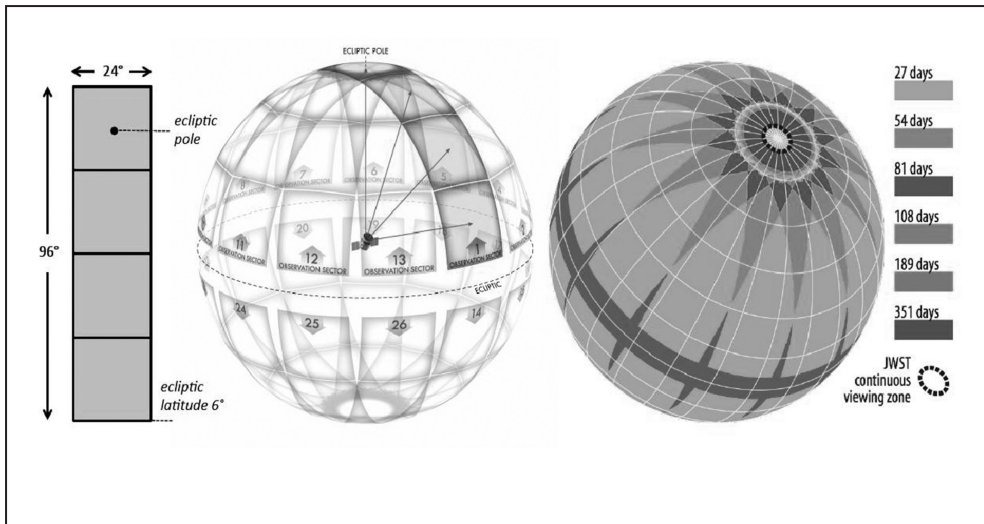


## Kalup Csilla

PULZÁLÓ, FEHÉR TÖRPECSILLAGOK<sup>1</sup>*Fehér törpék*

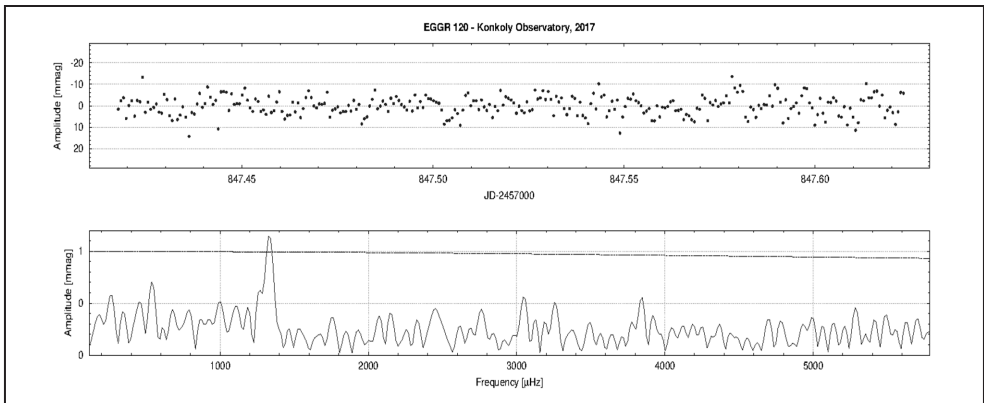
Mielőtt elmélyülnénk a részletekben, kezdjük egy egyszerű kérdéssel: mik azok a fehér törpék? Ennek megválaszolásához tökéletes kiindulópontként szolgál a Napunk. Mint tudjuk, a Napunk is egy csillag, még hozzá egy ereje teljében lévő, átlagos, sárga törpecsillag – igen sok hozzá hasonló létezik a Világegyetemünkben. Ha egy sötét, fényszennyezés mentes éjszakán bámuljuk a csillagokat, azt gondolhatjuk, hogy ezek a sziporkázó drágakövek az égbolt sötét abroszán olyanok, mint a nyugodt lelkek, ám valójában nem is tévedhetnénk nagyobbat. A csillagok belsejében folyamatos harc dül, hatalmas, ellentétes erők próbálnak felülkerekedni egymáson.



*A TESS misszió által 2x13 sávra osztott égbolt, ahol az egyes sávokat 27 napig fogja mérni a távcső. Egyre fentebb haladva a gömbön a sávok átfednek, így az egyre sötétebben jelölt régiók az átfedés miatt egyre jobban megnövekedett expozíciós időket jelölik, azaz hogy az adott területen valójában hány napig fog mérés zajlani.*

Amikor egy több fényév átmérőjű csillagközi gáz- és porfelhőből megszületik egy csillag, nem más történik, minthogy a tömegéből fakadó gravitáció hatására a felhő összehúzódik.

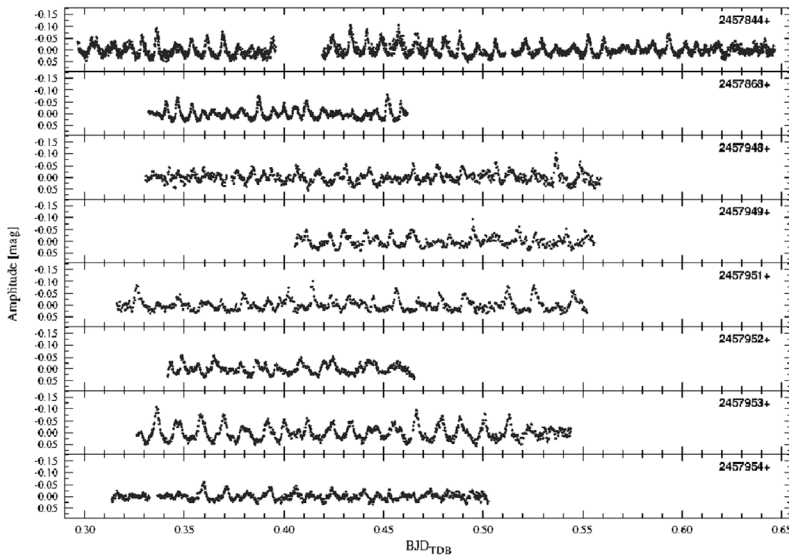
<sup>1</sup> Sódorné Bognár Zsófia témavezetőmmel eddig ismeretlen, pulzáló fehér törpecsillagokat kerestünk a 2018 áprilisában felbocsátott TESS űrtávcső missziójának előkészítéseként



*Az EGGR 120 fénygörbéje és Fourier-spektruma*

Az összehúzódás során energia szabadul fel, ami egy darabig szabadon kisugárzódik, egy idő után azonban, amikor a felhő már kellően sűrű lesz, nem jut ki, hanem elkezd fűteni azt. Mindez addig történik, amíg a felhő, az öcsillagunk belseje el nem éri a kb. 15 millió celsius fokot. Ekkor lesz elég forró ahhoz, hogy belsejében a hidrogén atommagok egyesülni tudjanak a hélium atommagokkal. Ez az egyesülés, a fúzió nagyon erősen energiatermelő folyamat: miközben a hidrogén héliummá alakul, az energia sugárzás formájában szabadul fel, ez a sugárzás a csillagok fénye, ami olyan erős, hogy legszívesebben szétvetné az egész csillagot. Csak azért nem teszi meg, mert a gravitáció nem engedi, továbbra is össze akarja nyomni a csillagot, s e két ellentétes erő éppen kioltja egymást. Így stabilizálódnak a csillagok, ezzel a szüntelen csatározással élnek le millió évekig az életüket. Aztán, mint minden élőlény a Földön, végül ők is meghalnak. Haláltáncuk akkor kezdődik, amikor a csillag magjában a hidrogén mennyisége lecsökken, s ahogy telik az idő, már nem lesz elég a fúzió fenntartásához. A fúzió megszűntével megszűnik az energiatermelés is, így a gravitáció győzedelmeskedik, nincs már ami ellentartson neki. A csillag elkezd összehúzódni, az összehúzódás hatására pedig (ahogyan láttuk a csillagok születésénél is) növekszik a hőmérséklete, amíg el nem éri azt az értéket, ami már elegendő a hélium fúziójának beindulásához: ekkor a hélium atommagok szén atommagokká egyesülnek. Ez is energiatermelő folyamat, így a csillag újra képes ellentartani a gravitációnak és stabilizálódni.

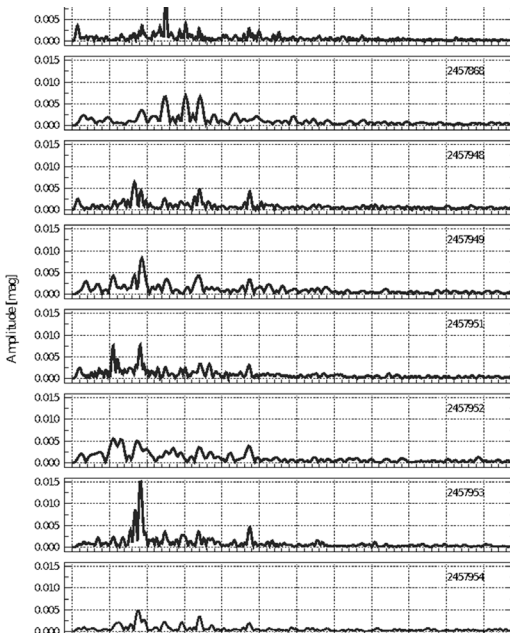
Hogyan néz ki egy ilyen csillag, ami mindezeket keresztülment? Ekkora változások nem múlnak el nyom nélkül: ezeket az égitesteket már *vörös óriáscsillagoknak* nevezzük. Első hallásra nem érthetjük, mitől lesznek ők „óriások”, hogyha az előbb azt írtuk le, hogy a csillag összehúzódik? Kicsit pontosítani kell a modellünket. Amikor megszűnik az energiatermelés, az egész csillag elkezd összehúzódni, és bár a magban még nem lesz elég nagy a hőmérséklet a hélium fúziójához, a külsőbb rétegekben található hidrogénnek be tud indulni a fúziója, ez pedig, míg a mag húzódik össze, a csillag többi részét felfújja.



*A WD1310 nyolc éjszakányi fénygörbéje*

A Napunk esetében például olyan nagyra, hogy a Nap pereme a Föld pályáját fogja majd súrolni. A kitágult csillag felszíni hőmérséklete lecsökken, s mint a fehéren izzó vas, amit elkezdünk hűteni, ő is vörösesen kezd ragyogni.

Sejthetjük, hogy a hélium fúziója sem fog örökké tartani, és eljön majd az a pillanat, amikor ez is megszűnik. Ekkor ugyanaz játszódik le, mint amit fentebb leírtam, annyi különbséggel, hogy a végén a magban a szén oxigénné történő fúziója fogja stabilizálni a csillagot. A Napunk esetében is elindul a szénatommagok egyesülése oxigénatommagokká, ám az oxigén fúziója már nem fog tudni beindulni, mivel az összehúzódás nem fogja elég nagy hőmérsékletre felfűteni a csillagmagot. A Napunknál nagyobb csillagok egészen a vasig képesek legyártani a periódusos rendszer elemeit. Azért a vasig, mert a vas fúziója már nem energiatermelő folyamat, létrejöttéhez éppen hogy energia befektetése szükséges, ami nem fogja megakadályozni a gravitációs összehúzódást. Ekkor a csillag végérvényesen összeomlik, s ha elég nagy (kb. 10-20-szor nagyobb a Napunknál), akkor vakítóan fényes és robusztus szupernóva-robbanásként fejezi be létét, ahol a robbanás utáni csillagmaradvány egy mindössze 10 km (!) átmérőjű ún. neutroncsillag. Ha ennél is nagyobb, 20 naptömeg feletti csillag omlik össze, akkor keletkeznek a fekete lyukak, melyek leírása máig probléma elé állítja a fizikusokat. Visszatérve a Napunkhoz: mi lesz belőle, és a Világegyetem csillagainak másik, körülbelül 97%-ból? Számukra kevésbé drasztikus a vég: miután elfogyott az „üzemanyaguk”, ledobják felfűvódott, külső burkaikat, majd összeomlanak egy kb. Föld méretű csillagmaradványba, amik egy ideig még világítanak, de csak a több



*A WD1310 nyolc éjszakájának  
Fourier-analízise.*

melyeket spektrális tulajdonságaik alapján, azaz a légkörüket alkotó elemek szerint szoktak csoportosítani. Legjellemzőbb típus, amely a fehér törpék kb. 75 százalékának sajátossága, hogy a magot körülvevő burok legkülső része hidrogénből áll, ők a „DA” típusú fehér törpék.

### *Pulzáció fehér törpékben*

1964-ben váratlan felfedezés történt. Egy amerikai csillagász, Arlo U. Landolt egy égbolt-felmérés során érdekes fehér törpére bukkant, mely olyan jelenséget produkált, amit korábban még nem figyeltek meg. Ez a fehér törpe, mely a Taurus, azaz bika csillagképben a HL Tau 76 nevet viseli, változtatta a fényességét. Az, hogy egy csillag változtatja a fényességét, az nem volt újdonság – már az ókorban is megfigyelték, hogy egyes csillagok fényessége változik, őket nevezzük változó csillagoknak. Az igazán érdekes az volt, hogy mindezt egy csillagmaradvány, egy fehér törpe tette!

Annak, hogy miért változtatják bizonyos csillagok a fényességüket, többféle oka lehet. Egyik lehetséges ok, hogy a vizsgált csillagnak van egy láthatatlan kísérője, legyen az egy másik csillag vagy egy bolygó, s amikor a kisebb méretű égitest eltűnik a nagyobb mögött, úgy érzékeljük, mintha a csillag fénye egy kicsit lecsökkent volna, hiszen korábban mindkettőjük fényét látuk, most viszont csak az egyikét. Másik lehetséges ok, hogy nagyon aktív felszínű

tízezer fokos hőmérsékletük miatt. Ezek a csillagmaradványok a fehér törpék. Már nem zajlik bennük energiatermelés, hanem lassan, fokozatosan, évmilliárdok alatt lehűlnék, míg csupán egy kihűlt, láthatatlan fekete törpe marad a helyükön. Ám addig is még pislákolnak, még mutatnak fényt – s a velük foglalkozó csillagászok számára még sokkal-sokkal többet is.

Csillagmaradványok lévén a fehér törpék nagyon sűrű és kompakt objektumok. Bár méretük a Földhöz hasonló, egy gyűszűnyi belőlük akár egy tonnát is nyomhat! Gyakorlatilag 99%-ban csak ez a sűrű magjuk létezik, mely főleg szénből és oxigénből áll, s csak egy 1%-nyi vékony, légkörszerű külső gázréteggel rendelkeznek, ami héliumból, hidrogénből, vagy ritkább esetben nehezebb elemekből áll. Jelenleg kicsivel több mint 39 000 fehér törpét ismerünk,

csillagról van szó, aminek hatalmas kitörései, kataklizmái vannak, s emiatt változékony a fénye. Egy harmadik alternatíva, ami talán a legkülönösebb és legösszetettebb, hogy a csillag *pulzál*, mintha egy lélegző, folyamatosan összehúzódó és kitáguló, deformálódó golyócskát képelnénk el. Ők a pulzáló változócsillagok, melyek éppen a periodikus összehúzódás és kitágulás miatt produkálnak fényességváltozást. Erre egyes fehér törpék is képesek – ők a pulzáló fehér törpecsillagok. Ahogy csökken a hőmérsékletük a hűlés során, vannak bizonyos hőmérséklet tartományok, amikor bizonyos kémiai összetételű fehér törpékben ez a pulzáció jó eséllyel gerjesztődik, s ha ez elég nagy intenzitással történik, akkor azt tudjuk detektálni a Földről is.

Ezek alapján három nagy csoportot különböztethetünk meg: a ZZ Cetiket, a V777 Her típusúakat és a GW Vir-féléket. A GW Vir típusú csillagok a fehér törpék hűlési sávjának elején helyezkednek el, éppen ezért nagyon forró, 75 000-175 000 Kelvin<sup>2</sup> fok közöttiek. Pulzációjuk periódusideje általában 400-3000 s közötti, ami azt jelenti, hogy kb. 20 percenként ismétlődik a fényváltozásuk, ennyi idő kell, amíg a maximum fényesség lecsökken a minimum fényességig, majd visszanevelszik a maximum fényességhez. A V777 Her típus hőmérséklete 22 000 és 29 000 K közé tehető, periódusideje még kevesebb, 100-500 s közötti. Ugyanez igaz a ZZ Cetikre is, átlagosan 10 perces periódussal változik a fényük, ők azonban a „leghűvösebbek”, 10 000-13 000 K közötti a hőmérsékletük. A ZZ Cetik azért is különlegesebb, mert az összes eddig ismert pulzáló fehér törpe 80%-át ZZ Cetik teszik ki. A HL Tau 76 is ebbe a típusba tartozik, ám később nem róla, hanem a második ilyen csillagról nevezték el ezt a típust ZZ Cetiknek. Ők azok a fehér törpék, amik spektrális tulajdonságaik alapján „DA” típusúak, azaz legkülső, légkörszerű burkuk hidrogént tartalmaz. Emiatt „DAV” típusnak is szokták őket nevezni, hogy a „DA” jelölés végére illesztett „V” betűvel jelöljük, változócsillag-típusról van szó.

### *A TESS projekt*

Foglaljuk össze, amit eddig tudunk a fehér törpékről: nagyon picik, nem túl fényesek, s ha pulzálnak, akkor a fényességük tized-ezred része változik. Mivel érdemes tehát őket megfigyelni? Minél nagyobb átmérőjű a távcső, annál jobb, hisz annál több fényt képes összegyűjteni a csillagról. Van azonban egy másik, csábító opció is: a nappalok és éjszakák változásától, illetve a légkör zavaró hatásától mentes űrtávcső használata. Ilyen űrtávcső például a 2018. április 18-án a NASA által felbocsátott TESS űrtávcső.

A TESS a „Transiting Exoplanet Survey Satellite” szavak kezdőbetűiből állt össze, s fő célja egy teljes égboltot átfogó égboltfelmérés keretén belül más csillagok körül keringő bolygókat, ún. exobolygókat detektálni. A TESS 2 év alatt csaknem 200 000 csillagot fog megvizsgálni, melyek főként közelebbi és fényesebb csillagok lesznek. 4 kamerájával 24x96 négyzetfokos látómezőt lehet elérni, ami egy a horizonttól a fejünk felett húzódó, arasznyi sávnak felel meg az égen. 13 ilyen sávval lehet lefedni az égboltot, kétszer

<sup>2</sup> 1 Kelvin fok = -273,25 Celsius fok, és a skála lineáris. Ugyanazon hőmérséklet értéke kelvin fokban mindig 273.25-dal kevesebb, mint celsiusban.

ennyivel pedig a teljes éggömböt. A TESS egy-egy ilyen sávot 27 napig fog folyamatosan mérni, ám mivel ezek a téglalap alakú sávok az éggömbre vannak ráhúzva, minél fentebbi részét nézzük a gömbnek, a sávok annál jobban átfednek egymással (1. ábra). Így a jó helyen lévő objektumokat 54, 81, 108, 189 vagy akár 351 napig is képes lesz mérni!

A TESS-ben rejlő lehetőségek tagadhatatlanok. A kérdés már csak az, hogy hogyan kapcsolódnak hozzá a pulzáló fehér törpék. A választ a távcső további képességeiben találjuk, kamerái ugyanis 30 perces és 2 perces mintavételezési időekkel lesznek használhatóak, ami azt jelenti, hogy a korábbi évek űrtávcsöveivel szemben a TESS alkalmas pulzáló fehér törpék vizsgálatára is. Ezért a TESS misszióon belül alakítottak egy „kompakt pulzátorok” munkacsoportot is, melynek tagja a témavezetőm, s így rajta keresztül becsatlakozhattam én is a munkába.

### *A távcsöves észlelésektől a fénygörbéig*

A Csillagászati Intézetben dolgozom demonstrátorként. Az Intézet demonstrátor programja több mint 1 éve indult útnak, célja egyetemi alap- és mesterszakos hallgatók alkalmazása az Intézetben csillagászati megfigyelések végzésére és adatfeldolgozására, valamint egy témavezető felügyelete mellett bekapcsolódni a kutatói munkákba. A program kezdete óta dolgozom a Konkoly-ban, azóta az itt végzett munkámból írtam egy TDK (Tudományos Diákköri Konferencia) dolgozatot is, mely a 2017-es kari Csillagász TDK-n első helyezést ért el. Ezen munka során először témavezetőmmel együtt beadtunk egy távcsőidő pályázatot az ország legnagyobb, 1 méter átmérőjű távcsövére, majd miután ezt elnyertük, csillagászati megfigyeléseket végeztem ezzel a távcsővel, mely a Mátrában, a Pizskéstetői Obszervatóriumban található.

Sokakban él még az a romantikus elképzelés, hogy a csillagász kint ül az ég alatt a távcsöve előtt, és rajta keresztül kémleli az égboltot. A valóság azonban az, hogy az észlelések elvégzéséhez elég az észlelő szobából számítógép segítségével bejelentkeztem a megfelelő mérő szerverre, majd a kiadott parancsoknak megfelelően a távcső automatikusan rááll az előzetesen nagy gonddal kiválasztott objektum jelöltekre, és professzionális felvételeket készít róluk. Mindezt annak reményében, hogy ha kielemezem a képeket, akkor azok arra utalnak majd, hogy a kiválasztott csillag olyan fényváltozásokat mutat, amiket korábban még senki nem észlelt. Azt, ahogyan a távcső által készített felvételekből kinyerem a csillagok fényességére vonatkozó információkat, fotometriának nevezzük. Mielőtt azonban ide eljutna a csillagász, még el kell végeznie bizonyos képkorrekciókat. A készített képeket ugyanis mindenféle zaj terheli, amiket ki kell küszöbölni, hogy a lehető legpontosabb eredményt kapjuk. A csillagászatban ún. CCD kamerákat használunk, amik olyan félvezető eszközök, amelyekben fény hatására elektronok válnak ki, és egy elektróda potenciál terében csapdába esnek. A kamera pixeleiben tehát a pixelt ért fényvel egyenes arányban keletkeznek elektronok, amiket kiolvasva hozzájuk tudunk rendelni egy-egy intenzitás értéket. Így a képen látható csillag pixeleinek intenzitásából következtethetünk a

csillag fényességére. Erre rakódnak rá különböző zajok, például a kamerának az ún. alapzaj szintje, ami azt jelenti, hogy még akkor is kapunk valamekkora intenzitást, ha gyakorlatilag „nulla ideig exponálunk” a letakart kamerával. Az alapzaj levonásához több, ilyen „nulla expozíciós idejű” képet készítünk, majd ezeket összeátlagoljuk. Az így megszerzett ún. *bias* képet vonjuk le minden egyes nyers mérési felvételtől: a nyers kép megfelelő pixeleinek intenzitásából kivonjuk a bias kép megfelelő pixeleinek intenzitását. A második korrekció az ún. *dark korrekció*. Ez nagyon hasonlít az előbb leírt bias korrekcióhoz. Az alapjelszint mellett a hőmérséklet hatására is keletkezik jel, ezt nevezzük sötétáramnak, ami adott hőmérsékleten a megvilágítási idővel egyenesen arányos. Éppen ezért minden kamerát hűteni szoktunk. Piszkéstetőn a méréseim -40 celsius fokra hűtött kamerával készültek, ám még így is megjelenik a sötétáram, amit le kell vonni. Ehhez olyan dark képet készítünk, ami a sötétáramon kívül mást nem tartalmaz, azaz letakart kamerával a nyers képekkel megegyező expozíciós idejű képeket készítünk, amiket aztán szintén levonunk a nyers képekből. A harmadik korrekció az ún. *flat* vagy *világos kép* korrekció. Ekkor olyan képet készítünk, ahol egyenletes megvilágítottaságú felületre exponálunk annyit, hogy a pixelek majdnem telítődjenek, de ne égjenek be. Ezekben a képekben előtűnnek a kamerán lévő szennyeződések, porszemek, hajszálak, szöszmaradványok, illetve szembeötlik a pixelek eltérő érzékenysége is. Mindezek korrigálására a nyers képek pixeleit leosztjuk a flat képek pixeleivel, így végre a pixelek egymáshoz képest is konzisztens jelértéket adnak, és a koszfoltok miatti hibákat is kiküszöböljük. Most már készen állunk a fotometriára!

Egy megtisztított felvételt (2. ábra) szemlélve a képen gyakorlatilag kétféle dolgot látunk: kiterjedt fehér pacákat (ezek a csillagok) és mákos tészta hangulatú háttérret (ez az égbolt). Az első fontos dolog tudni, hogy a kör alakú csillagkorong nem a csillag felszíne! A csillagok annyira távoli objektumok, hogy a legjobb távcsöveinkkel sem tudjuk felbontani őket: mindegyik csillag pontszerű fényforrásnak tekinthető. Amit látunk, az az, hogy a csillagok fénye több pixelre képződik le, annál jobban, minél fényesebb a csillag. A csillag fényessége arányos az intenzitásával, amit úgy számolhatunk ki, hogy összeadjuk azoknak a pixeleknek az intenzitását, amelyekre szétterült a csillag képe. A következő lépés, hogy levonjuk az égi háttérret, mivel ahhoz is tartozik valamekkora fényesség érték, ezért tűnik mákostészta-szerűnek, és nem egyenletesen feketének a képen. Ehhez a csillag körül veszünk egy gyűrűt, kiszámoljuk a gyűrűn belüli pixelintenzitások átlagát, majd ezt levonjuk a csillag fényét tartalmazó pixelekből. Az így kapott intenzitás értékét egy matematikai képlet segítségével átalakíthatjuk fényesség dimenziójú egységgé.

Az általam végzett fotometriának van még egy speciális lépése. Mivel számomra az az érdekes, hogy mutat-e fényváltozást a kiszemelt csillag, ezért a pontos, „abszolút” fényesség értékre nincs szükségem, elég, hogyha egy mellette lévő, konstans fényességű csillaghoz viszonyítom a vizsgált csillag fényét: ezt nevezzük differenciális fotometriának. Egy fényváltozást nem mutató csillag fényességéből kivonom a vizsgált csillag fényességét. Ha ezt minden képre megcsinálom, és ábrázolom az egyes pontokat az idő függvényében, akkor megkapom a csillag fénygörbéjét, ami szemléletesen mutatja, hogyan változik (vagy

épp, hogy nem változik) a csillag fénye az időben. Ha egy egyeneset kapok, az azt jelenti, nem változik a fénye, ha viszont kirajzolódik egy szinuszhullámszerű mintázat, akkor sikerült elkapnunk egy pulzáló változó fényességváltozásait!

### *A fényességváltozás részletes vizsgálata*

A csillagászati felvételekből kinyert fénygörbe megszerzésével még nem ért véget az adatok elemzése: ezután kezdődik a fénygörbék analízise. Ennek során az az alapgondolat, hogy az általunk látott fénygörbe alakja felírható sok, különböző szinuszhullám összegeként. Egy szinuszhullám a periódusidejével jól jellemezhető. A frekvencia a periódusidő reciproka, így ez is jól jellemezni a hullámot. Az a célunk, hogy a fénygörbében minél több szinuszhullámot azonosítsunk, ezek összege fogja ugyanis kiadni a fénygörbét. A beazonosított szinuszhullámok a frekvenciájukkal és amplitúdójukkal (ez adja meg a fényesség változásának mértékét) egyértelműen jellemezhetőek. A kiszedegetett szinuszhullámok amplitúdóját ábrázolva a frekvenciájuk függvényében szemléletesen is láthatjuk, hogy milyen frekvenciákon milyen mértékben pulzál a csillag. Ezek között a frekvenciák között általában felfedezhetőek bizonyos kapcsolatok: lehetnek egymás többszörösei, összegei, vagy kijöhet egy értékhez több nagyon közeli is. Leginkább azokat szeretjük, amik egyikhez sem köthetőek: őket nevezük független pulzációs módusoknak. Magát az analízist matematikai algoritmusok és programkódok segítségével végezzük el, amik kiszedegetik a fénygörbéből az egyes szinuszok frekvenciáit, amikből már ki tudjuk következtetni a módusokat. Az amplitúdót a frekvencia függvényében *Fourier-spektrum*nak, magát a matematikai eljárást pedig a *Fourier-analízis*nek nevezük.

### *A vizsgált fehér törpék*

A kilenc hónapon keresztül tartó észlelési időszakunkban témavezetőmmel 16 darab pulzáló fehér törpe jelöltet figyeltünk meg. Nagy részük nem mutatott fényességváltozást, ám kettő szerencsénkre más volt: ők korábban, mások által még sosem megfigyelt pulzációt mutattak. Az egyik az EGGR 120, a másik a WD1310+583 nevet viseli (3., 4. és 5. ábra).

A 3. ábra alsó felében, a Fourier-spektrum csúcsai felett látható egy csaknem vízszintes, jobb oldalt kicsit lehajló vonal, ez az ún. szignifikancia szintet jelöli: az ez alatti frekvencia csúcsok „nem szignifikánsak”, beleolvadnak a különféle zajokba. Hiába végeztünk ugyanis képkorrekciókat, ezekkel csak nagy mértékben csökkentettük a zajt, teljesen nem tudtunk mentesülni az általuk okozott bizonytalanságtól. Tökéletes, zajmentes mérés nem létezik, így meg kell szabni egy határértéket (szintet), amin felül azt mondhatjuk, hogy ez már nem köthető a zajhoz, az előlötti jelek már elég nagy valószínűséggel a csillag sajátosságai lesznek. 16-ból 14 csillag nem mutatott változást, csupán az EGGR 120 és WD1310 bizonyult változóknak, esetükben szépen látszódnak a szignifikáns frekvenciákat jelölő csúcsok.



Az EGGR120 fénygörbéjének analízisében csak egyetlen pulzációs frekvenciát találtunk, mely kb. 12 és fél perces periódusidőnek felel meg. A csillag, hőmérséklete alapján, a pulzációra hajlamos csillagok sávjának egyik széléhez nagyon közel esik, ami jól magyarázza a viszonylag hosszú periódusú pulzációt. A kis amplitúdó szintén ezzel magyarázható, hiszen ilyen hűvös csillagoknál már lecsökken a pulzációs amplitúdók nagysága, lényegében a pulzáció lassú megszűnéséhez közelednek.

A WD1310 esetében sokkal több szignifikáns pulzációs frekvenciát ki tudtunk szedni. Elvégezve a Fourier-analízist a teljes adatsorra, 17 szignifikáns frekvenciát sikerült meghatározni, melyek 4-27 perc közötti periódusidőknek felelnek meg. Megvizsgálva ezeket látható, hogy vannak köztük ún. dubletek, amik a csillag forgásával lehetnek kapcsolatosak, illetve vannak nagyon közeli frekvenciák, amik rövid időskálán (napos, hetes, vagy akár hónapos) lejátszódó amplitúdó- illetve frekvenciaváltozások eredményei lehetnek. Megtalálhatóak továbbá kombinációs frekvenciák is, amik bizonyosan nem független módusok.

Eredményeinket 2018 májusában angol nyelven, a nemzetközileg neves Monthly Notices of the Royal Astronomical Society szaklapban publikáltuk.<sup>3</sup>

### *További tervek*

Jelen sorok írásakor is zajlik a fénygörbék elemzéséből szerzett pulzációs módusok felhasználása ún. asztroszeizmológiai vizsgálatokra, ugyanis a pulzációk vizsgálata egyedülálló lehetőséget biztosít a csillagok belső szerkezetének tanulmányozására: ezzel foglalkozik az asztroszeizmológia. Lényegében olyasmi, mint a Föld esetében a szeizmológia, csak ebben az esetben mi távoli csillagok rezgéseivel foglalkozunk. Mivel a különböző frekvenciák különböző mélységekig terjedő hullámokat reprezentálnak, ezek észlelésével a csillag különböző belső rétegei letapogathatóvá válnak. A pulzációs módusok a csillag olyan fizikai paramétereiről árulkodnak, mint például a hőmérséklet, nyomás, sűrűség, kémiai összetétel, hiszen ezektől függ, hogy az egyes hullámok meddig jutnak el a csillag belsejében. Ezen kívül további földi bázisú mérésekkel támogatnánk meg az űrtávcsöves missziót, valamint részt szeretnénk venni a TESS-adatok feldolgozásában is, hogy ezáltal még közelebb kerüljünk a fehér törpecsillagok különleges, belső világának megismeréséhez.

<sup>3</sup> <https://arxiv.org/pdf/1805.10165.pdf>