

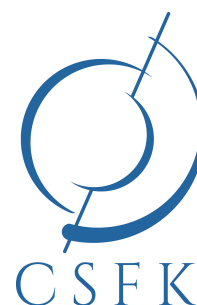
Flerek detektálása és elemzése gyorsfotometriai módszerekkel

Országos Tudományos Diákköri dolgozat

Schmercz Blanka

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Fizika BSc II. évfolyam



Témavezető:

Seli Bálint

Tudományos segédmunkatárs

HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Budapest, 2025

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
1.1. A flerek vizsgálata: kihívások és új lehetőségek	2
1.1.1. Flerek általános tulajdonságai és jelentőségük	2
1.1.2. Gyorsfotometriai mérések szerepe a csillagflerek kutatásában	3
1.2. A választott célpont: az AD Leo	4
1.3. Mérések menete	4
2. Mérések redukálása	5
2.1. Képkorrekciók	5
2.2. Fotometria	6
2.2.1. Apertúra fotometria	6
2.2.2. Adaptív apertúra fotometria	7
3. Az észlelt flerek részletesebb vizsgálata	9
3.1. Az észlelt flerek energiaeloszlása	9
3.1.1. Flerenergiák meghatározása	9
3.1.2. Fler frekvencia eloszlás	12
3.2. Komplex flerek egyedi morfológiai elemzése	13
3.3. Oszcilláció keresése a flerek leszálló ágán	17
4. Eredmények összevetése a TESS űrtávcső méréseivel	21
4.1. A TESS projekt	21
4.2. Adatok redukálása	21
4.3. Flerek energiaeloszlásának vizsgálata	22
4.4. Oszcilláció keresése a flerek leszálló ágán	24
4.5. Flerek statisztikai jellemzői	26
5. A használt módszerek egyéb alkalmazása	27
6. Összefoglalás, jövőbeli tervek	28
Köszönetnyilvánítás	29
Függelék	30
Irodalomjegyzék	30

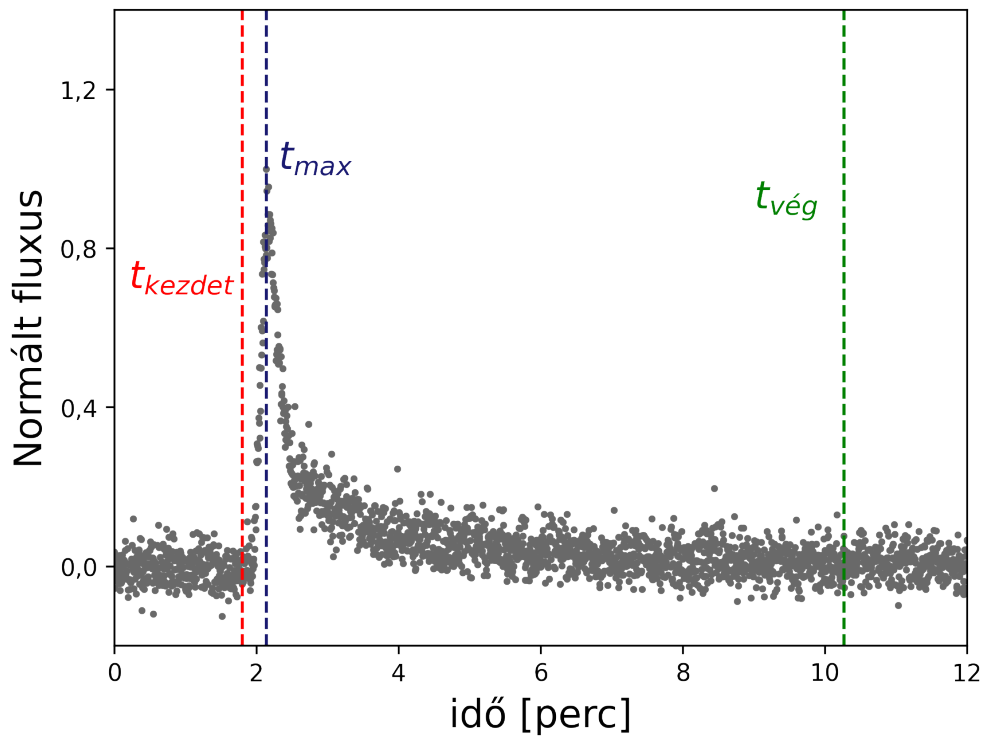
1. Bevezetés

1.1. A flerek vizsgálata: kihívások és új lehetőségek

1.1.1. Flerek általános tulajdonságai és jelentőségük

A flerek a csillagok légkörében kialakuló, intenzív és rövid ideig tartó energiakitörések, amik a mágneses tér hirtelen átrendeződése során felszabaduló energiának köszönhetők (Gershberg és mtsai. 2024). Az energiakibocsátás széles hullámhossztartományt ölel fel, a rádióhullámoktól a röntgen- és gamma-sugárzásig, és az esemény időtartama néhány perctől akár több óráig is tarthat (Kowalski 2024).

A flerek karakterisztikus jellemzője egy dinamikus fényességváltozás, amely két szakaszból áll. Az első szakasz egy gyors, intenzív felfutás, melynek során a csillag luminozitása – és ezáltal a detektált fluxus – hirtelen megemelkedik, míg el nem éri a maximumát. Ezt követi egy hosszabb lecsengés, amelynek során a fluxus fokozatosan visszatér a csillag nyugalmi állapotbeli értékéhez. Ez a jellegzetes fénygörbe-profil, amely egy tipikus fler időbeli lefolyását reprezentálja, az 1. ábrán látható.



1. ábra. Az ábrán egy tipikus fler látható. A függőleges vonalak a fler kezdetét (t_{kezdet}), maximumát (t_{max}) és lecsengésének végét ($t_{\text{vég}}$) jelölik. Az időtengelyen a mérés kezdetétől eltelt percek szerepelnek.

A csillagflerek vizsgálata több szempontból is kiemelkedően fontos. Egyrészt, mivel számos tekintetben hasonlítanak a Napon megfigyelt jelenségekre, tanulmányozásuk hozzájárulhat a Nap mágneses aktivitásának mélyebb megértéséhez. A napflerek és a napkitörések szorosan összefüggő, de nem minden esetben egyidejű jelenségek. A napflerek a Nap atmoszférájának lokalizált, hirtelen felfényesedései, amelyek gyakran, de nem mindig váltanak ki napkitöréseket (koronakidobódásokat), amikor jelentős mennyiségű anyag kerül kilökődésre az űrbe. Az ilyen események során kibocsátott intenzív elektromágneses sugárzás és töltött részecskék súlyos következményekkel járhatnak, amint azt az 1859-es Carrington-esemény is példázza (Muller 2014). Egy hasonló erejű kitörés napjainkban komoly károkat okozhatna az elektromos hálózatokban, megzavarhatná a műholdak és kommunikációs rendszerek működését, valamint veszélyt jelenthetne az űrhajósokra és a repülőgépek utasaira.

A hosszú távú, homogén megfigyelési adatok elemzése lehetőséget kínál arra, hogy jobban megértsük, ezek az események véletlenszerűek-e, vagy léteznek-e olyan mintázatok, amelyek előrejelzésüket lehetővé teszik. Az előrejelzések révén hatékonyabb felkészülési és védelmi stratégiákat dolgozhatnánk ki az ilyen események hatásainak mérséklésére.

Továbbá a flerek tanulmányozása az exobolygó kutatásban is fontos szerepet játszik. Ugyanúgy ahogy a Nap hatással van a Földre az aktív flercsillagok is befolyásolják a körülöttük keringő exobolygókat. A flerek során felszabaduló intenzív ultrabolya sugárzás és nagyenergiájú részecskék károsíthatják a bolygók ózonrétegét és légkörét, akár lakhatatlanná téve azokat (Segura és mtsai. 2010).

1.1.2. Gyorsfotometriai mérések szerepe a csillagflerek kutatásában

A Kepler- és TESS-űrtávcsövek ugyan forradalmasították a csillagflerek kutatását, azonban a jelenlegi űrfotometriai adatsorok többnyire néhány perces vagy annál rosszabb időfelbontással rendelkeznek, ami korlátozza a másodperces időskálájú események részletes vizsgálatát. A tervezett Ariel űrtávcső VISPhot műszere körülbelül 1 másodperces mintavételezést tesz majd lehetővé (Tinetti és mtsai. 2018). Ez a technológia lehetőséget ad kisebb energiájú, máshogy nem detektálható események vizsgálatára, valamint a nagyobb flereken finomszerkezetek keresésére. Továbbá keresettek ritkább jelenségek, például fler előtti elhalványodások, másodperces időskálájú oszcillációk a leszálló ágon illetve másodlagos csúcsok (Schmitt és mtsai. 2016; Beskin és mtsai. 1988).

Az Ariel által ígért, gyorsfotometriában rejlő lehetőségek feltérképezése a hazai műszerekkel jól kivitelezhető. Ehhez megfelelő célpontként az AD Leonis (AD Leo, lásd 1.2. fejezet) nevű aktív flercsillag korábbi méréseit vettem alapul, valamint részt vettem a az adatsor új mérésekkel való bővítésében. Az 1 másodpercesnél is jobb időfelbontású adatsorok redukálásához szükséges megfelelő technológia kifejlesztése után elemeztem az észlelt flerek energiaeloszlását, komplex többcsúcsú flereket egyedi komponensekre bontottam, vizsgáltam a flerek leszálló ágán megjelenő esetleges pulzációkat.

A projekt egyik fő célja annak igazolása volt, hogy a gyors időfelbontású mérések révén olyan finom részletek tárhatók fel, amelyek hagyományos időfelbontással rejtve maradnának. E cél elérése érdekében a CSFK piszkéstetői obszervatóriumából (lásd 1.3. fejezet) származó mérések eredményeit összevettem a TESS űrtávcső jóval ritkább, 20 másodperces időfelbontású adataival, demonstrálva a gyorsfotometria előnyeit.

1.2. A választott célpont: az AD Leo

Az AD Leonis, közismertebb nevén AD Leo egy mágnesesen aktív M-törpe. Tömege $0,43M_{\odot}$, spektráltípusa dM3 és távolsága 4,9 pc. Sugara nagyjából $0,436R_{\odot}$, effektív hőmérséklete pedig körülbelül 3400 K (Stelzer és mtsai. 2022). A Leo (Oroszlán) csillagképben helyezkedik el, és Piskástetőről február környékén ideális a megfigyelése. B szűrőben mért 10,86 magnitúdós fényessége és a látómezőben található egyetlen másik fényesebb csillag (BD+20 2464, $m_B = 11,67$, spektráltípus: G5V) kiváló célponttá teszi a mérésekhez.

Az AD Leo az északi égbolt egyik legaktívabb és legfényesebb M-törpéje, rajta 1–2 éjszakánként várhatóak észlelhető amplitúdóval rendelkező flerek, ami kiemelkedően magas aktivitásnak számít. Éppen ezért az AD Leo az egyik legintenzívebben tanulmányozott flercsillag (Bai és mtsai. 2023).

1.3. Mérések menete

A mérések a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetének piskástetői obszervatóriumában zajlottak, az 1 méteres Ritchey–Crétien–Coudé rendszerű teleszkóppal ($D = 1,01$ m, $f = 13500$ mm), nagyjából 3,5' méretű látómezővel, B szűrőt alkalmazva. Bár ebben a szűrőben a légkör hatása zavaró, a keresett flerből jövő jel amplitúdója itt a legnagyobb (Vida és mtsai. 2010).

A felvételek egy Andor Ixon+888 EMCCD kamerával készültek. Az EMCCD (*Electron Multiplying Charge-Coupled Device*) egy fejlett CCD technológia, amely egy speciális elektron-sokszorozó (*EM gain*) regiszterrel rendelkezik, lehetővé téve a jel felerősítését már a kiolvasás előtt. Ez a folyamat jelentősen csökkenti a kiolvasási zaj hatását, így rendkívül gyenge fényviszonyok mellett is megbízható detektálást tesz lehetővé. Az EMCCD-k akár egyetlen foton érzékelésére is képesek, ami különösen hasznos rövid expozíciós idejű, alacsony fényerejű alkalmazások esetén.

A gyorsfotometria előnyeinek kiaknázásához az átlagosnál rövidebb expozíciós idők elérése a cél, azonban figyelembe kell venni a technológia korlátait. Az EMCCD kamera expozíciós idejének lehetséges legkisebb értéke finomhangolható különböző paraméterek beállításával, amelyek közül kulcsfontosságúak a képméret, a bitmélység és a *gain*. A kisebb képméret rövidebb expozíciós időt tesz lehetővé, de fontos egyensúlyt találni, hogy elegendő hely maradjon a referencia-csillagok számára is. A bitmélység csökkentése (például 16 bitről 14 bitre) gyorsabb kiolvasást eredményez, de növeli a pixelek gyors telítődésének kockázatát. A magasabb *gain* általában javítja a képminőséget, de a kamera fizikai korlátai megszabják a maximális értékét. Az AD Leo csillag esetében a 0,286 másodperces expozíciós idő bizonyult optimálisnak, így a mérési sorozatok ezzel készültek.

A választott célponttól 2019 óta készültek mérések, melyeket a témavezetőm és a kutatócsoport többi tagja végzett. Én 2024 januárjában csatlakoztam a kutatáshoz, bekapcsolódva az új mérések elvégzésébe, valamint megkezdtem a korábban gyűjtött adatok redukálását. Az évek során összesen nagyjából 157 órányi adat gyűlt össze, a projekt során az első feladat ezek redukálása volt.

2. Mérések redukálása

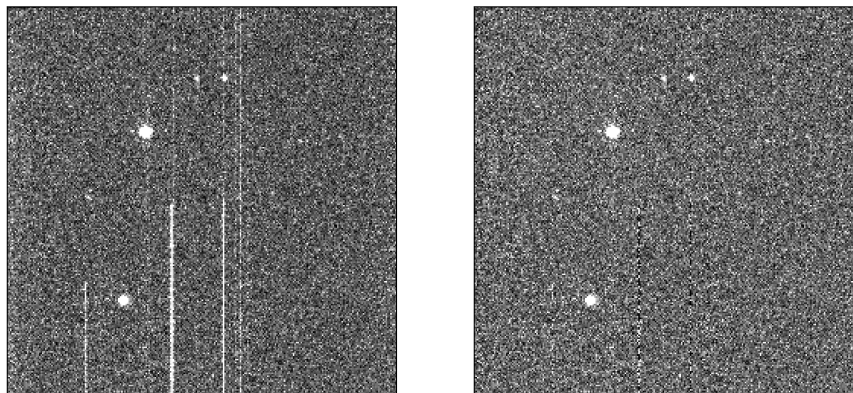
2.1. Képkorrekciók

A CCD kamerával készült felvételek különböző hibákkal terheltek, melyeket korrigálni kell, mielőtt elkezdődne a tényleges adatfeldolgozás. Ennek érdekében részben saját, részben korábbi mérésekből származó korrekciós felvételeket használtam: *dark* és *flat* képeket.

A *dark* képek zárt tubussal készülnek és expozíciós idejük megegyezik a valódi felvételek expozíciós idejével. Céljuk a hőmozgás következtében is felszabaduló elektronok (sötétáram) által okozott zaj korrigálása. Mivel ez a sötétzaj a kamera nem nulla abszolút hőmérsékletéből adódik, megszüntetni a problémát nem lehet, azonban a hőmérséklet csökkentésével sokat lehet rajta javítani. A projekt során a mérések alatt a kamera $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra volt lehűtve. Szokás még *bias* képeket készíteni zárt tubussal és nulla integrációs idővel, ezek tartalmazzák a kiolvasó elektronika által okozott zajt. Mivel a *dark* felvétel lényegében tartalmazza a *bias* komponenst, a gyakorlatban általában el lehet tekinteni ezek használatától. A jelen mérések során sem készültek *bias* képek.

Ezek mellett szükséges még *flat* képeket használni, melyeket nyitott tubussal, egy homogén, egyenletesen megvilágított forrásról készítenek. A projekt keretében végzett mérések esetében erre a célra tökéletes a távcső kupolájában található úgynevezett *flat* ernyő. Ezekre a kalibrációs képekre azért van szükség, mivel a CCD egyes pixeljei más és más érzékenységgel rendelkezhetnek, így ugyanannyi beeső fény esetén akár más eredményt adhatnak. Emellett a távcsőn található szennyeződések (pl. porszemcsék) is befolyásolhatják az észlelt fényességet, a *flat* képekkel az ezek által behozott hibák is korrigálhatók. Fontos, hogy a *flat* képek magas beütésszámmal készüljenek, így ezek expozíciós ideje nagyobb volt, mint a valódi mérés expozíciós ideje. Mivel a kamera termális fluktuációiból eredő hiba függ az expozíciós időtől, ezért a *flat* képekhez külön *dark* képek készítése szükséges.

Először tehát minden mérési sorozat esetében a hozzá tartozó *dark* képeket átlagoltam, majd kivontam az adatsorból. A *flat* képeket ugyanígy korrigáltam, majd átlagoltam őket. Ezután a valódi adatsort leosztottam az így kapott *flat*-tel. 1–2 éjszakán nem készültek kalibrációs képek, itt az időben hozzájuk legközelebbi éjszakához tartozó képeket használtam. Az eredmény így sem lesz tökéletes, hiszen valamennyi statisztikai fluktuáció továbbra is jelen lesz és persze véletlenszerű egyszeri zavarok is megjelenhetnek a képeken, azonban a jel/zaj arány így is jelentősen javul a képkorrekciók elvégzésével. A 2. ábra szemléletesen mutatja be a korrekció hatását: bal oldalon egy nyers, feldolgozatlan kép látható a célponttól, míg jobb oldalon ugyanazon felvétel általam korrigált változata.



2. ábra. Az ábra bal oldalán, egy AD Leo-ról készült nyers, korrekció előtti kép látható, jobb oldalon pedig az általam elvégzett korrekciók után kapott feldolgozott változat.

2.2. Fotometria

2.2.1. Apertúra fotometria

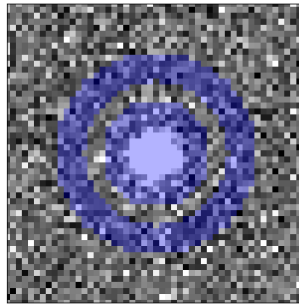
A képek korrigálása után a következő lépés a csillagok beazonosítása. Bár a távcső rendelkezik vezetéssel (úgynevezett *guiding*), ez nem tökéletes, a hosszabb mérési sorozatokon már látványos a csillagok elmozdulása, ezért van szükség a csillagok koordinátáinak minden képen való meghatározására.

Ehhez először megkerestem azokat a pixeleket a képen, amelyek intenzitása meghaladott egy adott küszöbértéket. Ez a küszöbérték általában a kép pixeleinek intenzitásának átlaga plusz k -szor a szórás volt. A k értéket az adott mérési sorozathoz igazítva választottam meg úgy, hogy a program a lehető legtöbb képen megtalálja az AD Leo csillagot és az összehasonlító csillagot is, miközben elkerülje a túlzott számú háttérből származó fényes pixelt. Ezek után kijelöltem egy téglalapot a csillag és az összehasonlító csillag körül, amibe ha beleesik az előbb leírt módon kiválasztott pixel, akkor azt tekintjük a csillag közepének. A kijelölt téglalapot a DS9 nevű vizuális megjelenítő program segítségével határoztam meg úgy, hogy az egész mérési sorozat elemzéséhez használható legyen. A látómezőben a célpont és az összehasonlító csillag a legfényesebb objektumok, egymástól jól elkülönülve jelennek meg. Bár néhány halványabb csillag is megfigyelhető a képen, ezek távol esnek a fő objektumoktól. Ez a kedvező elrendezés minimálisra csökkenti a téves azonosítás kockázatát. Ezt a folyamatot elvégezve az egész mérési sorozatra megkaptam a keresett pixelkoordinátákat.

Ezt követően illesztettem minden csillagra egy adott sugarú apertúrát, amelyen belül a pixelek intenzitásértékeit összegeztem. Mivel azonban ez tartalmazza a háttér fényességét is, a csillag körül egy pár pixel sugarú körgyűrűben is kiszámoltam az intenzitásértékek átlagát és ezt levontam a csillagnál számolt értékből. Ezt a módszert nevezzük apertúra fotometriának. Az apertúra méretének megválasztásakor arra törekedtem, hogy az optimális legyen: ne legyen túl kicsi, hogy a csillag teljes fluxusát tartalmazza, de ne legyen túl nagy sem, hogy a háttérméréshez használt körgyűrű ne kerüljön túl távol a csillagtól, ezzel biztosítva a helyi háttérfényesség pontos levonását. Az apertúra méretének helyességét vizuálisan is ellenőriztem a DS9 program segítségével.

Az optimális apertúrasugár jellemzően 10 – 20 pixel közé esett. A 3. ábra egy kép példáján szemlélteti az objektumot a köré helyezett apertúrával, valamint a háttér hatásának korrekciójára használt körgyűrűvel.

Ezt a folyamatot minden képen elvégezve megkaptam a célpont és az összehasonlító csillag intenzitásértékeinek arányát. Ebből (tudva a konstans fényességű összehasonlító magnitúdóját) Pogson-képlettel kiszámoltam a célpont fényességét. A mérési sorozat úgynevezett *header*-je tartalmazza a mérés kezdőidőpontját, és az egyes képek között eltelt időt, ezekkel az információkkal minden képhez ki tudtam számolni a hozzá tartozó Julián-dátumot. Ezzel a módszerrel összesen mintegy 157 órányi mérést elemeztem, melyek során 29 flert detektáltam.



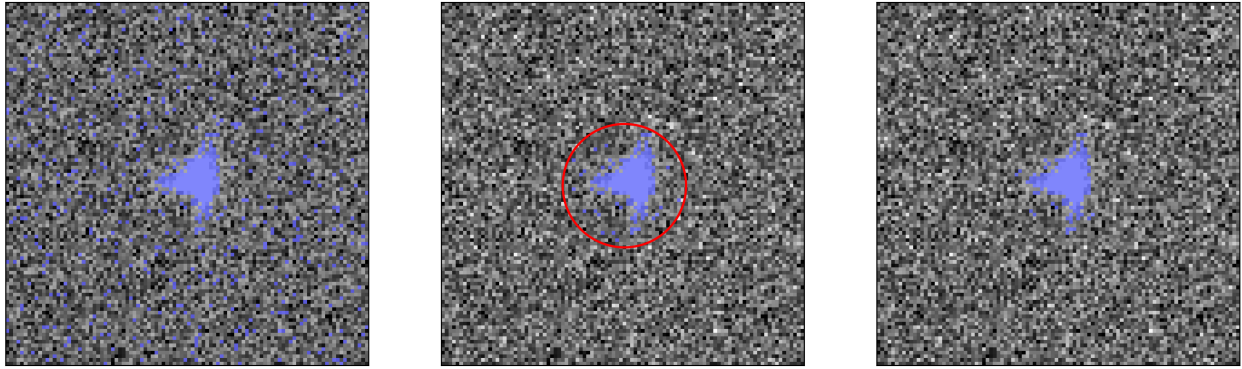
3. ábra. Az objektum köré helyezett apertúra és a körgyűrű szemléltetése.

2.2.2. Adaptív apertúra fotometria

A gyors mintavételezés során a légköri turbulencia miatt a csillagok képe nem mindig körszimmetrikus, ami indokoltá teszi a változó apertúrák alkalmazását a hagyományos kör alakú apertúrák helyett. A cél a flerek lehető legjobb jel–zaj arányának elérése volt, ezért kizárólag az ezeket tartalmazó mérési sorozatokat értékeltem ki újra, adaptív apertúra fotometriát alkalmazva a hagyományos apertúra fotometria helyett. Ez a módszer javította a jel–zaj arányt, amit a kapott fénygörbe relatív szórásával jellemeztem. Az adaptív apertúra fotometria használatával a relatív szórás értéke körülbelül 5 – 10 %-os csökkenést mutatott a hagyományos apertúra fotometriához képest.

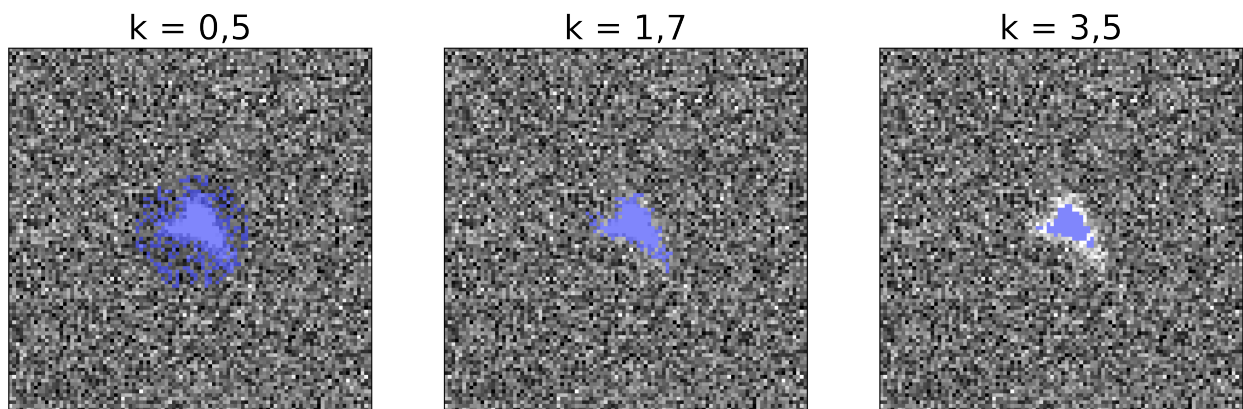
A képkorrekciónak és a csillagok helyzetének meghatározásának az adaptív apertúra fotometria esetében is megegyezik az előző módszerrel, a fő különbség az apertúrák kezelésében rejlik. Először kijelöltem azokat a pixeleket a képen, amelyek intenzitásértéke nagyobb egy adott határnál, ami jellemzően a háttér átlaga + k -szor a szórása (lásd 4. ábra bal oldala). Ezután ezek közül a pixelek közül kiválasztottam azokat, amelyek a csillag körül egy adott sugarú apertúrán belül vannak (lásd 4. ábra közepe). Ha a k értéke túl kicsi, akkor a háttér fluktuációi miatt túl sok fényes háttérpixel kerülhet a kiválasztott csoportba. Ha viszont k túl nagy, előfordulhat, hogy a csillaghoz tartozó valódi pixelek egy része kimarad. Minden mérési sorozat elején a DS9 program segítségével vizuálisan ellenőriztem, hogy az adott k érték megfelelő-e. Ez azt jelentette, hogy megbizonyosodtam róla, hogy a csillag összes releváns pixele bekerül a kiválasztott csoportba, míg a háttérből csak néhány pixel marad. A k paraméter megfelelő megválasztásának fontosságát szemlélteti az 5. ábra. A bennmaradó háttérpixel eltávolítására a következő eljárást alkalmaztam: ha egy pixelnek nem volt olyan szomszédja, amely szintén a csillaghoz tartozó csoportban szerepelt, akkor azt kizártam a csoportból (lásd 4. ábra jobb oldal).

Ezzel biztosítottam, hogy a megmaradt pixelek nagyjából egybefüggően kövessék a csillag apertúráját. A módszer hátránya, hogy nem mindig sikerült teljes mértékben kiküszöbölni a háttér fluktuációjából adódó pixelek hatását. A legtöbb képen 1–2 ilyen pixel a csillagként kijelölt apertúrában maradt. Bár ez elhanyagolható a csillag méretéhez képest, mégis torzíthatja az adatsort. A folyamat elvégzését követően ugyanúgy számoltam a csillag fényességét, mintha kör alakú apertúránk lenne.



4. ábra. Az adaptív apertúra fotometria lépései egy általam generált tesztképen szemléltetve. A bal oldali képen kékkel vannak megjelölve azok a pixelek, amelyek intenzitása meghalad egy adott küszöbértéket. A középső képen kékkel láthatók a bal oldali képen kijelölt pixelek közül azok, amelyek a piros színnel jelölt apertúrán belül helyezkednek el. A jobb oldali kép az utolsó korrekció után kapott végleges apertúrát ábrázolja.

Természetesen ez után is előfordulhat, hogy lesz egy–egy kilógó adatpont valamiféle hiba miatt (például felhős volt az ég és a program azonosít egy fényesebb pixelt csillagként messzebb a csillagtól). Az ilyen adatpontokat kiszedve, megkaptam a tényleges fénygörbét tartalmazó adatsort amivel a továbbiakban dolgoztam. A munka során Python-ban dolgoztam, a képkorrekciók elvégzését illetve a fotometriai feladatokat megvalósító kódot a `numpy`, `scipy`, `matplotlib`, `photutils` és `astropy` csomagok felhasználásával írtam.



5. ábra. A végleges apertúra különböző k értékek esetén.

3. Az észlelt flerek részletesebb vizsgálata

Az összegyűjtött 43 éjszakányi mérési adatból 29 fler eseményt azonosítottam és részletesen elemeztem, kihasználva a gyorsfotometria által kínált lehetőségeket. Vizsgálataim első lépéseként minden fler energiaértékét meghatároztam, majd ezek eloszlását elemeztem. Ezt követően a bonyolultabb, dupla csúcsú flerekre összpontosítottam, amelyeket egyedi fler profilok összegzésével bontottam szét. Végül a flerek leszálló ágát tanulmányoztam, keresve az esetleges oszcillációs jelenségeket.

3.1. Az észlelt flerek energiaeloszlása

3.1.1. Flerenergiák meghatározása

Egy fler energiájának kiszámításához szükség van az egyes flerhez tartozó ekvivalens időtartam (*Equivalent Duration*, ED) mennyiségre (Gershberg 1972). Ez az az időtartam, amely alatt a csillag nyugalmi állapotában annyi energiát bocsátana ki, mint amennyit a fler során kibocsátott. A kisebb flerek esetében az ED általában 1–2 perc, míg a nagyobb flerek esetén akár egy órák értéket is elérhet. Ez a következőképp határozható meg:

$$ED = \int_{t_{\text{kezdet}}}^{t_{\text{vég}}} \frac{I(t) - I_0}{I_0} dt \quad (1)$$

Ahol $I(t)$ a mért intenzitás az idő függvényében, I_0 a nyugalmi állapotban mért intenzitás. Az integrál határai a fler becsült kezdő és végidőpontjai. A korrigált intenzitás a fler előtti és utáni időpontokban nulla körüli értékeket vesz fel, emiatt az integrál értéke nem változik jelentősen, ha kismértékben módosítom a határokat. E módszer segítségével meghatároztam az összes detektált fler ekvivalens időtartamát.

Ez után következett a csillag nyugalmi luminozitásának megállapítása a méréseknél használt Johnson-féle B szűrőn keresztül. Ennek a meghatározásának egyik lehetséges módszere a csillag spektrumának elemzésén alapul (Kowalski 2024). Az AD Leo spektrumát egy 3400 K-es BT-NextGen modellel helyettesítettem (Hauschildt és mtsai. 1999). Ezt az SVO *Theory Server* segítségével értem el¹. Első lépésként megvizsgáltam, hogy a spektrum mekkora hányada esik a B szűrő áteresztési tartományába. Ezt az arányt ezután megszoroztam a csillag bolometrikus luminozitásával, így kaptam meg a nyugalmi luminozitást.

$$L_B = L_0 \cdot \frac{\int f(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int f(\lambda) d\lambda} = 1,27 \cdot 10^{30} \frac{\text{erg}}{\text{s}} = 1,27 \cdot 10^{23} \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad (2)$$

Ahol L_B a B szűrőn keresztül mért, L_0 pedig a bolometrikus nyugalmi luminozitás, $T(\lambda)$ a B szűrőhöz tartozó szűrőfüggvény, $f(\lambda)$ pedig a fluxus a hullámhossz függvényében. A normált spektrum és a B szűrő áteresztési sávja együtt a 6. ábrán láthatóak. A szűrőfüggvényt az SVO *Filter Profile Service* segítségével értem el (Rodrigo & Solano 2020; Rodrigo és mtsai. 2012).

¹<http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/newov2/>

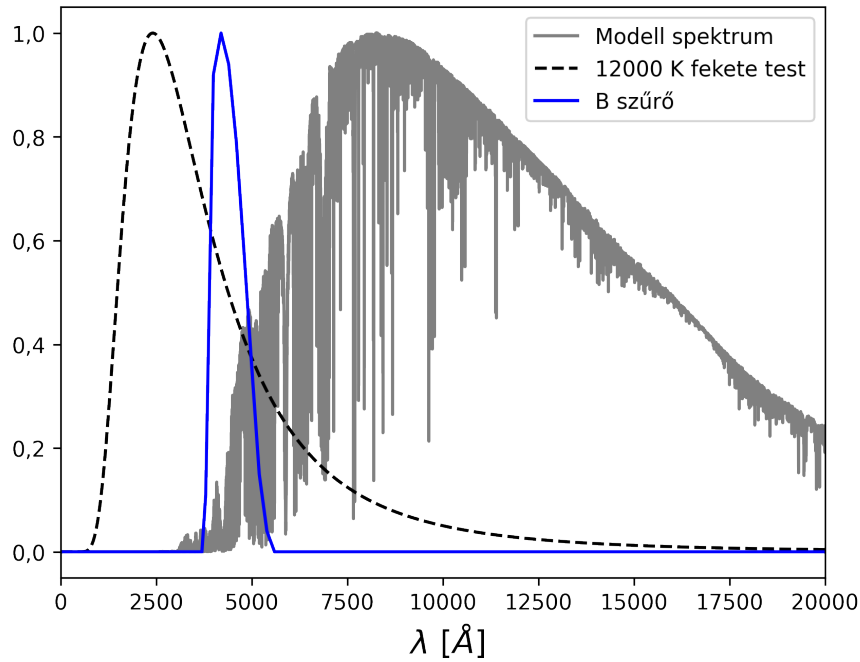
A fler energiákat úgy kaptam, hogy a számolt ED–ket megszoroztam a csillag a nyugalmi luminozításával (Hawley és mtsai. 2014).

Az adatok más szűrőben készült mérésekkel való összevetéséhez célszerű ezeket az energiákat bolometrikus energiákká konvertálni. Ehhez feltételeztem, hogy a flerek hőmérséklete nagyjából 12000 K (Rigney és mtsai. 2022), majd meghatároztam, hogy a spektrum hányadrésze jön át a B szűrőn keresztül, ugyanúgy, mint a luminozítás meghatározásánál:

$$\frac{E_{\text{fler,B}}}{E_{\text{fler,bol}}} = \frac{\int g(\lambda)T(\lambda) d\lambda}{\int g(\lambda) d\lambda} = 0,13 \quad (3)$$

Ahol $g(\lambda)$ a 12000 K-es fekete test spektrumát, míg $T(\lambda)$ a B szűrőhöz tartozó szűrőfüggvényt jelöli. A számításhoz használt spektrum a B szűrő áteresztési sávjával együtt a 6. ábrán látható.

A bolometrikus energiákat úgy határoztam meg, hogy a B szűrőben mért energiaértéket elosztottam a kapott arányszámmal. A detektált flerek időpontjai és a hozzájuk tartozó bolometrikus energia értékek az 1. táblázatban láthatók.



6. ábra. Az ábrán az AD Leo normált spektruma, egy 12000 K-es fekete test normált spektruma és a B szűrő áteresztési sávja látható.

Dátum (UT)	Kezdő időpont (UT)	Vég időpont (UT)	log E _{bol} [erg]
2019. 02. 27.	18:46:42	18:50:30	31,94
2019. 02. 27.	18:56:14	21:22:27	33,28
2019. 03. 22.	23:04:53	00:04:14	33,75
2019. 03. 22.	00:20:15	00:23:07	31,95
2019. 03. 23.	00:07:26	00:14:32	32,88
2019. 03. 23.	00:19:35	00:29:06	33,01
2019. 03. 23.	18:17:09	19:04:21	32,11
2019. 03. 23.	19:06:44	19:21:02	32,22
2019. 03. 23.	19:23:25	19:30:34	32,03
2019. 03. 23.	21:24:55	21:34:27	31,64
2019. 03. 23.	21:58:17	22:10:12	31,67
2019. 03. 24.	19:02:20	19:11:52	31,38
2019. 03. 24.	21:01:30	21:15:48	32,81
2019. 03. 26.	17:19:00	17:42:50	32,98
2022. 03. 04.	18:35:28	18:44:59	32,34
2022. 03. 04.	19:04:04	19:18:22	32,56
2022. 03. 04.	19:32:40	19:39:49	31,34
2022. 03. 04.	19:54:07	20:15:09	32,21
2022. 03. 06.	01:27:53	01:42:11	31,92
2022. 03. 10.	18:02:16	18:07:02	31,66
2022. 03. 10.	21:36:15	21:44:24	32,18
2022. 03. 10.	22:40:08	22:44:54	31,84
2022. 03. 13.	23:29:13	23:41:08	31,97
2022. 03. 12.	17:07:38	17:17:10	32,00
2023. 02. 27.	00:31:50	00:46:08	32,34
2023. 02. 27.	17:47:21	18:01:39	31,95
2023. 02. 27.	18:58:14	19:12:32	32,42
2024. 02. 13.	20:24:44	20:38:51	32,66
2024. 03. 31.	17:36:58	17:41:44	31,67

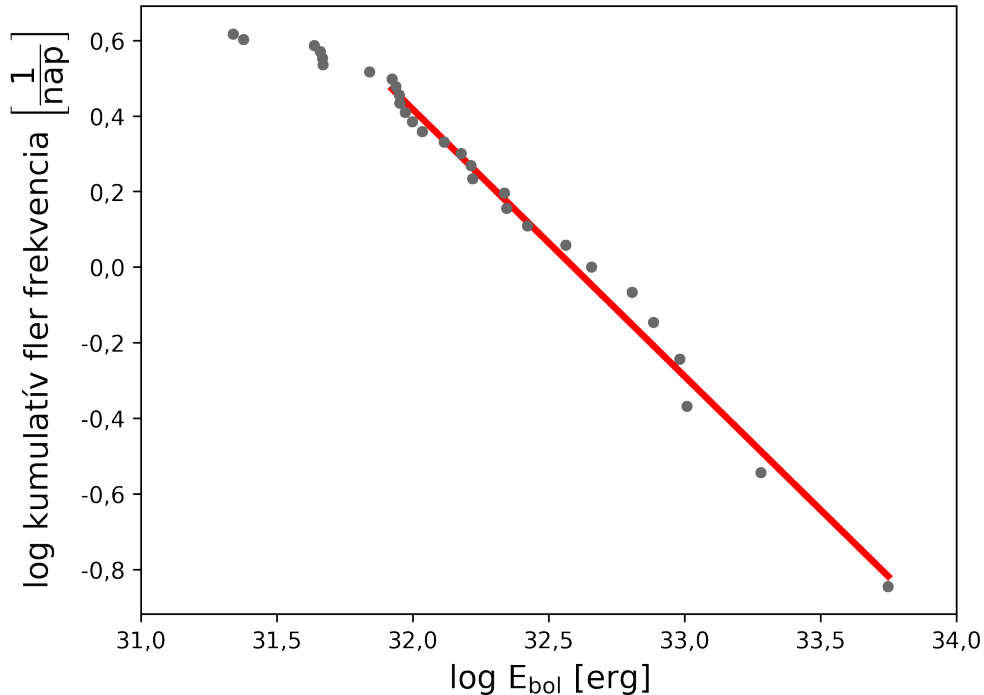
1. táblázat. A Piskésetőn észlelt flerek időpontjai és bolometrikus energiájuk.

3.1.2. Fler frekvencia eloszlás

A fler frekvencia eloszlás, vagy röviden FFD (*Flare Frequency Distribution*) egy olyan módszer nevét takarja, mellyel a flerek energiaeloszlását lehet vizsgálni. Ez a technika egy kumulatív eloszlást alkalmaz, amely szemléletesen ábrázolja, hogy egy csillag esetében, adott időintervallumban, hány olyan fler következik be, amelynek energiája meghalad egy meghatározott küszöbértéket (Hunt-Walker és mtsai. 2012; Lacy és mtsai. 1976).

A flerek energiaeloszlása a legtöbb csillagon jellegzetes mintázatot követ: a kisebb energiájú flerek gyakrabban fordulnak elő, míg a nagyobb energiájúak ritkábbak. Ez az eloszlás egy egyszerű hatványfüggvénnyel írható le, ami log–log skálán ábrázolva egyenes vonalként jelenik meg.

Az észlelési korlátok következtében létezik egy alsó energiaküszöb, amely alatt a flerek detektálása nehézkessé válik, és ez a flerek valós számának alulbecsléséhez vezethet. További kihívást jelent, hogy a magasabb energiájú flerek egyre ritkábban fordulnak elő, ami zajosabbá teszi az FFD magas energiájú tartományát, ezáltal statisztikailag kevésbé megbízhatóvá válik az eloszlás. Ezek a hatások az FFD-n úgy jelennek meg, hogy az egyenes kisebb energiák felé haladva megtörik, és alacsonyabb meredekségű szakaszként folytatódik (Vida és mtsai. 2024). Bár ezt a torzítást különféle módszerekkel korrigálni lehet (Gao és mtsai. 2022), jelen esetben nem befolyásolja jelentősen az eredményeket. Az illesztés során a kisebb energiáknál tapasztalható eltérő meredekségű szakasz jól elkülöníthető, így ezeket az adatpontokat az elemzés során el lehet hagyni. Ez lehetőséget teremt az FFD pontosabb jellemzésére a releváns, magasabb energiatarományban. Az általam elemzett flerek fler frekvencia eloszlása a 7. ábrán látható. Az adatok közül hét, a kisenergiás tartományba eső pontot kizártam az elemzésből, és a fennmaradó, nagyenergiájú tartományt vizsgáltam részletesebben.



7. ábra. Az AD Leo fler frekvencia eloszlása.

Az FFD megfelelő tartományára illesztett egyenest általában az alábbi egyenlettel szokás kifejezni (Petrucci és mtsai. 2024):

$$\log(\text{fler frekvencia}) = (1 - \alpha) \log(E_{\text{bol}}) + \log\left(\frac{\beta}{1 - \alpha}\right) \quad (4)$$

Ahol α és β konstansok. Az α értéke különös jelentőséggel bír, mivel információt hordoz a flerek energiakibocsátásának eloszlásáról és a csillagkorona fűtési mechanizmusáról egy adott megfigyelési periódusban. Ha $\alpha > 2$, az alacsony energiájú flerek dominálnak az összes kibocsátott energia tekintetében, ha $\alpha < 2$, a nagy energiájú flerek játsszák a főszerepet (Hudson 1991).

A megfelelő nagyenergiás tartományra egyenest illesztettem a Python `scipy` moduljának `optimize` almoduljában található `curve_fit` függvényvel, amely a legkisebb négyzetek módszerén alapul. Az illesztett egyenes egyenlete:

$$\log(\text{fler frekvencia}) = -(0,71 \pm 0,02) \cdot \log(E_{\text{bol}}) + (23,0 \pm 0,6) \quad (5)$$

Az illesztés eredménye a megfelelő energiájú tartományban pirossal látható a 7. ábrán. A meghatározott meredekség és annak hibája alapján kiszámítottam a keresett α paraméter értékét és a hozzá tartozó bizonytalanságot, az így kapott eredmény:

$$\alpha = 1,71 \pm 0,02 \quad (6)$$

3.2. Komplex flerek egyedi morfológiai elemzése

Az észlelt flerek között három olyan eset is akadt, ahol a fénygörbe a megszokottnál összetettebb mintázatot mutatott. Az alakjuk arra utalt, hogy az adott fler valójában kettő vagy több fler összegéből állhat össze. Érdemes megemlíteni, hogy az a tény, miszerint egy viszonylag kis mintában (29 fler) három ilyen jelenséget is sikerült detektálnom, arra utalhat, hogy ezek nem pusztán véletlenek, hanem megjelenésük mögött valamilyen jelentősebb fizikai ok húzódhat meg. Továbbá fontos hangsúlyozni, hogy ezek a rövid időskálájú jelenségek különösen érzékenyek a megfigyelés időfelbontására. A felfutási szakasz jellemzően 1 perc körüli, így hosszabb expozíciós idők (akár 20 – 30 s) használata esetén nem lehetne megfelelően detektálni és vizsgálni ezeket az eseményeket.

Ezeknél a komplex flereknél megvizsgáltam, hogy milyen flerprofil illesztésével érhetem el a legjobb eredményt. Az illesztéshez egy olyan modellt alkalmaztam, amely a fler maximuma előtti növekvő szakaszt egy negyedfokú polinommal, míg a maximum utáni csökkenő szakaszt két exponenciális tag összegével közelíti (Davenport és mtsai. 2014). A két szakaszhoz három szabad paraméter tartozik: a fler amplitúdója (A), a fler maximumának helye (t_0), valamint az az időtartam ($t_{1/2}$), amely alatt a fénygörbe a nyugalmi szintről a maximális értékre emelkedik. A modell előírja, hogy a maximum előtti, $t_{1/2}$ -nél távolabb eső pontok fényessége egyezzen meg a nyugalmi értékkel.

A növekvő szakaszt leíró függvény:

$$F_{\text{növekvő}} = A \cdot \left(1 + 1,941 \left(\frac{t - t_0}{t_{1/2}} \right) - 0,175 \left(\frac{t - t_0}{t_{1/2}} \right)^2 - 2,246 \left(\frac{t - t_0}{t_{1/2}} \right)^3 - 1,125 \left(\frac{t - t_0}{t_{1/2}} \right)^4 \right) \quad (7)$$

A csökkenő szakaszt leíró függvény:

$$F_{\text{csökkenő}} = \frac{A}{0,992} \cdot \left(0,689 \cdot e^{-1,6 \cdot \frac{t-t_0}{t_{1/2}}} + 0,303 \cdot e^{-0,2783 \cdot \frac{t-t_0}{t_{1/2}}} \right) \quad (8)$$

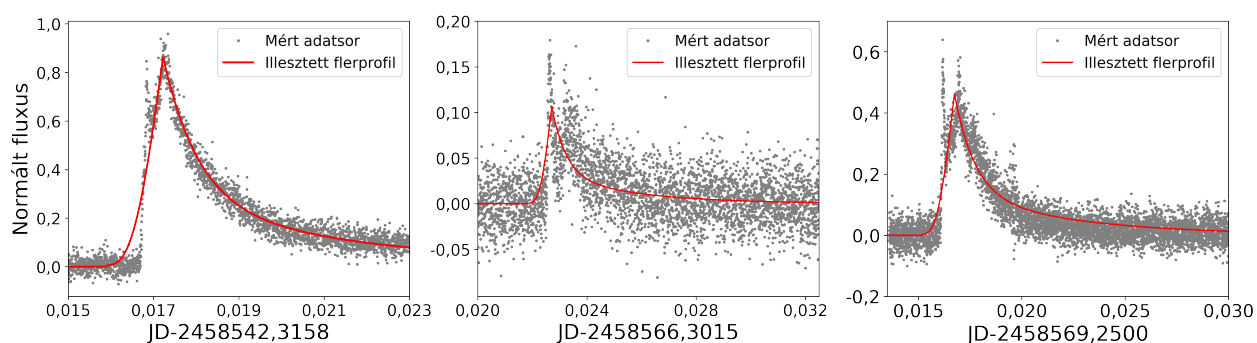
Az illesztés során a csillag relatív fluxusából, azaz az AD Leo és az összehasonlító csillag fluxusának arányából kivontam a nyugalmi értéket, majd leosztottam azzal. Mivel a legtöbb fler esetén az volt az alapfeltevés, hogy a jelenség két flerprofil összegeként írható le, elsősorban ilyen jellegű illesztéseket végeztem. Az illesztést a Python scipy moduljának optimize almoduljában található, legkisebb négyzetek módszerén alapuló curve_fit függvényével valósítottam meg. Tekintettel arra, hogy két fler összege számos paramétert eredményez (t_{01} , A_1 , $t_{1/21}$, t_{02} , A_2 , $t_{1/22}$), először szemrevételezéssel becsültem meg ezek értékeit, így közelítő értékek megadásával hatékonyan meghatározhattam az optimális görbe paramétereit. Az illesztés jóságát a $\chi^2_{\text{redukált}}$ paraméterrel jellemeztem melyet a következő módon számoltam:

$$\chi^2_{\text{redukált}} = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - f(x_i))^2}{\sigma^2} \quad (9)$$

Ahol y_i a korrigált fluxus értékeit jelöli, $f(x_i)$ az illesztett modell által adott fluxus értékeket, σ a fler nyugalmi állapotában a fénygörbe szórása, míg ν az adatpontok számának és az illesztett paraméterek számának különbségeként definiált szabadsági fokok száma. Az így meghatározott paraméter azt mutatja meg, hogy a modell és az adatok között mekkora az eltérés, szórásokban mérve. Ideális illeszkedés esetén az érték nulla lenne, egy általánosan jónak tekintett illeszkedésnél ez az érték körülbelül 1, és minél magasabb az érték, annál gyengébb az illeszkedés minősége. Az illesztés során kapott paraméterek az adott flert tartalmazó mérés kezdőidőpontjával és a $\chi^2_{\text{redukált}}$ paraméterrel együtt a 3. táblázatban láthatóak. A 3 összetettebb fler, amelyre az illesztést elvégeztem, a 9. ábrán látható. Az ábra bemutatja az illesztett függvényt, a függvényben szereplő flerkomponenseket, valamint a fler és az illesztett függvény második flerkomponense közötti különbséget is. Ábrázolva az adatsort illetve az illesztett flerösszegeből a nagyobb fler különbségét, az illesztés hibáitól eltekintve egyedi flerekhez hasonló alakú görbe adódik. Összehasonlításként a 8. ábrán láthatjuk az illesztés során kapott legjobb eredményt abban az esetben, ha két flerprofil összegéből álló függvény helyett egy flerprofilal illesztjük az adatsort, a 2. táblázatban pedig a 8. ábrán szereplő illesztett flerek adatait illetve az illesztés jóságát jellemző $\chi^2_{\text{redukált}}$ paramétert.

Kezdőidőpont [JD]	2458542,3158	2458566,3015	2458569,2500
t_0 [JD-kezdőidőpont]	$0,017225 \pm 0,000003$	$0,02271 \pm 0,00001$	$0,016748 \pm 0,000006$
A	$0,864 \pm 0,004$	$0,106 \pm 0,004$	$0,463 \pm 0,004$
$t_{1/2}$ [perc]	$1,91 \pm 0,01$	$1,18 \pm 0,06$	$2,24 \pm 0,03$
$\chi^2_{\text{redukált}}$	3,31	1,72	2,02

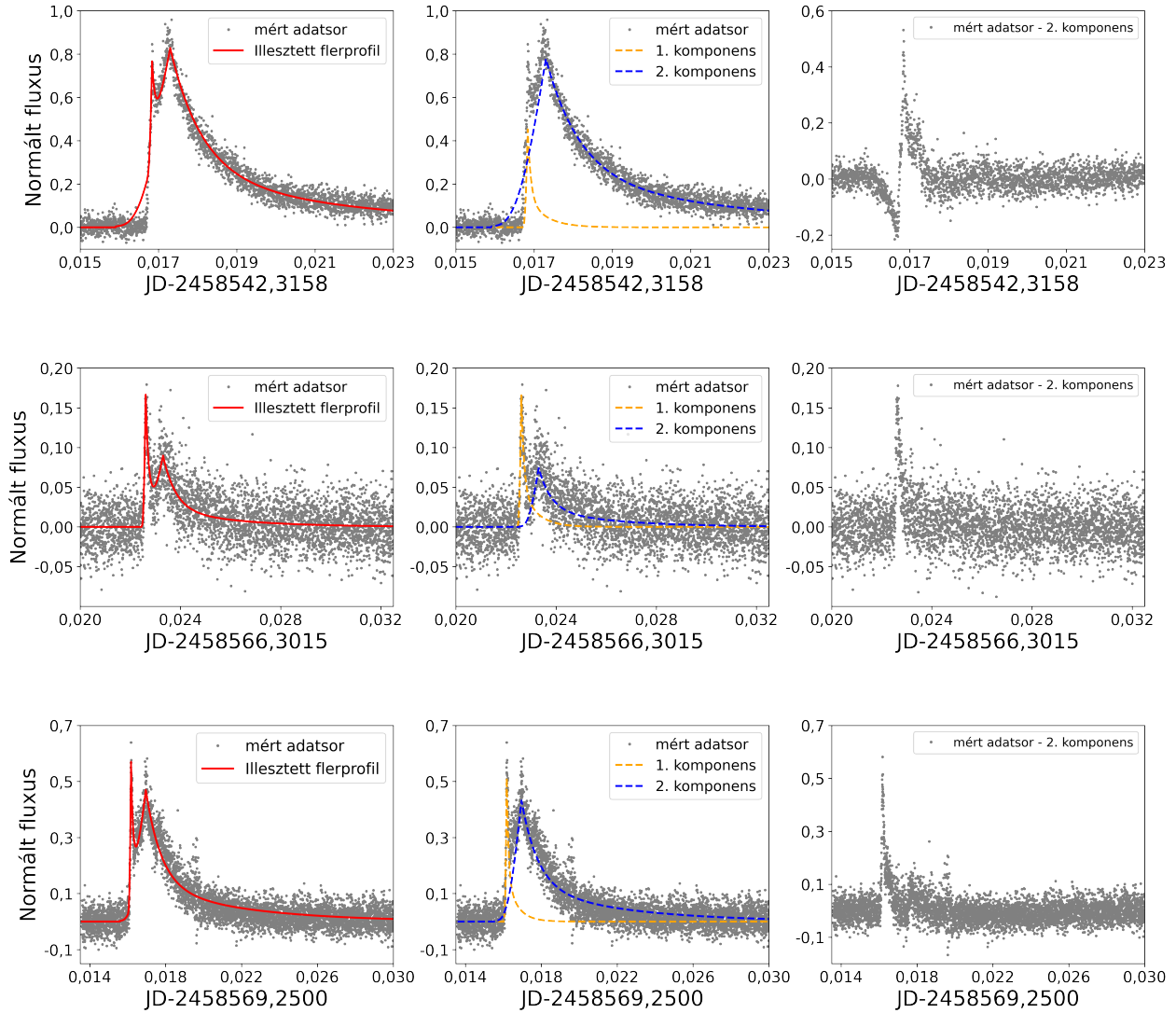
2. táblázat. A komplexebb flereket tartalmazó mérés kezdőidőpontja, a flerekre illesztett 1 flerprofilból álló függvény paraméterei és azok hibái valamint az illesztés jóságát jellemző $\chi^2_{\text{redukált}}$ paraméter.



8. ábra. A három komplexebb fler és a rájuk illesztett 1 flerprofilból álló függvény.

Kezdőidőpont [JD]	2458542,3158	2458566,3015	2458569,2500
t_{01} [JD-kezdőidőpont]	$0,017300 \pm 0,000004$	$0,022613 \pm 0,000003$	$0,016178 \pm 0,000001$
A_1	$0,800 \pm 0,005$	$0,168 \pm 0,008$	$0,51 \pm 0,01$
$t_{1/2_1}$ [perc]	$2,01 \pm 0,01$	$0,23 \pm 0,01$	$0,222 \pm 0,003$
t_{02} [JD-kezdőidőpont]	$0,016836 \pm 0,000002$	$0,02331 \pm 0,00002$	$0,016958 \pm 0,000005$
A_2	$0,45 \pm 0,01$	$0,074 \pm 0,004$	$0,432 \pm 0,004$
$t_{1/2_2}$ [perc]	$0,18 \pm 0,01$	$1,15 \pm 0,07$	$1,97 \pm 0,03$
$\chi^2_{\text{redukált}}$	1,72	1,13	1,18

3. táblázat. A komplexebb flereket tartalmazó mérés kezdőidőpontja, a flerekre illesztett két flerprofil összegéből előálló függvény paraméterei és azok hibái valamint az illesztés jóságát jellemző $\chi^2_{\text{redukált}}$ paraméter.



9. ábra. A bal oldali oszlopban láthatók az eredeti adatsorok, valamint pirossal a két fler összegével illesztett függvény. A középső oszlop szintén az eredeti adatsorokat mutatja, ahol külön-külön ábrázolva, szaggatott vonallal láthatók az illesztett flerprofilok összegében szereplő egyes flerek. A jobb oldali oszlopban az eredeti adatsor és az illesztett későbbi egyedi fler közötti különbség jelenik meg. Az ábrákon az időtengely mindhárom esetben az adott mérés Julián-dátuma és a mérés kezdőidőpontjában vett Julián-dátum különbségeként van megadva.

3.3. Oszcilláció keresése a flerek leszálló ágán

A fénygörbék elemzésének következő fázisa a flerek leszálló ágának vizsgálata, különös tekintettel a kváziperiodikus pulzációkra (QPP, *Quasi Periodic Pulsation*). Ezek az immár több mint fél évszázada ismert jelenségek gyakori kísérői mind a nap-, mind a csillagflereknek. Széles elektromágneses spektrumban detektálhatók, időtartamuk változatos: a másodperc törtrésze és több óra között mozoghat (Bastian és mtsai. 1990; Houdebine és mtsai. 1993). Ez a sokszínűség számos elméleti modell megszületéséhez vezetett, amelyek magyarázatot kívánnak adni a jelenségre (Zimovets és mtsai. 2021). E pulzációk tanulmányozása kulcsfontosságú a flerek fizikájának és keletkezési mechanizmusának mélyebb megértéséhez, illetve vizsgálatuk betekintést nyújt a csillagkorona plazmájának dinamikájába és mágneses szerkezetébe (Li és mtsai. 2022).

A rövid ideig tartó pulzációk megfigyelése kihívásokkal jár, a jobb időfelbontás jelentősen növelheti az észlelés esélyét (Panferov és mtsai. 2024). A használt 0,286 másodperces időfelbontás lehetőséget nyújt akár másodperces időskálán jelentkező pulzációk észlelésére, a cél ilyenek keresése volt.

Az adatfeldolgozás során az STFT (*Short Term Fourier Transform*) módszert alkalmaztam, amely, ahogy a neve is sugallja, a Fourier-transzformáció egy speciális változata. A hagyományos Fourier-transzformációval ellentétben, ez a módszer kétdimenziós adatsort állít elő, ami lehetővé teszi a jelben lokálisan megjelenő szinuszkomponensek detektálását és azok pontos frekvenciájának meghatározását. A módszer lényege a fénygörbe kisebb ablakokra történő felosztása, majd az egyes ablakokban külön-külön Fourier-transzformáció elvégzése. Az ablak mérete határozza meg a felbontás mértékét: nagyobb ablak esetén javul a frekvenciafelbontás, viszont az időfelbontás csökken, míg kisebb ablakoknál épp ennek fordítottja érvényesül. Az STFT eredményeit spektrogram formájában ábrázoltam. Ennek minden egyes pontja egy adott időpontbeli frekvenciakomponens intenzitását mutatja. Ezzel a 2D-s megjelenítéssel nyomon lehet követni a jel frekvenciáinak időbeli változásait is.

Lényegében az STFT a konvolúciója a jelnek és a léptetett ablaknak, azaz:

$$STFT(t, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cdot \omega^*(\tau - t) \cdot e^{-2i\pi\tau\nu} d\tau \quad (10)$$

Ahol $f(\tau)$ a transzformálandó jel, $\omega(t)$ pedig az ablak alakját leíró függvény. Ez ebben az esetben egy Gauss:

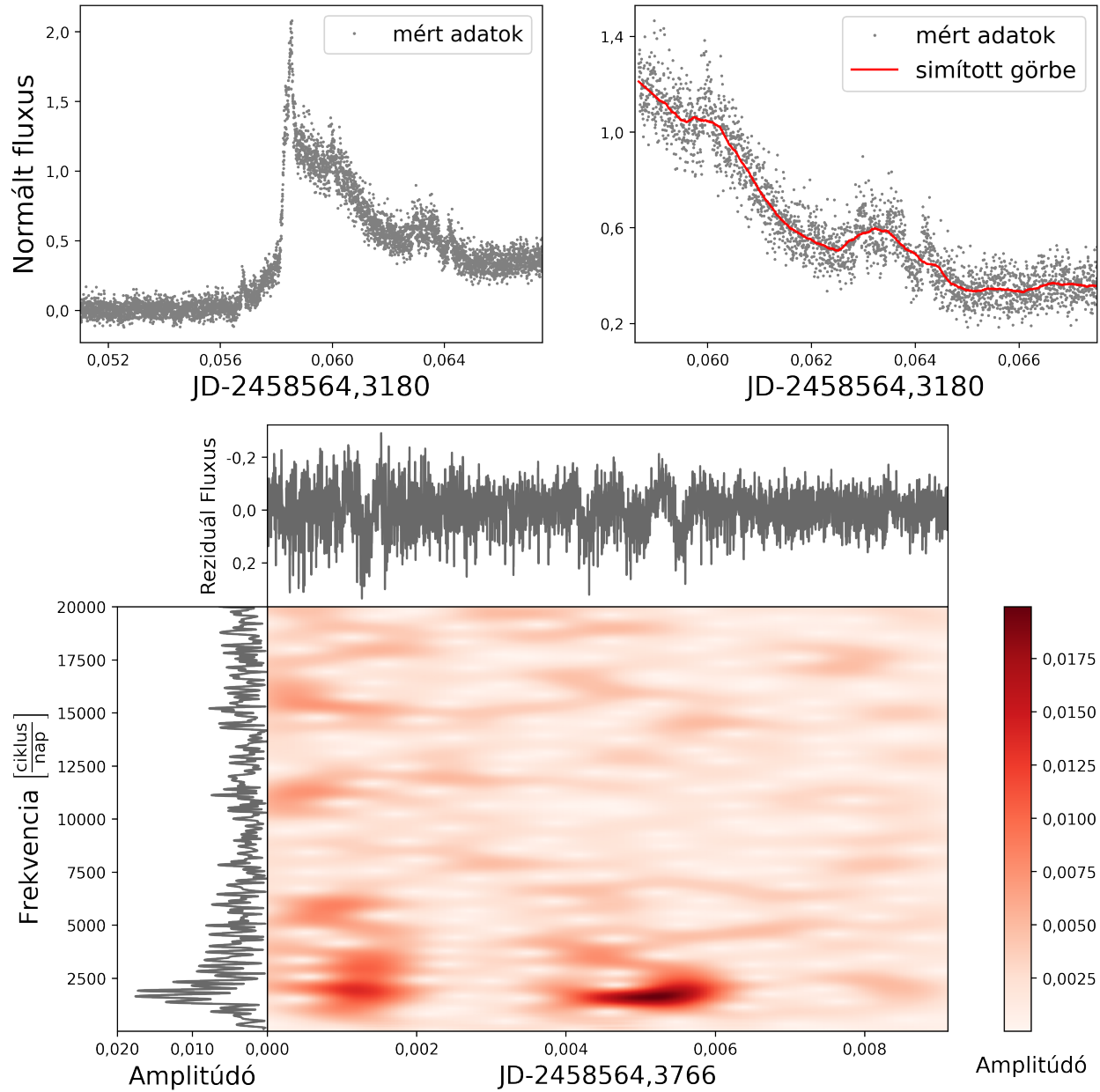
$$\omega(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

Ahol σ az ablak szélességének felel meg.

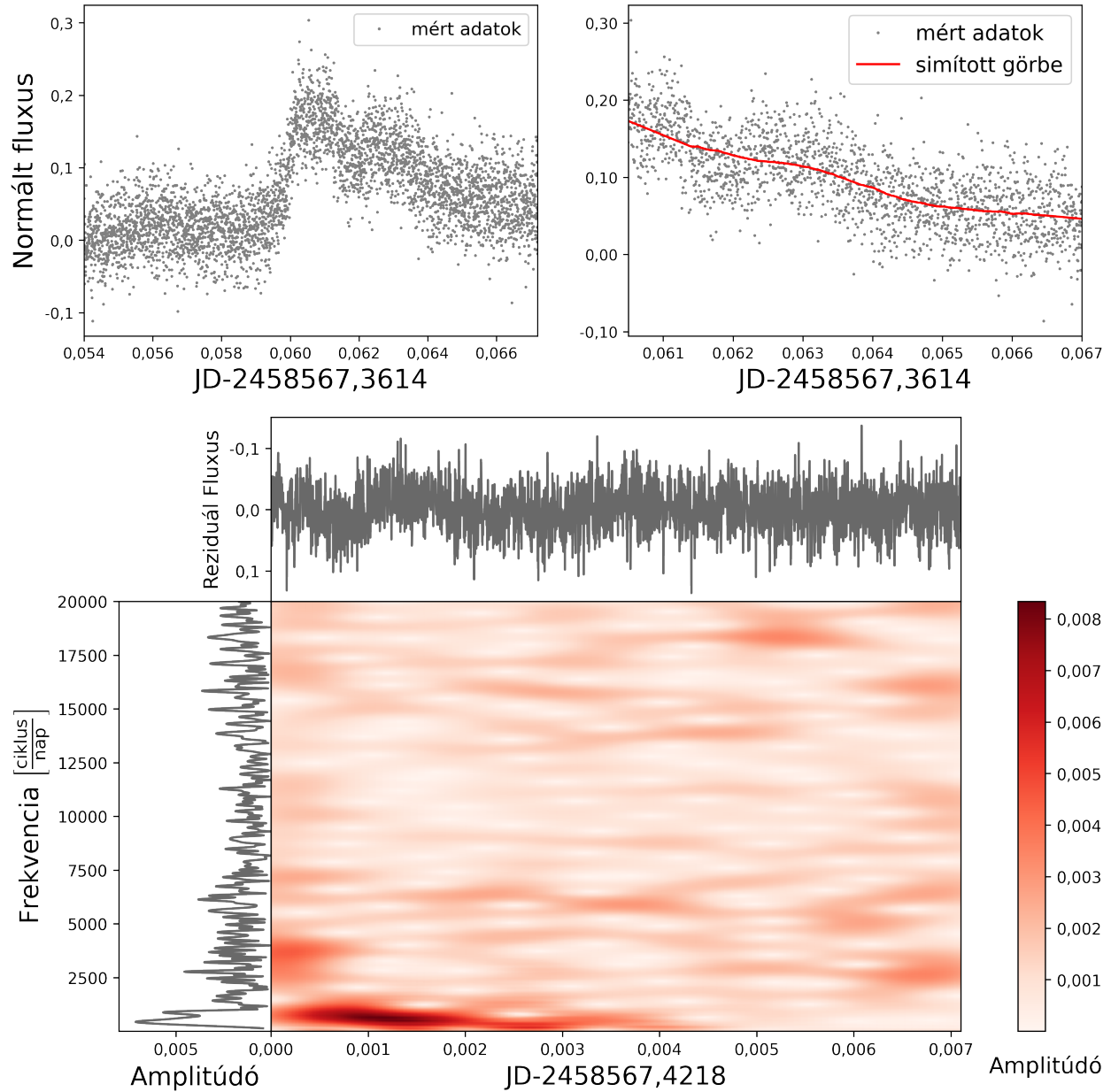
Az STFT egy alternatívája a wavelet transzformáció, amely kis oszcilláló hullámfüggvények csoportját alkalmazza a jól meghatározott ablakok léptetése helyett (Grinsted és mtsai. 2004; Thomas és mtsai. 2024). Ez a módszer lehetővé teszi a jelek egyidejű elemzését különböző idő- és frekvenciaskálákon, ami bizonyos esetekben részletesebb információt nyújthat. Azonban a wavelet transzformáció számításigényesebb az STFT-nél. Ennek a módszernek az alkalmazása nem eredményezett volna jelentős javulást az eredményekben, viszont számottevően megnövelte volna az elemzés időtartamát, ezért döntöttem az STFT mellett.

Ezzel a módszerrel a komplexebb flerek közül azokat vizsgáltam meg, amelyeknél feltételeztem, hogy kváziperiodikus pulzációk is előfordulhatnak – körülbelül 10 ilyen fler volt. Mivel ezeket a pulzációkat főként a flerek lecsengő szakaszán várjuk, minden esetben csak ezt a részt elemeztem. A fénygörbe ezen szakaszából egy simított változatot vontam ki, gondosan ügyelve arra, hogy ne simítsam ki a keresett frekvenciakomponenseket. A simításhoz a Python `scipy` csomagjának `signal` almoduljában található `savgol_filter` függvényét használtam. Ezt követően a Python Seismolab csomagjának `Windowed Lomb-Scargle Transform` függvényét használtam az idő-frekvencia összefüggés kiszámítására. Ez a függvény az STFT egy változata, amely lehetővé teszi nagy mennyiségű adat hatékony feldolgozását – ami elengedhetetlen a rövid időfelbontásból származó nagy adatállomány kezelésekor. A módszer hasonló a jel és egy Gauss-ablak konvolúciójához, azzal a különbséggel, hogy itt a Fourier-transzformációt a Lomb-Scargle periodogrammal számítjuk ki. Ennek egyik legnagyobb előnye, hogy képes kezelni a csillagászati adatsorokban gyakran előforduló egyenetlen mintavételezést, ezért gyakran használják az idő-frekvencia analízis során (Kolláth & Oláh 2009).

A vizsgált flerek közül kettőnél észleltem lehetséges kváziperiodikus pulzációt. A 10. ábrán és a 11. ábrán láthatjuk magukat a flereket, az elemzés előtt a leszálló ágból kivont simított görbét valamint az STFT eredményeképp kapott spektrogrammot. A 10. ábrán látható fler esetén a detektált periódus körülbelül 55 másodperc, míg a 11. ábrán látható fler esetén nagyjából 3,3 perc. Fontos hangsúlyozni, hogy ilyen hosszú periódusok vizsgálata gyorsfotometriai mérésekkel könnyen megvalósítható, míg hosszabb, akár 20 – 30 másodperces expozíciós idő esetén ez már lényegesen nehezebb, és nem feltétlenül kivitelezhető.



10. ábra. A bal felső ábrán az eredeti fler látható, míg a jobb felső ábrán a fler leszálló ága külön van kiemelve, rajta a simított görbével, amelyet az STFT elvégzése előtt vontam ki belőle. Alul az STFT eredménye jelenik meg kétdimenziós ábraként, a Fourier-spektrummal (bal oldalon, a frekvencia értékek ciklus/nap-ban megadva), valamint a fler leszálló ágának és a simított görbének a különbségével (közvetlenül az STFT felett).



11. ábra. A bal felső ábrán az eredeti fler látható, míg a jobb felső ábrán a fler leszálló ága külön van kiemelve, rajta a simított görbével, amelyet az STFT elvégzése előtt vontam ki belőle. Alul az STFT eredménye jelenik meg kétdimenziós ábraként, a Fourier-spektrummal (bal oldalon, a frekvencia értékek ciklus/nap-ban megadva), valamint a fler leszálló ágának és a simított görbének a különbségével (közvetlenül az STFT felett).

4. Eredmények összevetése a TESS űrtávcső méréseivel

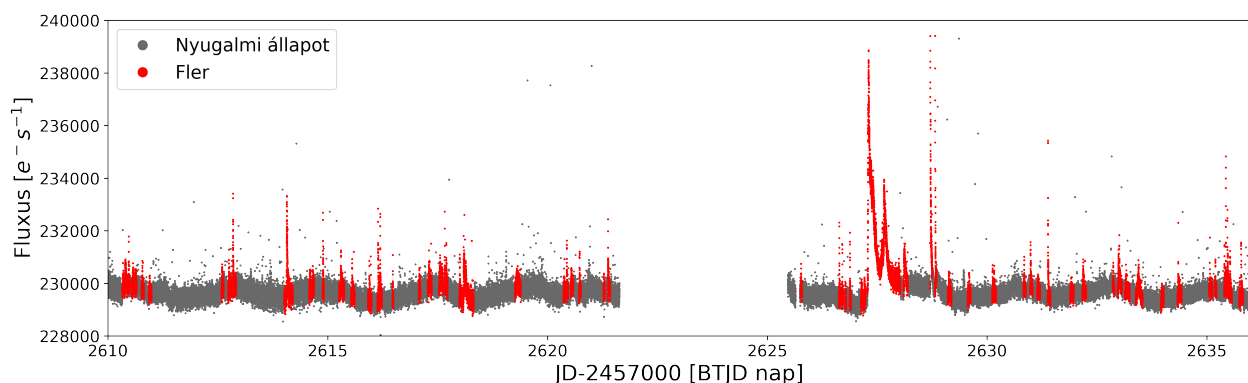
4.1. A TESS projekt

A TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*) egy 2018 óta működő űrtávcső, amelyet a teljes égbolt átfogó felmérésére terveztek (Ricker és mtsai. 2015). A távcső legfőbb célja – ahogyan neve is jelzi – az exobolygók felfedezése a tranzitmódszer segítségével. Ehhez a hagyományosnál rövidebb expozíciós időkre van szükség, ami lehetővé teszi a gyorsfotometriai mérések hatékony összehasonlítását a TESS adataival.

4.2. Adatok redukálása

A távcső számos közeli M törpéről gyűjtött adatokat, köztük az általam vizsgált AD Leo-ról is. Összesen négy különböző szektorból származnak az adatok, eltérő expozíciós időekkel. Mivel extrém rövid időfelbontással készültek a mérések, ezért az eredmények összehasonlításához igyekeztem a lehető legrövidebb expozíciós idejű TESS-mérést kiválasztani. Végül a 2022-ből származó, 48-as szektorbeli, 20 másodperces expozíciós idejű adatsor mellett döntöttem. Ez nagyjából 27 nap hosszú, a fénygörbe közepén négy nap kihagyással, amikor a TESS adatok telemetriája történik. A közeli fényes csillag miatt a többi szektor használhatatlan.

Az adatsort a Python *lightkurve* csomagjának segítségével értem el, a *Science Processing Operations Center* (SPOC) fénygörbéjét használva (Jenkins és mtsai. 2016). Az első feladat a flerek azonosítása volt. Ehhez a Bartus János által készített szkriptet használtam, amely vizuálisan megjeleníti a fénygörbét, lehetővé téve, hogy manuálisan jelöljem a flerek helyét. A flerek azonosításának eredményét egy új fájlba mentette el a program. Ezzel a módszerrel összesen 69 flert sikerült azonosítanom. Az adatsor és rajta a bejelölt flerek a 12. ábrán láthatóak.



12. ábra. A TESS fénygörbe az AD Leo-ról, az azonosított flereket pirossal jelöltem.

4.3. Flerek energiaeloszlásának vizsgálata

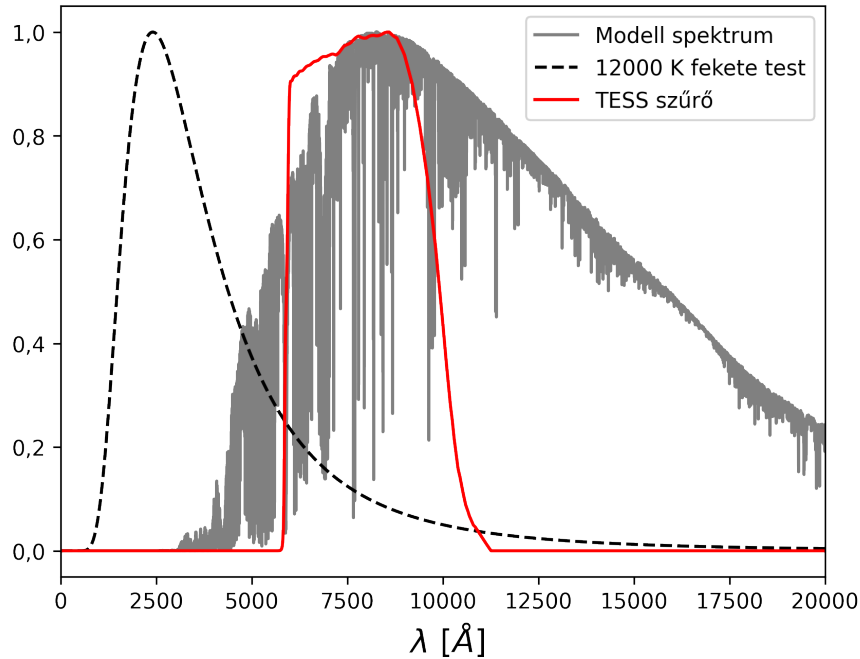
A következő lépésben, hasonlóan a Piskéstetőn végzett mérésekhez, meghatároztam az FFD-t (*Flare Frequency Distribution*).

Ehhez először ki kellett számolnom a flerekhez tartozó ekvivalens időtartam (*Equivalent Duration*, ED) értékeket. Mivel a TESS fénygörbéje kevésbé sima, a nyugalmi fluxusértéket minden flernél külön kellett meghatározni. Ehhez az adott fler lokális környezetére egy másodfokú polinomot illesztettem, ezzel elosztottam a fluxust, majd kivontam belőle egyet, az (1)–es képletnek megfelelően. Végül minden flernél külön elvégeztem az integrálást, amellyel megkaptam a keresett ED-értékeket.

Az energiák meghatározásához a következő lépés az AD Leo nyugalmi luminozitásának kiszámítása a TESS szűrőn keresztül. Ezt a B szűrőhöz hasonló módon végeztem el. A használt modell spektrum és a TESS szűrő áteresztési függvénye a 13. ábrán látható. A TESS szűrőfüggvényét, ugyanúgy, ahogy a B szűrőét az SVO Filter Profile Service segítségével értem el. A kapott luminozitás:

$$L_{\text{TESS}} = 2,5 \cdot 10^{31} \frac{\text{erg}}{\text{s}} = 2,5 \cdot 10^{24} \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad (12)$$

Ezt az értéket megszorozva az ED eredményekkel, megkaptam a flerek energiáit. A B szűrő méréseihez hasonlóan itt is átkonvertáltam az energiákat bolometrikus értékekké, amelyhez ismét egy 12000 K-es fekete test spektrumát használtam. A használt spektrum és a TESS szűrő áteresztési sávja a 13. ábrán látható.

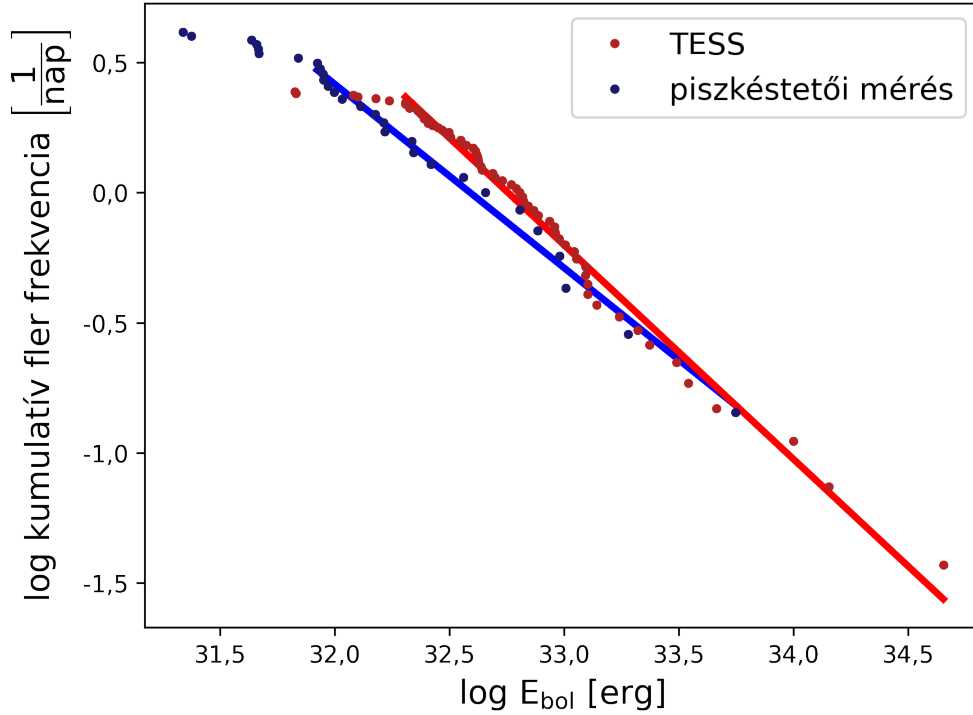


13. ábra. Az ábrán az AD Leo normált spektruma, egy 12000 K-es fekete test normált spektruma és a TESS szűrő áteresztési sávja látható.

Itt az arányszám, ami megadja, hogy a teljes spektrumnak hányadrésze jön a TESS szűrőn keresztül:

$$\frac{E_{\text{fler,TESS}}}{E_{\text{fler,bol}}} = \frac{\int f(\lambda) T_{\text{TESS}}(\lambda) d\lambda}{\int f(\lambda) d\lambda} = 0,14 \quad (13)$$

Ahol $f(\lambda)$ a fekete test spektruma, $T_{\text{TESS}}(\lambda)$ pedig a TESS szűrő áteresztési tartománya. Az így meghatározott arányszámmal elosztva az eddig számított energiákat, megkaptam a bolometrikus energiaértékeket, majd a piszkésetetői adatokkal együtt ábrázoltam a fler frekvencia eloszlást, mely a 14. ábrán látható.



14. ábra. Az AD Leo fler frekvencia eloszlása a piszkésetetői mérések valamint a TESS adatok alapján.

A 4. egyenletnek megfelelően a TESS adatsorra is illesztettem egy egyenest ugyanolyan módon, mint a piszkésetetői adatok feldolgozásánál. A 14. ábrán a TESS méréseiből származó adatokra illesztett egyenes pirossal jelenik meg, még a Piszkésetetői adatokra illesztett görbe kékkel. Mindkettő azon az energiatartományon van ábrázolva, amit az illesztéshez felhasznált adatok határoznak meg. Az illesztett egyenes egyenlete:

$$\log(\text{fler frekvencia}) = -(0,82 \pm 0,01) \cdot \log(E_{\text{bol}}) + (27,0 \pm 0,4) \quad (14)$$

Az egyenes meredekségéből meghatároztam a rá jellemző α paramétert. A kapott érték:

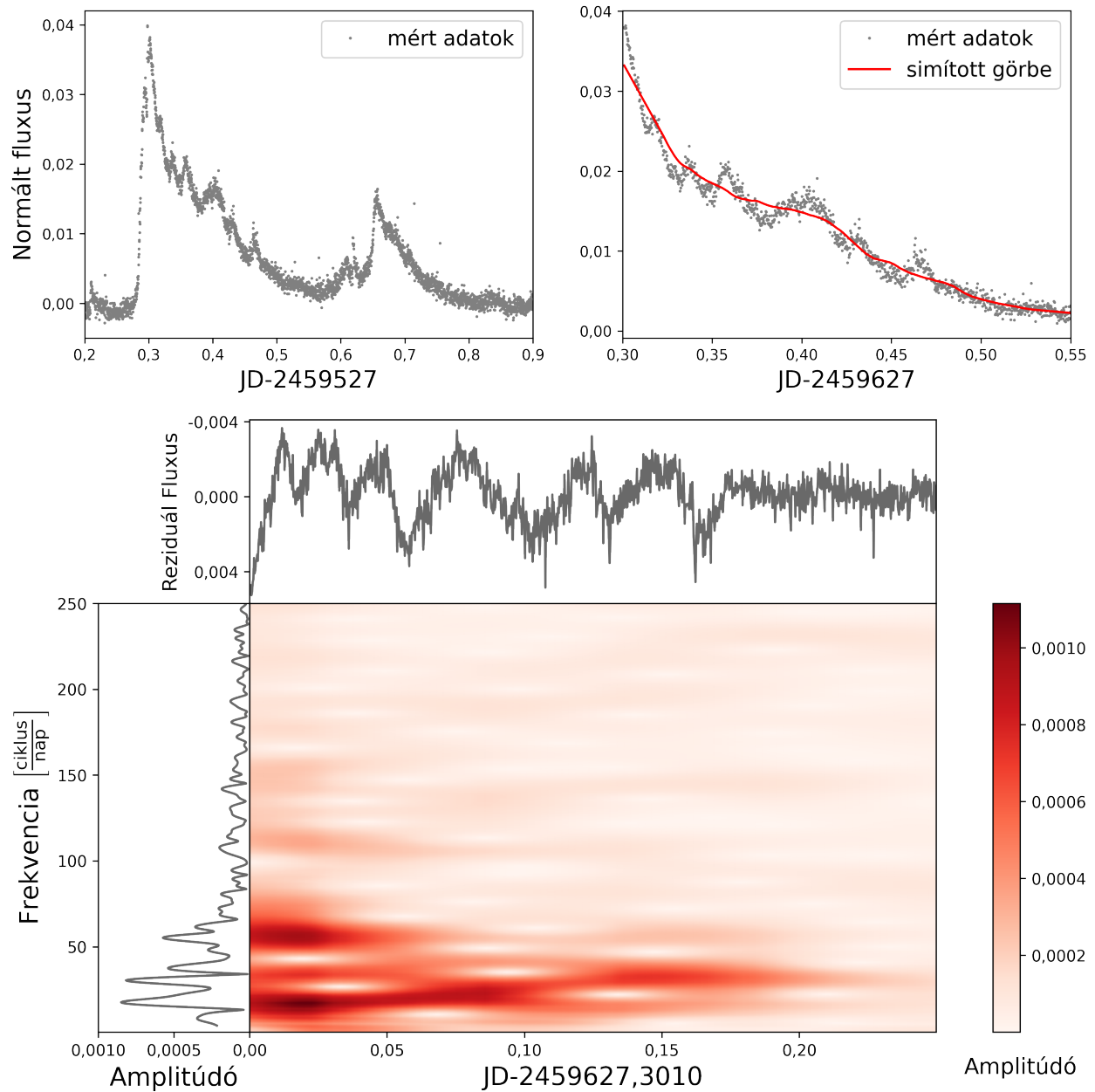
$$\alpha_{\text{TESS}} = 1,82 \pm 0,01 \quad (15)$$

Ami egy kicsit nagyobb, mint a piszkéstetői mérésekből kapott adat, az eltérést valószínűleg az észlelési időben lévő különbség okozhatja. A kapott eredmények konzisztensek az irodalomban elfogadott értékekkel (Bai és mtsai. 2023).

A 14. ábra részletes elemzése több érdekes megfigyelést tesz lehetővé. Egyrészt látható, hogy a TESS hosszabb mintavételezési ideje révén ($t_{\text{TESS}} = 23$ nap, míg $t_{\text{Piszkéstető}} = 6,5$ nap) a mérései több nagy energiájú flert tartalmaznak. Ugyanakkor a piszkéstetői műszer kiváló időfelbontása lehetővé teszi a kisebb energiájú flerek észlelését is, amelyeket a TESS nem képes rögzíteni. Ez hangsúlyozza, hogy a gyorsfotometriai földi mérések különösen értékesek lehetnek a kisebb energiájú flerek viselkedésének és gyakoriságának pontosabb megértésében.

4.4. Oszcilláció keresése a flerek leszálló ágán

A TESS 23 napos megfigyelési adatsorában elmezetem a bonyolultabb flerek viselkedését. Bár itt a kevésbé jó időfelbontás miatt nem sikerült olyan flerformákat találni, amelyeket egy kisebb, gyorsan növekvő és egy ezt követő nagyobb, lassan lecsengő fler kombinációjával modellezni lehetett volna, lehetőség nyílt a kváziperiodikus pulzációk vizsgálatára. Az észlelt flerek között egy lehetséges jelöltet találtam, amelyen további elemzést végeztem, hogy azonosítsam az esetleges oszcillációk jellegét. A fler illetve a hozzá tartozó spektrogram a 15. ábrán látható, a detektált periódus körülbelül 1,3 óra.



15. ábra. A bal felső ábrán az eredeti fler látható, míg a jobb felső ábrán a fler leszálló ága külön van kiemelve, rajta a simított görbével, amelyet az STFT elvégzése előtt vontam ki belőle. Alul az STFT eredménye jelenik meg kétdimenziós ábraként, a Fourier-spektrummal (bal oldalon, a frekvencia értékek ciklus/nap-ban megadva), valamint a fler leszálló ágának és a simított görbének a különbségével (közvetlenül az STFT felett).

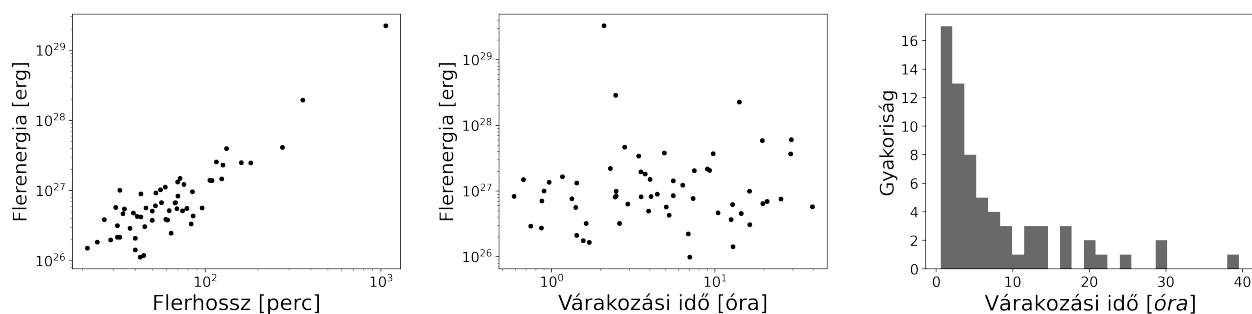
4.5. Flerek statisztikai jellemzői

A TESS hosszabb mintavételezési ideje és a több detektált fler lehetővé teszi olyan statisztikai jellemzők vizsgálatát, amelyeket a Piskésetőn készült mérésekkel még nem lehet kellően jól szemléltetni.

Az egyik ilyen jellemző a flerek energiájának és hosszának kapcsolata. Felmerül a kérdés, hogy mit is értünk a flerek hosszán. A flerek azonosításakor gondosan kiválasztottam azokat a pontokat, amelyek egyértelműen a flerre jellemző fázisokhoz tartoznak, vagyis ahol a fénygörbe az emelkedő, illetve az azt követő csökkenő szakaszban van. Így a fler kezdeti és végpontjának időbeli különbsége alapján határoztam meg a flerek hosszát. A hosszértékek és a hozzájuk tartozó, korábban kiszámított energiák ábrázolása során azt tapasztaltam, hogy általában a hosszabb flerekhez nagyobb energia társul. Ez a kapcsolat jól látható a 16. ábra bal oldalán.

Emellett megvizsgáltam, hogy van-e összefüggés egy adott fler energiája, valamint a közte és az előző fler között eltelt várakozási idő között. Ha ebben az esetben korrelációt tapasztaltam volna, az arra utalhatna, hogy a flerenergia bizonyos módon felhalmozódik. Az eredmények szerint azonban a flerek energiája függetlennek bizonyult az eltelt időtől (lásd a 16. ábrát).

Egy további statisztikai jellemző, amelynek vizsgálata földi mérésekkel nehezebb, a flerek közötti várakozási idők eloszlása. Ennek elemzése választ adhat olyan kérdésekre, mint hogy a flerek egymástól függetlenül, véletlenszerűen jelennek-e meg, vagy előfordulhat-e, hogy egy fler megjelenése más flerek hatására történik (Hawley és mtsai. 2014). A várakozási idők hisztogramjára jól illeszkedett egy exponenciális görbe (16. ábra), ami arra utal, hogy a jelenség egy Poisson-folyamat, az egyedi flerek megjelenése véletlenszerű. Az energiák hatványfüggvény alakú eloszlása és az exponenciális eloszlású várakozási idő együttesen arra utalhatnak, hogy a flerek önszerveződő kritikus rendszerek (Aschwanden 2011).



16. ábra. Bal oldalt a flerenergia látható a flerhossz függvényében, középen a flerenergia és a várakozási idő kapcsolata, jobb oldalt pedig az egyedi flerek között eltelt várakozási idők hisztogramja.

5. A használt módszerek egyéb alkalmazása

A gyorsfotometriában rejlő lehetőségek feltérképezése mellett a kidolgozott adatfeldolgozási eljárás hasznosítható más mérések elemzésénél is, különösen olyan esetekben, ahol a gyors mintavételezés miatt a csillagprofilok nem körszimmetrikusak. Egy ilyen konkrét alkalmazási lehetőség a 2024 augusztusában Piskésetőn megvalósított mérési program, amelyben Regály Zsolt és témavezetőm közreműködésével vettem részt, és amelynek során saját távcsőidővel végeztem méréseket két héten keresztül az 1 m-es távcső EMCCD kamerájával. Ez a két hetes program a protoplanetáris korongok gyors időskálájú fényváltozásainak keresésére irányult. A projekt során négy célpontot vizsgáltunk: 2MASS J20572484+4419470, DI Cep, V1331 Cyg és V1578 Cyg. A 2MASS J20572484+4419470 csillagról összesen 7, 2 órányi, a DI Cep-ről 6, 8 órányi, a V1331 Cyg-ről 10, 9 órányi, míg a V1578 Cyg-ről 3, 5 órányi mérési adatot gyűjtöttünk. Bár ennyi mérés alatt egyik csillagnál sem észleltem másodperces időskálájú felfényesedéseket, a jelenség elméleti értelmezése még folyamatban van.

Annak ellenére, hogy a kutatás asztrofizikai motivációja eltér az eredeti gyorsfotometriai vizsgálatokétól, az adatfeldolgozási követelmények teljesen megegyeznek. A program kiváló lehetőséget nyújtott az általam kidolgozott adaptív apertúra fotometriai módszer további finomítására.

6. Összefoglalás, jövőbeli tervek

A projekt során először egy egyedi kódot fejlesztettem, amely a szükséges képkorrekciók elvégzése mellett hatékonyan kezeli az apertúra fotometria során felmerülő kihívásokat. Összesen 157 órányi adatsort dolgoztam fel, amelyekből 29 flert sikerült detektálnom. A detektált flerek fénygörbéinek jel-zaj arányának javítása érdekében továbbfejlesztettem az adatfeldolgozó kódot oly módon, hogy képes legyen az adaptív apertúra fotometria során felmerülő feladatokat megoldani. Ezzel a módszerrel újból elemeztem a detektált flereket tartalmazó adatsorokat, ezzel javítva azok minőségén. A fotometriai elemzést követően meghatároztam az egyes flerekre jellemző ekvivalens időtartamot, valamint az AD Leo nyugalmi luminozitását a B szűrőben. Ezek alapján kiszámítottam a flerek energiáit, külön-külön az adott szűrőre vonatkozóan, illetve a bolometrikus energiákat is. Elmeztem a flerenergiák eloszlását, meghatároztam a fler frekvencia eloszlást, illetve az arra jellemző egyik legfontosabb paramétert (α). A detektált komplexebb flerekre megfelelő flerprofilokat illesztettem, miközben arra is választ kerestem, hogy leírhatók-e egy gyorsan és egy lassabban lecsengő komponens összegével. A detektált flereken ritkább jelenségek, például a leszálló ágon megjelenő rövid periódusú oszcillációk után kutattam, és két potenciális jelöltet azonosítottam. Az eredményeket összevetettem a TESS űrtávcső méréseivel, ahol szintén kiszámoltam a flerek energiáit, meghatároztam a fler frekvencia eloszlást, és oszcillációk után is kutattam. Az összehasonlított adatok összhangban voltak a piszkéstetői mérésekből származó eredményekkel. A TESS adatok elemzésével további jelenségeket is vizsgáltam, például a flerenergia és a flerhossz közötti kapcsolatot, az egyes flerek közötti várakozási időt és annak energiafüggését, valamint az időbeli eloszlást.

A flerek elemzése során világosan kirajzolódott, hogy a jó időfelbontású földi mérések milyen gazdag részletességgel képesek feltárni e jelenségek szerkezetét és dinamikáját. A megfelelő expozíciós idő alkalmazásával több kisebb energiájú fler detektálására volt lehetőségem, mint a hosszabb expozíciós időket alkalmazó TESS adatsorokban. Emellett komplex, többsúcsú flereket is azonosítottam és elemeztem. Ezek a TESS gyengébb időfelbontásával egyáltalán nem lennének észlelhetők. Továbbá, sikerült két fleren lehetséges, rövid periódusú oszcillációt is azonosítani a flerek leszálló ágán, amelyek nagyobb expozíciós idővel (például a TESS adatsoraiban alkalmazottakkal) nem detektálhatók.

Az előzetes eredményeimet a 2024 tavaszán megrendezett YSC (*Young Scientist Conference on Astronomy and Astrophysics*) keretében mutathattam be, ez a lehetőség nemcsak az előadói készségeim fejlesztésében segített, hanem értékes szakmai visszajelzéseket is kaptam, amelyek hozzájárultak a kutatásom további fejlődéséhez.

A jövőbeli tervek között szerepel az adatsor további mérésekkel való bővítése, melyre február elején illetve márciusban lesz lehetőség. Már nyújtottam be távcsőidőpályázatot a piszkéstetői obszervatórium RCC távcsövének EMCCD kamerájával történő mérésekre. Ezt el is nyertem, így január 30. és február 6., február 13. és február 20. illetve március 27. és április 3. között lesz lehetőség új mérések készítésére. Tervben van egy japán-indiai szimultán mérési programhoz való csatlakozás is, amelynek keretében a piszkéstetői távcső segítségével egyidejűleg nyomon követhetnénk az AD Leo fleraktivitását. A program várhatóan február 14. és február 17. között valósul meg. Az új adatok révén remélhetőleg további flereket detektálhatok, amelyekkel kiegészíthetem a fler frekvencia eloszlást, valamint lehetőség nyílik új, komplex flerek keresésére, amelyek esetleg több flert összegző modellekkel írhatók le, vagy oszcillációt mutatnak a leszálló ágon.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni hálámat témavezetőmnek, Seli Bálintnak a folyamatos támogatásért, türelméért és a rám fordított értékes időért. Az ő segítségével az elmúlt évben jelentős fejlődést értem el a távcsöves észlelés, az adatfeldolgozás, valamint az elméleti tudás terén. Köszönet illeti továbbá a HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet munkatársait is, akik támogató és inspiráló szakmai közegükkel hozzájárultak kutatásom előrehaladásához. A dolgozat a Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24 kódszámú Egyetemi Kiválósági Ösztöndíj Programjának a nemzeti kutatási, fejlesztési és innovációs alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Függelék

Saját eredmények

- Egyedi kódot fejlesztettem a szükséges képkorrekciók elvégzésére, valamint az apertúra fotometriában felmerülő feladatok megoldására.
- Részt vettem új mérések készítésében a választott csillagról (AD Leo), az összes korábbi és új piszkéstetői mérés redukálását elvégeztem az általam írt kód segítségével (körülbelül 157 órányi adat, 0,286 másodperces expozíciós időekkel).
- 29 flert azonosítottam a feldolgozott adatokból. Az eddig használt kódot továbbfejlesztettem oly módon, hogy az adaptív apertúra során felmerülő feladatokat is meg tudja oldani. A flereket tartalmazó adatsorokat újból feldolgoztam adaptív apertúra fotometriával.
- A flerek ekvivalens időtartamát és az AD Leo nyugalmi luminozitását B szűrőn keresztül meghatároztam. (A luminozitás meghatározásához használtam az *SVO Theory Server* segítségével elért megfelelő modell spektrumot, illetve az *SVO Filter Profile Service* segítségével a megfelelő szűrőfüggvényt)
- Kiszámítottam a flerenergiákat, majd meghatároztam a fler frekvencia eloszlást, illetve a rá jellemző α paraméter.
- Három olyan flert detektáltam, amelyek rövid időskálán figyelemre méltó jelenségeket, kettős csúcsokat mutatattak. Ezek a jelenségek a TESS által alkalmazott legrövidebb expozíciós idő mellett észrevétlenek maradnának. Ezekre a flerekre két fler összegéből álló függvényt illesztettem, azt vizsgálva milyen jól állíthatóak elő két egyedi flerprofil összegéből.
- Komplexebb flerek vizsgáltam a leszálló ágon megjelenő rövid periódusú oszcillációk szempontjából; két lehetséges oszcillációt azonosítottam (55 másodperc illetve 3,3 perc periódusidővel, ilyen nagyságú periódusok detektálása a TESS által használt legrövidebb, 20 másodperces expozíciós időekkel nehezen kivitelezhető).
- A TESS méréseiből származó adatsort elemeztem az AD Leo-ról, 69 flert azonosítottam. (Az adatsort a *Python lightkurve* csomagjának segítségével értem el, a *Science Processing Operations Center* (SPOC) fénygörbéjét használva, a flerek azonosításához a Bartus János által készített szkriptet használtam)
- A TESS adatsorában azonosított flerek ekvivalens időtartamát, és a nyugalmi luminozitást TESS szűrőn keresztül meghatároztam (szűrőfüggvényt szintén az *SVO Filter Profile Service* segítségével értem el).
- A TESS adatsorában azonosított flerek flerenergiáit kiszámítottam, a fler frekvencia eloszlást meghatároztam, a rá jellemző α paramétert kiszámítottam. Az eredményeket összevettem a piszkéstetői mérésekből kapottal, szépen látszott, hogy gyorsfotometriát alkalmazva lehetséges kisebb energiájú flereket is detektálni, amiket a TESS nagyobb expozíciós idejével már nem.
- Oszcillációkat kerestem a leszálló ágon komplexebb flerek esetében a TESS adatsorban.
- A TESS adatsorban vizsgáltam flerhossz és a flerenergia közötti kapcsolatot, a flerenergia és a flerek közötti várakozási idő közötti összefüggést, illetve a flerek közötti várakozási idő eloszlását.

Irodalomjegyzék

- Aschwanden, M. 2011, Self-organized criticality in astrophysics: The statistics of nonlinear processes in the universe (Springer Science & Business Media)
- Bai, J.-Y., Wang, J., Li, H.-L., és mtsai. 2023, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 135, 064201
- Bastian, T., Bookbinder, J., Dulk, G., & Davis, M. 1990, Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 353, April 10, 1990, p. 265-273., 353, 265
- Beskin, G., Chekh, S., Gershberg, R., és mtsai. 1988, Soviet Astronomy Letters, Vol. 14, NO. 1/JAN-FEB, P. 65, 1988, 14, 65
- Davenport, J. R., Hawley, S. L., Hebb, L., és mtsai. 2014, The Astrophysical Journal, 797, 122
- Gao, D.-Y., Liu, H.-G., Yang, M., & Zhou, J.-L. 2022, The Astronomical Journal, 164, 213
- Gershberg, R. 1972, Astrophysics and Space Science, 19, 75
- Gershberg, R., Kleeorin, N., Pustilnik, L., Airapetian, V., & Shlyapnikov, A. 2024, arXiv preprint arXiv:2411.11898
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. 2004, Nonlinear processes in geophysics, 11, 561
- Hauschildt, P. H., Allard, F., & Baron, E. 1999, The Astrophysical Journal, 512, 377
- Hawley, S. L., Davenport, J. R., Kowalski, A. F., és mtsai. 2014, The Astrophysical Journal, 797, 121
- Houdebine, E., Foing, B., Doyle, J., & Rodono, M. 1993, Astronomy and Astrophysics, Vol. 274, NO. 1/JUL (I), P. 245, 1993, 274, 245
- Hudson, H. 1991, Solar Physics, 133, 357
- Hunt-Walker, N. M., Hilton, E. J., Kowalski, A. F., Hawley, S. L., & Matthews, J. M. 2012, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 124, 545
- Jenkins, J. M., Twicken, J. D., McCaulliff, S., és mtsai. 2016, in Software and Cyberinfrastructure for Astronomy IV, Vol. 9913, SPIE, 1232–1251
- Kolláth, Z. & Oláh, K. 2009, Astronomy & Astrophysics, 501, 695
- Kowalski, A. F. 2024, Living Reviews in Solar Physics, 21, 1
- Lacy, C. H., Moffett, T. J., & Evans, D. S. 1976, Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 30, Jan. 1976, p. 85-96., 30, 85
- Li, D., Shi, F., Zhao, H., és mtsai. 2022, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 9, 1032099
- Muller, C. 2014, Origins of Life and Evolution of Biospheres, 44, 185
- Panferov, A., Beskin, G., Karpov, S., & Maryeva, O. 2024, arXiv e-prints, arXiv:2412.07580
- Petrucchi, R. P., Gómez Maqueo Chew, Y., Jofré, E., Segura, A., & Ferrero, L. V. 2024, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 527, 8290

- Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., és mtsai. 2015, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1, 014003
- Rigney, J., Ramsay, G., Carley, E. P., és mtsai. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 516, 540
- Rodrigo, C. & Solano, E. 2020, in XIV. 0 Scientific Meeting (virtual) of the Spanish Astronomical Society, 182
- Rodrigo, C., Solano, E., Bayo, A., & Rodrigo, C. 2012, IVOA Working Draft, 15
- Schmitt, J., Kanbach, G., Rau, A., & Steinle, H. 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 589, A48
- Segura, A., Walkowicz, L. M., Meadows, V., Kasting, J., & Hawley, S. 2010, *Astrobiology*, 10, 751
- Stelzer, B., Caramazza, M., Raetz, S., Argiroffi, C., & Coffaro, M. 2022, *Astronomy & Astrophysics*, 667, L9
- Thomas, E., Vineeth, S., & Abraham, N. P. 2024, arXiv preprint arXiv:2411.09234
- Tinetti, G., Drossart, P., Eccleston, P., és mtsai. 2018, *Experimental astronomy*, 46, 135
- Vida, K., Kővári, Z., Leitzinger, M., és mtsai. 2024, *Universe*, 10, 313
- Vida, K., Oláh, K., Kővári, Z., és mtsai. 2010, Four-colour photometry of EY Dra: A study of an ultra-fast rotating active dM1-2e star
- Zimovets, I., McLaughlin, J., Srivastava, A., és mtsai. 2021, *Space Science Reviews*, 217, 66