

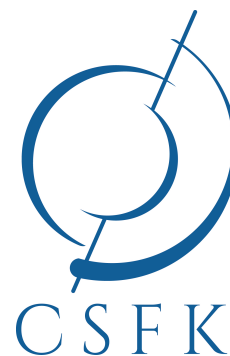
Egy kihunyó változócsillag utolsó lúktetései, az RU Vulpeculae termális pulzusának megfigyelése

Országos Tudományos Diákköri Dolgozat

Kertész Balázs

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Fizika BSc II. évfolyam



Témavezetők:

Kalup Csilla

tudományos segédmunkatárs

HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Dr. Molnár László

tudományos főmunkatárs

HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar

Csillagászati Tanszék

Budapest, 2025

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
1.1. Csillagfejlődés és termális pulzusok	2
1.2. Változócsillagok	6
1.3. Termális pulzusok változócsillagokban	8
1.3.1. T Ursae Minoris	9
1.3.2. R Hydrae	10
1.3.3. RU Vulpeculae	12
2. Adatredukció	14
2.1. Piszkéstetői mérések	14
2.2. Képkorrekció	14
2.3. Asztrometria	15
2.4. Apertúra-fotometria	17
3. Bekötés a standard rendszerbe	19
3.1. Standard összehasonlítók	19
3.2. Standard transzformáció	20
4. Perióduskeresés	24
5. A periódus hosszútávú időfejlődése	28
5.1. Archív adatok	28
5.2. A periódusváltozás meghatározása	30
6. Összefoglalás	33
Irodalomjegyzék	38
Függelék	39

Kivonat

A kis- és közepes tömegű csillagok a fejlődésük során a Hertzsprung-Russell-diagramon az aszimptotikus óriáságra érve termális pulzusok sorozatát élik át. Ez egy rövid, ám rendkívül fontos szakasza a csillagok életének, mivel ekkor érik el luminozitásuk maximumát, és veszítik el tömegük nagy részét, mielőtt fehér törpévé alakulnak át. Jelenleg három csillagról feltételezhető, hogy éppen egy termális pulzus folyamatában látjuk őket: a T UMi, R Hya és RU Vul változókról. Míg az első kettőről már készült részletes analízis, addig az RU Vulpeculae esetében még nem történt ilyen jellegű modellezés. Mivel a csillag amplitúdója és periódusa az utóbbi években jelentősen lecsökkent, a Piszkestetői Observatóriumból 2022. januárja óta heti rendszerességgel gyűjtenek az észlelők különböző színszűrőkben méréseket a csillagról. Ennek során a 2022–2023-as szezonban, összesen 162 nap alatt, csaknem 5200 kép készült.

A dolgozatom elsődleges célja a piszkéstetői adatokból abszolút fotometria segítségével a fénygörbe kinyerése, majd a Lomb-Scargle periodogram alkalmazásával a pulzációs periódus részletes vizsgálata. Ezután több évtizedre visszamenő megfigyelési adatok segítségével megvizsgáltam az RU Vul pulzációs periódusának hosszútávú időbeli fejlődését.

Munkám során elkészítettem egy olyan fotometriai kódot, ami a különböző szisztematikus és statisztikus hibákkal terhelt, nagy mennyiségű piszkéstetői RC80 méréseket egyszerre, automatikusan dolgozza fel. A szkript különböző kalibrációs felvételek alkalmazásával redukálja a méréseket, fluxusprofil alapján detektálja azokon a csillagokat, az adott napon a képeket teljesen fedésbe hozza, majd elvégzi rajtuk az apertúra illesztést és az apertúra fotometriát. Ezek az eredmények lehetővé tették a munkám következő lépéseként az abszolút fotometria elvégzését, így megkapva az RU Vul elmúlt 2 évének a fénygörbáját, mely alapján sikeresen igazoltam azt a sejtést, miszerint a csillag egymódusú pulzációja kétmódusúvá vált. Végül archív megfigyelési adatokat felhasználva közel 120 évre visszamenően feltérképeztem a csillag pulzációs periódusának időbeli fejlődését. Ezzel előkészítettem a csillag termális pulzusának modellezését, mely alapján az RU Vul több fizikai paramétere (például a csillag tömege) is meghatározhatóvá válik.

1. fejezet

Bevezetés

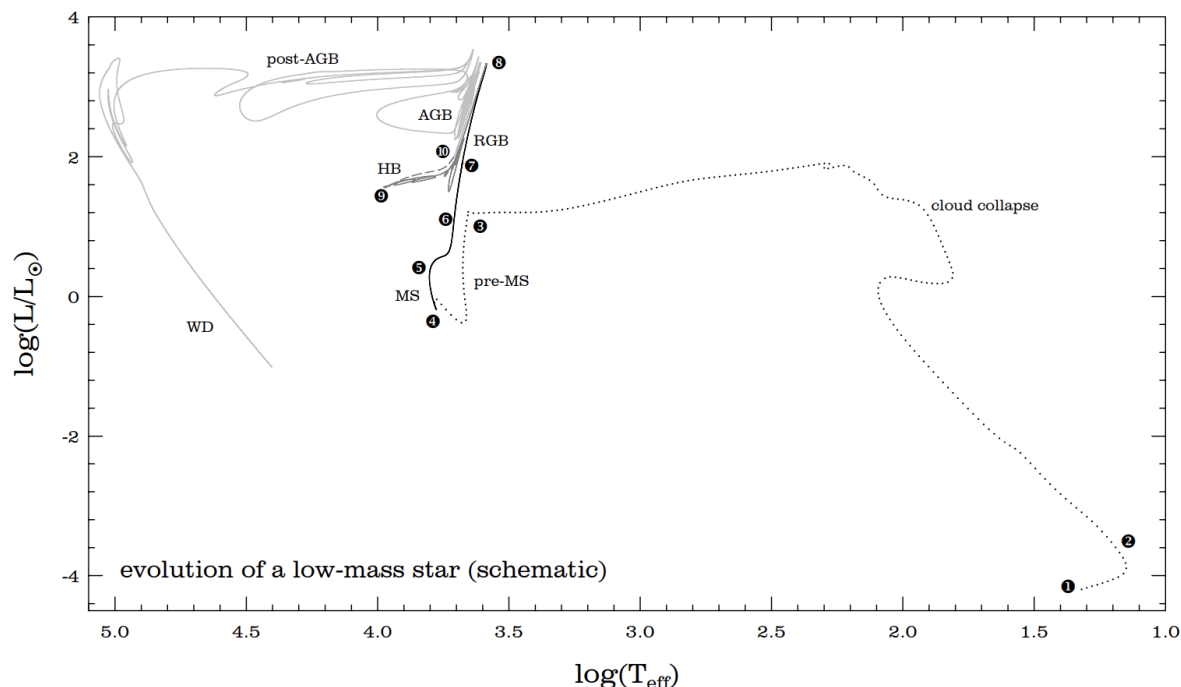
A kis- és közepes tömegű ($0.5 M_{\odot} \leq M \leq 8.0 M_{\odot}$) csillagok fejlődése során az aszimptotikus óriáság (Asymptotic Giant Branch, AGB) egy rövid, de nagyon fontos szakasza a csillagok életének, mivel itt érik el a luminozitásuk maximumát, és veszítik el a tömegük nagy részét, mielőtt fehér törpe csillagokká alakulnak át (Karakas, 2017). Az alábbiakban ezen csillagok evolúcióját ismertetem a fősorozattól az AGB szakaszig, különös tekintettel a termális pulzusokat mutató fázisra (Catelan & Smith, 2015).

1.1. Csillagfejlődés és termális pulzusok

Az 1.1. ábrán egy Hertzsprung-Russell-diagramon követhetjük végig egy kistömegű csillag sematikus életútját. Miután a születő csillag eléri a fősorozat nulladik életkorú pontját (Zero Age Main Sequence, ZAMS; ❷ pont az 1.1. ábrán), a magban zajló proton-proton ciklus hatására a hőmérséklete és luminozitása lassan, több milliárd éves időskálán növekszik, amíg el nem éri az ❸-ös, ún. lefordulási pontot. Ekkor a hidrogén égése a csillag központjában megszűnik, és helyette a hidrogén égetése egy héjban lokalizálódik.

Amikor a már héliumot égető mag növekedése elért egy bizonyos határt, termikus skálán összeomlik, miközben felmelegszik és energiát sugároz ki. Ahogy a héliumot égető mag tömörödik, az elektron-degeneráció is kialakul, és a csillag eléri a vörös óriás ág (Red Giant Branch, RGB) alját, ahol a struktúrája egy inaktív hélium-magot, egy egyre vékonyodó hidrogén-égető héjat és egy vastagodó konvektív köpenyt tartalmaz. A konvektív köpeny a belső rétegekbe hatolva nukleárisan feldolgozott anyagot hoz felszínre, beleértve kis mennyiségű héliumot, amit az első felkeveredésnek (❹ pont) neveznek (Iben, 1964). Ezt követően a konvektív köpeny visszahúzódik, és a csillag fejlődése felgyorsul, ahogy az RGB fázis során a luminozitás folyamatosan növekszik.

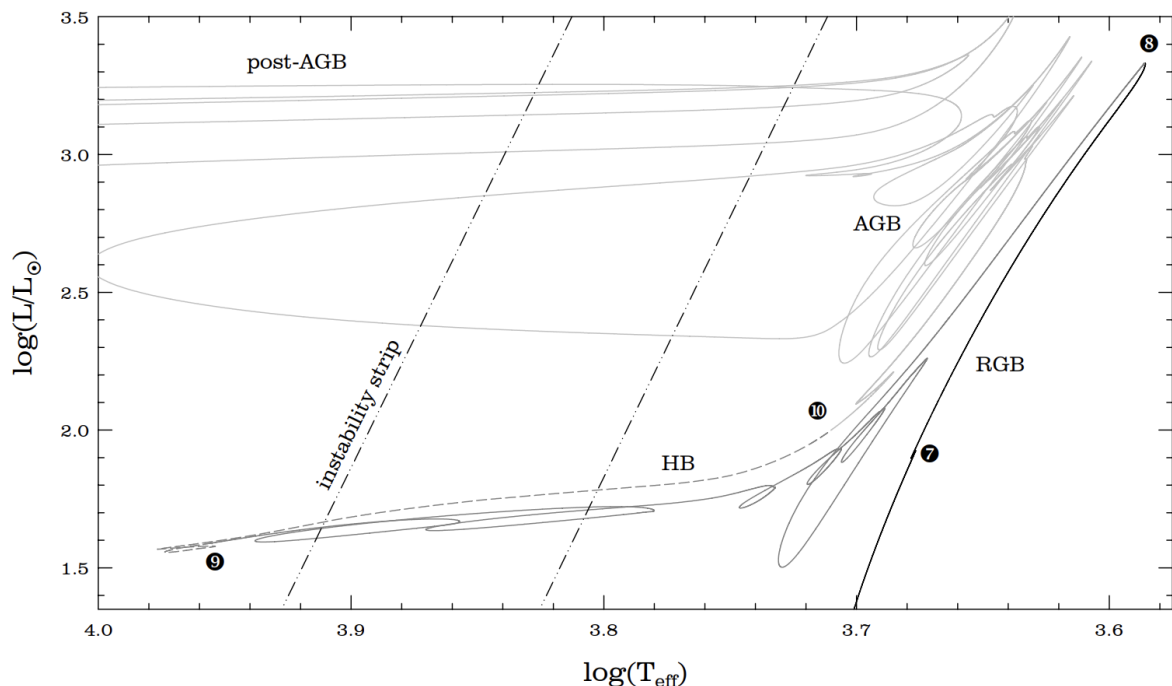
A 1.2. ábra egy, az 1.1. ábra nagyított verziója a következő csillagfejlődési szakaszokról.



1.1. ábra. Egy adott, kis tömegű csillag életútjának sematikus ábrázolása a Hertzsprung-Russell-diagramon, külön jelölve a fejlődési fázisokat. A függőleges tengelyen a csillag L luminozitásának és a Nap $L_{\odot}$ luminozitásának hányadosának tízes alapú logaritmus, míg a vízszintes tengelyen a csillag T_{eff} effektív hőmérsékletének a logaritmus található. MS: Main Sequence (fősorozat), RGB: Red Giant Branch (vörös óriáság), HB: Horizontal Branch (horizontális ág), AGB: Asymptotic Giant Branch (AGB), WD: White Dwarf (fehér törpe hűlési sáv). Forrás: Catelan et al. (2007)

Az RGB fázis végén a héliummag tovább nő és húzódik, egyre melegedve, miközben neutronok formájában jelentős energiavesztés történik, ami hőmérsékleti inverziót idéz elő a magban. A héliumégetés ennek következményeként a mag közepétől távolabb, egy belső héjban indul el. A mag degenerációja miatt a beinduló termionukleáris folyamatok öngerjesztőek lesznek, ezt nevezik hélium-villanásnak (Härm & Schwarzschild, 1961). A villanás során felszabaduló hatalmas energia a degeneráció megszüntetésére fordul, ezért a csillag fényessége nem növekszik ebben, az úgynevezett pre-HB fázisban (8 pont). Amikor végül a degeneráció megszűnik, a csillag eléri a horizontális ág nulladik életkorú (Zero Age Horizontal Branch, ZAHB) pontját (9 pont), ahol a magban héliumot, a héjban hidrogént éget. A horizontális ág elnevezés az ezen szakaszon elhelyezkedő csillagok közel állandó luminozitására utal.

Amikor a csillag eléri a 10-es pontot, a hélium elfogy a magban, és megkezdí életét, mint kistömegű AGB csillag. A belső magja többnyire szénből és oxigénből (C/O mag) áll. A hélium égetése egy héjban, a hidrogén égetése pedig egy másikban történik, miközben a héjak egyre vékonyodnak a csillag fejlődése során. A fiatal AGB (Early AGB, E-AGB) csil-



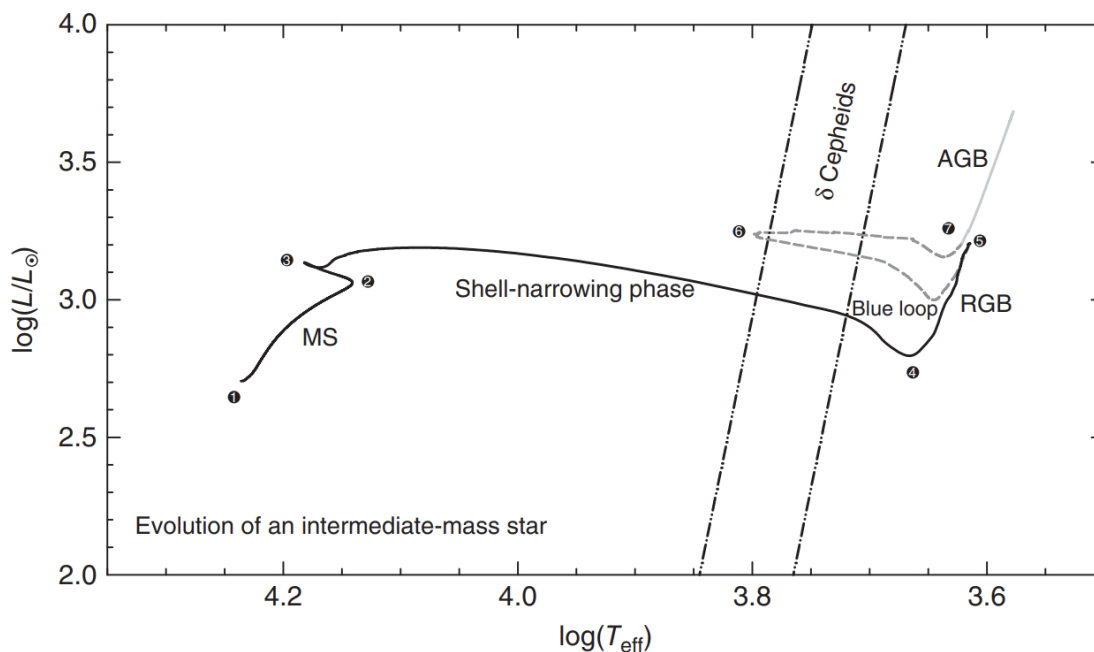
1.2. ábra. Az 1.1. ábra felnagyítva az RGB, HB és AGB fázisokra. Forrás: Catelan et al. (2007)

lagokban a hidrogénégető héj hatékonysága alacsony, mivel a héliumégetés beindulása a héj tágulásához és lehűléséhez vezet. A hélium-héj beindulása ideiglenesen megfordítja a csillag fejlődési irányát, amit az „AGB csomóként”-ként azonosítanak, és amely szépen látszódik a 10. pont után a 1.2. ábrán is. Ebben a korai szakaszban a héliumban gazdag réteg tömege csak kis mértékben növekszik, mivel a hidrogénégető héj hatékonysága alacsony. Amikor a héliumégető héj közel kerül a He/H diszkontinuitáshoz, leáll, majd a hidrogénégető héj összehúzódik és újra begyullad (Straniero et al., 2006). Ennek következtében a héliumhamu összenyomódik, felmelegszik, majd ismét begyullad, ezzel elindítva a termális pulzáló AGB (TP-AGB) fázist.

Az RGB csúcsánál korábban tapasztaltakhoz hasonlóan, ebben az esetben is degeneráció lép fel a héliumégető héjban, emellett a héj vékonyságának is köszönhetően instabil lesz az égés és alacsony hatásfokkal működik. A csillag energiatermelésének nagy részéért a hidrogénégető héj felelős, ami folyamatosan halad a külsőbb rétegek felé, miközben egyre melegíti a csillag belsejét. A hőmérséklet növekedésének következménye a héliumégés hatásfokának növekedése lesz, ami a degeneráció miatt nem tud a tágulásra fordítódni, hanem egy bizonyos pont után héliumhéj-villanás következtében megszűnik a degeneráció, és hatalmas mennyiségű energia szabadul fel, mely a mag körüli tartomány tágulásához vezet. Ennek következményeként a hőmérséklet lecsökken, és a hidrogénégető héj annyira kitágul, hogy leáll

benne az energiatermelés, majd visszazuhan, és újra beindul. Fontos megemlíteni, hogy egy erős konvektív zóna jelenik meg a hélium- és hidrogénhéj között a villanás után. Ezután a folyamat ismét megismétlődik a fentebb tárgyaltakkal analóg módon. Ezt a periodikus folyamatot nevezik termális pulzusnak, mely során sor kerül a harmadik felkeveredésre is, amely során a héliumégetésből, illetve egyéb magreakciókból származó anyagok a mély héjből a felszínre kerülnek.

A kis tömegű csillagok felső határa körülbelül $2\text{--}2.5 M_{\odot}$ (Sweigart et al., 1989). A határ feletti csillagoknál a héliumégés jóval a degeneráció előtt kezdődik meg, így nem jelentkeznek héliumvillanások a magban. Ennek fő következménye, hogy a héliumégetési folyamat nyugodt állapotban indul el, és a valós RGB szakasz (amely a 4–5 pontokat foglalja magában a 1.3 ábrán) sokkal rövidebb, mint a kis tömegű csillagok esetében. A közepes tömegű csil-



1.3. ábra. Egy adott, közepes tömegű csillag életútjának sematikus ábrázolása a Hertzsprung-Russell-diagramon. A függőleges tengelyen a csillag L luminozitásának és a Nap $L_{\odot}$ luminozitásának hányadosának tízes alapú logaritmus, míg a vízszintes tengelyen a csillag T_{eff} effektív hőmérsékletének a logaritmus található. Az ábrán csak az MS és AGB közötti fázisok vannak feltüntetve. Forrás: Catelan & Smith (2015)

lagok AGB és termális pulzusai nem térnek el lényegesen a fentebb bemutatottaktól. Azt azonban érdemes megemlíteni, hogy jellemzően több termális pulzus következik be, illetve több felkeveredésre kerül sor egy nagyobb tömegű csillag esetében. Ezen csillagok esetében még az E-AGB szakaszban megjelenik egy második felkeveredés is. Annak ellenére, hogy

a kis tömegű csillagok esetében ilyen nem fordul elő, a termális pulzus alatt bekövetkező felkeveredést ugyanúgy harmadik felkeveredésnek nevezik.

1.2. Változócsillagok

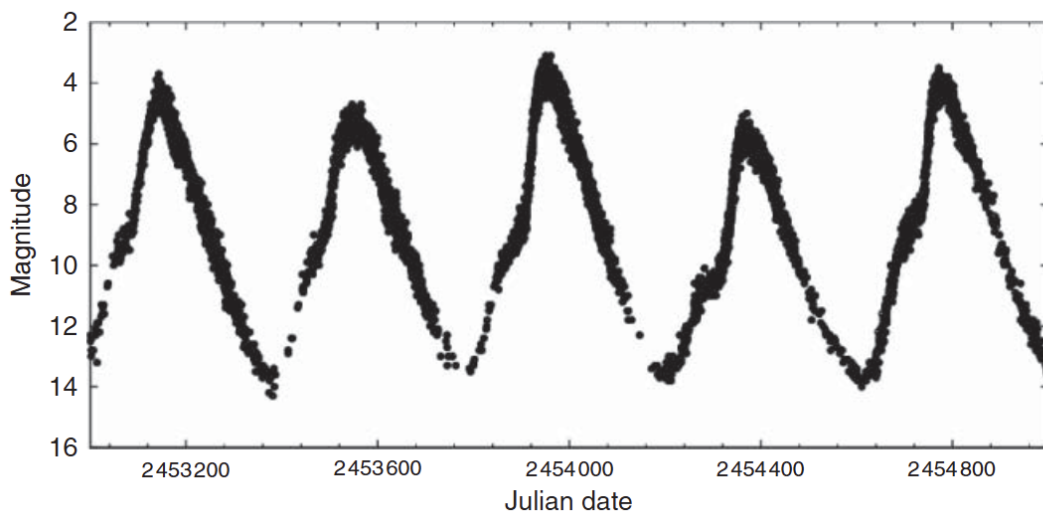
Annak érdekében, hogy a termális pulzusokat vizsgálni tudjuk, változócsillagokra van szükségünk. A termális pulzusok visszahatnak a csillag pulzációra, amelyben így változások következnek be, ezzel pedig a jelenség lekövethetővé válik. Ehhez az alábbiakban a Mira-típusú és a félszabályos változócsillagokat fogjuk áttekinteni.

Mira-típusú változócsillagok

A Mira típusú változócsillagok az AGB fázis végéhez közelítő, hidrogén- és héliumégési héjakból álló, hűvös óriáscsillagok, melyek effektív hőmérséklete körülbelül 3000 K. Sugaruk elérheti a néhány száz napsugarat, emiatt az átlagos sűrűségük rendkívül alacsony. A legöregebb Mira típusú változók (mint amilyenek a gömbhalmazokban is megtalálhatók) tömege körülbelül $0,6 M_{\odot}$. Ugyanakkor néhány Mira típusú változó fiatalabb és a közepes korú csillagpopulációkban található. A legnagyobb tömegű Mira típusú változók fősorozati elődjének tömege lehetett akár $4\text{--}6 M_{\odot}$ is lehetett. Egy tipikus Mira típusú változó tömegének leírására gyakran az 1 naptömeget használják. Az 1.4. ábra bemutatja egy ilyen, Mira típusú változócsillag, a χ Cygni látható fénygörbéjének egy részletét. Ezen csillagok pulzációs periódusai 80 és 1000 nap között mozognak, vizuális fényességük amplitudója pedig meghaladja a 2,5 magnitúdót, és alapvetően alaplómódusban, radiálisan pulzálnak.

Templeton et al. (2005) 547 Mira típusú változócsillag periódusváltozását vizsgálta, amelyekre kiterjedt megfigyelések álltak rendelkezésre a *The American Association of Variable Star Observers*¹ (AAVSO) nemzetközi adatbázisában. Számos Mira típusú változócsillag nem monoton periódusváltozást mutatott, hanem mintha a periódusa egy átlagos érték vagy egy periódustrend körül oszcillálna. Zijlstra et al. (2002) az ilyen csillagokat „meanderező Miráknak” nevezte el. Templeton et al. (2005) megjegyezte, hogy bár a meanderező periódusváltozások fizikai mechanizmusa nem világos, a meanderezés időskálái összhangban vannak a köpenyt érintő Kelvin–Helmholtz-féle lehűlési idővel. Azt javasolták, hogy a meanderező periódusváltozások a csillagköpenyt érintő hőmérsékleti relaxációs oszcillációk eredményei lehetnek, esetleg egy termális pulzus által kiváltott globális változásokra adott válaszként. Az a nyolc Mira típusú változó, amelyeknél a periódusváltozás a legszignifikánsabb volt, több másik, periódusváltozást célzó vizsgálatban is azonosítva lett. Azonban az egyes csil-

¹Az AAVSO weboldala: <https://www.aavso.org/>



1.4. ábra. A 408 napos periódusú, Mira típusú változócsillag, a χ Cygni vizuális fénygörbéjének egy részlete. Forrás: Catelan & Smith (2015)

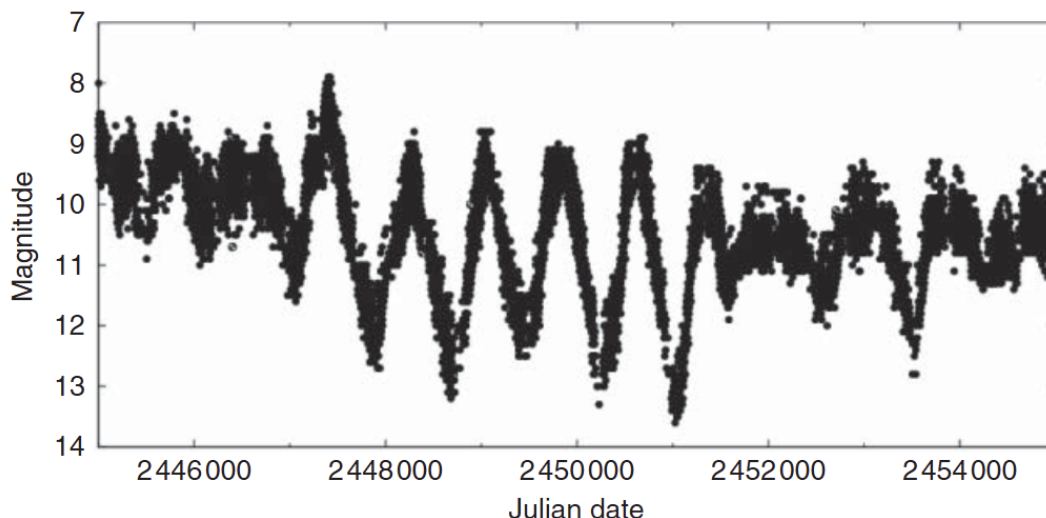
lagokban a periódusváltozás viselkedése nem feltétlen azonos: megfigyeltek például periódus növekedést és csökkenést is.

Felmerült az az érv, hogy azok a Mira típusú változócsillagok, amelyeknél nagy periódusváltozás figyelhető meg, azon AGB csillagok közé tartoznak, amelyek termális pulzusokon mennek keresztül (Wood & Cahn, 1977; Templeton et al., 2005). A Templeton et al. (2005) által vizsgált mintában található Mira típusú változók 1,6%-a mutat ilyen, összhangban az azal az elvárással, hogy ezen csillagok 1-2%-a az, mely éppen egy héjvillanáshoz kapcsolódó termális pulzust él át. Azonban az nem bizonyos, hogy minden nagy periódusváltozás Mira-típusú változókból termális pulzushoz köthető.

Félszabályos változócsillagok

A félszabályos változócsillagoknak (Semi-regular variables, SRs) olyan fénygörbéik vannak, amelyekben bár azonosítható egy tartós periodicitás, azok mégsem teljesen egyeznek meg ciklusról ciklusra. Az ilyen csillagok fő periódusai több tíz naptól néhány száz napig terjednek. Kiss et al. (1999) eredményei szerint a félszabályos változók többségében azonosítható két vagy három periodicitás, amelyek egy része különböző pulzációs módusok együttes jelenléte okozza. Más csillagokban a pulzációnál sokkal lassabb változások is megfigyelhetők. Az S Persei nevű vörös szuperóriás fénygörbéjét, amely egy félszabályos hideg szuperóriás (SRc), a 1.5 ábra mutatja.

Az ún. hosszú, másodlagos periódusokat számos Mira és SR típusú változónál megfigyelték már, ám az eredetüket továbbra is rejtély övezi. Nicholls et al. (2009) azt találták, hogy



1.5. ábra. Az SRc típusú változó S Persei fénygörbéje. A másodlagos periódus hatása 10 éves időskálán fejt ki hatását. Forrás: Catelan & Smith (2015)

akár a csillagok 24–50%-ánál is előfordulhatnak, és a legvalószínűbb magyarázatot a kettősökben látják (Soszyński et al., 2021). Az SR változók periódusváltozásainak meghatározása nehezebb, mint a szabályosabb Mira változók esetében. Ezeket a problémákat részletesen Markova et al. (2008) tárgyalta, és jelenleg még nem találtak a kérdésre kielégítő megoldást. Egy Mira típusú csillag félszabályossá alakulását okozhatja például egy termális pulzus is.

1.3. Termális pulzusok változócsillagokban

Abban az esetben, ha egy csillag szabályos vagy félszabályos változóként pulzál, a termális pulzusok közvetlen hatásaként a pulzációs periódus gyors változását, vagy pulzációs módusok megjelenését és/vagy eltűnését figyelhetjük meg.

Jelenleg három ismert Mira típusú vagy félszabályos változóról feltételezett, hogy éppen termális pulzuson mennek át. Ezek név szerint a T UMi, az R Hya és az RU Vul. Ezekről a változó csillagokról több tíz, de sokszor több száz évre visszamenőleg is lehet észlelési adatokat, feljegyzéseket találni. Ezen megfigyeléseket kombinálva a legkorszerűbb csillagfejlődési- és pulzációs modellekkel, mint a MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics, Paxton et al. (2019)) és GYRE (Townsend & Teitler, 2013), lehetőségünk adódik becslést adni a csillag egyes fizikai paramétereire, valamint jóslatot tenni arra vonatkozóan, hogy ez egyes, legjobban illeszkedő modellek alapján a következő 10-100 évben mikor fog a jelenleg megfigyelhető periódus csökkenés visszafordulni. Ilyen jellegű analízist a három jelölt közül eddig kettőre, a T UMi (Molnár et al., 2019) és R Hya (Joyce et al., 2024) csillagokra végeztek

el. Ezek a vizsgálatok az RU Vul változóra is elvégezhetőek, ez adta a munkám motivációját is.

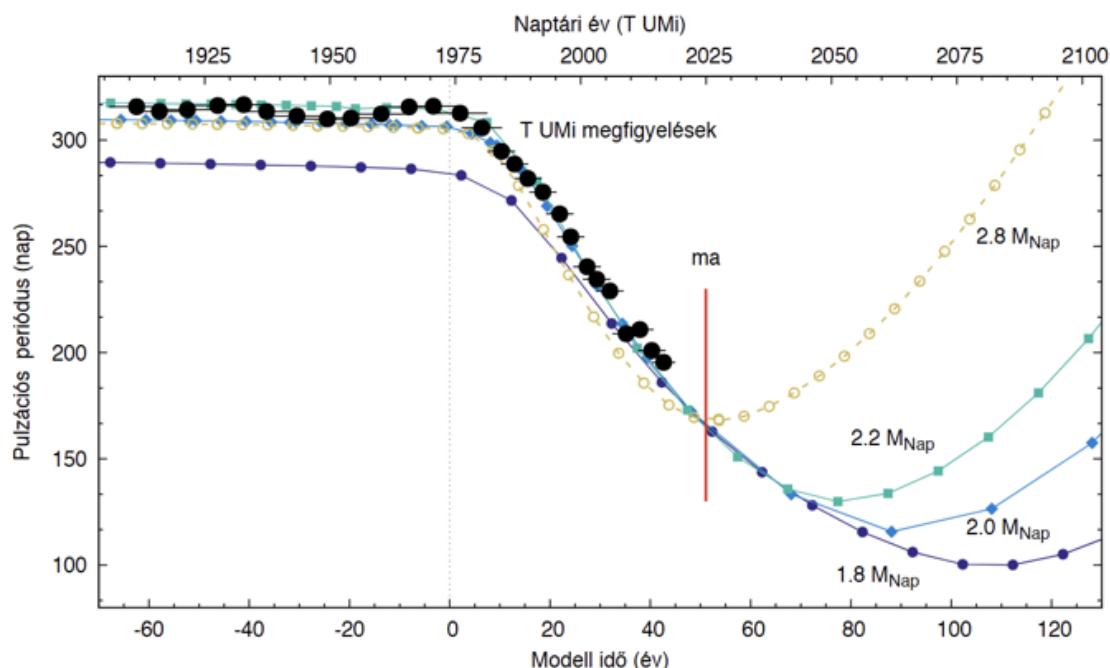
1.3.1. T Ursae Minoris

A T UMi elnevezésű, $V = 11.5$ magnitúdójú, M-típusú, magányos, Mira-típusú változócsillag fényességváltozásait először Campbell & Pickering (1912) közölte. A csillagot több mint egy évszázadon keresztül figyelték meg, mind hivatásos, mind amatőr csillagászok, többnyire fényképes adatok és vizuális becslések alapján. Az idő nagy részében a T UMi Mira típusú pulzációi nem mutattak különösebb érdekességet, 300 és 330 nap közötti periódusú hullámzásokat figyeltek meg 4,0–5,5 magnitúdós amplitúdóval az optikai sávban. A gyors perióduscsökkenés kezdetét először Gál & Szatmáry (1995) figyelte meg. Azóta a csillagot gondosan figyelik, és az elmúlt 20 évben CCD megfigyeléseket is gyűjtöttek, főként a Johnson V-sávban.

A pulzációs periódus meredek csökkenésének lehetséges okait először részletesen Szatmáry et al. (2003) vizsgálták. Ők a periódusváltozás mértékét $(-3, 8 \pm 0, 4)$ nap/év-nek állapították meg, és enyhe csökkenő trendet találtak a csillag pulzációjára átlagolt intenzitásában is. Azt a következtetést vonták le, hogy a csillag valószínűleg egy termális pulzus kezdeténél tart, amikor a csillag sugara és fényessége csökken, és a sugarának változása felelős a pulzációs periódus hirtelen csökkenéséért. Felvetették azt a lehetőséget is, hogy a csillag egyszerűen átvált az első felhangról a második felhangú pulzációra. Ez utóbbi azonban azt feltételezné, hogy a pulzációs periódus a közeljövőben stabilizálódik. Ezt követően Uttenthaler et al. (2011) azt találta, hogy a csillag pulzációs periódusa 229 napra rövidült, majd hirtelen 113,6 napra ugrott. Ez azt jelezheti, hogy a csillag az alaplómódusról az első felhangú módusra váltott, amit valószínűleg a termális pulzus (továbbiakban TP) indított el.

A probléma megoldása érdekében Molnár et al. (2019) részletes vizsgálatot végzett. Megállapították, hogy az alaplómódusú radiális pulzáció periódusa az elmúlt 40 év során folyamatosan csökkent, ami a 1.6. ábrán is követhető. Ugyanakkor azt találták, hogy a csillag nem egyszerű módusváltáson ment át, hanem kétmódusúvá vált, az alaplómódus mellett megjelent az első felhang is, 110 nap körüli periódussal. Elméleti evolúciós modelleket és csillagoszcillációs spektrumokat számoltak ki a MESA és GYRE programok segítségével, hogy megvizsgálják, vajon a T UMi pulzációs tulajdonságaiban bekövetkezett változások – és az ezekhez kapcsolódó kezdeti csillagsugár-csökkenés – a TP kezdetének következményei-e. A megfigyelésekből különböző megkövetéseket származtattak: a Mira-típusú változó szakasz kezdeti pulzációs periódusát, a félszabályos szakasz két módusának periódusait, valamint az alaplómódus periódusváltozási sebességét. Ezeket összehasonlították a modellhálók TP-ivel, hogy következtetéseket vonjanak le a csillag alapvető tulajdonságairól, különösen a kezdeti

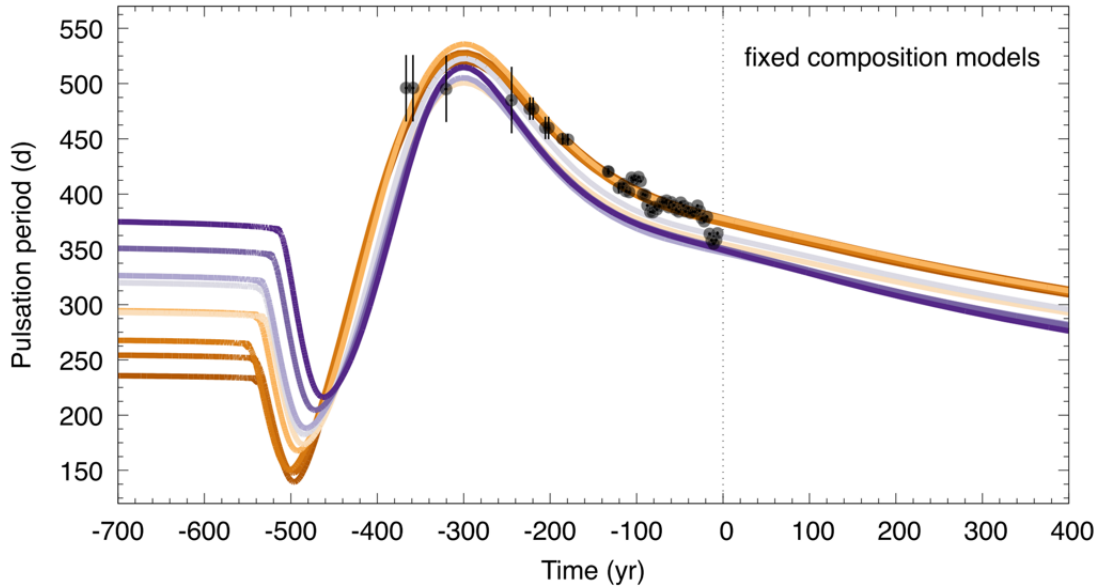
tömegről. A T UMi optimális kezdeti tömegét $M_{\text{ZAMS}} = 2.0 \pm 0.15 M_{\odot}$ értékre becsülték. Ez volt az első alkalom, hogy egy izolált TP-AGB csillag tömegét ilyen átfogó módon határozták meg, a korábbi próbálkozásoknál sokkal részletesebb aszteroseizmikus és klasszikus korlátokat alkalmazva. Azt is megjósolták, hogy a T UMi periódusának csökkenése további három-öt évtizeden keresztül folytatódik, és a periódusváltozási sebesség változásai néhány évvel vagy egy évtizeddel a jelenlegi trend megfordulása előtt észlelhetők lesznek. A következő években bekövetkező további periódusváltozások tovább pontosítják majd a meghatározott tömeget.



1.6. ábra. A T UMi pulzációs periódusa az idő függvényében, illetve az illesztett evolúciós modellek. A csillag a TP kezdeti szakaszában van. Forrás: Molnár et al. (2019)

1.3.2. R Hydrae

Az R Hydrae az elsőként felfedezett Mira-típusú változócsillagok egyike. Bár először 1662-ben dokumentálták, változékonyságát csak 1704-ben ismerték fel (Hoffleit, 1997). Az általam ebben a fejezetben tárgyalt három csillag közül ez rendelkezett a leghosszabb adatsorral. Az R Hya felfedezése óta jelentős, hosszú távú periódusváltozásokat mutat, a pulzációs periódusának csökkenését a 18. század végétől kezdve különböző adatforrásokból lehet nyomon követni. Bár a 18. század nagy részéből hiányosak a feljegyzések, a csillagot néhány korábbi, 17. századi térképen is azonosították (Zijlstra et al., 2002). Ezek azt sugallják, hogy a periódus ekkor stabil volt, körülbelül 495 nap, ami a periódus csökkenésének időtartamát legfeljebb 300 évre korlátozza.



1.7. ábra. Az R Hya pulzációs periódusa az idő függvényében. A csillag a TP lecsengő fázisában van. Forrás: Joyce et al. (2024)

A pulzációs periódus nagy változásai jelentős változásokat jeleznek a csillag köpenyének szerkezetében. Wood & Zarro (1981) megmutatták, hogy az R Hya periódusváltozásai illeszkednek a termális pulzusok evolúciós modelleivel. Az általuk javasolt forgatókönyv szerint a legkorábbi megfigyelések – különösen a 18. századi szünet – a héliumhéj villanás utáni maximális tágulási fázisnak felelnek meg, amely óta a csillag folyamatosan zsugorodik. Ezen modell alapján a tényleges héliumhéj villanás körülbelül 550 évvel ezelőtt történt. Figyelembe véve, hogy a pulzációs periódus úgy tűnik, hogy az 1950-es években megállt, alternatív hipotézisek is felmerültek az R Hya evolúciós állapotával kapcsolatban. Zijlstra et al. (2002) azt javasolták, hogy jelenleg a csillag köpenyének relaxációja zajlik, ami nemcsak a külső rétegek szerkezetét, hanem a pulzációs módust is megváltoztatja. Ebben az esetben módusváltást figyelni kell. Az idáig tárgyaltak miatt továbbra is bizonytalanság övezte az R Hya pulzációs periódusának megváltozásának okát. A probléma megoldását Joyce et al. (2024) hozták el, ahol építettek az előzőekben részletesen bemutatott Molnár et al. (2019) publikációban tárgyalt modellezési módszerekre. Megmutatták, hogy az R Hya a termális pulzus lecsengő fázisban van, ahogy ez a 1.7. ábrán is látható, valószínűleg 9. és 16. TP között.

A csillag várhatóan összesen 20–35 termális pulzusra fog keresztülmenni, és a jövőben valószínűleg széncsillaggá válik (jelenleg még nem széncsillag). A legjobban illeszkedő modellek alapján a TP az R Hya esetében körülbelül öt évszázaddal ezelőtt kezdődött, a csillag a fényességének maximumát pedig körülbelül 300 éve érte el. A lecsengő fázis várhatóan néhány évezredig folytatódik, mielőtt a csillag ismét tágulni kezd. Ezt a fázist nem lehet olyan

pontosan modellezni, mint a TP beindulását (pl. a T UMi esetén), emiatt az R Hya lehet kisebb tömegű ($2\text{--}3 M_{\odot}$ és fémszegényebb ($[\text{Fe}/\text{H}] < 0$), vagy nagyobb tömegű ($3\text{--}4 M_{\odot}$) és fémgazdagabb ($[\text{Fe}/\text{H}] > 0$) csillag is.

1.3.3. RU Vulpeculae

Az RU Vul egy félszabályos változócsillag, melyről Uttenthaler et al. (2011) mutatták meg, hogy egy fémszegény ($[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.5$), feltehetően kis tömegű változó, aminek az amplitúdója és periódusa körülbelül 1954 óta csökken. Az AAVSO és az *All-Sky Automated Survey for Supernovae*² (ASAS-SN) adatbázisokban elérhető fotometriai adatok azt sejtetik, hogy ez a csillag is az utóbbi években egymódusúból kétmódusú pulzációba váltott, ám a nagyrészt amatőr csillagászok által rögzített adatok minősége, rendszeressége és pontossága a lényegesen lecsökkent amplitúdó miatt nem egyértelmű. A 1.1 ábra szemlélteti a pulzáció periódusának és amplitúdójának csökkenését 2007-ig. Az 1935-ben szabadszemmel is jól megkülönböztethető, 1 magnitúdós amplitúdó közel negyedére csökkent 60 év leforgása alatt. A pontos modellezéshez azonban esszenciálisak a minél pontosabb megfigyelések, így a csillag jelenlegi pulzációs karakterizálásához a Piskéstetői Observatórium³ 2022. januárja óta végez méréseket. A csillag alapvető adatai a SIMBAD⁴ adatbázis alapján a 1.1. táblázatban találhatóak.

α [óra]	δ [fok]	π [mas]	B [mag]	V [mag]
20,6480	+23,2587	0,579	10,86	9,18

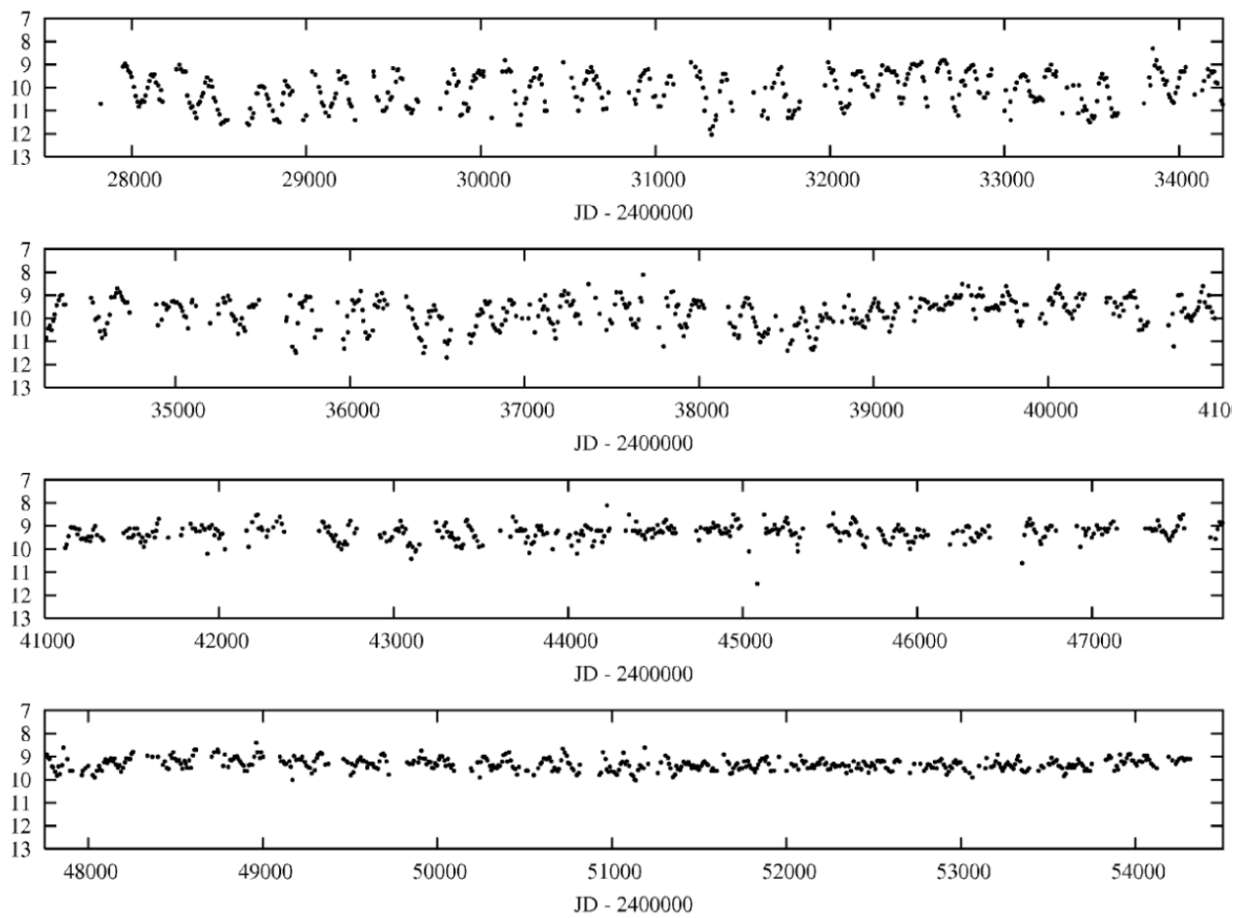
1.1. táblázat. Az RU Vulpeculae adatai a SIMBAD adatbázis alapján.

A munkám célja tehát precíz többszín fotometria felhasználásával a piskéstetői mérésekből igazolni azt a sejtést, miszerint az RU Vul pulzációja kétmódusúvá alakult. Ez lényegesen megnöveli a jövőben a termális pulzusra illesztett modellek pontosságát. Emellett célom még archív adatok segítségével feltérképezni a változó pulzációs periódusának hosszútávú időfejlődését, amiből pontosan meghatározható a termális pulzus beindulásának időpontja, mely szintén lehetőséget teremt az előzőekben említett jövőbeli modell illesztésekre, és amiből nagyságrendi becslés adható a csillag tömegére.

²Az ASAS-SN weboldala: <https://www.astronomy.ohio-state.edu/asassn/index.shtml>

³A Piskéstetői Observatórium weboldala: <https://pizkesteto.konkoly.hu/>

⁴A SIMBAD adatbázis weboldala: <https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>



1.8. ábra. Az RU Vul fénygörbéje 1935-től. A változó periódusa és fényessége körülbelül 1954 óta csökken. Forrás: Templeton et al. (2008)

2. fejezet

Adatredukció

2.1. Piskésetetői mérések

Az általam feldolgozott RU Vul mérések a Piskésetetői Observatórium RC80-as távcsövének CCD kamerájával készültek. A többszín-fotometriához szükséges észlelések Sloan-féle g , r és i színszűrőkben történtek, 20x20 ívperces látómezővel, a lehető legtöbb, viszonylag fényes összehasonlító csillagot tartalmazva. A csillagot ideálisan heti háromszor mérték. Egy éjszaka alatt összesen 11 kép készült színszűrőnként, g -ben 5, r -ben 3, i -ben 2 másodperces expozíciós idővel. A 2022 és 2023 közötti mérések alatt összesen 162 napnyi fotó, így közel 5200 kép készült az RU Vulpeculae-ról. A munkám első nehézsége tehát egy olyan fotometriai pipeline összeállítása volt, ami egyszerre tud kezelni ilyen nagy mennyiségű, az év során különböző időpontokban, valamint eltérő észlelési körülmények között készült mérést.

2.2. Képkorrekció

A fotometria előtt érdemes pár szót ejteni a felvételekről. A képek FITS formátumban vannak tárolva, melyek vizualizálására a **SAO ds9** (Joye & Mandel, 2003) szoftvert, míg a képeken való operációkhoz a **fitsh** (Pál, 2012) programcsomagot használtam. Mivel nagy mennyiségű képpel dolgoztam egyszerre, ezért a továbbiakban bemutatott parancsokat az általam írt **BASH** szkriptek segítségével hajtottam végre.

A mérés során a célponttól frissen készült képek az úgynevezett nyers, vagy objektum képek. Ezek különféle zajokkal terheltek, melyek korrigálására minden mérés előtt vagy után háromféle kalibrációs kép készül, melyek a következők:

1. **Bias:** Bezárt shutternél, páratlan számú, nulla expozíciós idővel készült képek. Ezeken a felvételeken a kamera alapzaja szerepel, ami az AD-konverter és az erősítő zajából

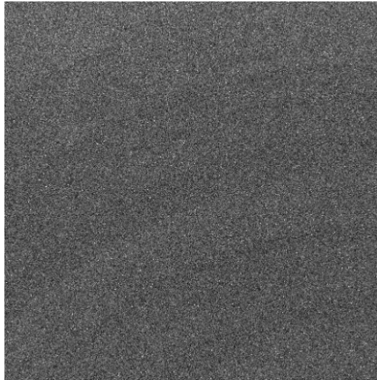
tevődik össze. Ezen képek mediánjából készítettem el az úgynevezett master biast. A képek átlagát venni elméleti hiba lenne, hiszen az egyes bias képekre beütődő kozmikus részecskék által keletkezett csík elvinné az átlagot, így nem pusztán az alapzaj lenne a képen. Az így készült master bias minden pixelét kivonjuk az összes nyers kép megfelelő pixeléből.

2. **Sötétáram/dark:** Bezárt shutternél, páratlan számú, a nyers képnek megfelelő expozíciós idővel készült képek. A CCD nem tud különbséget tenni a fotonok beütődéséből gerjesztődő, majd csapdázódó elektronok, illetve a hőmozgás miatt gerjesztődő, majd csapdázódó elektronok között. Ezzel az expozíciós idővel azt az addicionális zajt mérjük, ami a CCD-n való hőmozgás következtében csapdázódó elektronok miatt jelenik meg. Az összes dark képből ki kell vonni a master biast, majd az így kapott felvételek mediánját véve megkaptam a master darkot. Ezzel ismét redukáltam a nyers képeket. A sötétáram zaját minimalizálni lehet a CCD kamera hűtésével, amit a legtöbb mérési távcsőnél, így a piszkéstőinél is hűtőfolyadékkal ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) meg is tesznek.
3. **Flat:** Nyitott shutternél, páratlan számú, a kupola belső falára helyezett, egyenletesen megvilágított fehér felületről készült képek. Az expozíciós időt úgy állítják be, hogy a beütésszám ne legyen túl távol sem, illetve túl közel sem a szaturációs limithez (kb. 30000 ADU). Ezután készítenek egy, a flat képek expozíciós idejével megegyező expozíciós idejű master dark képet az előző pontban leírtak alapján. Ezt a master darkot és a master biast levontam minden egyes flat képből, majd vettem ezen képek mediánját, így megkapva a master flatet. Ily módon az optikai elemeken elhelyezkedő kosz- és porszemcsék váltak láthatóvá, illetve a kamera egyes pixeleinek eltérő intenzitás-érzékenysége. Utolsó lépésként a bias- és darkmentesített felvételeket normáltam a master flattal, így mindenhol azonos skálán voltak a pixelek érzékenységei.

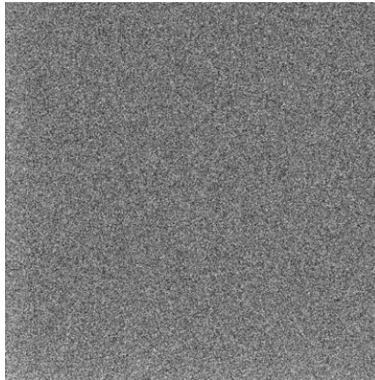
A zajokról tipikus példák a 2.1. ábrán találhatóak. A kimért három jellemző zajra korrigálva az összes nyers képet, megkaptam a korrigált képeket. Ezt a `fitsh` csomag `ficalib` nevű parancsával hajtottam végre, ami a fentebb leírtak szerint végzi el a korrekciót a három effektusra. Ezeknél a felvételeknél az eredeti, átlagosan 850 ADU-s háttérzaj 10 körülire csökkent. A korrekciós képek hiánya miatt meg kellett szabadulnom 2 teljes napnyi adattól.

2.3. Asztrometria

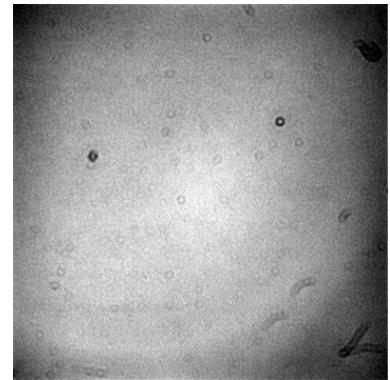
Hogyan jutunk el 5200 CCD-n rögzített képből egy kész fénygörbéig? A válasz a digitális képfeldolgozásban rejlik, ugyanis a képet pixelenként vizsgálva nyerhető ki információ a vizsgált objektumról. Egy felvétel összes pixeléhez hozzá van rendelve egy szám, ami az adott pixelre



(a) Master bias. Az itt megfigyelhető AD-converter és erősítő zaja 800 beütésszám körül volt pixelenként.



(b) Master dark. Az itt megfigyelhető hőmozgásból származó zaj értéke 30 beütés volt pixelenként.



(c) Master flat. Jól láthatóak a különböző koszos és por-szemcsék. A széleken koncentrikusan megfigyelhető az érzékenységekülönbség. Optimális esetben egy teljesen fehér, minden pontban megegyező pixelértékű felületet kéne látnunk.

2.1. ábra. Példák a korrekciós képekre.

eső fény mennyiségét jellemzi a többihez képest. A képeken minden csillagnak van egy véges mérete a CCD-n (Point Spread Function, PSF), mely a távcső- és kamerarendszer optikai elrendezéséből, az aktuális légköri viszonyoktól, valamint a csillag fényességéből fakad. Az apertúra fotometria lényege, hogy egy adott csillag PSF-jébe eső pixelek beütésszámainak felösszegzéséből származtathatjuk a csillag relatív fluxusát (Howell & Tavackolimehr, 2019).

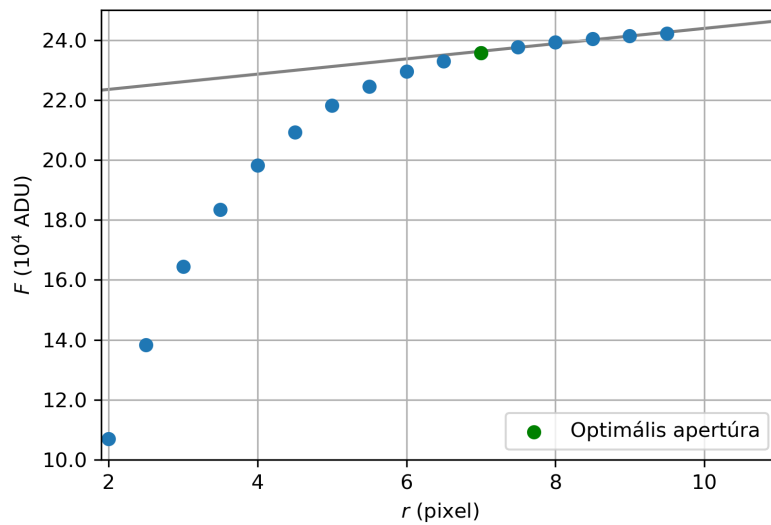
A `fistar` parancs segítségével meghatároztam minden képen a csillagok középpontjának pozícióját adott fluxusprofil és fluxus limit alapján. Egy ideális képen a csillag PSF-je egy Gauss-eloszlást követ. A fotometriához használandó standard összehasonlító csillagok fényessége 14-15 magnitudo közötti, ezért a lehető legtöbb csillagot próbáltam beazonosítani a képeken.

Mivel a képeken nem végeztem külön asztrometriát, ezért a fotometria elvégzéséhez a képeken lévő csillagok pixelkoordinátáit használtam. Ennek érdekében az egyes képeknek egymáshoz képest teljes fedésben kellett lenniük, amit úgy értem el, hogy minden éjszaka középső képét az adott észlelés referenciájának választva a többi képet transzformáltam úgy, hogy egybe essenek a referenciával. Ehhez először a `grmatch` nevű paranccsal legeneráltam azt a transzformációs mátrixot, ami a képek csillagainak koordinátáit a referencia kép csillagaival megegyező koordinátákba transzformálja. Ezután a `fitrans` parancs segítségével elvégeztem ezeket a transzformációkat a képeken. A derotátor és a követő motor precizitása, illetve a kis expozíciós idők következtében a legnagyobb elmozdulás a képeken 2 pixel volt. Annak ellenére, hogy ez egy alacsony érték, az általam használt halvány standard csillagoknál

ez is jelentős, hiszen ezek nagyságrendileg 4-5 pixel körüli félérték-szélességgel rendelkeztek. A látómezőben lévő csillagok nagy része, így az összehasonlító csillagok is nagyon halványak voltak, emiatt ezután minden napra az egy színszűrőben készült képeket összeadtam `ficombine` parancs használat, így lényegesen növelve a detektált csillagok számát és azok jel-zaj arányát.

Bizonyos felvételeken az égbolt olyan mértékben felhős volt, hogy mindössze 30-nál kevesebb csillag volt azonosítható. Ezek a képek túlnyomórészt télen készültek. Ez olyan kevés adat, hogy nem tudott rá lefutni a transzformáció, illetve, ha le is futott volna, ezeken a képeken nem lettek volna fellelhetőek a standard rendszerbe való áttéréséhez szükséges összehasonlító csillagok. Ennek következtében meg kellett szabadulnom további 57 napnyi képtől, így 3400 felvétel maradt az eredeti 5200-ból.

2.4. Apertúra-fotometria



2.2. ábra. Az RU Vul optimális apertúrája *g* szűrőben, mely 7 pixelnek adódott.

A képkorrekciónak után fennmaradó háttér több tényezőtől származhat, például nem felbontott objektumok sugárzásából vagy a légkör szórásából. Minden csillag körül felvettem egy külső és belső sugárral rendelkező körgyűrűt, az úgynevezett „sky annulus”-t, és ezen a tartományon összegeztem az intenzitás értékeket, majd leosztottam a körbefogott pixelek számával. Ezután ezt az értéket pixelenként levontam a csillagok képéből, így minimalizálva a fennmaradó zajt is. Ezeket a lépéseket a `fiphot` parancs segítségével hajtottam végre.

Az apertúra-fotometria lényege, hogy egy tetszőlegesen definiált tartományon belül összegezzük a beütésszámokat. A csillagok, mint pontszerű fényforrások, valamint a távcső tubus alakja miatt kör alakú apertúrát volt célszerű alkalmaznom. Az apertúrát a sugara, r , jellemzi, és a méretének kiválasztása során fontos szempont, hogy ne legyen se túl kicsi (hiszen akkor nem a csillag teljes fluxusát mérjük meg), se túl nagy (mert akkor jelentős mennyiségű háttérzajt is belemérünk). Az optimális apertúra meghatározásához célszerű az I beütésszámot ábrázolni az apertúra sugara függvényében. Ez a 2.2. ábrán található. Az optimális apertúra az a pont, ahol a növekedés lelassul, és a görbe konvergálni kezd egy kis meredekségű egyeneshez (Howell, 1989). A meghatározott optimális apertúrára elvégezve az összegzést adódik az RU Vul m_{ins} instrumentális magnitúdója.

3. fejezet

Bekötés a standard rendszerbe

A piszkéstetői felvételek alapján készített fénygörbét több különböző helyszínen és távcsővel végzett észleléssel szeretném összehasonlítani. Ennek következtében nem elég relatív mennyiségekkel foglalkozni, hanem az RU Vul standard fényességét kell meghatározni mindegyik színszűrőben. Ehhez szükséges olyan csillagokat választani, amelyek a látómezőben vannak, majd elvégezni rájuk is az apertúra-fotometriát az előző fejezet szerint. Ezeknek az úgynevezett standard csillagoknak több szűrőben is jól ismert, időben állandó fluxusa és magnitúdója van.

3.1. Standard összehasonlítók

Először a *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System* (Pan-STARRS, Chambers et al. (2019)) adataival próbáltam meg elvégezni a transzformációt. A katalógus különösen erős a halvány csillagok és más objektumok katalogizálásában, de fényesebb standard csillagok tekintetében nem éri el néhány más katalógus, például a Gaia vagy a *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) szintjét. Ez annak köszönhető, hogy a Pan-STARRS elsősorban széles látószögű égboltfelmérésre optimalizált rendszer, ami az égbolt nagy területeinek gyors vizsgálatát és halvány objektumok, tranziensek, kisbolygók azonosítását célozza. Az RU Vul látómezőben emiatt csak halvány csillagok voltak fellelhetőek. Sajnos a katalógus ebben a régióban csak 10 darab standard csillagot tartalmazott, és nem rendelkezett 14 magnitúdónál fényesebb csillagokkal. Ez nem volt elég, mivel egyrészt az RU Vul amplitúdója nagyon kicsi, másrészt az összehasonlítókhöz képest az RU Vul sokkal fényesebb (lásd, 1.1. táblázat).

A probléma feloldását egy innovatív megközelítés tette lehetővé. A Gaia harmadik adatközlése újdonságként fluxuskalibrált, alacsony felbontású spektrofotometriát biztosít 220 millió objektum számára az XP spektrumon ($330 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1050 \text{ nm}$). Ezekből az adatokból szintetikus fotometria nyerhető ki, amennyiben a vizsgált színsáv teljesen beleesik ebbe a

hullámhossztartományba (Gaia Collaboration et al., 2023). Az általam használt Sloan rendszer g , r és i szűrői ezen a tartományon belül esnek. A hivatkozott tanulmányban továbbá azt is megmutatták, hogy ezen színszűrők esetén egy nagy mennyiségű referencia-minta valódi fényessége és az ezekre generált szintetikus fényességek közötti különbség mediánja kisebb volt, mint 2,5 millimagnitudo, a szórás pedig kevesebb mint 12 millimagnitudo. Ez a pontosság elegendő ahhoz, hogy az RU Vul alacsony amplitúdójú fényességváltozását kellő bizonyossággal meghatározhassuk.

Az RU Vul pozíciója körüli 15 ívperces sugárban legeneráltam tehát a standard csillagok szintetikus fényességeit. Az ehhez használt ADQL utasítás a Függelékben található. Az így kapott csillagok koordinátáit leképeztem a felvételek pixel koordinátára, ezáltal beazonosítva őket. A képeken átlagosan 200 standard csillag volt beazonosítható, ami jelentősen csökkentette a bizonytalanságot a korábban elérhető 10 csillaghoz képest.

A beazonosítást követően elvégeztem az apertúra-fotometriát az összes standard csillagra az előző fejezetben taglaltak szerint. Fontos megjegyezni, hogy a választott apertúrának minden csillag esetén meg kell egyeznie az RU Vul esetén alkalmazott, optimális apertúrával, mivel ekkor mérünk azonos mennyiségű fennmaradó háttérrel. Ennek eredményeképpen már elegendő adat állt rendelkezésemre a standard transzformáció elvégzéséhez.

3.2. Standard transzformáció

A soron következő összes számítás alatt feltételeztem, hogy a képek között eltelt pár másodperc alatt nem változott meg jelentősen a légkör. A számolások elvégzéséhez Python szkripteket írtam, melyekhez a beépített parancsokat és a `numpy` nevű csomagot használtam. Első lépésként az apertúra-fotometria végeredményeként kapott F_{rel} relatív fluxusértékeket átváltottam a következő képlet segítségével m_{ins} instrumentális magnitúdóra:

$$m_{\lambda, \text{ins}} = -2.5 \log(F_{\lambda, \text{rel}}) \quad (3.1)$$

Ahol λ a szűrő színe.

Az összes standard csillag fényességére egy adott éjszaka, egy adott színszűrőben a következő kapcsolat áll fent a standard fényesség és instrumentális között:

$$M_{\lambda} = m_{\lambda, \text{ins}} + a_{\lambda}C + b_{\lambda} \quad (3.2)$$

Ahol M_{λ} a katalógusbeli standard-fényesség, $m_{\lambda, \text{ins}}$ az instrumentális magnitudo, C a katalógusbeli $g - i$ színindex, a_{λ} a meredekség, b_{λ} pedig a tengelymetszet.

A standard-és instrumentális magnitudo közötti légtömeg korrekciót azért nem veszem fi-

gyelembe a csillagokra, mert az összes standard csillag 10 ívpercnél kisebb távolságra van egymástól, ilyenkor csak mindegyikhez hozzáadódik jó közelítéssel megegyező nagyságú eltolás, ami beleolvad a b_λ tengelymetszetbe. Vegyük a következő átalakítást:

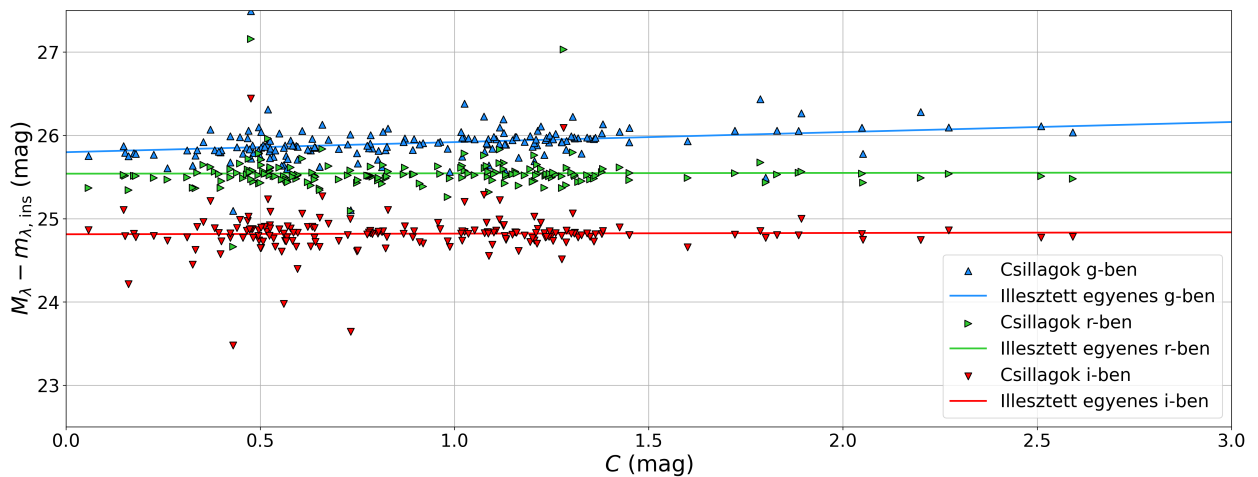
$$M_\lambda - m_{\lambda, \text{ins}} = a_\lambda C + b_\lambda \quad (3.3)$$

Így már egyenes illeszthető a standard csillagok adataira, amelyből meghatározhatóak a paraméterek.

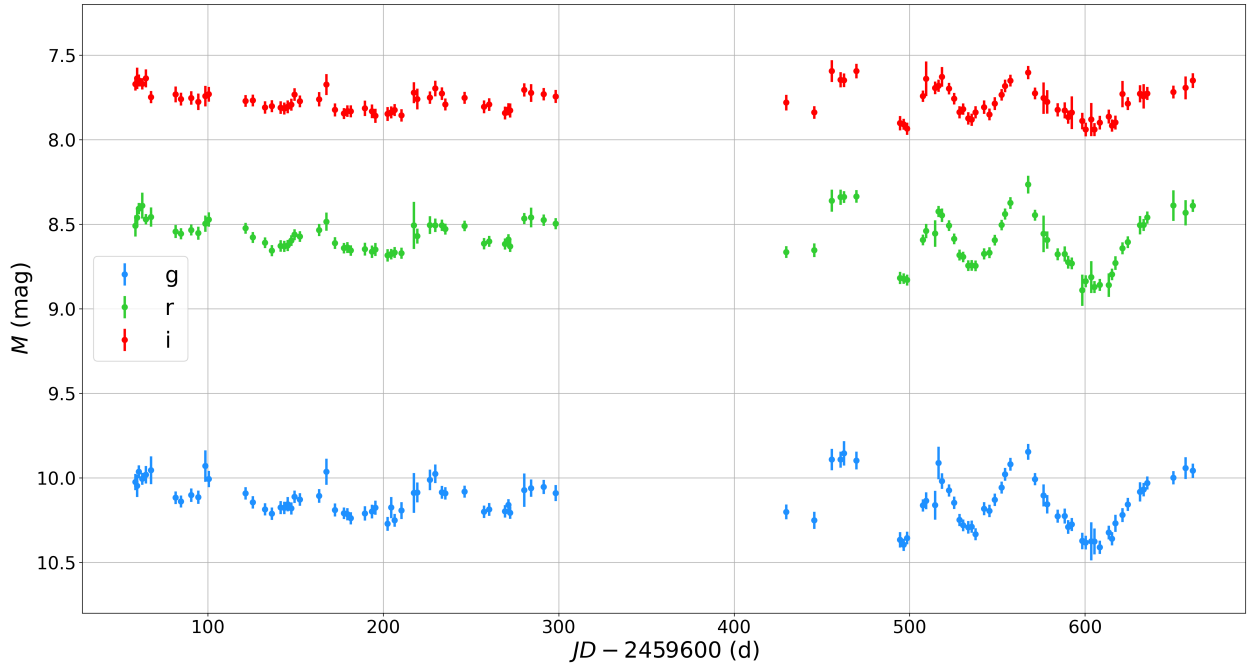
Miután minden estére elvégeztem az illesztést szűrőnként, fontos figyelembe venni, hogy az a_λ meredekség színszűrőnként állandó az összes mérés alatt, hiszen ez pusztán a távcsövet jellemzi. Átlagolva az összes este illesztésére kapott meredekségeket színszűrőnként adódik a távcsövet jellemző, valódi $\langle a_\lambda \rangle$ paraméter. A tengelymetszet viszont változhatlanul hagyom, mert az estéről-estére változó. A meredekségek a 3.1. táblázatban találhatóak. Egy példa az illesztésről pedig a 3.1. ábrán látható.

Szűrő	$\langle a_\lambda \rangle$
g	0.1337 ± 0.0368
r	-0.0013 ± 0.0183
i	-0.0046 ± 0.0154

3.1. táblázat. Az RC80 fotometria standardizálásának korrekciós tagjai a $g - i$ színindex függvényében: az illesztett egyenesek meredekségeinek átlagai különböző színszűrők esetén.



3.1. ábra. Illesztés eredménye egy adott, referencia napon. A számolt átlagmeredekségek korrelálnak az itt látható meredekségekkel.



3.2. ábra. Az abszolút fotometria eredményeként kapott fénygörbék. A téli megfigyelések jelentős része nem volt használható a magas zajszint és/vagy alacsony horizont feletti magasság miatt. A standard csillagok nagy számának köszönhetően a alacsonyak voltak. A fénygörbe alakulása arra utal, hogy a csillag pulzációja nem egymódusú.

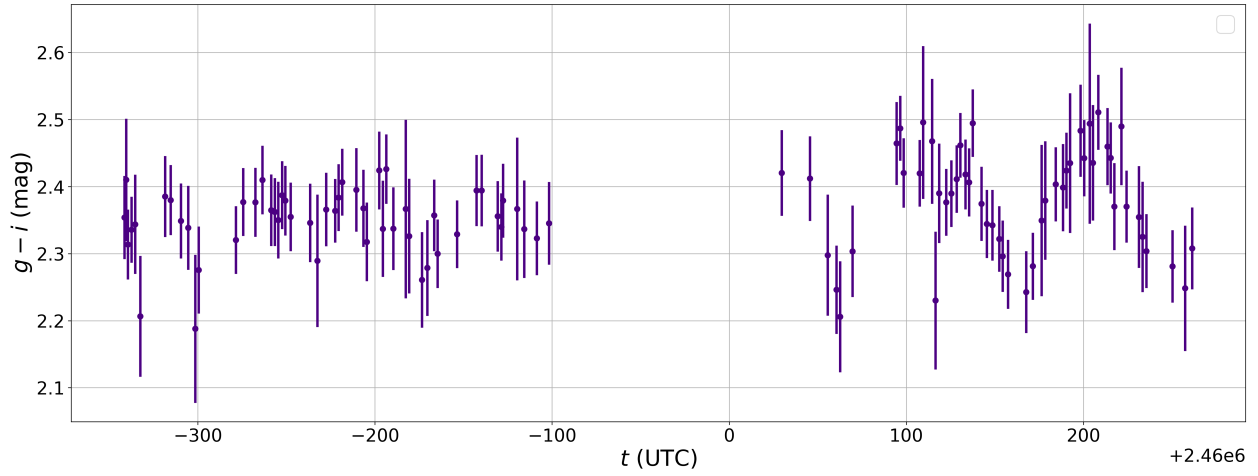
A fentebb ismertetettek alapján származtatható az RU Vul standard magnitúdója is:

$$M_{\lambda} = m_{\lambda, \text{ins}} + \langle a_{\lambda} \rangle C + b_{\lambda} \quad (3.4)$$

Mivel az RU Vul C színindexe változik a pulzáció miatt, ezért egy iteratív eljárást alkalmaztam. Először az előző alfejezetben ismertetett Pan-STARRS katalógusban jegyzett színindexet alkalmaztam a számításnál. Az így származtatott g , r , i fénygörbéből minden napra kiszámoltam a $g-i$ színindexet, majd ebből újra kiszámoltam a g , r , i fénygörbét.

Az eredmény a 3.2. ábrán, az iteráció végén kapott színindex pedig a 3.3. ábrán található. Az abszolút fotometria során kapott fénygörbe részletesen lefedi a megfigyelési időszakot, kivéve a téli hónapokat, amikor az RU Vul alacsony horizont feletti magassága, és/vagy felvételek jelentősen magasabb zajszintje miatt nem volt használható adat. A nagy számú szintetikus standard csillagok adatainak köszönhetően a származtatott bizonytalanságok alacsonyak voltak. Az eredmények alátámasztják azt a sejtést, hogy az RU Vul pulzációja egymódusúból kétmódusúvá vált. Ennek részletes igazolását a következő fejezetekben bemutatott analízis tartalmazza.

A hibaszámítást a Gauss-féle hibaterjedéssel végeztem, hiszen a szorzatokban csak füg-



3.3. ábra. Az iteráció végén kapott $g - i$ színindex. Az értéke nem állandó, viszont egy 0.2 magnitudós határon belül marad, miközben a katalógusbeli átlagérték körül ingadozik.

getlen mennyiségek vannak:

$$\Delta M_\lambda = \sqrt{(\Delta m_{\lambda, \text{ins}})^2 + (\langle a_\lambda \rangle \Delta c_{\text{ins}})^2 + (c_{\text{ins}} \Delta \langle a_\lambda \rangle)^2 + (\Delta b_\lambda)^2} \quad (3.5)$$

Ahol $\Delta \langle a_\lambda \rangle$:

$$\Delta \langle a_\lambda \rangle = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N (\Delta a_{\lambda, i})^2 + \sigma_{a_\lambda}^2} \quad (3.6)$$

Itt σ_{a_λ} pedig a korrigált empirikus szórása a meredekségeknek. A Pogson-formulára hattanva a Gauss-féle hibaterjedést megkaptam az instrumentális magnitudo hibáját:

$$\Delta m_\lambda = \left| -2.5 \frac{\Delta F_{\lambda, \text{rel}}}{F_{\lambda, \text{rel}} \ln(10)} \right| \quad (3.7)$$

Ahol $\Delta F_{\lambda, \text{rel}}$ a relatív fluxus hibája. A színindex hibája pedig:

$$\Delta C = \sqrt{(\Delta m_g)^2 + (\Delta m_i)^2} \quad (3.8)$$

Ahol Δm_g és Δm_i pedig az RU Vul Pan-STARRS-beli fényességeinek hibái.

4. fejezet

Perióduskeresés

A Lomb-Scargle (Scargle (1982), Lomb (1976)) periodogram egy széles körben használt módszer időben egyenletlen eloszlású adatok periodicitásának vizsgálatára. A módszert a fejezet több részében is alkalmaztam, sokat merítve VanderPlas (2018) publikációjából, amely részletes elméleti és gyakorlati áttekintést nyújt a témában.

A módszer rövid áttekintése a diszkrét Fourier transzformációval kezdődik:

$$X(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} g_n e^{-2\pi i f_k t_n} \quad (4.1)$$

ahol f_k a k -adik diszkrét frekvencia, N az adatpontok száma, g_n az n -edik adatpont. Ennek a négyzete az úgynevezett teljesítmény, amiből a Schuster-féle periodogram (Schuster, 1898) készíthető:

$$P_S(f_k) = 1/N \left| \sum_{n=0}^{N-1} g_n e^{-2\pi i f_k t_n} \right|^2 \quad (4.2)$$

Ez egyenletes időbeli mintavételezés esetén működik csak, egyébként aliasing-hoz, azaz állcsúcsok megjelenéséhez vezet. A Lomb-Scargle periodogram alakja:

$$P_{LS}(f_k) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\sum_n g_n \cos(2\pi f_k [t_n - \tau]) \right)^2 / \sum_n \cos^2(2\pi f_k [t_n - \tau]) + \left(\sum_n g_n \sin(2\pi f_k [t_n - \tau]) \right)^2 / \sum_n \sin^2(2\pi f_k [t_n - \tau]) \right\} \quad (4.3)$$

Ahol τ minden f_k értékhez úgy van választva, hogy invariáns maradjon az időeltolásra:

$$\tau = \frac{1}{4\pi f} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_n \sin(4\pi f t_n)}{\sum_n \cos(4\pi f t_n)} \right). \quad (4.4)$$

A periodogram eredménye megegyezik azzal a módszerrel, amikor a legkisebb négyzetek módszerével szinuszhullámokat illesztünk minden f_k frekvenciára, és az illesztések alapján „periodogramot” készítünk, amely így időben egyenlőtlen mintavételezés esetén is alkalmazható. A periodogram három fő tulajdonsága:

- A Lomb-Scargle periodogram a Schuster-féle periodogramból lett levezetve (Scargle, 1982), emiatt időben egyenletes mintavételezésre a klasszikus formára egyszerűsödik.
- A periodogram statisztikai jellemzői analitikusan kiszámíthatók.
- A periodogram érzéketlen az adatsor teljes időeltolására.

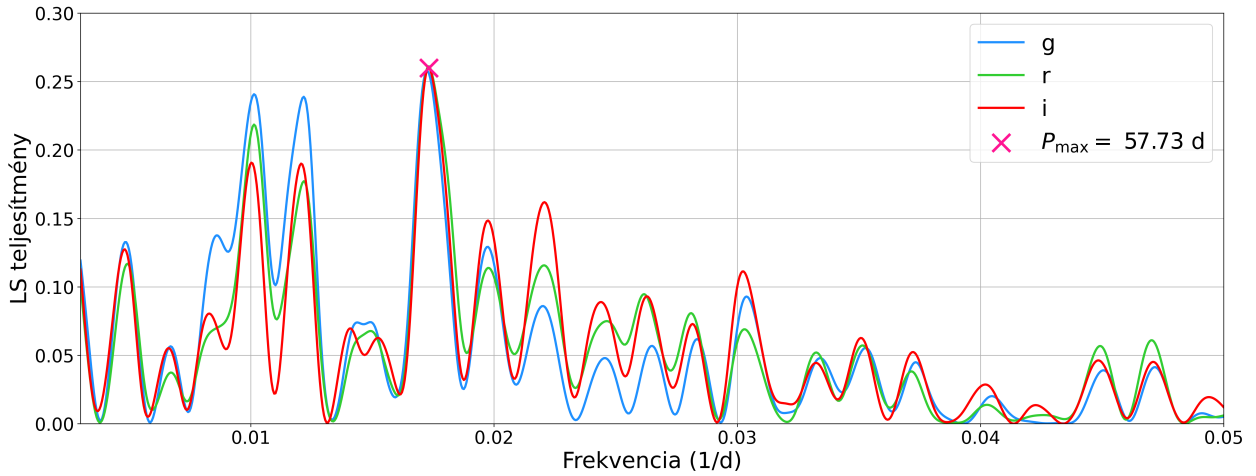
A mérések pontos időpontjait Julián Dátumban (JD) kinyertem a fits headerből, majd átváltottam Baricentrikus Julián Dátumba (BJD). Ez azért fontos, mert a fény véges sebessége miatt, miközben a Föld a pályáján kering, egy adott égitesttől érkező foton akár 8.3 percet is késheket, vagy előbb érkezhethet. Abban az esetben, hogyha ezt nem korrigálnám, akkor a mérések ideje, amelyet Piszkestetőn JD-ben mérünk, évente akár 16,6 perces eltérést mutathat. A problémát úgy oldottam fel, hogy kiszámítottam, mikor érkezett volna meg a fény az RU Vulról a Naprendszer tömegközéppontjához, és mikor érkezett volna meg a Földhöz, majd ezen értékek különbségével korrigáltam a mérést. Ezt a számítást, illetve a fejezet soron következő lépéseit az **Astropy** (Robitaille et al., 2013) nevű csomag segítségével végeztem el **Pythonban**.

A rendelkezésemre álló mindhárom színszűrő esetén kiszámoltam az LS periodogramot. Periódusok helyett itt frekvencia függvényében ábrázolom a P_{LS} teljesítményt, vagyis frekvenciaspektrumot készítek. Ennek előnye, hogy a frekvenciaspektrum egyenletesen mintavételezett, míg a periodogram mintavételezése a periódus növekedésével csökken. Ez a 4.1. ábrán látható. A mintavételezést $0.003 \frac{1}{d} \leq f \leq 0.05 \frac{1}{d}$ között végeztem, ahol 15 mintát gyűjtöttem csúcsonként, annak elkerülése érdekében, hogy az alacsony felbontás miatt egy élesebb csúcs figyelmen kívül marad. Azért ezt a tartományt választottam, mivel a következő fejezetben tárgyalt, az RU Vul periódusának időfejlődésének vizsgálata során napjainkban várhatóan ebbe a frekvenciatartományba esik a csillag pulzációjának frekvenciája. Az ábrán kimagaslik egy csúcs az LS teljesítményében $P_{\max} = 57.73$ napos periódussal. Megfigyelhetők további egyéb csúcsok is, ezek vizsgálatához levontam ezt a csúcsot a diagramból.

A levonást úgy végeztem, hogy az adatokra illesztettem egy szinuszgörbét, az (4.5). egyenlet szerint, a frekvencia kezdőértékének az illesztésben f_b -t adtam meg.

$$f(t) = \langle M \rangle + A \sin(2\pi(f \cdot t + \varphi)) \quad (4.5)$$

ahol $\langle M \rangle$ az abszolút fényesség átlaga, A a pulzáció amplitúdója, φ pedig a fázisszög. Az



4.1. ábra. Az RU Vul frekvenciaspektruma a három színszűrőben. Egy kimagasló csúcs látható a Lomb-Scargle teljesítményében, amihez $P_{\max} = 57.73$ napos periódus tartozik, emellett megfigyelhetők egyéb csúcsok is, melyek további vizsgálatot igényelnek.

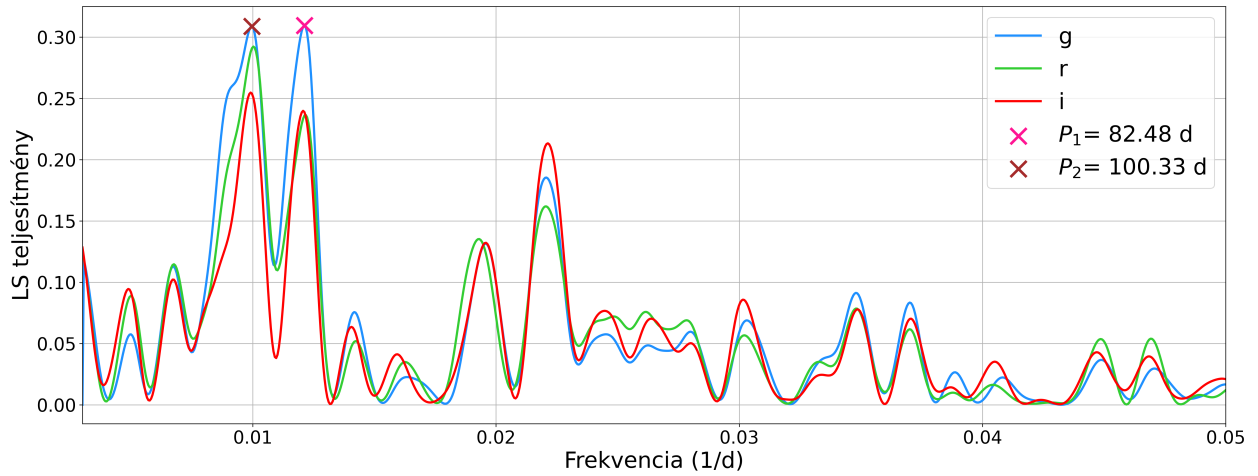
így kapott görbét levontam a mért abszolút fényességekből. Az illesztés alapján kapott frekvenciát, és annak hibáját vettem a csúcs frekvenciájának. Az így származtatott periódus a domináns csúcsra tehát: $P_{\max} = 57.98 \pm 0.46$ nap. A levonást azért tehattük meg, mert az LS periodogram szinuszgörbék szuperpozíciójából állatja elő a spektrumot.

A levonás után kapott adatokra újból periodogramot készítettem, ami a 4.2. ábrán látható. Mindhárom szűrőben két csúcs is kimagaslík a teljesítményben, amelyekhez a $P_1 = 82.47$ nap, illetve $P_2 = 100.33$ nap nagyságú periódusok tartoznak. A következő fejezetben megmutatottak alapján egy egyszerű, egymódusú pulzáció esetében, amilyen a RU Vul eleinte volt, egy darab egyértelmű csúcsot kéne látnunk. Esetünkben tehát egy felhasadt, inkoherens jel figyelhető meg.

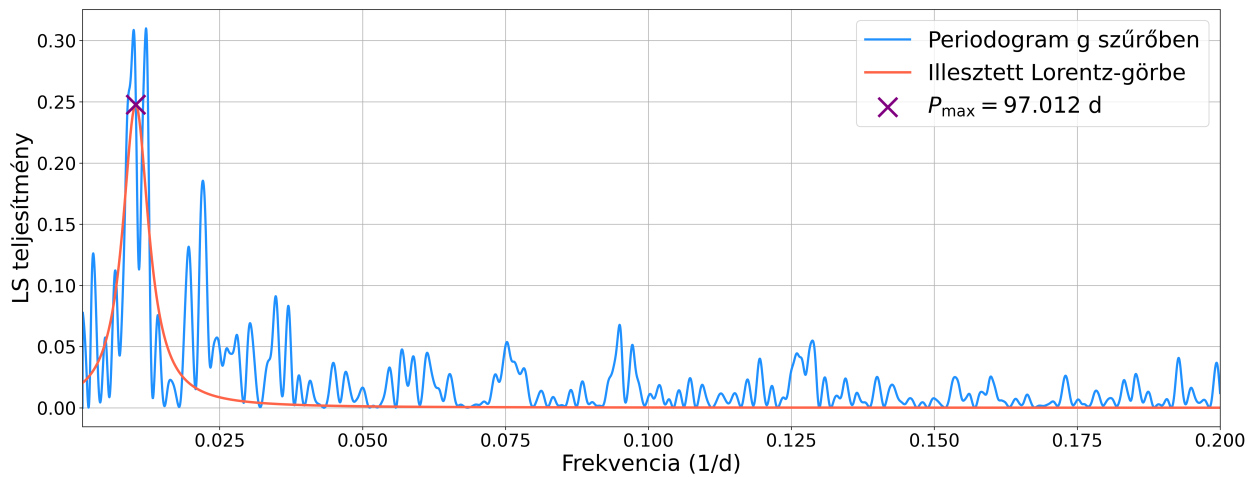
A további vizsgálatokhoz az inkoherens jelekre jellemző Lorentz-görbével közelítettem a felhasadt jelet (Kiss et al., 2006), ami a 4.3. ábrán található. A frekvenciatartományt itt tágabbra vettem az illesztés pontosságának növelése érdekében. A Lorentz-görbe szépen illeszkedik, a maximumához $P_L = (97.01 \pm 0.81)$ nap nagyságú periódus tartozik.

A T UMi pulzációjára illesztett evolúciós modellekkel összehasonlítva az eredményt, egy $P \approx 100$ nap nagyságú periódusú alapl módus, és az ehhez tartozó első felhang periódusainak aránya ≈ 0.6 kétmódusú pulzáció esetén (Molnár et al., 2019). Az általam először talált $P_{\max} = (57.98 \pm 0.46)$ nap nagyságú periódus, illetve az illesztett Lorentz-görbe maximumához tartozó $P_L = (97.01 \pm 0.81)$ nagyságú periódus aránya 0.600 ± 0.007 . Ez alapján kijelenthető, hogy a sejtés, miszerint az RU Vul egymódusú pulzációból kétmódusú pulzációvá alakult, igaz.

A dolgozatomban jelenleg a piszkástetői adatokat 2023-mal bezárólag dolgoztam fel. A



4.2. ábra. az RU Vul frekvenciaspektruma a három színszűrőben, levonva a domináns csúcsot. Két további domináns csúcs figyelhető meg, amelyekhez $P_1 = 82.47$ nap, illetve $P_2 = 100.33$ nap nagyságú periódusok tartoznak.



4.3. ábra. A frekvenciaspektrum és az inkohérens jelre illesztett Lorentz-görbe g szűrőben. A görbe teljesítményének maximumához $P_L = (97.01 \pm 0.81)$ nap nagyságú periódus tartozik.

monitorozás napjainkig folyamatban van, így ezeket, illetve a jövőbeli adatokat vizsgálva további információkhoz lehet majd jutni az alapmódus felhasadásával kapcsolatban.

5. fejezet

A periódus hosszútávú időfejlődése

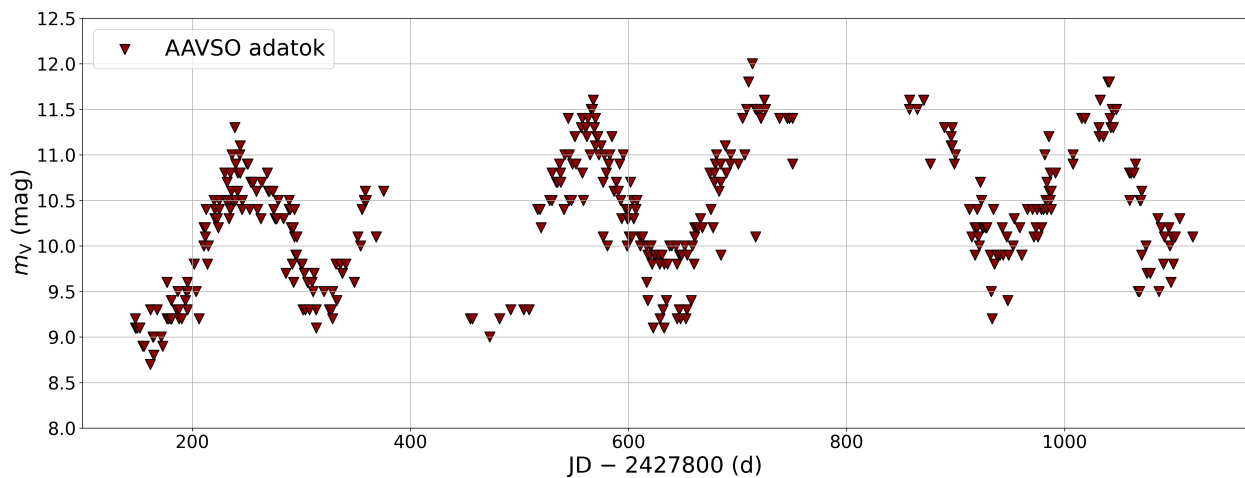
A pulzáció periódusának időbeli fejlődésének hosszútávú vizsgálata céljából különböző forrásokból gyűjtött adatokra is elvégeztem az előző fejezetben tárgyalt módszert.

5.1. Archív adatok

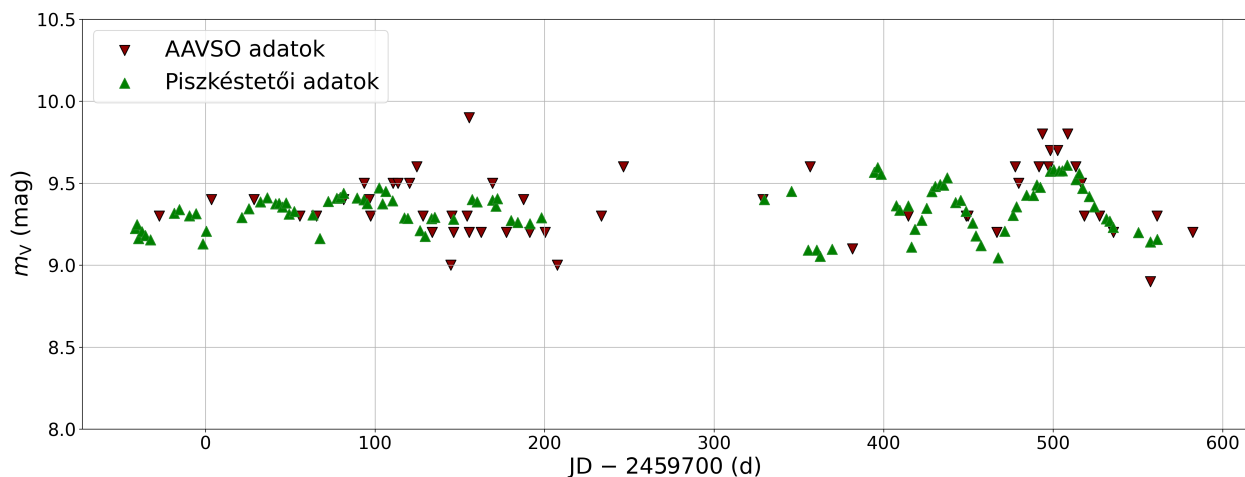
Az RU Vulról a legkorábban fellelt archív adatok a DASCH¹ (Digital Access to a Sky Century at Harvard; Laycock et al. (2008)) program keretében kerültek elő. A projekt célja a Harvard College Obszervatórium által őrzött, körülbelül félmillió fényképlemez digitalizálása. A gyűjtemény az 1880-tól 1990-ig terjedő időszakot fedi le, ezalatt az égbolt minden pontját megközelítőleg 500–1000 alkalommal figyelték meg. Az RU Vult először 1906-ban fényképezték le, és összesen 2360-szor észlelték egészen 1989-ig. Ezen adatok segítségével közel 120 évre visszamenőleg fel tudtam térképezni az RU Vul pulzációs periódusának időbeli fejlődését.

Az AAVSO az amatőr és professzionális csillagászok közösségét fogja össze, hogy adatokat gyűjtsenek a változócsillagokról és egyéb csillagászati jelenségekről. Az AAVSO által gyűjtött adatok a világ egyik legnagyobb és legrégebbi adatbázisát alkotják a változócsillagokról. Emiatt elsősorban én is ezekkel az adatokkal hasonlítottam össze az általam kapott fénygörbét. Az RU Vul-ról az első feljegyzés 1935 január 18-án készült, azóta pedig rendszeresen figyelik napjainkig a csillagot, amit összesen 7930 éjszaka alkalmával észleltek. Az 5.1. ábrán láthatóak az AAVSO által eleinte regisztrált periódusok a vizuális fényességbecslésekből. Ebben az időszakban a fénygörbe még jól definiált periódusokat mutatott. Az utóbbi években azonban a fényességbecslések, bár időnként kiegészülnek fotometriai mérésekkel is, de ritkábbá és pontatlanabbá váltak. A 5.2. ábrán összevetettem a piszkástetői adatokat az

¹A DASCH weboldala: <https://dasch.cfa.harvard.edu/>



5.1. ábra. Az AAVSO által feljegyzett ciklusok, az 1930-as évekből. A fényességváltozás amplitúdója körülbelül 0.75 magnitúdó.



5.2. ábra. Az AAVSO adatai és a Piszkestetői mérések napjainkban. Az általam kalibrált fénygörbe jelentősen javítja a pontatlanná vált AAVSO adatokat. Az amplitúdó körülbelül a harmadára csökkent 1935 óta.

akkor készült AAVSO adatokkal. A piszkéstetői mérések jelentősen javították a csillag ezen kritikus szakaszának fénygörbéjét.

Az AAVSO adatok alapján azonban hosszú távon megfigyelhető az RU Vul periódusának időfejlődése, amíg az amplitúdó túlságosan le nem csökkent ahhoz, hogy szabad szemmel is precízen meg lehessen figyelni.

Az ASAS (All Sky Automated Survey, Pojmanski (1997)) egy 1996 elején indult projekt, aminek célja az égbolt minél nagyobb részén előforduló bármilyen fotometriai változás észlelése és vizsgálata. Kezdetben csak a legfényesebb néhány millió csillagra korlátozták magukat, vagyis a fényességhatáruk kb. 13 magnitúdó volt. A RU Vul fényesebb ennél, így

fellelhető volt az adatok között. Először 2003-ban észlelték, mindössze pár ciklust rögzítettek 2007-ig.

Az ASAS-SN egy globális, automatizált égboltfelmérő projekt, amelynek célja a teljes égbolt vizsgálata fényes szupernóvák, változó csillagok és más asztrofizikai jelenségek felfedezése érdekében. A program a világ különböző pontjain elhelyezett teleszkóphálózatot használ, amelyek folyamatosan monitorozzák az égboltot. Ez a felmérés először 2015-ben rögzítette a csillagot, összesen pedig 1180-szor észlelték. A megfigyelések magas számának ellenére az adatsor erősen zajosnak bizonyult.

5.2. A periódusváltozás meghatározása

Az olyan, több évtizedes megfigyeléseknél, mint az AAVSO és DASCH, szükséges volt az adatokat megfelelően mintavételezni, hogy meg tudjam határozni különböző szakaszokban a csillag periódusát. Molnár et al. (2019) alapján csúszó Gauss-görbével súlyoztam az adatokat, mivel ez letisztultabb spektrumokat eredményez, mint a dobozfüggvénnyel való súlyozás. A görbe paraméterét $\sigma = 500$ napnak választottam, és azt a következőként definiáltam:

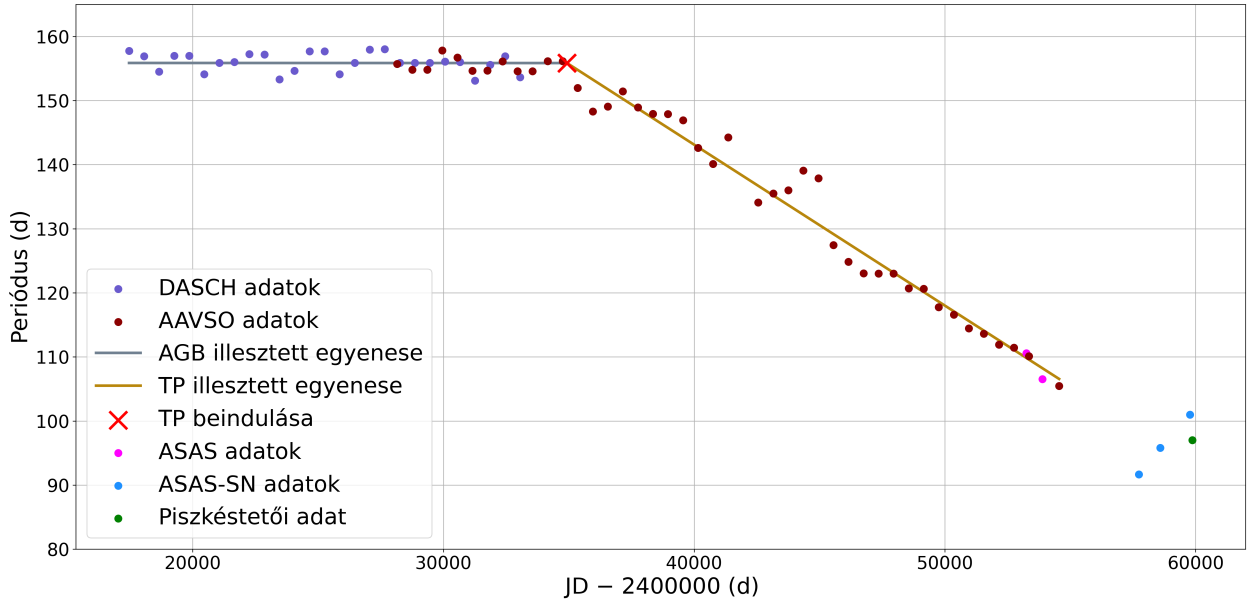
$$f(t) = e^{-\frac{(t-t_k)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

Ahol a t_k középvértéket $\Delta t_k = 500$ napos különbségekkel egyenletesen végigmozgatva a mérési időintervallumon letapogattam a fénygörbék periódusváltozását. Minden egyes t_k értéknél Lomb-Scargle periodogrammot készítve, sűrű mintavételezéssel a $\frac{3}{1000} \leq \omega \leq \frac{5}{100}$ tartományon, meghatároztam a periódusokat az egyes t_k értéknél. A magas zajszint miatt az AAVSO adatokból nem volt kimutatható a felhasadt alaplóbus, illetve a felhang sem, viszont ezen adatok, illetve a DASCH adatok segítségével sikerült részletesen feltérképezni közel 100 éven keresztül, 1906-tól 2008-ig, az RU Vul pulzációjának periódusváltozását.

A legrövidebb, öt ciklust tartalmazó ASAS adatokon már látszódott, hogy az alaplóbusban változások következtek be, viszont a zaj miatt nem lehetett egyértelmű konklúziókat levonni.

Az ASAS-SN megfigyelések közel egy évtizeddel az ASAS megfigyelések után, a piszkés-tetői megfigyelések előtt pár évvel kezdődtek. Ennek ellenére a magas zajszint, és az ehhez képest kevés rendelkezésre álló feltérképezett ciklus miatt ezen adatoknak periodogramjában nem volt kimutatható az alaplóbus felhasadása, illetve a felhang sem volt felfedezhető. Ennek ellenére három periódus adatpontot ki tudtam nyerni belőle.

Az így összegyűjtött adatokból felállítottam az RU Vul pulzációs periódusának időbeli fejlődését közel 120 évre visszamenően, ami a 5.3. ábrán látható.

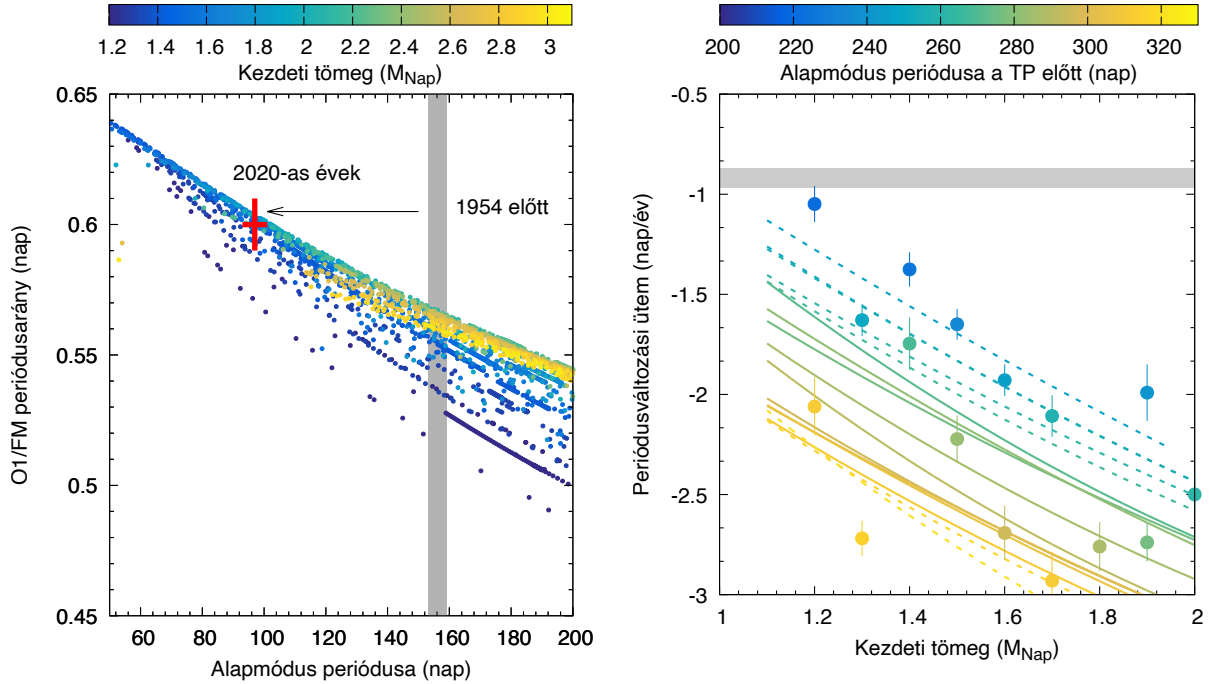


5.3. ábra. Az RU Vul pulzációs periódusának időbeli fejlődése közel 120 évre visszamenően. Az ábrán megfigyelhető a Mira típusú változókra jellemző meanderezés. Az AGB szakaszra és a termális pulzusra illesztett egyenesek metszéspontjából megállapítható, hogy a termális pulzus 1954 nyarán indult be. A pulzációs periódus megváltozásának sebessége a termális pulzus alatt (-0.92 ± 0.03) nap/év.

A kezdeti, AGB szakaszon, illetve később is megfigyelhető az ábrán a Mira típusú változókra jellemző meanderezés, a periódus több éves, évtizedes skálán való félszabályos hullámzása (Merchan-Benitez et al., 2023). Az AGB és TP szakaszokra egyenest illesztve meghatároztam, hogy a csillag a termális pulzusa kezdeti szakaszában járhat, ami 1954 nyarán indult be. A termális pulzusra illesztett egyenes meredekségéből meghatároztam, hogy a pulzációs periódus megváltozásának sebessége (-0.92 ± 0.03) nap/év.

Az eredményeim alapján az RU Vul ugyanúgy a TP kezdeti szakaszában jár, mint a T UMi, így a két csillag paramétereit is össze tudom hasonlítani. A fő különbségek a két csillag között, hogy az RU Vul pulzációs periódusai kb. a fele a T UMi-énak, és pulzációs amplitúdója is jelentősen kisebb. Emellett a perióduscsökkenés üteme is jóval lassabb, kevesebb, mint harmada annak, amit a T UMi-nál mértek (Molnár et al., 2019).

Az RU Vul adatait összehasonlítottam a T UMi-ra számolt illesztett MESA modellekkel is. A 5.4. ábra bal oldalán a TP előtti alaplómódus periódust a szürke sáv jelzi, a jelenlegi periódust és az első felhanggal való periódusarányát pedig a piros kereszt. Utóbbi egyezik a korábbi felvételekkel, miszerint a csillag tömege nagyságrendileg $1 M_{\odot}$, tehát feltehetően kis tömegű. A jobb panelen a TP kezdeti szakaszát jellemző perióduscsökkenés üteme van feltüntetve a kezdeti tömeg függvényében. Itt az eredeti cikkben már a csak hosszabb periódusú, a T UMi-hoz közeli modelleket dolgozták fel, így nem lehet egyértelmű követke-



5.4. ábra. Összehasonlítás a T UMi esetére számolt MESA modellekkel. Balra: a modellek első felhangjának és alpmódusának aránya az alpmódushoz képest, a tömeg függvényében. Az RU Vul kezdeti és jelenlegi periódusait a szürke sáv és a piros kereszt jelzi. Jobbra: a termális pulzusok kezdetén fellépő periódusváltozási ütemek. Az RU Vul-t ismét szürke sáv jelzi. Az ábrák Molnár et al. (2019) cikkéből lettek adaptálva.

tetéseket levonni, de látható, hogy a lassabb periódusváltozás a kisebb tömegű modellekhez tartozik.

Mivel a T UMi-hoz készült modellháló már csak korlátozottan érvényesek ilyen kis tömegek és rövid periódusok esetén, ezért pontosabb következtetésekhez további modellezés lesz szükséges. Erre egy lehetőség az R Hya-hoz számolt, több ezer csillagmodellt tartalmazó nagy modellháló használata (Joyce et al., 2024). Ennek alsó határa $0,8 M_{\odot}$, széles fémességtartományban, tehát várhatóan le fogja fedni a várt paramétertartományt, és lehetővé fogja tenni az RU Vul pontos fizikai paramétereinek meghatározását számunkra.

6. fejezet

Összefoglalás

A jelen dolgozatban ismertetett munkám során gyakorlatot szereztem az észlelések megtervezésétől és kivitelezésétől a földi-bázisú távcsöves mérések feldolgozásán át a fénygörbék frekvencia analíziséig, illetve a kapott eredmények értelmezéséig.

Az eredményeimet a következő pontokban foglalom össze:

- A munkám első részében létrehoztam egy saját magam által írt fotometriai pipeline-t, mely képes nagy mennyiségű, különböző éjszakák során, valamint eltérő észlelési körülmények között készült mérések feldolgozására.
- A 2022 és 2023 közötti piszkéstetői RC80 többszín-fotometriai mérések kiredukálásával elkészítettem az RU Vulpeculae standard fénygörbáját, melyhez szintetikus Gaia fotometriából kinyert közel 200 összehasonlító csillagot használtam fel.
- A fénygörbe mögött rejlő pulzációs frekvencia spektrumának kinyeréséhez az adatokból Lomb-Scargle periodogramot készítettem. A spektrumból meghatároztam az első felhang $P_{O1} = (57.99 \pm 0.46)$ napos, illetve további részletes vizsgálat segítségével a felhasadt alapl módus $P_{FM} = (97.01 \pm 0.81)$ napos periódusát. A kettő arányából és a T UMi-ra illesztett modellekből egyértelműen igazoltam azt a sejtést, miszerint az RU Vul pulzáció kétmódusúvá vált, ezzel növelve a jövőben illeszthető modellek pontosságát, és az ebből meghatározott olyan sztelláris paramétereiket is, mint például a tömeg.
- Archív adatok segítségével részletesen feltérképeztem a csillag pulzációs periódusának időfejlődését közel 120 évre visszamenően, így megteremtve a modell illesztés lehetőségét a termális pulzusra. A grafikonokon végzett illesztések segítségével meghatároztam,

hogy a termális pulzus 1954 nyarán indult be. A pulzációs periódus csökkenésének üteme -0.92 ± 0.03 nap/év-nek adódott.

- A T UMi-ra illesztett modellek segítségével meghatároztam, hogy egy ilyen alacsony periódus csökkenési ütemmel rendelkező csillag tömege nagyságrendileg $1 M_{\odot}$.

A jövőben szeretnék a T UMi és R Hya-hoz hasonló modell illesztéseket végezni az RU Vul termális pulzusára, majd ebből nagy pontossággal meghatározni a csillag különböző, egyébként nehezen vizsgálható paramétereit, mint például a tömegét. Emellett további mérések segítségével szeretnék minél pontosabb képet kapni a felhasadt alaplómódusról és annak időbeli fejlődéséről. A termális pulzus fázisában lévő csillagok azért is kifejezetten érdekesek, mert a jelenség lefolyása emberöltőkben is érzékelhető, szemben a csillagok általában millió éves életszállájával.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék ismét köszönetet mondani témavezetőimnek, Kalup Csillának és Dr. Molnár Lászlónak a fáradhatatlan munkájukért, a rendszeres rám szánt időért, a megértésért és türelemért amit nyújtottak az elmúlt közel 2 év során.

Köszönjük az adatgyűjtést a 80 cm-es távcsővel az alábbi észlelőknek: Bora Zsófia, Bódi Attila, Cseh Borbála, Frits Márton, Horti-Dávid Ágoston, Joó András, Kalup Csilla, Könyves-Tóth Réka, Krezinger Máté, Kriskovics Levente, Lelkes Klára, Pál András, Regály Zsolt, Sárneczky Krisztián, Seli Bálint, Sódor Ádám, Szabó Norton, Szakáts Róbert, Takács Nóra, Varga Vázsony, Vinkó József.

Köszönjük az AAVSO Nemzetközi Adatbázisából származó változócsillag megfigyeléseket, amelyeket megfigyelők gyűjtöttek össze világszerte, és amelyeket ebben a kutatásban felhasználtunk.

Köszönöm a CSFK CSI demonstrátori programjának támogatását is. A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal KKP-137523 „SeismoLab” Élvonal pályázat támogatásával készült.

Köszönöm az Új Nemzeti Kiválósági Program és az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program támogatását is. A dolgozat a 2023. évi ÚNKP-23-6 és a 2024. évi EKÖP-24-1 ösztöndíjak keretében valósult meg.

Végül, de nem utolsó sorban szeretnék köszönetet mondani páromnak, Ilyés Laurának is a végtelen támogatásért amit a munkám során nyújtott.

Irodalomjegyzék

- Campbell, L., & Pickering, E. C. 1912, *Annals of Harvard College Observatory*, 63, 1
- Catelan, M., Roig, F., Alcaniz, J., de la Reza, R., & Lopes, D. 2007, in *AIP Conference Proceedings*, Vol. 930 (AIP), 39–90. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2790333>
- Catelan, M., & Smith, H. A. 2015, *Pulsating Stars*
- Chambers, K. C., Magnier, E. A., Metcalfe, N., et al. 2019, *The Pan-STARRS1 Surveys*, arXiv, arXiv:1612.05560. <https://arxiv.org/abs/1612.05560>
- Gaia Collaboration, Montegriffo, P., Bellazzini, M., et al. 2023, *A&A*, 674, A33
- Gál, J., & Szatmáry, K. 1995, *Astronomy and Astrophysics*, 297, 461
- Härm, R., & Schwarzschild, M. 1961, *AJ*, 66, 45
- Hoffleit, D. 1997, *JAAVSO*, 25, 115
- Howell, S., & Tavackolimehr, A. 2019, *Handbook of CCD Astronomy*
- Howell, S. B. 1989, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 101, 616. <https://dx.doi.org/10.1086/132477>
- Iben, Icko, J. 1964, *ApJ*, 140, 1631
- Joyce, M., Molnár, L., Cinquegrana, G., et al. 2024, *ApJ*, 971, 186
- Joye, W. A., & Mandel, E. 2003, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 295, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XII*, ed. H. E. Payne, R. I. Jedrzejewski, & R. N. Hook, 489
- Karakas, A. I. 2017, *Low- and Intermediate-Mass Stars*, ed. A. W. Alsabti & P. Murdin (Cham: Springer International Publishing), 1–21. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20794-0_117-1

- Kiss, L. L., Szabo, G. M., & Bedding, T. R. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 372, 1721–1734. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10973.x>
- Kiss, L. L., Szatmáry, K., Cadmus, Jr., R. R., & Mattei, J. A. 1999, *A&A*, 346, 542
- Laycock, S., Tang, S., Grindlay, J., et al. 2008, *Digital Access to a Sky Century at Harvard. II: Initial Photometry and Astrometry*, , , arXiv:0811.2005. <https://arxiv.org/abs/0811.2005>
- Lomb, N. R. 1976, *Ap&SS*, 39, 447
- Markova, N., Prinja, R. K., Markov, H., et al. 2008, *Astronomy & Astrophysics*, 487, 211–221. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:200809376>
- Merchan-Benitez, P., Uttenthaler, S., & Jurado-Vargas, M. 2023, *A&A*, 672, A165
- Molnár, L., Joyce, M., & Kiss, L. L. 2019, *The Astrophysical Journal*, 879, 62. <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab22a5>
- Nicholls, C. P., Wood, P. R., Cioni, M.-R. L., & Soszyński, I. 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399, 2063–2078. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15401.x>
- Paxton, B., Smolec, R., Schwab, J., et al. 2019, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 243, 10. <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/ab2241>
- Pojmanski, G. 1997, *AcA*, 47, 467
- Pál, A. 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 421, 1825–1837. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19813.x>
- Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., Greenfield, P., et al. 2013, *A&A*, 558, A33. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201322068>
- Scargle, J. D. 1982, *ApJ*, 263, 835
- Schuster, A. 1898, *Terrestrial Magnetism*, 3, 13
- Soszyński, I., Olechowska, A., Ratajczak, M., et al. 2021, *The Astrophysical Journal Letters*, 911, L22. <https://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/abf3c9>
- Straniero, O., Gallino, R., & Cristallo, S. 2006, *Nuclear Physics A*, 777, 311
- Sweigart, A., Greggio, L., & Renzini, A. 1989, *Astrophys. J. Suppl.*, 69, doi:10.1086/191331

- Szatmáry, K., Kiss, L. L., & Bebesi, Z. 2003, *A&A*, 398, 277–282. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20021646>
- Templeton, M., Willson, L. A., & Foster, G. 2008, *JAAVSO*, 36, 1
- Templeton, M. R., Mattei, J. A., & Willson, L. A. 2005, *AJ*, 130, 776
- Uttenthaler, S., van Stiphout, K., Voet, K., et al. 2011, *A&A*, 531, A88
- VanderPlas, J. T. 2018, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 236, 16. <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/aab766>
- Wood, P. R., & Cahn, J. H. 1977, *ApJ*, 211, 499
- Wood, P. R., & Zarro, D. M. 1981, *ApJ*, 247, 247
- Zijlstra, A., Matsuura, M., & Bedding, T. 2002, *Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)*, 283
- Zijlstra, A. A., Bedding, T. R., & Mattei, J. A. 2002, *MNRAS*, 334, 498

Függelék

A szintetikus *Gaia* fotometria lekéréséhez használt ADQL utasítás a következő volt. Ez az utasítás az RU Vul égi koordinátái ($\alpha = 309.719537^\circ$, $\delta = +23.258666^\circ$) körüli negyedfokos körben kéri le a *G* sávban 15 magnitúdónál fényesebb csillagokra a *Gaia* DR3 azonosítókat, égi koordinátákat, illetve az SDSS fotometriai rendszer *g*, *i* és *r* sávjaiban számolt fényességeket, a <https://gaia.aip.de/query/> címen elérhető adatbázisból.

```
SELECT dr3.source_id, dr3.ra, dr3.dec, phot.g_sdss_mag, phot.r_sdss_mag,  
phot.i_sdss_mag  
FROM gaiadr3.synthetic_photometry_gspc AS phot  
JOIN gaiadr3.gaia_source_lite AS dr3  
ON dr3.source_id = phot.source_id  
WHERE 1 = CONTAINS(POINT('ICRS', dr3.ra, dr3.dec), CIRCLE('ICRS', 309.719537,  
+23.258666, 0.25)) AND dr3.phot_g_mean_mag < 15.0
```