

Kepler fedési kettőscsillagok LAMOST spektrumokból meghatározott radiális sebességeinek vizsgálata

OTDK-dolgozat

Készítette: Mike Lilla Titanilla, Csillagász MSc, II. évfolyam

Témavezető: Dr. Mitnyan Tibor, tudományos munkatárs, HUN-REN-SZTE
Sztelláris Asztrofizikai Kutatócsoport

Természettudományi és Informatikai Kar, Fizikai Intézet

Szegedi Tudományegyetem



Szeged

2025

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Elméleti összefoglaló	4
2.1. Fedési kettőscsillagok	4
2.2. Radiális sebesség	9
2.3. Sebességmeghatározási módszerek	11
3. Mérési adatok	13
4. Adatfeldolgozás	13
4.1. Radiálissebesség-görbék készítése	15
5. Eredmények	18
5.1. Egyvonalas radiálissebesség-görbék	18
5.2. Kétvonalas radiálissebesség-görbék	22
5.2.1. Körpálya	22
5.2.2. Excentrikus pálya	25
5.3. További feldolgozásra váró objektumok	27
6. Összefoglalás	31
7. Köszönetnyilvánítás	32
Hivatkozások	33

1. Bevezetés

A fizikai kettőscsillagok vizsgálata nagyon fontos, mert segítséget nyújtanak abban, hogy pontosan meghatározhassuk csillagok tömegét, méretét és a pályáik tulajdonságait. Magányos csillagok esetén a tömegmeghatározás nem végezhető el egyszerűen, mint kettős rendszerek esetén, ahol a rendszert alkotó csillagok tömegaránya megadható, hanem különféle modellek segítségével becsülhető meg.

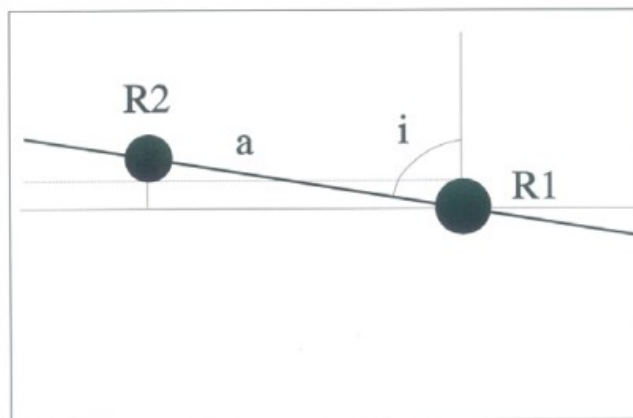
Az objektumok radiális sebességeinek meghatározásához színeképek felvételére van szükség, mivel a csillagok spektrumát vizsgálva azt látjuk, hogy mozgásuk hatására a spektrumvonalak helye periodikusan változik a Doppler-hatás miatt.

Munkám során a számomra új LAMOST adatbázist használtam a Kepler űrtávcső által megfigyelt fedési kettőscsillagok spektrumainak kereséséhez. Az volt a cél, hogy ezen objektumok radiálissebesség-görbéit állítsam elő, és Kepler-pályák segítségével modellezzem őket, mivel eddig ilyen átfogó elemzés még nem jelent meg ezekről a szakirodalomban. Ez azért fontos, mert a radiálissebesség-görbéket a Kepler-fénygörbékkel együtt elemezve a rendszerben található csillagok összes fizikai jellemzője nagy pontossággal meghatározható. A kapott eredmények végső soron pedig statisztikai vizsgálatok révén hozzájárulhatnak a csillagfejlődés és a csillagokon végbemenő folyamatok jobb megértéséhez.

2. Elméleti összefoglaló

2.1. Fedési kettőscsillagok

A kettőscsillagok olyan objektumok, amelyek a közös tömegközéppontjuk körül keringenek. Fedési kettőscsillagokról beszélünk, ha a rendszer keringési síkja a látóirányhoz közel esik, így megfigyelhető, amikor az egyik csillag elhalad a másik előtt (1. ábra). A fedés lehet teljes vagy részleges (2. ábra). Ettől függően ilyenkor a rendszer periodikus fényességcsökkenését tapasztaljuk. Ezt a fényességet az idő függvényében ábrázolva kapjuk a rendszer fénygörbéjét.



$$R_1 + R_2 \geq a \cos i$$

1. ábra. A fedés geometriai feltétele. R a csillagok sugara, a a pályasugár, i az inklináció.[1]

Különböző rendszerekre, a geometriájuktól és a komponensek fizikai paramétereitől függően, különböző fénygörbéket kapunk (3. ábra). Tehát az egyik csoportosítási módszer a fénygörbe alakja alapján történik:

- **Algol típus:** Az ilyen fénygörbékre jellemző, hogy a fedéseken kívüli tartomány általában egyenes, tehát a fedések közötti időben a rendszer összfényessége szinte állandó. Ez arra utal, hogy a komponensek között nincs tömegátadás, és alakjuk közel gömbszimmetrikus. Ez pedig úgy lehetséges, ha a két komponens elég messze van egymástól, hogy ne lépjen fel közöttük árapály-kölcsönhatás, ami az alakjukat eltorzíthatná. Ebből pedig az adódik, hogy minél hosszabb periódusú egy fedési kettős, annál valószínűbb, hogy ilyen fénygörbét fog mutatni. A keringési periódus

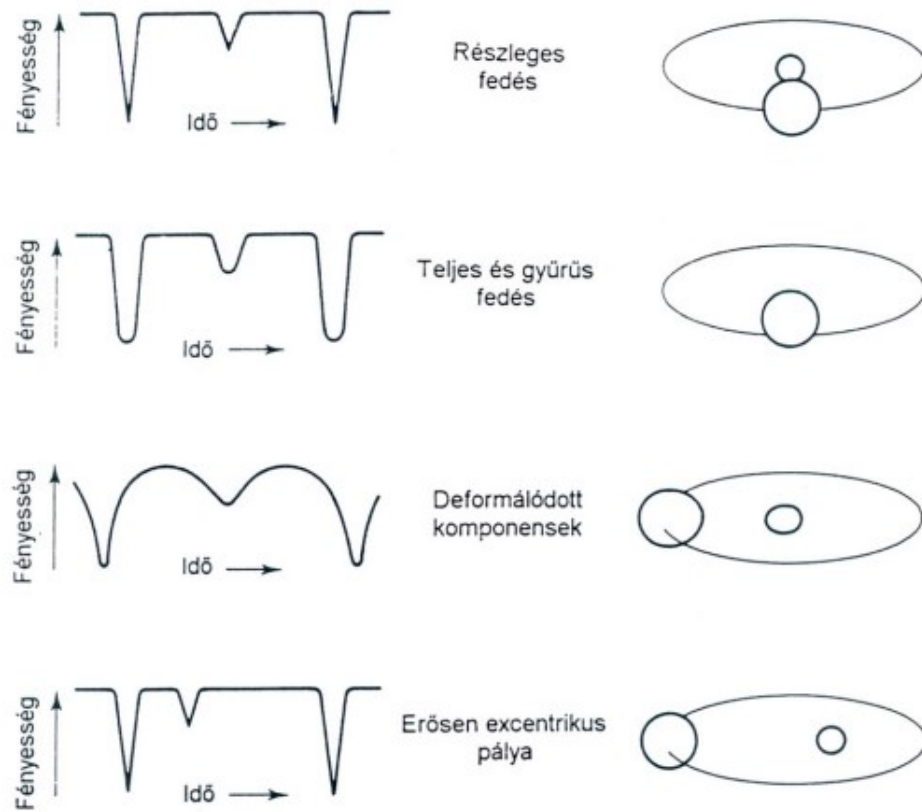
széles tartományon változik, néhány óra és 10000 nap közé esik. További jellegzetessége, hogy bizonyos esetekben a mellékminimum nem két főminimum között félidőben következik be, ami arra enged következtetni, hogy a csillagok ellipszispályán keringenek.

- **β Lyrae típus:** Ennél a típusnál jellemző, hogy a fedések között is folyamatosan változik az összfényesség, és a fedések sokkal hosszabb ideig tartanak. Ezt az okozza, hogy a csillagok fajlagos (szeparációjukhoz viszonyított) sugara jóval nagyobb, mint az Algol típus esetében, így a közöttük fellépő árapály-kölcsönhatás és a közelségük miatt fokozódó tengelyforgás eltorzítja a csillagok alakját. Emiatt a keringés során folyamatosan változik a csillagok felszínének felénk irányuló mérete, ami miatt ellipszoidális változásokat figyelhetünk meg. Keringési periódusuk általában 1 napnál hosszabb.
- **W UMa típus:** Az ilyen fénygörbék folyamatos, szinuszoszerű fényváltozást mutatnak. A fényességminimumok és maximumok közel azonos mélységűek, nem igazán különböztethetők meg egymástól, ami arra utal, hogy a csillagok felületi fényessége és így hőmérséklete nagyon hasonló. Tipikusan 1 napnál rövidebb a keringési periódusuk.

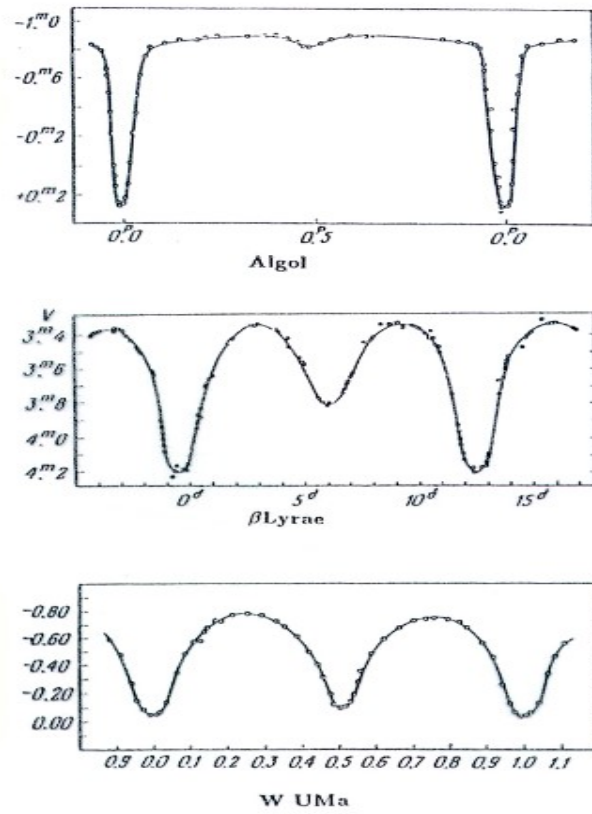
A fedési kettősöket geometriájuk alapján is osztályozhatjuk. Ez a csillagok Roche-térfogatának kitöltöttségén alapul, ami kettőscsillagok esetében a belső (L1) Lagrange-ponthoz tartozó gravitációs ekvipotenciális felületek által határolt térrészt jelenti. Ez alapján egy kettős rendszer az alábbi csoportok egyikébe tartozhat:

- **Különálló rendszerek:** A komponensek nem töltik ki a Roche-térfogatot, azon belül helyezkednek el, így nincs tömegátadás. Ezek Algol típusú fénygörbéket mutatnak, de nem minden Algol típusú fedési kettős ilyen rendszer.
- **Félig érintkező rendszerek:** Amint a rendszer egyik csillaga kitölti a Roche-térfogatát ilyen rendszerről beszélünk. Ekkor az L1 ponton keresztül anyag áramlik át a Roche-térfogatát kitöltő csillagról a másik csillagra. Ilyenkor a csillagok tömege megváltozik, a tömegarány meg is fordulhat. A tömegátadás miatt akkréciós korong alakulhat ki az anyagot kapó csillag körül. Ez a fénygörbe alakjának változását okozhatja. Ezek a rendszerek általában β Lyrae típusú fénygörbéket mutatnak, de ha a másodkomponens halvány, akkor Algol típusú fénygörbe is előfordulhat.

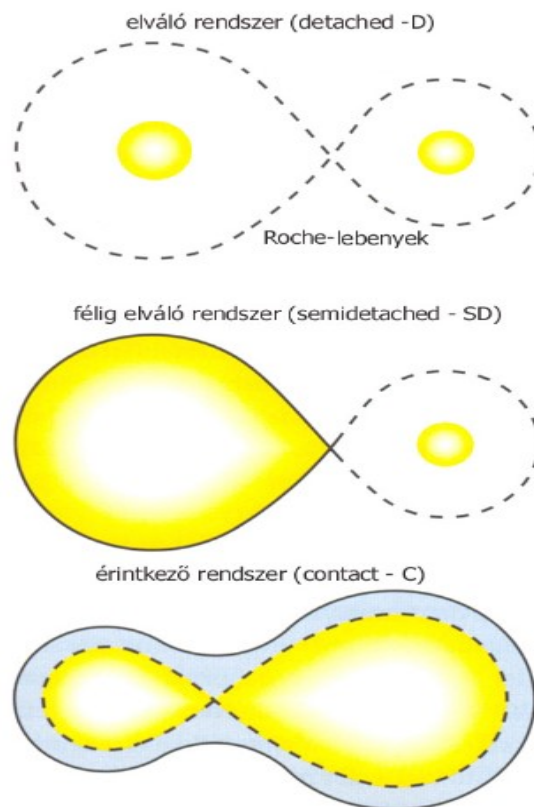
- **Érintkező rendszerek:** Mindkét csillag kitölti a Roche-térfogatát, túl is csordulnak rajta, így egy közös burkot fognak képezni maguk körül. Ezek W UMa fénygörbéket hoznak létre. [2] [3]



2. ábra. Fedés fajták.[1]



(a)

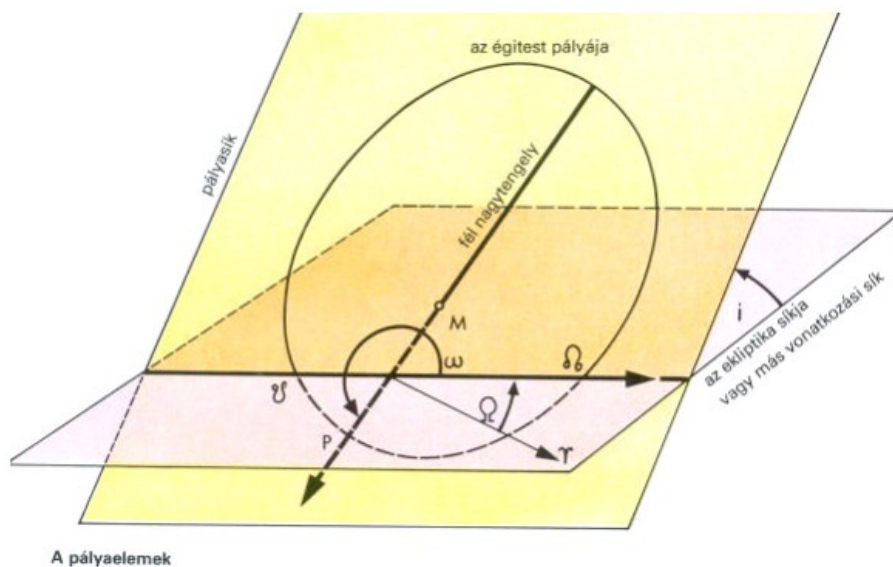


(b)

3. ábra. Csoportosítás a fénygörbe alakja (a) és a geometria (b) alapján.[1]

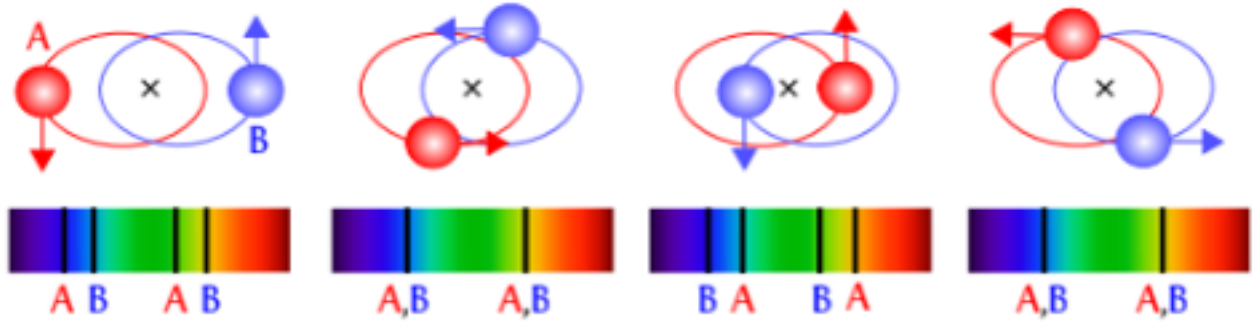
A kettőcsillagok pályájának leírására szolgáló paramétereket pályaelemeknek hívjuk. Ebből a 6 elemből a pálya egyértelműen meghatározható (4. ábra):

1. i : pályahajlás vagy inklináció; a keringési sík hajlásszöge az alapsíkhoz képest
2. a : a pálya félnagy tengelye
3. e : excentricitás, ami a pálya lapultságát adja meg
4. ω : pericentrum argumentuma, ami a pericentrum iránya (P) és a felszálló csomó által bezárt szög nagysága a keringési síkban mérve
5. Ω : a felszálló csomó hossza, amelyet az alapsíkban mérünk, és amely egyenlő az alapirány és a felszálló csomó által bezárt szög nagyságával
6. τ : a keringő égitest egy pericentrum-átmenetének időpontja



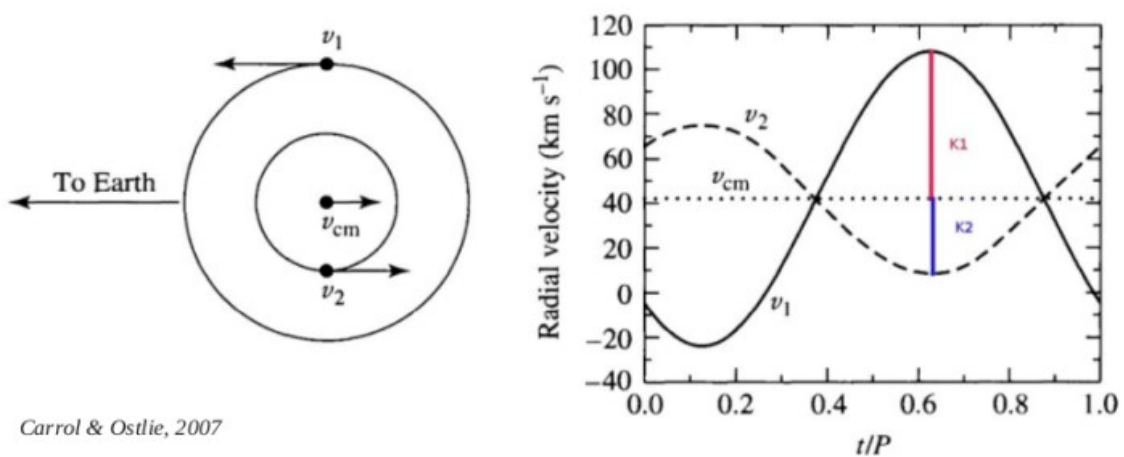
4. ábra. Pályaelemek. [4]

2.2. Radiális sebesség



5. ábra. Spektroszkópiai kettőscsillag spektruma. *Forrás: [5]*

Az 5. ábrán látható egy spektroszkópiai kettős, amelyek a közös tömegközéppontjuk körül keringenek. Tekintsük a Föld irányát a lefelé mutató nyíl irányába. Amikor a piros csillag a Földhöz közeledik a színeképvonalai a kék felé tolódnak el, ekkor a kék csillag távolodik, tehát vonalai a vörös irányba tolódnak el. Ha a két csillag mozgása a Föld irányára merőleges, akkor egyik csillag vonalai sem tolódnak el, a két csillag vonalai ugyanott látszódnak. Minden időpillanatban kiszámítható a radiális sebesség a vonalak eltolódásából. Ha mindezt radiálissebesség-görbén ábrázoljuk, akkor meghatározhatjuk a csillagok keringésének periódusidejét.



6. ábra. Radiálissebesség-görbe körpálya esetén. *Forrás: [6]*

Körpálya esetén a radiális sebességek változását az idő függvényében a következő összefüggéssel írhatjuk le:

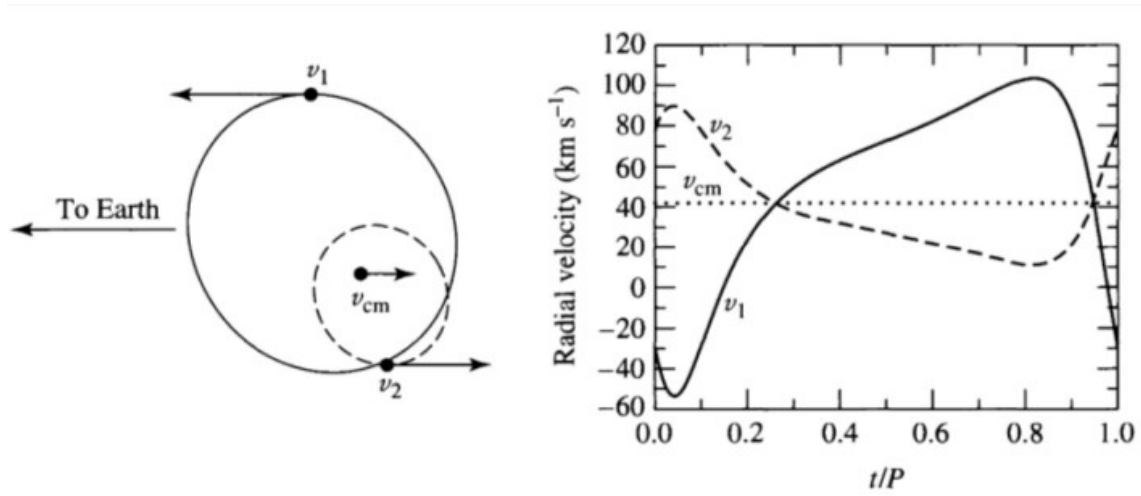
$$v_{rad\ 1,2}(t) = a_{1,2} \frac{2\pi}{P} \sin i \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{P} (t - t_{min}) \right) \quad (1)$$

ahol P a keringési periódus, t_{min} pedig egy referencia-időpont (tipikusan egy főminimum időpontja).

Radiálissebesség-amplitúdók körpálya esetén:

$$K_{1,2} = a_{1,2} \frac{2\pi}{P} \sin i \quad (2)$$

$$K_{1,2} = |v_{rad \ max \ 1,2} - v_{cm}| \quad (3)$$



7. ábra. Radiális sebesség-görbe ellipszis pálya esetén. *Forrás: [6]*

Radiális sebességamplitúdók ellipszis pálya esetén:

$$K_{1,2} = a_{1,2} \frac{2\pi}{P\sqrt{1-e^2}} \sin i \quad (4)$$

A tömegarányban (q) elveszik az inklináció hatása.

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{M_2}{M_1} = q \quad (5)$$

Azonban tömegek összeadása esetén nem veszik el.

Kepler III. törvényének segítségével:

$$\frac{(a_1 + a_2)^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2), \quad (6)$$

$$a_k \cdot \sin i = K_k \cdot \frac{P}{2\pi}, \quad (7)$$

$$M_1 + M_2 = \frac{P}{2\pi G} \frac{(K_1 + K_2)^3}{\sin^3 i}, \quad (8)$$

ahol G a gravitációs állandó, a $k = 1, 2$.

Hogyha csak az egyik csillag spektrumát tudjuk megfigyelni, akkor a képletben a K_2 -t $K_1 \cdot M_1/M_2$ -vel helyettesíthetjük. Ekkor megkapjuk az úgynevezett tömegfüggvényt:

$$\frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{P}{2\pi G} K_1^3 \quad (9)$$

A tömegfüggvény mindig kisebb mint M_2 . Egyvonalas spektroszkópai kettősök esetén csak alsó tömegbecslés tehető M_2 -re.

2.3. Sebességmeghatározási módszerek

Vonalprofil-analízis:

Ennél a módszernél egy adott objektum vonalprofiljára illesztünk Gauss- vagy Voigt-profilt és ezek maximum- vagy minimumhelye alapján megállapítható az eltolódás mértéke, amelyből pedig a sebesség értéke. Mivel ez egy nem túl pontos módszer, így csak akkor alkalmazzák, amikor a spektrum kevés vonalat tartalmaz, vagy ha túl nagyok a vonalkiszéledések és nem lehet más módszert használni.

Keresztkorrelációs módszer:

A kettős rendszer komponenseinek radiális sebességét pontosabban ezzel a módszerrel lehet meghatározni. Ez az eljárás akkor ad kellően pontos értéket, ha sok vonal található a spektrumban. Ez úgy működik, hogy a vizsgált csillag színképét keresztkorreláljuk egy ismert, azonos vagy hasonló színképtípusú, állandó radiális sebességű csillag spektrumával. A két spektrum egymáshoz képesti relatív eltolódását nagy pontossággal képes meghatározni. Ezt a keresztkorrelációs függvény (Cross-Correlation Function, CCF) írja le:

$$CCF(y) = \int_{-\infty}^{\infty} S(x) \cdot T(x - y) dx, \quad (10)$$

ahol S a mért spektrum, T pedig a referenciaként használt spektrum.

Ezután az egyes csillagok sebességprofiljaira Gauss-görbe illeszthető, amelynek csúcsa, vagyis a maximumhelye adja meg a csillag látóirányú sebességét. Ez az azonos spektrumvonalak hullámhossz-eltolódásából határozható meg. [7]

3. Mérési adatok

A méréshez szükséges adatokat a LAMOST Medium Resolution Search (MRS) adatbázisból [8] töltöttem le, így elsősorban ennek tulajdonságait mutatom be.

A LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) egy Schmidt távcső, amelynek fő- és melléktükre is szegmentált. Ez egyszerre 4000 objektum mérését teszi lehetővé a behelyezett optikai szálakkal. 20 négyzetfokos látómezővel rendelkezik. Egy objektumról egy expozíción belül kétféle spektrumot vesz fel egyszerre, egy kék (B) és egy vörös (R) sávú spektrumot, amelyeknek hullámhossztartománya rendre 495-535 nm és 630-680 nm. Az objektumokról általában több mérés is készült egy adott mérési napon, így az egyes expozíciókkal kapott spektrumok összeadása megadja a kombinált B és R sávú spektrumokat. A spektrális felbontóképesség 7500 a kék és vörös sáv esetében is.

4. Adatfeldolgozás

Elsősorban szükség volt olyan objektumokra, amelyekhez vannak elérhető spektrumok a LAMOST MRS adatbázisban. Ehhez a Kepler fedési katalógust használtam fel. [9]

A keresést elsőként a CDS XMatch-csel (8. ábra) végeztem. Eerre azért volt szükség, mert a LAMOST adatbázisban nem lehetséges KIC ID szerint keresni csak Gaia DR3 ID szerint. Ahhoz, hogy megkapjam a megfelelő azonosítót, két katalógus, a J/AJ/151/68/catalog és az I/355/gaiadr3 crossmatch-cselését végeztem el. A J/AJ/151/68/catalog egy 2016-os katalógus, amely a Kepler által észlelt fedési kettőscsillagokat tartalmazza és a Vizierben található meg. Az I/355/gaiadr3 egy 2022-es katalógus, amely szintén a Vizierben található meg, és tartalmazza a Gaia által mért összes csillagot. Eredményként egy táblázatot kaptam rengeteg paraméterrel, amelyből nekem csak a Gaia azonosítókra lett volna szükségem. A szűrés egyszerű lett volna, azonban észrevettük, hogy a Kepler katalógusban kb. 2900 objektum van, míg a crossmatch-cselés után több mint 4000 Gaia azonosítót kaptam. Ez amiatt van, mert a crossmatch-cselés koordináták alapján történik. Itt be lehet állítani, hogy mekkora szögsugarú körben történjen a keresés, ami alapértelmezetten 5 ívmásodperc, de én ezt 10-re növeltem. Ez azt jelenti, hogyha több csillag is találha-

tó a Gaia adatbázisban olyan koordinátákkal, amik beleesnek ebbe a körbe, akkor azok mindegyikének Gaia azonosítóját hozzá fogja párosítani az adott Kepler azonosítóhoz, így meg fognak jelenni olyan objektumok is, amik valójában nem az adott KIC azonosítóhoz tartoznak. Ezeket előbb ki kell szűrni a listából. Ezt egy Python szkripttel végeztem el, ami megkeresi azokat az objektumokat, amiknél ugyanahhoz a Kepler azonosítóhoz több Gaia azonosító is megjelent a crossmatch-cselés után, majd úgy választja ki közülük az eredeti KIC azonosítójú csillaghoz tartozó egyetlen, helyes Gaia azonosítót, hogy megnézi melyik esetben a legkisebb a koordináták szögtávolsága. A végén 2284 db Gaia azonosítót kaptam.



8. ábra. A CDS XMatch weboldala a használt paraméterekkel. [10]

Miután meglettek a Gaia ID-k a LAMOST MRS keresőjébe (9. ábra) feltöltöttem a Gaia azonosítókat tartalmazó fájlt, aminek eredményeként megkaptam a hozzájuk tartozó összes elérhető spektrumot. Ezeket egyszerre le lehet tölteni, aminek eredményeként egy listát kaptam az egyes spektrumokhoz tartozó linkekkel. Ennek a listának az első sorában van egy parancs, amit annak a mappának a termináljában kell lefuttatni, ahova a spektrumokat szeretnénk letölteni. Ekkor egyesével megkapjuk az összes spektrumot.

GAIA DR3 Constraints		
Source ID	list of ID	or Upload File (1000000 rows max) Sample Fájl kiválasztása gaiaID.csv
	Min	Max
g_mean_mag		
bp_mean_mag		
rp_mean_mag		
gaia_vari_type_sos	All agn cepheid eclipsing_binary long_period_variable ms_oscillator	
Search Reset		

9. ábra. A LAMOST MRS weboldalán használt keresőablak. [8]

Egy objektumhoz több spektrum is tartozik, de ezek nem feltétlenül objektum szerint sorrendben voltak megtalálhatóak, hanem a mappán belül összevissza. Ezeket szét kellett válogatni, és külön, az objektumok azonosítóival ellátott mappákba helyezni. Ehhez írtunk egy Python kódot, amely a fits fájlok fejlécéből egy változóba sorra elmenti az objektumok azonosítóját, majd megnézi, hogy a változóban szereplő, éppen aktuális azonosítóval létezik-e a célhelyen egy ezzel az objektumnévvel ellátott mappa. Ha nem létezik, akkor létrehoz az adott névvel egy mappát, és belemásolja a hozzá tartozó fits képet. Ha már létezik a mappa, akkor pedig csak bemásolja a képet, aminek a fejlécében ugyanaz az objektumazonosító szerepel.

Ennek eredményeként összesen 333 db objektumot kaptunk. Többségükhöz csak egyetlen, némelyikhez 2-3, valamelyikhez pedig 15 darab spektrum is tartozik.

4.1. Radiálissebesség-görbék készítése

A spektrumok megléte után elkezdhettem a radiálissebesség-görbék készítését, amit az iSpec-kel [11] végeztem el, de annak a szkriptelt változatával. A szkriptet (amely egy félautomata Python kód) tartalmazó fájlt minden egyes objektum mappájába be kellett másolni, majd onnan futtatni. A megírt kód teljesen automatizálja a spektrumok kontinuumnormálását és a radiálissebesség-meghatározást a keresztkorrelációs módszerrel, majd a radiálissebesség-görbére Kepler-pályát illeszt, amit a végén grafikontként jelenít meg. Ezt úgy teszi meg, hogy először kinyeri a fits képekből a hullámhossz és fluxus információkat, amiket listákba ment el. Ezután az iSpec beépített módszerével elvégzi a kontinuumillesztést és normálást a spektrumokon, majd előállítja a keresztkorrelációs függvényeket úgy,

hogy a beépített vonallisták közül az általam megadott referenciaspektrumot használja. A CCF-ekre automatikusan Gauss-függvényeket illeszt, majd a CCF-ekből így kapott radiális sebességek baricentrikus korrekcióját is elvégzi a program. A radiális sebességekhez a Kepler fedési katalógusban található periódus és referencia-időpont segítségével kiszámolja az egyes időpontokhoz tartozó keringési fázisokat, és az így előálló radiális sebesség-görbére Kepler-pályamodellt illeszt a legkisebb négyzetek módszere segítségével, amelyből végül kiszámolja és kiírja a rendszer pályaelemeit.

A kódban lehetőség van módosítani például a spektrum hosszát. Le tudjuk vágni ezek széleit, ha látunk benne hibás pixelekből származó részeket, amelyek ronthatják a normálást és a keresztkorrelációs függvények minőségét. Beállítható, hogy a spektrum kék vagy vörös ágát használja a kód. Én minden esetben a kék ágat használtam (495 nm - 535 nm). Természetesen az is megadható, hogy az összeátlagolt vagy egyedi spektrumokat használja-e, de én csak az összeátlagoltakat használtam. Tudjuk állítani a csúcs megtalálásának valószínűségét (peak probability) és a referenciaspektrumokat is, amelyek különböző típusú spektrumok, hiszen nem feltétlenül jó, ha pl. egy O típusú csillagot egy G típusúval hasonlítunk össze. Az esetleges hibákat abból láthatjuk, hogy a kódba beleírtuk, hogy készítsen külön mappákat, amibe elment diagnosztikai ábrákat. Ezeken az ábrákon az eredeti spektrumokra illesztett kontinuummodelleket, a normált spektrumokat, valamint a keresztkorrelációból kapott sebességprofilokat és a rájuk illesztett Gauss-görbéket láthatjuk. Ezek hasznos ábrák, mivel ha valami nem tűnik jónak a radiális sebesség-görbén, akkor ezen ábrák végiglapozgatásával megtalálhatjuk a hiba okát, és a paraméterek változtatásával kaphatunk egy jobb eredményt.

Egy- és kétvonalas radiális sebesség-görbét is tud kezelni a program, és kör- vagy ellipszispályát is tud illeszteni. Emellett külön fájlokba elmenti az illesztési paramétereket a hibákkal együtt és a mérési eredményeket a periódussal és T0 referencia-időponttal együtt, amiket egyébként a kód a Vizierből kérdez le közvetlenül a Kepler fedési katalógusból.

A kódba beépítésre került egy olyan rész is, ahol kétvonalas radiális sebesség-görbe esetén felcserélhetünk adatpontokat, amelyek az ábrán nem jó helyen látszanak az illesztett görbével összevetve. Ez azért történhet meg, mert a program úgy kezeli a sebességprofil, hogy minden esetben a magasabb csúcs tartozik az egyes, az alacsonyabbik csúcs a kettes komponenshez. Azonban előfordulhat olyan eset, hogy valójában a magasabbik csúcs éppen a kettes komponensé, míg a kisebbik az egyesé. Ezt indexcserével könnyen

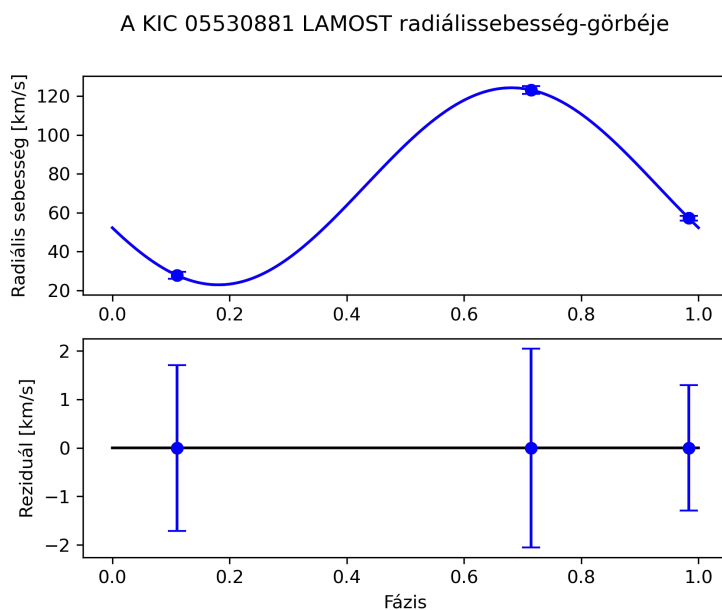
felülírhatjuk, ha megnézzük a grafikonon, hogy melyik fázishoz tartozó adatpontokat kell felcserélni. Ekkor az adatfájlban 0-tól indítva a sorindexeket megnézzük hányadik sorban található az adott fázisú adatpont és ennek a sorszámát beírjuk a kód megfelelő helyére.

5. Eredmények

Első körben minden, legalább 3 db spektrummal rendelkező objektumra lefuttattam az alap beállításokon a radiálissebesség-görbék illesztéséhez szükséges kódot. Alap beállítások alatt értendő, hogy a peak probability 0,75, nincs vágás a spektrumban, körpályát illeszt és az iSpec beépített Narval.Sun referenciaspektrumát alkalmazza a keresztkorrelációhoz. 333 darab objektum közül 46 darab volt használható a további vizsgálatokhoz, mert a legtöbb objektumhoz nem volt elegendő használható spektrum. Erre a 46 db-ra, egyesével elemezve, hogy milyen változtatások lennének szükségesek a kódban, újrafuttattam azt. A futtatásokhoz beállított paramétereket a függelékben található 8. és 9. táblázatban gyűjtöttem össze. A következő alfejezetekben ezeket a feldolgozott objektumokat mutatom be különböző csoportokba osztva.

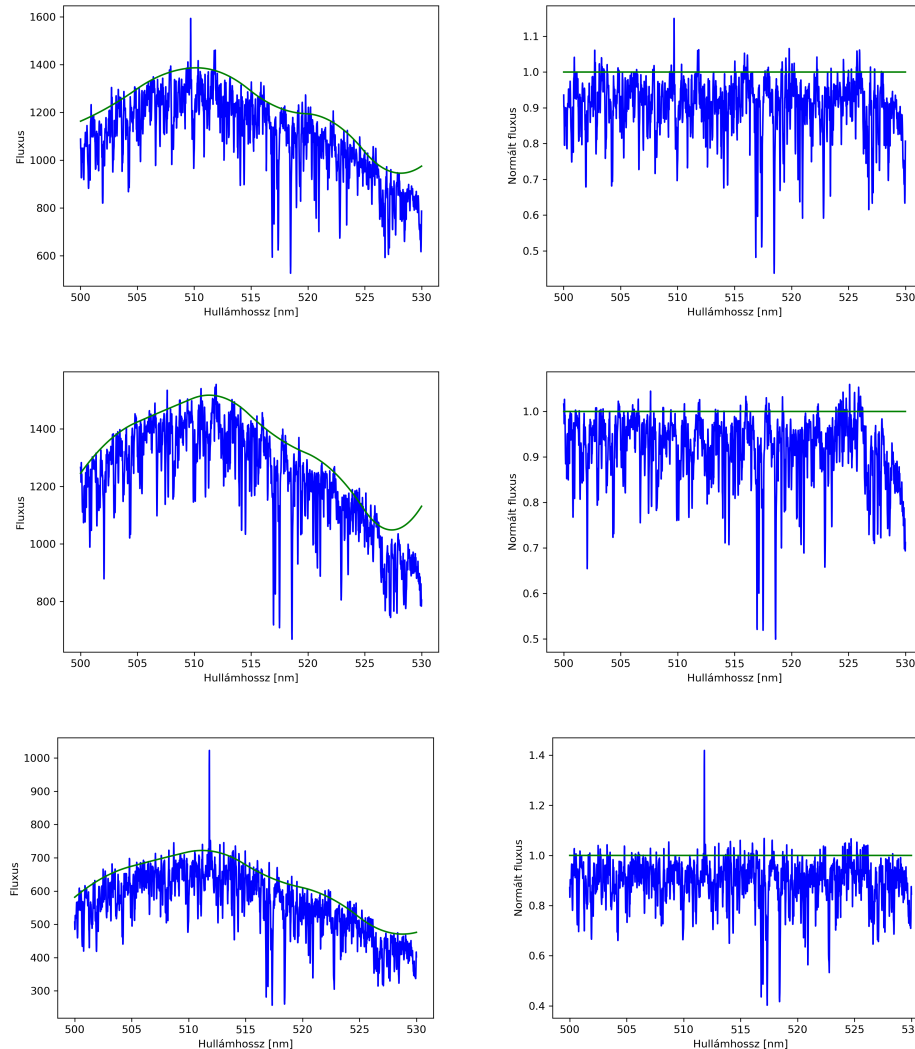
5.1. Egyvonalas radiálissebesség-görbék

Az egyvonalas kettősök olyan objektumok, amelyeknél csak az egyik komponens spektrumvonalait látjuk, mert az sokkal fényesebb a társánál. Ebben a részben a további feldolgozást nem igénylő, a várt eredménynek megfelelő egyvonalas radiálissebesség-görbéket mutatom be.



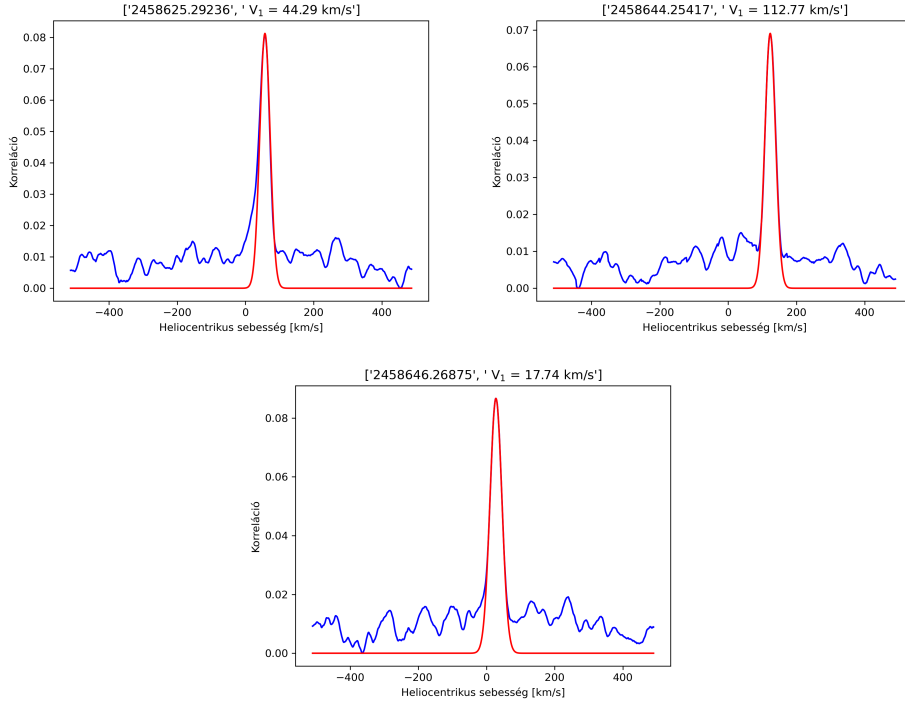
10. ábra. A KIC 05530881 LAMOST radiálissebesség-görbéje a ráillesztett körpályamoddellel.

A 10. ábrán látható KIC 05530881 esetében a kódban csak a spektrumok határait változtattam (500-530 nm). Levágtam a hibás pixelekből származó nem megfelelő részeket, majd minden más beállítást az eredetin hagyva futattam a programot.



11. ábra. Példa a KIC 05530881 eredeti és normált spektrumaira.

A 11. ábra bal oldalán láthatóak a már levágott, de eredeti spektrumok. A jobb oldalon pedig a normált spektrumok találhatók. Maga a spektrum sötétkék színű, míg az illesztett kontinuumot a zöld vonal jelöli.



12. ábra. A KIC 05530881 normált spektrumaiból előállított sebességprofilok.

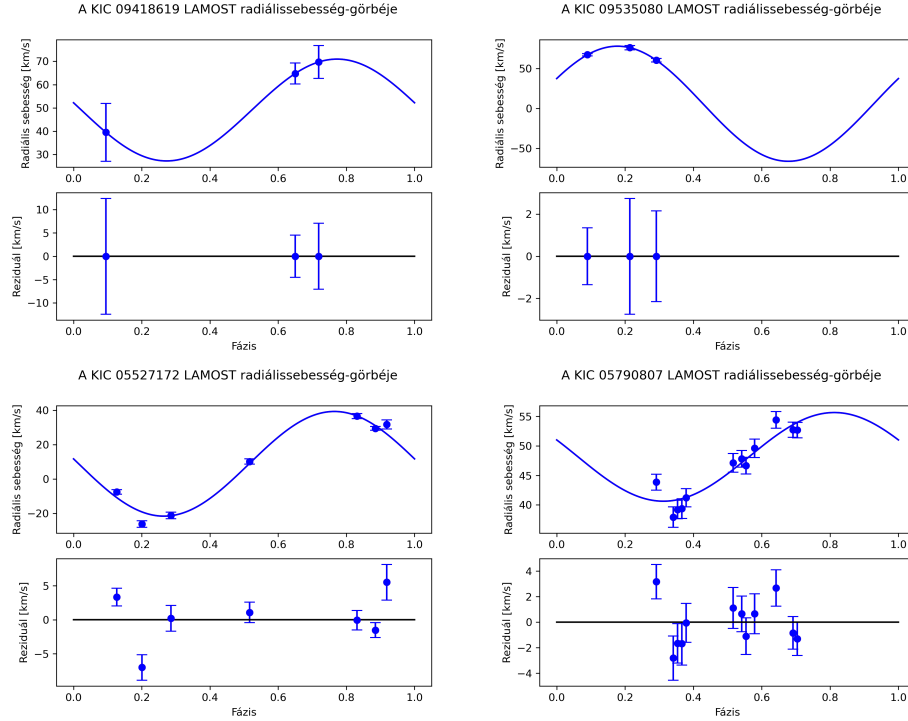
A 12. ábrán késsel jelölt, mért sebességprofilokra illesztett Gauss-görbék látszanak a piros vonallal jelölve. Az ábrák felett látható, hogy az adott mérés melyik BJD-hez tartozik, és hogy milyen radiális sebességnél található az illesztett Gauss-görbe maximuma.

$a_1 \sin i [R_\odot]$	$5,087 \pm 0,143$
e	0,0
Fázistolás	$-0,069 \pm 0,007$
$v_\gamma [km/s]$	$73,61 \pm 1,524$
$P [nap]$	5,082522
$T_0 [BJD]$	2454965,96077

1. táblázat. A KIC 05530881 LAMOST radiálissebesség-görbáját leíró körpályamodellből meghatározott pályaelemek.

A 1. táblázatban láthatóak a program által kiszámított paraméterek, ahol $a_1 \sin i$ az egyes komponens relatív félnagy tengelyének látóirányú vetületét, a v_γ pedig a tömegközéppont radiális sebességét jelöli.

A további egyvonalas kettősök radiálissebesség-görbéit és az általam meghatározott pályaelemeiket a 13. ábrán, illetve a 2. táblázatban gyűjtöttem össze:



13. ábra. A KIC 09418619, a KIC 09535080, a KIC 05527172 és a KIC 05790807 LAMOST radiálissebesség-görbéi a rájuk illesztett körpályamodellekkel.

Objektumok	KIC 09418619	KIC 09535080	KIC 05527172	KIC 05790807
$a_1 \sin i [R_\odot]$	$2,652 \pm 1,521$	$70,603 \pm 11,815$	$1,914 \pm 0,049$	$11,878 \pm 1,136$
e	0,0	0,0	0,0	0,0
Fázistolás	$0,023 \pm 0,07$	$0,428 \pm 0,003$	$0,015 \pm 0,004$	$0,062 \pm 0,784$
$v_\gamma [km/s]$	$49,103 \pm 5,912$	$5,987 \pm 10,139$	$8,835 \pm 0,457$	$48,146 \pm 0,784$
P [nap]	6,150247	49,645296	3,183967	79,996246
T_0 [BJD]	2454955,121931	2454986,027785	2454975,414638	2454960,128986

2. táblázat. A KIC 09418619, a KIC 09535080, a KIC 05527172 és a KIC 05790807 LAMOST radiálissebesség-görbéit leíró körpályamodellekből meghatározott pályaelemek.

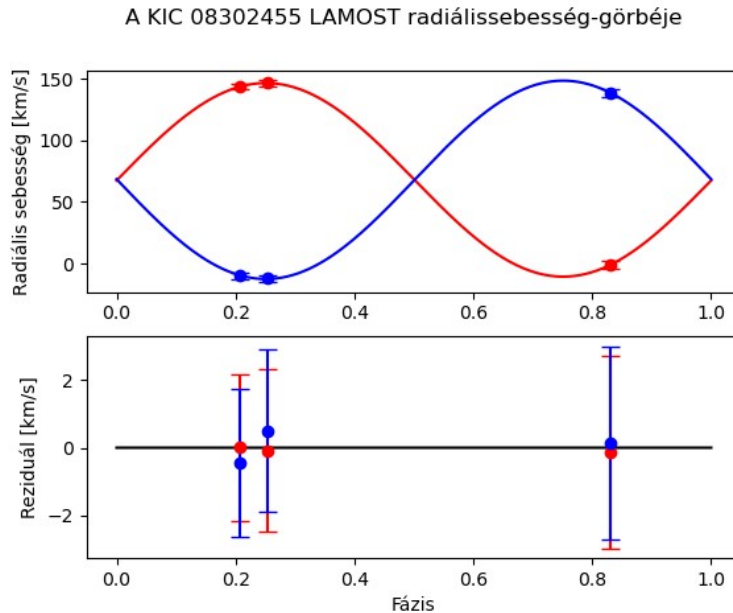
5.2. Kétvonalas radiálissebesség-görbék

Kétvonalas kettőscsillagról beszélünk, ha mindkét komponens spektruma megfigyelhető és elemezhető.

Alapvetően két különböző esetet vizsgálhatunk. Az egyik eset, mikor a két csillag körpályán kering a közös tömegközéppontjuk körül, a másik esetben pedig ellipszispályán.

Ebben a részben a további feldolgozást nem igénylő, a várt eredménynek megfelelő radiálissebesség-görbéket mutatom be.

5.2.1. Körpálya

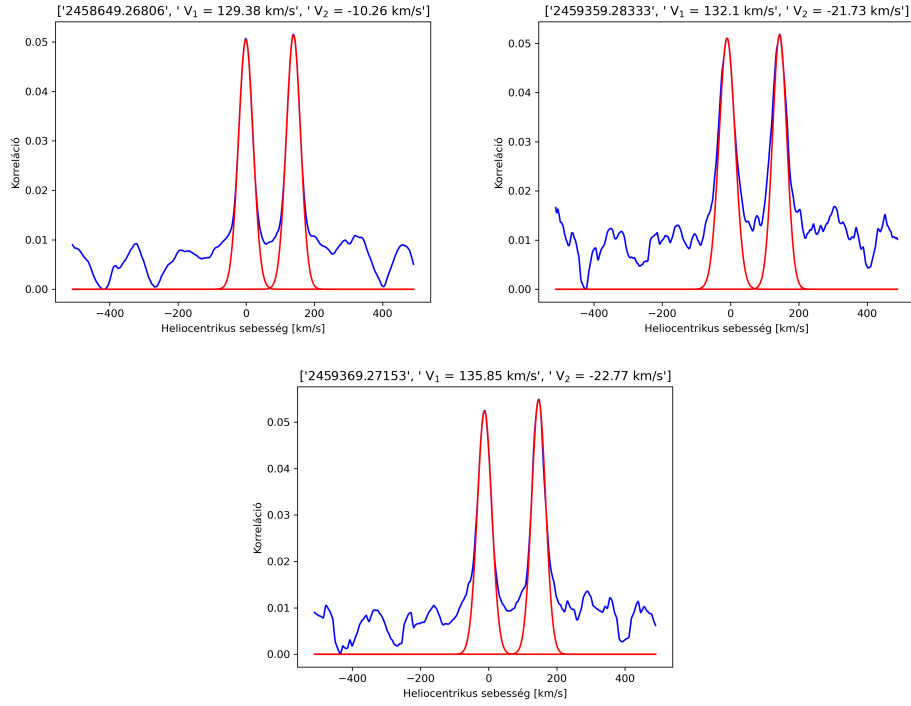


14. ábra. A KIC 08302455 LAMOST radiálissebesség-görbéje a ráillesztett körpályamoddellel. A piros szín a főkomponenshez, a kék pedig a másodkomponenshez tartozik.

A 14. ábra elkészítésénél körpályát illesztettem és az illesztésből származó pályaelemeket a 3. táblázatban gyűjtöttem össze. A paramétereken változtatni kellett a kódban, hogy megfelelő sebességprofilokat és radiálissebesség-görbét kapjak. A spektrumok széleit le kellett vágni a 493 és 530 nm-es hullámhosszértékeknél, és egy indexcserét is végezni kellett a 0,83-as fázisnál lévő adatpontra.

$a_1 \sin i [R_\odot]$	$7,585 \pm 0,158$
$a_2 \sin i [R_\odot]$	$7,771 \pm 0,181$
e	0,0
Fázistolás	$0,001 \pm 0,007$
$v_\gamma [km/s]$	$67,929 \pm 1,259$
$P [nap]$	4,883976
$T_0 [BJD]$	2454957,805712

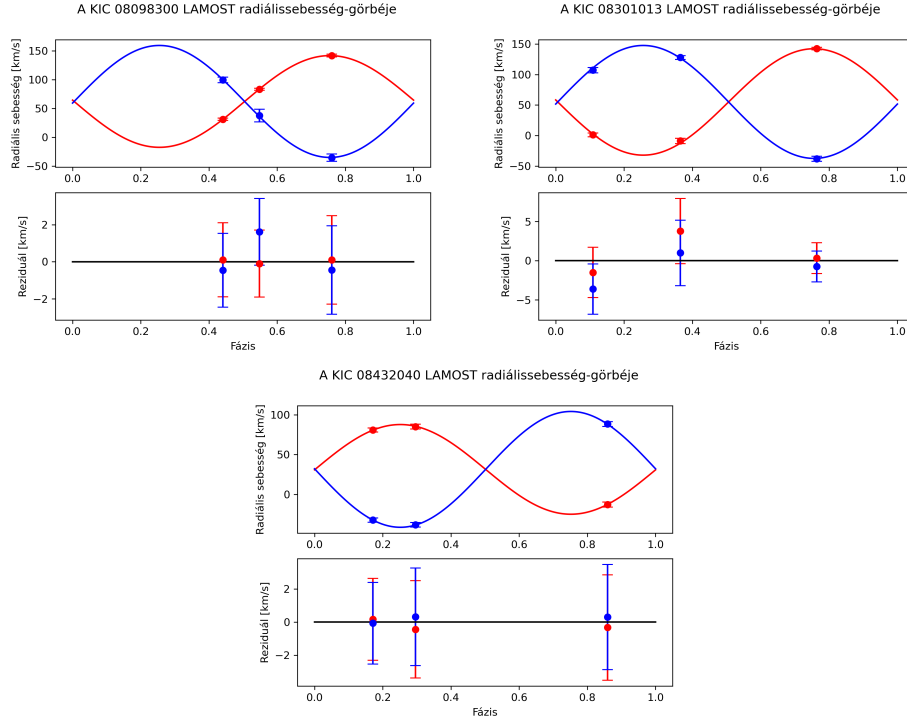
3. táblázat. A KIC 08302455 LAMOST radiálissebesség-görbét leíró körpályamodellből meghatározott pályaelemek.



15. ábra. A KIC 08302455 normált spektrumaiból előállított sebességprofilok.

A 15. ábrán látható kékkel jelölt, mért sebességprofilokon jól elkülönülnek a piros vonalakkal kirajzolt Gauss-görbék, melyek a komponensek radiális sebességeit mutatják meg.

A további kétvonalas kettősök radiálissebesség-görbéit és az általam meghatározott pályaelemeiket a 16. ábrán, illetve a 4. táblázatban gyűjtöttem össze:

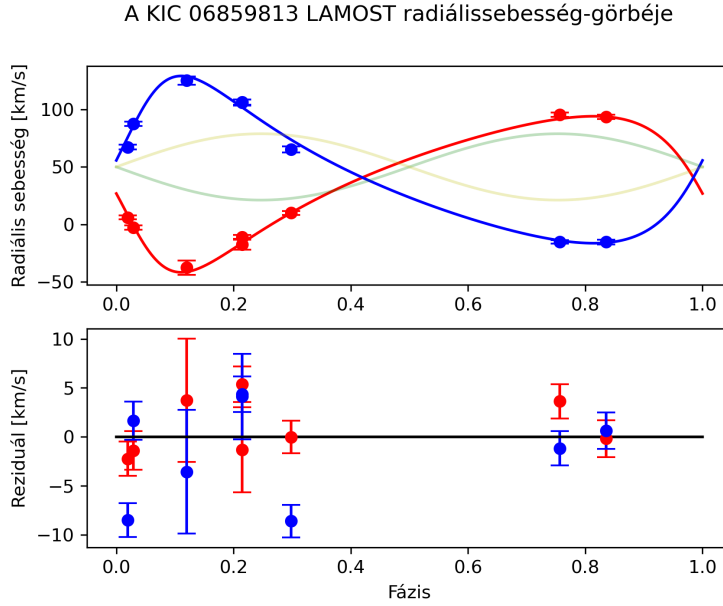


16. ábra. A KIC 08098300, a KIC 08301013 és a KIC 08432040 LAMOST radiálissebesség-görbéi a rájuk illesztett körpályamodellekkel. A piros szín rendre a főkomponenshez, a kék pedig a másodkomponenshez tartozik.

Objektumok	KIC 08098300	KIC 08301013	KIC 08432040
$a_1 \sin i [R_\odot]$	$6,763 \pm 0,21$	$7,631 \pm 0,164$	$5,937 \pm 0,213$
$a_2 \sin i [R_\odot]$	$8,257 \pm 0,478$	$8,099 \pm 0,238$	$7,667 \pm 0,217$
e	0,0	0,0	0,0
Fázistolás	$0,005 \pm 0,004$	$0,006 \pm 0,005$	$0,002 \pm 0,006$
$v_\gamma [km/s]$	$62,051 \pm 1,838$	$55,076 \pm 1,395$	$31,409 \pm 1,35$
$P [nap]$	4,305918	4,428059	5,327758
$T_0 [BJD]$	2454956,737583	2454957,310989	2455095,4989142

4. táblázat. A KIC 08098300, a KIC 08301013 és a KIC 08432040 LAMOST radiálissebesség-görbéit leíró körpályamodellekből meghatározott pályaelemek.

5.2.2. Excentrikus pálya

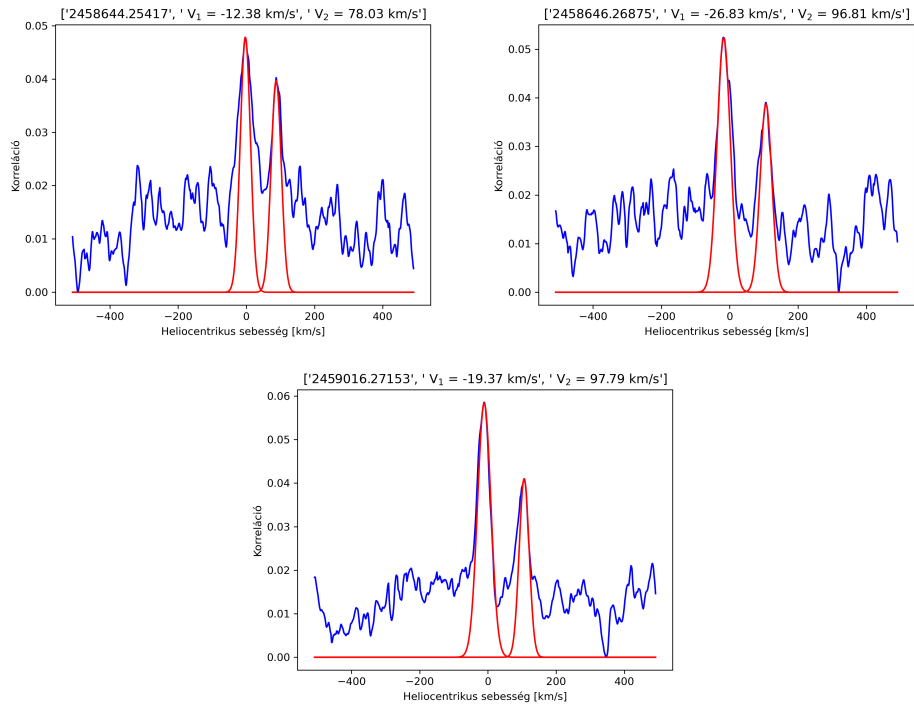


17. ábra. A KIC 06859813 LAMOST radiális sebesség-görbéje a ráillesztett excentrikus pályamoddell. A piros szín a főkomponenshez, a kék pedig a másodkomponenshez tartozik.

A 17. ábrán bemutatott radiális sebesség-görbén a két csillag elliptikus pályán kering. Ennél az objektumnál a peak probabilityt 0,5-re változtattam, a spektrumokat levágtam a 493 és 530 nm-es hullámhosszaknál és egy indexcsere is történt a 0,83-as fázisnál az újrafuttatás előtt.

$a_1 \sin i [R_\odot]$	$13,48 \pm 0,273$
$a_2 \sin i [R_\odot]$	$14,447 \pm 0,251$
e	$0,384 \pm 0,021$
$\omega [fok]$	$124,025 \pm 0,05$
Fázistolás	$0,041 \pm 0,005$
$v_\gamma [km/s]$	$40,764 \pm 0,545$
$P [nap]$	10,882422
$T_0 [BJD]$	2454954,793569

5. táblázat. A KIC 06859813 LAMOST radiális sebesség-görbét leíró excentrikus pályamoddellből meghatározott pályaelemek.

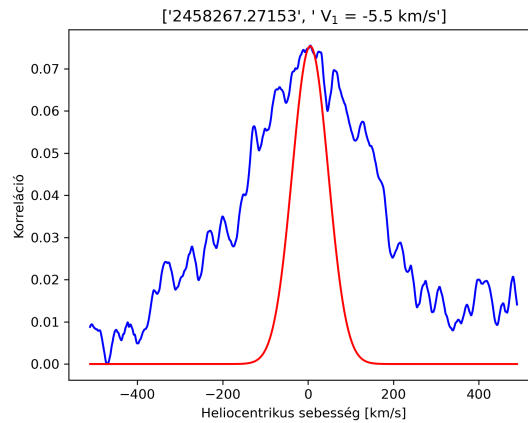


18. ábra. Néhány példa a KIC 08302455 normált spektrumaiból előállított sebességprofilokra.

Szintén itt is mindent táblázatba foglaltam. Azonban ennél az esetről bejött egy további paraméter is, az ω -val jelölt periasztron argumentum, amit az 5. táblázat mutat.

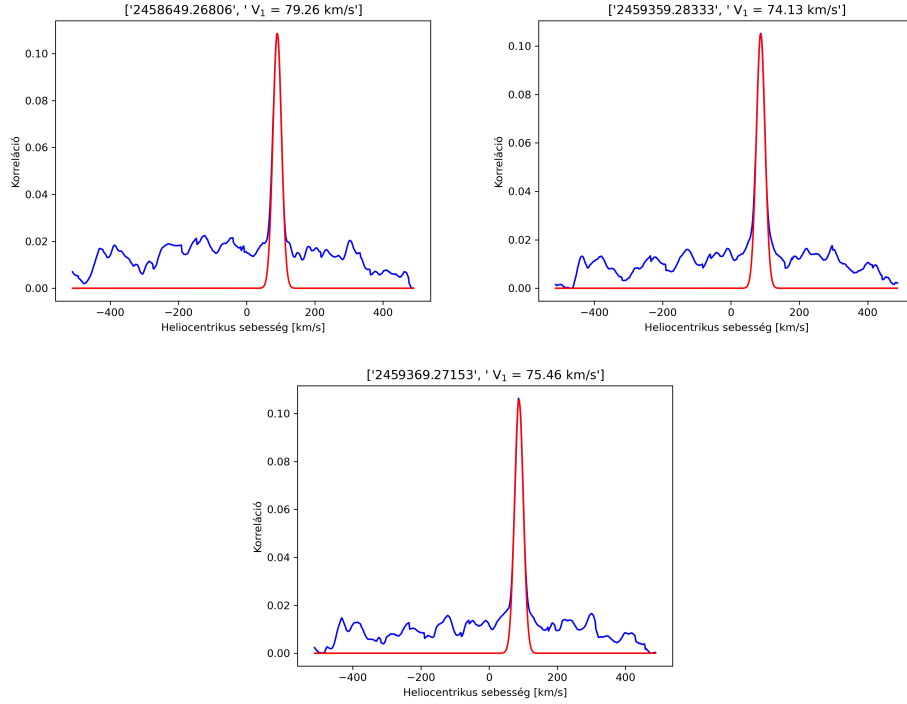
5.3. További feldolgozásra váró objektumok

A 46 darab objektumból 10 darab volt, amely egyértelműen besorolható volt valamelyik csoportba, ezek mind az adott csoportra és a kettőscsillagokra jellemző tulajdonságokat mutatták. A maradék 36 objektum azonban nem volt ilyen jól vizsgálható. A fő ok az volt, hogy habár a keresztkorrelációs függvényeken (CCF) jól látszik a radiális sebességek változása az időben, tehát a futtatás az összes objektumra adott eredményt, azonban a program teljes mértékben nem volt megfelelő ezek modellezésére. Ennek egyik oka, hogy némelyik spektrum nagyon zajos, emellett a túlságosan kiszélesedett, sokszor egymással átfedő CCF csúcsokra az iSpec nem tud megfelelő Gauss-görbét illeszteni. Egy ilyen típusú CCF-re látható példa az alábbi, 19. ábrán.



19. ábra. A KIC 06431545 egyik sebességprofilja.

Másik ok, hogy valójában nem kettős, hanem hármas csillagrendszerrel van szó, és a CCF-en a harmadik komponens radiális sebességének a változását látjuk. Ennek a harmadik komponensnek azonban sokkal hosszabb időskálájú ez a változása, mint a belső kettős periódusa, emellett a rendelkezésre álló adatsor sem elég hosszú ugyanezen okból, ezért a modellezéshez több adatra lenne szükség.



20. ábra. A KIC 07375348 sebességprofiljai.

Példaként bemutatva, a 20. ábrán lévő sebességprofilokról látszik, hogy a radiális sebesség nagyon keveset változik hosszú idő alatt és a fedésekből meghatározott periódussal nem illeszthető megfelelő pályamodell a radiális sebesség-görbére. Ez utalhat arra, hogy a CCF-en látható csúcs valójában nem a kettős egyik tagjához, hanem egy a kettős periódusánál jóval hosszabb periódusú és jóval tágabb pályán keringő harmadik komponenshez tartozik.

Ezeket a további feldolgozásra váró objektumokat a 6. és 7. táblázatban gyűjtöttem össze és a későbbiekben más módon tervezem modellezni, elemezni. Ehhez elérhetőek olyan programok, amelyekkel rugalmasabban végezhetőek el a Gauss-görbe illesztések a CCF csúcsokra, mint az iSpec automatikus illesztőmoduljával. Ilyen program például a Fityk [12] nevű alkalmazás.

LAMOST ID	KIC ID	Megjegyzések
J190930.41+430033.8	07431665	egyvonalas, de valószínűleg egy harmadik komponenst látunk
J190933.84+430554.9	07431703	egyvonalas, de nagyon kiszélesedett és zajos a CCF profil
J191003.60+425442.7	07350038	kétvonalas, de a CCF-ek átfednek
J191118.95+414817.2	06431545	egyvonalas, de nagyon kiszélesedett és zajos a CCF profil
J191125.66+440609.8	08223328	egy- vagy kétvonalas, néhány CCF-en mintha megjelenne egy másik, félig fedésben lévő csúcs is
J191221.05+435233.1	08087799	egyvonalas, nem tudni mi ez
J191452.41+423008.1	07023917	egyvonalas, de nagyon kiszélesedett
J191708.88+411553.3	05952403	egyvonalas, de valószínűleg egy harmadik komponenst látunk
J191742.91+443829.0	08553788	egyvonalas, de valószínűleg egy harmadik komponenst látunk
J191846.70+433733.4	07884842	kétvonalas, ki kell szűrni a rossz pontokat a spektrumból
J191905.59+432317.2	07676610	egyvonalas, de nagyon kiszélesedett
J191926.66+412429.5	06117415	kétvonalas, de zajos és kiszélesedett CCF
J192044.71+434325.9	07955301	egyvonalas, de erősen változik a v_γ , így lehet harmadik komponens is a rendszerben
J192220.82+430659.6	07523733	egyvonalas, de elég zajosak a spektrumok
J192325.12+420512.8	06603043	egyvonalas, de nagyon kiszélesedett CCF
J192442.70+421156.3	06689368	egyvonalas, de nagyon kiszélesedett CCF
J192516.67+433543.0	07889628	kétvonalas, de vannak benne egymást fedő csúcsok
J192614.06+442917.4	08430210	egyvonalas, de lehet harmadik komponens látszik

6. táblázat

LAMOST ID	KIC ID	Megjegyzések
J192728.85+421942.7	06863161	lehet, hogy kétvonalas lehet, hogy nem
J192731.66+435823.5	08097902	kétvonalas, de vannak fedések, közel fedések
J192937.51+413046.9	06206751	kétvonalas, de zajos és kiszélesedett CCF
J193026.86+431818.5	07684873	egyvonalas, de ki kell szűrni a rossz pontokat a spektrumból
J193028.19+440007.2	08167938	egyvonalas, de nagyon kiszélesedett
J193052.32+415520.8	06525196	kétvonalas, de némely CCF-en a harmadik komponens is látszik
J193141.20+464843.6	09953894	kétvonalas, de nagyon kiszélesedett
J193311.19+415227.0	06447430	egyvonalas, nagyon kiszélesedett
J193406.08+425738.7	07368451	egyvonalas, de valószínűleg egy harmadik komponenst látunk
J193450.18+450037.8	08823666	egyvonalas, de nagyon kiszélesedett és átfedő belső komponensek + éles csúcs (harmadik komponens)
J193536.79+460556.1	09470054	egyvonalas, de nagyon kiszélesedett
J193806.35+432347.2	07690843	egyvonalas, de valószínűleg egy harmadik komponenst látunk
J193812.84+445101.2	08696442	egyvonalas, de valószínűleg egy harmadik komponenst látunk
J194117.90+433019.3	07833144	kétvonalas, de nem megfelelő a modellezés
J194137.02+425852.6	07375348	egyvonalas, de valószínűleg egy harmadik komponenst látunk
J194210.49+463710.4	09840412	egyvonalas, de nagyon kiszélesedett
J194655.50+435027.7	08043961	egyvonalas, de ki kell szűrni a rossz pontokat a spektrumból
J194744.41+445101.3	08703887	egyvonalas, de ki kell szűrni a rossz pontokat a spektrumból

7. táblázat

6. Összefoglalás

A munkám során a Kepler fedési katalógusban listázott kettőscsillagokhoz kerestem publikusan elérhető, mért spektrumokat a LAMOST Medium Resolution Search adatbázisában. Összesen 333 darab objektum esetén találtam legalább egy spektrumot, de végül ezek között 46 objektumhoz volt legalább 3 használható mérés a további vizsgálatokhoz. Mindezekre lefuttattam egy félautomata Python-kódot, amely az általam végzett megfelelő módosításokkal 10 objektum esetén volt képes megfelelő radiálissebesség-görbét előállítani, majd Kepler-pályamodellel segítségével illeszteni és pályaparamétereket meghatározni. A többi 36 objektum esetében egyelőre megállapítottam, hogy még további vizsgálatokra szorulnak, ugyanis az általam használt program nem volt képes ezek megfelelő feldolgozására, mert az olyan problémákat, mint a zajos és kiszélesedett, esetleg nagy mértékben átfedő keresztkorrelációs függvényeket nem tudja kielégítően kezelni. Másrészt pedig vannak olyan objektumok is a listában, amelyekhez nem állt rendelkezésre elég adat a megfelelő modellezéshez, mert a mérés folyamán kiderült, hogy valószínűsíthetően nem kettős, hanem hármas rendszerekről van szó. A 10 modellezett kettőscsillag közül 3 (KIC 05527172, KIC 08098300, KIC 06859813) esetében találtam korábbi vizsgálatokban meghatározott pályaelemeket a szakirodalomban, a többi 7 rendszer esetében ezek új eredménynek számítanak. A továbbiakban a fennmaradó 36 objektum egyéb programokkal történő feldolgozása és modellezése van tervben, majd ezt követően az elért eredmények szakcikkben való publikálása. Ezt követően pedig a távolabbi tervek között szerepel a Kepler űrtávcső által mért fénygörbék bevonása a vizsgálatokba, és a rendszerek komplex modellezése a rendszerekben található csillagok fizikai paramétereinek meghatározása céljából.

7. Köszönetnyilvánítás

Nagyon hálás vagyok a témavezetőmnek, Dr. Mitnyan Tibornak, hogy a dolgozatom elkészítése során szakmai tudásával végig segített és ösztönzött.

Hivatkozások

- [1] Szatmáry Károly. *Változócsillagok*. URL: <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/asztrofizika/3valtozocsillagok.pdf>.
- [2] Borkovits Tamás. *A fedési kettős és többes csillagrendszerek vizsgálatának járatlan útjain*. 2016. URL: https://real-d.mtak.hu/980/7/dc_1364_16_doktori_mu.pdf.
- [3] Mitnyan Tibor. *Érintkező kettőscsillagok fotometriai és spektroszkópiai vizsgálata, valamint a TIC 278825952 hármas rendszer analízise*. 2020. URL: https://doktori.bibl.u-szeged.hu/id/eprint/10673/1/MitnyanT_disszertacio.pdf.
- [4] *Csillagászat*. URL: http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/5_Egi_mechanika/egi_mechanika.htm.
- [5] Dálya Gergely. *Bevezetés a csillagászatba*. 2021.
- [6] Dr. Szalai Tamás. *Bevezetés a csillagászatba 3 (egyetemi tananyag)*.
- [7] Mike Lilla Titanilla. *Kettőscsillagok radiálissebesség-elemzése az iSpec programmal*. BSc Szakdolgozat. 2023.
- [8] *LAMOST*. URL: <https://www.lamost.org/dr9/v2.0/medcas/search>.
- [9] *Kepler Eclipsing Binary Catalog*. URL: <https://keplerebs.villanova.edu/>.
- [10] *CDS X-Match Service*. URL: <http://cdsxmatch.u-strasbg.fr/>.
- [11] *iSpec alkalmazás*. URL: <https://www.blancocuaresma.com/s/iSpec>.
- [12] *Fityk alkalmazás*. URL: <https://fityk.nieto.pl/>.

Függelék

KIC azonosító	iSpec referenciaspektrum	Hullámhossz- tartomány (nm)	Pályamodell típusa
07431665	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
07431703	Narval.Sun.370_1048nm	511-538	-
07350038	Narval.Sun.370_1048nm	495-530	-
06431545	HARPS_SOPHIE.A0.350_1095nm	493-525	-
08223328	Narval.Sun.370_1048nm	495-530	-
08087799	HARPS_SOPHIE.F0.360_698nm	502-530	-
07023917	HARPS_SOPHIE.F0.360_698nm	493-530	-
05952403	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
08553788	Narval.Sun.370_1048nm	500-530	-
07884842	Narval.Sun.370_1048nm	510-525	-
07676610	HARPS_SOPHIE.A0.350_1095nm	515-525	-
06117415	Narval.Sun.370_1048nm	493-530	-
07955301	Narval.Sun.370_1048nm	493-530	-
07523733	Narval.Sun.370_1048nm	493-510	-
06603043	HARPS_SOPHIE.A0.350_1095nm	493-530	-
06689368	HARPS_SOPHIE.A0.350_1095nm	493-530	-
07889628	Narval.Sun.370_1048nm	493-530	-
08430210	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
06863161	Narval.Sun.370_1048nm	493-530	-
08097902	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
08098300	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	Kör
08301013	Narval.Sun.370_1048nm	500-530	Kör
06206751	HARPS_SOPHIE.F0.360_698nm	517-530	-
07684873	Narval.Sun.370_1048nm	493-510	-

8. táblázat. A program egyes futtatásaihoz általam beállított paraméterek objektumonként. Ahol nem szerepel a pályamodell típusa, ott a rendelkezésre álló adatok vagy a használt program korlátai miatt egyelőre nem lehetett megfelelő modellt illeszteni.

KIC azonosító	iSpec referenciaspektrum	Hullámhossz- tartomány (nm)	Pályamodel típusa
08167938	HARPS_SOPHIE.A0.350_1095nm	493-530	-
06525196	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
09953894	HARPS_SOPHIE.A0.350_1095nm	490-540	-
06447430	HARPS_SOPHIE.A0.350_1095nm	493-530	-
07368451	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
08823666	HARPS_SOPHIE.A0.350_1095nm	510-530	-
09470054	HARPS_SOPHIE.F0.360_698nm	493-530	-
07690843	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
08696442	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
07833144	HARPS_SOPHIE.F0.360_698nm	493-530	-
07375348	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
09840412	HARPS_SOPHIE.A0.350_1095nm	497-530	-
08043961	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
08703887	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	-
05530881	Narval.Sun.370_1048nm	500-530	Kör
09418619	Narval.Sun.370_1048nm	493-530	Kör
09535080	Narval.Sun.370_1048nm	493-530	Kör
05527172	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	Kör
05790807	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	Kör
08302455	Narval.Sun.370_1048nm	493-530	Kör
08432040	Narval.Sun.370_1048nm	490-540	Kör
06859813	Narval.Sun.370_1048nm	493-530	Excentrikus

9. táblázat. A program egyes futtatásaihoz általam beállított paraméterek objektumonként. Ahol nem szerepel a pályamodel típusa, ott a rendelkezésre álló adatok vagy a használt program korlátai miatt egyelőre nem lehetett megfelelő modellt illeszteni.

Saját eredmények

- Összepárosítottam a Kepler fedési katalógusban szereplő kettőscsillagokat a Gaia DR3 azonosítóikkal a CDS XMatch segítségével, majd a Gaia DR3 azonosítók felhasználásával megkerestem a LAMOST Medium Resolution Search adatbázisban az összes róluk elérhető spektrumot.
- A spektrumok letöltése után szétválogattam azokat objektumonként, majd kiszűrtem azokat, amelyekhez elegendő mennyiségű spektrum állt rendelkezésre a további vizsgálathoz. Ilyen módon 46 objektumot találtam, amelyhez legalább 3 spektrum volt elérhető.
- Az iSpec-hez írt félautomata Python-kódot lefuttattam erre a 46 objektumra, majd egyesével megvizsgáltam a kapott eredményeket és addig változtattam a kód bevetési paramétereit, amíg megfelelő sebességprofilokat, valamint radiálissebesség-görbékét sikerült előállítani.
- 10 objektum esetén sikerült kielégítő radiálissebesség-görbét és pályamodellt kapni, melyek közül 7 esetben még nem szerepelnek meghatározott pályaelemek a szakirodalomban.
- A többi 36 objektumról megállapítottam, hogy az általam használt program nem alkalmas a kielégítő vizsgálatukhoz vagy az objektum valószínűsíthetően nem kettős, hanem hármas rendszer és a rendelkezésre álló spektrumok nem elégségesek ezek pályáinak leírására, ezért ezekhez további mérésekre lenne szükség.