězdy. Při správném zvolení srovnávací hvězdy lze uvažovat o stejném ovlivnění signálu při průchodu atmosférou (Janík, 2021). Tato metoda je zvláště důležitá v případě proměnných hvězd, kde jsou i malé změny v jasu důležité pro studium vnitřní struktury a chování hvězdy. Metoda se opírá o fakt, že atmosférická extinkce ovlivňuje blízké objekty na obloze stejným způsobem. Zatímco jasnost hvězd je ovlivněna těmito změnami v atmosféře (např. vlivem oblačnosti nebo vlhkosti), rozdíl jasností mezi dvěma neproměnnými hvězdami, které jsou blízko sebe na obloze, je v podstatě konstantní. Pokud tedy měříme jasnost mezi objektem a srovnávací hvězdou, můžeme eliminovat vliv atmosféry.

Výběr srovnávací hvězdy

Výběr správné srovnávací hvězdy je klíčový pro úspěšnost diferenciální fotometrie. V odlišných situacích je váha podmínek pro výběr různá. Obecně by ale srovnávací hvězda měla:

- Mít konstantní světelnou křivku, aby se zřetelně ukázaly změny na zkoumaném objektu.
- Mít podobný jas jako cílová hvězda.
- Mít podobný spektrální typ, aby byla minimalizována odchylka ve vlivu atmosférických podmínek (např. extinkce).
- Být dostatečně vzdálená od cílové hvězdy, aby se signály obou hvězd neovlivňovaly.
- Ležet v rozumné vzdálenosti od zkoumaného objektu, aby se dala uvažovat stejná citlivost čipu a zároveň se daly uvažovat stejné atmosférické podmínky pro oba objekty.

Velikost apertury a přesnost měření

Při diferenciální fotometrii je velmi důležité správně zvolit velikost apertury, tedy oblasti, ve které se měří jasnost hvězd. Apertura je obvykle kulatého tvaru, ale může být i obdélníková, eliptická atd. Velikost apertury závisí na velikosti zdroje světla a je důležitá pro optimalizaci poměru signál/šum.

Pokud je apertura příliš malá, část světla z objektu se nemusí zahrnout do měření, což povede ke špatné přesnosti. Naopak, pokud je apertura příliš velká, může do ní proniknout nadměrné množství pozadí, což opět zhorší kvalitu výsledků. Optimální velikost apertury je ta, která poskytuje nejlepší poměr signál/šum. Příklad vhodně zvolené apertury je vidět na obrázku 1.3. Důležité je i myslet na fakt, že se musí v apertuře vyskytovat pouze zkoumaný objekt. Proto není diferenciální fotometrie vhodná pro snímky s velkou hustotou výskytu hvězd. U takovýchto hvězdných polí by byl problém i s určením pozadí. To se určuje v praxi mezikruží se středem v apertuře.



Obrázek 1.3: Příklad nastavení fotometrické apertury (zelená kružnice) pro měření světla hvězdy, spolu s mezikružím (modrý prstenec) pro odhad pozadí (sky background) a červeným kruhem označujícím oblast odpovídající FWHM, tedy šířku hvězdy při polovičním maximálním signálu.

Fotometrické filtry

Pro získání světelných křivek v různých vlnových délkách se používají fotometrické filtry, které umožňují měření jasnosti objektu v určitém spektrálním pásmu. Měření v různých částech spektra umožňuje získat informaci o teplotě objektu a jeho spektrálních vlastnostech. Příkladem často používané soustavy filtrů může být Johnson-Cousins UBVRI (Cousins, 1976). V této práci se u pozemní fotometrie použila soustava Sloan Digital Sky Survey (SDSS, Fukugita et al., 1996).

1.2.4 Získávání světelných křivek

Světelná křivka je graf, který ukazuje závislost jasnosti, či hvězdné velikosti objektu na čase. Tato křivka se používá pro hodnocení povahy proměnlivosti objektů na obloze. Obvykle je vyjádřena v magnitudách, což je logaritmické měřítko jasnosti.

Pro určení hvězdné velikosti proměnné hvězdy v daném čase používáme následující vzorec:

$$\Delta m = -2,5\log\left(\frac{j_v}{j_c}\right),\tag{1.3}$$

kde Δm je změna hvězdné velikosti, j_v je jasnost sledované hvězdy a j_c je jasnost srovnávací hvězdy. Tento výpočet nám umožňuje zjistit relativní změny jasnosti sledovaného objektu ve srovnání s jinou, stabilní hvězdou (Mikulášek a Zejda, 2013).

Světelná křivka může mít různé tvary v závislosti na typu objektu, který pozorujeme. U pulzujících hvězd, jako jsou hvězdy typu δ Scuti, je světelná křivka pravidelná a periodická. U jiných typů objektů, jako jsou například novy nebo eruptivní hvězdy, může být naopak nepravidelná.

Pro analýzu světelných křivek, u kterých očekáváme krátkou periodu (jako například u světelných křivek δ Scuti), je klíčové mít vysoké časové rozlišení, což umožňuje detekci rychlých změn jasnosti. Tato schopnost je zásadní pro identifikaci periodických signálů, které jsou charakteristické pro pulzující hvězdy, a pro oddělení těchto signálů od potenciálních artefaktů nebo kontaminace jinými zdroji světla.

1.2.5 Fázová křivka

Fázová křivka představuje upravený způsob zobrazení periodických změn jasnosti hvězd. Místo zobrazení jasnosti v čase, jako u klasické světelné křivky, se zde časové údaje převedou do opakujících se cyklů.

Fáze ϕ udává relativní pozici pozorování v cyklu a vypočítává se podle vztahu:

$$\phi = \left(\frac{t - t_0}{P}\right) \mod 1,\tag{1.4}$$

kde t je čas pozorování, t_0 je referenční čas (například čas minima jasnosti), P je perioda a mod 1 značí operaci modulo 1.

Při správné volbě periody se jednotlivé cykly překryjí a vytvoří charakteristický průběh fázové křivky.

10 _

1.3 Družice TESS

Družice Transiting Exoplanet Survey Satellite (*TESS*, Ricker et al., 2015) je misí NASA, která byla vypuštěna 18. dubna 2018 s cílem hledat exoplanety pomocí metody tranzitů. *TESS* je vybavena kamerami, které umožňují monitorování obrovských oblastí oblohy, ovšem za cenu nízkého úhlového rozlišení. *TESS* byla použita i v článku Skarka et al. (2022), ze kterého pochází cílové objekty této práce. *TESS* používá technologii CCD a hojně se využívá k analýze i jiných jevů, než je detekce tranzitu exoplanet, díky kvalitě a velkému počtu měřených objektů (Ricker et al., 2015).

Rozlišení a zorné pole

Družice *TESS* má zorné pole o celkové velikosti 24 × 96 stupňů, které je rozděleno do čtyř polí o velikosti 24 × 24 stupňů (Obrázek 1.4 (a)). Základní doba pozorování pro určitou oblast na obloze (označovanou jako sektor) tohoto zorného pole je 27 dní. Po uplynutí této doby se měření přenese do dalšího sektoru, jak lze vidět na obrázku 1.4 (b). Z této strategie pozorování vychází fakt, že různé oblasti oblohy jsou proměřovány různou dobu, viz obrázek 1.4 (c) Celkový počet pixelů CCD je 4096 × 4096. Na jeden pixel tedy vychází úhel 0,35' jak ve vertikálním, tak i horizontálním směru. Toto nízké úhlové rozlišení je důsledkem prioritizace snímání velké oblasti oblohy (Ricker et al., 2015). Nevýhodou však může být fakt, že se na jednom pixelu může nacházet více objektů. Při zpracování dat se většinou používá více pixelů pro vyšší kvalitu dat ze stejného důvodu jako u aperturní diferenciální fotometrie popsané výše - lepšího poměru signálu a šumu, to však může zvýšit šanci na možnou kontaminaci signálu z jiných hvězd, než je cílová hvězda.



Obrázek 1.4: (a) Kombinovaný záběr kamer *TESS*. (b) Rozdělení nebeské sféry do 26 sektorů. (c) Doba pozorování na nebeské sféře s ohledem na překrytí mezi sektory. Obrázek byl převzat z článku Ricker et al. (2015).

Kadence a doba pozorování

TESS sleduje objekty s různými kadencemi, což je časový interval mezi jednotlivými měřeními. V primární misi byla kadence pro pozorování exoplanet a dalších jevů vyžadujících vysoké časové rozlišení dat 2 minuty. Tyto objekty byly předem vybrané pro toto častější měření (Ricker et al., 2015). Avšak pro celkovou oblast snímku byla kadence nižší (30minutové pozorování). V první rozšířené misi v letech 2020 až 2022 byla přidána 20sekundová kadence a pro celkovou oblast zvýšená kadence na 10 minut. V druhé rozšířené misi v letech 2022 až 2025 byla zvýšena kadence celkové oblasti snímku na 200 sekund (NASA, 2020). Dvouminutová kadence pozorování je dostačující pro studium proměnných hvězd, jako jsou hvězdy typu δ Scuti, jejichž světelná křivka vykazuje krátkodobé změny v rámci hodin. Při použití půlhodinové kadence by během jedné periody bylo pořízeno pouze pár snímků, což je k další analýze nedostačující.

Kapitola 2

Fotometrická data a jejich zpracování

2.1 Výběr kandidátů

Výběr kandidátů na hvězdy typu δ Scuti pochází z článku Skarka et al. (2022). Jedná se o hvězdy vykazující periodické změny jasnosti, typické pro δ Scuti, které se přesto nacházejí mimo pás nestability, jak lze vidět na obrázku 2.1. Pro tuto práci byl konkrétně vybrán vzorek 10 nejchladnějších hvězd se svítivostí do 10 L_{\odot} označených jako δ Scuti. Jejich výčet lze vidět v tabulce 2.1.



Obrázek 2.1: Vpravo od spodní hranice pásu nestability (červená línie) stanoveného v článku Murphy et al. (2019) se nachází několik hvězd (symbol hvězdičky) označených jako δ Scuti. Obrázek byl převzat z článku Skarka et al. (2022).

| | 1 | I | 1 | | 1 | 1 | 1 |
|-----------|-----------|-----------|---------|---------|-------------------|----------------|--------|
| TIC | RA (deg) | DEC (deg) | f (c/d) | V (mag) | $T_{\rm eff}$ (K) | $L(L_{\odot})$ | d (pc) |
| 353937916 | 272,26579 | 59,65678 | 8,605 | 10,803 | 6020 | 1,634 | 202 |
| 243277123 | 288,32454 | 58,56755 | 5,477 | 10,719 | 6084 | 1,632 | 192 |
| 229764421 | 281,64146 | 70,99396 | 7,018 | 10,872 | 6178 | 2,371 | 279 |
| 229795026 | 285,03315 | 66,06500 | 13,258 | 10,185 | 6265 | 2,559 | 201 |
| 236885887 | 303,34277 | 63,51587 | 6,289 | 10,438 | 6349 | 1,7616 | 179 |
| 237217852 | 295,20789 | 72,95440 | 17,787 | 9,593 | 6350 | 8,792 | 259 |
| 420128765 | 290,47244 | 75,89193 | 11,483 | 10,882 | 6365 | 3,814 | 304 |
| 366581060 | 305,24712 | 73,68422 | 14,585 | 10,15 | 6612 | 2,716 | 147 |
| 243280731 | 288,42863 | 56,16600 | 11,361 | 10,278 | 6678 | 4,575 | 256 |
| 259132389 | 291,99172 | 71,08894 | 8,146 | 9,880 | 6678 | 5,412 | 240 |

Tabulka 2.1: Tato tabulka zobrazuje údaje o deseti TIC objektech vybraných pro tuto práci.

2.2 Získání a analýza dat z TESS

Pro získání a analýzu fotometrických dat z družice *TESS* jsem použil knihovnu LIGHTKURVE (Lightkurve Collaboration et al., 2018), což je Python balík vyvinutý pro snadnou práci s daty z *TESS* a jiných astronomických misí. Zároveň poskytuje uživatelsky přívětivý způsob, jak stáhnout a zpracovat data, analyzovat světelné křivky a vizualizovat výsledky.

Prvním krokem bylo nalezení objektu pomocí TIC identifikátoru společně s funkcí lightkurve.search_target_by_name() a stažení dat pro světelné křivky z veřejně dostupného datového archivu Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST, 2024) z družice *TESS*. V rámci analýzy jsem se zaměřil na konkrétní typ dat – Pre-search Data Conditioning Simple Aperture Photometry (PDCSAP, Stumpe et al., 2012). Tento typ dat je jedním z několika dostupných datových produktů z *TESS* a je zpracován tak, aby eliminoval základní šumy a systematické chyby způsobené například chvěním nebo změnami v detektorových podmínkách. Výběr správného typu dat je důležitý pro následnou analýzu.

Po stažení a výběru vhodného typu světelných křivek jsem využil knihovnu LIGHTKURVE ke zpracování a vizualizaci dat. Pro vykreslení světelné křivky jsem si vytvořil vlastní rutinu, která mi umožnila přesněji upravit vzhled grafu – například nastavit rozměry obrázku, přidat popisky os či nadpis. Tato vizualizace slouží k důkladné kontrole změn jasu objektu v čase a umožňuje snadno odhalit případné anomálie v datech. Výsledný graf je zobrazen na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Světelná křivka TIC 237217852 zobrazující průběh relativní jasnosti. Stejným způsobem se stáhla všechna data a vizuálně zkontrolovala. Za povšimnutí stojí i malé rozpětí relativní jasnosti typické pro δ Scuti v obrázku fázově složené křivky. Ta byla vytvořena po frekvenční analýze popsané v 2.2.1. Pro každý z objektů se může lišit i počet naměřených dat, podle jeho umístění na obloze (popsáno výše na obrázku 1.4).

2.2.1 Frekvenční analýza – Periodogram

Dalším krokem byla frekvenční analýza světelných křivek, která sloužila k detekci periodických signálů. Pro tuto úlohu jsem využil knihovnu LIGHTKURVE, která umožňuje efektivní a rychlý výpočet periodogramu pomocí Lomb–Scargleovy metody (Scargle, 1982). Příklad výsledného periodogramu lze vidět na obrázku 2.3. Tato metoda je vhodná zejména pro astronomická data, která jsou často nepravidelně vzorkovaná, a umožňuje spolehlivou identifikaci dominantních frekvencí v signálu.



Obrázek 2.3: Příklad výsledných periodogramů. Na vertikální ose je vyznačena bezrozměrná veličina power značící relevanci dané frekvence. Horizontální osa označuje frekvenci v cyklech za den.

Všechny výsledné periodogramy vykazují výrazné píky v oblasti přibližně 5 až 20 cyklů za den. Takový frekvenční rozsah je typický pro hvězdy typu δ Scuti, které pulzují na časových škálách několika desítek minut až několika hodin. Přítomnost více maxim zároveň naznačuje, že se jedná o vícenásobné oscilace v různých módech, což je další charakteristický znak hvězd δ Scuti. Výsledné nejrelevantnější frekvence pro každý cílový objekt jsou v tabulce 2.2

| TIC ID | <i>f</i> (c/d) |
|-----------|----------------|
| 353937916 | 8,61 |
| 243277123 | 5,48 |
| 229764421 | 7,02 |
| 229795026 | 12,58 ; 13,26 |
| 236885887 | 6,29 ; 10,72 |
| 237217852 | 17,79 ; 18,12 |
| 420128765 | 11,48 |
| 366581060 | 14,59 |
| 243280731 | 11,36 |
| 259132389 | 8,15 |

Tabulka 2.2: Tabulka nejvýznamnějších frekvencí pro vybrané kandidáty.

2.2.2 Analýza pixelových dat – TPF PLOTTER

TPF PLOTTER (target pixel file) (Aller et al., 2020) je dalším nástrojem pro vizualizaci dat z družice *TESS*, konkrétně i jednotlivých pixelů. Po stažení dat je schopen TPF PLOTTER vykreslit pixelovou mapu v okolí zkoumaného objektu. U každého pixelu se vykreslí intenzita přicházejícího signálu pomocí barevné škály. Dále se zobrazí maska apertury - tedy všechny pixely, které se automaticky berou jako zdroj signálu v zájmu lepší kvality dat (v obrázku 2.4 vyznačené červenými čtverečky). Je tedy časté, že se nachází v těchto pixelech určitý zdroj kontaminace blízkou hvězdou. Výhodou nástroje TPF PLOTTER je i to, že umožňuje vykreslit do pixelů pozice hvězd z družice *Gaia* (Gaia Collaboration et al., 2023). Můžeme tedy vizuálně zkontrolovat, jestli se nějaká hvězda nachází v oblasti masky nebo v její bezprostřední blízkosti.

Jak lze vidět na obrázku 2.4, hvězda s označením "2" je už na okraji, avšak její světelný signál zasahuje do nejbližších pixelů. Tudíž je potřeba brát v úvahu i hvězdy, které nejsou TPF PLOTTER vyznačeny ve vybrané apertuře a jsou v její blízkosti. TPF PLOTTER je schopen sepisovat údaje o daných hvězdách (informace o všech hvězdách na obrázcích čerpá TPF PLOTTER z *Gaia* DR3), přičemž jeden z údajů je výskyt v apertuře (tabulka 2.3). Orientačně je tedy tento údaj užitečný, ale pro podrobnější analýzu je potřeba kontrola každého výstupu.



TIC 237217852 - Sector 24

Obrázek 2.4: Příklad výstupu TPF PLOTTER pro objekt TIC 237217852. Zbarvení pixelů značí velikost signálu. Tmavě modrá odpovídá nulovému toku. Světle žlutá odpovídá toku $3-7 \cdot 10^3$ e/s v závislosti na objektu. Červené čtverečky značí velikost apertury, ze které se automaticky bere signál pro další zpracování. Červené body značí pozici hvězd v okolí. Tyto hvězdy jsou číselně seřazeny dle vzdálenosti od cílového objektu.

Tabulka 2.3: Příklad výstupní tabulky z TPF PLOTTER. Vzdálenost je zde myšlena od cílového objektu. Vzdálenost hvězdy "1" (cílového objektu) je tedy vždy nula. Poslední sloupec nabývá dvou hodnot: 1 pro umístění v apertuře a 0 pro umístění mimo aperturu.

| Označení hvězdy | Gaia ID | Vzdálenost (pix) | Vzdálenost (arcsec) | Gmag | V apertuře |
|-----------------|---------------------|------------------|---------------------|--------|------------|
| 1 | 2264076243263097728 | 0,00 | 0,00 | 9,507 | 1 |
| 2 | 2264076238966939392 | 1,07 | 22,51 | 12,025 | 0 |
| 3 | 2264123174369549440 | 2,26 | 47,53 | 11,760 | 0 |
| 4 | 2264076174543623552 | 3,14 | 65,94 | 13,147 | 0 |
| 5 | 2264123144305966464 | 3,55 | 74,47 | 13,384 | 0 |
| 6 | 2264076140183883904 | 3,74 | 78,63 | 14,132 | 0 |
| 7 | 2264076689939700352 | 5,42 | 113,90 | 14,479 | 0 |
| 8 | 2264075968385195904 | 6,11 | 128,36 | 14,100 | 0 |

2.2.3 Periodogramy v jednotlivých pixelech – TESS INTERACT

TESS INTERACT je nástroj pro vizualizaci a analýzu pixelových dat z družice *TESS* (Fleming, 2019). Umožňuje interaktivně zkoumat frekvenční spektra pro každý pixel v oblasti, což pomáhá identifikovat a analyzovat potenciální blendy a nejednoznačnosti ve světelných křivkách.



Obrázek 2.5: Příklad periodogramu pro jednotlivé pixely objektu TIC 237217852. Na horizontální ose je frekvence společně i s x souřadnicí pixelu. Na vertikální ose je veličina power společně s y souřadnicí pixelu. Barva pixelů značí tok a červené okraje pixelů značí aperturu podobně jako u TPF PLOTTER 2.4.

Rozdíl oproti předchozím periodogramům je tedy jasný. Zatímco na obrázku 2.3 můžeme vidět frekvenční spektrum z celé apertury (vyznačené červeným zvýrazněním

pixelů na obrázku 2.4), na výstupech z TESS INTERACT uvidíme, na kterých pixelech jsou podobné signifikantní frekvence. To umožní přesněji lokalizovat zdroj detekované proměnnosti a zda proměnnost přísluší našim cílovým objektům.

Pomocí TESS INTERACT jsem generoval frekvenční spektra pro každý pixel v oblasti kolem vybraného objektu (obrázek 2.5). Důležité je podotknout, že frekvenční analýza probíhá stejnou metodou, jako u periodogramů z celé apertury v 2.2.1, a rozsah os je také stejný. Pixelová mapa je zrcadlově otočená vůči výstupům z TPF PLOTTER. Apertura je zde ale stejná, a tak můžeme porovnat výstupy obou nástrojů.



Obrázek 2.6: Porovnání výstupu TPF PLOTTER (vlevo) a TESS INTERACT (vpravo) u objektu TIC 237217852. (Obrázek vlevo původně z TPF PLOTTER byl zrcadlově otočen pro lepší srovnání. U jiných objektů tato úprava nebyla provedena).

Na obrázku 2.6 lze vidět, že signifikantní frekvence náleží oblasti kolem hvězdy s označením "2". Naopak směrem k cílovému objektu se síla těchto frekvencí výrazně snižuje. Lze tedy tvrdit, že hvězda s označením "2" s velkou pravděpodobností kontaminuje světelný signál z cílového objektu. Pokud bychom ale brali v úvahu jen jediný pixel, na kterém by se cílový objekt vyskytoval, pořád by část kontaminace z vedlejší hvězdy procházela tímto pixelem. Z toho lze vyvodit, že i při nejpřísnějším zvolení apertury (jeden pixel) není možné z podstaty věci zcela eliminovat vliv kontaminace.

2.2.4 Lokalizace původu signálu – TESS LOCALIZE

TESS LOCALIZE je specializovaný nástroj vyvinutý pro lokalizaci zdroje periodického signálu ve fotometrických datech z družice *TESS* (Higgins & Bell, 2023). Jeho hlavním cílem je určit, z kterého objektu na snímku signál pravděpodobně pochází, a identifikovat možnou kontaminaci způsobenou přítomností blízkých hvězd v zorném poli. Při správném použití tak může výrazně zefektivnit následnou analýzu dat a omezit potřebu manuálního porovnávání výstupů z jiných metod či vizuálních kontrol. TESS LOCALIZE pracuje tak,
že potřebuje zadat jednu či více signifikantních frekvencí, které poté hledá v křivkách pocházejících z jednotlivých pixelů snímku. Dále se snaží najít nejlepší zdroj této frekvence. Příklad výstupu z něj lze vidět na obrázku 2.7. Označení černým křížkem (způsob označení zdroje proměnnosti) a poloha podezřelé hvězdy buď splývají, nebo jsou v dostatečné blízkosti na to, aby se dala správně identifikovat jako proměnná hvězda.



Obrázek 2.7: Příklad výstupu z nástroje TESS LOCALIZE pro objekt TIC 237217852. Barevná škála označuje míru relativní dominance hledané frekvence. Bílé kotouče označují pozice hvězd. Černý křížek označuje centrum proměnnosti a červený kotouč označuje hvězdu, ke které danou proměnnost TESS LOCALIZE přiřazuje. Oranžový kotouč označuje původní cílový objekt. Červená a oranžová barva kotoučků byla přidána do původního výstupu pro lepší přehlednost.

Podrobnější analýza pouze z dat družice *TESS* již nelze provést. I s těmito nástroji není identifikace naprosto jistá. Pro definitivní potvrzení kontaminace blízkou hvězdou a falešné klasifikace cílových objektů jako δ Scuti je potřeba použít pozemní fotometrii s vyšším úhlovým rozlišením.

2.3 Pozemní fotometrie

Pozemní fotometrie je v této práci nezbytnou součástí ověření výsledků získaných z družice *TESS*, přičemž slouží k nezávislé kontrole světelných křivek a analýze variability hvězd. Ačkoli družice *TESS* poskytuje vysoce kvalitní data pro širokou škálu objektů, pozemní měření umožňuje podrobnější analýzu v problematice kontaminací díky vyššímu úhlovému

rozlišení. Cílem tohoto měření je tedy potvrdit či vyvrátit proměnnost našich kandidátů a porovnat výsledky s analýzou dat z *TESS*.

2.3.1 Metodika pozemní fotometrie

V rámci této práce byla pozemní fotometrie provedena pomocí dvou dalekohledů. Ve Ždánicích s průměrem zrcadla 80 cm (Masarykova univerzita, 2023) a v Ondřejově za pomocí 30 cm dalekohledu (Štrobl et al., 2019). Fotometrii jsem prováděl pouze ve filtru *g*, který zajišťuje pro daný spektrální typ a CCD kameru dostatečný tok k měření změn nízkých amplitud. Objekty pro měření jsem vybíral dle amplitudy změn jasnosti, pozorovatelnosti v daném období a jejich deklinace, která ovlivňuje množství vzdušné hmoty, kterou světlo musí urazit, a tedy i kvalitu měření. Informace k měření jednotlivých objektů jsou v tabulce 2.4.

Tabulka 2.4: Přehled pozemního pozorování pro jednotlivé objekty TIC, ze kterých se v průběhu zpracování neztrácela proměnnost v rozptylu dat. U objektu TIC 237217852 je nečekaně méně expozic u měření s kratší expozicí (Ondřejov) z důvodu měření i v jiných filtrech, než g.

| TIC | Observatoř | Datum | t [s] | Počet expozic |
|-----------|------------------|---------------|-------|---------------|
| 229795026 | Ondřejov | 16. 10. 2024 | 20 | 438 |
| 236885887 | Ždánice | 15. 10. 2024 | 30 | 238 |
| 237217852 | Ždánice/Ondřejov | 7/8. 11. 2024 | 70/30 | 249/167 |
| 243280731 | Ždánice | 1. 12. 2024 | 50 | 112 |

2.3.2 Oprava dat a diferenciální fotometrie

Po získání surových snímků jsem nejprve provedl jejich kalibraci pomocí metod popsaných v sekci 1.2.2, konkrétně pomocí masterdark a masterflat snímků. Následně jsem přistoupil k diferenciální fotometrii, kterou jsem realizoval v programu MUNIWIN (Motl & Hroch, 2011). Program po detekci hvězd na snímku nabízí volbu několika možností pro označení objektů. Zkoumaný objekt jsem zvolil jako proměnný (variable), tedy V. Poté jsem označil vhodnou srovnávací hvězdu jako C (check) podle kritérií zmíněných v části 1.2.3. Potenciální proměnnou hvězdu, kterou určil TESS LOCALIZE, jsem označil jako K1. Jako K2 a K3 jsem označil kontrolní hvězdy, které slouží k ověření volby srovnávací hvězdy a výsledků samotné fotometrie. Přehled vybraných hvězd pro každý z objektů je sepsán v tabulce 2.5.

Tabulka 2.5: Přehled cílových objektů (tj. hvězd s předpokládanou nebo domnělou proměnností, jejíž existenci chceme ověřit), srovnávacích hvězd a kalibračních hvězd včetně souřadnic, jasnosti ve filtru V a barevného indexu (rozdíl jasnotí ve filtru B a V). U hvězd bez označení TIC jsou údaje brány z *Gaia* DR3 (jasnost v oblasti *G*, barva jako BP–RP).

| | id | ra [°] | dec [°] | jasnost [mag] | barevný index |
|----|---------------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| V | TIC 229795026 | 285,0331575 | 66,06500723 | 10,185 | 0,382 |
| C | TIC 229800729 | 285,3131642 | 66,13071126 | 10,175 | 0,955 |
| K1 | TIC 229795027 | 285,040844 | 66,06928154 | 13,15 | -0,195 |
| K2 | TIC 229795087 | 284,9795021 | 66,16872688 | 12,026 | 0,836 |
| K3 | TIC 229795007 | 285,0602098 | 66,03581784 | 12,163 | 0,631 |
| | | | | | |
| | id | ra [°] | dec [°] | jasnost [mag] | barevný index |
| V | TIC 236885887 | 303,3427765 | 63,51587126 | 10,438 | 0,5 |
| C | TIC 236885894 | 303,2055433 | 63,52451096 | 11,321 | 1,311 |
| K1 | TIC 236885884 | 303,3400303 | 63,5120722 | 12,268 | 0,271 |
| K2 | 2244156253666111360 | 303,1507602 | 63,50837898 | 12,2609 | 1,6553 |
| K3 | TIC 236890282 | 303,4306886 | 63,57917886 | 11,6 | 0,479 |
| | | | | | |
| | id | ra [°] | dec [°] | jasnost [mag] | barevný index |
| V | TIC 237217852 | 295,207894 | 72,95440298 | 9,593 | 0,541 |
| C | TIC 237217769 | 295,1045848 | 73,09450434 | 10,673 | 0,689 |
| K1 | TIC 237217857 | 295,2103756 | 72,94821028 | 12,15 | -0,307 |
| K2 | TIC 237217848 | 295,1656468 | 72,95889164 | 12,243 | 0,755 |
| K3 | 2264123144305966464 | 295,1405254 | 72,96062043 | 13,3838 | 0,8211 |
| | | | | | |
| | id | ra [°] | dec [°] | jasnost [mag] | barevný index |
| V | TIC 243280731 | 288,4286378 | 56,1660083 | 10,278 | 0,244 |
| C | TIC 243284712 | 288,6670768 | 56,24299348 | 9,842 | 0,338 |
| K1 | TIC 243280722 | 288,4244729 | 56,17388172 | 11,287 | 0,537 |
| K2 | 2141152526906659968 | 288,4330084 | 56,17113811 | 12,5542 | 0,6086 |
| K3 | TIC 243280712 | 288,4370579 | 56,18446053 | 11,845 | 0,942 |

Po volbě těchto hvězd je důležité zvolit správnou velikost apertury. MUNIWIN nabízí volbu apertury dle kvality výsledné křivky (rozptylu dat u jednotlivých apertur). Zvolil jsem tedy u jednotlivých objektů aperturu, u které byl tento rozptyl nejmenší. Následně jsem data exportoval do textového dokumentu a vizualizoval jsem výsledky měření pomocí Python kódu, který generoval jednotlivé grafy (např. obrázek 3.5).

Kapitola 3

Analýza a výsledky

3.1 TIC 237217852

Analýza objektu TIC 237217852 probíhala v několika na sebe navazujících krocích (popsaných v kapitolách 2.2.2 až 2.2.4), které měly za cíl určit původ detekované proměnnosti v datech z družice *TESS*.

Vycházelo se z provedené periodové analýzy (obrázek 2.3), která odhalila signifikantní frekvence proměnnosti odpovídající hvězdám typu δ Scuti (frekvence pulzací nad 3,3 c/d). Periodová analýza zároveň poskytla vodítko k vhodným časovým rozsahům pro pozemní pozorování, zatímco fázová křivka zhotovená po určení hlavní periody (např. obrázek 2.2) umožnila odhadnout amplitudu změn, kterou bychom měli očekávat. Tato informace však sama o sobě neumožňuje určit, z kterého objektu v apertuře (popřípadě zorném poli) proměnnost pochází.

Proto byla provedena vizuální kontrola pomocí nástroje TPF PLOTTER. Tato vizualizace ukázala, že se v těsné blízkosti cílového objektu nachází několik dalších hvězd, z nichž nejbližší je hvězda TIC 237217857 označená v obrázku 3.1 jako "2". Ta se nachází přímo na hranici apertury pro sběr signálu, a tím pádem může být kontaminantem. Výpis hvězd z obrázku 3.1 lze vidět v tabulce 3.1.



Obrázek 3.1: Výstup TPF PLOTTER pro TIC 237217852. Barvy a symboly mají stejný význam jako u obrázku 2.4.

| Tabulka 3.1: Výstupní tabulka z TPF PLOTTER pro hvězdu TIC 237217852. |
|---|
| |

| Označení hvězdy | Gaia ID | Vzdálenost (pix) | Vzdálenost (arcsec) | Gmag | V apertuře |
|-----------------|---------------------|------------------|---------------------|--------|------------|
| 1 | 2264076243263097728 | 0,00 | 0,00 | 9,507 | 1 |
| 2 | 2264076238966939392 | 1,07 | 22,51 | 12,025 | 0 |
| 3 | 2264123174369549440 | 2,26 | 47,53 | 11,760 | 0 |
| 4 | 2264076174543623552 | 3,14 | 65,94 | 13,147 | 0 |
| 5 | 2264123144305966464 | 3,55 | 74,47 | 13,384 | 0 |
| 6 | 2264076140183883904 | 3,74 | 78,63 | 14,132 | 0 |
| 7 | 2264076689939700352 | 5,42 | 113,90 | 14,479 | 0 |
| 8 | 2264075968385195904 | 6,11 | 128,36 | 14,100 | 0 |

Aby bylo možné lépe porozumět rozložení signálu, byl následně použit nástroj TESS INTERACT. Analýza jednotlivých pixelů ukázala, že periodicita není soustředěna v oblasti odpovídající cílové hvězdě (obrázek 3.2, souřadnice (236,1497)), jak by tomu bylo, pokud by skutečnou proměnnou hvězdou byl cílový objekt. Výraznější frekvence byly identifikovány v pixelech ležících na pozici hvězdy TIC 237217857 označené v obrázku 3.1 jako "2" (souřadnice (234,1498)).



Target ID: 237217852, 1955.79 - 1982.28 [BTJD days]

Obrázek 3.2: Výstup z TESS INTERACT pro TIC 237217852. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.5.

Dále jsem použil TESS LOCALIZE, který na základě nejvýraznější frekvence (z tabulky 2.2) určil, že zdrojem detekované proměnnosti je s nejvyšší pravděpodobností hvězda TIC 237217857. Na obrázku 3.3 lze vidět předpokládané umístění zdroje proměnnosti označené černým křížkem. Jak lze vidět, toto centrum proměnnosti je velmi blízko červeně zvýrazněné hvězdě, kterou určil TESS LOCALIZE s nejvyšší pravděpodobností jako původce této frekvence. To tedy dále potvrzuje předchozí myšlenku a zároveň nabízí potenciální možnost, jak efektivně zjistit zdroj kontaminace bez nutnosti předchozích kroků, které mohou být časově i výpočetně náročnější. Zdrojem proměnnosti je tedy TIC 237217857 s teplotou 7 666 K a ne předpokládaná hvězda TIC 237217852 s teplotou 6 350 K.



Obrázek 3.3: Výstup z TESS LOCALIZE pro TIC 237217852. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.7.

Závěrečným krokem byla analýza pomocí pozemní diferenciální fotometrie, která sloužila jako nezávislé ověření výsledků z družice *TESS*. Na obrázku 3.4 lze vidět zvolení jednotlivých hvězd k diferenciální fotometrii společně s měřítkem a orientací snímku. Světelné křivky jsou vidět na obrázku 3.5. Tento objekt byl naměřen jak ve Ždánicích, tak i v Ondřejově. První, čeho si lze všimnout, je lepší kvalita měření ze Ždánického dalekohledu. To může být způsobeno větším úhlovým rozlišením i pozorovacími podmínkami v daný moment měření. Vyšší kadence dat u tohoto měření může lépe vystihnout vývoj jasnosti. U světelné křivky ze Ždánic lze ke konci vidět větší rozptyl dat, pravděpodobně způsobený zhoršením pozorovacích podmínek.



Obrázek 3.4: Okolí hvězdy TIC 237217852. Výpis označených objektů je v tabulce 2.5.

U obou měření lze zřetelně vidět rozdíl v průběhu jasnosti mezi cílovým objektem TIC 237217852 (označeným jako V) a jeho možným kontaminantem určeným z analýzy družicových dat TIC 237217857 (označeným jako K1). Zatímco v levé části obrázku 3.5 zobrazující cílový objekt V nelze vidět periodickou proměnnost, v pravé části zobrazující potenciální kontaminant K1 je vidět proměnnost zřetelně. Na obrázku 3.6 zobrazujícím výřez světelné křivky (pro objekt V) z *TESS* můžeme pro lepší srovnání pozorovat stejný průběh změn jasnosti, jako u objektu K1. Světelná křivka z pozemní fotometrie (K1-C) by tedy měla mít stejný průběh jako křivka z *TESS* pro objekt V, jak lze vidět na obrázku 3.7. Vzhledem k omezenému počtu datových bodů není periodická analýza pro pozemní fotometrii vhodná. Pro porovnání jsem ale vytvořil periodogram, který čerpal data ze světelné křivky K1-C (obrázek 3.8). Na něm lze vidět, že se hlavní frekvence proměnnosti blíží frekvenci identifikované v tabulce 2.2 pro cílový objekt. Samotný rozsah změn jasnosti je také typický pro hvězdy typu δ Scuti. V případě objektu TIC 237217852 se tedy pomocí pozemní fotometrie vyvrátila proměnnost a hvězda nepatří do skupiny δ Scuti. Do té patří s vysokou pravděpodobností hvězda TIC 237217857.



Obrázek 3.5: Světelné křivky pro objekt TIC 237217852 (V) a potenciální kontaminant TIC 237217857 (K1) vybraného nástrojem TESS LOCALIZE.



Obrázek 3.6: Výřez ze světelné křivky pro objekt TIC 237217852.



Obrázek 3.7: Srovnání světelných křivek z pozemské fotometrie (TIC 237217857 - žlutá) a *TESS* (TIC 237217852 - červená). Data z pozemní fotometrie byla převedena na toky a horizontálně posunuta, aby odpovídala datům z *TESS*



Obrázek 3.8: Periodogram ze světelné křivky K1-C z obrázku 3.5 a).

3.2 TIC 229795026

Analýza objektu TIC 229795026 probíhala v několika na sebe navazujících krocích obdobně jako u objektu TIC 237217852. Stejně tak se vycházelo z provedené periodové analýzy (obrázek 2.3), která odhalila signifikantní frekvence proměnnosti.

Vizualizace z TPF PLOTTER ukázala, že se v těsné blízkosti cílového objektu nachází několik dalších hvězd, z nichž nejbližší je hvězda TIC 229795027 označená v obrázku jako "2" (obrázek 3.9). Ta se také nachází v apertuře pro sběr signálu, a tím pádem může být kontaminantem. Výpis hvězd z obrázku 3.9 lze vidět v tabulce 3.2.



TIC 229795026 - Sector 20

Obrázek 3.9: Výstup TPF PLOTTER pro TIC 229795026. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.4.

Tabulka 3.2: Výstupní tabulka z TPF PLOTTER pro hvězdu TIC 229795026.

| Označení hvězdy | Gaia ID | Vzdálenost (pix) | Vzdálenost (arcsec) | Gmag | V apertuře |
|-----------------|---------------------|------------------|---------------------|--------|------------|
| 1 | 2255295337247760640 | 0,00 | 0,00 | 10,006 | 1 |
| 2 | 2255295337247192448 | 0,91 | 19,04 | 12,999 | 1 |
| 3 | 2255294546973778560 | 3,88 | 81,48 | 14,695 | 0 |
| 4 | 2255294443893974016 | 5,36 | 112,58 | 12,484 | 0 |

Analýzou jednotlivých pixelů pomocí nástroje TESS INTERACT se ukázalo, že periodicita není soustředěna v oblasti odpovídající cílové hvězdě (souřadnice (989,1866)), jak by tomu bylo, pokud by skutečnou proměnnou hvězdou byl cílový objekt. Výraznější jsou frekvence zjištěné z periodové analýzy v pixelech ležících na pozici hvězdy TIC 229795027 označené na obrázku 3.9 jako "2" (souřadnice (990,1867)). Tento výsledek se tedy přiklání k variantě kontaminace hvězdou TIC 229795027.



Obrázek 3.10: Výstup z TESS INTERACT pro TIC 229795026. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.5.

Na základě nejvýraznější frekvence (z tabulky 2.2) určil TESS LOCALIZE, že zdrojem detekované proměnnosti je hvězda TIC 229795027. Na obrázku 3.11 lze vidět předpokládané umístění zdroje proměnnosti označené černým křížkem. Toto centrum proměnnosti je velmi blízko červeně zvýrazněné hvězdě, kterou určil TESS LOCALIZE s nejvyšší pravděpodobností jako původce této frekvence.



Obrázek 3.11: Výstup z TESS LOCALIZE pro TIC 229795027. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.7.

Závěrečným krokem byla analýza pomocí pozemní diferenciální fotometrie. Na obrázku 3.12 lze vidět zvolení jednotlivých hvězd k diferenciální fotometrii společně s měřítkem a orientací snímku. Světelné křivky jsou vidět na obrázku 3.13. Tento objekt byl naměřen v Ondřejově. U měření lze zřetelně vidět rozdíl v průběhu jasnosti mezi cílovým objektem TIC 229795026 (označeným jako V) a jeho možným kontaminantem určeným z analýzy družicových dat TIC 229795027 (označeným jako K1). Zatímco v levé části zobrazující cílový objekt V nelze vidět periodickou proměnnost, v pravé části zobrazující potenciální kontaminant K1 je vidět proměnnost zřetelně. Na obrázku 3.14 zobrazujícím srovnání světelné křivky (pro objekt V) z *TESS* a světelné křivky K1-C z pozemské fotometrie můžeme vidět, že i přes vyšší rozptyl dat lze stále vidět shodu obou křivek. Při pohledu na obrázek A.16 lze u fázové křivky pozorovat jemnou proměnnost, která souhlasí s detekovanou proměnností na obrázku 3.13.

Stejně jako u objektu TIC 237217852 jsem zhotovil periodogram pro křivku K1-C (obrázek 3.15). I na něm můžeme vidět hlavní frekvenci, která se blíží příslušné frekvenci z tabulky 2.2. Samotný rozsah změn jasnosti je také typický pro hvězdy typu δ Scuti. V případě objektu 229795026 se tedy pomocí pozemní fotometrie vyvrátila proměnnost a hvězda nepatří do skupiny δ Scuti. Do té patří s vysokou pravděpodobností hvězda TIC 229795027.



Obrázek 3.12: Okolí hvězdy TIC 229798026. Výpis označených objektů je v tabulce 2.5.



Obrázek 3.13: Světelné křivky pro objekt TIC 229795026 (označeného jako V) a potenciálního kontaminanta TIC 229795027 (K1) vybraného nástrojem TESS LOCALIZE. Měření bylo provedeno na dalekohledu v Ondřejově.



Obrázek 3.14: Srovnání světelných křivek z pozemské fotometrie (TIC 229795026 žlutá) a *TESS* (TIC 229795027 - červená). Data byla srovnána stejným způsobem jako u obrázku 3.7.



Obrázek 3.15: Periodogram ze světelné křivky K1-C z obrázku 3.13.

3.3 TIC 236885887

U objektu TIC 236885887 byly provedeny stejné kroky jako u objektu TIC 237217852. Vycházelo se z provedené periodové analýzy (obrázek 2.3), která odhalila signifikantní frekvence proměnnosti odpovídající hvězdám typu δ Scuti. Proto byla provedena vizuální kontrola pomocí nástroje TPF PLOTTER. Tato vizualizace ukázala, že se v těsné blízkosti cílového objektu nachází několik dalších hvězd, z nichž nejbližší je hvězda TIC 236885884 označená v obrázku jako "2" (obrázek 3.16). Ta se také nachází v apertuře pro sběr signálu, dokonce i v sousedním pixelu, a tím pádem může být kontaminantem. Výpis hvězd z obrázku 3.16 lze vidět v tabulce 3.3.



TIC 236885887 - Sector 18

Obrázek 3.16: Výstup TPF PLOTTER pro TIC 236885887. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.4.

| 10001Ku 5.5. V y 5tu p m tu bu Ku 2 111 1 Do 11 LK pro m C200 110 250005007 |
|---|
|---|

| Označení hvězdy | Gaia ID | Vzdálenost (pix) | Vzdálenost (arcsec) | Gmag | V apertuře |
|-----------------|---------------------|------------------|---------------------|--------|------------|
| 1 | 2244146151903996032 | 0,00 | 0,00 | 10,374 | 1 |
| 2 | 2244146117543355904 | 0,66 | 13,89 | 12,127 | 1 |
| 3 | 2244144708794082176 | 3,99 | 83,76 | 14,077 | 0 |
| 4 | 2244145327269375360 | 5,17 | 108,56 | 14,968 | 0 |
| 5 | 2244146392421261184 | 5,84 | 122,62 | 15,312 | 0 |

Analýza jednotlivých pixelů z nástroje TESS INTERACT ukázala, že periodicita se soustředí na mnohem menší oblasti, díky samotné blízkosti daných hvězd. Lze ale vidět, že se periodicita v pravé části kolem cílové hvězdy (souřadnice (263,443)) mnohem dříve ztrácí než ve směru hvězdy TIC 236885884 (souřadnice (263,444)). Nejvýraznější jsou frekvence u hvězdy TIC 236885884 označené na obrázku 3.16 jako "2" a v jejím okolí na levé straně. To je způsobeno tím, že se vlevo nenachází v blízkosti další hvězda, která by přispívala svou jasností do daných pixelů. Tento výsledek se tedy přiklání k variantě kontaminace hvězdou TIC 236885884.



Obrázek 3.17: Výstup z TESS INTERACT pro TIC 236885887. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.5.

Na základě nejvýraznější frekvence (z tabulky 2.2) určil TESS LOCALIZE, že zdrojem detekované proměnnosti je hvězda TIC 236885884. Na obrázku 3.18 je předpokládané umístění zdroje proměnnosti označené černým křížkem. Jak lze vidět, toto centrum proměnnosti je velmi blízko červeně zvýrazněné hvězdě, kterou určil TESS LOCALIZE s nejvyšší pravděpodobností jako původce této frekvence.



Obrázek 3.18: Výstup z TESS LOCALIZE pro TIC 236885887. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.7.

Závěrečným krokem byla analýza pomocí pozemní diferenciální fotometrie, která sloužila jako nezávislé ověření výsledků z družice *TESS*. Na obrázku 3.19 lze vidět zvolení jednotlivých hvězd k diferenciální fotometrii společně s měřítkem a orientací snímku. Světelné křivky jsou vidět na obrázku 3.20. Tento objekt byl naměřen ve Ždánicích.

Na obrázku 3.20 se ukazuje odlišné chování mezi cílovým objektem TIC 236885887 (označeným jako V) a jeho možným kontaminantem určeným z analýzy družicových dat TIC 236885884 (označeným jako K1). U objektu V není patrná žádná pravidelná proměnnost, zatímco hvězda K1 prokazatelně mění svou jasnost v čase. Tato proměnnost patřící právě hvězdě K1 odpovídá proměnnosti z družice *TESS*, jak lze vidět na obrázku 3.21 . Srovnání světelné křivky z *TESS* pro objekt V a světelné křivky K1-C z pozemského pozorování je zobrazeno na obrázku 3.22.

V tomto případě jsem nezhotovil periodogram z pozemního měření z důvodu krátké doby měření pro zachycení celé fáze proměnnosti. Pokud bychom ale vzali v úvahu časový rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou jasnosti z grafu 3.20 a ten brali jako polovinu periody (zhruba 1,7 hodiny), tak bychom dostali hodnotu blízkou frekvenci z tabulky 2.2. To je však hrubý odhad jen pro lepší představu a srovnání proměnnosti. Výkyvy jasnosti také odpovídají typickému rozsahu pro δ Scuti proměnné hvězdy. V případě objektu TIC 236885887 se tedy pomocí pozemní fotometrie vyvrátila proměnnost a hvězda nepatří

do skupiny δ Scuti. Do té patří s vysokou pravděpodobností hvězda TIC 236885884.



Obrázek 3.19: Okolí hvězdy TIC 236885887. Výpis označených objektů je v tabulce 2.5.



Obrázek 3.20: Světelné křivky pro objekt TIC 236885887 (označeného jako V) a potenciálního kontaminanta TIC 236885884 (K1) vybraného nástrojem TESS LOCALIZE. Měření bylo provedeno na dalekohledu ve Ždánicích.



Obrázek 3.21: Výřez ze světelné křivky pro objekt TIC 236885887.



Obrázek 3.22: Srovnání světelných křivek z pozemské fotometrie (TIC 236885887 - žlutá) a *TESS* (TIC 236885884 - červená). Data byla srovnána stejným způsobem jako u obrázku 3.7.

3.4 TIC 243280731

Objekt TIC 243280731 byl analyzován stejně jako TIC 237217852. Vycházelo se z provedené periodové analýzy (obrázek 2.3), která odhalila signifikantní frekvence proměnnosti. Po vizuální kontrole pomocí nástroje TPF PLOTTER se ukázalo, že se v těsné blízkosti cílového objektu nachází několik dalších hvězd, z nichž jsou nejbližší hvězdy TIC 243280725 označená v obrázku jako "2" a TIC 243280722 označená v obrázku jako "3" (obrázek 3.23). Ty se také nacházejí v apertuře pro sběr signálu, a tím pádem můžou být kontaminantem. Výpis hvězd z obrázku 3.23 lze vidět v tabulce 3.4.



TIC 243280731 - Sector 41

Obrázek 3.23: Výstup TPF PLOTTER pro TIC 243280731. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.4.

|--|

| Označení hvězdy | Gaia ID | Vzdálenost (pix) | Vzdálenost (arcsec) | Gmag | V apertuře |
|-----------------|---------------------|------------------|---------------------|--------|------------|
| 1 | 21/1152526907318/00 | 0.00 | 0.00 | 10.008 | 1 |
| 1 | 2141152520907518400 | 0,00 | 0,00 | 10,090 | 1 |
| 2 | 2141152526906659968 | 0,97 | 20,27 | 12,554 | 1 |
| 3 | 2141152526906659328 | 1,39 | 29,16 | 11,519 | 1 |
| 4 | 2141152561266402560 | 3,24 | 68,14 | 11,185 | 0 |
| 5 | 2141158230623239040 | 4,50 | 94,58 | 15,085 | 0 |
| 6 | 2141152080230049920 | 4,80 | 100,85 | 14,862 | 0 |

U tohoto objektu se pixelovou analýzou z TESS INTERACT ukázalo, že je situace na pixelové mapě složitější než u předchozích objektů. V apertuře se nachází tři hvězdy poměrně blízko sebe a v obrázku 3.24 nelze snadno určit zdroj hledaných frekvencí. Lze ale vidět, že se směrem nahoru od cílového objektu (souřadnice (1964,1498)) význam daných frekvencí ztrácí poměrně rychle, zatímco směrem dolů ke hvězdám TIC 243280725 označená jako "2" a TIC 243280722 označená jako "3" se frekvence i slabě zesiluje. Již s menší jistotou lze proměnnost přiřadit konkrétně k TIC 243280722. K dalším krokům analýzy lze předpokládat, že zdroj těchto frekvencí může být jedna z této dvojice hvězd.



Target ID: 243280731, 2419.99 - 2446.58 [BTJD days]

Obrázek 3.24: Výstup z TESS INTERACT pro TIC 243280731. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.5.

Závěrem analýzy družicových dat jsem využil TESS LOCALIZE k identifikování zdroje nejvýraznější frekvence z periodové analýzy (z tabulky 2.2). Zdrojem detekované proměnnosti je podle výsledků hvězda TIC 243280722. Na obrázku 3.25 lze vidět předpokládané umístění zdroje proměnnosti označené černým křížkem. Jak lze vidět, toto centrum proměnnosti je velmi blízko červeně zvýrazněné hvězdě, která byla označena s nejvyšší pravděpodobností jako původce této frekvence.



Obrázek 3.25: Výstup z TESS LOCALIZE pro TIC 243280731. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.7.

Pozemní diferenciální fotometrie, realizovaná jako finální krok validace družicových dat z mise *TESS*, poskytla důležitý vhled do povahy objektu TIC 243280731. Výběr referenčních hvězd a orientace záběru je patrný z obrázku 3.26, zatímco samotné světelné křivky jsou zachyceny na obrázku 3.27. Pozorování probíhalo ve Ždánicích.

Z průběhu světelných křivek je zřejmé, že cílový objekt TIC 243280731 (V) nevykazuje známky pravidelné proměnnosti. Naproti tomu hvězda TIC 243280722 (K1), označená na základě družicových dat jako pravděpodobný kontaminant, vykazuje výrazné změny jasnosti v čase. Vedle ní byla analyzována i hvězda TIC 243280725 (K2), u níž se žádná proměnnost neprojevila, a lze ji tedy jako zdroj kontaminace vyloučit. Zároveň se chování hvězdy K1 shoduje s proměnností hvězdy TIC 243280731 zjištěné z *TESS*, jak lze vidět na výřezu světelné křivky, viz obrázek 3.28. Srovnání světelné křivky z *TESS* pro objekt V a světelné křivky K1-C z pozemské fotometrie lze vidět na obrázku 3.29.

Stejně jako u objektu TIC 236885884 nebyl naměřen celý průběh fáze a z měření není ani zcela poznat, kde má křivka maximum, a tedy nemá smysl provádět ani hrubé odhady. V případě objektu TIC 243280731 se tedy pomocí pozemní fotometrie vyvrátila proměnnost a hvězda nepatří do skupiny δ Scuti. Do té patří s vysokou pravděpodobností hvězda TIC 243280722, jelikož vykazuje typickou proměnnost.



Obrázek 3.26: Okolí hvězdy TIC 243280731. Výpis označených objektů je v tabulce 2.5.



Obrázek 3.27: Světelné křivky pro objekt TIC 243280731 (označeného jako V) a potenciálního kontaminanta TIC 243280722 (K1) vybraného nástrojem TESS LOCALIZE. Měření bylo provedeno na dalekohledu ve Ždánicích.



Obrázek 3.28: Výřez ze světelné křivky pro objekt TIC 243280731.



Obrázek 3.29: Srovnání světelných křivek z pozemské fotometrie (TIC 243280731 - žlutá) a *TESS* (TIC 243280722 - červená). Data byla srovnána stejným způsobem jako u obrázku 3.7.

3.5 Ostatní kandidáti

U ostatních kandidátů proběhla stejná analýza z dat *TESS* a také pozemní měření v Ondřejově, avšak výsledky nebyly prokazatelné, protože případná proměnnost se ztrácela v rozptylu dat. Při zpracování jsem zjistil, že amplituda proměnnosti je natolik nízká, že potvrzení nebylo možné, a proto jsem se soustředil pouze na analýzu dat z *TESS*. Příklad takovéto křivky, kdy se začíná proměnnost ztrácet v rozptylu dat je na obrázku A.1. Funkčnost nástroje TESS LOCALIZE byla ověřena na základě čtyř hlavních proměřených objektů, a následně byl tento nástroj použit pro konečnou identifikaci ostatních kandidátů. Výstupy z kroků předcházejících použití nástroje TESS LOCALIZE v této práci jsou prezentovány v apendixu (obrázky A.2 až A.34). Svítivosti (respektive hvězdné velikosti a vzdálenosti k jejich výpočtu) a teploty jsou brány z katalogu *Gaia*.

TIC 243277123

Objekt TIC 243277123 nebyl identifikován jako zdroj proměnnosti. Tím je pravděpodobně hvězda *Gaia* DR3 2143453289346677376. Na obrázku 3.30 jde vidět téměř překrytí černého kříže a červeně označené hvězdy.



Obrázek 3.30: Výstup z TESS LOCALIZE pro TIC 243277123. Barevná škála a značení má stejný význam, jako u předchozích výstupů z TESS LOCALIZE.

Za pozornost však stojí teplota kontaminantu *Gaia* DR3 2143453289346677376. Ta je podezřele nízká s hodnotou 5 447 K. Svítivost je také nízká s hodnotou 2,65 L_{\odot}. Tento kontaminant se tedy nachází daleko od hranice pásu nestability a jeho případná proměnnost by měla mít jinou podstatu, než pulzace. Z databáze VSX (Watson et al., 2022) proměnných hvězd jsem zjistil, že se jedná o zákrytovou dvojhvězdu.

TIC 259132389

Objekt TIC 259132389 nebyl identifikován jako zdroj proměnnosti. Tím je pravděpodobně hvězda *Gaia* DR3 2263451548860403328. Na obrázku 3.31 lze vidět úplné překrytí černého kříže a červeně označené hvězdy vzdálené několik pixelů.



Obrázek 3.31: Výstup z TESS LOCALIZE pro TIC 259132389. Barevná škála a značení má stejný význam, jako u předchozích výstupů z TESS LOCALIZE.

I zde je teplota kontaminantu *Gaia* DR3 2263451548860403328 podezřele nízká s hodnotou 4 068 K. Svítivost je nízká s hodnotou 0,18 L_{\odot}. Tento kontaminant se tedy nachází velmi daleko od hranice pásu nestability a jeho případná proměnnost by měla mít jinou podstatu, než pulzace. Při pohledu na příslušný periodogram A.12 můžeme pozorovat nejvýraznější frekvenci cca 8 cyklů za den. Může se však jednat o dvojnásobek skutečné frekvence, což je častý jev u periodogramů, které lépe aproximují světelnou křivku vyšší harmonickou. Myšlenka násobků základních frekvencí vznikla na základě inspirace článkem Skarka & Henzl (2024), který tuto problematiku rozebírá. Proměnnost hvězdy *Gaia* DR3 2263451548860403328 by tedy mohla být způsobena například zákrytovou dvojhvězdou. Tato myšlenka se potvrdila po vyhledání kontaminantu v databázi VSX.

TIC 353937916

Objekt TIC 353937916 zde byl identifikován jako zdroj proměnnosti. TESS LOCALIZE označil tento cílový objekt jako proměnný (obrázek 3.32).



Obrázek 3.32: Výstup z TESS LOCALIZE pro TIC 353937916. Barevná škála a značení má stejný význam, jako u předchozích výstupů z TESS LOCALIZE.



Obrázek 3.33: Pixel periodogram ukazující rozložení síly periodických signálů v jednotlivých pixelech pro TIC 353937916. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.5.

Z peridogramu (obrázek A.13) lze vidět, že více upravit vstupní podmínky pro lepší výsledek nelze zadat kvůli absenci dalších významných frekvencí. Při pohledu na obrázek 3.33 je patrné, že zdroj dané frekvence se nachází v oblasti tohoto objektu.

Ačkoliv se zde nenachází kontaminant, je poměrně složité určit, o jakou proměnnost se zde jedná, a bylo by potřeba podrobnější ověření. Ale i zde existuje určitá pravděpodobnost, že detekovaná frekvence proměnnosti je násobek základní frekvence, která může souviset s jiným mechanismem proměnnosti.

TIC 366581060

Objekt TIC 366581060 nebyl identifikován jako zdroj proměnnosti. Za zdroj byla TESS LOCALIZE označena hvězda *Gaia* DR3 2276317690330694400. Při pohledu na obrázek 3.34 můžeme ale vidět poněkud více pixelů s detekovanou danou frekvencí. Nejsilnější detekce se ale nachází u červeně označené hvězdy.



Obrázek 3.34: Výstup z TESS LOCALIZE pro TIC 366581060. Barevná škála a značení má stejný význam, jako u předchozích výstupů z TESS LOCALIZE.

I u tohoto kontaminantu narazíme na nízkou teplotu s hodnotou 5 407 K. Svítivost zde dosahuje hodnoty 4,70 L_{\odot}. Kontaminant se nachází daleko od pásu nestability a i zde se tedy nabízí myšlenka o hlavní frekvenci, která je násobkem základní frekvence.

TIC 420128765

Objekt TIC 420128765 byl jako druhý z deseti kandidátů identifikován jako zdroj proměnnosti (obrázek 3.35). I v tomto případě periodogram (viz obrázek A.15) vykazuje jedinou signifikantní frekvenci a nelze tak zpřesnit výstup TESS LOCALIZE. Při pohledu na obrázek 3.36 lze pozorovat rovnoměrný a symetrický pokles dané frekvence směrem od cílového objektu. To značí, že zdrojem proměnnosti je TIC 420128765.



Obrázek 3.35: Výstup z TESS LOCALIZE pro TIC 420128765. Barevná škála a značení má stejný význam, jako u předchozích výstupů z TESS LOCALIZE.



Obrázek 3.36: Pixel periodogram objektu TIC 420128765 ukazující rozložení síly periodických signálů v jednotlivých pixelech. Barvy a symboly mají stejný význam jako na obrázku 2.5.

Hvězda TIC 420128765 je druhým z deseti objektů, u kterého proměnnost nebyla způsobena kontaminantem. S teplotou 6 040 K a svítivostí 3,76 L_{\odot} se objekt nachází také poměrně daleko od pásu nestability. Možnou příčinou může být nepřesné určení teploty, jelikož teplota z TIC katalogu dosahuje 6 365 K. I to je však nízká teplota pro výskyt v pásu nestability. I zde to tedy může být případ násobku základní frekvence a jiného původu proměnnosti.

TIC 229764421

Objekt TIC 229764421 nebyl identifikován jako zdroj proměnnosti. Za zdroj byla TESS LOCALIZE označena hvězda *Gaia* DR3 2265538112691940096. Na obrázku 3.37 lze vidět poměrně velkou oblast s detekovanou frekvencí. Uprostřed této oblasti se nachází identifikovaný kontaminant. Cílový objekt se nachází mimo tuto oblast a tím pádem nemůže být zdrojem této frekvence.



Obrázek 3.37: Výstup z TESS LOCALIZE pro TIC 229764421. Barevná škála a značení má stejný význam, jako u předchozích výstupů z TESS LOCALIZE.

I zde se teplota společně se svítivostí kontaminantu pohybuje v malých hodnotách pro pobyt v pásu nestability. S hodnotami 5 513 K a $0,82 L_{\odot}$ se tak jedná pravděpodobně o jiný typ proměnnosti. V periodogramu 3.38 lze dokonce vidět malý náznak základní frekvence (cca 3,5 c/d), který by mohl o to více nasvědčovat proměnnosti s delšími periodami a jiným původem, než u δ Scuti. V databázi VSX je skutečně *Gaia* DR3 2265538112691940096 označena jako kontaktní zákrytová dvojhvězda s frekvencí právě 3,5 cyklů za den.



Obrázek 3.38: Periodogram pro objekt TIC 229764421.

3.6 Zkoumané hvězdy v H-R diagramu

U čtyř objektů, které byly ověřeny pomocí pozemní diferenciální fotometrie, se podařilo jednoznačně identifikovat blízké hvězdy kontaminující jejich světelnou křivku. Tyto hvězdy vykazují známky proměnnosti a měly by se nacházet v oblasti nestability. Na obrázku 3.39 je znázorněno jejich postavení v H-R diagramu (křížky), kde jsou porovnány s původními cílovými objekty (čtverečky). Cílové hvězdy byly záměrně voleny mimo oblast nestability, zatímco jejich kontaminanti se již do této oblasti promítají, což odpovídá očekávanému chování δ Scuti proměnných hvězd.

V diagramu jsou zahrnuty pouze tyto čtyři případy, pro které jsem zpracoval pozemní fotometrická měření a ověřil původ jejich domnělé proměnnosti. U zbývajících čtyř identifikovaných kontaminantů, nalezených pomocí TESS LOCALIZE, chybí přiřazení v katalogu TIC a jsou evidovány pouze v rámci databáze *Gaia*. Jelikož zjištěné kontaminanty u těchto neověřených případů vykazují výrazně nižší efektivní teploty oproti původním kandidátům, nebylo by smysluplné je vykreslovat v okolí pásu nestability. Druhotným důvodem pro jejich nezařazení do diagramu mohou být i možné rozdíly mezi parametry uváděnými v jednotlivých katalozích (např. teplota: 6 365 K z TIC vs 6 040 K z *Gaia* u objektu TIC 420128765).



Obrázek 3.39: H-R diagram zobrazují vyvrácené kandidáty na δ Scuti (znak čtverce) a kontaminanty těchto objektů (znak kříže). Červená línie označuje pravou hranici pásu nestability. Jedná se o modifikaci obrázku 2.1. Úpravu jsem provedl pomocí kódu od Marka Skarky.

Závěr

Tato bakalářská práce se zaměřila na ověření původu pulzací u kandidátů na hvězdy typu δ Scuti s nízkou efektivní teplotou. Výběr kandidátů vycházel z práce Skarka et al. (2022), v níž byly identifikovány objekty vykazující periodickou proměnnost v datech z družice *TESS*, ačkoliv jejich parametry odporovaly předpokladům pro výskyt pulzací tohoto typu. Zaměřil jsem se na vzorek deseti nejchladnějších hvězd se svítivostí do $10L_{\odot}$, kde byly odchylky od teoretického pásu nestability nejvýraznější.

Pro každého z vybraných objektů byla nejprve provedena frekvenční analýza a identifikace význačných frekvencí světelných křivek typu PDCSAP Flux pomocí knihovny LIGHTKURVE a Lomb-Scargleovy metody. Následně byla aplikována prostorová analýza pixelových dat s využitím nástrojů TPF PLOTTER, TESS INTERACT a TESS LOCALIZE, která umožnila lokalizovat pravděpodobný zdroj detekované proměnnosti v okolí cílové hvězdy. Ve čtyřech případech, kde byl signál výrazný a objekt dobře dostupný k pozorování, jsem přistoupil k nezávislému ověření pomocí pozemní diferenciální fotometrie. Pozorování probíhala na observatořích ve Ždánicích a Ondřejově. Získaná data byla poté zpracována v programu MUNIWIN.

Po zpracování diferenciální fotometrie jsem vykreslil jednotlivé světelné křivky cílových objektů a kontaminantů. Ověřil jsem, že proměnnost nebyla způsobena samotnými cílovými objekty. Ve všech čtyřech případech se ukázalo, že pulzace odpovídající typickým frekvencím a amplitudám δ Scuti hvězd pocházely od jiného, blízkého objektu v poli. Výsledky rovněž ukazují, že samotná frekvenční analýza bez prostorového rozlišení nemusí být při určování zdroje proměnnosti spolehlivá, zejména u širokoúhlých přehlídek s nízkým úhlovým rozlišením, jako je *TESS*.

U zbývajících šesti objektů neproběhlo ověření pomocí pozemní fotometrie z důvodu většího rozptylu dat, než byly samotné amplitudy proměnnosti. I pro ně však byla provedena kompletní analýza družicových dat, včetně prostorového rozložení signálu. Ve čtyřech případech se opět ukázalo, že pulzace pochází z jiného objektu v okolí, který byl identifikován jako pravděpodobný kontaminant pomocí nástroje TESS LOCALIZE. U těchto kontaminantů se navíc zjistila velmi nízká teplota a svítivost, a tudíž je možné, že detekované frekvence pulzací jsou násobkem neurčené základní frekvence (pravděpodobně dvojnásobkem), které mají jiný původ. U třech případů se konkrétně jednalo o kontaminaci známými zákrytovými dvojhvězdami. Čtveřice kontaminujících hvězd neměla označení v katalogu TIC, ale pouze v katalogu Gaia. Vzhledem k nízkým teplotám a možným rozdílům v datech mezi katalogy nebylo jejich zařazení do H-R diagramu vhodné.

Ve dvou případech se však ukázalo, že detekovaný signál je opravdu prostorově soustředěn u cílovém objektu a že není přítomen u žádné okolní hvězdy. Objekty TIC 353937916 a TIC 420128765 lze tedy považovat za vážné kandidáty na δ Scuti hvězdy

s nízkou efektivní teplotou, které by si zasloužily další pozorování – ideálně spektroskopické ověření parametrů a nezávislá fotometrická měření. Kontaminantem by zde mohla být teoreticky velmi slabá hvězda v blízkosti kandidáta, která nebyla detekována v rámci TESS LOCALIZE. I zde je však možný výskyt detekované frekvence jako násobku neurčené základní frekvence. S nižší frekvencí by poté mohl souviset i jiný původ proměnnosti.

Celkově tato práce potvrzuje, že většina kandidátů na proměnné hvězdy typu δ Scuti s nízkou teplotou byla chybně klasifikována na základě kontaminovaných světelných křivek. Skutečný zdroj proměnnosti se v těchto případech nacházel v blízké hvězdě. Práce tak podtrhuje význam prostorové diagnostiky a nezávislého ověřování, zejména při práci s daty s nízkým prostorovým rozlišením.
Seznam použité literatury

- Aller, A., Lillo-Box, J., Jones, D., et al. 2020, Astronomy & Astrophysics, Planetary nebulae seen with TESS: Discovery of new binary central star candidates from Cycle 1, 635, A128. doi:10.1051/0004-6361/201937118
- Breger, M. 2000, Delta Scuti and Related Stars, δ Scuti stars (Review), 210, 3.
- Cousins, A. W. J. 1976, Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa, Standard Stars for VRI Photometry with S25 Response Photocathodes, 35, 70.
- Fleming, S. W. 2019, American Astronomical Society Meeting Abstracts, Interacting And Searching For TESS Data At MAST, 233, 245.11.
- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., et al. 1996, The Astronomical Journal, The Sloan Digital Sky Survey Photometric System, 111, 1748. doi:10.1086/117915
- Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A., et al. 2023, Astronomy & Astrophysics, Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties, 674, A1. doi:10.1051/0004-6361/202243940
- Higgins, M. E. & Bell, K. J. 2023, The Astronomical Journal, Localizing Sources of Variability in Crowded TESS Photometry, 165, 4, 141. doi:10.3847/1538-3881/acb20c
- Janík, J. 2021, Astronomické pozorování, skripta, Masarykova univerzita
- Lightkurve Collaboration, Cardoso, J. V. de M., Hedges, C., et al. 2018, Astrophysics Source Code Library, Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python. ascl:1812.013
- Mikulášek, Z., Zejda, M. 2013, Úvod do studia proměnných hvězd, skripta, Masarykova univerzita
- Murphy, S. J., Hey, D., Van Reeth, T., et al. 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Gaia-derived luminosities of Kepler A/F stars and the pulsator fraction across the δ Scuti instability strip, 485, 2, 2380. doi:10.1093/mnras/stz590
- Pietrukowicz, P., Soszyński, I., Netzel, H., et al. 2020, Acta Astronomica, 70, 241, doi:10.32023/0001-5237/70.4.1
- Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., et al. 2015, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), 1, 014003. doi:10.1117/1.JATIS.1.1.014003

- Scargle, J. D. 1982, Astrophysics Journal, Studies in astronomical time series analysis.
 II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data., 263, 835. doi:10.1086/160554
- Skarka, M. & Henzl, Z. 2024, Astronomy & Astrophysics, Periodic variable A-F spectral type stars in the southern TESS continuous viewing zone. I. Identification and classification, 688, A25. doi:10.1051/0004-6361/202450711
- Skarka, M., J., Fedurco, M., et al. 2022, Astronomy & Astrophysics, Periodic variable A-F spectral type stars in the northern TESS continuous viewing zone. I. Identification and classification, 666, A142. doi:10.1051/0004-6361/202244037
- Stumpe, M. C., Smith, J. C., Van Cleve, J. E., et al. 2012, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Kepler Presearch Data Conditioning I—Architecture and Algorithms for Error Correction in Kepler Light Curves, 124, 919, 985. doi:10.1086/667698
- Štrobl, J., Jelínek, M., & Hudec, R. 2019, Astronomische Nachrichten, Small Binocular Telescope: The new epoch of Burst Alert Robotic Telescope, 340, 7, 633. doi:10.1002/asna.201913668
- Watson, C., Henden, A. A., & Price, A. 2022, VizieR Online Data Catalog: AAVSO International Variable Star Index VSX (Watson+, 2006-), 1. B/vsx

Elektronické zdroje

- Space Telescope Science Institute, 2024, Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST), https://archive.stsci.edu/
- Masarykova univerzita, 2023, Masaryk University News, MU astrophysicists inaugurate largest telescope in Moravia, https://www.em.muni.cz/en/news/ 16536-mu-astrophysicists-inaugurate-largest-telescope-in-moravia
- Motl, D., & Hroch, F., 2011, C-Munipack: MuniWin [software], 2025-04-30, https://c-munipack.sourceforge.net/
- NASA, 2020, Guide to TESS Extended Mission Planning, NASA GSFC. Available at https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/docs/ Guide-to-TESS-for-EM-planning.pdf
- Wikipedia contributors, 'Instability strip," Wikipedia, The Free Encyclopedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Instability_strip

Apendix

Apendix Světelné křivky



Obrázek A.1: Příklad světelné křivky, u které se proměnnost ztrácí v rozptylu dat. Jedná se o stejnou volbu objektů jako na obrázku 3.27 při analýze kandidáta TIC 243280731.



Obrázek A.2: Světelná křivka TIC 229795026.











Obrázek A.5: Světelná křivka TIC 243280731.



Obrázek A.6: Světelná křivka TIC 259132389.



Obrázek A.7: Světelná křivka TIC 353937916.



Obrázek A.8: Světelná křivka TIC 366581060.







Obrázek A.10: Světelná křivka TIC 229764421.



Periodogramy

Obrázek A.11: Periodogram TIC 243277123.



Obrázek A.12: Periodogram TIC 259132389.



Obrázek A.13: Periodogram TIC 353937916.



Obrázek A.14: Periodogram TIC 366581060.



Obrázek A.15: Periodogram TIC 420128765.

Fázové křivky



Obrázek A.16: Fázová světelná křivka TIC 229795026.



Obrázek A.17: Fázová světelná křivka TIC 236885887.



Obrázek A.18: Fázová světelná křivka TIC 243277123.



Obrázek A.19: Fázová světelná křivka TIC 243280731.



Obrázek A.20: Fázová světelná křivka TIC 259132389.



Obrázek A.21: Fázová světelná křivka TIC 353937916.



Obrázek A.22: Fázová světelná křivka TIC 366581060.



Obrázek A.23: Fázová světelná křivka TIC 420128765.



Obrázek A.24: Fázová světelná křivka TIC 229764421.



Okolí hvězd - TPF plotter



192

190

188

186

184

182

1146

Pixel Row Number









Obrázek A.28: TIC 366581060.

 $Flux \times 10^{3}$ (e^{-/s})







Obrázek A.30: TIC 229764421.

Pixel periodogramy - TESS Interact



 Image: Dis 259132389, 1842.50 - 1868.82 [BTD days]

 Image: Dis 25913289, 1842.50 -

Obrázek A.32: TIC 259132389.

Obrázek A.31: TIC 243277123.

Apendix _____

| Target ID: 366581060, 1842.50 - 1868.82 [BTJD days] | | | | | | | | | | Target ID: 229764421, 1683.39 - 1710.18 [BTJD days] | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|-----------------|-------------|-----------------|---------------------------|---------------------|-------------|------------------------|-----------------|---|-------------|-------------|-------------------|--------------------|---|---------------------|--------|------------|---------------------|---|----------------------|------------------------|---------------|--------------|-----------|--------|
| 878 | A day | My KNI A | Handleib | harles | A. A. | Authorit | Author | Aster | halad | Masse | h, Andrea | 1141 | | e laker energie | a de la composition de La composition de la composition de | | | | | | | | | k lefon of h | i linutar | |
| 868 Power / Row (pixel) | A SAME | Audion | Anthin | , the short | A NARA AN | Alexhade | Juli in | u ⁿⁿ direit | Aprilia | habe | hum | | | | an a | 4. | | | | | | | | | und an | , III |
| | , hitilit | A SHOWING | Mapleol | the ball | , Marathani | , day huk | shqinad | habite | Manufik | u de la | u Muhuh | | | | elenne 1 | Muanas | | | | | | | | والمسالية | deed p- | , had |
| | fre staatt | , Mariak | ylayhiya | <u>Hertur</u> | Anton | Arthol | thetal | , Haghard | h, Miles | Analisi | li jiladaha | | bi hi hara a da a | | Addr | l dhana | l the | | | | | | | opender | Mallere | alian |
| | . Mardelle | Nakita | ahahadh | Handhalar | , Norwight | a Madana | . Asimila | Mashika | Allen | <u>j</u> h.hee | n jê jakin | (lax | 4 0.0 1 1 1 0 1 1 | | Mariata | | all M | hilling | المطاورات | | | , , <mark>.</mark> , | ية مراما يه م | | | |
| | deskealt | Malflut | Autor | himi | Jana | V ^{AN} AAA | w Manahita | History | Hartlad | , <mark>Jahandua</mark> | k Anderski | r / Row (pi | antatan | by he still method | | lan ditadi ba | al, lu | um du l | vlatal | da X.a | a <mark>ky "M</mark> | | hatataha | h.) ptimulie | ji. | |
| | Adde | . Min Pilling | Hand | , dia hite | and the second | an Mindowin | الاستان الم | , deathailt | Aldan | halla | e Albert | Powe | | | | | | hanaday | ul _{sme} l | l Jilimi | | unt a | anti-strati | | apelerat | hitest |
| | Marian | Madan | Andrew | with the second | _{lei} ilhi, kith | | | hadist | Hallia | Maker | e, Aistan | | العاريون العار | e juliusk dans | ap diseased | ing list the second | | d. W.dala | Ulanal | l adayad | tin pila si si si | | delassite i | dina nati | n Liste | |
| | Ashal | Miller | Author | , Politic | Andrei | | | hadaad | Annual | Alpha | h fhanaith | | | | | l Martuk | | la altre | | NILLARE A | a dhan | | Hara H. | hland | J. | J. |
| | , dhila k | Malline | h, hak | , lock of prod | , the short | Jeineesin | Hudley | A strophy. | M illion | Jund | lt Aufwart | | | a a fundamente de | | | Jupter | (entropped | hereiukee | Jakés | , uluy | du l | u.u.u | le in it | | , lup |
| | Austip. | , Honethild | <u>A</u> LA | , Arden A | , di jila ki | Higher | hadadi | de la company | Haine | Aine | e Philipp | 1131 | l l l | | | | | | | Na | Apartika | ωφν I | . بادالها | an alla h | n wie. | , and |
| | 83 | | | | Frequent | cy / Colum | n (pixel) | | | | 93 | | 1004 | | | | F | requen | cy / Colu | mn (pixel | | | | | 10 | 14 |

Obrázek A.33: TIC 366581060. Obrázek A.34: TIC 229764421.