

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Természettudományi Kar
Kísérleti Fizikai Tanszék
Csillagász szak

DIPLOMAMUNKA

Forró emissziós csillagok spektroszkópiája

Szaniszló Erika

Témavezető: Dr. Kovács József, ELTE GAO

Konzulens: Dr. Szatmáry Károly

2005

Tartalomjegyzék

Bevezetés	7
1. A klasszikus Be és a Herbig-féle Ae/Be típusú csillagok	8
1.1. A klasszikus Be csillagok definíciója	8
1.2. A Herbig Ae/Be csillagok definíciója	8
2. A klasszikus Be és a HAeBe csillagok megfigyelhető tulajdonságai	9
2.1. Alaptulajdonságok	9
2.1.1. Asztrofizikai kontextus	11
2.1.2. Gyakoriság	11
2.1.3. Rotáció	11
2.1.4. Csillagszél, kifúvás	12
2.2. Spektrális energiaeloszlás	12
2.3. Fotometria és polarizáció	15
2.3.1. Fotometria	15
2.3.2. Polarizáció	18
2.4. Spektroszkópia	18
2.5. A modellek	23
2.6. Megoldatlan problémák, a jövő nagy kérdései	25
3. A HD 109387 Be csillag és a HD 163296 HAeBe csillag spektroszkópiai analízise	26
3.1. A csillagok bemutatása	26
3.1.1. Spektroszkópia: irodalmi előzmények	27
3.2. Echelle spektroszkópia, Midas	29
3.2.1. Az echelle-spektroszkópia	29
3.2.2. A spektrum-feldolgozás módszere	30
3.3. Adatfeldolgozás	31
3.3.1. A műszerek leírása	31
3.3.2. A spektrumok leírása, vonalazonosítás	33
3.3.3. A spektrumok jel/zaj viszonya	34
3.3.4. Paraméterek számítása: Ekvivalens szélességek, V/R változások, radiális sebességek	36

3.4. Perióduskeresés az adathalmazban	40
3.4.1. Fázis diszperzió minimanizálás és a CLEAN algoritmus	41
4. Összefoglalás	43
Köszönetnyilvánítás	47
Nyilatkozat	48
Függelék	49
Vonalazonosítás a HD109387 csillag spektrumán	49
Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán	53
Vonalprofilok változásai a HD109387 csillag és a HD163296 csillag esetében . . .	61
A HD109387 Be csillag és a HD163296 HAeBe csillag spektrumainak adatai . .	67

Ábrák jegyzéke

1.	A Be csillagok IR spektrális energiaeloszlása	13
2.	A Herbig Ae/Be csillagok IR spektrális energiaeloszlása	14
3.	Az <i>o</i> And rövid időskálájú fényváltozásai a Hipparcos mérései alapján	16
4.	A <i>nu</i> Cyg kitörése és az EW Lac elhalványodása a Hipparcos műhold mérései alapján	16
5.	A BF Ori és az UX Ori csillagok optikai fénygörbéi	17
6.	A spektrumvonalak erőssége az egyes színek típusok függvényében	19
7.	A dupla vagy kettős emissziós csúcs kialakulása	20
8.	Rezonancia vonalak a γ Cas UV spektrumában, diszkrét abszorpciós komponensekkel	21
9.	I. TÍPUS: Klasszikus P Cygni vonalprofil	22
10.	III. TÍPUS: Ezen vonaltípus esetén két - egy kék- és egy vörös-eltolódott - emissziós csúcs, centrális abszorpcióval	22
11.	V. TÍPUS: A "tisztán" emissziós vonalak, a rendszersebességre nagyjából szimmetrikus profil	22
12.	VI. TÍPUS: Centrális emissziós komponens, ami egy abszorpciós komponensen ül.	23
13.	VIII. TÍPUS: Kék-eltolódott abszorpciós komponens	23
14.	A Be csillagok rotációs modellje Struve nyomán.	24
15.	A γ Cas Be csillag cirkumsztelláris környezetének modellje	25
16.	Sematikus vázlat a HEROS-ról és a FEROS optikai fényútja	32
17.	A Balmer-vonalak $H\alpha$ -tól $H\delta$ -ig a HD109387 és a HD163296 esetében	34
18.	SiII 6347, 6371 Å vonalak, FeII 6456 Å és HeI 6678 Å vonalak a HD109387 és a HD163296 esetében	35
19.	CaIIK vonal a HD163296 esetében és NaID vonalak a HD109387 és a HD163296 spektrumain	35
20.	A FLASH spektrográffal készült mérések jel/zaj viszonya	36
21.	A HEROS spektrográffal készült mérések jel/zaj viszonya	37
22.	A FEROS spektrográffal készült mérések jel/zaj viszonya	37
23.	Az ekvivalens szélesség definíciójának szemléltetése	38
24.	A HD163296 csillag esetében a $H\alpha$ vonal ekvivalens szélességének változása	39
25.	A V/R mennyiség V és R definíciója	40
26.	A HD109386 csillag V/R és Δv értékei	41

27.	A HD109386 csillag V/R értékeire kapott periodogram és Δv értékeire kapott periodogram	43
28.	Fázisgörbék a HD109386 csillag V/R értékeire és Δv értékeire a PDM módszerrel meghatározott periódusok alapján	44
29.	Fázisgörbék a HD109386 csillag V/R értékeire és Δv értékeire a CLEAN módszerrel meghatározott periódusok alapján	45
30.	A HD163296 csillag $H\alpha$ ekvivalens szélességének értékeire a FEROS és a HEROS spektrumokból kapott periodogrammok	45
31.	A HD163296 csillag $H\alpha$ ekvivalens szélességének értékeire a FEROS és a HEROS spektrumokból kapott periodogrammok	46
32.	A HD163296 csillag $H\alpha$ ekvivalens szélességének értékeire a FEROS és a HEROS spektrumokból kapott periodogrammok	46
33.	Vonalazonosítás a HD109387 csillag spektrumán, 4000-4900 Å	50
34.	Vonalazonosítás a HD109387 csillag spektrumán, 4900-5800 Å	51
35.	Vonalazonosítás a HD109387 csillag spektrumán, 5800-6700 Å	52
36.	Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 3800-4220 Å	54
37.	Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 4200-4820 Å	55
38.	Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 4800-4520 Å	56
39.	Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 5800-6420 Å	57
40.	Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 6400-7020 Å	58
41.	Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 7000-7620 Å	59
42.	Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 7600-8220 Å	60
43.	A HD109387 csillag $H\alpha$ és $H\beta$ vonalának változása	62
44.	A HD163296 csillag $H\beta$ és $H\gamma$ vonalának változása	63
45.	A HD163296 csillag $H\alpha$ vonalának változása	64
46.	A HD163296 csillag CaII 3933 Å vonalának változása	64
47.	A HD163296 csillag HeI 5876 Å+ NaI D1,D2 és a $H\delta$ vonalának változása	65
48.	A HD163296 csillag $H\alpha$ és $H\beta$ vonalának változása	66

Táblázatok jegyzéke

1.	A HD109387 Be csillag és a HD163296 HAeBe csillag alap paramétere	27
2.	Az alkalmazott spektrográfok adatai: FLASH, HEROS, FEROS	33
3.	A jel/zaj viszony méréséhez használt spektrum tartományok	36
4.	Az ekvivalens szélesség méréséhez használt spektrum tartományok	38
5.	A FLASH spektrumok adatait mutatja a táblázat. Az egyes oszlopokban a mérések idő adatai szerepelnek az év, hónap, nap, óra UT-ben és a módosított Julián dátum megadásával.	68
6.	A HEROS kék oldali tartományában készült spektrumok adatait mutatja a táblázat. Az egyes oszlopokban a mérések idő adatai szerepelnek az év, hónap, nap és a módosított Julián dátum megadásával.	69
7.	A HEROS vörös oldali tartományában készült spektrumok adatait mutatja a táblázat. Az egyes oszlopokban a mérések idő adatai szerepelnek az év, hónap, nap és a módosított Julián dátum megadásával.	70
8.	A FEROS spektrumok adatait mutatja a táblázat. Az egyes oszlopokban a mérések idő adatai szerepelnek az év, hónap, nap, óra UT-ben és a módosított Julián dátum megadásával.	71

Bevezetés

Több, mint 130 éves múltja van annak, hogy ismerünk forró emissziós csillagokat. Ennek ellenére a hazai szakirodalom igen keveset foglalkozik az ilyen furcsa természetű csillagokkal. Ezen csillagok fő vizsgálati módszere a színképelemzés vagy spektroszkópia, ami sajnos a magyarországi csillagászati kutatásokban - talán történeti okokból is - csekély szerepet kap. Azonban egyre több magyar kutató fér hozzá külföldi csúcskategóriájú műszerekhez, vagy külföldi partnerekkel ápolt jó kapcsolatok révén jut feldolgozásra váró anyagokhoz. Ezen javuló tendencia egyértelműen kedvez a csillagászati spektroszkópia hazai fejlődésnek, növelve az esélyét annak, hogy a forró emissziós csillagok spektroszkópiája is eredményes kutatási terület legyen.

Munkám során olyan izgalmas csillagokkal foglalkozhattam, amelyek spektrumai, a normál csillagoktól eltérően emissziós vonalakat is mutatnak. Munkámat a szombathelyi ELTE Gothard Asztrofizikai Observatóriumban (GAO) végeztem, ahol kutatás céljából redukált spektrumokat kaptam. Mivel a témakör igen tág, ezért jelen dolgozatomban a forró emissziós csillagok közül két típusra koncentrálok: az egyik a forró Be csillagok, míg a másik a kevésbé forró Herbig-féle Ae/Be csillagok.

Dolgozatom első részében részletesen bemutatom a Be csillagokat és a Herbig-féle Ae/Be csillagokat, beleértve az alaptulajdonságaikat, a fotometriai és a spektroszkópiai tulajdonságaikat is. A spektroszkópiai analízis tárgya két csillag volt: a HD109387 jelű Be csillag és a HD163296 jelű Herbig Ae/Be csillag. A két csillag egyedi jellemzőinek leírása után rátérek a használt módszerek, mérések rövid bemutatására. Majd következik az adatfeldolgozás rész a kapott eredményekkel, végül egy összefoglalással zárom a dolgozatot.

1. A klasszikus Be és a Herbig-féle Ae/Be típusú csillagok

A tárgyalt csillagok egyaránt fontos jellemzője, hogy viszonylag forró, emissziós objektumok. Mi az ami alapján mégis külön csoportot alkothatnak? A normál Be és a Herbig-féle Ae/Be csillagok megkülönböztetésének egyik alapja lehet, hogy társul-e a csillaghoz sötét felhő, fényes köd vagy sem. A Herbig csillagok ugyanis többnyire ködbe ágyazott objektumok, gyakran csillagkeletkezési régiók környezetében találhatók. Ám a korai spektroszkópiai kritériumok szigorúan nem különböztették meg a forró emissziós csillagokat. Azonban infravörös tulajdonságaik miatt mégis csak külön csillagcsoportot alkothatnak a Herbig Ae/Be csillagok és a "normál" Be csillagok, ami egyben megerősíti Herbig megkülönböztetésre tett javaslatát is. Mindehhez társul az a tény is, hogy a Be csillagok fősorozati, míg a Herbig csillagok csupán fősorozat előtti objektumok. A klasszikus Be csillagok definícióját és alaptulajdonságait bemutató áttekintő cikk 2003-ban jelent meg, J.M. Porter és Th. Rivinius nevéhez kötődik [1]. A HAeBe csillagok esetében hasonló áttekintő cikk 1998-ban L.B.F.M. Waters és C. Waelkens szerzőktől származik [2].

1.1. A klasszikus Be csillagok definíciója

1866. augusztus 23-án Angelo Secchi atya levelet írt az *Astronomische Nachrichten* című folyóirat szerkesztőjének, amelyben a γ Cas csillag különös viselkedéséről adott számot. Érdekes módon azt tapasztalta, hogy a Balmer-vonalak abszorpció helyett, mint az normál csillagok (pl. Vega, Sirius) esetében tapasztalható, emisszióban voltak. Ez volt az első emissziós vagy emissziós-vonalú csillag detektálása, és egyben az első jelentés is egy Be csillagról.

Több, mint 120 évvel később Collins (1987) a következő definíciót adta: a Be csillag egy olyan B típusú, nem szuperóriás csillag, amelynek spektruma mutat, vagy valamikor mutatott, egy vagy több Balmer-vonalat emisszióban. Nem véletlen tehát a kis *e* betű a nagy B mögött, ezzel is utalunk a csillag különleges, emissziós természetére. A Collinstól származó definíció a mai napig használatos.

A Be jelenséget néhány O és A színképtípusú csillag is produkálja, ezeket is szokás a Be csillagokhoz sorolni. Legújabban a klasszikus Be csillag terminológia van elterjedőben, amely kizárja a Herbig-féle Ae/Be csillagokat, Algol-rendszereket, stb. A klasszikus Be csillagok tehát olyan, a fősorozathoz közel tartózkodó B színképtípusú csillagok, amelyek a normál fotoszférikus spektrumon kívül emissziós vonalakkal gazdagabbak. Ez a többlet tulajdonság egy cirkumsztelláris gázkomponensnek köszönhető. Általánosan elfogadott, hogy ez a cirkumsztelláris anyag az egyenlítő környékén, korong formában van jelen.

1.2. A Herbig Ae/Be csillagok definíciója

Herbig vizsgált először olyan speciális A és B színképtípusú csillagokat, amelyeknek spektruma szintén nem volt szokványosnak mondható. Csillagait a következő kritériumok

alapján választotta ki:

- Az objektumok színekében emissziós vonalak figyelhetők meg, és színeképtípusuk A vagy annál korábbi.
- A csillag egy ködös vidéken található.
- A csillag a közvetlen közelében lévő ködöt igen erősen gerjeszti.

A későbbiekben a róla elnevezett Herbig Ae/Be vagy HAeBe csillagok kezdeti empirikus definíciója kibővült, így a ma is érvényes definíció:

- A vagy B spektráltípusú csillag emissziós vonalakkal.
- Infravörös excesszus (többlet), forró vagy hideg cirkumsztelláris por jelenléte (vagy mindkettő) miatt.
- A csillag III-V luminozitási osztályba sorolható.

A második pont kizárja a klasszikus Be csillagokat, mivel azoknál az infravörös többletet (IR excesszus) a cirkumsztelláris burokból lévő ionizált gáz szabad-szabad emissziója okozza (és nem a cirkumsztelláris por komponens, ami egyébként elhanyagolhatóan kis mennyiségű a Be csillagoknál). A harmadik kritérium pedig kizárja a B[e] szuperóriás csillagokat, nagy tömegű fősorozat utáni csillagokat poláris kifúvásokkal.

2. A klasszikus Be és a HAeBe csillagok megfigyelhető tulajdonságai

Jelenlegi tudásunk a klasszikus Be és a HAeBe csillagokról igen összetettnek mondható, hiszen mérések, adatok az elektromágneses spektrum egészen kiterjedt részéről származnak. Az eredmények igen változatos jelenségeket mutatnak, csillagszelek, bipoláris kifúvások, akkréciós és cirkumsztelláris korong, burok, stb. jelenléte is fennállhat. A következőkben egy áttekintést kívánok nyújtani a megfigyelhető tulajdonságokról.

2.1. Alaptulajdonságok

A klasszikus Be csillagok tehát olyan B színeképtípusú, a fősorozathoz közel tartózkodó csillagok, amelyek a fotoszférikus spektrumon túl még emissziós vonalakkal is bírnak. Spektroszkópiai vizsgálatok és újabban interferometriás képalkotó berendezések rámutattak arra, hogy a csillag cirkumsztelláris anyaggal bír, amely a csillag körül az egyenlítő tájékán korong formában van jelen, és ez az emisszió forrása. A legtöbb Be csillag fotometriai és spektroszkópiai módon is változik, különösen igaz ez a hidrogén α vonalára.

A klasszikus Be csillagok egy alcsoportját alkotják az ún. Be héjcsillagok. Tulajdonképpen minden kiterjedt atmoszférájú csillag héjcsillag, azonban a héj elnevezés a B színképtípusú csillagokra különleges jelentéssel bír. Ezeknél ugyanis a szokványos keskeny abszorpciós fém-vonalakon és a semleges hélium gyenge, diffúz abszorpciós vonalain túl a Balmer emissziós vonalaikban még központi keskeny, éles abszorpciós komponens is van, ami egész mélyen a kontinuum szintje alá mehet. Ez a csillag körüli héj hidegebb és ritkább mint az atmoszféra, emiatt látunk abszorpciót. A jelenleg elfogadott magyarázat: az ilyen csillagok közel egyenlítőjükről látszanak. A Be héjcsillagok csupán egy fázisát képviselik az egész Be-jelenségnek. Hiszen minden Be héjcsillag Be csillag is egyben, de nem minden Be csillag mutat héj spektrumot. Ugyanakkor érdekes dolog, hogy egy B csillag átkerülhet a Be állapotba majd Be héj állapotba, végül vissza normál B állapotba. Klasszikus példa erre a Pleione csillag.

Pontos és megbízható alap fizikai tulajdonságok meghatározása problémás dolog a Be csillagoknál. A jelenleg elérhető adatok alapján néhány fényes Be csillag feltételezett sugarának becslésére viszonylag éles határ szabható. Tömeget viszont nagyon kevés esetben sikerült közvetlenül meghatározni. Azok is fedési kettős rendszerekben lévő Be csillagok. Ráadásul ezen kettősök többsége kölcsönható is, ami további nehézségek forrása.

A Be burok vagy korong jelenléte mind a kontinuumspektrumot, mind a vonalas spektrumot befolyásolja. Ezen komplikációk miatt egyáltalán nem triviális a spektrális és luminositási osztály korrekt megállapítása, és ennek megfelelően a kapott effektív hőmérséklet értelmezése sem. Ezért nem véletlen pl., hogy egy csillagot az évek során egyre bővülő mérések következtében akár több, különböző spektroszkópiai osztályba is besorolhatnak.

Az egyes csillagokra jellemző alap paraméterek meghatározása tekintetében a HAeBe csillagok esetében is hasonlóan rossz a helyzet, mint a Be csillagoknál. Itt is csak kevés esetben van konkrét eredmény, az is annak köszönhető, hogy a csillag vagy kettős vagy többszörös rendszer tagja, vagy a Hipparcos műhold révén ismert pl. a távolsága.

A Herbig csillagok nem alkotnak annyira homogén csoportot mint a Be csillagok. Az azonban elmondható, hogy fősorozat előtti (pre-main sequence = PMS), közepes tömegű objektumok a korai B színképtípustól a késői A-ig, néha még F is. Ezen tulajdonságok miatt a T Tauri csillagok nagyobb tömegű képviselőinek tekinthetők.

Mivel a HAeBe csillagok lényeges cirkumsztelláris extinkcióval rendelkezhetnek és gyakran csillagkeletkezési régiók területén találhatóak, az extinkciós törvény jelentősen eltérhet attól, amit az átlagos természetű intersztelláris anyag esetében ismerünk. Néhány szerző szerint ugyanis a HAeBe csillagok a standard intersztelláris extinkciós törvényben szereplő $R_v = 3,1$ értékhez képest jóval nagyobb R_v értékekkel rendelkeznek. Ez a paraméter azért is érdekes, mert segítségével számolandó ki a a csillag irányában a vizuális abszorpció A_v , amely pedig a meghatározott távolságra van hatással. Ugyanakkor az R_v paraméter ilyen nagy értéke ($R_v \sim 5$) azt sejteti, hogy a cirkumsztelláris anyagban a szemcsék mérete nagyobb lehet, mint a diffúz intersztelláris anyagban lévő átlagos porszemcsék mérete [3].

A Herbig Ae/Be csillagok gyakran erős röntgen-sugárzók, $L_x \sim 10^{29} - 10^{32}$ erg/s. Ez a jelentős aktivitás a feltételezhetően mágneses mező által hajtott akkréciós korong jelenlétéhez kapcsolódik. A mágneses tér eredete még ismeretlen. Fősorozati A,B csillagok nem rendelkeznek olyan vastag konvektív réteggel, mint a késői típusú csillagok, ahol is

a konvektív zóna hajtja a mágneses dinamót és táplálja a röntgensugárzó kromoszférát, vagy a forró koronát.

2.1.1. Asztrofizikai kontextus

A Be csillagok általános tulajdonságainak tanulmányozása alapvető lépés a forró csillagok esetében fellépő emissziós jelenségek megértéséhez.

A Be csillagok fontosak forgásuk miatt is, hiszen igen gyors rotátorok, forgási sebességük egy kritikus határhoz közelít, amikor a centrifugális erő legyőzi a gravitációt. Különösen érdekes az ún. Ω határsebesség, amelynek definíciója: az a kritikus sebesség, ahol a csillag effektív gravitációja zérussá válik.

A Be csillagok cirkumsztelláris környezetének tanulmányozása során a folyamatok magyarázatára számos modell született. Ezen modelleket tágabb környezetben elkezdtek alkalmazni más forró csillagokra is.

A közepes tömegű főszorozat előtti csillagok fejlődése másképpen megy végbe, mint a kis és nagy tömegű csillagoké. Éppen ezért fontos tanulmányozni a HAeBe csillagokat, mint a csillagkeletkezés köztes objektumait. Abból a szempontból is érdekesek, hogy esetleg a β Pictoris és Vega csillagok progenitor (elő) csillagai lehetnek, amelyek egyébként cirkumsztelláris porkoronggal vagy diszkkal bírnak. Az ilyen korongok vagy diszkek jelenléte előrevetíti bolygószerű testek létezését is a csillag körül. Könnyen felmerül tehát a kérdés, hogy vajon jelenleg zajlik-e bolygókeletkezés a HAeBe csillagok környezetében?

A Be csillagok a HRD-n (Hertzsprung-Russel Diagram) a főszorozaton vannak vagy éppen most hagyják el azt. Az egyes HAeBe csillagok HRD-n való helyzetének meghatározását bonyolítja a bizonytalan vörösödési korrekciók használata és a cirkumsztelláris porpekuális jellege. A legtöbb objektum, ami teljesíti a Herbig-féle kritériumokat a HRD-n, a főszorozat felett vagy ahhoz közel található, készül "ráülni" a főszorozatra ún. evolúciós útvonalon (track) át, 1.5-10 M_{\odot} tömegtartománynak megfelelően.

2.1.2. Gyakoriság

A legtöbb szerző szerint a Be csillagoknak a B1, B2 színképosztályokban legnagyobb az előfordulásuk. A galaxisunkban a korai B csillagok mintegy 20 %-a Be csillag, ez az arány 10-15 %-ra csökken a késői B csillagokra és a galaxisunk belső tartományában lévő korai B csillagokra. A Be csillagok százalékos aránya a Magellán Felhőkben jóval nagyobb, 25-45 %. Az A és B csillagok kevesebb mint 4 %-a Herbig Ae/Be csillag.

A spektroszkópiai kettősség gyakorisága a HAeBe csillagok esetében több, mint 25 %.

2.1.3. Rotáció

A Be csillagok szokatlanul gyorsan forognak, a B típusú csillagok közül a klasszikus Be csillagok a leggyorsabb rotátorok, 250 - 500 km/s -os rotációs sebességek is lehetségesek.

A HAeBe csillagokra levetített rotációs sebességeket mért Finkenzeller (1985) [4], később Böhm és Catala (1995) [5] is vizsgálta. Mindkét tanulmány alapján adódik, hogy a HAeBe csillagok viszonylag nagy $v \sin i$ sebességgel forognak, tipikusan a 60-200 km/s-os tartományban. Ezért az mondható róluk, hogy közepes rotátorok, a T Tauri csillagoknál gyorsabban forognak, míg a klasszikus Be csillagoknál jóval lassabban.

2.1.4. Csillagszél, kifúvás

A Be csillagok esetében már a korai UV megfigyelések csillagszelet és tömegvesztést mutattak ki. Csillagszél elméletek alapján a tömegvesztés mértéke $10^{-11} - 10^{-9} M_{\odot}/\text{év}$. A csillagszelek akár az 1000 km/s-os sebességet is elérhetik.

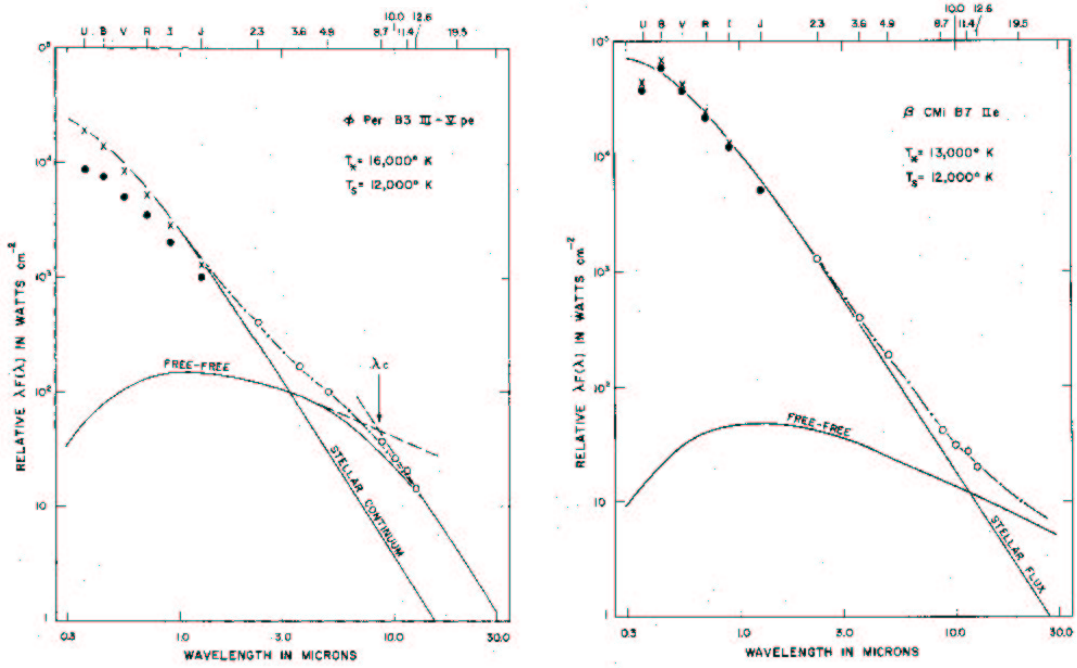
A HAeBe csillagok mintegy 25 %-a estében spektroszkópai bizonyíték van szél jelenlétére. 15 %-uk pedig erősen kollimált széllel rendelkezik, ezek az ún. kifúvások, amelyek következtében a tömegvesztés mértéke $10^{-6} - 10^{-8} M_{\odot}/\text{év}$ [6].

A HAeBe csillagok mintegy 20 %-a mutat tömegkiáramlásra utaló jeleket emissziós P Cygni profilok formájában. Catala (1989) [7] szerint az alapvető forrása az ilyen kiáramlásoknak a csillag forgása, és a felszíni mágneses mező, mint a csillag belsejéből az energiát kiszállító közvetítő. Azonban nagyon kevés közvetlen bizonyíték van ilyen felszíni mágneses mező létezésére.

2.2. Spektrális energiaeloszlás

A klasszikus Be csillagok spektrális energiaeloszlása (spectral energy distribution = SED) UV tartományban alapvetően nem különbözik a nem Be csillagokétól, de a Paschen kontinuum az elvártnál fényesebb lehet. Másrészt a Be héjcsillagok UV spektruma fátyolos, emiatt tipikusan halvány Paschen kontinuummal rendelkeznek (Doazan és társai, 1991 [1]).

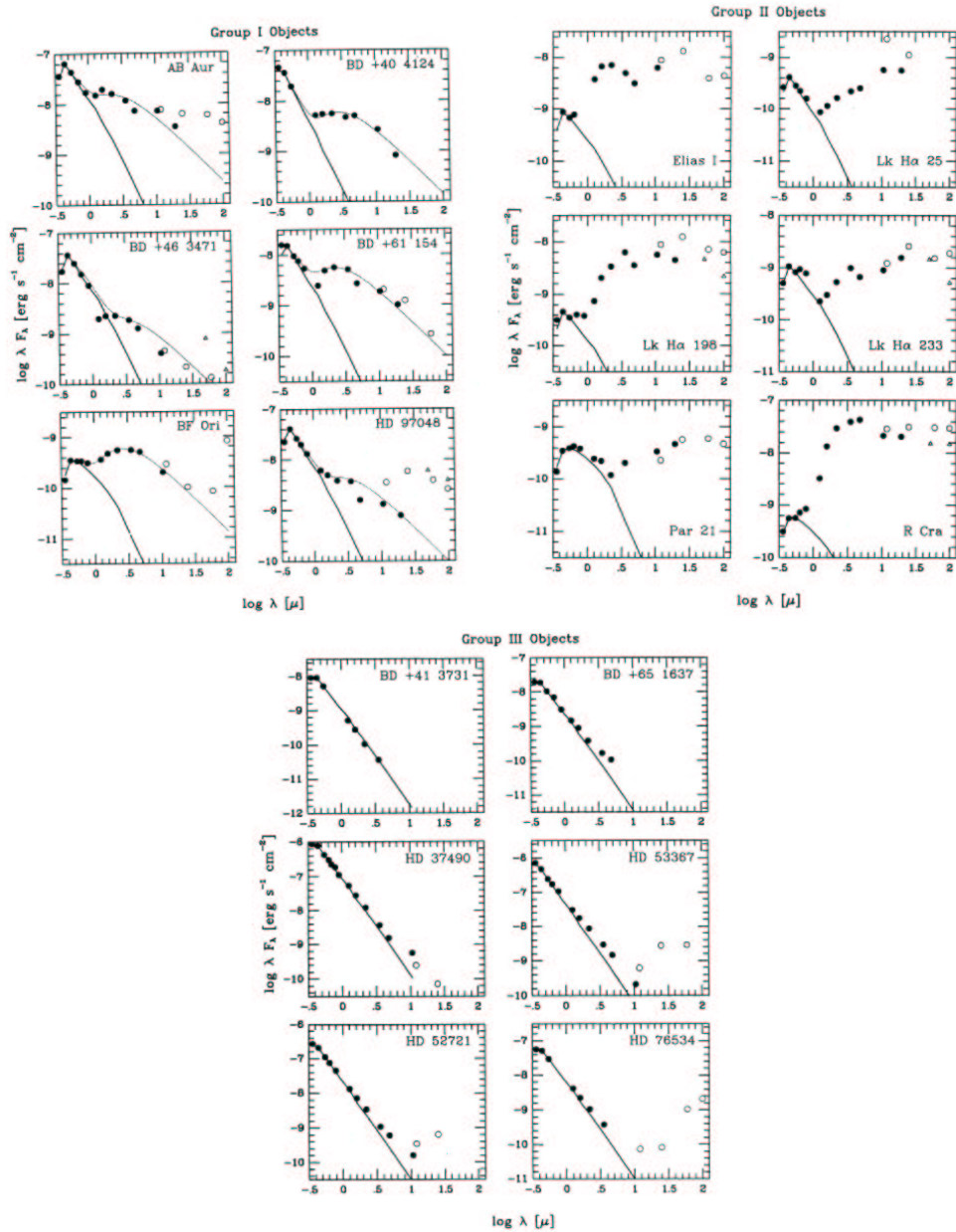
Az infravörös sugárzás erős, nem sztelláris eredetű komponense figyelhető meg a Be csillagoknál. A sugárzás spektrális energiaeloszlása megfelel az ionizált gáz termális jellegű szabad-szabad emissziójának. Ez az infravörös többletsugárzás nagy valószínűséggel szintén abból a csillag körüli hidegebb burokból származik, ahonnan a $H\alpha$ emisszió is ered. Nem véletlen tehát, hogy korreláció van az infravörös többlet sugárzás luminozitása és a $H\alpha$ vonal luminozitása között [8]. Woolf és társai [9] megerősítették az IR excesszus szabad-szabad emisszió eredetét és rámutattak arra, hogy a Be csillagok 5-10 μ -os sugárzása erősen változó lehet. Gehrz és társai [10] az IR spektrumok két típusát különböztették meg. Az egyik csoportba tartoznak azok a Be csillagok, amelyeknek spektrális energiaeloszlása 0.35-19.5 μ -on egy forró fekete test kontinuum sugárzása és egy 7-20 μ -on optikailag vastaggá váló szabad-szabad sugárzás eredője. A maradékba pedig azok vannak, amelyeknél a szabad-szabad emissziós burok legalább 12.6 μ -ig optikailag vékony. A 1. ábra példa a két típusra. Az infravörös többlet a Be csillagok estében növekszik az egyre korábbi spektráltípusok felé. Ez valószínűleg amiatt lehet, hogy a forróbb, korábbi típusúak jobban tudják ionizálni a körülöttük lévő anyagot. Egyébként az excesszus miatt az interszelláris vörösödés megállapításánál komoly problémák adódhatnak.



1. ábra. A Be csillagok IR spektrális energiaeloszlása, [10].

A HAeBe csillagok spektrális energiaeloszlását alapvetően a nagymennyiségű cirkumstelláris anyag (circumstellar material = CMS) jelenléte határozza meg, ami lényegében por komponens. Ez leginkább az infravörös (IR) tartományban meghatározó, ugyanakkor a cirkumstelláris gáz komponens is megjelenik az ultraibolya (UV) kontinuumban. A spektráltípus pontos meghatározása vagy a cirkumstelláris por figyelembevételével számolt extinkció megállapítása nem könnyű feladat a HAeBe csillagok esetében. Az így kapott bizonytalanságok miatt problémás lehet a csillag saját fotoszférájától ténylegesen származó SED elkülönítése a CSM okozta hatásoktól.

Hosszabb hullámhosszakon ($\lambda > 1\mu\text{m}$) a HAeBe csillagok jelentős többletsugárzást mutatnak. Sok HAeBe csillag spektrális energiaeloszlásában élesen megjelenik az excesszus $\lambda \sim 1 - 2\mu\text{m}$ -en, amely mintegy 1500 kelvines pornak felel meg. Egy sokat hivatkozott cikkben Hillebrand és társai (1992) [11] 47 HAeBe csillag IR tulajdonságait vizsgálták. Az IR kontinuum-görbe alapján három csoportba osztották a csillagokat. Az (I) csoportba tartoznak azok a csillagok, amelyek erős IR excesszust mutatnak, és az λF_λ függvény $\sim \lambda^{-4/3}$ meredekségű. Ezen objektumok IR SED-je $\lambda > 2\mu\text{m}$ egy geometriailag lapult, optikailag vastag cirkumstelláris akkréciós korongban ébredő többletsugárzás határoz meg, amely a fotoszféra szintje feletti helyekből származik. Az akkréciós korongok belső része viszont már optikailag vékony kell hogy legyen, a közeli IR ($1.2\mu\text{m} \lesssim \lambda \lesssim 2.2\mu\text{m}$) SED alak miatt. A (II) csoportot alkotják azok, amelyeknél a görbe ellaposodik vagy a hosszabb hullámhosszak felé emelkedést mutat. Ezek az objektumok leginkább fiatal, közepes tömegű csillagok vagy csillag/korong rendszerek gázzal és porral körülvéve. Végül a (III)-ba kerültek a csak kis IR többlettel rendelkező csillagok, ebből a szempontból Be csillagokhoz hasonlítanak. A 2. ábra a három csoportra mutat egy-egy példát.



2. ábra. A Herbig Ae/Be csillagok IR spektrális energiaeloszlása. Az (I) csoportba tartoznak azok a csillagok, amelyek erős IR excesszust mutatnak, a (II) csoportot alkotják azok, amelyeknél a görbe ellaposodik vagy a hosszabb hullámhosszak felé emelkedést mutat, a (III)-ba kerültek a csak kis IR többlettel rendelkező csillagok, [11].

A HAeBe csillagok UV kontinuumában néha felléphet egy többletsugárzás (excesszus), amely a csillag környezetében lévő forró gáz miatt jöhet létre úgy, hogy annak hőmérséklete túllépi a csillag effektív hőmérsékletét.

A feltételezett egyedüli (kísérő társ nélküli) Be csillagok többsége minőségileg hasonló, de némileg erősebb röntgen luminozitással bír, mint a normál B típusú csillagok. Egyes kettős rendszerekben található Be csillagoknál viszont meghatározó röntgen luminozitás

mérhető.

Néhány Be csillag esetében röntgen kitörések, flerek detektálhatók, amelyek valószínűleg inkább fotoszférikus jelenségek, mintsem egy kompakt társtól származnának.

Röntgen megfigyelések szerint a HAeBe csillagok környezetében nagyon forró gáz van, aminek helyzete és eredete még nem igazán tisztázott. Esetleges származása összefügghet a csillagszéllel (Zinnecker és Preibisch, 1994) [12]. Nem HAeBe csillagnál is mértek ilyen röntgen-luminozitást hasonló spektráltípusú csillagokra, lehetséges hogy az nem a csillag HAeBe természetéhez kapcsolódik, hanem inkább egy kisebb tömegű, aktív kromoszférájú társtól származik (Berghöfer és társai 1997) [13].

2.3. Fotometria és polarizáció

2.3.1. Fotometria

Az első észlelés a Be csillagok fényváltozásáról időben egészen Keplerig visszanyúlik (P Cygni). Feinstein (1968) volt az első, aki expliciten kimutatta, hogy a Be csillagok változó fényességű csillagok. A korai Be csillagok szinte mindegyike mutat fényesség változást. Számos csillagnál a fázisban történő változások a csillag kettős csillag természetéhez kapcsolódnak [14]. Jól ismert tény, hogy a Be csillagok fotometriai változékonysága igen komplex: három időskálán is jelentkezhetnek, amelyek gyakran egymásra is rakódhatnak. Vannak a rövid ideig (órák, napok) tartó változások, ezek legtöbbször kis amplitúdójúak. A közepes időskálájúak (napok, hetek) amplitúdó változása a 0.3 magnitúdót is elérheti. A hosszú időskálájúak (évek, évtizedek) amplitúdója akár 0.8 - 1 magnitúdót is változhat, mint az a γ Cas, vagy az X Per esetében már előfordult [15].

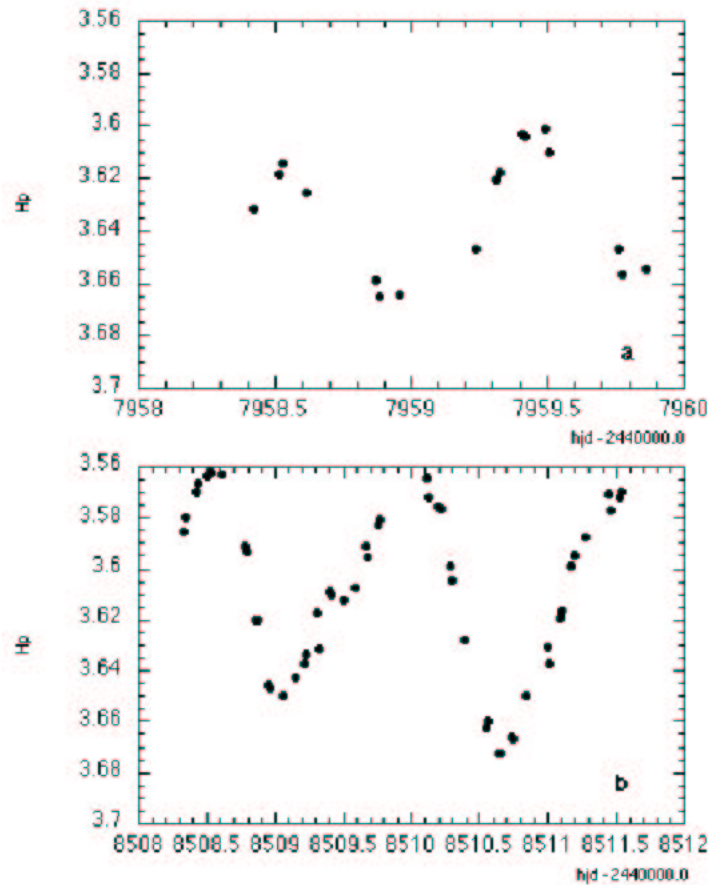
Periodikus fényváltozások a korai Be csillagok mintegy felénél kimutathatók, a késői Be csillagoknál ez az arány lecsökken. Ezek a változók λ Eri típusú csillagok. A λ Eri csillagok többségének fénygörbéje kettős hullám alakú. Néhány hónap alatt a fénygörbe átválthat az egyről dupla hullámúra, vagy fordítva. Ez a jellegzetes fénygörbe pl. dipólus mezővel értelmezhető. A 3. ábra példa ilyen fénygörbére.

Kitörések gyakrabban előfordulnak a korai Be csillagok esetében, amelyeknél a $v \sin i$ kicsi, halványodások pedig a nagyobb $v \sin i$ -jű csillagok esetében. A 4. ábra példa a fénygörbén látható kitörésre és elhalványodásra.

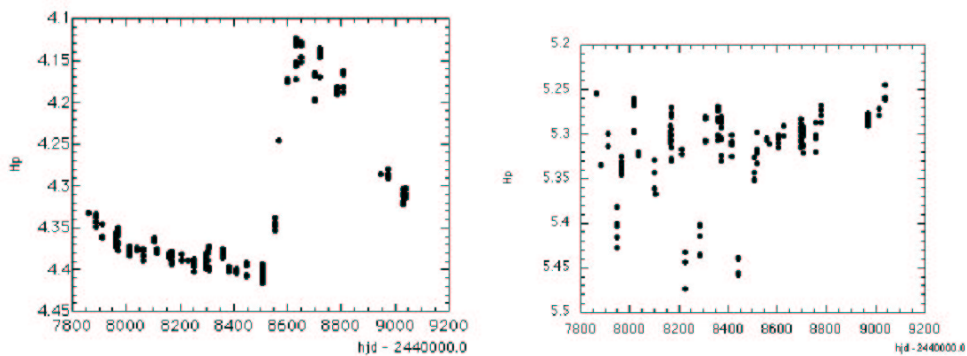
Már régóta ismert, hogy a fősorozat előtti csillagok jelentős fotometriai változékonyságot mutatnak széles hullámhossztartományon. A HAeBe csillagok mintegy 25 %-a erős fényességváltozásokat produkál, ami a 4 magnitúdós nagyságrendet is elérheti.

A Hipparcos fotometriai adatok alapján a Herbig Ae/Be csillagok több mint 65 %-a mutat olyan fényességváltozást, ami 0.05-ös amplitúdónál nagyobb. Az A0-nál korábbi színképtípusúak csupán kis változásokat mutatnak (< 0.05 mag), míg a későbbieknél a fényváltozás amplitúdója akár a 2.5 magnitúdót is elérheti. A legkisebb infravörös többletet mutató csillagoknál nem észlelhető jelentős fényességváltozás. Nem mutatható ki korreláció a fényességváltozás és a csillag $v \sin i$ -je között [16].

A nagy (> 0.5) amplitúdójú, szabálytalan fényességváltozások az ún. UXOR csillagok-



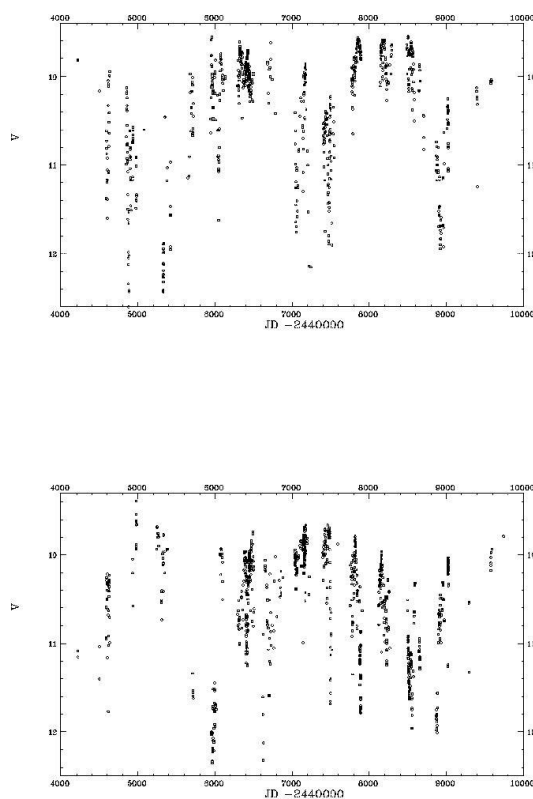
3. ábra. Az *o* And rövid időskálájú fényváltozásai a Hipparcos mérései alapján, [15].



4. ábra. A bal oldali ábrán a ν Cyg Hipparcos műhold által rögzített erős, hosszan tartó kitörése látható a ν Cyg esetében, míg a jobb oldali ábra egy elhalványodást mutat az EW Lac csillag esetében, amely egy hosszú időskálájú változása rakódik, [15]

nak tulajdoníthatók, amelyek a HAeBe csillagok egy alcsoportját alkotják, nevüket a prototípus csillagról, az UX Ori-ről kapták. Például az XY Per csillag jellegzetesen UX Ori típusú objektum, vagy a V350 Ori, BF Ori csillagok is, a 5. ábra ilyen fénygörbéket mutat. Egy lehetséges modell szerint a cirkumsztelláris anyag, amely származhat nagy, keringő

cirkumsztelláris felhőkből, beeső üstükösszerű testekből, kiszélesedett instabil diszkekből, stb., éppen kitakarja egy időre a csillagot. Ezek többnyire hetes időskálájú változások, amelyeket feltehetően cirkumsztelláris anyag, por miatt a csillagfény extinkciójának változó mértékével lehet magyarázni. Az erre rakódó 0.1 magnitúdós változások órás, napos időskálájúak, ezek oka lehet az akkréció csomóssága vagy kromoszférikus aktivitás. A jóval szabályosabb millimagnitúdós változások a csillag pulzációja miatt alakulnak ki, ilyenkor a PMS csillag a HRD azon részén, az instabilitási sávban található, mint ahol pl. a jóval fejlettebb δ Scuti csillagok is vannak [2]. Másféle változások is előfordulnak, ezek többnyire hosszú időskálájúak. Akár évtizedekig tartó elhalványodások, és kitörések formájában jelentkezhetnek, vagy FU Ori típusú kitörések, vagy a cirkumsztelláris extinkció graduális változásának következményei, pl. a PV Cep.



5. ábra. A felső ábra a a BF Ori csillag fénygörbéje, míg az alsó ábra az UX Ori-é. A mély, szabálytalan, Algol-szerű minimumok változó cirkumsztelláris extickció eredményei. <http://laeff.inta.es/EXPORT/uxorinfo.html>, 2005.

Az IR fotometria és az interferometria fényt derített arra, hogy a Be csillag körüli korong sugárirányú kiterjedése a $20 R_{\star}$ -ot is meghaladhatja, és benne az anyag főleg kepleri mozgást folytat. A korong belső részén a magasság $\sim 1 R_{\star}$, míg kifelé jelentősen nőhet, több csillagsugárra akár.

A szubmilliméteres és infravörös (IR) fotometria alkalmas a csillag környezetében lévő por tömegének meghatározására. Ezen meghatározások mentesek a geometriai feltételezésektől, mert a por optikailag vékony ezeken a hullámhosszakon, és nem valószínű, hogy a szabad-szabad emisszió jelentősen hozzájárulna a mért fluxushoz. Ámbár a por-tömeg meghatározásához két bizonytalan mennyiség is kell, ez a por opacitása és a gáz/por arány. Az értékek 10^{-3} és $10 M_{\odot}$ között vannak (feltéve: gáz/por arány ~ 100) [2].

2.3.2. Polarizáció

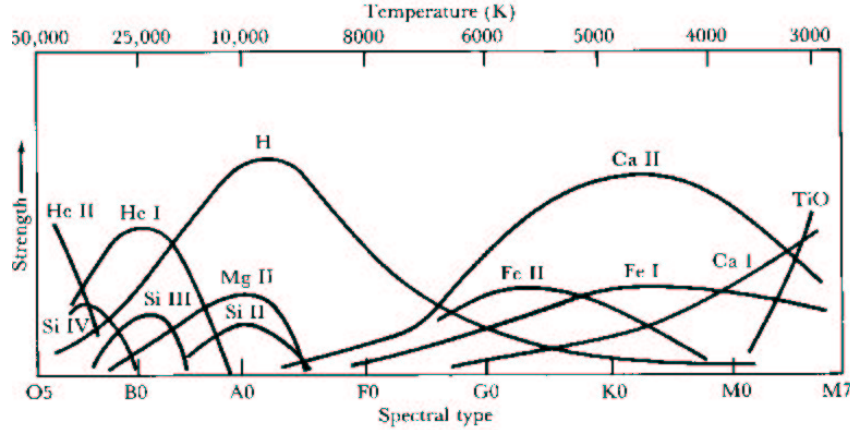
Majdnem minden Be csillag rendelkezik polarizált fényvel. A polarizáció mértéke, ami a 2 %-ot is elérheti, időben változik, az emissziós vonal az erősségével korrelációt mutat, bár néhány esetben fáziskésés tapasztalható. Erőssége általában növekszik a rövidebb hullámhosszak felé, a Balmer emissziós vonalaknál pedig csökken [17], [18]. A polarizáció oka Thompson-szóródás az ionizált cirkumsztelláris korongban.

A HAeBe csillagok optikai kontinuumja gyakran mutat változó polarizációt. A polarizáció oka a porszemcséken történő szóródás, szemben a Be csillagokkal, ahol az elektronokon való szóródás miatt jön létre. Feltétele, hogy a szemcsék a csillag körül vagy egy irányba álljanak vagy nem gömbszimmetrikus eloszlást kövessenek. Egyes, a polarizációban bekövetkező változások korrelációban vannak a fotometriai változásokkal, lehetséges egy mély fényességi minimum. A jelenség magyarázata, hogy sűrű porfelhő takarja ki a csillag fényét és csak a por miatti szórt fény tud távozni. Az UX Ori csillagnál egy ilyen modell a H α -ban történő változást is meg tudja magyarázni (Grinin és társai, 1994) [19]. Néhány csillag esetében a polarizáció pozíciószöge is erőteljesen változik, ami utalhat arra, hogy a szóró részecskék térbeli helyzete megváltozott (Grinin és társai, 1988).

2.4. Spektroszkópia

Ahhoz, hogy egyáltalán képünk legyen arról, milyen színeképek vonalak fordulhatnak elő forró csillagok esetében, tekintsünk egy fősorozati B színeképtípusú csillagot (effektív hőmérséklete 10000-30000 K). A csillag optikai spektrumát alapvetően a hidrogén és a hélium abszorpciós vonalai dominálják. Egyéb spektrális jegyek: a spektrumban, lehetnek CaII, CII, CIII, NII, NIII, SiII, SiIV és MgII vonalak. Ha egy csillagban elég magas a hőmérséklet (~ 50000 K) ahhoz, hogy a hélium ionizálódni tudjon, akkor már O csillagról beszélünk, egyben ezek a legforróbb csillagok is. A kevésbé forróak, amelyek spektrumát szintén a hidrogén dominálja, az A csillagok (effektív hőmérséklete < 10000 K). Ezeknél még jelen lehet néhány nehezebb elem is a spektrumban a CaII K és H vonala mellett, 6. ábra.

A Be csillagok egyfajta klasszifikációja már 1980-ban megtörtént. A 140 csillagból álló minta alapján Jaschek és társai [20] 5 csoportot különböztettek meg. A csoportok sorszáma leginkább az emisszió erősségével állítható párhuzamba. Az erőteljes Be csillagok az I-be kerültek, a gyengébbek a II-III csoportba, és a leggyengébb csoport a IV-es. Az V-be kerültek azok a Be csillagok, amelyek változtatták állapotukat B-ből Be-be a tanulmány készítésének ideje alatt. Bonyolultsága és pontatlansága miatt ezt a klasszifikációt a későbbi szerzők nem igazán alkalmazták.



6. ábra. A spektrumvonalak erőssége az egyes színképtípusok függvényében. Az ábráról leolvasható, hogy mely vonalak dominálnak a HAeBe és a Be csillagok esetében. <http://zebu.uoregon.edu/~imamura/208/jan18/lines.gif>, 2005.

Az emissziós profilok alakja igen változatos lehet mind szimmetrikus, mind aszimmetrikus esetben. Bizonyítható, hogy az emissziós $H\alpha$ -profilok alakját és félérték szélességét (full width at half maximum = FWHM) alapvetően csupán két paraméter határozza meg: a profil emissziós komponensének ekvivalens szélessége, $W(\alpha)$ és a szóban forgó csillag levetített rotációs sebessége, $v \sin i$, ahol i a csillag inklinációja. Ezt felhasználva Dachs és társai [21] számításokat is végeztek a csillag körüli diszk geometriájára vonatkozólag.

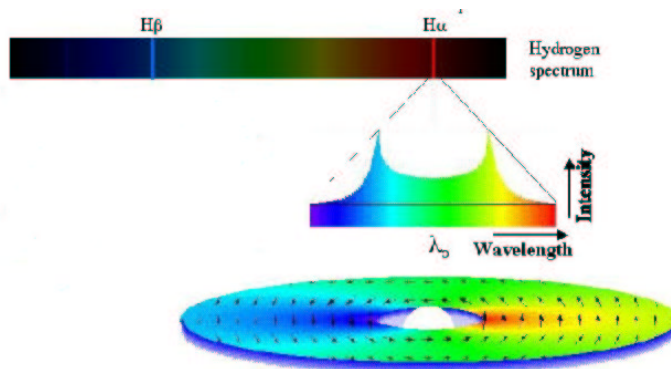
A csillag inklinációja a látóirányunkhoz mérve van leginkább hatással a vonalalakra, de az optikai mélység, τ , az anyag mozgása a korongban szintén nem mellékesek. Pólusról vagy pólusáról látjuk azt a csillagot, amelyiknek az inklinációja, $i < 30^\circ$, egyenlítőjéről azt, ahol az $i > 80^\circ$.

Be csillagok nagyfelbontású spektrumain gyakran észlelhető bizonyos "vállak" megjelenése a hidrogén α és β emissziós vonalakban. Ez az ún. borosüveg nyak struktúra, amely az optikailag vastag diszkben történő nem koherens szórási folyamatban jön létre.

A klasszikus Be csillagokra igen jellemző a kettős vagy dupla csúcs megjelenése a vonalalakokban. Valószínű, hogy ezen forma kialakulása a forgó egyenlítői korong létevel függ össze, amelyre nagy inklinációs szög alatt látunk rá. Első közelítésben a cirkumsztelláris gáz mozgása felelős a vonalalak kiszélesedéséért és a jellegzetes kettős vagy dupla emissziós csúcs kialakulásáért, 7. ábra. Persze a valóság ennél jóval bonyolultabb.

A kettős csúcs intenzitásai különbözőek lehetnek. A kék felé eltolódott komponenst szokás I_V -vel, a vörös felőlit I_R -el jelölni. A V/R mennyiség pedig a V és R helyi kontinuum feletti emisszióinak hányadosa: $V = I_V - I_C$, $R = I_R - I_C$, ahol I_C a kontinuum intenzitása. A Be héjcsillagok Balmer emissziós vonalain V/R változások mérhetők, ezek hosszú időskálájú periodikus vagy kvázi periodikus változások.

1980 óta nagy felbontású és jel/zaj viszonyú adatok rámutattak arra, hogy nemradiális pulzáció (non radial pulsation = NRP), tranziens jelenségek is lehetségesek a Be csil-



7. ábra. A dupla vagy kettős emissziós csúcs lehetséges létrejöttét magyarázza. A megfigyelőhöz közeledő, ill. távolodó gáz Doppler-eltolódását észleljük a spektrumon dupla csúcsként, ahol az emisszió intenzitása felbomlott egy kék és egy vörös középponttal rendelkező csúcsra. <http://www.bartol.udel.edu/~owocki/RDOME/Swarthmore/sld021.htm>, 2005.

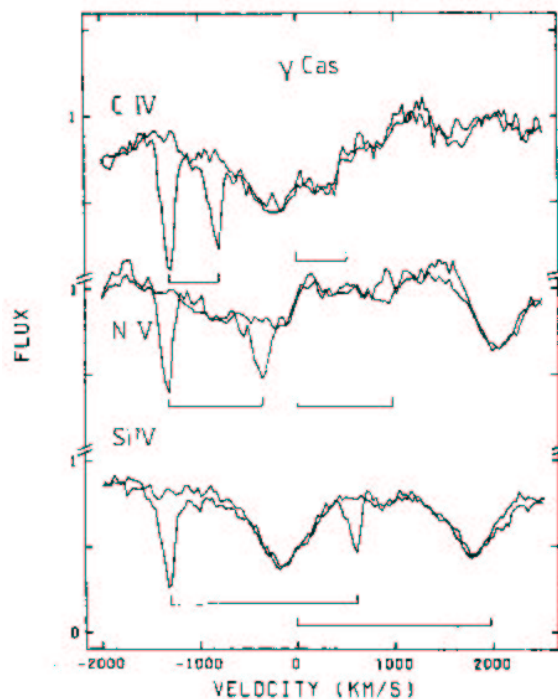
lagoknál. Az NRP észlelése gyenge abszorpciós komponensek formájában jelentkezik, ezeket gyakran kis dudoroknak (bump) is nevezik. Lassan végigvonulnak a kék felől a vörös oldal felé a fotoszférikus vonalprofilon, ciklikusan ismétlődve, általában rövidebb idő alatt, mint a csillag feltételezett rotációs periódusa (~ 1 nap).

Az UV megfigyelések szerint a Be csillagok esetében a szuperionizáció mértéke magasabb fokú, mint a normál fősorozati B csillagok esetében: CIV és SiIV vonalak vannak a spektrumban egészen B9 spektráltípusig, míg ugyanez csupán B2-B5 a normál B csillagok esetében. Ráadásul ilyen magasan ionizált vonalak esetében előfordultak aszimmetrikus profilok vagy eltolódott abszorpciós komponensek. Ezeknél jelentős kifúvási sebességek mérhetők, ami arra utal, hogy ezek az ionok cirkumsztelláris anyagban keletkeztek, amely eltávolodik a csillagtól [22].

Az első ilyen eltolódott diszkrét abszorpciós komponenst a γ Cas UV rezonancia vonalaiban figyelték meg. Ezek erős változékonyságot mutatnak intenzitás és sebességek szerint mind hosszabb, mind rövidebb időskálán. A 8. ábra példát mutat ilyen diszkrét abszorpciós komponensekre.

Általánosságban a HAeBe csillagokat idősebb, nem pekuliáris, fősorozati társaitól az optikai spektrumban a csillag és cirkumsztelláris környezetének aktivitásának nyilvánvaló jele különbözteti meg. Egyike ezen figyelemre méltó jelenségeknek, a $H\alpha$ vonal emissziós természete. Az emisszió a többi Balmer-vonalban is jelentkezhet, és egyéb vonalakban is, mint pl. : HeI $\lambda\lambda$ 5876, 6678, NaI doublet λ 5890 -nél és a 42 multiplett számú FeII vonalakban $\lambda\lambda$ 4924, 5018, és 5169.

Néhány HAeBe csillag olyan abszorpciós vonalakat mutat, amelyek összehasonlítva hasonló spektráltípusú, fősorozati csillagokkal, anomálisnak tűnnek. Ilyen vonalak lehetnek például az abszorpcióban lévő NaI doublet vonalak, és a 42 multiplett számú FeII vonalak. Ezek a vonalak feltételezhetően a csillag körüli anyagban jönnek létre. Mivel az emisszió és az anomális abszorpció forrása egyaránt a csillag fotoszféráján kívülre helyezhető, ezért közös néven nem fotoszférikus szerkezeteknek lehet hívni őket. A csillag fotoszféráján



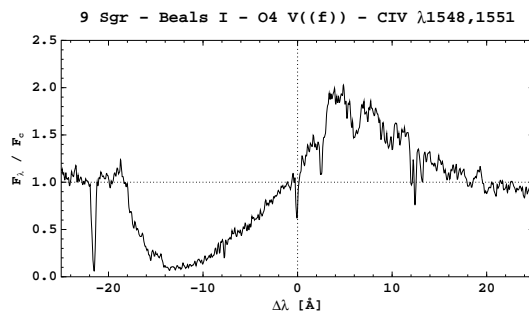
8. ábra. Rezonancia vonalak a γ Cas UV spektrumában, a spektrumban megjelenő eltolódott diszkrét abszorpciós komponenseket szemlélteti az ábra, [22].

kívül keletkező kontinuum sugárzás befolyásolhatja a mért fluxust. Ha ez a nem fotoszférikus kontinuum ráakódik a csillag spektrumára, akkor ez egy jelentős hatás lehet, amit figyelembe kell venni az ilyen, fősorozat előtti csillagok klasszifikációjánál. Ez a fátzolhatás pl. csökkentheti az abszorpciós vonalak mélységét. Bizonyos HAeBe csillagoknál előfordul, hogy majdnem minden vonal emisszióban látható. Az ilyen csillagokat kontinuum csillagoknak hívjuk. Ezeket nem igazán lehet spektroszkópiai osztályokba sorolni, az abszorpciós szerkezetek majdnem teljes hiánya miatt [3].

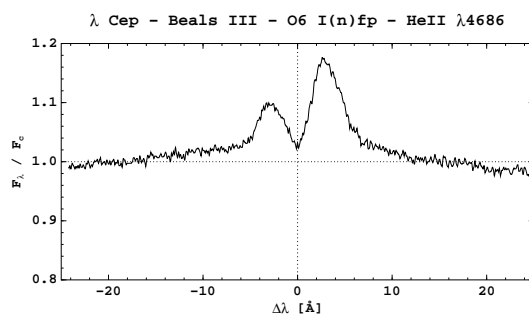
A Herbig csillagok Balmer-vonalai változatosak: egy csúcs, két csúcs, akár P Cygni profil is lehet. Általában a $H\alpha$ profil gyakrabban P Cygni típusú a B8-A0 spektrális tartományban, míg az ennél későbbi, ill. korábbi spektráltípusúakra inkább a kettős vagy dupla csúcs a jellemző (Finkenzeller és Mundt, 1984). A B8 spektráltípusnál korábbi csillagok optikai tartományban kevésbé változnak, szemben a B8-nál későbbi csillagokkal, amik gyakran jelentős változók (Finkenzeller és Mundt, 1984).

A Herbig Ae/Be csillagok esetében néha előfordul, hogy az emissziós vonal P Cygni profilba megy át, csillagszél kialakulására, tömegvesztésre utalva ezzel. A vonalprofilok Beals-féle osztályozása szerint a P Cygni vonalprofilja az I. típusba tartozik, 9. ábra. Jóval szimmetrikusabb vonalak forró, kiterjedt kromoszférában keletkeznek. Az is előfordulhat, hogy az abszorpciós vonal kék eltolódott, de az emissziós komponens hiányzik a profilból, Beals VIII. típus. Ez sebesség gradiensre utal a vonal keletkezésének helyén, 13. ábra. Esetenként inverz P Cygni profilok is feltűnhetnek a spektrumban. Forgó táguló burok hatásaként jelentkező kettős csúcsú emissziós vonal nem csak a Be csillagoknál fordulhat

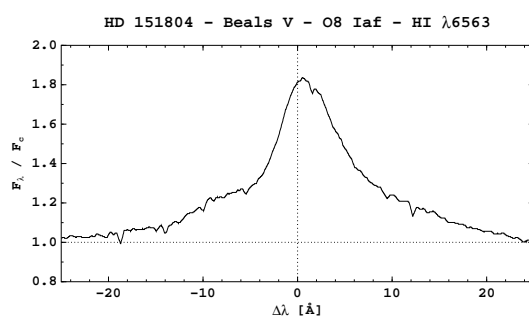
elő, hanem a HAeBe csillagok esetében is jelentkezhet, 10. és 12. ábra. A "tisztán" emissziós profilok pedig inkább a Be csillagokra jellemzőek, Beals V. típus, 11. ábra.



9. ábra. I. TÍPUS: Klasszikus P Cygni vonalprofil, egy kék eltolódott abszorpciós komponensből és egy enyhén vörös eltolódott emissziós komponensből tevődik össze, <http://www.gothard.hu/astronomy/astroteaching/Beals-profiles/Beals-profiles.html>.

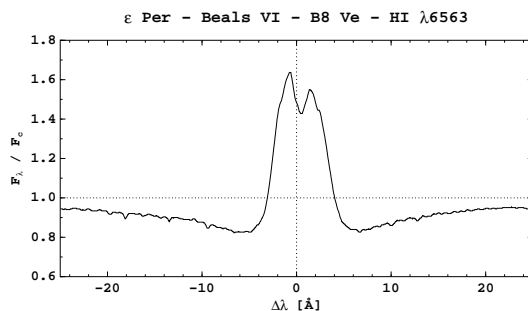


10. ábra. III. TÍPUS: Ezen vonaltípus esetén két - egy kék és egy vörös eltolódott - emissziós csúcsot figyelhetünk meg, köztük egy centrális abszorpcióval. A vonal alakjának kialakításában valószínűleg szerepe van a csillagról kiáramló anyagnak és a gyors forgásnak is, <http://www.gothard.hu/astronomy/astroteaching/Beals-profiles/Beals-profiles.html>.

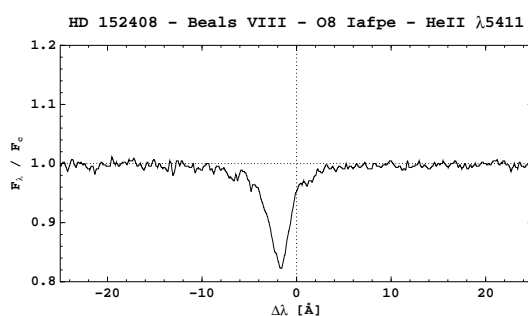


11. ábra. V. TÍPUS: Ezek a "tisztán" emissziós vonalak a rendszersebességre nagyjából szimmetrikus profillal, <http://www.gothard.hu/astronomy/astroteaching/Beals-profiles/Beals-profiles.html>.

társai, 1997). A megfigyelésekből felépített modell a γ Cas cirkumsztelláris környezetét mutatja, szépen látszik, hogy az egyes színképvonalak más-más helyen keletkeznek.



12. ábra. VI. TÍPUS: Ezt a típust egy centrális emissziós komponens jellemzi, ami egy abszorpciós komponensen ül. A centrális emisszió gyakran kettős csúcsú. Ez a profil leginkább a Be csillagokra jellemző, s a forgó, táguló burok hatását mutatja, <http://www.gothard.hu/astronomy/astroteaching/Beals-profiles/Beals-profiles.html>.



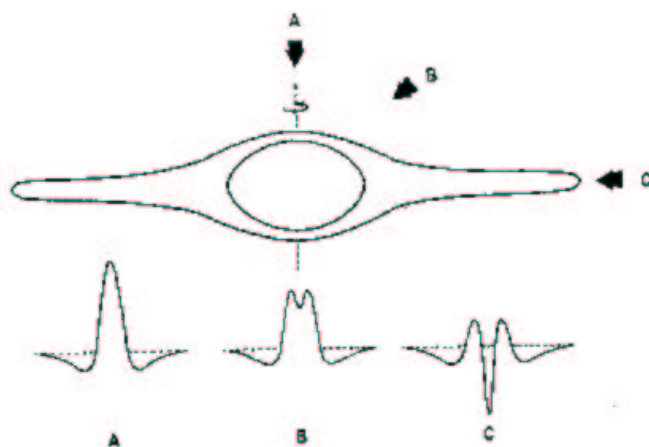
13. ábra. VIII. TÍPUS: Ezt a típust kék eltolódott abszorpciós komponens jellemzi, hasonlóan az I. típushoz, csak itt hiányzik az emissziós összetevő. Az abszorpció gyakran aszimmetrikus profilt mutat, a kék irányban jobban elnyúló vonalszárnnyal, ami a vonal keletkezési helyén jellemző sebesség gradiensre utal, <http://www.gothard.hu/astronomy/astroteaching/Beals-profiles/Beals-profiles.html>.

2.5. A modellek

Az idők során számos modell készült, számos szerző által, azon különleges jelenségek magyarázatára, amelyeket a forró emissziós csillagok produkálnak. Jelen dolgozat keretei nem engedik meg az összes létező modell bemutatását, ezért csupán ízelítőt szeretnék adni néhány jellegzetes példával.

A Be csillagokra vonatkozó korai modellekről Arne Slettebak 1988-as, összefoglaló cikkében olvashatunk [22]. Az egyik legkorábbi modell Otto Struve (1931) nevéhez fűződik, 14. ábra Struve modelljét szemlélteti. A Be csillagok olyan B színképosztályú csillagok, amelyek a gyors forgásuk miatt instabilak. A csillag egy lencse alakú formát ölt, az egyenlítő környékén anyagkiáramlás történik, amelynek következtében az anyag a csillag körül gyűrű alakban kering. Struve rotációs modellje megmagyarázta az emissziós vonalak szélességét, és a héjcsillagok esetében a keskeny abszorpciós vonal spektrumot, viszont a Be csillagok megfigyelt változókéony természetével nehézségek adódtak. Jelenleg elfogadott dolog, hogy a klasszikus Be csillagok esetében az anyag, ami a cirkumsztelláris koron-

got felépíti, a csillag fotoszférájából származik. A csillag egy bizonyos ismeretlen méretű területéről anyag áramlik ki, a korongba való gyors bekerülésért az egyenlőre még nem minden elemében tisztázott tömegvesztési mechanizmus felel. Feltehető, hogy kezdetben az anyag a csillag egyik féltekéjén tartózkodik, ami néhány nap alatt a csillag forgása következtében körülveszi azt, és egy jobbra kepleri diszk fog felépülni. Számos hipotézis szolgál a tömegvesztés magyarázatára, például: nemradiális pulzáció (NRP), lokalizált mágneses mezők.



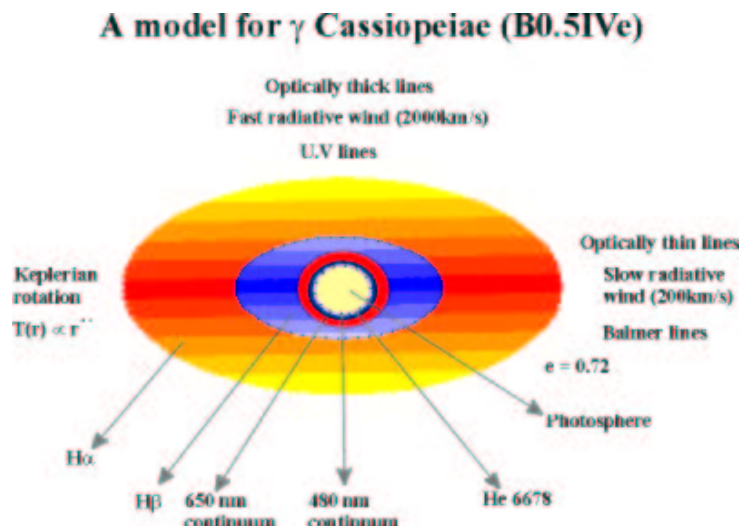
14. ábra. A Be csillagok rotációs modellje Struve nyomán. A gyorsan forgó csillag egyenlítőjénél egy gázhéj alakul ki, ami felelős a Balmer-vonalak emissziójáért. A, B, C profilok láthatók a megfigyelő más-más rálátási szögétől függően.

Alapvetően a forgó, lapult korong modellt támogatják az optikai spektroszkópiai, polarizációs, IR és rádió megfigyelések, azonban egy egyszerű modell semmiképp nem tud magyarázatot adni az összes megfigyelési tényre. Nehezen érthető pl. a jelenségek epizódikus jellege, ehhez mindenképpen egyfajta trigger mechanizmus szükséges. Ehhez járul még az is, hogy a mért rotációs sebességek nem érik el a kritikus értéket, ami azt jelenti, hogy nem eléggé gyors a csillag forgása a cirkumsztelláris anyag leszakadásához.

A kettőscsillag modell a Be csillagok esetében már az 1975-ös IAU szimpóziumon előtérbe került. De később bebizonyosodott, hogy magányos Be csillagok is vannak.

Jelenleg elfogadott dolog, hogy a klasszikus Be csillagok esetében az anyag, ami a cirkumsztelláris korongot felépíti, a csillag fotoszférájából származik. A csillag egy bizonyos ismeretlen méretű területéről anyag áramlik ki, a korongba való gyors bekerülésért az egyenlőre még nem minden elemében tisztázott tömegvesztési mechanizmus felel. Feltehető, hogy kezdetben az anyag a csillag egyik féltekéjén tartózkodik, ami néhány nap alatt a csillag forgása következtében körülveszi azt, és egy jobbra kepleri diszk fog felépülni. Számos hipotézis szolgál a tömegvesztés magyarázatára, például: nemradiális pulzáció (NRP), lokalizált mágneses mezők.

Egy a megfigyelésekből felépített modellt mutat a 15. ábra a γ Cas cirkumsztelláris környezetéről. Szépen látszik, hogy az egyes színképvonalak más-más helyen keletkeznek. A csillag fotoszférájától legtávolabb van a $H\alpha$ emissziós vonal forrása.



15. ábra. A γ Cas Be csillag cirkumsztelláris környezetének modelljét mutatja az ábra. Látszik, hogy a fotoszférikus vonalak más helyen keletkeznek, mint az emisszióban lévő vonalak, www.obs-nice.fr/stee/Bemodel.html.

2.6. Megoldatlan problémák, a jövő nagy kérdései

Jelenlegi tudásunk a Be csillagokról és a Herbig Ae/Be csillagokról nem mondható kevésnek, ugyanakkor kielégítőnek sem nevezhető, hiszen számos kérdés még megválaszolásra vár.

A központi, megoldatlan probléma a Be csillagok esetében a csillagkörüli korong vagy burok eredete, a tömegvesztés milyen folyamaton keresztül megy végbe? Mi is a tényleges evolúciós állapota a Be csillagoknak?

Még az sem egészen tisztázott mi a tényleges oka a különböző időskálájú változásoknak, . A hosszú periódusúak (évtizedes) eredete a korong vagy diszk oszcillációjához kapcsolódhat. Azt sem értjük igazán a Be csillagok esetében, hogy miért vannak emisszióban a Balmer-vonalak és egyes vas vonalak, míg a hélium vonalak abszorpcióban.

Az egyik alapvető probléma a HAeBe csillagoknál, hogy a luminozitás és T_{eff} paraméterek igen bizonytalanok, ugyanis ilyen objektumok esetében nem magától értetődő a pontos spektráltípus és az extinkció megállapítása. Mindezek együtt a HRD-n való pozíciójuk pontatlanságát eredményezik.

Az akkréciós korongokhoz és az ezzel járó röntgenluminozításhoz kapcsolódó jelenségek magyarázatára bevezetett mágneses tér eredete sem egészen tisztázott a HAeBe csillagok esetében.

3. A HD 109387 Be csillag és a HD 163296 HAeBe csillag spektroszkópiai analízise

Munkám során forró emissziós csillagok rejtélyes világába nyertem bepillantást. Azért csupán bepillantást, hiszen óriási témakörrel van szó, amit az évente megjelenő akár több száz cikk is igazol. Főleg Be csillagokkal és HAeBe csillagokkal volt alkalmam foglalkozni. Két csillag spektroszkópiai analízise volt a fő feladatomban. Ezek konkrétan a HD 109387, ismertebb néven κ Draconis Be csillag és a HD 163296 Herbig-féle Ae csillag.

3.1. A csillagok bemutatása

A κ Dra (5 Dra, HD 109387, HR 4787, BD+70 703, MWC 222, HIP 61281) csillag az északi félteke egyik legfényesebb Be csillaga. Emissziós H α vonalára már Pickering (1890), majd Campbell (1895) felhívta a figyelmet, azóta számtalan vizsgálat célpontja lett a csillag.

Figyelemre méltó, hogy szisztematikus fotometriai és polarimetriai tanulmányok jóval később történtek meg, mint a spektroszkópiai vizsgálatok, és csupán csak néhány kiterjedt megfigyelést publikáltak.

Érdekesség, hogy a hosszú időskálájú (23 év) ciklusban a fényességi maximum néhány évvel megelőzi az emisszió erősségének maximumát (Juza és társai, 1994). A kontinuum polarizáció viszont fázisban követi az emissziós erősséget (Arsenijevic és társai, 1994). Ezen tények miatt arra lehet következtetni, hogy az objektum fényessége egy átmenetileg kitágult fotoszférával van összefüggésben. Erre született forgó fotoszférát tartalmazó modell Hirata (1995) által.

A κ Dra csillag főkomponense egy egy-vonalas spektroszkópiai kettőscsillagnak. A feltételezett körpályán való keringés periodusideje, $P = 61.55$ nap, a félamplitúdó, $K = 7 - 8$ km/s. Ez a keringésből adódó radiális sebességváltozás szinte minden publikált radiális sebességgörbén nyomon követhető. Ehhez társul a kettős csúcsú Balmer emissziós vonal fázisban megegyező V/R változása (Juza és társai, 1991) [23].

Az emissziós vonalú csillag, a HD 163296 (BD-21 4749, HIP 87819) a Sagittárius környékén, az M8 és M20 objektumok környezetében helyezkedik el, viszonylag fényes objektum ($V = 6.^m85$). Eleinte még Be csillagként volt ismert a HD163296 csillag, amely pekuliáris héj spektrummal és nagy infravörös többlettel rendelkezett. Később Finkenzeller és Mundt sorolta a fiatal Herbig Ae/Be objektumok közé. Később The és társai (1994) felvették a Herbig-csillagokat tartalmazó katalógusba. A megfigyelhető paraméterek nagy többsége hasonló Herbig (1960) klasszikus katalógusában található objektumokéhoz. Van azonban különbség is: ennek a csillagnak nincsen ködszerű környezete, ún. izolált csillag, és fotometriailag nem mutat figyelemreméltó változást.

A Herbig Ae/Be csillagokkal való hasonlóságot a UV és IR spektroszkópiai mérések is megerősítették. Sok az alacsonyan ionizált vonal az UV tartományban és por okozta IR többlet mutatható ki (Sitko és társai, 1981).

Brown és társai (1993) [24] rádióforrást detektáltak $\lambda = 3,6$ cm-en, amely forrás valószínű-

1. táblázat. A HD109387 Be csillag és a HD163296 HAeBe csillag alap paramétereit tartalmazza az irodalomból összegyűjtve. Az egyes referenciák az irodalomjegyzékben találhatóak meg.

paraméterek	HD109387	HD163296	referencia1	referencia2
RA	12 ^h 33 ^m 28,9 ^s	17 ^h 56 ^m 21,29 ^s	J2000.0	J2000.0
DE	69° 47' 17"	-21° 57' 21,9"	J2000.0	J2000.0
távolság (pc)	125	150	[26]	[25]
	129	122 ± 13	[27]	[28]
látszólagos fényesség (mag)	3,75-3,95	6,82-6,89		[16]
spektráltípus	B5	A3V	[29]	[30]
	B7IV	A1V	[31]	[30]
	B5III	A0V	[32]	[25]
	B6III		[33]	
	B4-6III		[23]	
effektív hőmérséklet, T_{eff} (K)	13900	8700 ± 200	[34]	[30]
	14000	9300	[35]	[25]
		9475		[36]
tömeg, $M (M_{\odot})$	4.8 ± 0.8	2.2	[35]	[36]
		2.3 ± 0.1		[28]
sugár, $R (R_{\odot})$	5.6	2.2 ± 0.5	[26]	[30]
	6.4	2.4	[27]	[36]
	4.9-6.9		[23]	
	6.4 ± 0.5		[35]	
luminozitás, $L (L_{\odot})$		32 ± 8		[28]
		35.2		[36]
log kor (év)		6.6 ± 0.4		[28]
		5		[36]
inklináció, $i (^{\circ})$	35 ± 5	58	[29]	[36]
	40 ± 5		[29]	
	40		[23]	
$v \sin i$ (km/s)	280-350	120 ± 30	[29]	[16]
	200	120 ± 1	[37] [32]	[38]
	249		[33]	
	156 ± 6		[31]	
	232		[39]	
	170		[35]	
	180		[40]	
	160 ± 2		[38]	

leg egybeesik a HD163296 csillaggal. A mért rádiófluxus eredete még nem tisztázott, a csillagszélhez lehet köze.

Anyagkidobódás jelei láthatók a nagy felbontású spektrumokon. Tömegvesztésre utaló bizonyítékok a $H\alpha$ vonal, a NaI D és a MgII doublettekben emissziós P Cygni alakok megjelenése. Továbbá az ultraibolyában érvényes extinkciós törvény nem szabályos, a nagy infravörös többletsugárzás pedig egy ~ 1590 kelvines porháj jelenlétére utal [25].

A 1. táblázat a HD109387 Be csillag és a HD163296 HAe/Be csillag alap paramétereit tartalmazza összegyűjtve az irodalomból.

3.1.1. Spektroszkópia: irodalmi előzmények

A spektroszkópiai vizsgálatok történelme igen hosszú és meglepően ellentmondásos a HD109387 Be csillag esetében. A HI emisszióját már 1888-ban harvardi csillagászok észlelték. Hamar észrevették, hogy igen figyelemre méltóan változik az emissziós vonalak

intenzitása és alakja. A változások ciklikus jellegére néhány évvel később figyeltek fel.

A $H\beta$ emissziós-vonal erőssége mintegy 23 éves periódussal változik, ezt már Jessup észlelte 1932-ben [41], azóta fotometriai, kontinuum polarimetriás mérések is megerősítették ezt. Juza és társai (1994) 8406 napos, 23,01 éves periódust mutattak ki [42]. További vizsgálatok során Saad és társai megmutatták, hogy a HD109387 csillag átlagosan 22 éves ciklussal változik. Ezen ciklikus változások a gyorsan forgó cirkumsztelláris korong méretének meredek növekedése és lassú csökkenése miatt lehetségesek [35]. Az erős $H\alpha$ vonal ekvivalens szélessége szintén változik.

Juza és társai radiális sebességváltozások után kutattak új méréseiket korábbi irodalmi adatokkal kiegészítve [23]. A tény, hogy a $H\alpha$ vonal emissziójának, a $H\beta$ vonal V/R változásának és a HeI abszorpciós profil radiális sebességváltozásai mind a 61,5 nap körüli periódust adták, arra utalhatnak, hogy ez egy kettős rendszer lehetséges keringési periódusa. A teljes adatsorra számolt pálya megoldása adja az efemeriszt:

$$T_{max.RV} = HJD2415757,52 + 61,5549^d \times E \quad (1)$$

Szintén ugyenebben a cikkben erős bizonyítékot találtak 1 napnál rövidebb sebességváltozásra. 0,890384 napos perodust, mint a korábbi szerzők által is megjelölt érték, megerősítették. Több periódust is találtak 0,3-1,1 nap között különböző epochákra mért sebesség, vonalszélesség és vonal aszimmetria adatokban is.

Hill és társai gyors változásokat kerestek a HD109387 Be csillag esetében és 0,545 napos rövid periódust találtak a vonalszélesség és vonal aszimmetria paraméterek változásában. Magyarázatuk szerint ez a periódus megfelel a csillag fél rotációs periódusának és az eredete kis módusú nemradiális pulzációra vezethető vissza. Csupán a kontinuumszint 3%-át kitevő szerkezeteket is észleltek, ezek közös jellemzője, hogy a vonalprofilban a kék tartománytól a vörös felé mozognak [43].

A HD 163296 vonalas spektrumának első leírását optikai tartományban Merill és társai (1925, 1930, 1933) végezték. A spektrumra vonatkozó leírásuk: a Balmer-vonalak emisszióban vannak keskeny abszorpciós maggal, és számos alacsonyán ionizált fémvonal van jelen a spektrumban. A vonalak erősen változnak intenzitásukban és pozíciójukban egyaránt [44].

A 80-as évekig nem végeztek részletes spektroszkópiai vizsgálatokat a csillagon. Az első nagyfelbontású spektrumok a $H\alpha$ vonal érdekes természetét mutatták meg. A profil változik, P Cygni II-ből P Cygni III-as osztályba sorolható idővel (a kék szárnyon egy másod emissziós csúcs jelenik meg).

Catala és társai (1989) az UV MgII rezonancia duplet és a CaII K vonalak esetében mutattak ki periodikus változásokat ($P = 50 \pm 8$ óra, $P = 35 \pm 5$ óra az utóbbi esetében). A CaII vonalhoz tartozó periódus a csillag rotációs periódusa, míg az UV vonalak a cirkumsztelláris burok differenciális rotációjakor, a kromoszférában keletkező csillagszélben jönnek létre. [7].

Baade és Stahl (1989) részletesen foglalkozott a fotoszférikus SiIII és MgII vonalak, a kromoszférikus CaII K és a $H\alpha$ vonal gyors alakváltozásaival. A vonal-alak különböző

részein mértek intenzitás változásokat, periodicitást nem találtak.

A $H\alpha$ és a $H\beta$ vonalak vizsgálata során Pogodin (1994) figyelemre méltó profilváltozást mutatott ki a HD163296 csillag esetében [45]. A A változások az egy órától a néhány napig tartó időskálájúak és az éles spektrális kis "dudorok" helyzetének megváltozásában és a profilok intenzitásának egyenetlenségében jelentkeznek. A megfigyelt Balmer-vonalprofilok kvalitatívan egy ún. burok modellel értelmezhetők, ez a modell elsőként az AB Aur csillagra volt kidolgozva. Lényege, hogy a burok két részből áll: egy aktív, nem stabil terület a csillaghoz közel, ami az egyenlítőre koncentrált csillagszelek által jön létre, és egy külső, közelítőleg konstans héj.

Breskovnaya és társai a $H\alpha$ vonal maradék spektrumában ún. "állóhullám" jelenséget figyeltek meg.

A SiII és a CaII vonalak a csillagfelszín közelében keletkeznek és gyors, ~ 1 órás időskálájú alaktorzulásokat mutatnak aszimmetriák és (több komponens esetén) változó intenzitás arányok formájában.

3.2. Echelle spektroszkópia, Midas

3.2.1. Az echelle-spektroszkópia

Az elektromágneses sugárzás egyik vizsgálati módszere a spektroszkópia, míg a csillagászatban a legfontosabb információgyűjtési technika, a fotometria mellett. Az objektumról hozzánk érkező sugárzást hullámhossz szerint szelektálva kapjuk a színeképet, amelyet megfelelően rögzítve, feldolgozás után analizálva számos új ismeretanyaggal gazdagíthatjuk Világegyetemünkről alkotott képünket.

Az echelle-spektrográfok csillagászati alkalmazása az 1950-es évek óta egyre inkább elterjedt. Ennek oka, hogy ezen optikai rendszerek a hagyományos rácsos spektrográfokkal összehasonlítva sok, csillagászati szempontból fontos paraméter tekintetében messze túlszárnyalják azok teljesítményét úgy, hogy a hátrányok elhanyagolhatók ezen teljesítménynövekedés előnyei mellett. A spektrográfokat mind földi, mind űreszközökre szerelt távcsöveken (pl. IUE) is sikerrel alkalmazták és alkalmazzák. A fő diszpergáló elem az ún. echelle-rács. Ez egy speciális fűrészfog vagy lépcső alakú reflexiós rács. Ha nagy beesési és diffrakciós szöggekkel dolgozunk, magas interferencia-rendekeket kapunk. Mivel a magas elhajlási rendek miatt a rendek közötti átfedés nagy, ezért szükség van egy ún. kereszt-diszperziós optikai elemre, ami a rendekre merőleges irányban széthúzza a spektrumot. A spektrográf által létrehozott színekép kétdimenziós lesz, ezért rögzítésére jól alkalmazhatók a modern kétdimenziós detektorok, CCD-kamerák. A kereszt-diszperziós elem hátránya a fényvesztés. Kárpótól azonban a sok jelenlévő rend miatti nagy hullámhossztartomány-lefedhetőség egyetlen egy felvétellel. Az echelle-spektrográfok jó tulajdonságai tovább javíthatók, például, ha a távcső és a spektrográf üvegszállal van összekötve. Ennek több előnye is van. Egyrészt elkerülhető a spektrográf belépő részének egyenetlen megvilágítása, mivel az üvegszál jól definiált pontszerű forrást biztosít. Másrészt a távcső és a spektrográf közötti üvegszálás kapcsolat lehetővé teszi, hogy a spektrográfot ne közvetlenül a távcsőre kelljen szerelni, hanem azt egy külön szobában, állandó feltételeket biztosító helyiségben

lehesse elhelyezni.

3.2.2. A spektrum-feldolgozás módszere

Az echelle-spektrumok feldolgozásának igen jó eszköze a MIDAS (Munich Image Data Analysis System) programcsomagban implementált Echelle Reduction Package, amely egy jól struktúrált, ugyanakkor flexibilis eszköz a különböző echelle-spektrográfokkal nyert spektrumok feldolgozásához.

A redukció tényleges megkezdése előtt a spektrumokat korrigálni kell néhány effektusra (a CCD rossz oszlopai, kozmikus részecskék nyomai). A MIDAS-ban megfelelő parancsok állnak rendelkezésre, de a megmaradt nyomok is könnyen felismerhetők a redukció végén, ugyanis az egydimenziós spektrumban igen éles "emissziós" csúcsként jelentkeznek.

A redukció bevezető fázisának legfontosabb lépése a spektrum ún. standard állásba való forgatása, amikor is az egyes rendeken belül a hullámhossz balról jobbra, míg a rendek között letről felfele nő.

A feldolgozáshoz az objektum spektrumán kívül a következő segédfelvételek szükségesek:

- Egy megfelelő számú és pontosan ismert hullámhosszú vonalakat tartalmazó színekép a hullámhossz-kalibrációhoz. Ez általában egy ThAr spektrállámpa spektruma.
- Egy ún. flat-field felvétel, ami egyrészt a spektrumot rögzítő CCD-kamera pixeleinek érzékenységről nyújt információt, másrészt segítségével korrigálható az echelle-rács által okozott, echelle-rendeken belüli intenzitásváltozás. Erre a célra a legtöbb esetben a spektrográfba beépített magas hőmérsékletű izzólámpát használnak, vagy egy ilyen lámpával megvilágított fehér felület képét veszik fel, esetleg a szürkületi égbolt egy kis, egyenletes fényességű területének "színeképét" rögzítik.
- Igen pontos redukciókhoz szükség van a CCD sötétáramának ismeretére, ami egy, az objektumról készült spektrum expozíciós idejével megegyező expozíciójú "vak" felvétellel vehető figyelembe.
- A CCD-pixelekben megvilágítás nélkül is jelenlévő "eltolási" elektronok által okozott hatás figyelembe vételére egy igen rövid expozíciójú (általában a kamerával végezhető legrövidebb expozíció), ún. "bias" felvételt is szoktak készíteni, s ezt levonják a többi képből.
- Ha a redukció végén abszolút intenzitáskalibrációt akarunk végrehajtani, akkor rögzíteni kell egy spektroszkópiai standard csillag spektrumát, aminek az intenzitáseloszlása a vizsgált hullámhossz-tartományban jól ismert. Ha csak ún. normált spektrumot akarunk kapni, ez a felvétel nem kell.

3.3. Adatfeldolgozás

Rendelkezésemre állt a HD109387 Be csillagról 195 FLASH¹ spektrum, a HD163296 HAe/Be csillagról 81 FEROS² és 115 a HEROS³ kék tartományában, 118 a HEROS vörös tartományában készült különböző spektrum. Az adatfeldolgozás módszere a következő volt: első lépésként kiválogattam a jobb minőségű spektrumokat, hogy a tényleges méréseket azokon végezhessem el. Így kaptam a HD109387 csillag esetében 188, a HD163296 csillag esetében pedig 79 FEROS, 114 HEROS Red és 117 HEROS Blue megfelelő spektrumot. A következőkben egy rövid leírást adok az alkalmazott spektrográfokról, aztán térek rá részletesen a mérések leírására és a spektrumok analízisére.

3.3.1. A műszerek leírása

A spektrumok a FLASH, HEROS, FEROS echelle spektrográfokkal készültek, a jellemző paramétereket a 2. táblázat mutatja, míg a HEROS sematikus vázlatát és a FEROS optikai fényútját a 16. ábra szemlélteti. A HD109387 spektrumai FLASH echelle-spektrográffal készültek. A spektrográf 1987-ben Landessternwarte-ban Holger Mandel tervei alapján készült.

A spektrográfban a kamera által leképezett spektrumot egy EEV CCD rögzítette, pixelméret 22μ m. A chip hűtése folyékony nitrogénnel történt. Az egyetlen felvétellel lefedhető spektrális tartomány mérete kb. 2700\AA , ami azt jelenti, hogy egy átlagos beállítással a H δ és a HeI λ 6678 \AA vonalak egyszerre látszódnak. A spektrográf az alkalmazott teleszkóp jellemzőitől függően egy 100 és egy 200 μ m átmérőjű üvegszállal kapcsolódik a távcsőhöz. Emiatt az eszközt a távcsőtől függetlenül, megfelelő hőmérsékletű helyiségben lehet elhelyezni, növelve ezzel a mérések pontosságát.

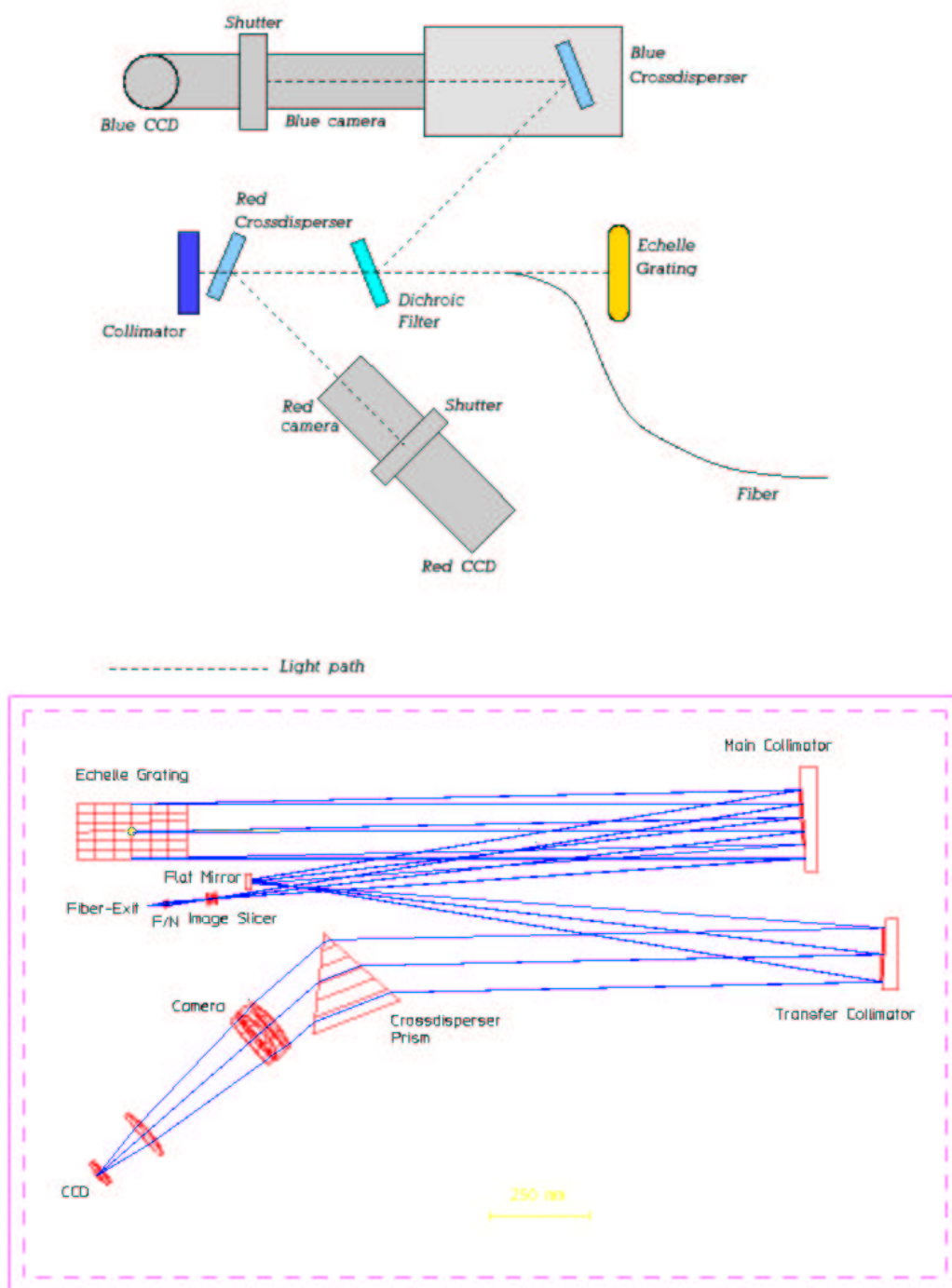
A HD163296 spektrumai HEROS és FEROS spektrográfokkal készültek. A HEROS spektrográf egy szállítható, fiber-csatolt (üvegszál köti össze a távcsövet és a detektort), két-csatornás echelle spektrográf. Az 1994-ben készült műszer építői és tervezői: A. Kaufer, H. Mandel, O. Stahl, B. Wolf, I. Appenzeller. Fejlettebb és modernebb elődjénél a FLASH spektrográfnál. A pehelysúlyú teleszkóp-egység egy TV-monitorozó rendszerrel együtt mindössze 30 kg. Ezáltal még egy szubméter kategóriás távcsőre is könnyen felszerelhető. Tartalmaz továbbá lámpákat (flat-field képekhez: halogén lámpa, hullámhossz kalibrációhoz: thórium-argon lámpa) a kalibrációs képekhez. Az alkalmazott üvegszál átmérője: 100 μ m. A szabad spektrális tartomány 3450-5600 és 5800-8650 Angström egy felvételnél. A felbontás: $R = \lambda/\Delta\lambda = 20000$, ami nagy felbontú spektrumokat jelent. A radiális sebességmérés pontossága elérheti az 1 km/s -t is.

A FLASH spektrográf csak egy kamerával működött, lefedve a 400-670 nm-es tartományt. A HEROS pedig egy nyalábosztó és egy kék-érzékeny kamera segítségével két külön tartományban alkalmas a spektrumok felvételére. Megnőtt tehát a spektrális lefedettség, nem véletlen a választott név sem, egyetlen felvétel tartománya: 350-550 nm

¹Fiber-Linked Astronomical Spectrograph of Heidelberg

²Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph

³Heidelberg Extended Range Optical Spectrograph



16. ábra. A felső ábra HEROS spektrográf sematikus vázlata: az üveg-
szálon érkezik be a fénnyaláb a kollimátorhoz (balról), a már párhuzamos
nyaláb az echelle rácsot éri el, majd a spektrumot egy félig áteresztő szűrő
kettéosztja, a nyaláb egy vörös és kék csatornára irányul. Az alsó ábrán
a FEROS optikai fényútja látható. <http://stelweb.asu.cas.cz/heros/descr.html>,
<http://www.ls.eso.org/lasilla/Telescopes/2p2T/E1p5M/FEROS/docu/A/OS.html>, 2005

2. táblázat. Az alkalmazott spektrográfok adatai: FLASH, HEROS, FEROS.

Műszerek:	FLASH	HEROS	FEROS
Kollimátor fókusztávolsága (mm)	400	360	1500
Kollimátor nyílászviszonya	f/5	f/4.5	f/2.2
Echelle-rács mérete (mm)	110 x 220		154 x 306
Rácsállandó (osztás/mm)	31.6		79
Beesési szög (°)	6	1.2	
Ragyogási szög (°)	65	63.4	
Kereszt-diszperziós rács mérete (mm)		165 x 135	
Rácsállandó (osztás/mm)	300	Red 300 Blue 400	
Kereszt-diszperziós prizma (°)			55
Kamera fókusztávolsága (mm)	300	Red 300 Blue 300	410
Kamera nyílászviszonya		Red f/2.8 Blue f/2.8	f/3
Nyaláb átmérő (mm)			135
Detektor	EEV CCD	EEV CCD	CCD
Chip mérete	1152 X 770	Red 1152X770 Blue 1170 x 800	2048x4096
Pixel-méret (μm)	22	22	15
Szabad spektrális tartomány (Å)	2700	Red 5800-8650 Blue 3540-5600	
Spektrális felbontás, $R = \Delta\lambda/\lambda$	20000	20000	48000
Rádiális sebességmérés pontossága (km/s)		<1	<50m/s

a kék csatornában, 575-860 nm a vörös csatornában.

A FEROS echelle-spektrográf szintén fiber-csatolt, kereszt-diszperziós eleme eltérően az előző kettő spektrográftól nem rács, hanem prizma. 1998-tól 2002 szeptemberéig a chilei ESO 1.52 méteres távcsövön működött. 2002 októberében az ESO 2.20 méteres teleszkópjára került. A kvázi Littrow-módban üzemelő spektrográf egy felvételével a teljes lefedhető optikai tartomány 360 nm-920 nm. A felbontás a 48000-et is elérheti. Ez volt az első olyan műszer Chilében, ahol a teljes, automata adatredukció online módon történhetett.

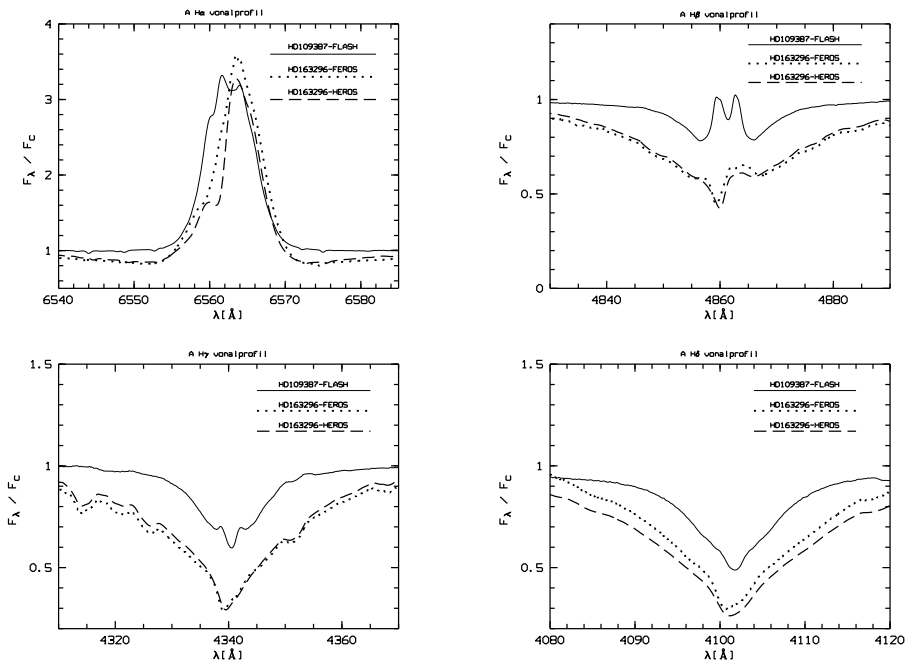
3.3.2. A spektrumok leírása, vonalazonosítás

A FLASH spektrumok esetében az átlagos spektrumtartomány: 4035-6865 Å, amely a H α vonalat is magában foglalja. A tartomány határaiban nagyobb ingadozások vannak az egyes napok esetében. Emiatt pl.: a H δ vonal ($\lambda = 4101$) nincs rajta minden spektrumon. Ez köszönhető annak is, hogy a FLASH spektrográf első igazi próbája volt ez a mérés sorozat 1991-ben. A HEROS kék csatornájában készült spektrumok esetében az átlagos spektrumtartomány: 3369-5685 Å, a HEROS vörös csatornájában készült spektrumoknál ez 5836 - 8628, az egyes napokra nézve kisebb ingadozások vannak. A HEROS spektrumok 1997-ben készültek, míg a FEROS spektrumok 1999-ben. A FEROS spektrumok esetében, az átlagos lefedési tartomány 3527 - 9214 Å. Az 1997-es HEROS és a FEROS mérések jóval szélesebb tartományt lefednek, mint a FLASH spektrumok, ezáltal sok izgalmas spektrumvonalat tartalmaznak.

Mindkét csillagra vonalazonosítást végeztem egy átlagspektrumon. A HD109387 csillagnál a FLASH spektrumokat, míg a HD163296 esetében a HEROS spektrumokat használtam erre a célra. A vonalazonosításhoz egy ismert laboratóriumi hullámhosszú atomi vonalakat tartalmazó katalógus volt a fő támasz (Charlotte E. Moore, [46]) Emellett segítségemre volt Saad és társainak 2004-es cikke a HD109387-ről [35] és Stefan Noll 1999-as PhD tézise a HD163296 csillagról. A Függelékben található az eredményként

kapott spektrális atlasz.

A HD109387 Be és a HD163296 HAe/Be csillagok egyaránt rendelkeznek emissziós vonalakkal. Átlagspektrumot készítve egy ábrán tüntettem fel néhány jellegzetes vonalat a spektrumokból. A 17. ábra a Balmer-sorozat első négy tagját mutatja. Ha csupán a $H\alpha$ vonalat néznénk a két csillag esetében, egyáltalán nem lehetne eldönteni, hogy ez most egy fősorozati Be csillag, vagy egy Herbig-féle, fősorozat előtti csillag. A $H\beta$ vonal már adhat némi támpontot. A Be csillagok esetében gyakran dupla csúcsú profil a $H\beta$, és kevésbé fordul elő P Cygni profil, mint az egy fősorozat előtti csillag esetében elvárható. A $H\gamma$ és a $H\delta$ vonalak profilja szintén nem ad támpontot a két csillag megkülönböztetésére, kivéve, hogy a HD109387 esetében a $H\gamma$ enyhe Be héjcsillag profilt mutat. Egyéb érdekes profilú vonalakat mutat a 18. és a 19. ábra, melyekből hasonló következtetések vonhatók le. A NaID vonalak emissziós volta jellegzetes HAe/Be csillag jegy, míg a SiII vonalak emissziója Be csillag jellegre utal.

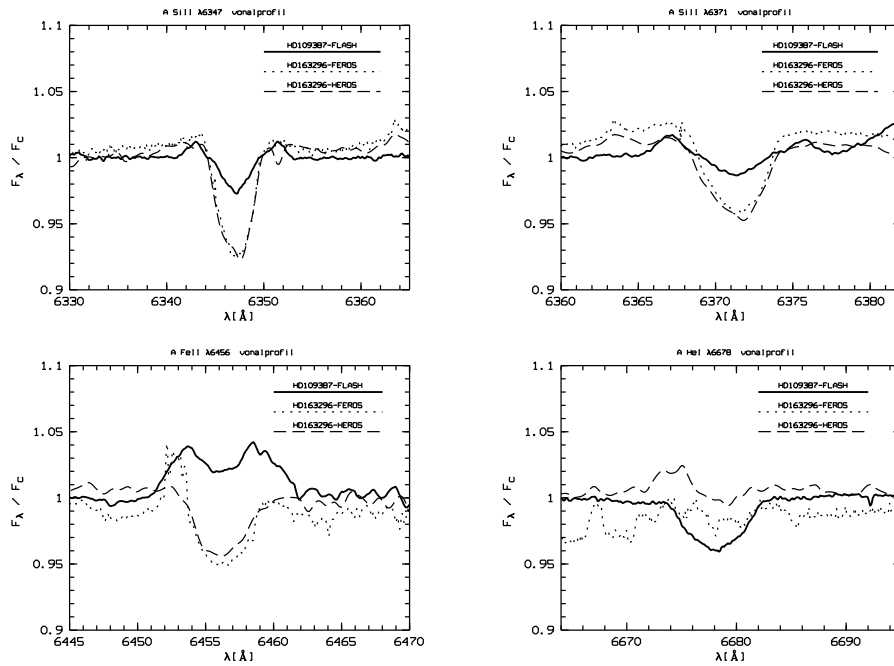


17. ábra. A Balmer-vonalak a $H\alpha$ -tól a $H\delta$ -ig a HD109387 és a HD163296 csillagok esetében.

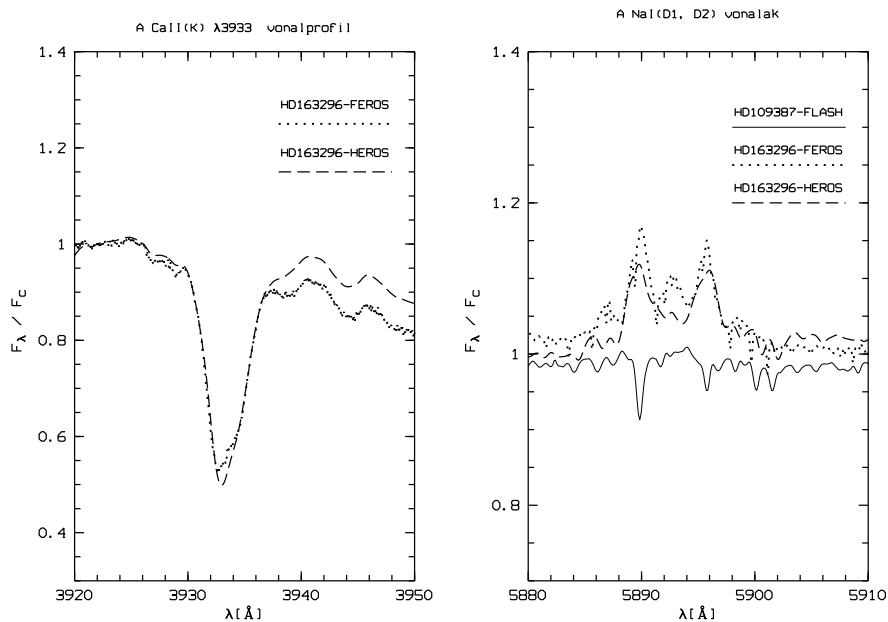
Számos vonalprofil alakja, intenzitása változást mutat időben. Vannak akár egy éjszaka jelentős változásokat mutató vonalak. A függelékben bemutatok néhány ilyen változást.

3.3.3. A spektrumok jel/zaj viszonya

Általánosságban elmondható, hogy bármilyen adatfeldolgozás során létezik egy igen fontos paraméter, a jel/zaj viszony. Ez mondja meg ugyanis adataink minőségét. Ha jó a jel/zaj viszony, az azt jelenti, hogy erős jelre kis zaj rakódik csupán, vagyis a mérés valós adatot



18. ábra. Az ábra Si III 6347, 6371 Å vonalakat, Fe I 6456 Å és He I 6678 Å vonalakat mutat a HD109387 és a HD163296 esetében.



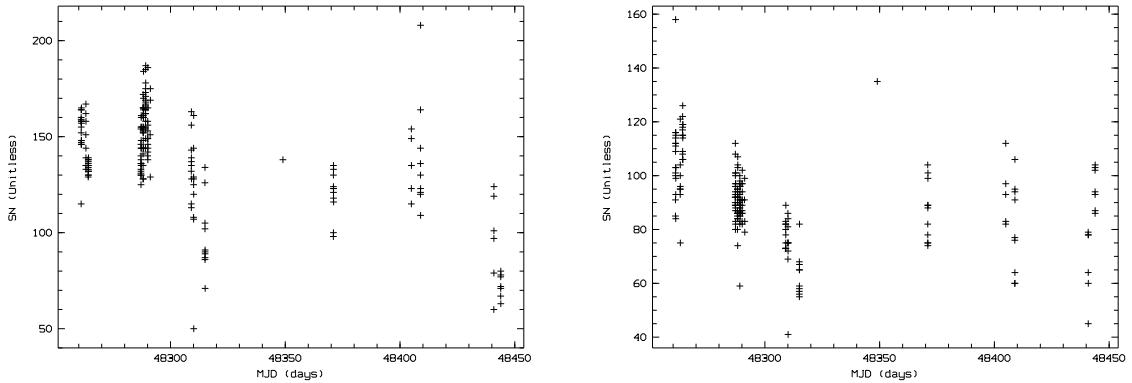
19. ábra. Az ábra a Ca II K vonalat mutatja a HD163296 esetében és a Na I D vonalat a HD109387 és a HD163296 esetében.

3. táblázat. A jel/zaj viszony méréséhez használt spektrum tartományok.

Műszerek:	Központi hullámhossz, λ_c	Tartomány, $\pm \Delta\lambda$
FLASH	5400	25
FLASH	6400	25
HEROS BLUE	5400	25
HEROS RED	6400	25
FEROS	5400	25
FEROS	6400	25

tükrözhet. Kis jel/zaj viszony esetén az ellenkező eset érvényes. Éppen ezért fontos, hogy elvégezzük a kapott spektrumokra a jel/zaj viszony vizsgálatát.

A mérést egy MIDAS programmal valósítottam meg. A jel/ zaj viszony számolásához vonalmentes területeket kerestem a spektrumokon. A 3. táblázat a megfelelő tartományokat mutatja a központi hullámhosszal. A 20.,21. ábra és a 22. ábra pedig az egyes spektrumokra vonatkozó jel/zaj viszony méréseket mutatja az idő függvényében. Az értékek azért lehetnek viszonylag olyan nagyok, mert fényes csillagról van szó és a mérések a két méteres Tautenburgi távcsővel készültek. A HEROS kék csatornával és vörös csatornával készült spektrumokat összehasonlítva viszont szépen látszik, hogy a CCD, a spektrográf kékben kevésbé érzékeny, mint vörös tartományban. Ezt mutatja a HEROS RED esetében a magasabb jel/zaj viszony érték.

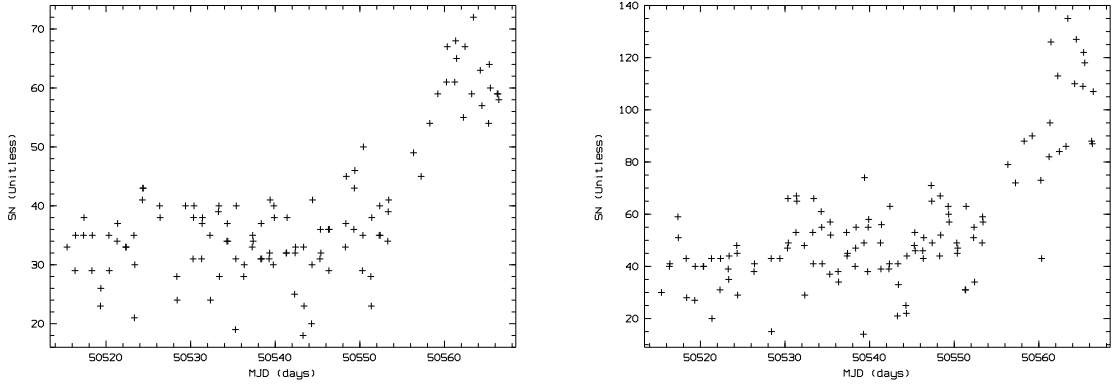


20. ábra. A FLASH spektrográffal készült mérések jel/zaj viszonya, a bal oldali ábra 5400 Å-nél mérve, a jobb oldali ábra 6400 Å-nél van mérve.

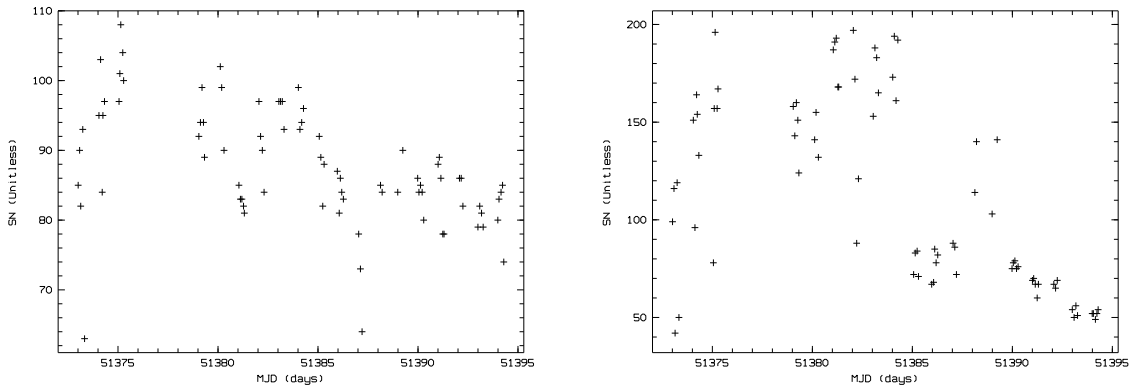
3.3.4. Paraméterek számítása: Ekvivalens szélességek, V/R változások, radiális sebességek

A színekvonalak jellemzésére szolgáló paraméter pl. az ekvivalens szélesség. Matematikai definíciója:

$$W_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{I_c - I_\lambda}{I_c} \Delta\lambda, \quad (2)$$



21. ábra. A HEROS spektrográffal készült mérések jel/zaj viszonya, a bal oldali ábra 5400 Å-nél mérve, a jobb oldai ábra 6400 Å-nél van mérve.

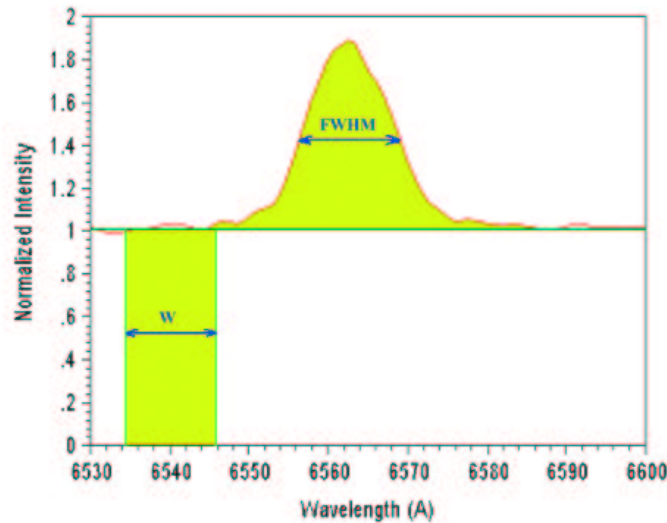


22. ábra. A FEROS spektrográffal készült mérések jel/zaj viszonya, a bal oldali ábra 5400 Å-nél mérve, a jobb oldai ábra 6400 Å-nél van mérve.

az integrálást a színekvonal hullámhossztartományára ($\Delta\lambda$) kell elvégezni, I_c a kontinuumhoz tartozó intenzitást jelöli. Az ekvivalens szélesség nem más, mint abszorpciós vonal esetén a vonal feletti terület, emissziós vonal esetén a vonal alatti terület. A W_λ fizikai tartalmát szemlélteti a 23. ábra. Ha a színekvonalprofil téglalap alakú lenne, akkor ugyanolyan W_λ ekvivalens szélesség mellett éppen W_λ lenne a szélessége, ez indokolja az ekvivalens szélesség elnevezést. A csillagászati alkalmazások során elterjedt, hogy abszorpciós vonal esetében $W_\lambda > 0$ pozitív, míg emissziós vonal esetében $W_\lambda < 0$, negatív értékű.

Ekvivalens szélességeket mértem a HD109387 Be csillag és a HD163296 Herbig Ae csillag spektrumain számos vonal esetében egy, a MIDAS-on belül írt rövid program segítségével. Tulajdonképpen egy tartomány két végét megadva egy a MIDAS-ba beépített integrálás paranccsal számoltam ki a megfelelő értékeket. A 4. táblázat mutatja a mérési paramétereket.

A mért ekvivalens szélességek közül a HD163296 Herbig Ae/Be csillag esetében találtam érdekes mintázatot, ezért ezen idő és ekvivalens szélesség adatokra különböző periód-



23. ábra. Az ekvivalens szélesség definíciója. A vonal alatti színes terület megegyezik a színes téglalap területével, ekvivalens szélességük egyforma. <http://www.astrosurf.prg/buil/us/spe2/hresol7.htm>, 2005.

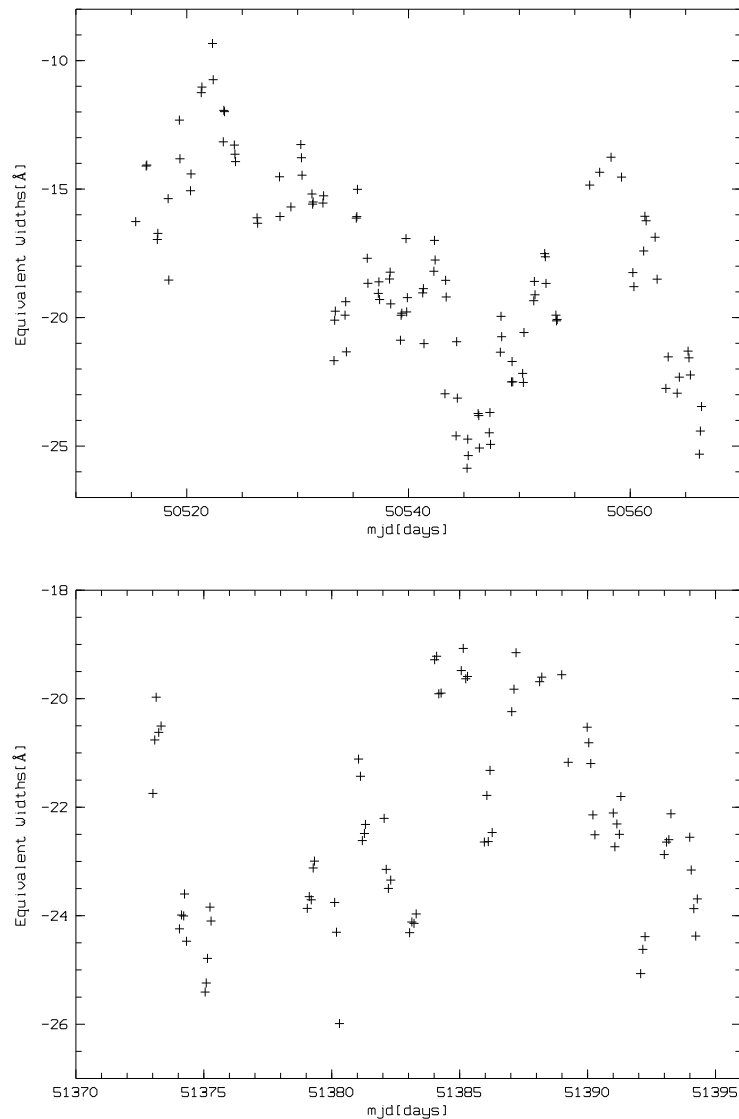
4. táblázat. Az ekvivalens szélesség méréséhez használt spektrum tartományok

HD109387 FLASH		HD163296 HEROS BLUE		HD163296 HEROS RED		HD163296 FEROS	
vonall neve	tartomány (Å)	vonall neve	tartomány (Å)	vonall neve	tartomány (Å)	vonall neve	tartomány (Å)
HI 4340	4295-4380	HI 3797	3780-3815	HI 6562	6550-6580	HI 4101	4050-4150
HI 4861	4830-4890	HI 3836	3816-3858	HeI 5876	5866-5882	HI 4340	4270-4400
HI 6562	6535-6590	HI 3889	3865-3915	SiII 6347	6340-6355	HI 4861	4830-4890
HeI 4144	4135-4150	HI 3979	3940-4000	SiII 6371	6365-6377	HI 6562	6550-6580
HeI 4388	4380-4396	HI 4101	4050-4150	FeII 6456	6452-6462	HeI 4144	4137-4150
HeI 4471	4466-4476	HI 4340	4275-4400	NaID	5880-5902	HeI 5876	5866-5882
HeI 4713	4706-4720	HI 4861	4830-4890			SiII 6347	6340-6355
HeI 5876	5868-5882	HeI 4144	4138-4149			SiII 6371	6365-6377
HeI 6676	6666-6690	MgII 4481	4476-4486.5			FeII 4416	4412-4422
SiII 6347	6335-6360	CaHK 3933	3926-3940			FeII 6456	6452-6462
SiII 6371	6355-6385	FeII 4416	4410-4422			MgII 4481	4476-4486.5
FeII 4583	4576-4591					NaID	5880-5902
FeII 5234	5225-5243						
FeII 5534	5527-5543						
MgII 4481	4476-4486						

duskeresési módszereket alkalmaztam, 24. ábra.

Emissziós csillagoknál érdekes paraméter a dupla csúcsú vonal V/R mértéke, 25. ábra. Az ilyen érdekes csillagoknál az emissziós profilt központi intenzitás minimum szelheti ketté, egy kék oldali részre ($V = \text{violet}$) és egy vörös oldali részre ($R = \text{red}$). Ezen részek relatív intenzitásai, a V/R mennyiségek. A kontinuumtól mérve a profil aszimmetrikus jellegét mutatja, természetesen egyszeres csúcs is lehet aszimmetrikus. Ha $V > R$, akkor a kék oldali szárny a meredekebb, ha $V < R$, akkor fordítva igaz. Megjegyzendő, hogy az $R > V$ egy táguló mozgásra utal, míg a $V > R$ összehúzódásra. Kettős csúcs esetén a V/R mennyiség mellett egy másik mennyiség is fontos, ami a csúcsok távolságát méri. Ez a Δv paraméter, a V és az R csúcsok központi hullámhosszából kiszámolható csúcsszeparáció.

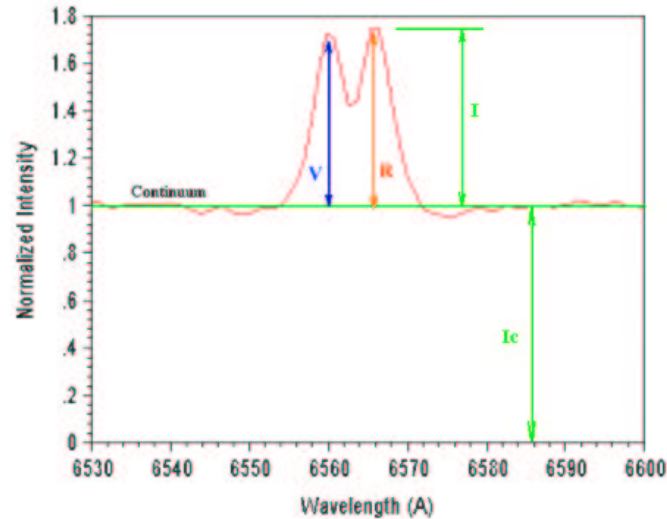
V/R és Δv méréseket végeztem a HD109387 Be csillag válogatott, dupla csúcsot mutató vonalain: HI4861 Å, SiII 6347Å, SiII 6371 Å, FeII 5534 Å, FeII 5234 Å és FeII 4583 vonalak esetében.



24. ábra. Az ábra a HD163296 csillag esetében a H α vonal ekvivalens szélességének változását mutatja. A felső ábra a HEROS kék tartományban készült spektrumokra, az alsó a FEROS spektrumokra vonatkozik.

A mérésekből a HD109387 Be csillag esetében találtam figyelemre méltó mintázatot a H β -ra. Ezért ezen idő és V/R , Δv párokra alkalmaztam különböző perióduskeresi módszereket, 26 ábra.

Radiális sebességeket is mértem mindkét csillag esetében számos vonalra. Megpróbáltam automatizálni a mérést egy MIDAS program segítségével a spektrumok nagy száma miatt. Az előzőleg kivágott spektrumtartományú képeken Gauss-profilt illesztettem az egyes vonalprofilokra, hogy megkapjam a központi hullámhosszat, λ_c -t. A vonal laboratóriumi hullámhosszának ismeretében kis sebességek esetén a Doppler-képlet (3.) adja a megfelelő radiális sebességeket, a v_r -eket.



25. ábra. Az ábra a V és R paramétereket mutatja a vonalprofilon, ezekből számolható a V/R paraméter. Az ábrán I -vel van jelölve a vonal intenzitása, I_c -vel a kontinuum intenzitása, a Δv mennyiség pedig a V csúc és az R csúc központi hullámhosszainak különbsége. <http://www.astrosurf.org/buil/us/spe2/hresol7.htm>.

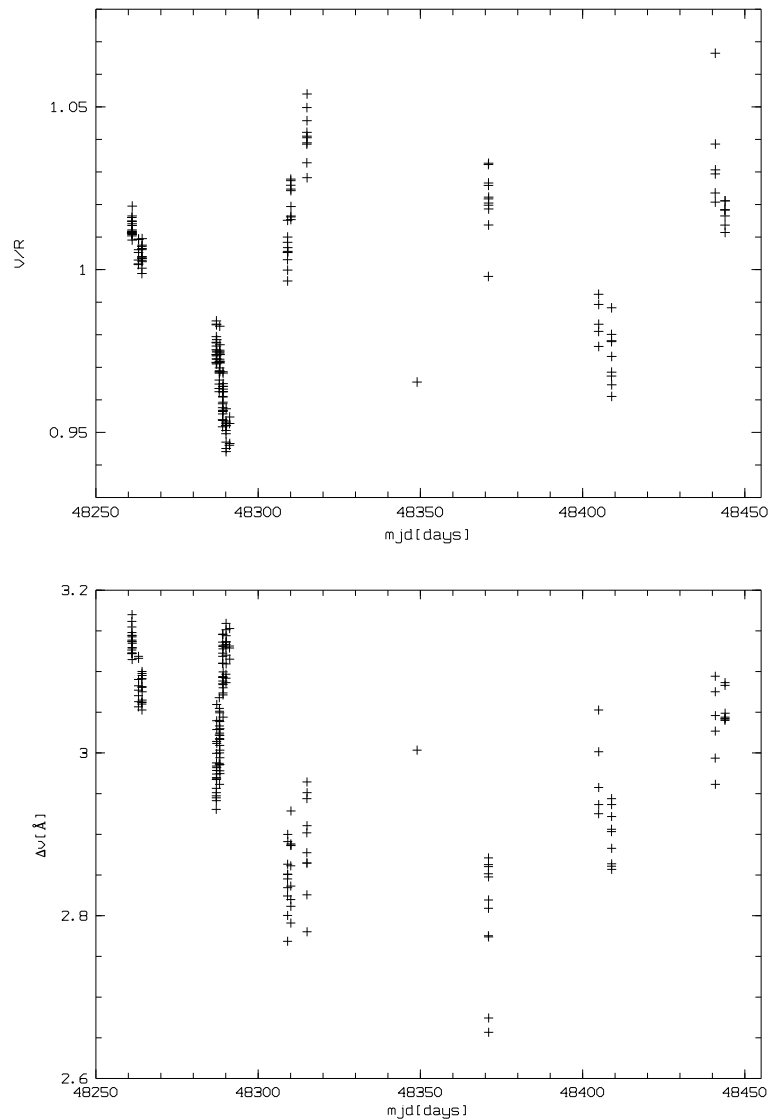
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}, \quad (3)$$

ahol $\Delta\lambda$ a mért hullámhossz és a laboratóriumi hullámhossz különbsége, c a fénysebesség. A program elején definiáltam az illesztési paramétereket. A módszer nem igazán vált be, ugyanis nagyon nagy szórású radiális sebesség értékeket kaptam. Konklúzió: a módszer további finomítására van szükség, vagy marad a jól bevált lépésenkénti kézi módszer, amely nem nevezhető könnyűnek nagy mennyiségű spektrum esetén, de figyelembe veszi az egyes vonalprofilok jellegzetességeit.

A mérésekben nem találtam figyelemre méltó mintázatot, viszont számos vonal esetében a radiális sebesség értékekből látható egy kékeltolódás. Az ilyen jelenségek kifúvásokhoz, csillagszélhez kapcsolódnak.

3.4. Perióduskeresés az adathalmazban

Mint azt már az irodalmi áttekintésben is tárgyaltam, mindkét csillag spektroszkópiai változásokat mutat. Nem egy szerző talált különböző periódusokat a spektrumokon mérhető paraméterek változásait vizsgálva. Éppen ezért nekem is céлом volt az adathalmazban tendenciákat, esetleges periodicitásokat keresni. A Függelékben helyeztem el azokat az ábrákat, amelyek példákat adnak a vonalprofilok változásaira, 43.-48. ábrák.



26. ábra. A HD109386 csillag V/R és Δv értékeit mutatja az idő függvényében.

3.4.1. Fázis diszperzió minimanizálás és a CLEAN algoritmus

Lehetséges periodicitások után kutatva olyan perióduskeresési technikát alkalmaztam, amely jellegében illeszkedik a rendelkezésre álló adatsorhoz. Azaz kiválóan használható szabálytalan térbeli lefedettségű észlelések esetére, amelyek időben nem szinuszosak. A módszer az ún. fázis diszperzió minimalizálás (phase dispersion minimization = PDM) Stellingwerf (1978) [47] nevéhez fűződik.

Tekintsünk egy megfigyelésekből származó adatsort. Jellemezzük ezt két vektorral: \mathbf{x} , a mért értékek és \mathbf{t} , az értékekhez tartozó időadatok. Az i -ik megfigyelés az (x_i, t_i) -vel írható le, N adat estén ($i = 1, N$). Legyen σ^2 a teljes adatsor (\mathbf{x}) szórása:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}, \quad (4)$$

ahol \bar{x} az értékek átlaga; $\bar{x} = \sum x_i/N$. Legyen a próbaperiódus P , ezt felhasználva a fázisvektor ϕ i -ik komponense:

$$\phi_i = t_i/P - [t_i/P]. \quad (5)$$

A fázis diagrammon az adatok a $[0 - 1]$ intervallumba esnek. A fázis intervallumot fel kell osztani N_b db egyenlő, $1/N_b$ hosszúságú intervallumokra. Ezt a felosztást N_c -szer kell végrehajtani úgy, hogy a következő felosztás kezdőpontja $1/N_b N_c$ -vel el van tolva, ezzel az egész fázis lefedhető. s $M = N_b N_c$, kiszámolni ezen M változások átlagát, súlyozva az adott részben lévő adatpontok számával. Legvégül ezt a súlyozott átlagot el kell osztani az összes adatra vonatkozó szórással. Az így kapott függvény:

$$\Theta = \frac{1}{\sigma^2} \left(\sum_{i=1}^M (N_i - 1) s_i^2 / \sum_{i=1}^M (N_i - 1) \right), \quad (6)$$

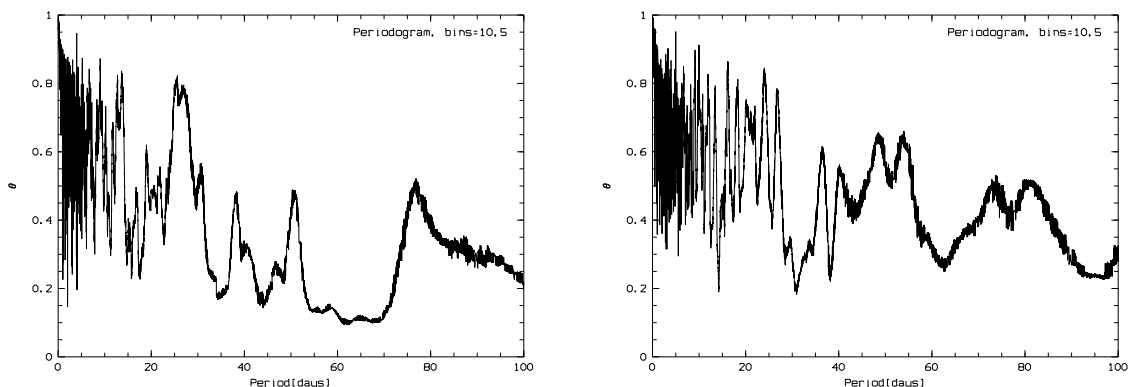
ahol a N_i jelöli az i -ik részben az adatpontok számát, s_i^2 és σ^2 pedig a i -ik rész és a teljes adatsor szórása. Megmutatható, hogy a Θ függvény helyi minimuma megfelel egy periódusnak vagy a periódus multiplettjének. A módszer legfontosabb előnye, hogy megmutat olyan periódust is, amelyhez kapcsolódó változások nem írhatók fel tiszta szinuszos hullámok eredőjeként. Még az igazán összetett periodicitások is felfedhetők e módszerrel.

Az adatsoraimon a PDM módszert alkalmaztam. Ellenőrzés képpen egy másik, a CLEAN algoritmuson alapuló perióduskeresési eljárást is végigcsináltam. Ezt is a MIDAS-on belül A. Kaufer által írt programmal valósítottam meg. A CLEAN algoritmus kiválóan alkalmas szinuszos változások kimutatására idősorokban. Az algoritmus egyes lépései:

1. Az idősor normalizálása az adatsor középértékének levonásával.
2. A szignifikancia szint kiszámolása a Lomb-Scargle statisztika segítségével.
3. Az algoritmus magja, iteráció i:
 - (a) A powerspektrum kiszámolása.
 - (b) A periodogram kiszámolása és a szignifikanciaszint ellenőrzése (Ha nincs szignifikáns frekvencia \Rightarrow) ugrás a 4. lépésre).
 - (c) A power spektrum periodogramján a legerősebb szignifikancia szinthez periódus meghatározása.
 - (d) sin, cos függvények illesztése a megtalált frekvenciára. A kapott illesztésből a pontos frekvencia, amplitudó és fázis meghatározása.
 - (e) Residuálok kiszámolása az előbbi illesztett paramétereket (frekvencia, amplitudó, fázis) felhasználva. Ez a klasszikus fehérítés, amelyről a módszer is a nevét kapta.

- (f) A residuálok power spektrumának kiszámolása.
- (g) A következő iteráció előkészítése, $i = i + 1$

A HD109387 Be csillag esetében a 27. ábra mutatja a PDM módszerrel kapott periodogramokat a $H\beta$ vonal V/R és Δv értéire. Nyilván az adatok rossz időbeli eloszlásának is köszönhető, hogy a periodogramok nem mutatnak szép tiszta csúcsokat. A PDM esetében a legmélyebb csúcs lenne a talált periódus. A 28. ábra mutatja a vélt periódusukkal készített fázis diagramokat. Hasonlóan bizonytalanul a CLEAN módszer is talál periódusokat. Az ezzel elkészült fázis diagramok a 29. ábrán láthatók.



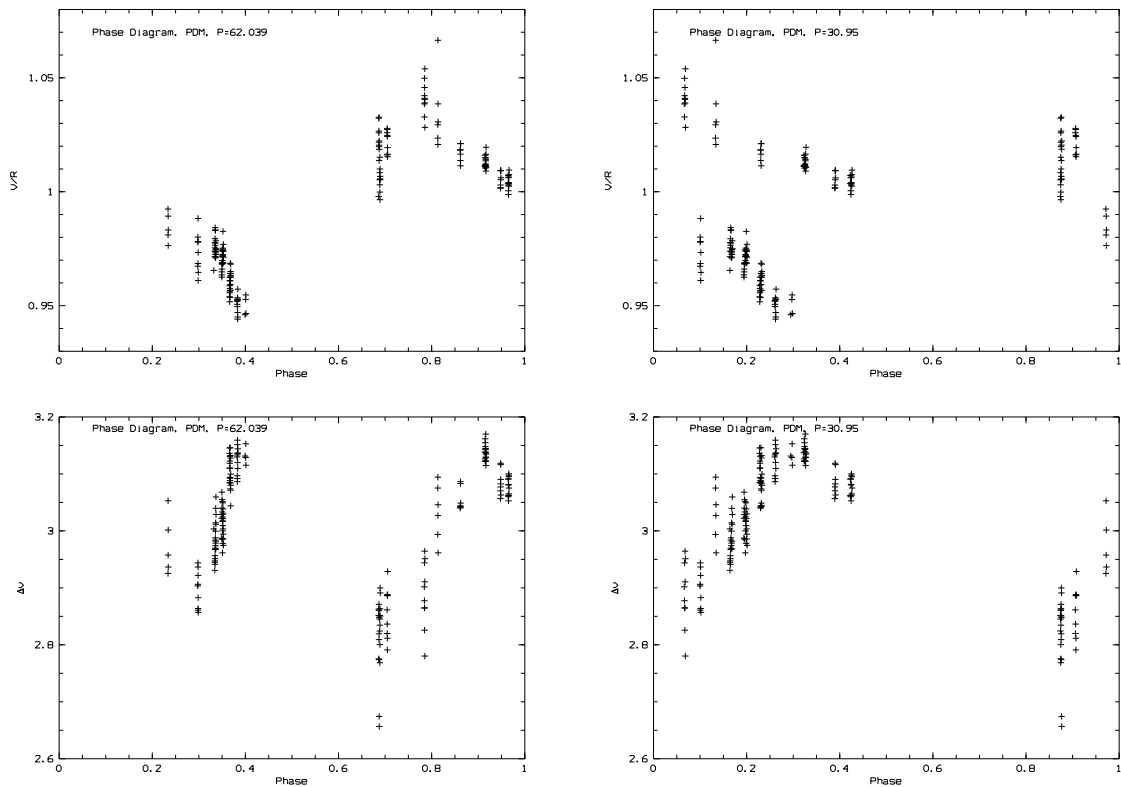
27. ábra. A bal oldali ábra a HD109386 csillag V/R értékeire kapott periodogrammot a jobb oldali a Δv értékeire kapott periodogrammot mutatja.

A HD163296 HAeBe csillag esetében a 30. ábra mutatja a PDM módszerrel kapott periodogramokat a $H\alpha$ vonal ekvivalens szélesség értéire. A periodogramok itt sem mutatnak szép tiszta csúcsokat. A 31. ábra mutatja a vélt periódusukkal készített fázis diagramokat. Hasonlóan bizonytalanul a CLEAN módszer is talál periódusokat. Az ezzel elkészült fázis diagramok a 32. ábrán láthatók.

4. Összefoglalás

Diploma dolgozatomban olyan érdekes, forró csillagokkal foglalkoztam, amelyek spektruma a normál csillagoktól eltérően emissziós vonalakat is mutat. Részletesen bemutattam a klasszikus Be csillagokat és a Herbig-féle Ae/Be csillagokat. Ezután tértem rá a fő részre, a HD109387 Be csillag, és a HD163296 HAeBe csillag spektroszkópiai analizisére. Mindkét csillagon a vonalazonosítást követően a spektrumokon paramétereket mértem meg és számoltam ki, így ekvivalens szélességeket, kettős csúcsok esetén V/R és Δv értékeket, és radiális sebességértékeket kaptam. Mivel mindkét csillag irodalmi előzményei alapján spektroszkópiailag változó, különböző időskálákon, ezért a kapott paraméterekre időbeli változékonyságot, periodicitást kerestem.

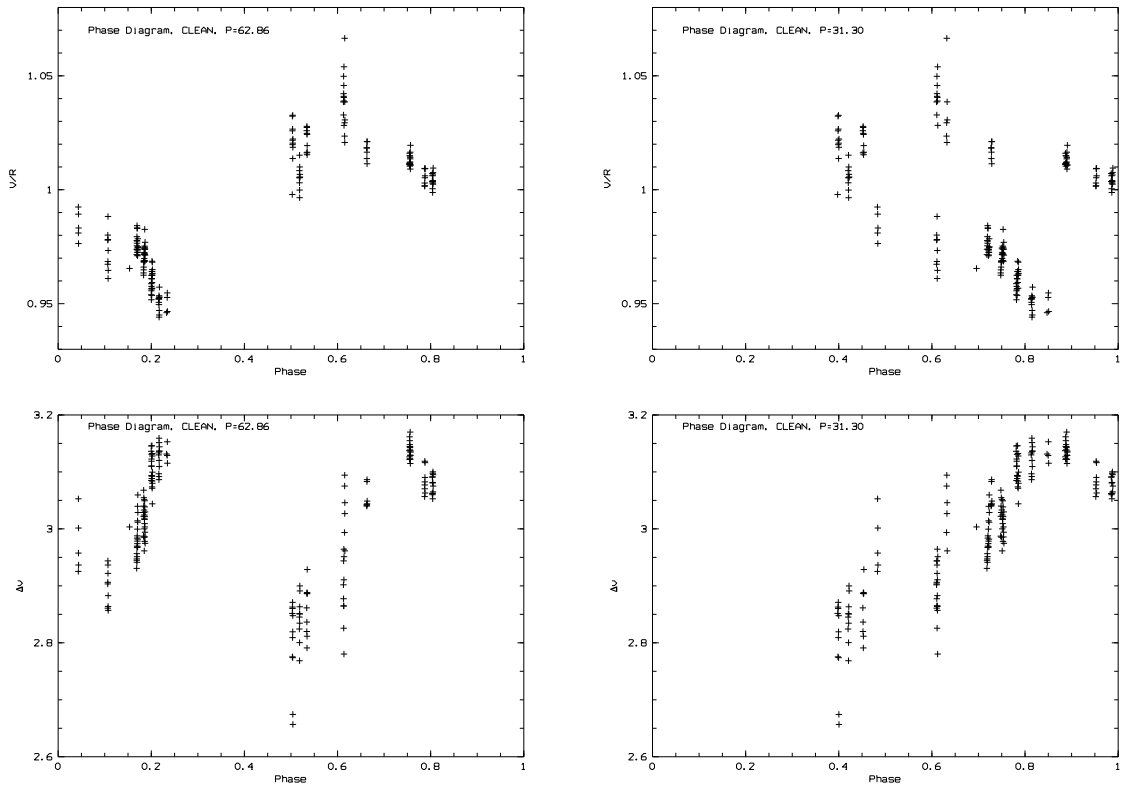
A spektrumok nagy száma miatt kellő képpen nagy mennyiségű adatsort nyertem. Kutatásom nem ért véget a dolgozat elkészítésével, mindenképpen maradtak még további vizsgálati lehetőségek az adathalmazban.



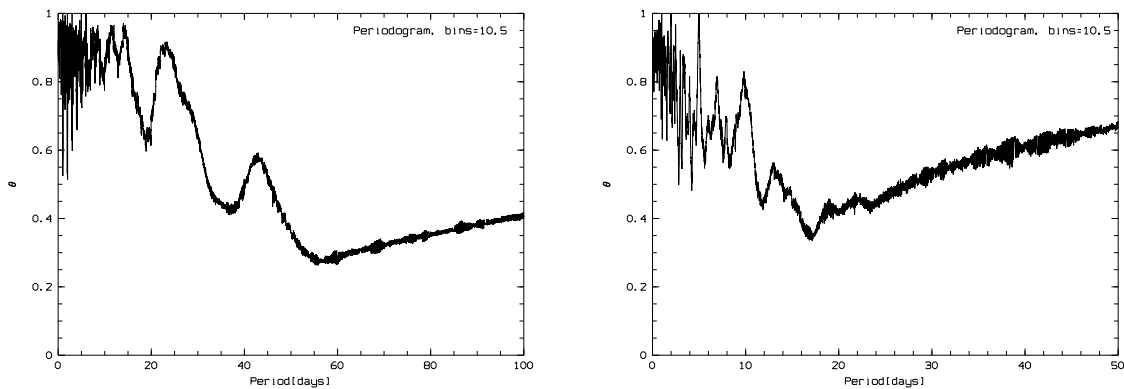
28. ábra. Az ábrák fázisgörbéket mutatnak a HD109386 csillag V/R értékeire és Δv értékeire a PDM módszerrel meghatározott periódusok alapján. A bal felső ábra a V/R értékekből meghatározott fázisgörbe $P = 62.039$ napos periódussal, a bal alsó fázisgörbe szintén ugyanezzel a periódussal készült a Δv adatokra. A jobb alsó ábra a Δv értékekből meghatározott fázisgörbe $P = 30.95$ napos periódussal, a felső ábra fázisgörbe szintén ugyanezzel a periódussal készült a V/R adatokra.

Az első érdekes eredménynek mondható a HD109387 Be csillag esetében a $H\beta$ vonalának V/R és Δv változása. A korábbi mérések csupán a V/R változásokra mutatták ki a kettőscsillag magyarázathoz kötődő 61.5 napos periódust. Nem minden kétséget kizáróan, de sikerült kimutatni egy nagyjából fele ekkora periodusú változást a vonal Δv paraméterre.

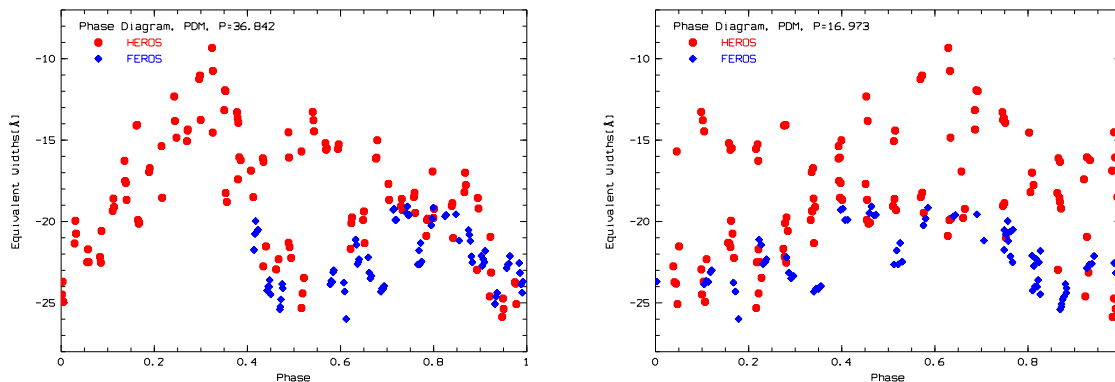
A másik furcsa dolgot a HD163296 HAeBe csillag $H\alpha$ vonalának ekvivalens szélességére kaptam. Ez sem túl bizonyos, de úgy tűnik, a periodogramok között van olyan, amelyhez tartozó periodussal elkészett fázisdiagramon rendeződni látszanak a mért értékek. A kialakult képet támogatja az a tény is, hogy a különböző időben készült HEROS és FEROS spektrumok adatai illeszkednek egymásra. Ez periodikus jellegre utal, és mindenképpen további analízis tárgyát képezi.



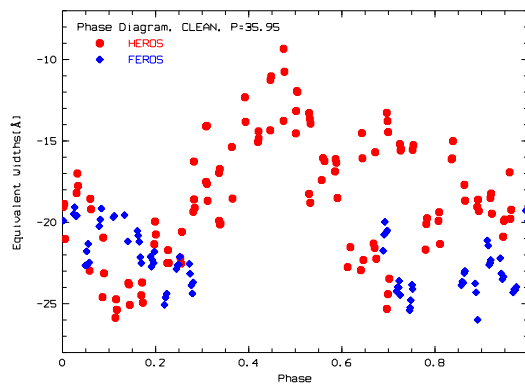
29. ábra. Az ábrák fázisgörbéket mutatnak a HD109386 csillag V/R értékeire és Δv értékeire a CLEAN módszerrel meghatározott periódusok alapján. A bal felső ábra a V/R értékekből meghatározott fázisgörbe $P = 62.86$ napos periódussal, a bal alsó fázisgörbe szintén ugyanezzel a periódussal készült a Δv adatokra. A jobb alsó ábra a Δv értékekből meghatározott fázisgörbe $P = 31.30$ napos periódussal, a felső ábra fázisgörbe szintén ugyanezzel a periódussal készült a V/R adatokra.



30. ábra. A bal oldali ábra a HD163296 csillag $H\alpha$ vonal ekvivalens szélességének értékeire a FEROS spektrumokból nyert periodogrammot mutatja, míg a jobb oldali a FEROS spektrumok alapján készült periodogram.



31. ábra. A bal oldali ábra a HD163296 csillag $H\alpha$ vonal ekvivalens szélességének értékeire a FEROS spektrumokból nyert periodogrammot mutatja, míg a jobb oldali a FEROS spektrumok alapján készült periodogram.



32. ábra. A bal oldali ábra a HD163296 csillag $H\alpha$ vonal ekvivalens szélességének értékeire a FEROS spektrumokból nyert periodogrammot mutatja, míg a jobb oldali a FEROS spektrumok alapján készült periodogram.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőimnek: Dr. Kovács Józsefnek és Dr. Szatmáry Károlynak a témába nyújtott bevezetést, támogatásukat és türelmüket. Továbbá köszönöm Dr. Jankovics Istvánnak és Dr. Vince Ildikónak a lehetőséget, hogy kiváló légkörben, nyugodt körülmények között dolgozhattam Szombathelyen, az ELTE Gothard Asztrofizikai Obszervatóriumban. Végül, de nem utolsó sorban nagyon hálás vagyok szüleimnek és páromnak a kitartó támogatásukért.

Nyilatkozat

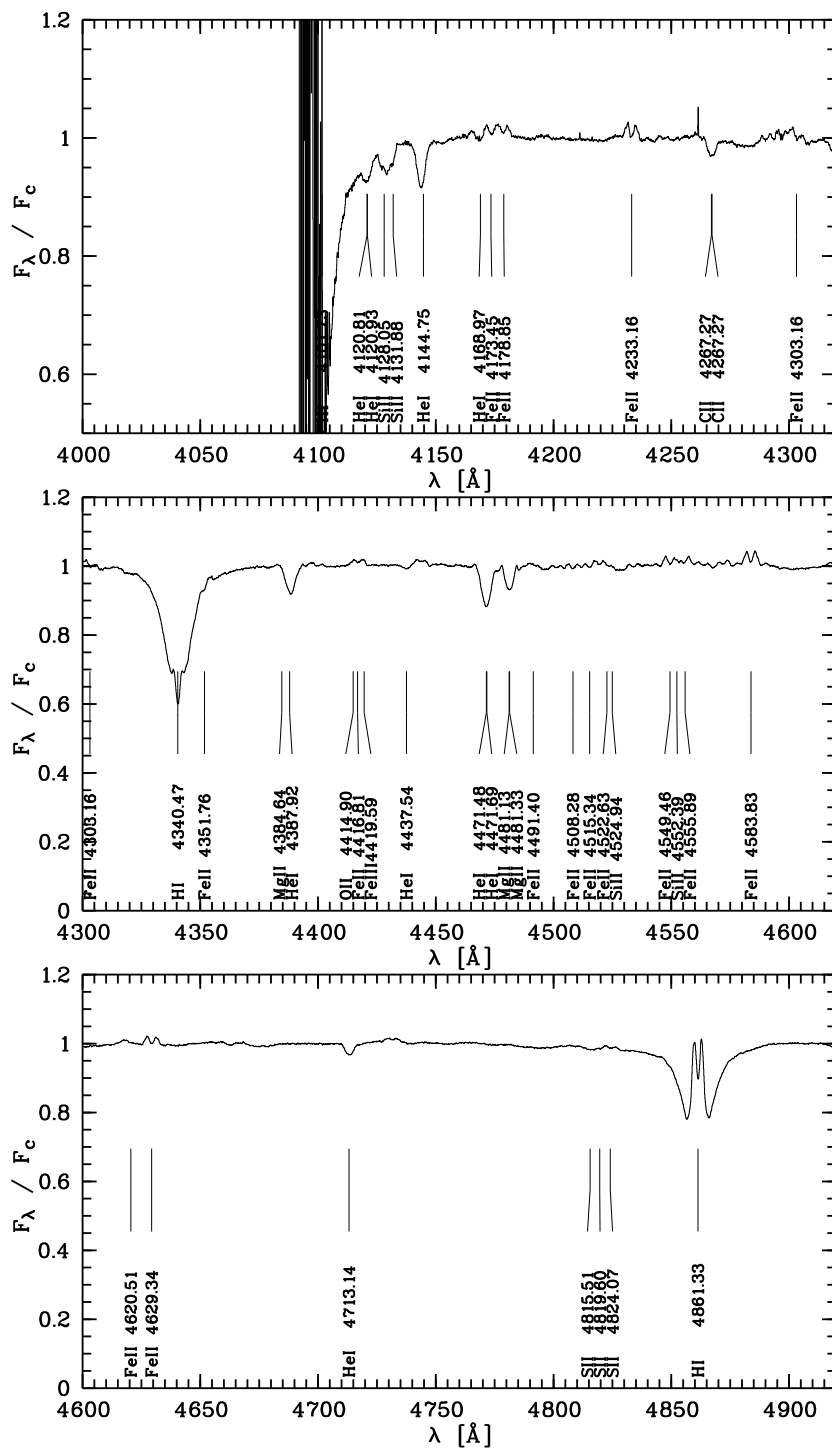
Alulírott, szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel. Tudomásul veszem azt, hogy szakdolgozatomat/diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek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

aláírás

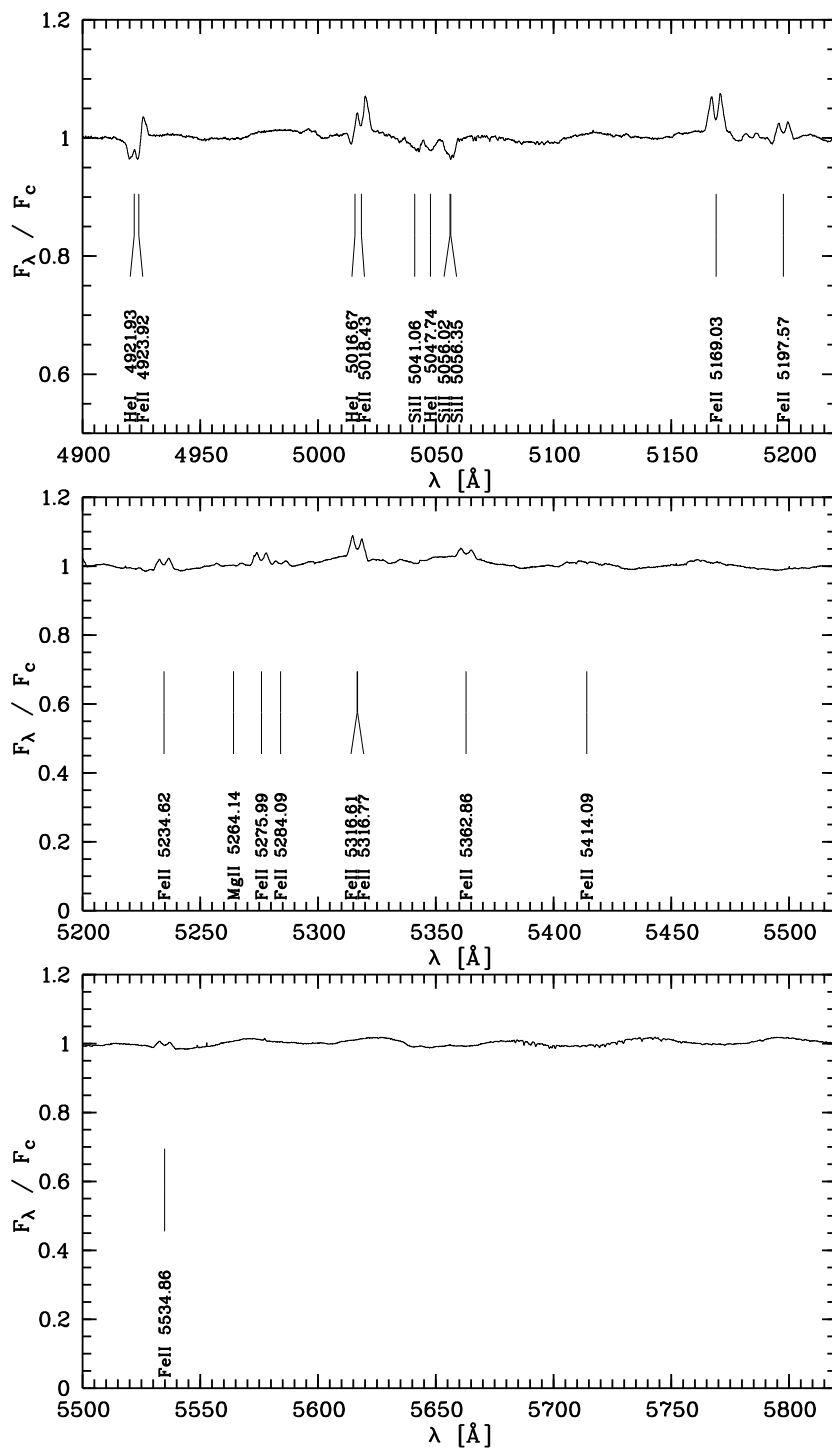
dátum

Függelék

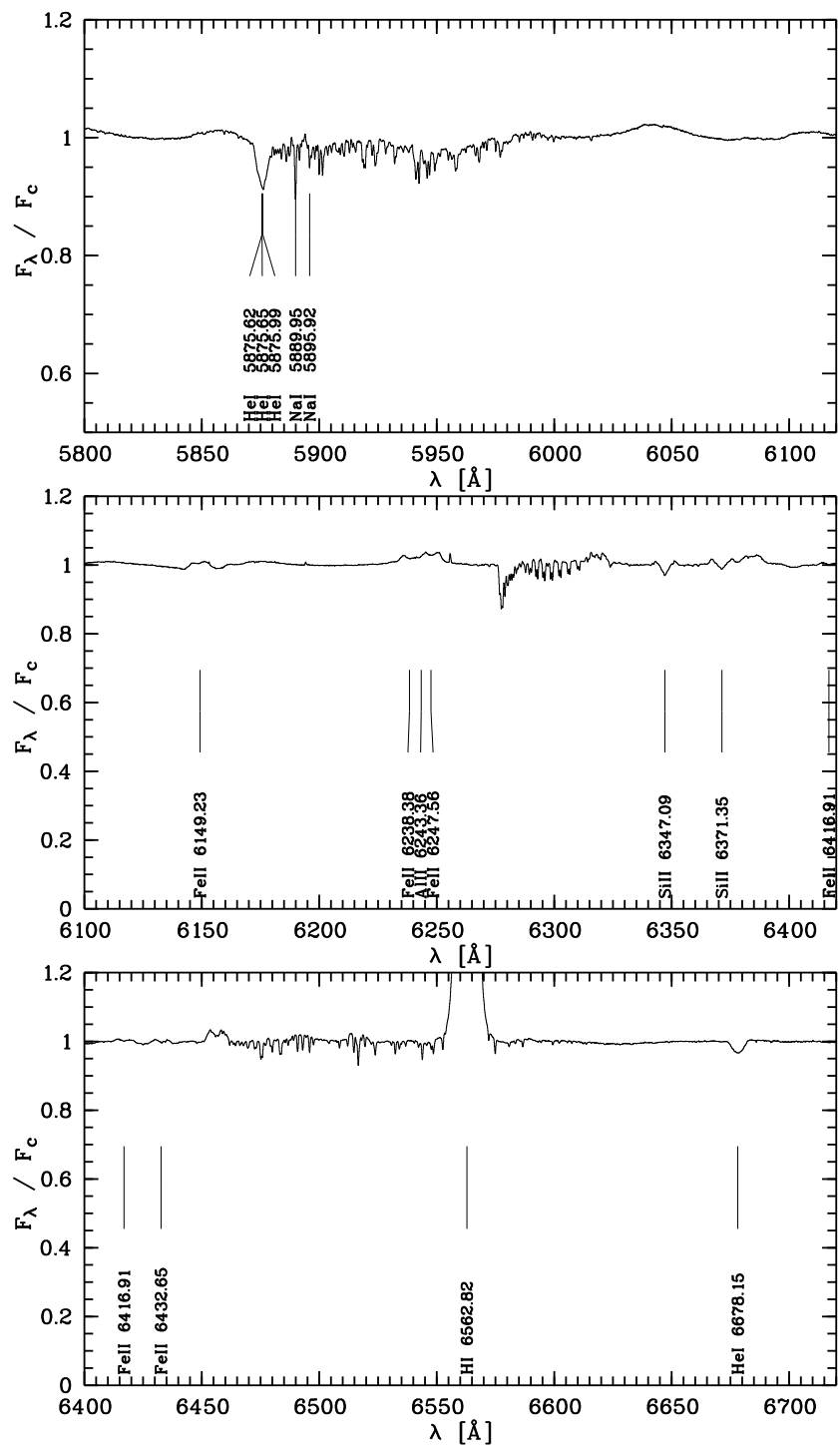
Vonalazonosítás a HD109387 csillag spektrumán



33. ábra. Vonalonosítás a HD109387 csillag spektrumán, 4000-4900 \AA .

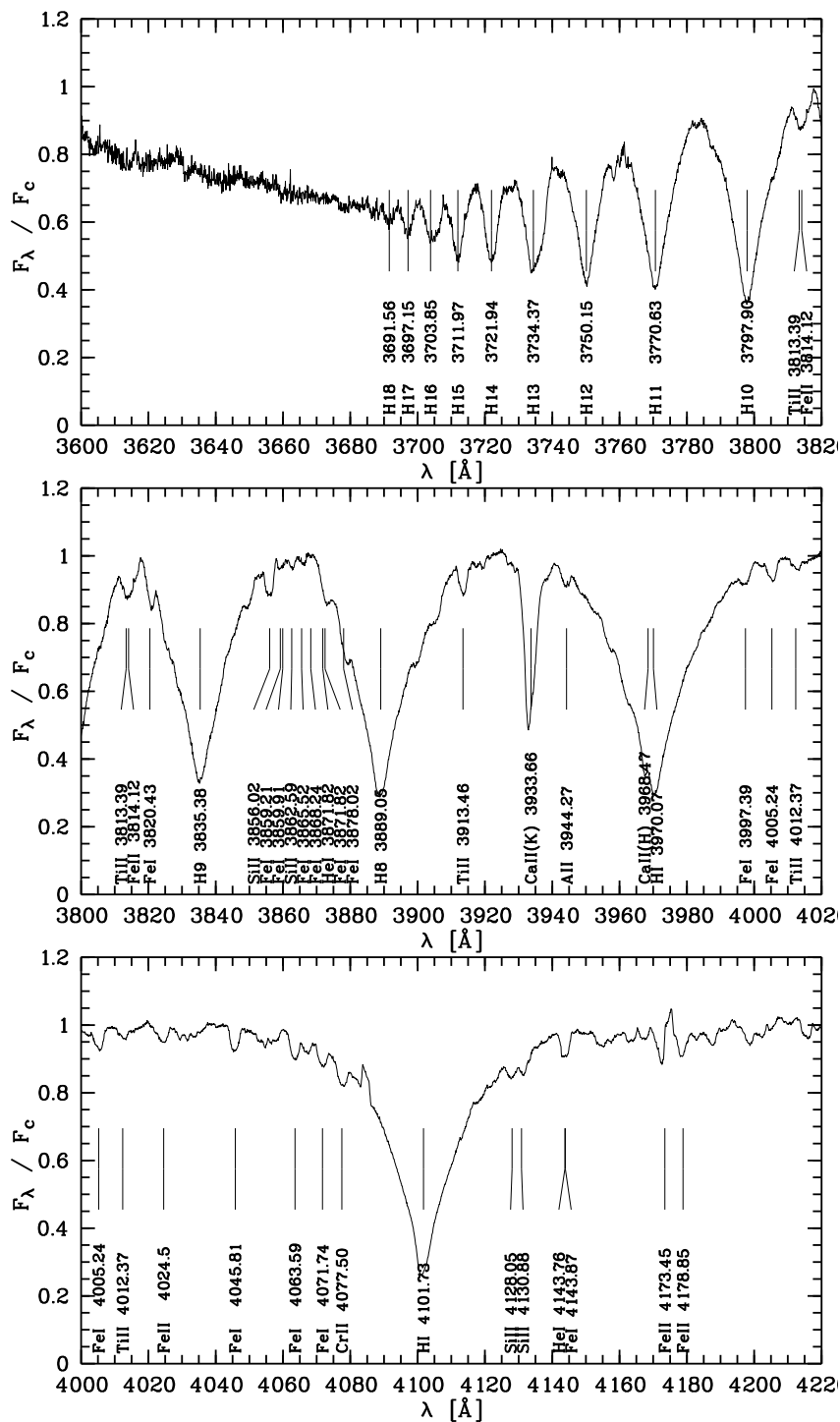


34. ábra. Vonalonosítás a HD109387 csillag spektrumán, 4900-5800 \AA .

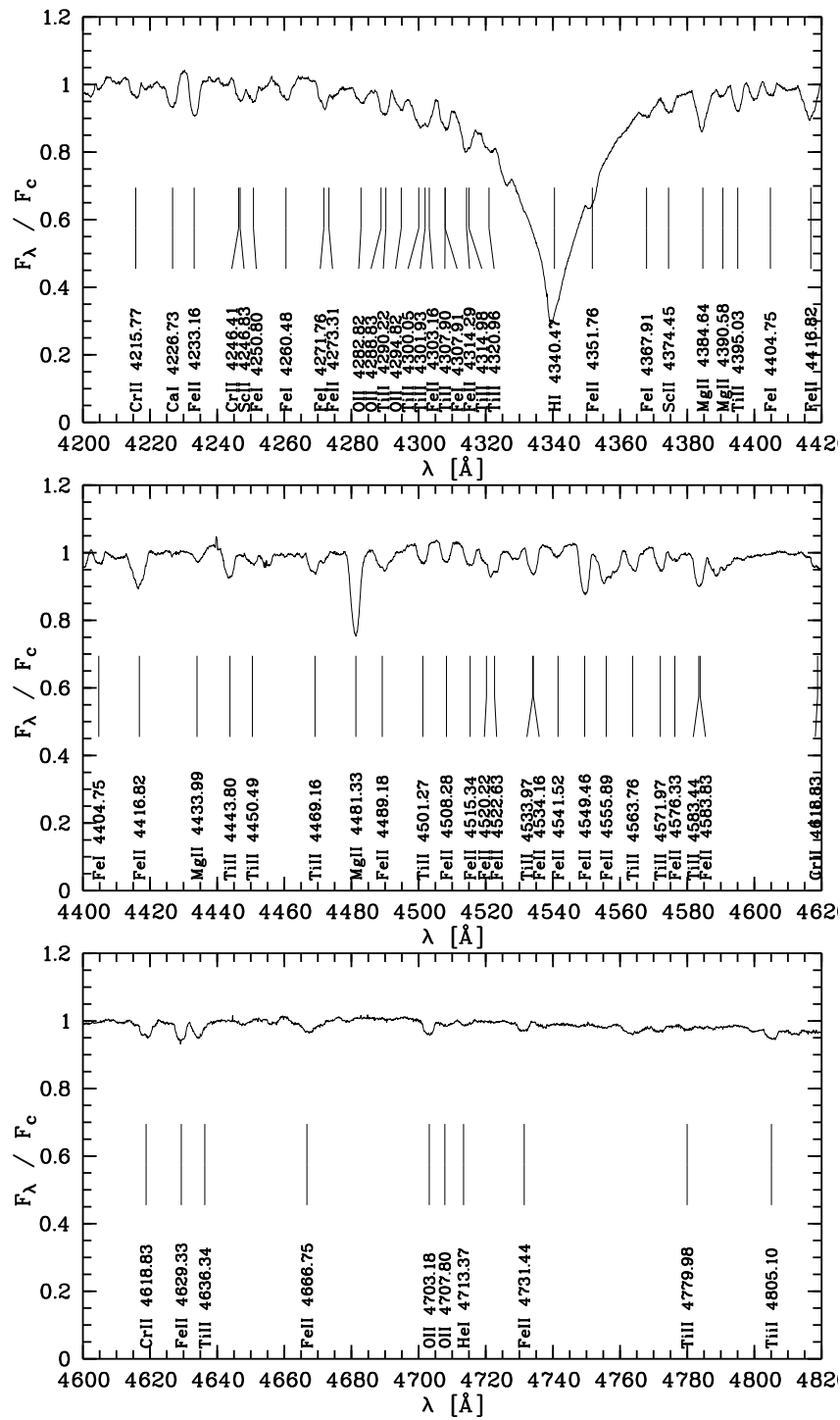


35. ábra. Vonalazonosítás a HD109387 csillag spektrumán, 5800-6700 \AA .

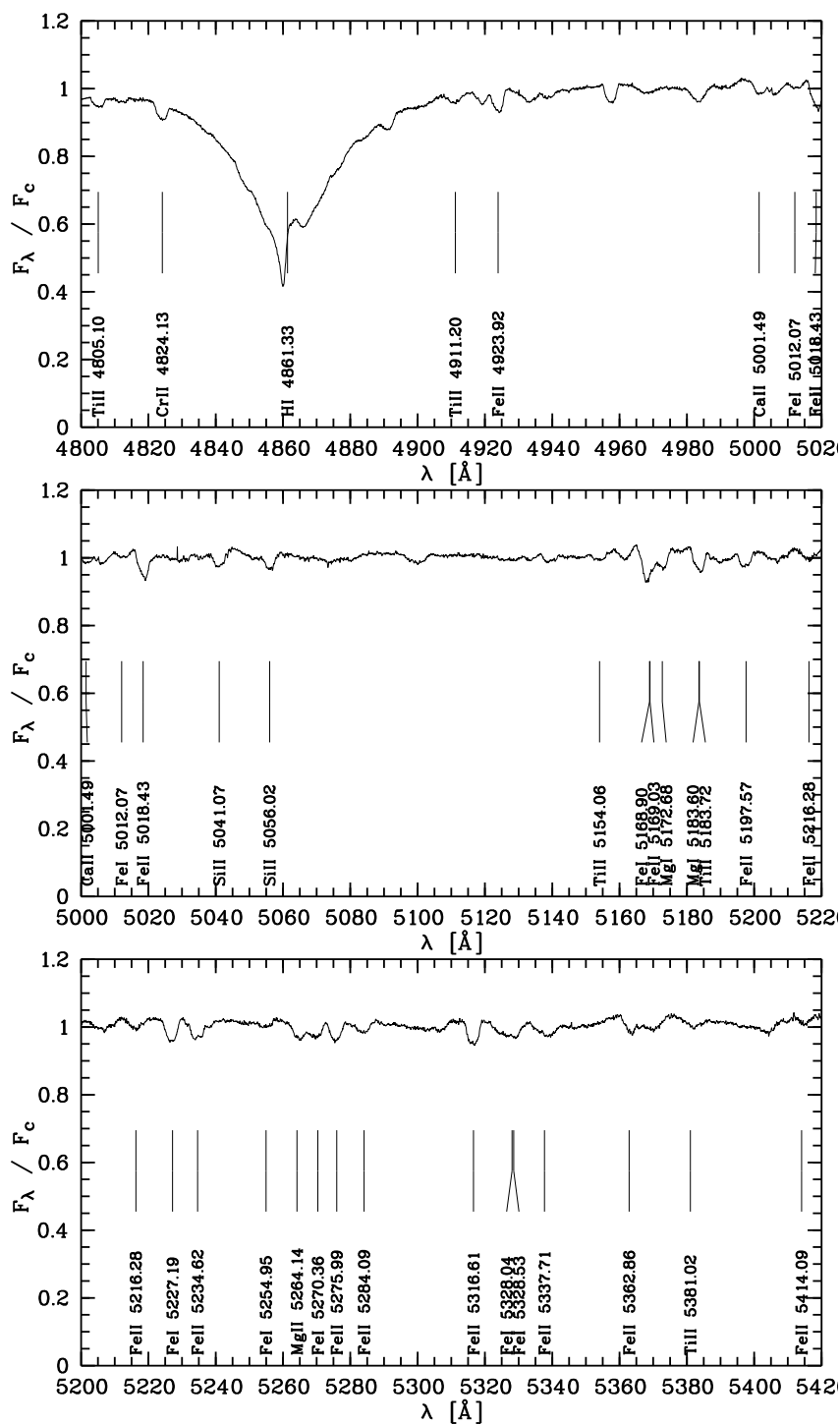
Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán



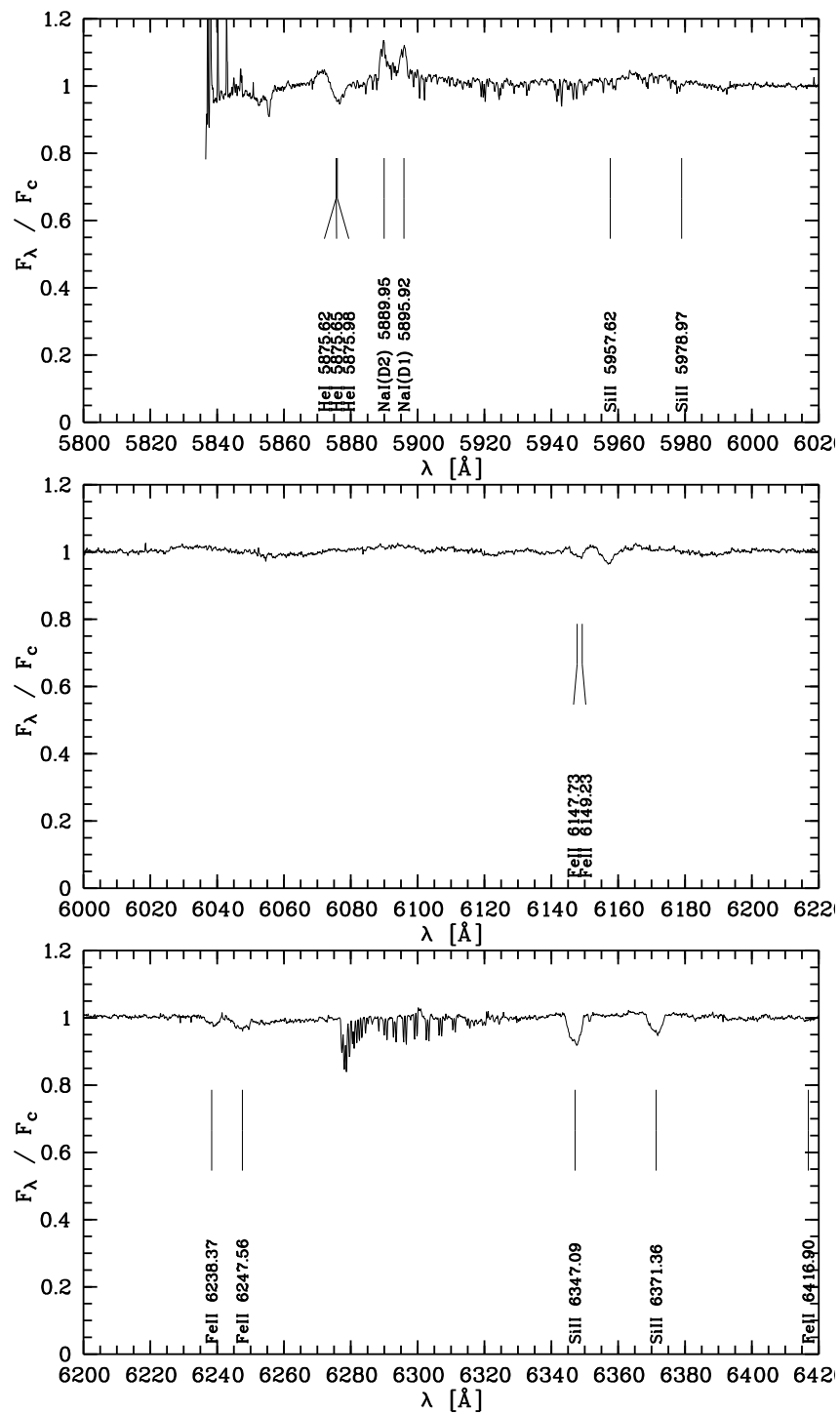
36. ábra. Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 3800-4220 Å.



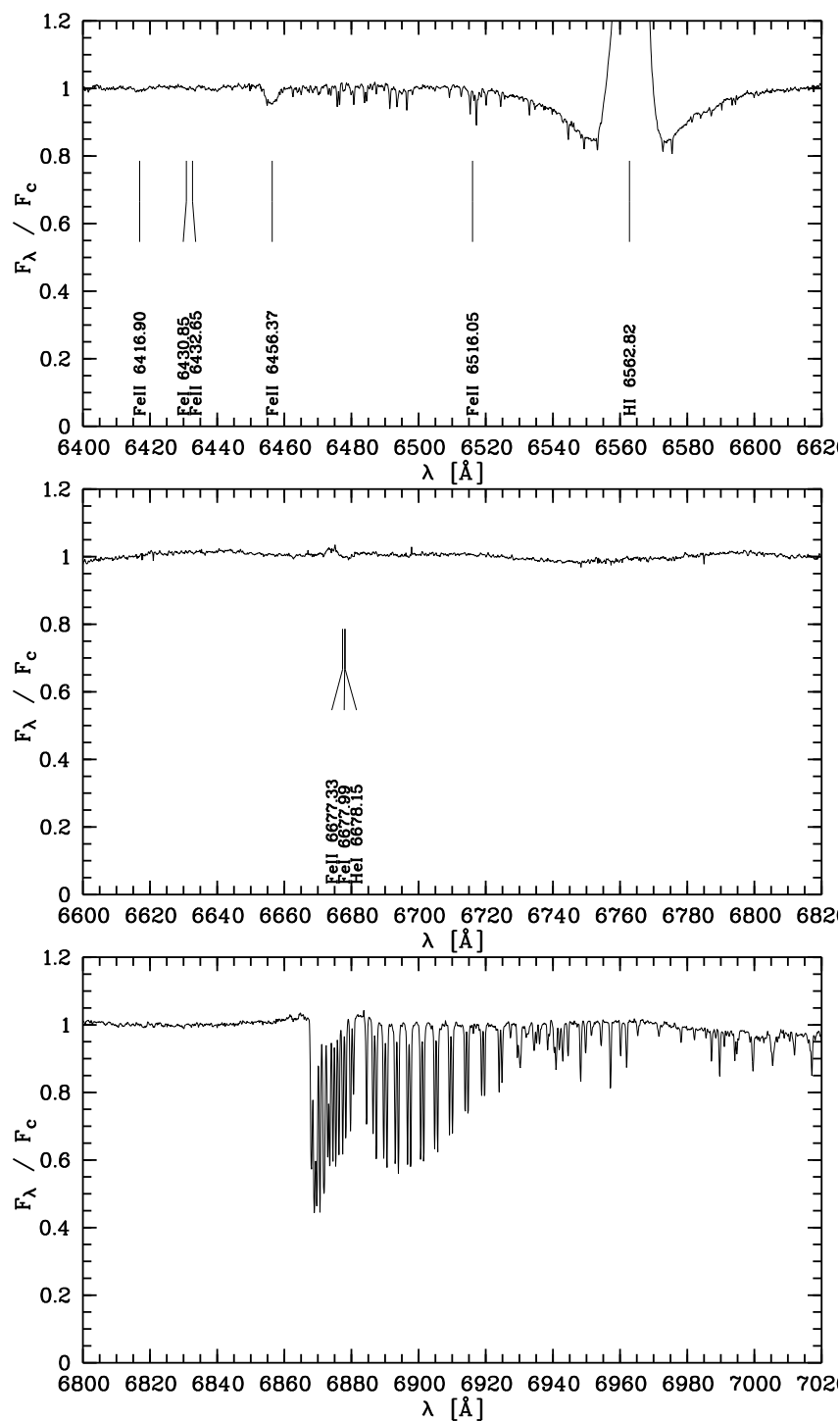
37. ábra. Vonalonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 4200-4820 \AA .



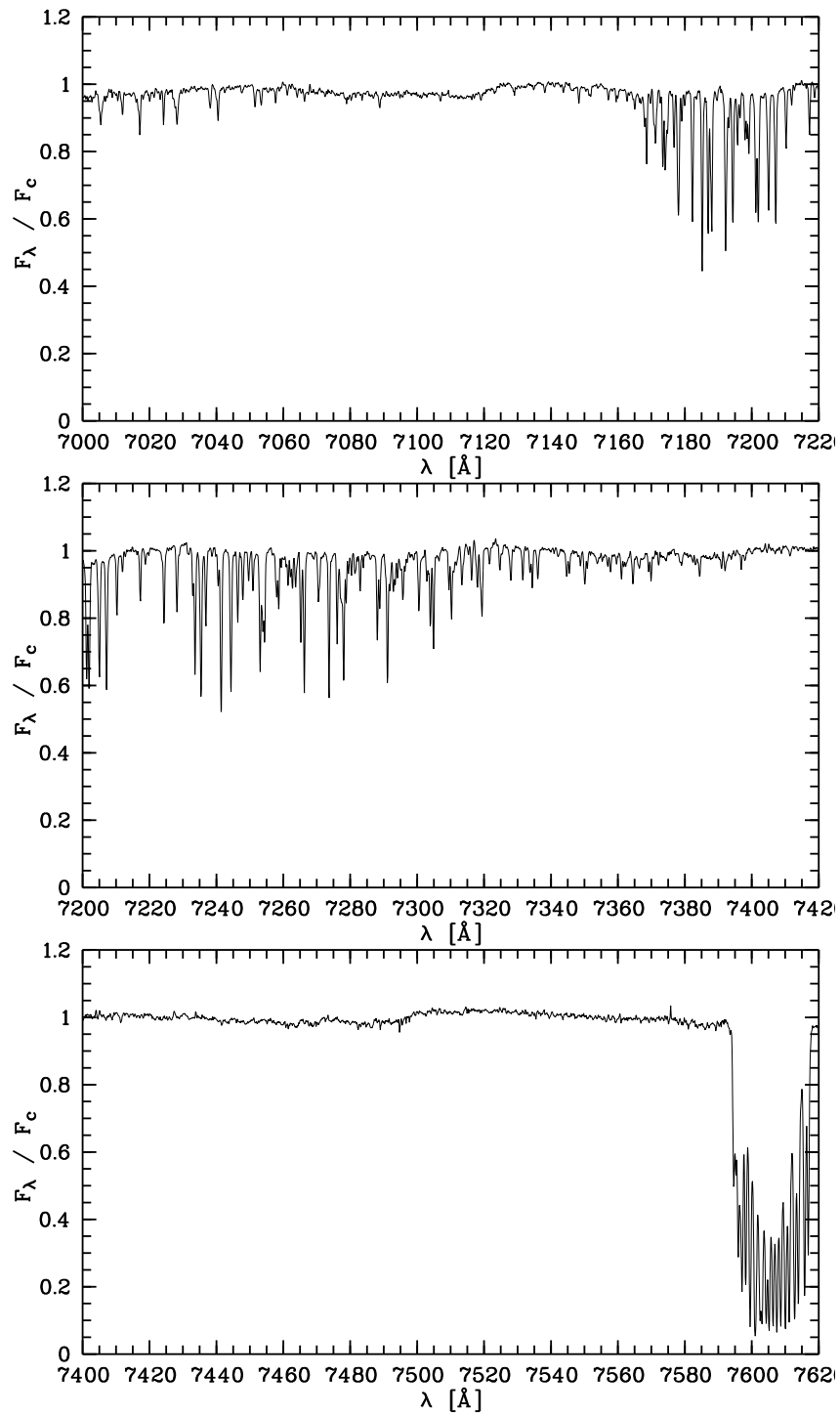
38. ábra. Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 4800-5420 \AA .



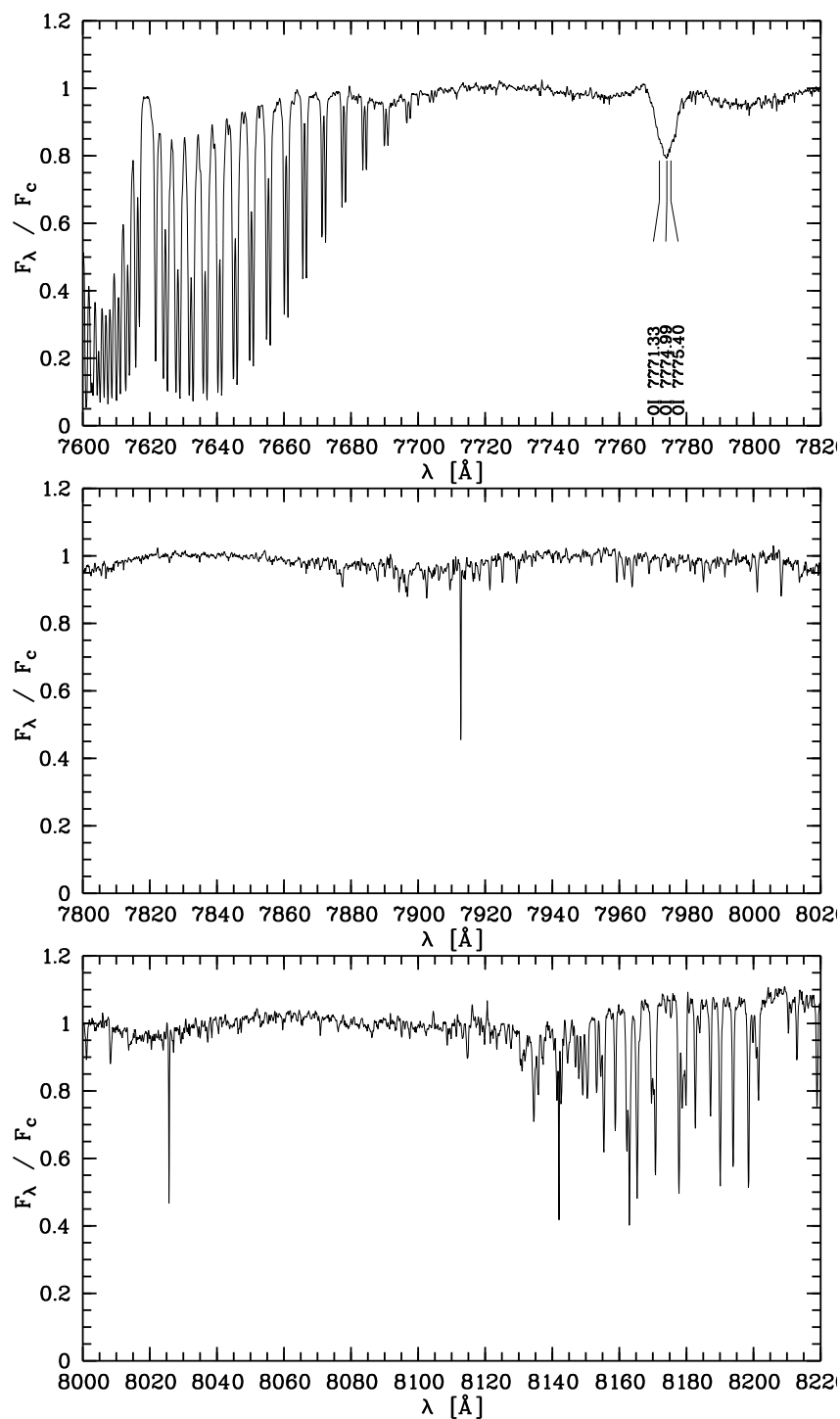
39. ábra. Vonalazonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 5800-6420 \AA .



40. ábra. Vonalonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 6400-7020 \AA .

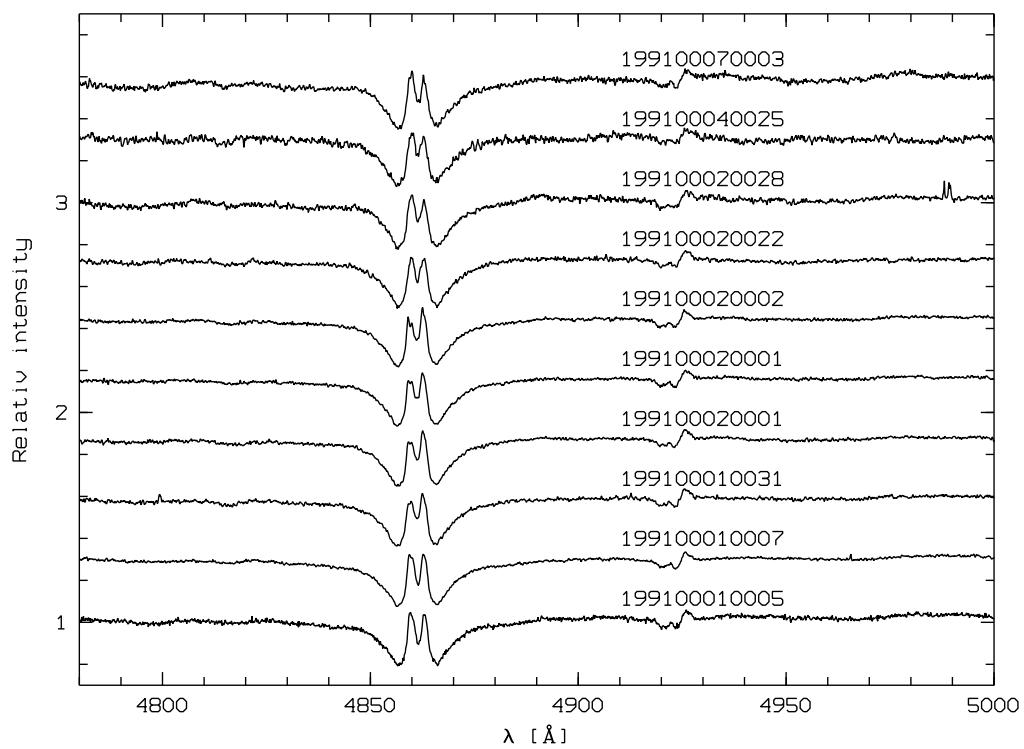
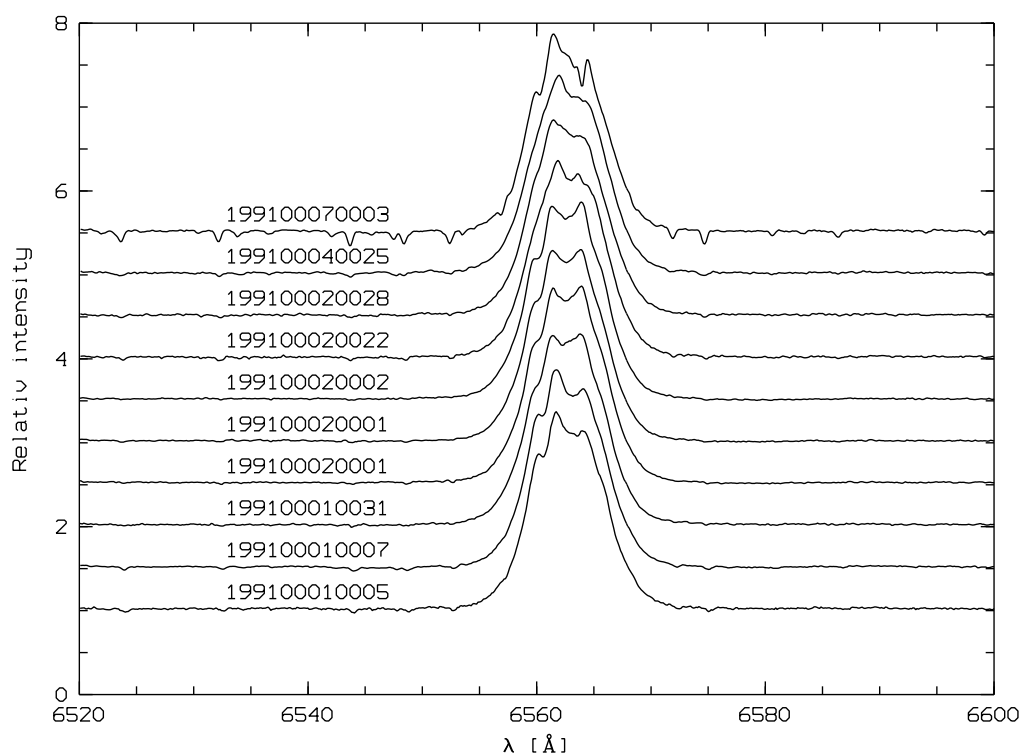


41. ábra. Vonalonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 7000-7620 \AA .

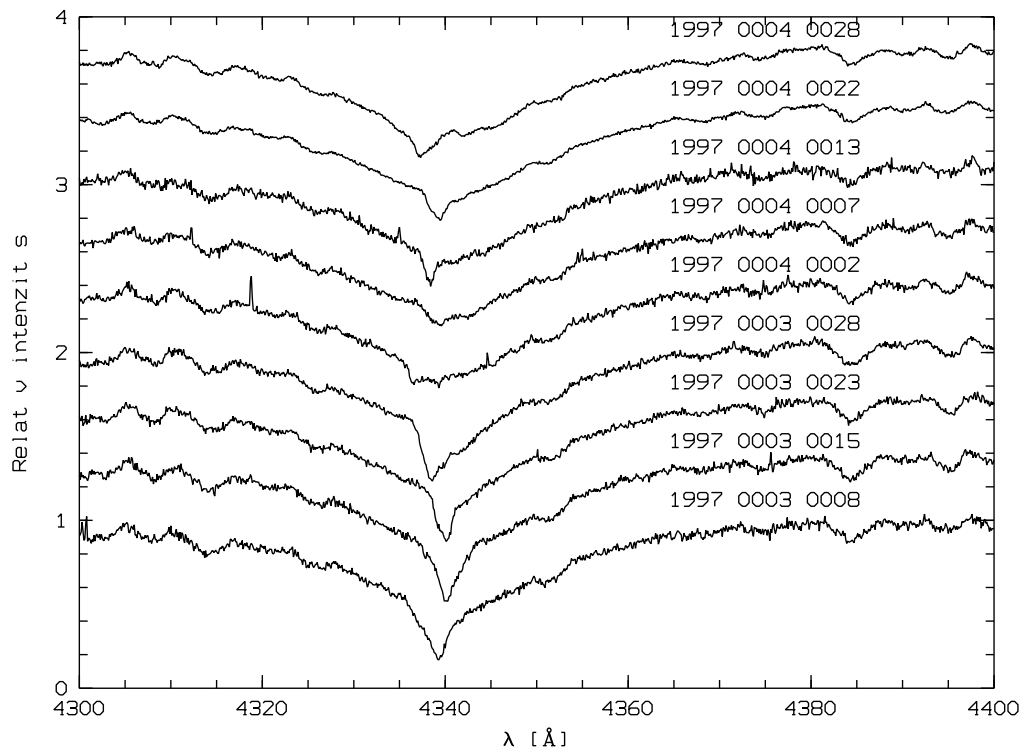
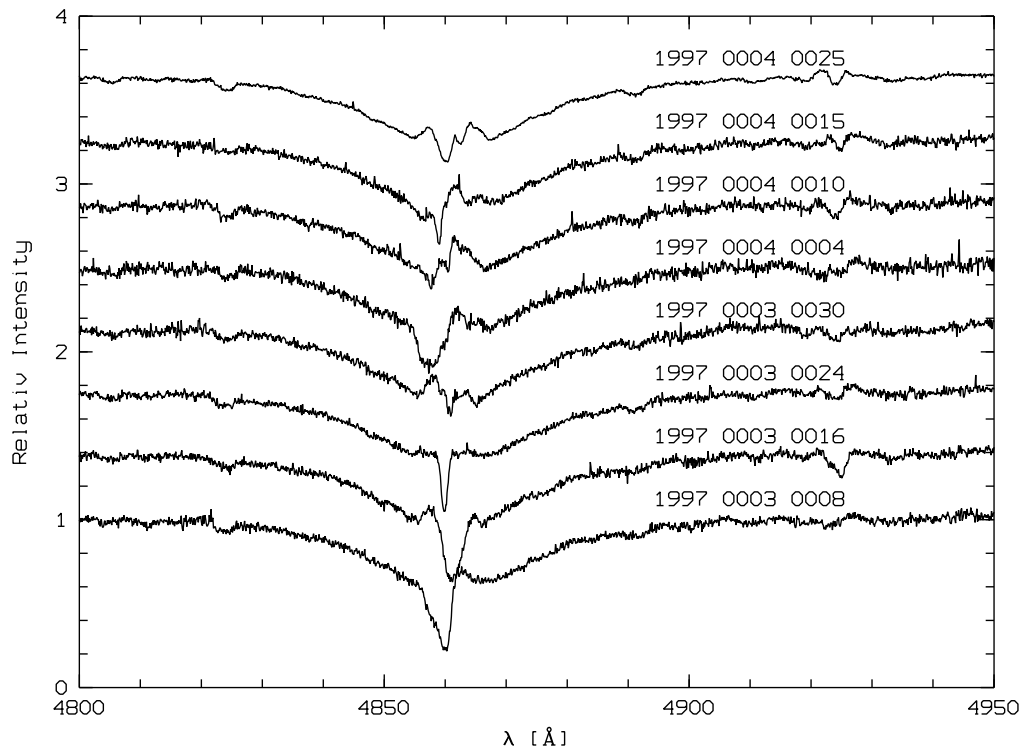


42. ábra. Vonalonosítás a HD163296 csillag spektrumán, 7600-8220 Å.

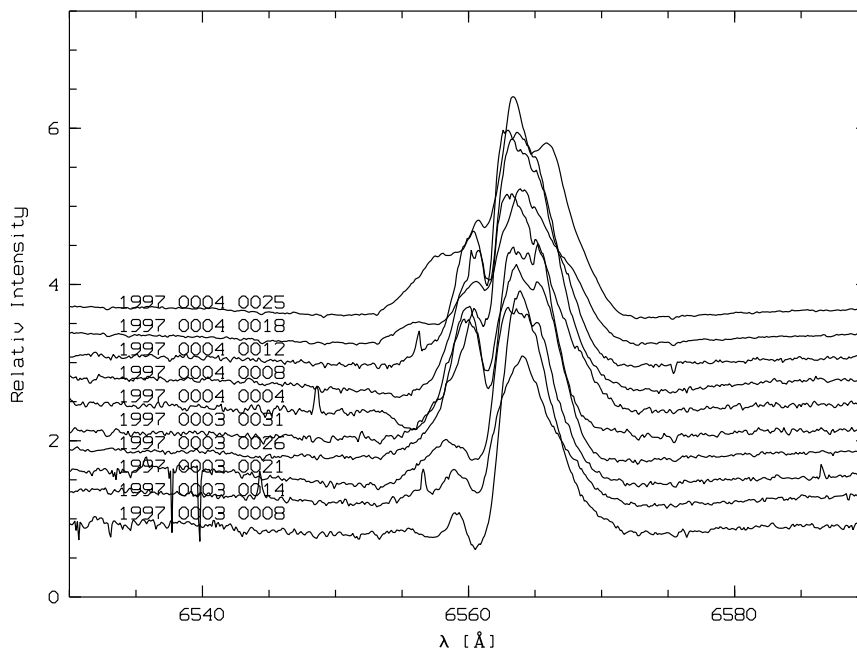
**Vonalprofilok változásai a HD109387 csillag és a HD163296
csillag esetében**



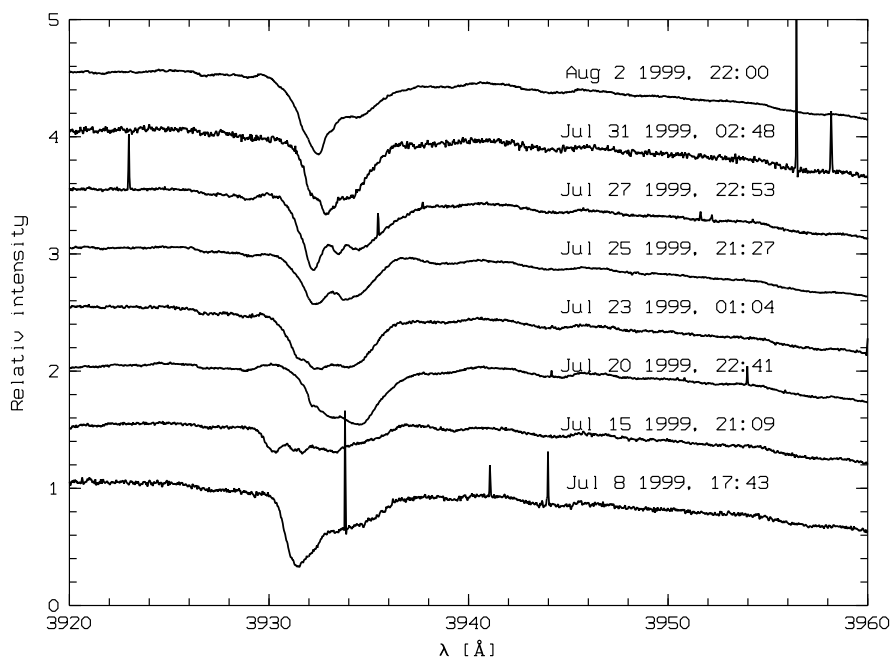
43. ábra. A HD109387 csillag $H\alpha$ és $H\beta$ vonalának változását szemlélteti az ábra néhány spektrumot kiragadva a 188 spektrumból.



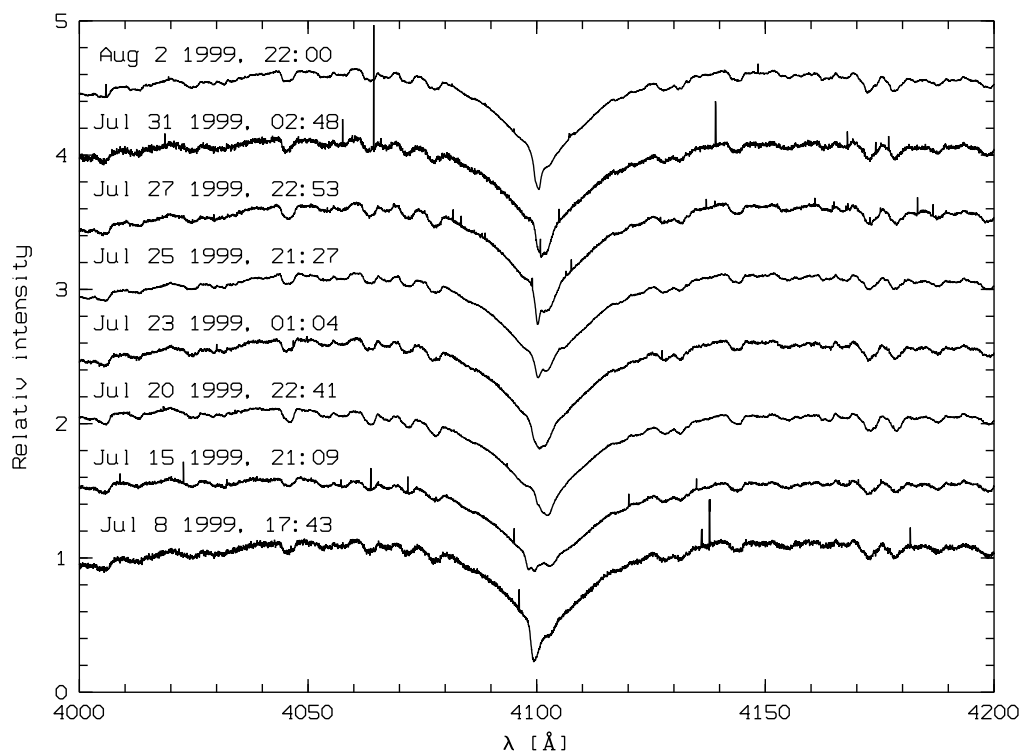
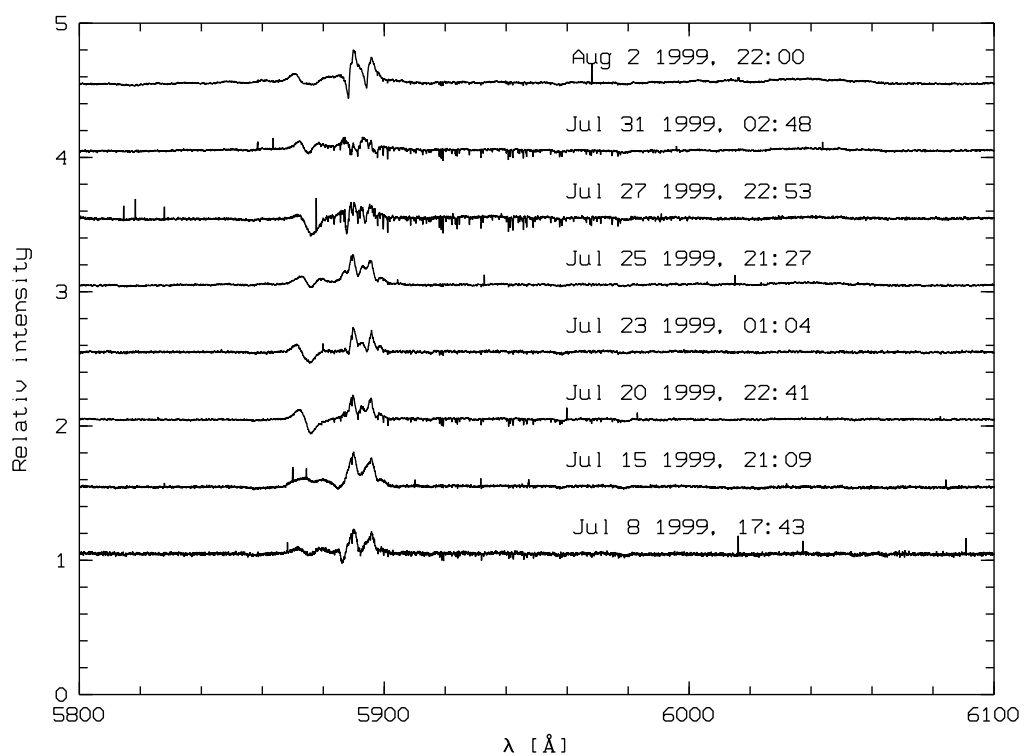
44. ábra. A HD163296 csillag $H\beta$ és $H\gamma$ vonalának változásit szemlélteti az ábra néhány spektrumot kiragadva a 113 spektrumból.



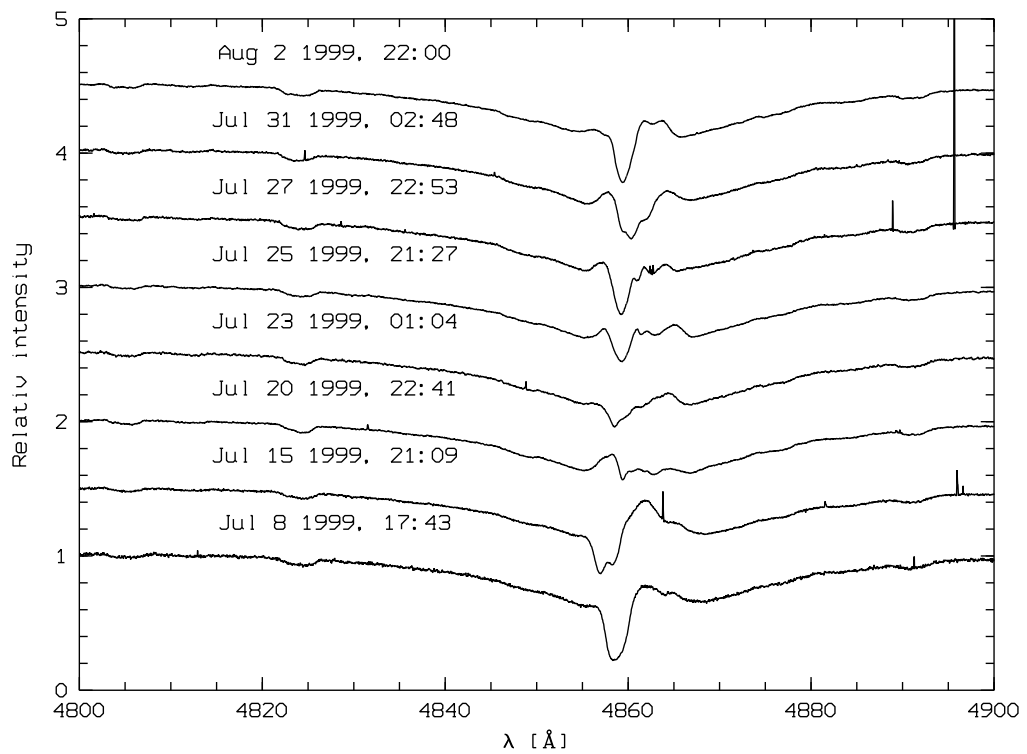
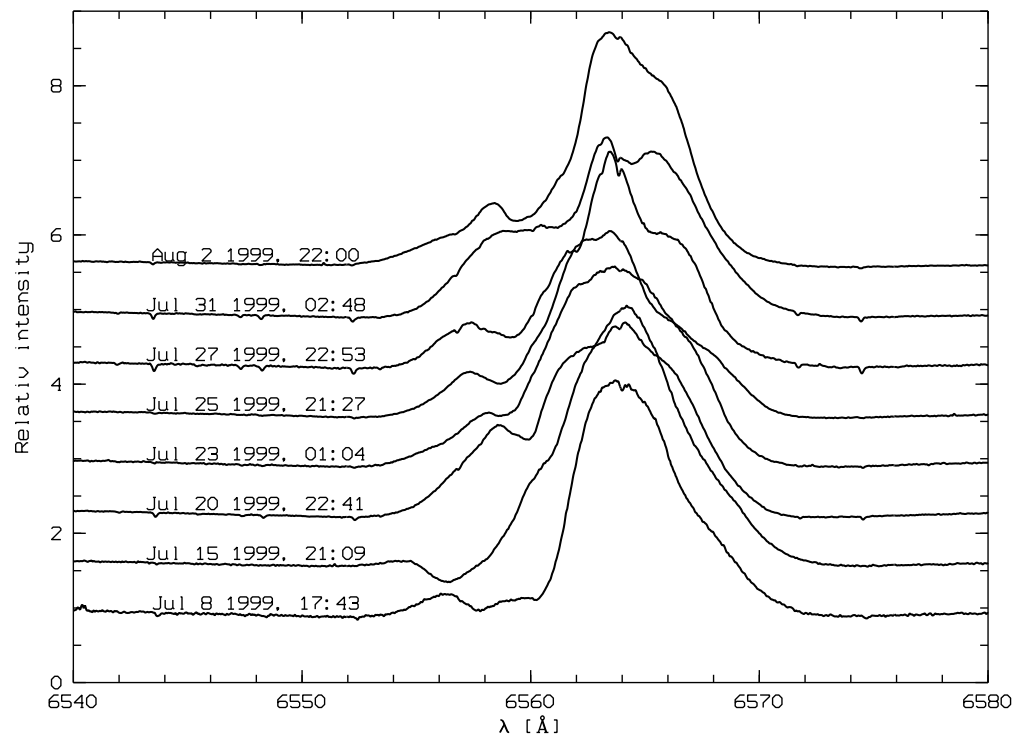
45. ábra. A HD163296 csillag H α vonalának változásit szemlélteti az ábra néhány spektrumot kiragadva a 117 spektrumból.



46. ábra. A HD163296 csillag CaII 3933 Å vonalának változásit szemlélteti az ábra néhány spektrumot kiragadva a 78 spektrumból.



47. ábra. A HD163296 csillag HeI 5876 Å + NaI D1,D2 és a H δ vonalának változásit szemlélteti az ábra néhány spektrumot kiragadva a 78 spektrumból.



48. ábra. A HD163296 csillag H α és H β vonalának változásit szemlélteti az ábra néhány spektrumot kiragadva a 78 spektrumból.

**A HD109387 Be csillag és a HD163296 HAeBe csillag
spektrumainak adatai**

no.	év	hó	nap	óra	MJD	no.	év	hó	nap	óra	MJD	no.	év	hó	nap	óra	MJD	no.	év	hó	nap	óra	MJD
1	1991	1	5	0.900	48261.03750	51	1991	1	31	4.300	48287.17917	101	1991	2	2	4.400	48289.18333	151	1991	4	24	22.700	48370.94583
2	1991	1	5	1.300	48261.05417	52	1991	1	31	4.500	48287.18750	102	1991	2	2	4.600	48289.19167	152	1991	4	24	23.100	48370.96250
3	1991	1	5	1.500	48261.06250	53	1991	1	31	4.600	48287.19167	103	1991	2	2	4.800	48289.20000	153	1991	4	24	23.300	48370.97083
4	1991	1	5	1.700	48261.07083	54	1991	1	31	4.800	48287.20000	104	1991	2	2	4.900	48289.20417	154	1991	4	24	23.500	48370.97917
5	1991	1	5	1.900	48261.07917	55	1991	1	31	5.000	48287.20833	105	1991	2	3	1.400	48005833	155	1991	4	24	23.700	48370.98750
6	1991	1	5	2.100	48261.08750	56	1991	1	31	5.200	48287.21667	106	1991	2	3	1.600	48006667	156	1991	4	24	23.800	48370.99167
7	1991	1	5	2.300	48261.09583	57	1991	1	31	5.400	48287.22500	107	1991	2	3	1.800	48007500	157	1991	4	25	0.100	48371.00417
8	1991	1	5	2.500	48261.10417	58	1991	1	31	5.600	48287.23333	108	1991	2	3	2.000	48008333	158	1991	4	25	0.200	48371.00833
9	1991	1	5	2.700	48261.11250	59	1991	1	31	5.800	48287.24167	109	1991	2	3	2.200	48009167	159	1991	4	25	0.400	48371.01667
10	1991	1	5	2.900	48261.12083	60	1991	2	1	0.100	48288.00417	110	1991	2	3	2.400	48000000	160	1991	4	25	0.600	48371.02500
11	1991	1	5	3.200	48261.13333	61	1991	2	1	0.300	48288.01250	111	1991	2	3	2.600	48000833	161	1991	4	25	0.800	48371.03333
12	1991	1	5	3.400	48261.14167	62	1991	2	1	0.500	48288.02083	112	1991	2	3	2.700	48001250	162	1991	5	28	22.100	48404.92083
13	1991	1	5	3.600	48261.15000	63	1991	2	1	0.700	48288.02917	113	1991	2	3	2.900	48002083	163	1991	5	28	22.300	48404.92917
14	1991	1	5	3.800	48261.15833	64	1991	2	1	0.900	48288.03750	114	1991	2	3	3.100	48002917	164	1991	5	28	22.500	48404.93750
15	1991	1	5	3.900	48261.16250	65	1991	2	1	1.100	48288.04583	115	1991	2	3	3.300	48003750	165	1991	5	28	22.700	48404.94583
16	1991	1	5	4.200	48261.17500	66	1991	2	1	1.300	48288.05417	116	1991	2	3	3.500	48004583	166	1991	5	28	22.900	48404.95417
17	1991	1	5	4.400	48261.18333	67	1991	2	1	1.900	48288.07917	117	1991	2	4	2.900	48291.12083	167	1991	6	1	21.500	48408.89583
18	1991	1	5	4.500	48261.18750	68	1991	2	1	2.100	48288.08750	118	1991	2	4	4.700	48291.19583	168	1991	6	1	21.600	48408.90000
19	1991	1	7	2.400	48263.10000	69	1991	2	1	2.500	48288.10417	119	1991	2	4	5.100	48291.21250	169	1991	6	1	21.700	48408.90417
20	1991	1	7	2.600	48263.10833	70	1991	2	1	2.700	48288.11250	120	1991	2	4	5.500	48291.22917	170	1991	6	1	22.000	48408.91667
21	1991	1	7	2.800	48263.11667	71	1991	2	1	2.800	48288.11667	121	1991	2	22	1.100	48309.04583	171	1991	6	1	22.200	48408.92500
22	1991	1	7	2.900	48263.12083	72	1991	2	1	3.000	48288.12500	122	1991	2	22	1.300	48309.05417	172	1991	6	1	22.300	48408.92917
23	1991	1	7	3.100	48263.12917	73	1991	2	1	3.300	48288.13750	123	1991	2	22	1.500	48309.06250	173	1991	6	1	22.500	48408.93750
24	1991	1	7	3.300	48263.13750	74	1991	2	1	3.400	48288.14167	124	1991	2	22	1.700	48309.07083	174	1991	6	1	22.700	48408.94583
25	1991	1	7	3.500	48263.14583	75	1991	2	1	3.600	48288.15000	125	1991	2	22	1.800	48309.07500	175	1991	6	1	22.900	48408.95417
26	1991	1	7	3.700	48263.15417	76	1991	2	1	3.800	48288.15833	126	1991	2	22	2.000	48309.08333	176	1991	7	3	0.800	48440.86667
27	1991	1	8	3.100	48264.12917	77	1991	2	1	4.000	48288.16667	127	1991	2	22	2.200	48309.09167	177	1991	7	3	21.000	48440.87500
28	1991	1	8	3.300	48264.13750	78	1991	2	1	4.200	48288.17500	128	1991	2	22	2.400	48309.10000	178	1991	7	3	21.200	48440.88333
29	1991	1	8	3.700	48264.15417	79	1991	2	1	4.600	48288.19167	129	1991	2	22	2.600	48309.10833	179	1991	7	3	21.400	48440.89167
30	1991	1	8	3.900	48264.16250	80	1991	2	1	4.700	48288.19583	130	1991	2	22	2.800	48309.11667	180	1991	7	3	21.700	48440.90417
31	1991	1	8	4.200	48264.17500	81	1991	2	1	4.900	48288.20417	131	1991	2	23	0.900	4830.03750	181	1991	7	3	21.900	48440.91250
32	1991	1	8	4.400	48264.18333	82	1991	2	1	5.100	48288.21250	132	1991	2	23	1.100	4830.04583	182	1991	7	6	0.700	48443.86250
33	1991	1	8	4.500	48264.18750	83	1991	2	1	5.300	48288.22083	133	1991	2	23	1.300	4830.05417	183	1991	7	6	0.900	48443.87083
34	1991	1	8	4.700	48264.19583	84	1991	2	2	1.100	48289.04583	134	1991	2	23	1.500	4830.06250	184	1991	7	6	21.100	48443.87917
35	1991	1	8	4.900	48264.20417	85	1991	2	2	1.300	48289.05417	135	1991	2	23	1.700	4830.07083	185	1991	7	6	21.300	48443.88750
36	1991	1	8	5.100	48264.21250	86	1991	2	2	1.500	48289.06250	136	1991	2	23	1.900	4830.07917	186	1991	7	6	21.500	48443.89583
37	1991	1	8	5.400	48264.22500	87	1991	2	2	1.700	48289.07083	137	1991	2	23	2.100	4830.08750	187	1991	7	6	21.700	48443.90417
38	1991	1	8	5.600	48264.23333	88	1991	2	2	1.900	48289.07917	138	1991	2	23	2.300	4830.09583	188	1991	7	6	21.900	48443.91250
39	1991	1	8	5.900	48264.24583	89	1991	2	2	2.000	48289.08333	139	1991	2	23	2.500	4830.10417						
40	1991	1	31	1.900	48287.07917	90	1991	2	2	2.200	48289.09167	140	1991	2	27	23.900	48314.99583						
41	1991	1	31	2.100	48287.08750	91	1991	2	2	2.400	48289.10000	141	1991	2	28	0.200	48315.00833						
42	1991	1	31	2.300	48287.09583	92	1991	2	2	2.600	48289.10833	142	1991	2	28	0.400	48315.01667						
43	1991	1	31	2.500	48287.10417	93	1991	2	2	2.800	48289.11667	143	1991	2	28	0.500	48315.02083						
44	1991	1	31	2.700	48287.11250	94	1991	2	2	2.900	48289.12083	144	1991	2	28	0.700	48315.02917						
45	1991	1	31	2.900	48287.12083	95	1991	2	2	3.300	48289.13750	145	1991	2	28	0.900	48315.03750						
46	1991	1	31	3.100	48287.12917	96	1991	2	2	3.500	48289.14583	146	1991	2	28	1.100	48315.04583						
47	1991	1	31	3.300	48287.13750	97	1991	2	2	3.700	48289.15417	147	1991	2	28	1.300	48315.05417						
48	1991	1	31	3.400	48287.14167	98	1991	2	2	3.900	48289.16250	148	1991	2	28	1.600	48315.06667						
49	1991	1	31	3.600	48287.15000	99	1991	2	2	4.000	48289.16667	149	1991	2	28	1.800	48315.07500						
50	1991	1	31	4.100	48287.17083	100	1991	2	2	4.200	48289.17500	150	1991	4	2	23.500	48348.97917						

68

5. táblázat. A FLASH spektrumok adatait mutatja a táblázat. Az egyes oszlopokban a mérések idő adatai szerepelnek az év, hónap, nap, óra UT-ben és a módosított Julián dátum megadásával.

no.	év	hó	nap	MJD	no.	év	hó	nap	MJD
1	1997	3	8	50515.39385	61	1997	4	4	50542.28810
2	1997	3	9	50516.33581	62	1997	4	4	50542.34608
3	1997	3	9	50516.39328	63	1997	4	4	50542.40208
4	1997	3	10	50517.34097	64	1997	4	5	50543.28852
5	1997	3	10	50517.39239	65	1997	4	5	50543.34697
6	1997	3	11	50518.32452	66	1997	4	5	50543.40352
7	1997	3	11	50518.37692	67	1997	4	6	50544.28901
8	1997	3	12	50519.33495	68	1997	4	6	50544.34528
9	1997	3	12	50519.38503	69	1997	4	6	50544.40607
10	1997	3	13	50520.33713	70	1997	4	7	50545.28257
11	1997	3	13	50520.38506	71	1997	4	7	50545.33871
12	1997	3	14	50521.30557	72	1997	4	7	50545.39308
13	1997	3	14	50521.36906	73	1997	4	8	50546.28323
14	1997	3	15	50522.32293	74	1997	4	8	50546.33952
15	1997	3	15	50522.38638	75	1997	4	8	50546.39405
16	1997	3	16	50523.29184	76	1997	4	10	50548.28781
17	1997	3	16	50523.34681	77	1997	4	10	50548.34556
18	1997	3	16	50523.39699	78	1997	4	10	50548.40157
19	1997	3	17	50524.29362	79	1997	4	11	50549.28782
20	1997	3	17	50524.34396	80	1997	4	11	50549.34579
21	1997	3	17	50524.39929	81	1997	4	11	50549.40350
22	1997	3	19	50526.33693	82	1997	4	12	50550.29893
23	1997	3	19	50526.39425	83	1997	4	12	50550.35987
24	1997	3	21	50528.36628	84	1997	4	12	50550.41428
25	1997	3	21	50528.40602	85	1997	4	13	50551.29733
26	1997	3	22	50529.39563	86	1997	4	13	50551.35538
27	1997	3	23	50530.28810	87	1997	4	13	50551.41160
28	1997	3	23	50530.34499	88	1997	4	14	50552.28833
29	1997	3	23	50530.39717	89	1997	4	14	50552.34610
30	1997	3	24	50531.29546	90	1997	4	14	50552.40399
31	1997	3	24	50531.34989	91	1997	4	15	50553.29664
32	1997	3	24	50531.39916	92	1997	4	15	50553.35492
33	1997	3	25	50532.28260	93	1997	4	15	50553.40880
34	1997	3	25	50532.34098	94	1997	4	18	50556.34630
35	1997	3	26	50533.28100	95	1997	4	19	50557.24175
36	1997	3	26	50533.34074	96	1997	4	20	50558.26649
37	1997	3	26	50533.39626	97	1997	4	21	50559.21388
38	1997	3	27	50534.27839	98	1997	4	22	50560.23969
39	1997	3	27	50534.33692	99	1997	4	22	50560.33207
40	1997	3	27	50534.39574	100	1997	4	23	50561.21303
41	1997	3	28	50535.28932	101	1997	4	23	50561.32253
42	1997	3	28	50535.33966	102	1997	4	23	50561.43432
43	1997	3	28	50535.39612	103	1997	4	24	50562.24131
44	1997	3	29	50536.27767	104	1997	4	24	50562.42847
45	1997	3	29	50536.33567	105	1997	4	25	50563.21684
46	1997	3	30	50537.27415	106	1997	4	25	50563.42653
47	1997	3	30	50537.33206	107	1997	4	26	50564.23637
48	1997	3	30	50537.39164	108	1997	4	26	50564.42838
49	1997	3	31	50538.29049	109	1997	4	27	50565.21543
50	1997	3	31	50538.34494	110	1997	4	27	50565.30002
51	1997	3	31	50538.39907	111	1997	4	27	50565.42759
52	1997	4	1	50539.27378	112	1997	4	28	50566.23966
53	1997	4	1	50539.33505	113	1997	4	28	50566.32586
54	1997	4	1	50539.39626	114	1997	4	28	50566.43065
55	1997	4	2	50539.77286					
56	1997	4	2	50539.83440					
57	1997	4	2	50539.89574					
58	1997	4	3	50541.28362					
59	1997	4	3	50541.34135					
60	1997	4	3	50541.39903					

6. táblázat. A HEROS kék oldali tartományában készült spektrumok adatait mutatja a táblázat. Az egyes oszlopokban a mérések idő adatai szerepelnek az év, hónap, nap és a módosított Julián dátum megadásával.

no.	év	hó	nap	MJD	no.	év	hó	nap	MJD
1	1997	3	8	50515.39306	61	1997	4	4	50542.28682
2	1997	3	9	50516.33424	62	1997	4	4	50542.34471
3	1997	3	9	50516.39172	63	1997	4	4	50542.40069
4	1997	3	10	50517.33872	64	1997	4	5	50543.28788
5	1997	3	10	50517.39009	65	1997	4	5	50543.34645
6	1997	3	11	50518.32152	66	1997	4	5	50543.40280
7	1997	3	11	50518.37384	67	1997	4	6	50544.28796
8	1997	3	12	50519.33117	68	1997	4	6	50544.34448
9	1997	3	12	50519.38127	69	1997	4	6	50544.40524
10	1997	3	13	50520.33563	70	1997	4	7	50545.28185
11	1997	3	13	50520.38355	71	1997	4	7	50545.33794
12	1997	3	14	50521.30348	72	1997	4	7	50545.39222
13	1997	3	14	50521.36686	73	1997	4	8	50546.28269
14	1997	3	15	50522.32004	74	1997	4	8	50546.33894
15	1997	3	15	50522.38343	75	1997	4	8	50546.39341
16	1997	3	16	50523.28823	76	1997	4	9	50547.28542
17	1997	3	16	50523.34315	77	1997	4	9	50547.34326
18	1997	3	16	50523.39330	78	1997	4	9	50547.39949
19	1997	3	17	50524.29286	79	1997	4	10	50548.28707
20	1997	3	17	50524.34317	80	1997	4	10	50548.34477
21	1997	3	17	50524.39818	81	1997	4	10	50548.40156
22	1997	3	19	50526.33465	82	1997	4	11	50549.28708
23	1997	3	19	50526.39195	83	1997	4	11	50549.34501
24	1997	3	21	50528.36565	84	1997	4	11	50549.40260
25	1997	3	21	50528.40538	85	1997	4	12	50550.29818
26	1997	3	22	50529.39422	86	1997	4	12	50550.35909
27	1997	3	23	50530.28605	87	1997	4	12	50550.41343
28	1997	3	23	50530.34289	88	1997	4	13	50551.29654
29	1997	3	23	50530.39504	89	1997	4	13	50551.35463
30	1997	3	24	50531.29442	90	1997	4	13	50551.41071
31	1997	3	24	50531.34881	91	1997	4	14	50552.28550
32	1997	3	24	50531.39804	92	1997	4	14	50552.34307
33	1997	3	25	50532.28205	93	1997	4	14	50552.40102
34	1997	3	25	50532.34039	94	1997	4	15	50553.29589
35	1997	3	26	50533.28049	95	1997	4	15	50553.35420
36	1997	3	26	50533.34025	96	1997	4	15	50553.40745
37	1997	3	26	50533.39574	97	1997	4	18	50556.34501
38	1997	3	27	50534.27723	98	1997	4	19	50557.24110
39	1997	3	27	50534.33572	99	1997	4	20	50558.26510
40	1997	3	27	50534.39453	100	1997	4	21	50559.21317
41	1997	3	28	50535.28862	101	1997	4	22	50560.23822
42	1997	3	28	50535.33895	102	1997	4	22	50560.33056
43	1997	3	28	50535.39536	103	1997	4	23	50561.21086
44	1997	3	29	50536.27698	104	1997	4	23	50561.32028
45	1997	3	29	50536.33490	105	1997	4	23	50561.43196
46	1997	3	30	50537.27340	106	1997	4	24	50562.24060
47	1997	3	30	50537.33126	107	1997	4	24	50562.42762
48	1997	3	30	50537.39081	108	1997	4	25	50563.21536
49	1997	3	31	50538.29000	109	1997	4	25	50563.42484
50	1997	3	31	50538.34435	110	1997	4	26	50564.23567
51	1997	3	31	50538.39844	111	1997	4	26	50564.42745
52	1997	4	1	50539.27323	112	1997	4	27	50565.21400
53	1997	4	1	50539.33444	113	1997	4	27	50565.29848
54	1997	4	1	50539.39560	114	1997	4	27	50565.42603
55	1997	4	2	50539.77233	115	1997	4	28	50566.23895
56	1997	4	2	50539.83381	116	1997	4	28	50566.32510
57	1997	4	2	50539.89510	117	1997	4	28	50566.42981
58	1997	4	3	50541.28294					
59	1997	4	3	50541.34064					
60	1997	4	3	50541.39869					

7. táblázat. A HEROS vörös oldali tartományában készült spektrumok adatait mutatja a táblázat. Az egyes oszlopokban a mérések idő adatai szerepelnek az év, hónap, nap és a módosított Julián dátum megadásával.

no.	év	hó	nap	óra	MJD
1	1999	7	8	17:43	51373.00655
2	1999	7	8	17:43	51373.08244
3	1999	7	8	17:43	51373.13689
4	1999	7	8	17:43	51373.23796
5	1999	7	8	17:43	51373.32671
6	1999	7	14	21:03	51374.04522
7	1999	7	14	23:02	51374.12955
8	1999	7	15	01:00	51374.20968
9	1999	7	15	01:47	51374.24447
10	1999	7	15	03:46	51374.32435
11	1999	7	15	21:09	51375.04910
12	1999	7	15	22:14	51375.09492
13	1999	7	15	23:20	51375.13909
14	1999	7	16	01:42	51375.23935
15	1999	7	16	02:41	51375.28093
16	1999	7	19	21:03	51379.04469
17	1999	7	19	22:50	51379.12145
18	1999	7	20	00:43	51379.19969
19	1999	7	20	02:30	51379.27230
20	1999	7	20	03:41	51379.32318
21	1999	7	20	22:41	51380.11316
22	1999	7	21	00:22	51380.18382
23	1999	7	21	03:08	51380.29969
24	1999	7	21	21:09	51381.04775
25	1999	7	21	22:56	51381.12256
26	1999	7	22	00:37	51381.19497
27	1999	7	22	02:35	51381.27609
28	1999	7	22	03:35	51381.31712
29	1999	7	22	21:06	51382.04661
30	1999	7	22	23:05	51382.12961
31	1999	7	23	01:04	51382.21449
32	1999	7	23	03:15	51382.30297
33	1999	7	23	21:00	51383.04405
34	1999	7	23	22:59	51383.12733
35	1999	7	24	01:06	51383.21429
36	1999	7	24	03:11	51383.30068
37	1999	7	24	20:27	51384.01895
38	1999	7	24	22:20	51384.09824
39	1999	7	25	00:20	51384.18181
40	1999	7	25	02:31	51384.27391
41	1999	7	25	21:27	51385.06356
42	1999	7	25	23:20	51385.13975
43	1999	7	26	01:43	51385.24007
44	1999	7	26	03:18	51385.30505
45	1999	7	26	19:08	51385.96457
46	1999	7	26	21:19	51386.06211
47	1999	7	26	22:48	51386.11905
48	1999	7	27	00:29	51386.18799
49	1999	7	27	02:22	51386.26838
50	1999	7	27	20:54	51387.03704
51	1999	7	27	22:53	51387.11950
52	1999	7	28	00:52	51387.20302
53	1999	7	28	22:59	51388.12508
54	1999	7	29	00:52	51388.20568
55	1999	7	29	19:41	51388.98737
56	1999	7	30	01:44	51389.24226
57	1999	7	30	19:34	51389.98453
58	1999	7	30	21:04	51390.04549
59	1999	7	30	22:57	51390.12590
60	1999	7	31	00:56	51390.20875
61	1999	7	31	02:48	51390.28565
62	1999	7	31	19:58	51391.00200
63	1999	7	31	21:27	51391.06458
64	1999	7	31	23:26	51391.14648
65	1999	8	1	01:48	51391.24350
66	1999	8	1	03:11	51391.30106
67	1999	8	1	21:44	51392.07418
68	1999	8	1	23:49	51392.15919
69	1999	8	2	01:47	51392.24497
70	1999	8	2	19:50	51392.99469
71	1999	8	2	22:00	51393.08483
72	1999	8	3	00:11	51393.17491
73	1999	8	3	02:09	51393.25808
74	1999	8	3	19:43	51393.99030
75	1999	8	3	21:12	51394.05101
76	1999	8	3	23:34	51394.15164
77	1999	8	4	01:26	51394.22738
78	1999	8	4	02:55	51394.28987

8. táblázat. A FEROS spektrumok adatait mutatja a táblázat. Az egyes oszlopokban a mérések idő adatai szerepelnek az év, hónap, nap, óra UT-ben és a módosított Julián dátum megadásával.

Hivatkozások

- [1] John M. Porter and Thomas Rivinius. Classical Be stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115:1153–1170, October 2003.
- [2] L.B.F.M. Waters and C. Waelkens. Herbig Ae/Be stars. *Annu. Rev. Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 36:233–266, 1998.
- [3] J. Hernandez, N. Calvet, C. Briceno, L. Hartmann and P. Berlind. Spectral analysis and classification of Herbig Ae/Be. *Astronomical Journal*, 127:1682–1701, 2004.
- [4] U. Finkenzeller. Rotation velocities, spectral types and forbidden lines of Herbig Ae/Be stars. *Astronomy and Astrophysics*, 151:340–348, 1985.
- [5] T. Böhm and C. Catala. Rotation, winds and active phenomena in Herbig Ae/Be stars. *Astronomy and Astrophysics*, 301:155–169, 1995.
- [6] I. Appenzeller. Herbig Ae/Be stars: The interface between low-mass and high-mass star formation. *ASP Conference Series*, 62:12–19, 1994.
- [7] C. Catala, T. Simon, F. Praderie, A. Talavera, P.S. Thé and H.R.E. Tjin A Djie. Active phenomena in the pre-main sequence Herbig Ae/Be star HD 163296. *Astronomy and Astrophysics*, 221:273–286, 1989.
- [8] A. Chokshi and M. Cohen. IR Excess in Be stars. *Astronomical Journal*, 94(1):123–, 1987.
- [9] W.A. Stein N.J. Woolf and P.A. Strittmatter. Infrared Emission from Be Stars. *Astronomy and Astrophysics*, 9:252–258, 1970.
- [10] R. D. Gehrz and J. A. Hackwell. Infrared observations of Be stars from 2.3 to 5.9 microns. *Astrophysical Journal*, 191:675–684, 1974.
- [11] F.J. Vrba L.A. Hillenbrand, S.E Strom and J. Keene. Line profile variability of the Be star κ Draconis. *Astrophysical Journal*, 397:613–643, 1992.
- [12] Hans Zinnecker and Thomas Preibisch. Rosat X-ray Observations of Herbig Ae/Be stars. *ASP Conference Series*, 62:281–290, 1994.
- [13] T.W. Berghörfer, J.H.M.M. Schmitt, R. Danner and J.P. Cassinelli. X-ray properties of bright OB-type stars detected in the ROSAT all-sky survey. *Astronomy and Astrophysics*, 126:438–439, 1983.
- [14] K. Pavlovski, P. Harmanec, H. Bozic, P. Hadrava, S. Kriz, Z. Ruzic and S. Stefl. UVB Photometry of Be stars at Hvar: 1972-1990. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 125:75–98, 1997.
- [15] A.M. Hubert and M. Floquet. Investigation of the variability of bright Be stars using Hipparcos photometry. *Astronomy and Astrophysics*, 335:565–572, 1998.

- [16] D. de Winter M.E. van den Ancker and H.R.E. Tjin A Djie. Hipparcos photometry of Herbig Ae/Be stars. *Astronomy and Astrophysics*, 330:145–154, 1998.
- [17] R. Poeckert. Linear polarization of H alpha in Be stars. *Astrophysical Journal*, 196:777–787, 1975.
- [18] P. Bastien R. Poeckert and J.D. Landstreet. Intrinsic polarization of Be stars. *Astronomical Journal*, 84:812–830, 1979.
- [19] V.P. Grinin. Polarimetric activity of Herbig Ae/Be stars. *ASP Conference Series*, 62:63–70, 1994.
- [20] H. Hubert M. Jaschek, A.-M. Hubert-Delplace and C. Jaschek. Classification of Be stars. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 42:103–114, 1980.
- [21] D. Kaiser J. Dachs, R. Hanuschik and D. Rohe. Geometry of rotating envelopes around Be stars derived from comparative analysis of Halpa emission line profiles. *Astronomy and Astrophysics*, 159:276–290, 1986.
- [22] Arne Slettebak. The Be stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 100:770–784, July 1988.
- [23] Karel Juza, Petr Harmanec, Grant M. Hill, Anatolii E. Tarasov, Jaymie M. Matthews, Illka Tuominen and Stephenson Yang. Properties and nature of Be stars. XVI - Closer to a solution of the puzzle of 5 κ Dra? *Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin*, 42:39–61, 1991.
- [24] M.R. Pirez D.A. Brown and F. Yusef-Zadeh. Radio-continuum observations of the Herbig Ae/Be stars HD163296 and HR 5999. *Astronomical Journal*, 106(5):2000–2004, 1993.
- [25] P.S. Thé, P. Felenbok, H. Cuypers and H.R.E. Tjin A Djie. High resolution spectroscopy and photometric study of the possibility that HD 76534 and HD 163296 are Herbig Ae/Be-type stars. *Astronomy and Astrophysics*, 149:429–436, 1985.
- [26] A.B. Underhill, L. Divan, M-L. Prevot-Burnichon and V. Doazan. Effective temperatures, angular diameters, distances and linear radii for 160 O and B stars. *Royal Astronomical Society, Monthly Notices*, 186:601–605, 1979.
- [27] I.N. Glushneva. Effective temperatures and angular diameters of peculiar stars. *Astronomicheskii Zhurnal*, 64:601–605, 1987.
- [28] M.E. van den Ancker, P.S. The, A.D. Tjin, H. R. E., C. Catala, D. de Winter, P.F.C. Blondel and L.B.F.M. Waters. ISO spectroscopy of circumstellar dust in the Herbig Ae system AB Aur and HD 163296. *Astronomy and Astrophysics*, 324:33–36, 1997.
- [29] J.B. Hutchings. Rotationally extended stellar envelopes. II. HD 109378 and 142926. *Royal Astronomical Society, Monthly Notices*, 152:109–119, 1971.

- [30] M.E. van den Ancker J. Bouwman P.R. Wesselius L.B.F.M. Waters S.M. Doherty and E.F. van Dishoeck. HIPPARCOS data on Herbig Ae/Be stars: an evolutionary scenario. *Astronomy and Astrophysics*, 357:325–329, 2000.
- [31] R.W. Carroll T.R. Stoeckley and R.D. Miller. Absorption Line Profiles for 39 Rapidly Rotating Stars. *Royal Astronomical Society, Monthly Notices*, 208:459–488, 1984.
- [32] A. Slettebak. Spectral types and rotational velocities of the brighter Be stars and A-F type shell stars. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 50:55–83, 1982.
- [33] D. Hoffleit and C. Jaschek. The Bright Star Catalogue. *The Bright Star Catalogue*, 349:151–168, 1982.
- [34] J. Chauville J. Zorec D. Ballerean N. Morell L. Cidale and A. Garcia. High and intermediate-resolution spectroscopy of Be stars 4481 lines. *Astronomy and Astrophysics*, 378:861–882, 2001.
- [35] S.M. Saad, J. Kubát, P. Koubský, P. Harmanec, P. Skoda, D. Korčáková, J. Krticka, M. Slechta, H. Bozic, H. Ak, P. Hadrava and V. Votruba. Properties and nature of Be stars Dra. XXIII. Long-term variations and physical properties of κ Dra. *Astronomy and Astrophysics*, 419:607–621, 2004.
- [36] Sargent V. Mannings and I. Anneila I. A High-Resolution Study of Gas and Dust around Young Intermediate-Mass Stars: Evidence for Circumstellar Disks in Herbig AE Systems. *Astrophysical Journal*, 490:792–802, 1997.
- [37] A. Slettebak. Be Stars as Rotating Stars: Observations. *Be and Shell Stars: IAU Symposium no. 70*, 70:123, 1976.
- [38] E.M. Halbedel. Rotational Velocity Determinations for 164 Be and B stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 100:770–784, July 1988.
- [39] V. Reglero J. Fabregat. Determination of Be-Star Parameters from Uvby-Beta Photometry and H α Equivalent Widths. *Royal Astronomical Society, Monthly Notices*, 247:407–414, 1990.
- [40] T.R. Stoeckley and W. Buscombe. Axial inclination and differential rotation for 19 rapidly rotating stars. *Royal Astronomical Society, Monthly Notices*, 227:801–813, 1987.
- [41] M. K. Jessup. Note on the Hydrogen Emission of Kappa Draconis. *Astrophysical Journal*, 76:75–76, 1932.
- [42] K. Juza, P. Harmanec, H. Bozic, K. Pavlovski, J. Ziznovsky, A. E. Tarasov, J. Horn and P. Koubsky. Correlated long-term light, colour and spectral variations of the Be star κ Dra. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 107:403–411, 1994.
- [43] G.A.H. Walker G.M. Hill and S. Yang. Line profile variability of the Be star κ Draconis. *Astronomy and Astrophysics*, 246:146–152, 1991.

-
- [44] N.G. Beskrovnaya M.A. Pogodin R.V. Yudin G.A.P. Franco S.L.A. Vieira and A. Evans. Cyclic phenomena in the circumstellar gaseous envelope of the candidate Herbig A0e star HD 163296. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 127:243–249, 1998.
- [45] M.A. Pogodin. Rapid line-profile variability of H α and H β in the A-shell type star HD 163296. *Astronomy and Astrophysics*, 282:141–150, 1994.
- [46] C.E. Moore. *A Multiplet Table of Astrophysical Interest*. Princeton University Observatory, 1972.
- [47] R.F. Stellingwerf. Period determination using phase dispersion minimization. *The Astrophysical Journal*, 224:953–960, 1978.