

**SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM**

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

OPTIKAI ÉS KVANTUMELEKTRONIKAI TANSZÉK

CSILLAGÁSZ SZAK

**DIPLOMAMUNKA**

**II. típusú cefeida csillagok légkörének  
kinematikája**

Jurkovic Mónika

Témavezető: Dr. Vinkó József, egyetemi docens

2006

# Tartalmi összefoglaló

A cefeida változócsillagok nagy amplitúdójú, radiális rezgéseket (pulzációt) végeznek, emiatt mérhető fizikai paramétereik periodikusan változnak. A cefeidák két altípusra oszthatóak:

1. I. típusú (klasszikus) cefeidák: fiatal, nagy tömegű, fémgazdag csillagok
2. II. típusú cefeidák: idősebb csillagok, távol a Galaxis fősíkjától.

Dolgozatomban II. típusú cefeidák pulzációját vizsgáltam spektroszkópai adatok segítségével. A spektrumban látható vonalak a csillaglégkör különböző helyein keletkeznek, így ezek Doppler-eltolódásának mérésével egy adott réteg radiális sebességeit határozhatjuk meg. Vizsgálataimhoz 12 db. II. típusú cefeidáról készült közepes felbontású ( $R=10000$ ) spektrumot használtam. A  $H\alpha$  vonalat a kromoszférához, a  $6600 \text{ \AA}$  körüli fémvonalakat pedig a fotoszférához társítottam, és meghatároztam radiális sebességeiket. E két réteg a csillag pulzációja során egymáshoz képest néha azonos, néha ellentétes fázisban mozog. Ennek jellemzésére a két réteg maximális radiális sebesség különbségét ( $\Delta V$ ) használtam. Megállapítottam, hogy a 3 napnál rövidebb és a 10 napnál hosszabb periódusú csillagokra  $\Delta V$  nagy értékeket vehet fel, míg e két periódus között lényegesen kisebb szórást mutat. Eredményeimet irodalmi adatokkal összevetve kimutattam, hogy a II. és I. típusú cefeidák légköre hasonló mozgást mutat, kivéve a rövid periódusú tartományt, ahol a klasszikus cefeidákra a  $\Delta V$  sokkal kisebb.

# Tartalomjegyzék

<b>Bevezetés</b>	<b>3</b>
<b>1. Cefeidák</b>	<b>4</b>
1.1. A cefeida változócsillagok . . . . .	4
1.2. A cefeidák pulzációja . . . . .	5
<b>2. Adatfeldolgozás</b>	<b>10</b>
2.1. Radiális sebességek mérése keresztkorrelációs módszerrel . . . . .	10
2.2. Radiális sebesség görbék . . . . .	11
2.3. A radiális sebességek hibája . . . . .	19
<b>3. A mérési adatok értelmezése, eredmények</b>	<b>23</b>
3.1. Mérési adatok értelmezése, sebesség differenciák . . . . .	23
3.2. Modellszámítások . . . . .	36
<b>Összefoglalás</b>	<b>40</b>
<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>41</b>
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>43</b>

## Bevezetés

A cefeida változócsillagok a csillagászati távolságmérés alappillérei közé tartoznak. A periódus–fényesség reláció pontos kalibrációja érdekében rendkívül fontos, hogy megértsük, pontosan hogyan pulzálnak. Ezenkívül a pulzációs elméletek tesztelésére is alkalmasak, hiszen nem csak alaplómodusban, hanem első-, második felharmónikusban is rezegnek.

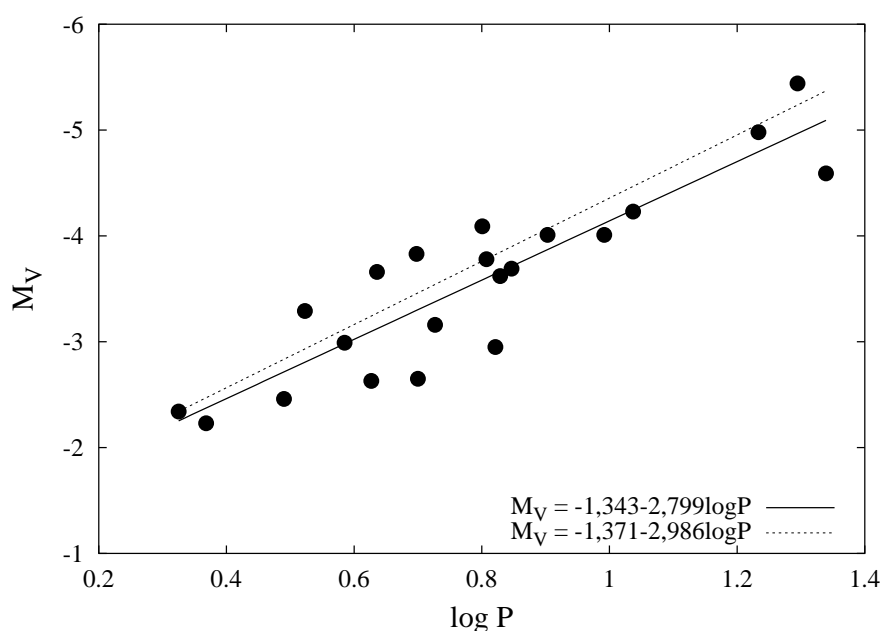
Dolgozatomban spektroszkópai radiális sebességmérésekből vizsgáltam, hogy az I. és II. típusú cefeidák megkülönböztethetőek-e kinematikai szempontból. Ehhez II. típusú cefeidákról a témavezetőm által 1997–1998-ban készített méréseket, és az elérhető irodalmi adatokat használtam fel. A pulzáló csillaglégkör kinematikáját a fotoszféra és kromoszféra különböző radiális sebességeiből kaptam. Ezt az eljárást néhány szerző már alkalmazta, de az általam bemutatott 12 darab II. típusú cefeidák radiális sebességgörbéi a legteljesebb fázislefedettségűek.

A mérésekből kapott eredményeket az egyzóna modell segítségével értelmezem.

# 1. Cefeidák

## 1.1. A cefeida változócsillagok

A cefeidák 1784-ben történt felfedezésüktől kezdve jelentős szerepet töltek be a csillagászatban, elsősorban a Henrietta Leavitt által felismert periódus–fényesség reláció miatt. Ez lehetővé tette, hogy a cefeidák fényváltozási periódusát mérve távolságokat határozzunk meg. A periódus–fényesség relációt általában  $M_V = a \log P + b$  alakban adják meg, ahol  $M_V$  az észlelt abszolút fényesség,  $P$  a pulzáció periódusa (1. ábra).



1. ábra. A klasszikus cefeidák periódus–fényesség relációja (Csák, 2002).

A cefeidák rezgéseket (pulzációt) végző változócsillagok. Két alapvető típusra oszthatók:

1. I. típusú cefeidák: fiatal, nagy tömegű, fémgazdag csillagok,
2. II. típusú cefeidák: idősebb csillagok, távol a Galaxis fősíkjától.

Az I. típusú cefeidák nagy luminozitású szuperóriás, vagy óriás csillagok. Tömegük  $3\text{--}15 M_\odot$ , sugaruk  $15$  és  $200 R_\odot$  közötti. A pulzáció periódusa  $2$  és  $50$  nap között van általában, de észleltek ennél hosszabbat is. A színképtípusuk a pulzáció során változik: maximumban F5–F8, minimumban F5–K5 között. A pulzáció alapján három altípust különböztethetünk meg:

1. klasszikus cefeidák: a csillagban a pulzáció során csak az alpmódus van gerjesztve; a fénygörbe aszimmetrikus: a felszálló ág meredek, a leszálló ág lankásabb (2. ábra),
2. s-cefeidák: az első felharmonikus rezgés van gerjesztve (szinuszos fénygörbe),
3. beat-cefeidák: a csillagban az alpmódus és az első felharmonikus is gerjesztett.

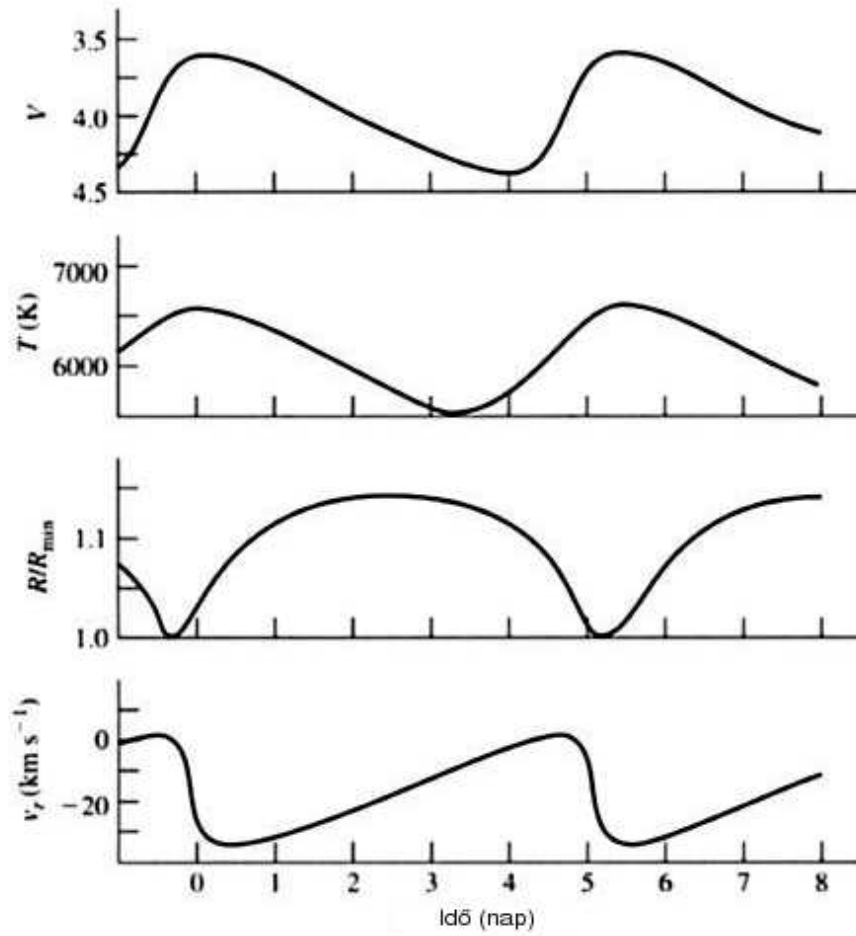
A II. típusú cefeidák között is három altípus különíthető el:

1. BL Herculis csillagok: a periódusuk 1–4 nap közé esik, a fénygörbék aszimmetrikus, színképük F0–G0 között változik. Tömegük kb.  $0,6 M_{\odot}$ , luminozitásuk körülbelül négyszer kisebb a hasonló periódusú klasszikus cefeidákétól. Radiális pulzációt végeznek, alpmódusban;
2. W Virginis csillagok: a periódusuk 6–20 nap közé esik (Wallerstein 2002), a BL Her csillagoknál idősebbek;
3. anomális cefeidák: törpe extragalaxisokban megfigyelhető csillagok, melyek fényesebbek a normál II. populációs csillagoknál, különösen fémszegény, nagyobb tömegű ( $1,3\text{--}1,6 M_{\odot}$ ) objektumok.

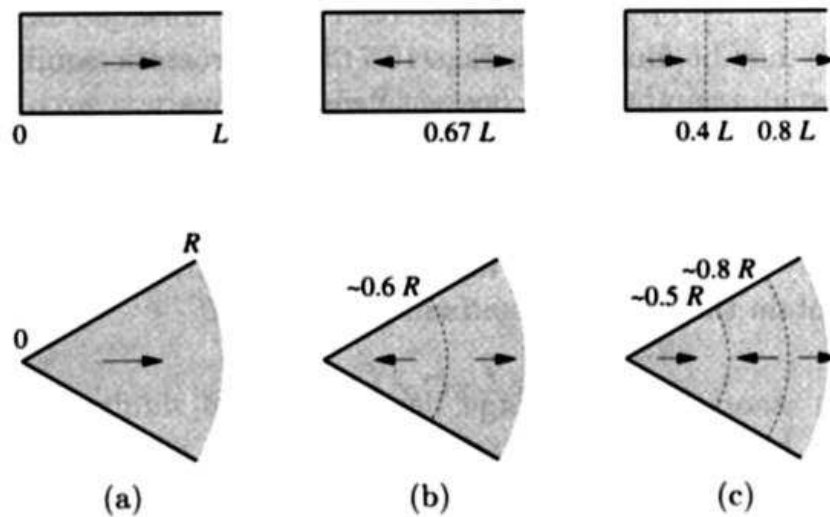
## 1.2. A cefeidák pulzációja

A pulzáció során a csillag változtatja a fényességét, hőmérsékletét, sugarát, radiális sebességét és a spektráltípusát. Az 2. ábrán a  $\delta$  Cephei példáján látszik ezen paraméterek változása.

A fénygörbe és a radiális sebesség görbe egymás tükörképe. A csillag akkor a legfényesebb, amikor a felszíne a leggyorsabban mozog kifelé, miután átment az egyensúlyi sugarán. A klasszikus cefeidák radiálisan pulzálnak. A többségük alpmódusban rezeg, bár a megfigyelésekből látszik, hogy vannak olyanok is, amelyeknél az alpmódus mellett az első felharmonikus is gerjesztve van. A radiális pulzáció leírható úgy, mintha állóhullámok jönnének létre a csillag belsejében, a nyitott végű sípban kialakuló hanghullámokkal analóg módon. A sípban kialakuló csomópontokhoz hasonlóan a csillag légkörében is csomópontok jelennek meg. A síp zárt végét a csillag központjával, míg a nyitott végét a felszínével azonosíthatjuk. Ezt a 3. ábra szemlélteti (Carroll & Ostile, 1996).



2. ábra. A  $\delta$  Cephei megfigyelt paramétereit (Carroll & Ostlie, 1996).



3. ábra.

Állóhullámok sípban és a csillaglégkörben, amikor a) az alapl módus, b) az első felharmonikus, c) a második felharmonikus van gerjesztve (Carroll & Ostlie, 1996).

Az állóhullámokat a  $\kappa$ -mechanizmus táplálja a csillagban, amely röviden a következőképpen írható le (Marik, 1989). A csillag belsejében ionizációs zónák helyezkednek el. A csillag felszínéhez közel található a hidrogén ionizációs zónája, ahol a hidrogén részlegesen ionizált, majd ez alatt található az egyszerűen ionizált hélium (He II) zónája. A pulzáció fenntartásában ez a zóna játssza a fő szerepet. Amikor a csillag rezgése folyamán összenyomott állapotban van, a He II-zóna hélium atomjai a sugárzás hatására még egyszer ionizálódnak, és így a sugárzás e zóna belső energiáját, azaz hőmérsékletét és nyomását növeli. Ez a nyomástöbblet lökést ad a csillaglégkörnek, és a csillag (és vele együtt a He II-zóna is) kitágul. A kisebb sűrűségű He II-zóna hélium atomjai ismét rekombinálódnak, és a sugárzás már nem ionizálja őket, ezért a légkör összehúzódásba kezd. Minden összehúzódáskor tehát a He II-zónában a sugárzás energiájának egy része mechanikai energiává alakul át. A He II-zónára jellemző abszorpciós koefficiens (jelölése:  $\kappa$ ) tehát érzékeny a pulzáció következtében bekövetkező állapotváltozásokra.

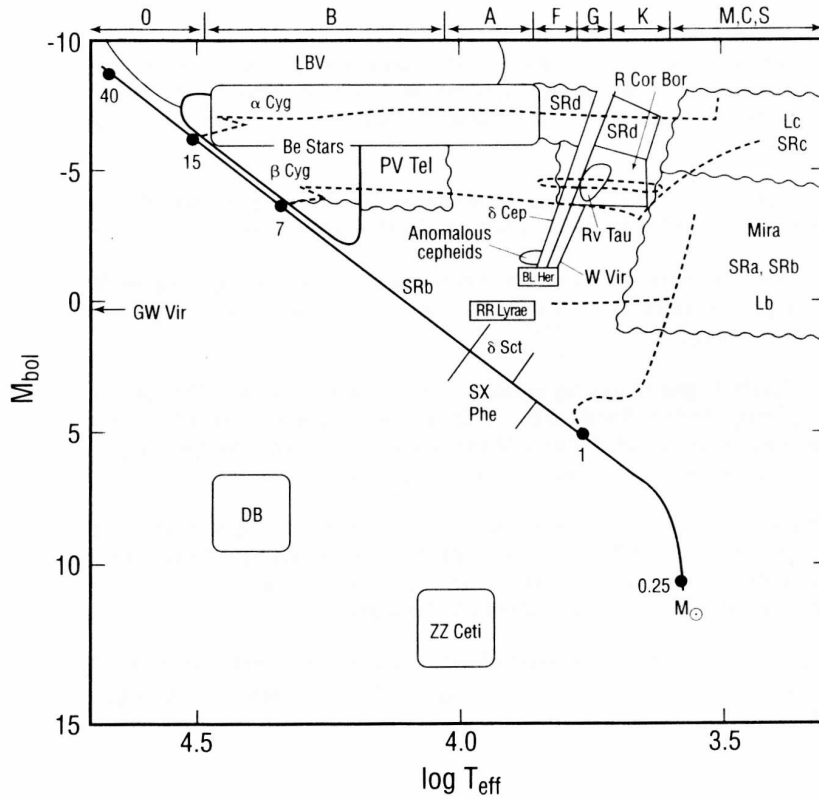
A Hertzsprung–Russell diagramon a cefeidák az instabilitási sávban helyezkednek el (4.ábra).

A fémszegény pulzáló változók instabilitási sávja szélesebb, mint az azonos luminozitású I. típusú cefeidáké. Az eltolódás oka valószínűleg az, hogy ezekben a csillagokban kisebb a konvekció hatékonysága. A II. típusú cefeidák pulzációja kicsit különbözik a fent vázolt  $\kappa$ -mechanizmustól (Gautschi & Saio 1996). Ebben az esetben a He II és H/He I ionizációja táplálja a pulzációt. A II. típusú cefeidák általában alaplómódusban pulzálnak, vagy ritkábban az első felharmonikus gerjesztődik bennük.

A II. típusú cefeidák spektrális jellemzői különböznek az I. típusúaktól (Vinkó et al. 1998). A 10 napnál hosszabb periódusú csillagoknál, mint a W Vir, erős H és He emisszió észlelhető. Ez az emisszió hiányzik, vagy nagyon gyenge a klasszikus cefeidák spektrumában. A 3–10 napos periódusú cefeidák között nem találtak ilyen emissziót. A rövid periódusú, BL Her típusú cefeidáknál (1–3 nap között) szintén H $\alpha$  emisszió mutatható ki. Ezt az emissziót okozhatja anyagledobódás a pulzáció következtében. Ezen kívül a H $\alpha$ -nál megfigyelhető a vonalkettőződés, ami általában a légkörben terjedő lökeshullámra utal (Sasselov & Lester, 1990).

A pulzáló csillagok sosem mutatnak egyfajta radiális sebességet. Az irodalomban többször ki lett hangsúlyozva (Wallerstein et al. 1992; Vinkó et al. 1998; Kiss & Vinkó, 2000), hogy a spektrumban észlelt vonalak nem azonos optikai mélységben keletkeznek a csillag





4. ábra.

Pulzáló változócsillagok a Hertzsprung–Russell-diagramon. A szaggatott vonalakkal a különböző tömegű csillagok evolúciós útvonalai vannak bejelölve (Becker et al. 1998).

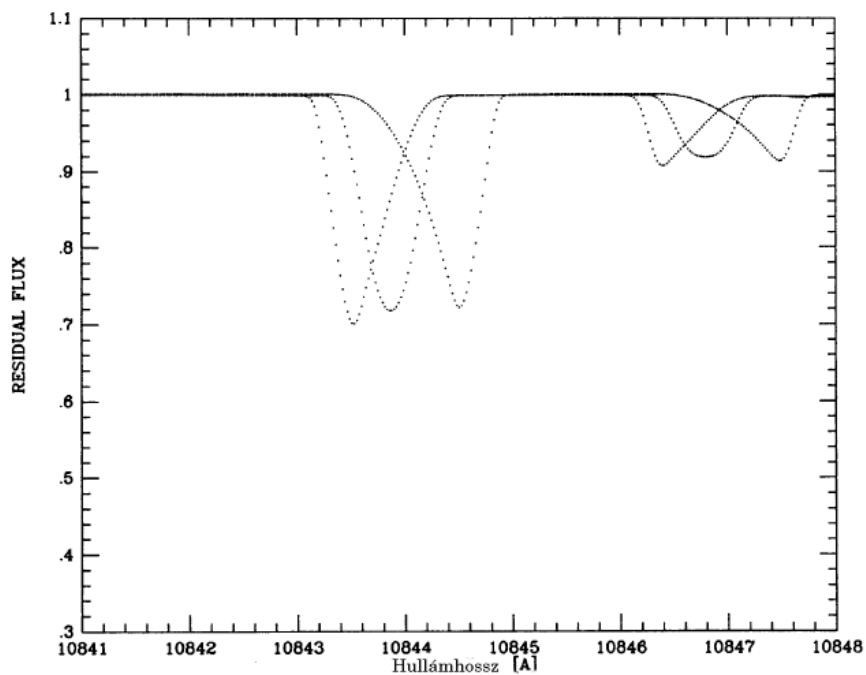
légkörében. Egy pulzáló csillaglégkör különböző rétegeiből származó vonalak Doppler-eltolódása is különböző, tehát a mérhető radiális sebességek is különböznek. Valamilyen feltételt szabva a vonalkeletkezés helyére nézve a csillaglégkör különböző rétegeinek kinematikáját tudjuk vizsgálni.

A pulzáló csillagoknál a vonalprofil aszimmetrikus és még időben változó is. A pulzáció során a csillag közepe mutatja a legnagyobb Doppler eltolódást, míg a szélén az eltolódás nulla (Kiss & Vinkó, 2000). Ezt projekciós effektusnak nevezzük. A mérhető radiális sebesség kisebb a pulzációs radiális sebességnél:

$$v_r = v_0 \frac{(4 - u)}{(6 - 2u)}, \quad (1)$$

ahol  $v_r$  a mért radiális sebesség,  $v_0$  a konstans pulzációs sebesség,  $(4 - u)/(6 - 2u)$  pedig az úgynevezett projekciós faktor,  $u$ -val a szélsőtétedési faktort jelöljük. A projekciós faktort nem tudjuk mérni, értéke modellszámításokból adható meg. Az 5. ábrán bemutatott

aszimmetrikus vonalprofilok modellszámításból származnak (Sasselov & Lester, 1990). A fotoszféra pulzációjánál feltételezték, hogy a különböző pulzációs sebességek vannak jelen (balról jobbra  $v_0$   $-10,0$  km/s és  $+20,0$  km/s között van). A modell légkörben az effektív hőmérséklet  $T_{eff} = 5500$  K és a gravitációs gyorsulás  $\log g = 1,5$  volt.



5. ábra. Aszimmetrikus vonalprofilok pulzáló csillagoknál (Sasselov & Lester, 1990).

A pulzáló csillaglégkör tehát nem homogén mozgást végez, hanem a különböző rétegek elmozdulnak egymáshoz képest. Ezen kívül a légkörben turbulenciák is fellépnek, ami vonalkiszélesedést okoz a spektrumban. Ennek az effektusnak a pontos elméleti leírására még nem került sor.

## 2. Adatfeldolgozás

### 2.1. Radiális sebességek mérése keresztkorrelációs módszerrel

A radiális sebességeket a spektrumvonalak Doppler-eltolódásából tudjuk kimérni. Nem relativisztikus esetben a következő képletet használjuk:

$$\Delta\lambda = \lambda \frac{v_r}{c}, \quad (2)$$

ahol  $\lambda$  a fény hullámhossza,  $v_r$  a radiális sebesség,  $c$  a fénysebesség. A látható tartományban a pulzáló csillagoknál fizikailag megvalósuló radiális sebességek kicsik, tehát a detektoron mérendő  $\Delta\lambda$ -k is kicsik. Ezért a pontos kimérés érdekében nagy felbontású spektrumokat célszerű használni. A radiális sebesség mérés pontosságát úgy is növelhetjük, hogy több vonalat használunk.

A radiális sebességek mérésének egyik gyakran alkalmazott formája a keresztkorrelációs módszer. A keresztkorrelációs módszernél két spektrum átfedését vizsgáljuk a keresztkorrelációs függvény segítségével:

$$c(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g(x-y)dx. \quad (3)$$

A kapott  $c(y)$  függvény maximumhelyét keressük, hisz akkor a legnagyobb az átfedés a két spektrum között. Az  $y$  paraméter azt az eltolást jelenti, amivel az összehasonlító spektrumot a mérendőhöz képest eltoljuk. Az  $x$  a hullámhosszt jelenti, tehát a vizsgált hullámhossztartományra összegezve nézzük az eltolás mértékét. A keresztkorrelációs módszer tehát a két spektrum közti relatív Doppler-eltolódását adja meg. Ennek gyakorlati alkalmazását célszerű úgy végezni, hogy az egyik spektrum egy sebesség standard csillag, amelyiknek ismerjük a radiális sebességét, a másik spektrum pedig az, amelyiken ki szeretnénk mérni a radiális sebességeket. A maximumhoz tartozó hullámhossz eltolódásból ( $\Delta\lambda$ ) következik az összehasonlítóhoz viszonyított relatív radiális sebesség, amit az alábbi képlettel számolhatunk:

$$v_m = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}c. \quad (4)$$

A mért radiális sebességeken el kell végezni a heliocentrikus korrekciót is. A Föld Nap körüli keringése (körülbelül 30 km/s sebességgel) és a Föld forgása éves, illetve napos szisztematikus hibát visz a mért radiális sebességekbe. Kiküszöbölésükre a Nap középpontjára vonatkoztatjuk a méréseinket. Ennek kiszámításához ismernünk kell a megfigyelt objektum pozícióját az égen (égi koordinátáit), a megfigyelő helyét a Földön (az obszervatórium pontos földi koordinátáit), és a megfigyelés pontos idejét. Az így korrigált radiális sebességeket heliocentrikus radiális sebességeknek nevezzük. A dolgozatom további részében a radiális sebességeken a már heliocentrikusan korrigált sebességeket fogom érteni.

Ügyelni kell továbbá arra is, hogy a két spektrumon azonos tartományt vizsgáljunk. A cefeidák a pulzációjuk során változtatják a spektráltípusukat, ezért nem triviális a megfelelő összehasonlító (template) spektrum kiválasztása. Ebben az esetben az összehasonlító spektrumnak olyan spektráltípusúnak kell lennie, mint a cefeidáé a pulzációs periódus legnagyobb részében. Ha ezt nem kezeljük elég körültekintően, akkor fázisfüggő hiba jelentkezik a sebességekben (Vinkó et al. 1998).

## 2.2. Radiális sebesség görbék

Az általam feldolgozott mérések a kanadai David Dunlap Observatory 188 cm-es távcsövével készültek 1997-ben és 1998-ban. A Cassegrain spektrográfhoz használt detektor egy Thomson 1024x1024-es CCD chip volt. Az alkalmazott felbontás  $R = 10000$  volt a  $H\alpha$  vonalnál. A felvett spektrális tartomány tartalmazta a  $H\alpha$  vonalat és néhány fotoszférikus fémvonalat. A méréseket témavezetőm készítette, az én munkám a kiredukált spektrumok kiértékelése volt. A programcsillagokat az 1. táblázatban soroltam fel.

A spektrumok kiértékeléséhez az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility<sup>1</sup>) csillagászati képfeldolgozó programcsomagot használtam. A már kontinuum normált spektrumok alapján meghatároztam a csillagok radiális sebességeit. Ehhez a *noao.rv* programcsomag *fxcor* taszkját használtam, amely az előző fejezetben leírt keresztkorrelációs módszer segítségével határozza meg a radiális sebességeket. A spektrumban a  $H\alpha$  és a fémvonalakat külön-külön analizáltam. Összehasonlítóként minden mérésnél a HD 187691 jelű csillagot használtam, amely az IAU (International Astronomical Union<sup>2</sup>) radiális sebesség standard csillaga ( $v_r = +0,1$  km/s, spektráltípusa F8 V). Illusztrációként az 6. ábrán bemutatom az

---

<sup>1</sup><http://iraf.noao.edu>

<sup>2</sup><http://www.iau.org>

Csillag	Epocha (JD - 2400000)	Periódus (nap)	Spektrál típus
BL Her	46200,316	1,30744	F0–F6
SW Tau	41687,456	1,58358	A7
DQ And	41998,140	3,20056	K–M
BD Cas	41935,547	3.65090	?
V572 Aql	42694,273	3,76809	?
V383 Cyg	47412,822	4,61227	?
KL Aql	47760,858	6,10801	F6–G6
TX Del	42947,033	6,16591	F8
V733 Aql	48874,815	6,17875	F8
BB Her	46620,994	7,50794	G5
IX Cas	47348,390	9,15455	F7
AP Her	49902,000	10,40	F2–G0

1. táblázat. Az észlelt csillagok epochája és periódusa, Vinkó et al. (1998) alapján.

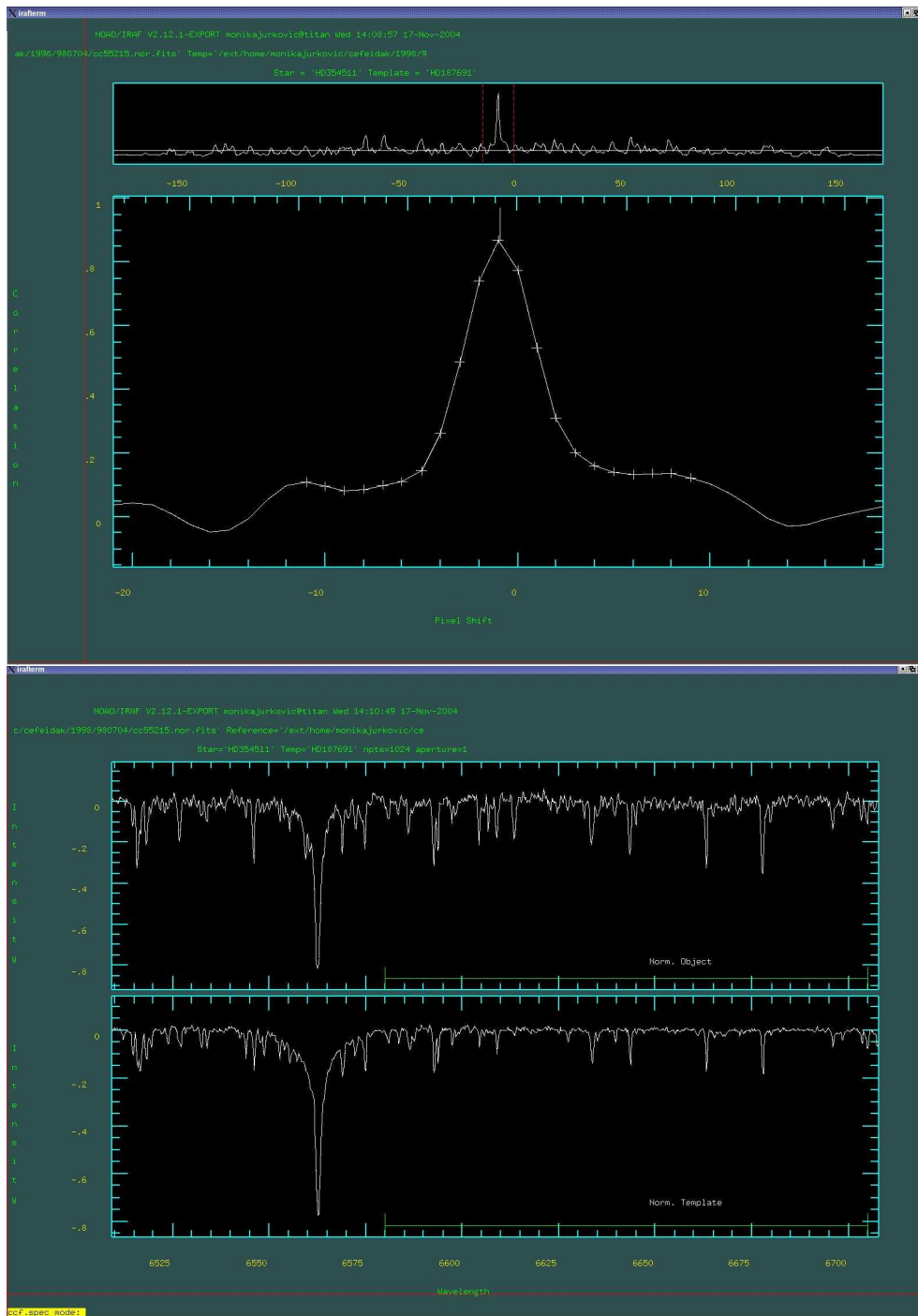
IRAF *fxcor* taszkjával kapott keresztkorrelációs függvényt a KL Aql fémvonalaira, és az analizált spektrumot az összehasonlítóval együtt.

Ezzel vált lehetővé, hogy a II. típusú cefeidák légkörének radiális mozgását vizsgáljam. Ezt az eljárást már többen alkalmazták (Wallerstein et al. 1992; Vinkó et al. 1998; Schmidt et al. 2003a; Schmidt et al. 2003b). Dolgozatomban azt a feltételezést tettem, hogy a H $\alpha$  vonal a csillagok kromoszférájához, a fémvonalak pedig a csillag fotoszférájához közel keletkeznek. Minden kimért spektrumban a H $\alpha$  vonal pozíciójának kereséséhez a 6550–6580 Å közötti tartományt választottam, míg a fémvonalakra a 6580–6705 Å intervallumot használtam.

A kapott radiális sebesség értékeket a két tartományra külön kimérve közös fázisdiagramon ábrázoltam. Ha egy változócsillagot a periódusánál hosszabb ideig figyelünk meg, akkor az észlelésekből sokkal többet tudhatunk meg, ha fázisdiagramot készítünk. A fázis azt jelenti, hogy egy rögzített időponttól kezdődően megnézzük, hányszor ismétlődött meg a periódus az észlelés időintervallumában. Ezt az intervallumot felosztjuk periódusokra. Minden észlelt pontot jellemezhetünk a perióduson belüli helyével. Ha ezt a 0 és 1 közé eső számot ábrázoljuk, megkapjuk a fázisdiagramot. Képlettel kifejezve:

$$\Phi = \frac{t - E}{P} - \text{int}\left(\frac{t - E}{P}\right), \quad (5)$$

ahol  $\Phi$  a fázis,  $E$  az epocha (alapidőpont),  $P$  a periódus, míg az  $\text{int}()$  az egészrész függvényt jelöli. Az általam készített fázisdiagramokon a fázis 0-tól 2-ig van ábrázolva a könnyebb átláthatóság érdekében, ahol a 0–1 tartomány azonos az 1–2 tartománnyal. A jobb fázis-



6. ábra.  
A felső panelen a KL Aql fémvonalaira kapott ccf profil, míg az alsón az analizált spektrumrészlet és az összehasonlító spektrum látható.

Csillag	Régi periódus (nap)	Új periódus (nap)
DQ And	3,20056	3,2006011
BD Cas	3,65090	3,6493229
V572 Aql	3,76809	3,7544679
AP Her	10,4	10,4120273

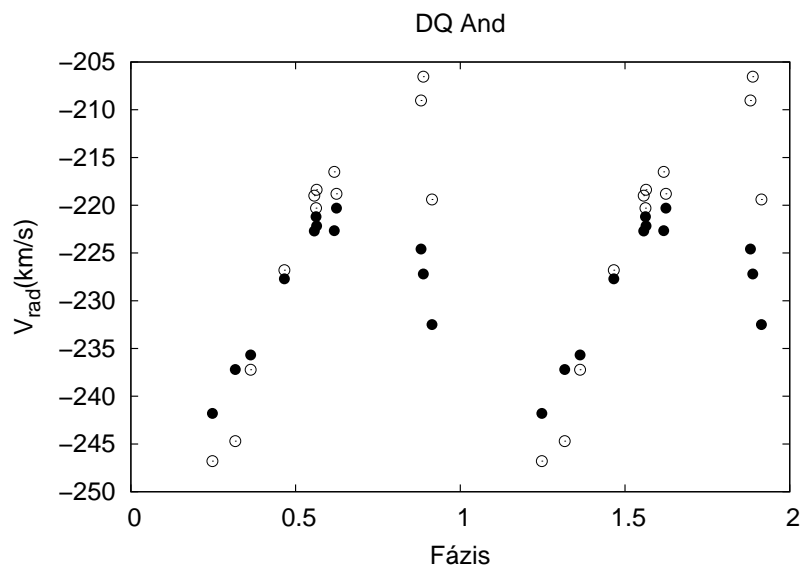
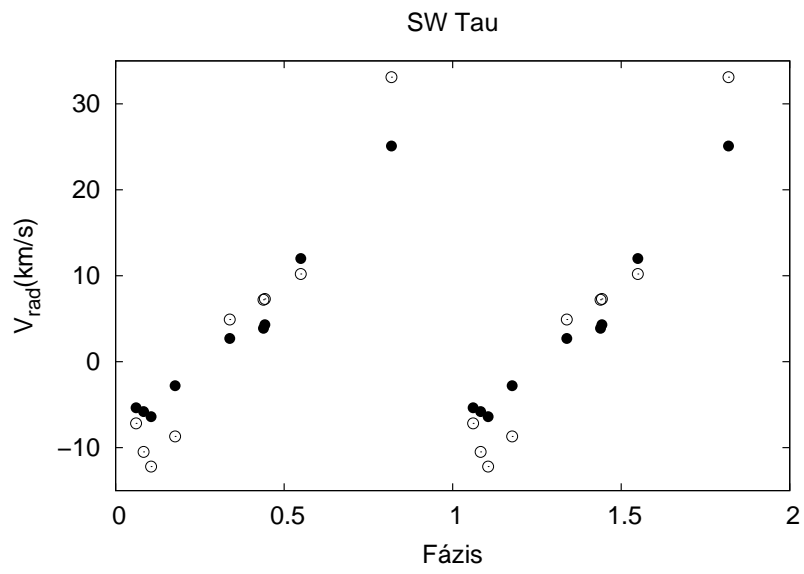
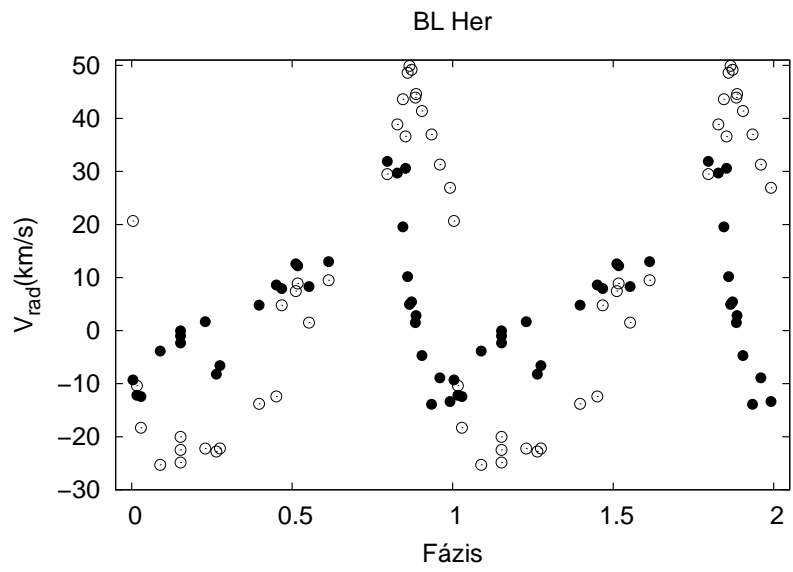
2. táblázat.

Azok a csillagok, amelyeknél szükséges volt pontosítani az ismert periódus értéken.

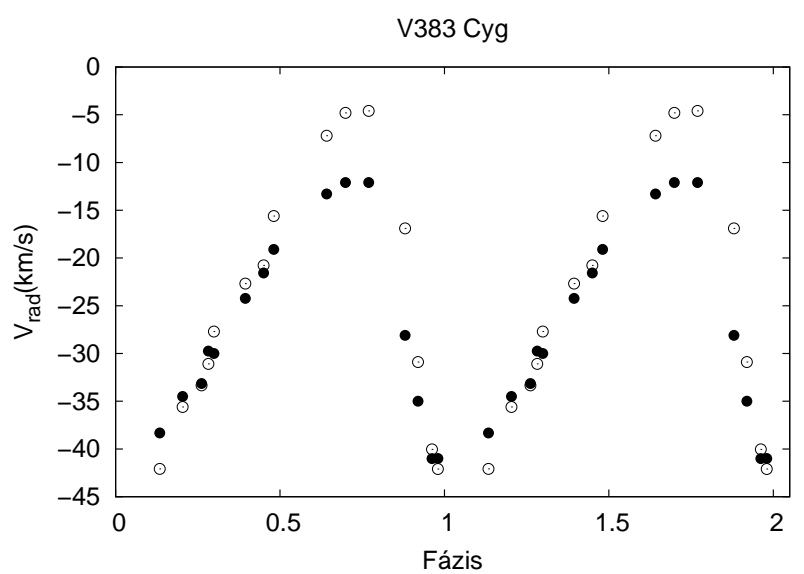
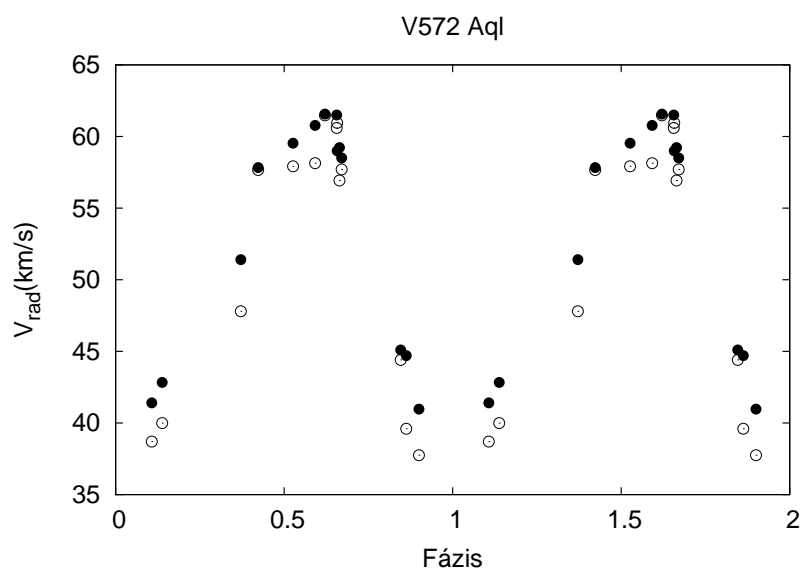
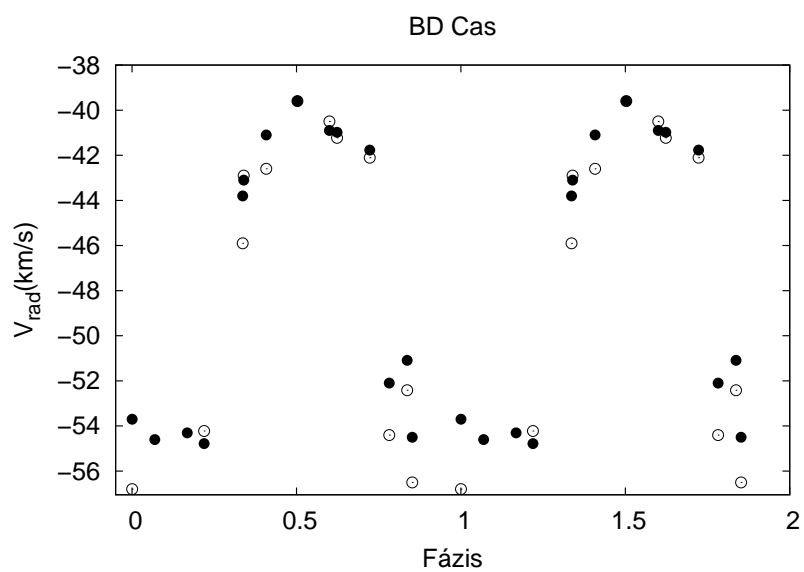
lefedettség érdekében a Vinkó et al.(1998) cikkből is felhasználtam az ott szereplő radiális sebességeket (ezek az adatok 1995-ben készültek ugyanazzal a műszerrel).

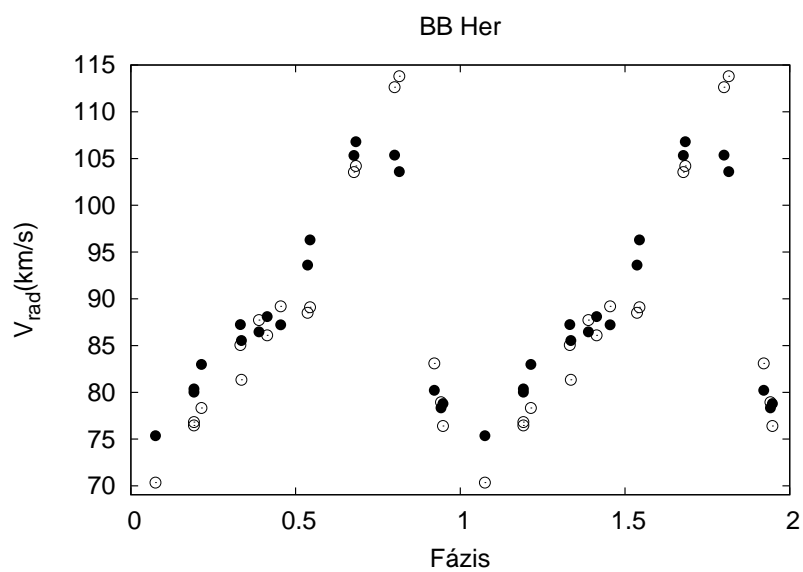
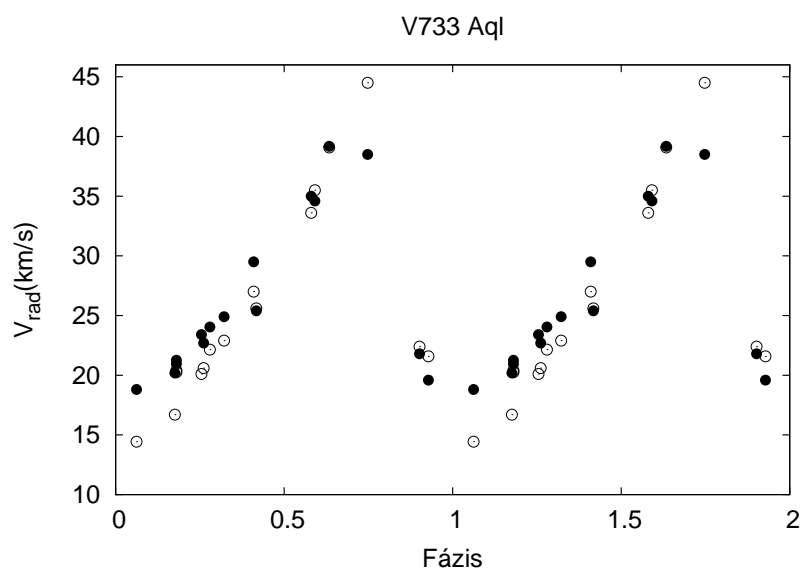
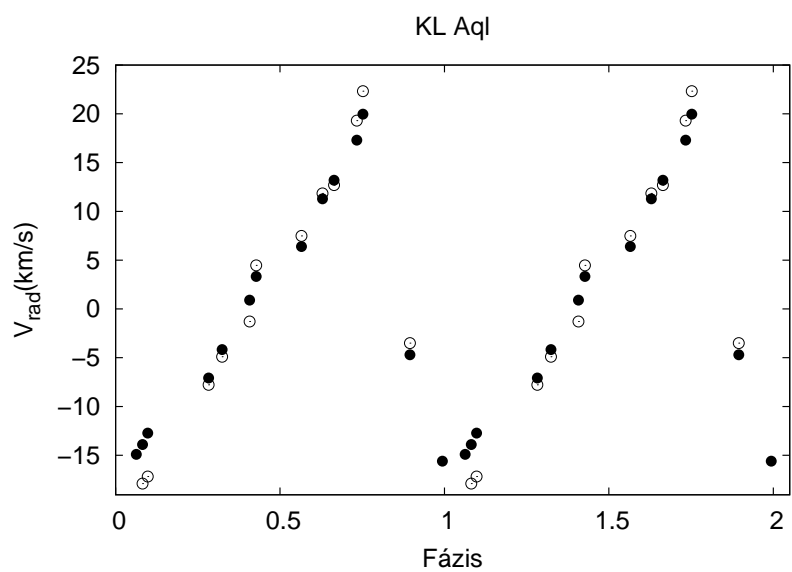
Néhány csillag esetében a periódust pontosítanom kellett, amit IRAF *pdm* taszkjával végeztem el. A *pdm* (Phase Dispersion Minimization) algoritmus egy adott epochával és periódussal elkészíti az adatsor fázisgörbéjét, majd megvizsgálja, hogy az adott görbének mekkora a szórása. Minél kisebb a szórás, annál közelebb van az adott periódus a valódi értékéhez. Ezt sok periódus értékre kiszámolva, a szórás minimalizálásával a valódi periódus meghatározható (Stellingwerf, 1978). A 2. táblázatban a GCVS-ben (General Catalogue of Variable Stars, Kholopov et al. (1985-88)) szereplő, illetve a pontosított periódusokat adtam meg.

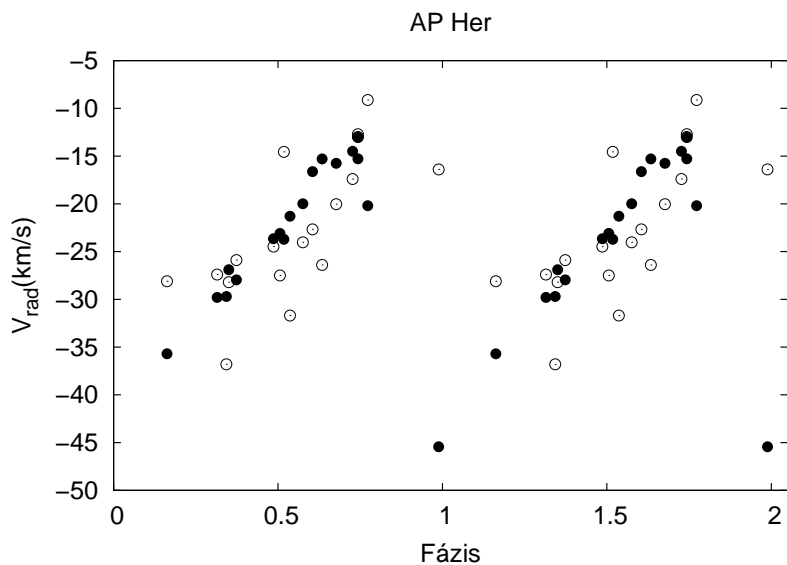
Az általam kimért radiális sebességeket és a Vinkó et al. (1998) cikkből vett adatokat együtt ábrázoltam, tehát az 1995, 1997 és 1998-as méréseket egyesítve kaptam a 7. ábrán levő fázisdiagramokat. A II. típusú cefeidákról ilyen lefedettségű fázisdiagramok még nincsenek publikálva.







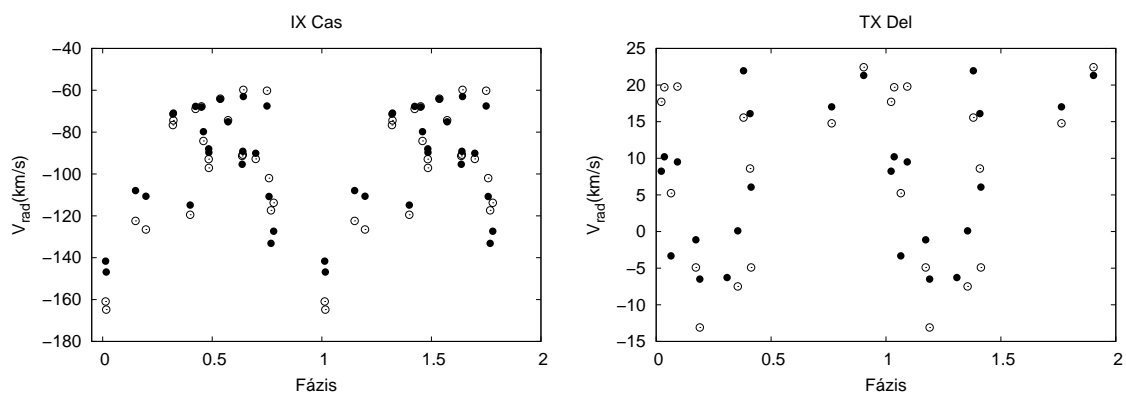




7. ábra.

Radiális sebesség görbék: az üres kör a  $H\alpha$ , a teli kör a fémvonalak radiális sebességeit jelöli.

A programcsillagok között szerepeltek ismert kettőscsillagok: az IX Cas és a TX Del. Ezeknél a csillagoknál a pulzációs sebességekre ráakódik a kettősségből származó komponens is. Illusztrációként (8. ábra) bemutatom, hogy a kettősségből származó mozgás milyen szórást visz a fázisdiagramba.



8. ábra. Kettősök radiális sebesség görbéi.

### 2.3. A radiális sebességek hibája

A radiális sebesség méréseknél meg kell vizsgálni mekkora pontosság érhető el az adott műszerrel. A lehetséges hibaforrások közül a legjelentősebbek a következők:

- A spektroszkóp együtt mozog a távcsővel az éjszaka folyamán, és ennek következtében gravitációs torzulások lépnek fel a műszerben. Ezek a torzulások tized pixel nagyságrendűek. A méréseknél használt műszernél 1 pixel 10 km/s-nak felel meg.
- A keresztkorrelációs módszernél fontos figyelembe venni milyen függvényt illesztünk a  $c(y)$  függvény maximális helyének meghatározására.

A mérés hibájának megállapításához az észlések során 11 darab sebesség standard csillagra is készültek mérések. A 3. táblázatban megadom a csillagok nevét, IAU és CfA<sup>3</sup> (Harvard–Smithsonian Center for Astrophysics; Stefanik & Latham, 1991) standard sebességüket. A sebesség standard olyan csillag, melynek sebessége legalább 0,1–0,2 km/s pontossággal kimért, és az IAU által elfogadott konstans radiális sebesség.

Csillag	IAU (km/s)	CfA (km/s)	Spektrál típus
HD3765	-63,0	-62,80	K2V
HD22484	+27,9	+28,06	F9IV–V
HD136202	+53,5	+54,66	F8IV–V
HD144579	-60,0	-59,50	G8V
HD145001	-9,5	-10,36	G5III
HD154417	-17,4	-16,87	G0V
HD187691	+0,1	+0,02	F8V
HD212943	+54,3	+54,39	K0III–IV
HD213014	-39,7	-39,57	G8
HD222368	+5,3	+5,52	F7V
HD223094	+19,6	+20,22	K5III

3. táblázat.

Az észlelt sebesség standard csillagok IAU és CfA radiális sebességei, valamint spektráltípusaik.

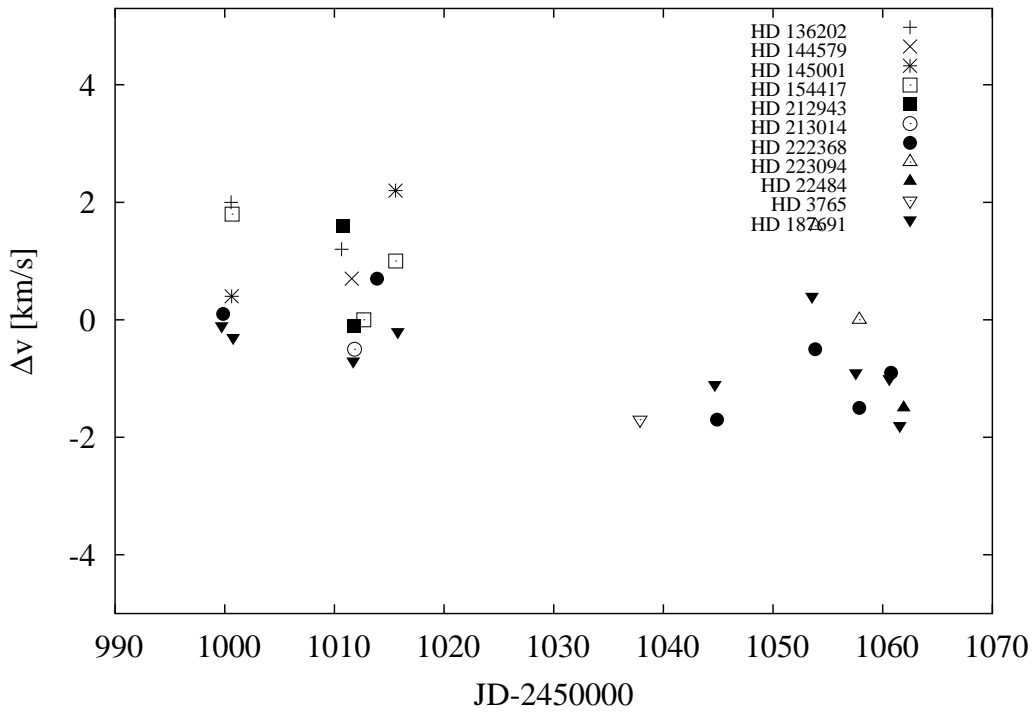
Ezekből a mérésekből meghatároztam a radiális sebességeket az IRAF *fxcor* taszkjával az előzőekben leírt módon. Ebben az esetben is a HD 187691 csillagot használtam összehasonlítónak. Először megvizsgáltam, hogy a keresztkorrelációs módszernél a gauss vagy center1d beépített függvények (amelyekkel a ccf profil maximum helyek megkeresése történik az *fxcor*-ban) mennyire adnak eltérő szórást. Minden mérésnél meghatároztam az általam mért és az elfogadott standard sebesség közötti differenciát. Ezt a 9. és 10. ábrán

<sup>3</sup><http://cfa-www.harvard.edu>

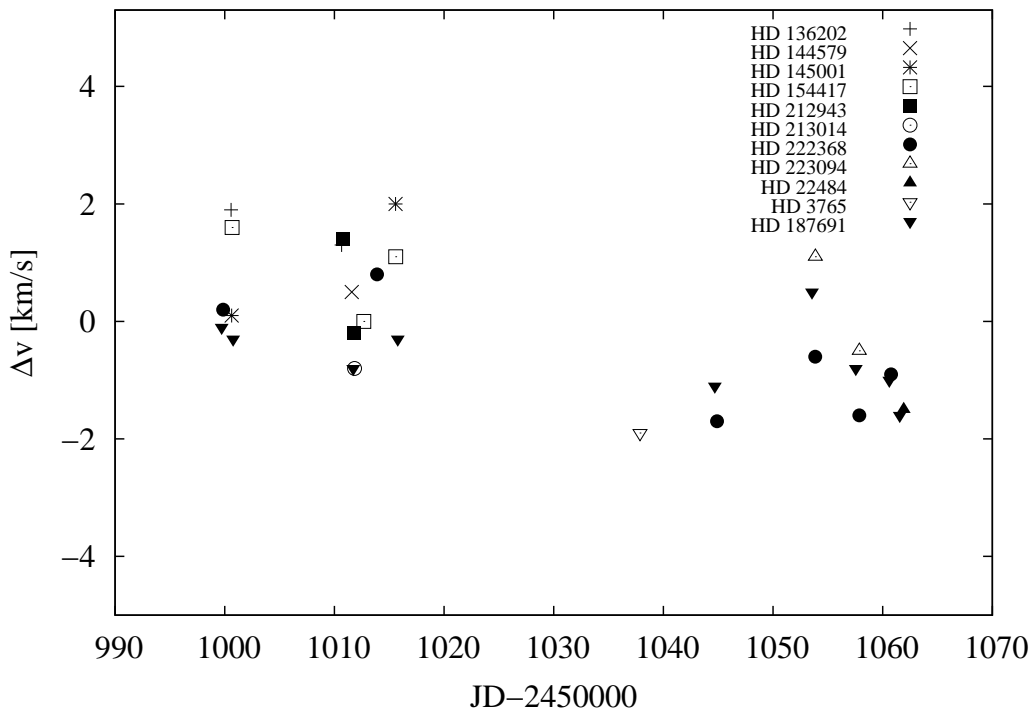
mutatom be. Ideális esetben az összes pont a 0 értéknél lenne. Az ábrákról látszik, hogy a mérést terhelik a műszerből származó hibák, de a center1d algoritmus kisebb szórást ad. A továbbiakban ezt használtam a programcsillagok radiális sebesség méréseinél.

Megvizsgáltam azt is, hogy az IAU és a CfA adatai közötti eltérés mekkora hibát visz a mérésbe. Ezt a 10. és 11. ábrán mutatom be. A kapott szórások:  $\sigma_{IAU} = 1,125$  km/s és  $\sigma_{CfA} = 1,106$  km/s.

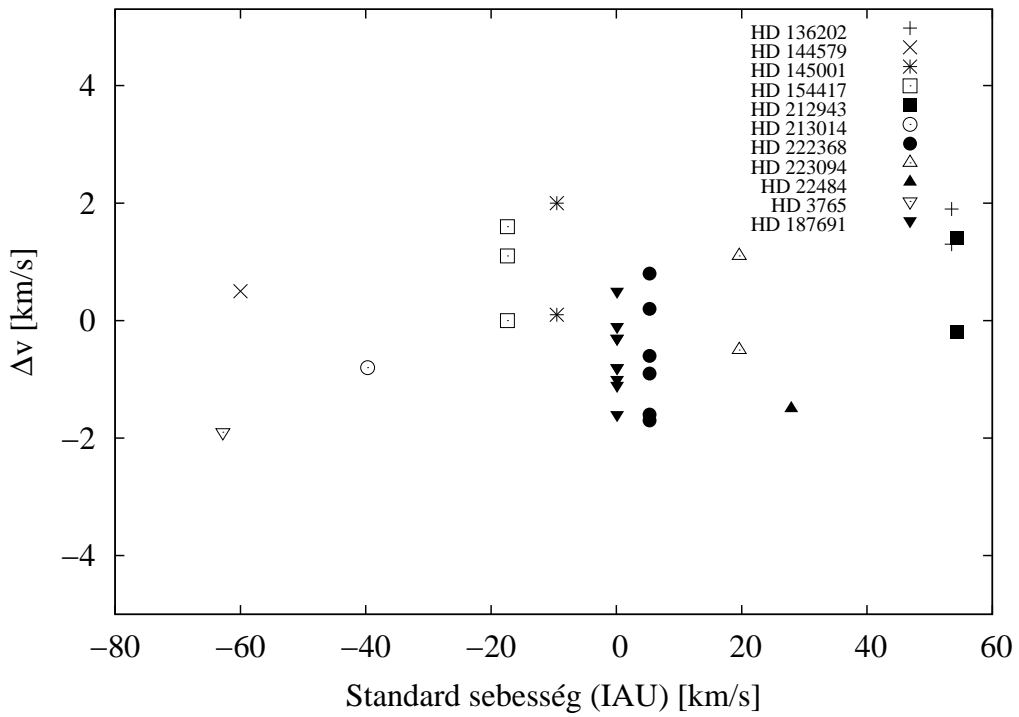
Összesítve azt kaptam, hogy az abszolút sebességmérési pontosság 1,1 és 1,2 km/s között van.



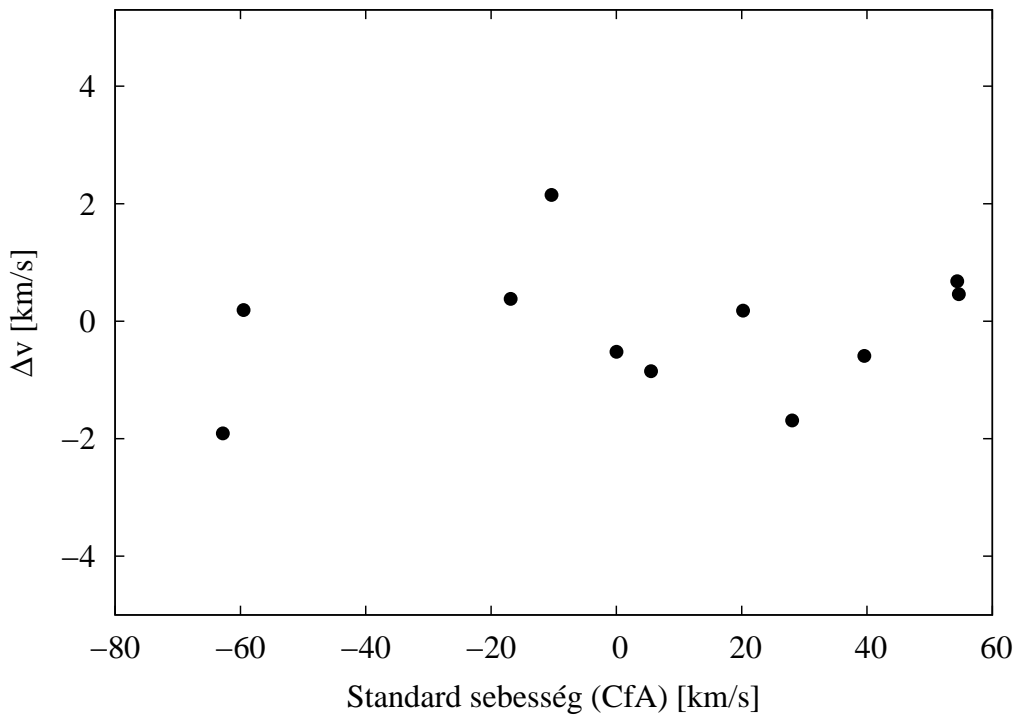
9. ábra. A mért és az ismert IAU sebességek különbsége (gauss).



10. ábra. A mért és az ismert IAU sebességek különbsége (center1d).



11. ábra. A mért radiáliális sebességek eltérése az IAU standardok adataitól



12. ábra.

Az egyes csillagokra átlagolt radiáliális sebességek eltérése a CfA standardok adataitól

### 3. A mérési adatok értelmezése, eredmények

#### 3.1. Mérési adatok értelmezése, sebesség differenciák

A 7. és 8. ábrán látszik, hogy a fotoszféra és a kromoszféra nem egyszerre mozog a pulzáció során. A külső réteg a fotoszférával néha azonos, néha ellentétes fázisban rezeg. Ennek pontosabb vizsgálatára használtam a két réteg sebességének különbségét. A sebességdifferenciát úgy definiáltam, hogy a  $H\alpha$  vonal radiális sebességéből kivontam a fémvonalakét. Ezzel a módszerrel azt vizsgálhatom, hogyan mozognak a rétegek egymáshoz képest. A kettőscsillagok (TX Del, IX Cas) esetén a kettősből származó mozgás mindkét rétegnél ugyanakkora, ezért a sebesség-differenciák számításánál kiesik. A továbbiakban minden programcsillagra kapott fázisdiagramokat egyenként mutatom be és elemzem.

A rétegek mozgásának könnyebb átlátásához Csák Balázs által írt programot használtam fel, amelyet ő a diplomamunkájában használt cefeida csillagok sugárváltozásának kimutatására. A csillag sugarának változását a pulzációs periódus során a radiális sebességgörbe kiintegrálásával kaphatjuk meg:

$$\Delta R(\Phi) = -p(P/R) \int (v_r(\Phi') - v_\gamma) d(\Phi'), \quad (6)$$

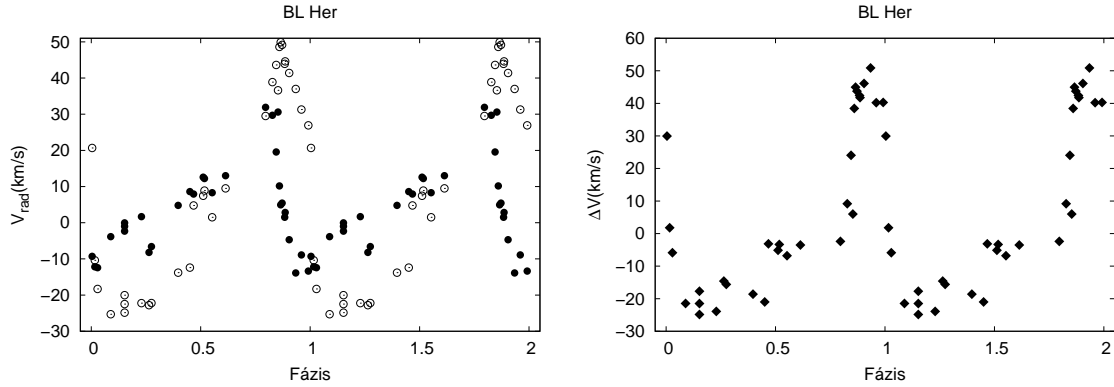
ahol  $P$  a periódus másodpercekben,  $R$  a Nap sugara km-ben,  $v_r$  és  $v_\gamma$  a radiális és átlag sebesség km/s-ben,  $p$  pedig a projekciós faktor ( $p=1,31$ ). A relatív sugárváltozásokat csak azoknál a csillagoknál mutatom be, amelyeknél az adatsorban szereplő mérési pontok elegendőek, hogy a sebesség-differenciák alapján jóslott módon mutassák integrálással a sugárváltozást.

##### *BL Her*

A BL Her spektrumában megfigyelhető egy erős  $H\alpha$  emissziós vonal (14. ábra). Ilyen P Cygni profilú spektrumot eddig csak az AU Peg-nél észleltek (Vinkó et al. 1998). Az AU Peg-nél a cikk szerzői ezt tömegkiáramlással indokolták, amit a csillagot körülvevő porkorong jelenléte is alátámaszt. A BL Her  $H\alpha$  vonalában vonalkettőződés is észlelhető volt. Az irodalomban ezt a jelenséget a csillaglégkörben létrejövő lökeshullámoknak tulajdonítják (Szabados, 1985). A spektrumból látszik, hogy a  $H\alpha$  keletkezési helye folyamatosan változott a pulzáció során, hiszen egy  $H\alpha$  vonalnál kettőződést és erős emissziót is látunk.

##### *SW Tau*





13. ábra. A BL Her radiális sebesség görbéje és sebességdifferencia görbéje.

A hiányos fázisfedettség miatt nem lehet pontosan következtetni a csillaglégkör mozgására (Vinkó et al. 1998). Az 1995-ben észlelt mérési pontsorozatot csak négy mérési ponttal tudtam kiegészíteni 1997-ből. A differenciák sokkal kisebbek, mint a BL Her-nél.

#### *DQ And*

A pulzáció során a fotoszféra kisebb amplitúdóval tágul ki a kromoszférához képest. Először gyorsabban húzódik össze a fotoszféránál, majd hirtelen lelassul. A fázisdiagram első részét további észlelésekkel kellene kiegészíteni. A tágulást a két réteg együtt kezdi, úgy, hogy a kromoszféra nagyobb sebességgel tágul.

#### *BD Cas*

Nem mutat  $H\alpha$  emissziót. A sebességdifferencia görbén jól látszik, hogy a két réteg közötti sebességkülönbség kicsi, tehát a rétegek együtt mozognak a pulzáció során.

#### *V572 Aql*

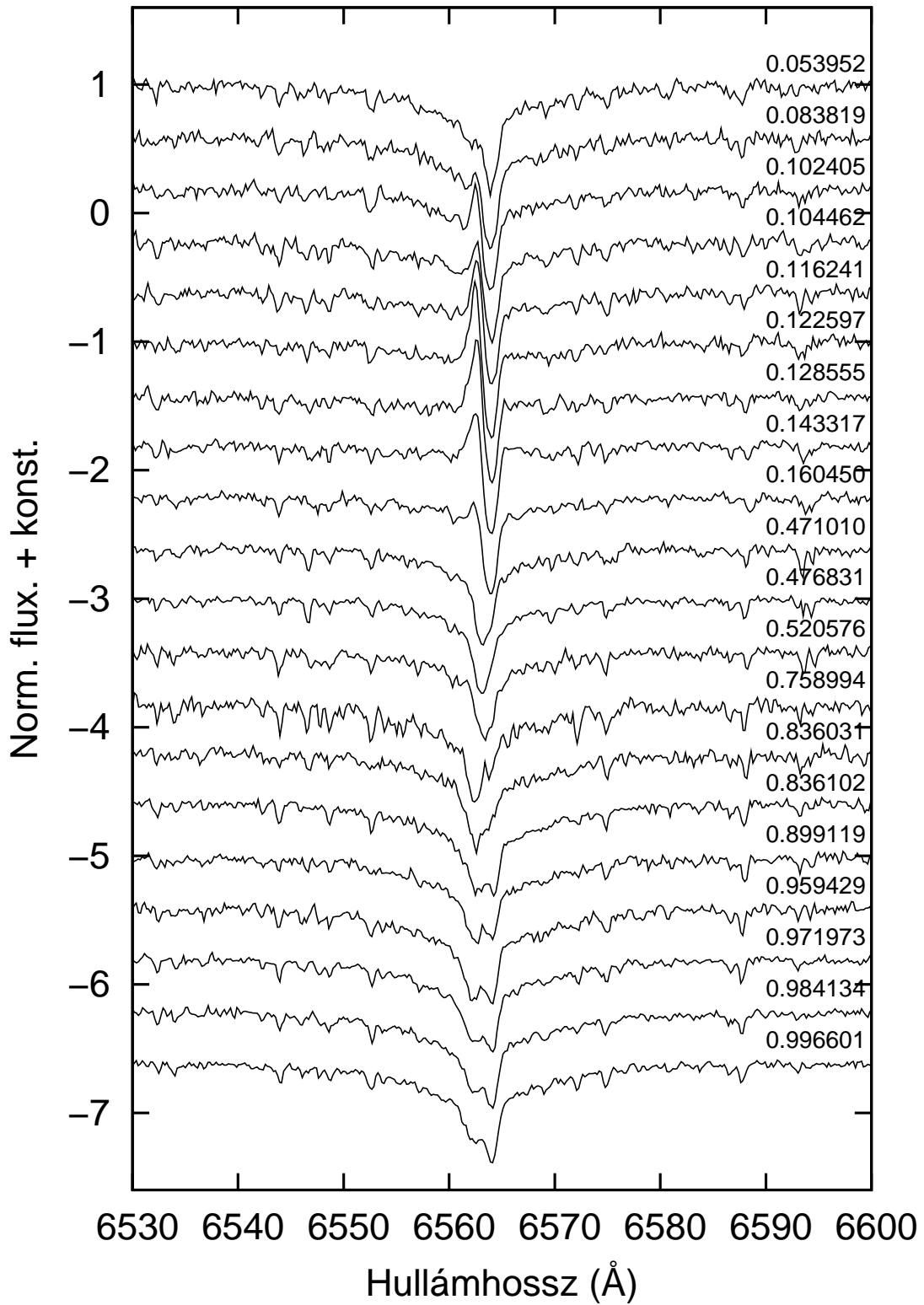
A BD Cas-hez hasonlóan – amelynek periódusa szintén 3 és 4 nap közé esik – ennél a csillagnál sem észlelhető  $H\alpha$  emisszió. A két réteg sebességkülönbsége kicsi, amiből következik, hogy együtt mozognak.

#### *V383 Cyg*

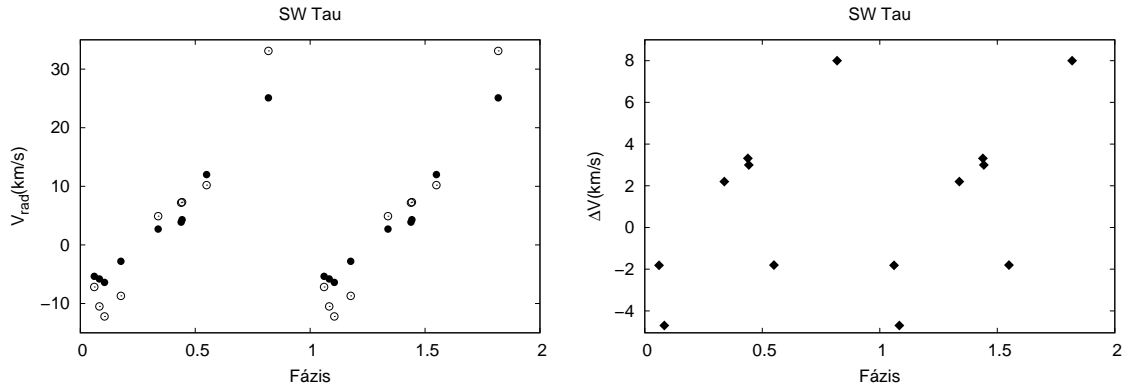
A tágulás során együtt mozognak a rétegek. Összehúzódkor a kromoszféra gyorsabban halad, majd ez hirtelen lelassul, és a táguláskor megint együtt halad a két réteg.

#### *KL Aql*

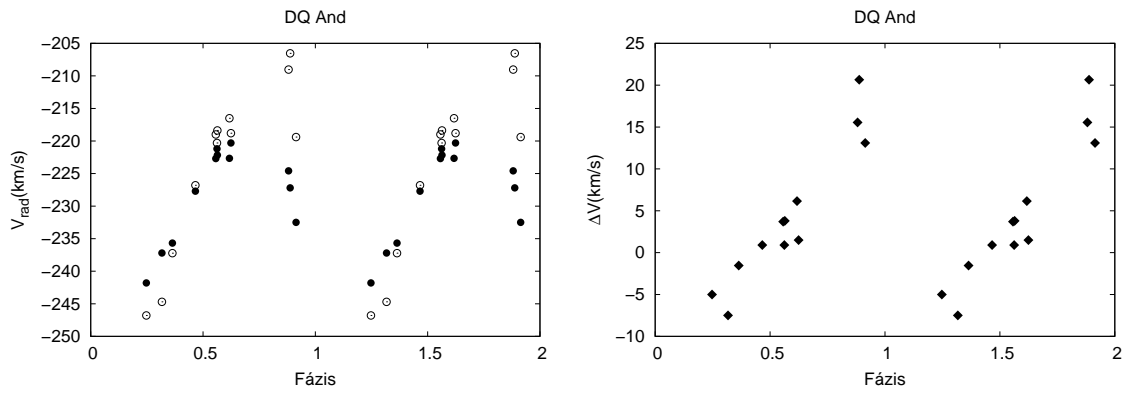
A teljes pulzáció során a két réteg együtt mozog. Balog et al. (1997) felveti annak a lehetőségét, hogy ez egy I. típusú cefeida, hiszen nem mutat sem  $H\alpha$  emissziót, sem vonalkettőződést.



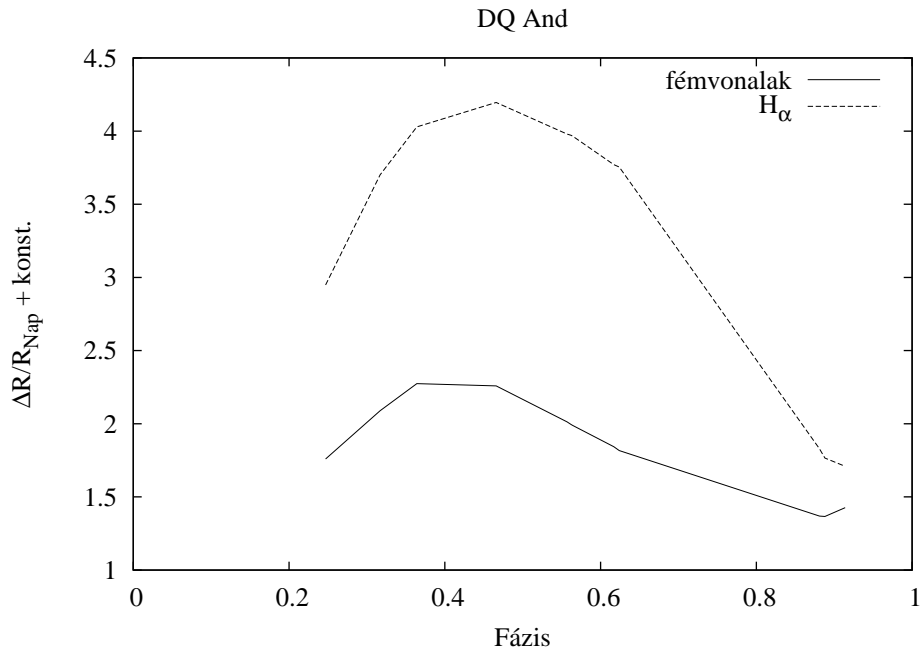
14. ábra. A BL Her észlelt spektruma fázis szerint rendezve.



15. ábra. Az SW Tau radiális sebesség görbéje és sebességdifferencia görbéje.

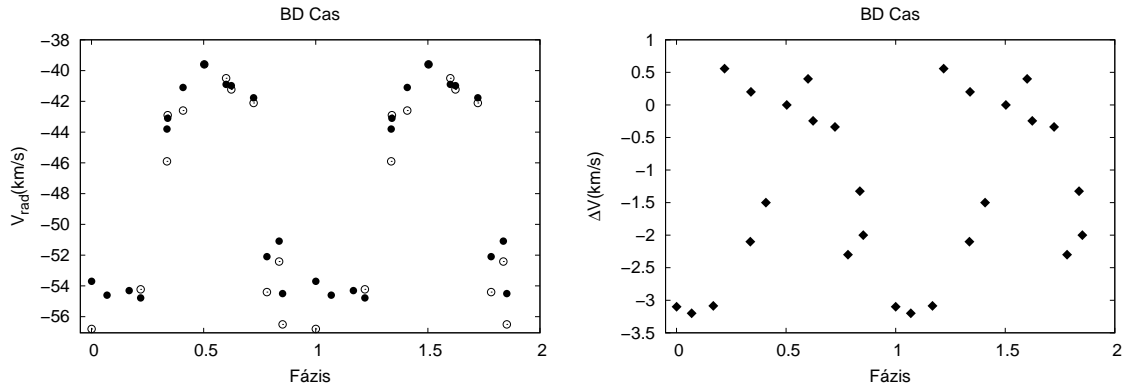


16. ábra. A DQ And radiális sebesség görbéje és sebességdifferencia görbéje.

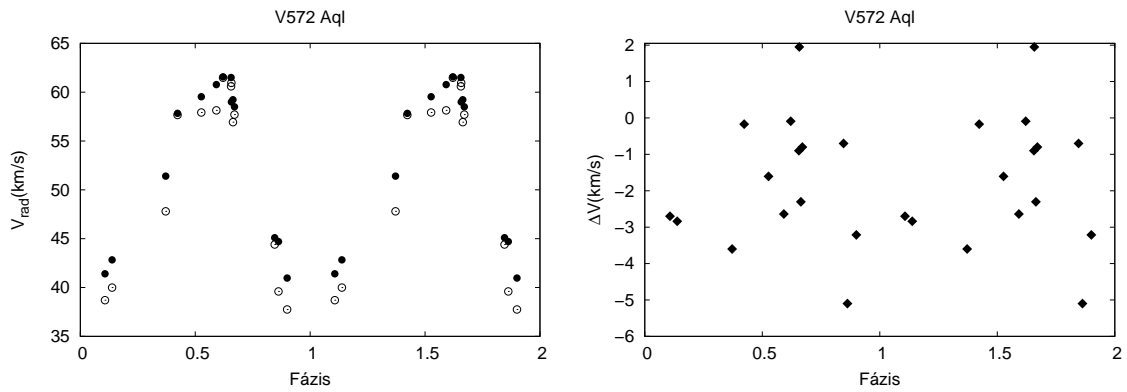


17. ábra.

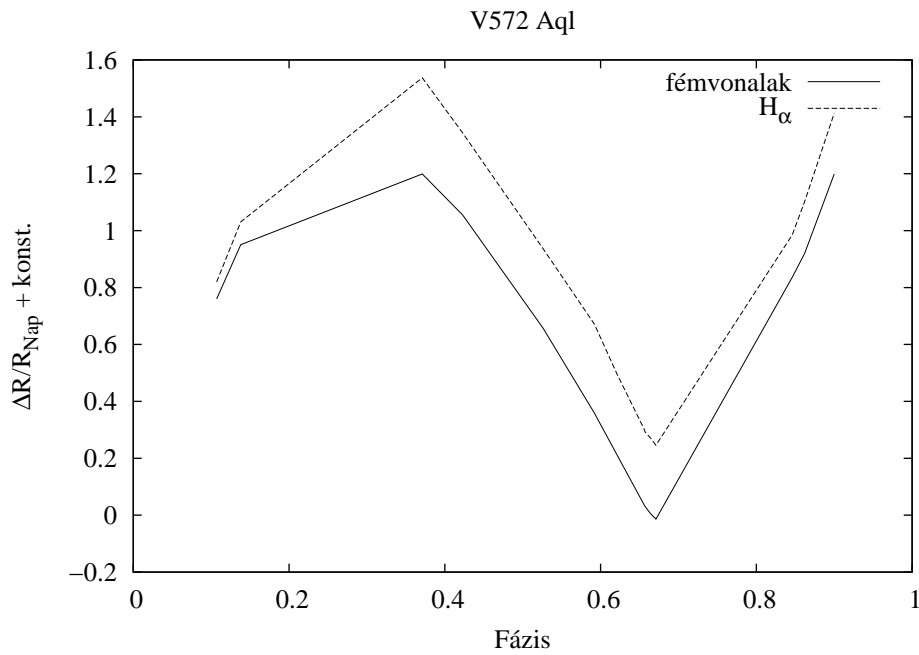
A DQ And  $H_{\alpha}$  és fémvonal sebességeinek integrálásával kapott relatív sugárváltozás.



18. ábra. A BD Cas radiális sebesség görbéje és sebességdifferencia görbéje.

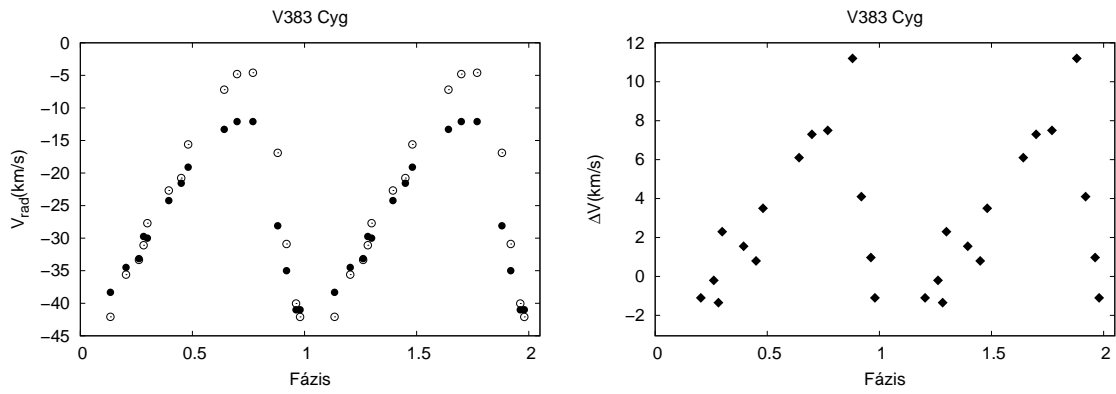


19. ábra. A V572 Aql radiális sebesség görbéje és sebességdifferencia görbéje.

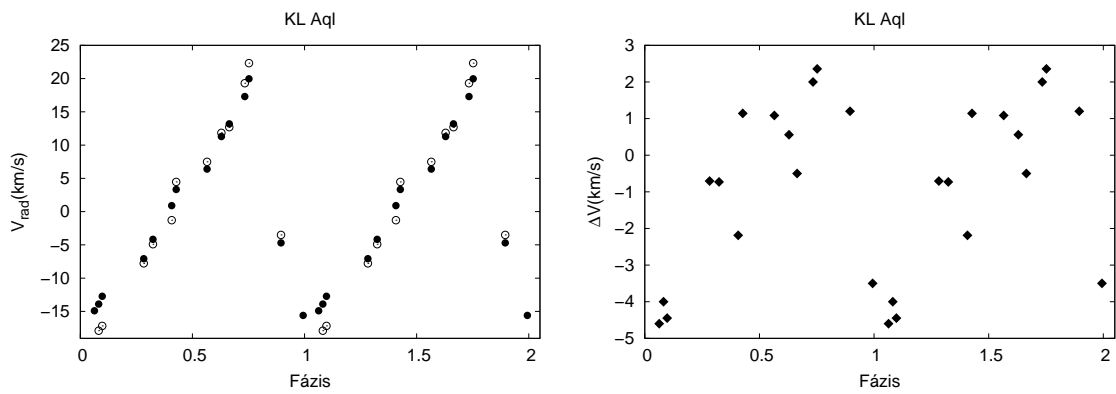


20. ábra.

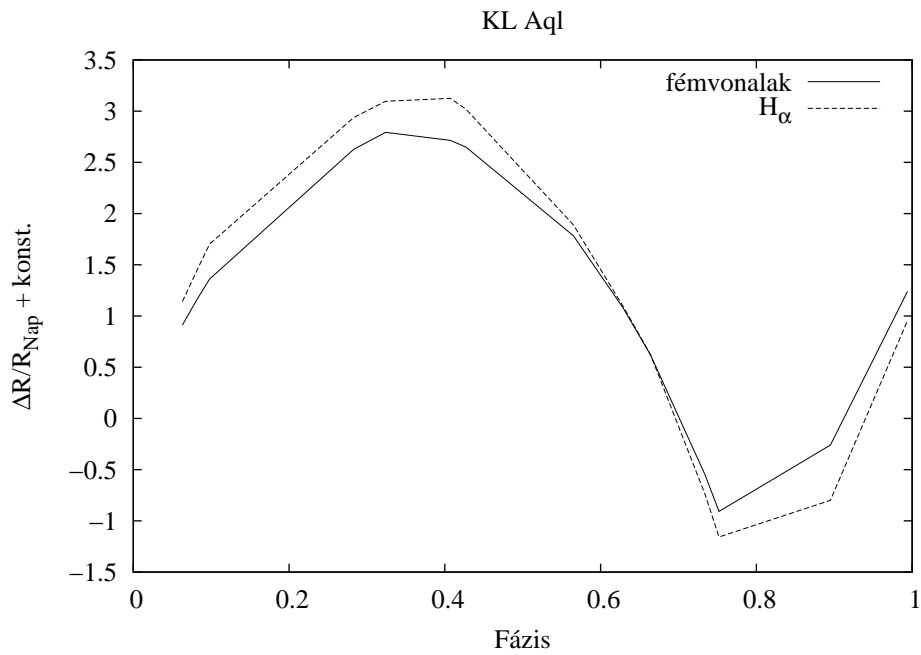
A V572 Aql  $H_{\alpha}$  és fémvonal sebességeinek integrálásával kapott relatív sugárváltozás.



21. ábra. A V383 Cyg radiális sebesség görbéje és sebességdifferencia görbéje.

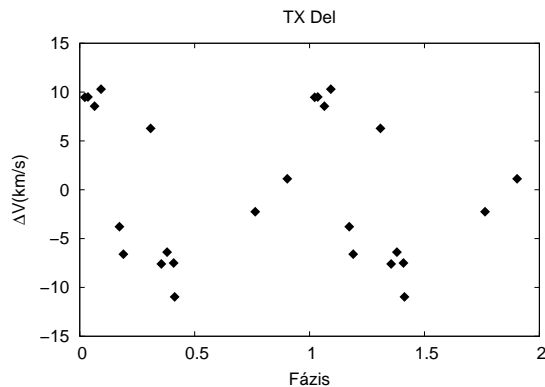


22. ábra. A KL Aql radiális sebesség görbéje és sebességdifferencia görbéje.



23. ábra.

A KL Aql H $\alpha$  és fémvonal sebességeinek integrálásával kapott relatív sugárváltozás.



24. ábra. A TX Del sebességdifferencia görbéje.

### *TX Del*

Kettős rendszer lévén itt csak a sebességdifferencia görbét mutatom be. Nagyon érdekes, hogy a sebességdifferencia görbe elején a BL Her-hez hasonlóan pozitív értéket olvashatunk le. Ez arra utalhat, hogy a fotoszféra egy lökeshullámmal megdobja a kromoszférát.

### *V733 Aql*

A Vinkó et al. (1998) alapján ez a csillag egy I. típusú cefeida. Erre a megállapításra utal az is, hogy a két réteg maximális radiális sebesség különbsége kicsi.

### *BB Her*

Mind a fotoszféra, mind a kromoszféra ugyanattól a fázistól kezdve tágul, de a fotoszféra előbb kezdi meg összehúzódását. Az újabb tágulás elejére a két réteg megint ugyanabban a fázisból indul.

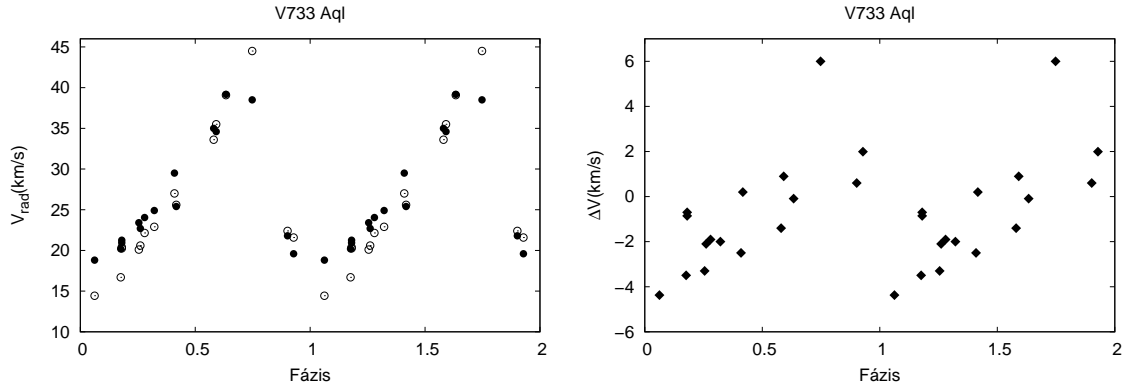
### *IX Cas*

Mivel kettős rendszerről van szó, ezért csak sebességdifferencia görbét mutatom be. A sebességdifferencia görbe nagyon hasonló a DQ And-nál látotthoz.

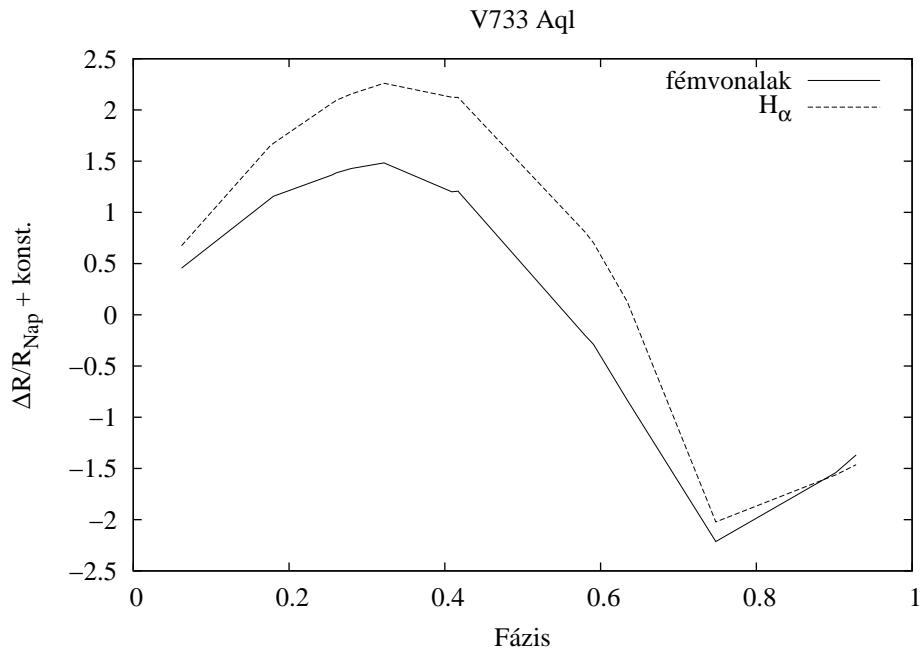
### *AP Her*

A csillag periódusa nagyon változó (Szabados, 1985), ezért nehéz fázisdiagramot készíteni róla. A kromoszféra egy kicsi fáziskésésben van a fotoszférához képest az összehúzódás során, mintha a fotoszféra után menne ugyanabban az ütemben. A fotoszféra összehúzódása nagyon hirtelen felgyorsul, míg a kromoszféráé nem. A fotoszféra ezután hirtelen elkezd tágulni, maga előtt tolvaa a kromoszférát.

Eddigiekben az egyes csillagok légkörében történő mozgást írtam le a két réteg radiális sebességének segítségével. Fontos tisztázni, hogy a H $\alpha$  vonal keletkezési helye és a réteg

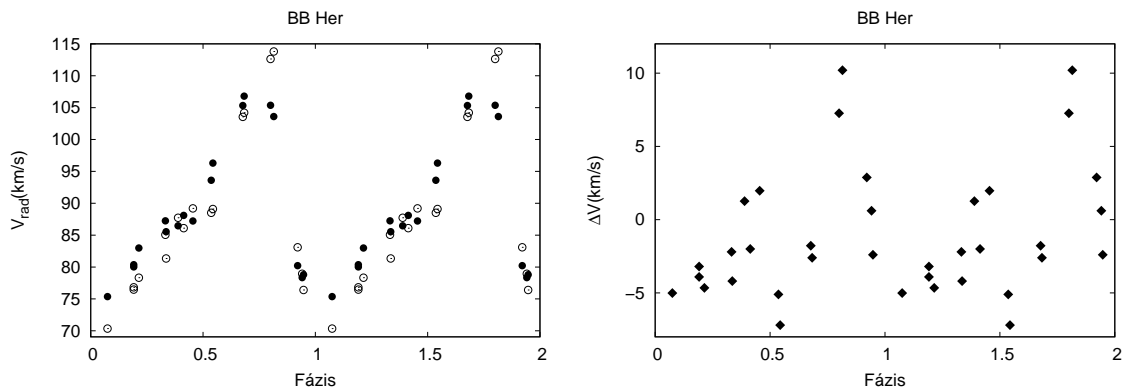


25. ábra. A V733 Aql radiális sebesség görbéje és sebességdifferencia görbéje.

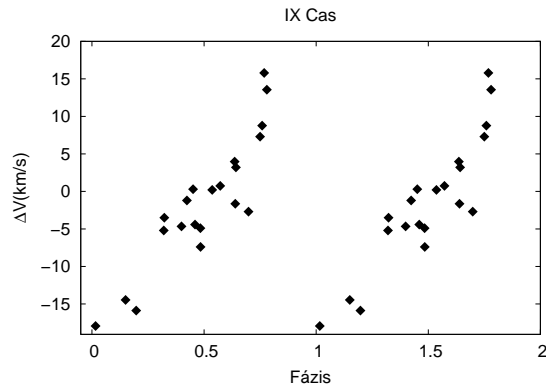


26. ábra.

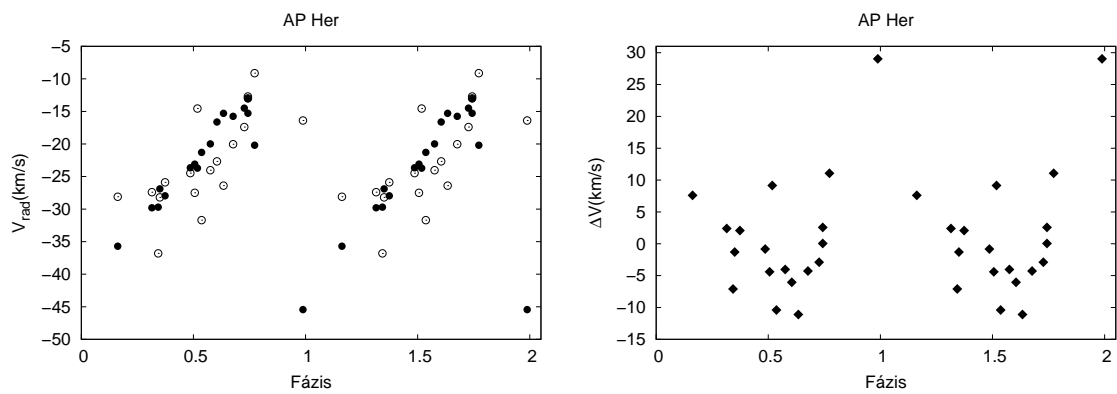
A V733 Aql  $H\alpha$  és fémvonalak radiális sebességei integrálásával kapott relatív sugár változás.



27. ábra. A BB Her radiális sebesség görbéje és sebességdifferencia görbéje.



28. ábra. Az IX Cas sebességdifferencia görbéje.



29. ábra. Az AP Her radiális sebesség görbéje és sebességdifferencia görbéje.



Csillag	Periódus (nap)	K (km/s)	$\Delta V$ (km/s)
BL Her	1,30744	42	50,8
SW Tau	1,58358	35	8,0
DQ And	3,2006011	35	20,6
BD Cas	3,6493229	18	3,2
V572 Aql	3,7544679	23	5,1
V383 Cyg	4,61227	30	11,2
KL Aql	6,10801	36	4,6
TX Del	6,17	30	10,9
V733 Aql	6,17875	24	6,0
BB Her	7,50794	32	10,2
IX Cas	9,15	20	19,2
AP Her	10,4120273	25	29,0
<b>W Vir</b>	<b>17,27</b>	<b>55</b>	<b>50,0</b>
<b><math>\kappa</math> Pav</b>	<b>9,08</b>	<b>25</b>	<b>40,0</b>

4. táblázat. A II. típusú cefeidák adatai.

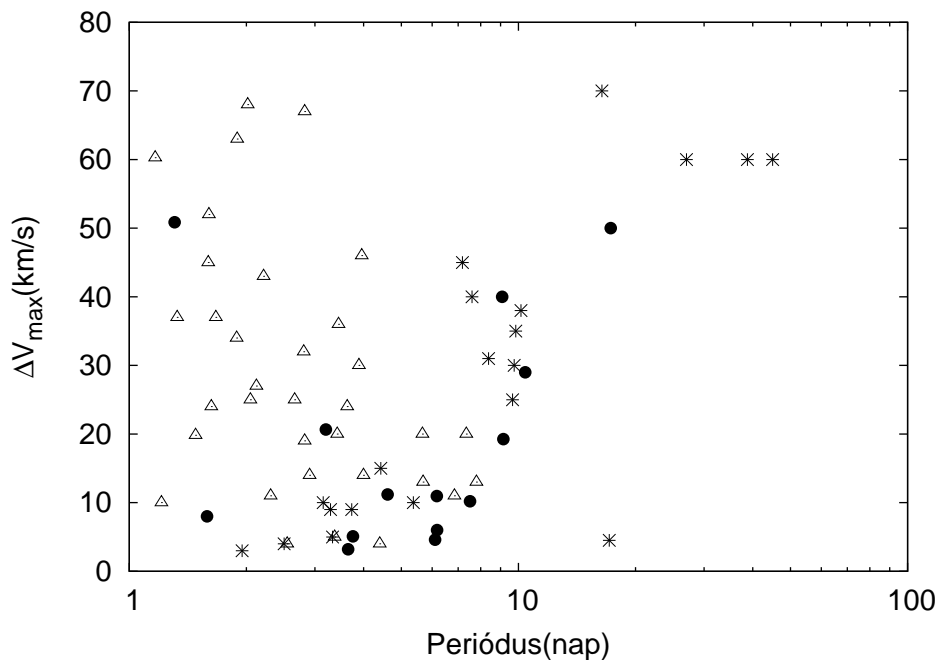
sűrűsége is változhat a pulzáció során. Egy egyszerű kinematikai modell nem elegendő ennek a mechanizmusnak a leírására (Kiss & Vinkó, 2000).

Saját eredményeimet az irodalmi adatokkal egyesítve megnéztem, hogyan függ a maximális radiális sebesség különbség ( $\Delta v_{max}$ ) a periódustól (30. ábra) és a radiális sebesség görbe legnagyobb amplitúdójától (31. ábra). A  $\Delta v_{max}$  értéket úgy határoztam meg, hogy megkerestem az általam kimért H $\alpha$  és fémvonalak (abszolút értékben) maximális radiális sebesség különbség értékét. A 4. táblázatban a programcsillagok általam mért maximális radiális sebesség különbségei szerepelnek, és a Vinkó et al. (1998) cikkből származó amplitúdó adatok. A vastagon bejelölt W Vir és  $\kappa$  Pav csillagok nem voltak programcsillagok, viszont ezek is a II. típusú cefeidákhoz tartoznak, és van róluk publikált amplitúdó adat, ezért itt soroltam fel őket. Az 5. táblázatban a Vinkó et al. (1998) által az irodalomból összegyűjtött K és  $\Delta v_{max}$  adatok szerepelnek I. típusú cefeidákra. A 6. táblázat pedig a Schmidt et al. (2003a, 2003b) cikkben közölt  $\Delta v_{max}$  mérési adatok szerepelnek további II. típusú cefeidákra. Megjegyezném, hogy a cikkben szereplő csillagokról kevés mérés lett készítve, ezért a kapott  $\Delta v_{max}$  értékek a tényleges maximális differenciáknál valószínűleg kisebbek.

A 30. ábra jól mutatja, hogy a 4 napnál kisebb periódusú II. típusú cefeidáknál nagy szórást mutatkozik a  $\Delta v_{max}$  értékeiben. A Schmidt et al. (2003a) cikk ennek a jelenségnek a magyarázatára a csillaglégkörben létrejövő, terjedő, majd visszaverődő hullámokat adja meg. Ezt többen modellezték is (Christy, 1968; Carson et al., 1981) és így megmagyarázhatók a

Csillag	Periódus (nap)	K (km/s)	$\Delta V$ (km/s)
SU Cas	1,95	18	3
DT Cyg	2,50	13	4
SZ Tau	3,15	15	10
HD32456	3,29	27	9
V1334 Cyg	3,33	10	5
RT Aur	3,73	35	9
T Vul	4,43	30	15
$\delta$ Cep	5,37	38	10
$\eta$ Aql	7,18	39	45
W Sgr	7,60	39	40
S Sge	8,38	37	31
S Mus	9,66	31	25
S Nor	9,75	34	30
$\beta$ Dor	9,84	33	35
$\zeta$ Gem	10,15	27	38
X Cyg	16,39	55	70
Y Oph	17,12	17	4,5
T Mon	27,02	47	60
U Car	38,77	47	60
SV Vul	45,00	44	60

5. táblázat. A I. típusú cefeidák adatai (Vinkó et al. 1998).

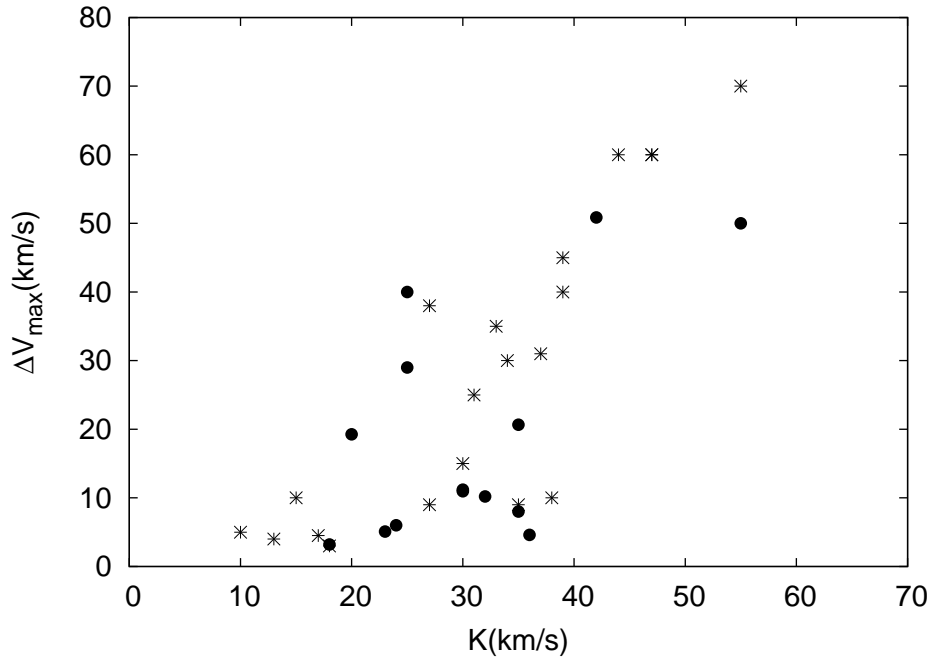


30. ábra.

A maximális radiális sebesség különbség a periódus függvényében. A teli körök jelentik a 4. táblázatban levő II. típusú cefeidákat, csillagokkal az 5. táblázatbeli I. típusú cefeidákat jelöltem, és a háromszögekkel ábrázoltam a 6. táblázatban szereplő Schmidt et al. (2003a, 2003b) által mért II. típusú cefeidákat.

Csillag	Periódus (nap)	$\Delta V$ (km/s)
BF Ser	1,165439	60,28
CE Her	1,2094357	10
VX Cap	1,3275583	37
MQ Aql	1,48078	19,82
V745 Oph	1,59558	45
NW Lyr	1,601179	52
V971 Aql	1,62453	24
VZ Aql	1,66828	37
V714 Cyg	1,88744	34
V439 Oph	1,89301	63
V477 Oph	2,01567	68
EK Del	2,04686	25
FF Aur	2,12056	27
UY Eri	2,21331	43
BB Gem	2,308207	11
CN CMa	2,54612	4
EW Aur	2,65950	25
V351 Cep	2,80652	32
V565 Oph	2,82194	67
NY Cas	2,82313	19
BC Aql	2,90513	14
GL Cyg	3,370693	5
FT Mon	3,4218	20
EF Tau	3,4482	36
BF Cas	3,63045	24
QY Cyg	3,89188	30
FM Del	3,9552	46
AM Cam	3,997197	14
V912 Aql	4,4005	4
CZ Cas	5,66438	20
V394 Cep	5,689	13
AP Cas	6,8470	11
IT Cep	7,34744	20
CD Cas	7,80089	13

6. táblázat. További II. típusú cefeidák (Schmidt et al. 2003a, 2003b).



31. ábra.

A maximális radiális sebesség különbség az amplitúdó függvényében. A teli körök jelentik a 4. táblázatban levő II. típusú cefeidákat, csillagokkal az 5. táblázatbeli I. típusú cefeidákat jelöltem.

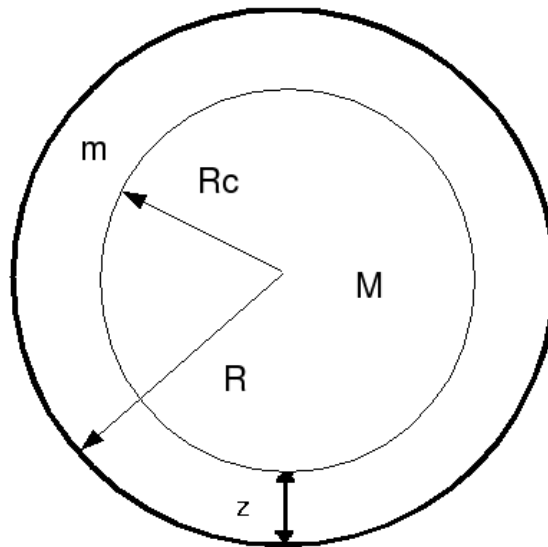
fény- és radiális sebességgörbékben jelentkező „púpok”. Azt váránk, hogy a sebesség különbségek függenek a sebesség amplitúdótól, hisz az erősebb pulzációnak nagyobb sebesség különbségeket kellene létrehozni a külső régiókban (Vinkó et al., 1998). Erre a tartományra ezt nem tudtam leellenőrizni, hisz további mérésekre lenne szükség. A következő elkülönülő tartomány a 4 napnál nagyobb és 8 napnál kisebb periódusú csillagoké. Ebben a régióban mind az I-es, mind a II. típusú cefeidák kicsi radiális sebesség különbségeket mutatnak. A két vizsgált csillagréteg ebben a szakaszban együtt mozog. A 10 nap körüli periódusoknál hirtelen ugrás látszik. Ez a periódus az alpmódus és az első felharmonikus 2:1 rezonanciájához van közel, és a sebesség-differenciák hirtelen felerősödése is valószínűleg ezzel van kapcsolatban. Az Y Oph az a csillag, amely 17,12 napos periódusnál eltér az összes többi csillagtól. I. típusú cefeidának van besorolva, mégis kérdéses, hogy tényleg ide tartozik-e.

A 31. ábra a Vinkó et al. (1998) cikk 20. ábrájának felel meg, viszont az általam közölt ábra a több mérési pontnak köszönhetően pontosabb képet ad. A maximális radiális sebesség különbségek növekednek a sebesség amplitúdójával. Ha a fotoszférát és a kromoszférát a fémvonalak és a H $\alpha$  vonalak keletkezési helyének tekintjük, akkor ezekenek a rétegeknek a mozgása modellezhető egy csatolt oszcillátorként.

### 3.2. Modellszámítások

A következő fejezetben a 30. és 31. ábrán bemutatott eredményeket egy egyszerű elméleti modell az ún. egyzóna modell segítségével interpretálom. Ezt a modellt a csillagpulzáció leírására dolgozta ki Stellingwerf (1972). Az egyzóna modell alapesetben úgy épül fel, hogy a csillag belsejét egy stabil belső rétegre és egy vékony külső héjra osztják, majd a megfelelő fizikai közelítéseket kihasználva a vékony héj pulzációját vizsgálják.

Az egyzóna modell alkalmazásánál feltettem, hogy a vizsgált belső réteg a csillag fotoszférájának, míg a vékony héj a kromoszféranak felel meg. Az alsó rétegről azt feltételeztem, hogy nem stabil, hanem szinuszos rezgést végez. A 32. ábrán az egyzóna modell sematikus vázlatát látható. Az ábrán  $M$  a csillag tömege,  $m$  a vékony héj tömege ( $m \ll M$ , a héj sűrűsége homogén),  $z = R - R_c$  a héj vastagsága,  $R$  a külső réteg sugara,  $R_c$  a belső réteg sugara. Az alsó réteg  $R_0$  egyensúlyi sugár körül szinuszos rezgést végez.



32. ábra. Az egyzóna modell.

A két réteg úgy mozog, mint egy csatolt oszcillátorokból álló rendszer. Az  $R$  sugárnál a rendszert leíró mozgásegyenlet és a szinuszos rezgést végző belső réteg mozgásegyenlete:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -4\pi R^2 \frac{dP}{dm} - \frac{GM_0}{R^2} \quad (7)$$

$$R_c = R_0 + A \sin(\omega t), \quad (8)$$

ahol  $2\pi/\omega$  a rezgés periódusa.

Egyensúlyi konfigurációban érvényes a hidrosztatikai egyensúly egyenlete:

$$4\pi R_0^2 \frac{dP_0}{dm} = -\frac{GM_0}{R_0^2}, \quad (9)$$

ahol  $P_0$  a nyomás egyensúlyi értéke,  $M_0$  az össztömeg. A  $dP_0/dm$  közelítőleg  $-P_0/m$ . Ezt behelyettesítve kapjuk:

$$\frac{P_0}{m} = \frac{1}{4\pi} \frac{GM_0}{R_0^4}. \quad (10)$$

Az így kapott mozgásegyenlet:

$$\frac{d^2R}{dt^2} = \frac{GM}{R_0^2} \left( \left( \frac{R}{R_0} \right)^2 \frac{P}{P_0} - \left( \frac{R_0}{R} \right)^2 \right). \quad (11)$$

Legyen a relatív sugár az egyensúlyi sugárhoz képest  $x = R/R_0$ . Ezzel a mozgásegyenlet:

$$R_0 \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{GM_0}{R_0^2} \left( x^2 \frac{P}{P_0} - \frac{1}{x^2} \right). \quad (12)$$

Adiabatikus rezgést nézve a  $P/P_0 = (\rho/\rho_0)^\gamma$ . A térfogatokat egyszerűen kiszámíthatjuk:

$$V = \frac{4\pi}{3} (R^3 - R_c^3) \quad (13)$$

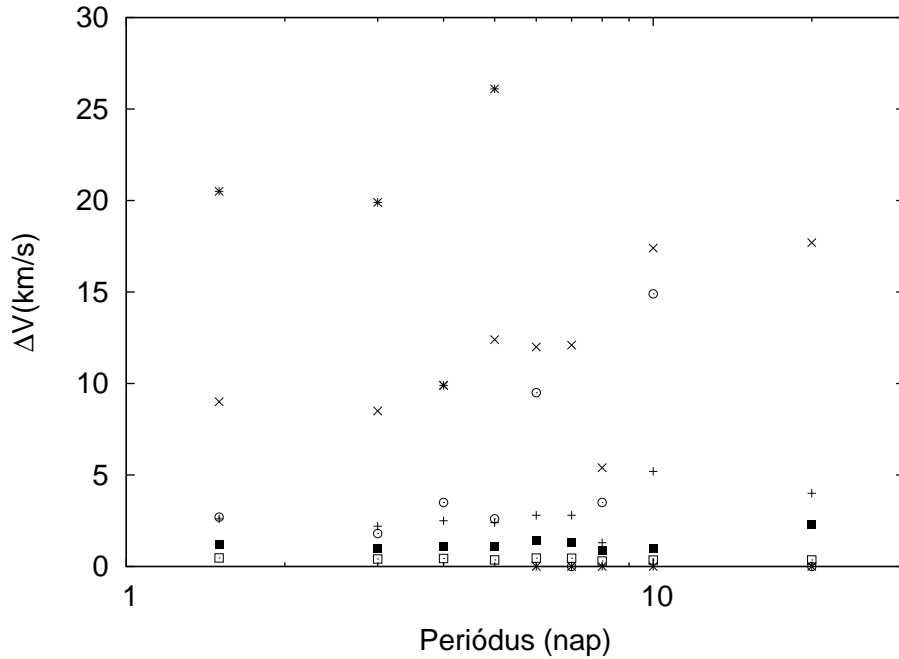
$$V_0 = \frac{4\pi}{3} (R_0^3 - R_c^3). \quad (14)$$

Ezzel a sűrűségek arányára a következőt kapjuk:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{1 - z_0^3}{x^3 - z_0^3}, \quad (15)$$

ahol a héj vastagsága  $z_0 = R_c/R_0$ .

A mozgásegyenletet a témavezetőm által korábban írt program segítségével, különböző bemenő paraméterekkel futattam. Változtattam a héj vastagságát, az alsó réteg rezgési amplitúdóját és a rezgés periódusát. Ahhoz, hogy a modellel fizikailag értelmezhető konfigurációkat vizsgáljak, a periódushoz Balog et al. (1997) alapján csillagsugarakat társítottam. Ezen kívül a tömegeket is változtattam, hiszen ezek összfüggő mennyiségek. A II. típusú cefeidák-

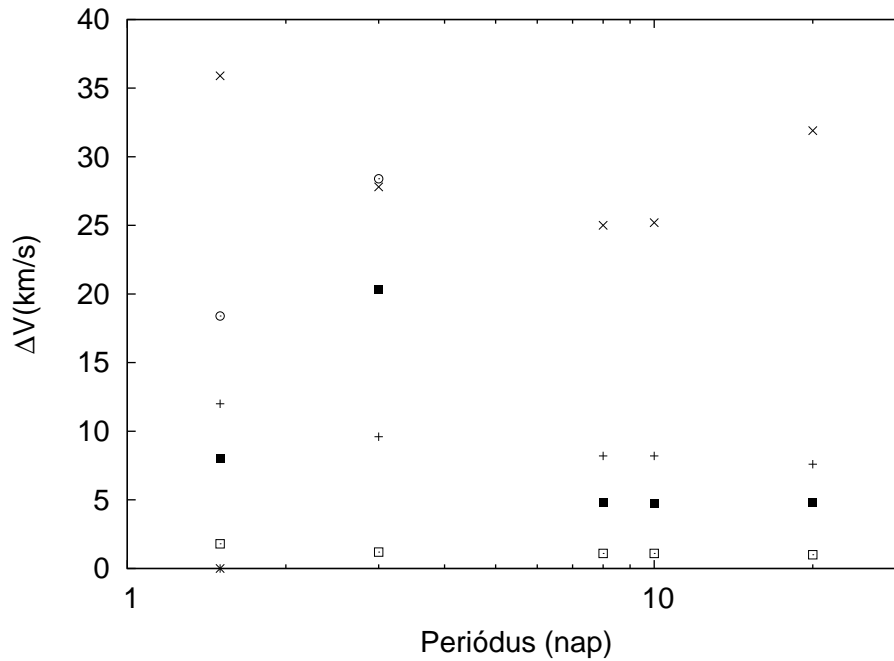


33. ábra. A modellszámítás a II. típusú cefeidákra.

nál a tömegeket egységesen  $1 M_{\odot}$ -nek választottam, míg az I. típusú cefeidáknál a Gieren et al. (1990) cikkben közölt periódus–sugár–tömeg reláció (Fricke, Stobie & Strittmatter, 1972) alapján becsültem meg. A modellből kapott rétegsebességeket kivontam egymásból, ahogyan a megfigyelésekből kapott ábránál is tettem.

A 33. ábrán a II. típusú cefeidákra modellszámításból kapott maximális sebességkülönbséget ábrázoltam a választott periódusok függvényében. A különböző szimbólumok különböző rétegvastagságnak és kezdő amplitúdónak felelnek meg. Az 1 és 3 nap közé eső tartományban nagy szórást mutat a maximális sebesség különbség, bár a megfigyelésekhez képest elmarad a szórás nagysága, a tendencia mégis észlelhető. A 3 napnál hosszabb és 8 napnál rövidebb periódusoknál a maximális sebesség adatok a megfigyelésekkel összhangban állnak. A 8 napnál hosszabb periódusoknál sokkal kevesebb adatot tudtam felhasználni, mert a modellszámítások során a 40 km/s-os kezdő amplitúdójú modellek instabilak voltak.

A 34. ábra az I. típusú cefeidákra mutatja a modellszámításból kapott eredményeket. A nagyon rövid periódusú tartományra a modell csak korlátozottan érvényes, hiszen ilyen rövid periódusú I. típusú cefeidák nem figyelhetőek meg. A 10 napnál hosszabb periódusnál rezonancia jelenségek lépnek fel a csillaglégkörben, amit az egyzóna modell nem tud megfelelően kezelni. Mivel dolgozatomban a II. típusú cefeidákra koncentráltam, ezért az I. típusú cefeidák modellszámításainál sokkal kevesebb periódusnál számoltam maximális



34. ábra. A modellszámítás az I. típusú cefeidákra.

sebesség különbségeket.

A 33. és 34. ábrán közölt modellszámítási eredményeket a megfigyelésekkel (30. ábra) összevetve, megállapíthatjuk, hogy a  $P=3-8$  nap közötti tartományon a modellek körülbelül hasonló nagyságú sebesség-differenciákat adnak, mint a megfigyelések. A  $P < 3$  nap tartományban viszont a megfigyelt sebesség-differenciák jóval nagyobbak, mint a számoltak. A 10 napnál hosszabb periódusoknál a modellek egy része instabilitást mutatott, ez többé-kevésbé összhangban van a megfigyelt, hirtelen növekvő sebesség-különbségekkel.



# Összefoglalás

A dolgozatomban megvizsgáltam 12 darab II. típusú cefeida csillag légköreinek mozgását különböző helyeken keletkező spektrumvonalak Doppler-eltolódása alapján. Eredményeim:

- A programcsillagok radiális sebesség görbéit pontosítottam újabb mérésekkel, így az irodalomban még nem publikált lefedettségű fázisdiagramokat mutattam be.
- A H $\alpha$  vonal és néhány fémvonal Doppler-eltolódásának különbségéből elkészítettem a csillagok sebességdifferencia görbéit.
- A csillaglégkörben mérhető sebesség-differenciák korrelálnak a rezgés periódusával illetve a radiális sebesség görbe amplitúdójával. Ezen diagramok alapján az I. és II. típusú cefeidák hasonló mozgásokat mutatnak, ezért a két típus elkülönítése a légköruk kinematikája alapján kevésbé lehetséges, mint azt korábban az irodalomban gondolták.
- Egy egyszerű pulzációs modell alkalmazásával a  $P=3-8$  nap periódusstartományban sikerült a megfigyelésekhez körülbelül hasonló sebesség-differenciákat számolnom. Az ettől eltérő periódusoknál a modell kevésbé írta le a megfigyelt nagy sebesség-differenciákat.

## **Köszönetnyilvánítás**

Megköszönöm témavezetőmnek, Dr. Vinkó Józsefnek a téma bemutatását és a munkám során kapott szakmai útmutatásokat. Köszönettel tartozom szüleimnek, Jurkovic Vinkónak és Jurkovic Ilonkának, hogy folyamatosan biztattak, valamint Csák Baláznak a hasznos szakmai tanácsokért.

## Nyilatkozat

Alulírott Jurkovic Mónika, csillagász szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel. Tudomásul veszem azt, hogy szakdolgozatomat/diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

Aláírás: .....

Dátum: 2006.május 10.

## Irodalomjegyzék

- Balog, Z., Vinkó, J., & Kaszás, G. 1997, AJ, 113, 1833
- Becker, S. A. 1998, ASP Conf. Ser., Vol. 135, 12
- Carrol, B. W. & Ostlie, D. A. 1996, *An Introduction to Modern Astrophysics*, Addison-Weseley
- Carson, T.R., Stothers, R. & Vemury, S. K., 1981, ApJ, 244, 230
- Christy, R.F., 1968, QJRAS, 9, 13
- Csák, B., 2002, *Cefeida változócsillagok és a periódus-fényesség reláció*, diplomamunka, SZTE
- Fricke, K., Stobie, R.S., Strittmatter, P.A., 1972, ApJ, 171, 593
- Gautschy, A., Saio, H., 1996, ARA&A, 34, 551
- Gieren, W.P., Moffett, T. J., Barnes, T. G.,III, Frueh, M. L., Matthews, J. M., 1990, AJ, 99, 1196
- Kholopov, P.N., Samus, N.N., Frolov, M.S., et al., 1985-88, General Catalogue of Variable Stars. 4th edition, Nauka Publishing House, Moscow (GCVS)
- Busquets, J., Marco, A., Reglero, V., 1996, A&AS, 119, 271
- Kiss, L. L.; Vinkó, J., 2000, MNRAS, 314, 2
- Marik Miklós (szerk.), 1989, *Csillagászat*, Akadémiai Kiadó, Budapest
- Sasselov D. D., Lester J. B., 1990, ApJ, 362, 333
- Schmidt, E. G., Lee, K. M., Johnston, D., Newman, P. R., Snedden, S. A., 2003a, AJ, 126, 2
- Schmidt, E. G., Langan, S., Lee, K. M., Johnston, D., Newman, P. R., Snedden, S. A., 2003b, AJ, 126, 5
- Stefanik, R.P.& Latham, D.W., CfA Digital Speedometers, as reported at IAU General Assembly XXI, Buenos Aries, 1991

Stellingwerf, R.F., 1972, A&A, 21, 91

Stellingwerf, R.F., 1978, ApJ, 224, 953

Szabados, L., 1985, *Csillagászati évkönyv*, Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest

Vinkó, J., Remage Evans, N., Kiss, L. L., Szabados, L., 1998, MNRAS, 296, 824

Wallerstein G., Jacobsen T. S., Cottrell P. L., Clark M., Albrow M., 1992, MNRAS, 259, 474

Wallerstein G., 2002, PASP, 114, 689