

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM  
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK

# Forró szubtörpe csillagok és szubtörpe-fősorozati kettőscsillagok vizsgálatai

Diplomamunka

Készítette: Németh Péter, V. csillagász hallgató

Témavezetők: Dr. Kiss L. László, egyetemi adjunktus  
Dr. Szatmáry Károly, egyetemi docens

Szeged, 2004

# Tartalomjegyzék

<b>Bevezetés</b>	<b>2</b>
<b>A forró szubtörpe csillagok tulajdonságai</b>	<b>3</b>
Forró szubtörpe csillagok kialakulása . . . . .	8
A Roche-üreg túlnövése, RLOF . . . . .	13
Közös burok, CE . . . . .	14
Fehér törpék összeolvadása, WDM . . . . .	17
Szubtörpe B csillagok fősorozati kísérővel . . . . .	17
A kettőscsillagok jövője . . . . .	20
HW Virginis rendszerek . . . . .	21
A szubtörpe B típusú pulzátorok . . . . .	22
<b>HW Virginis</b>	<b>25</b>
A keringési periódus változása . . . . .	25
A HW Virginis spektroszkópiája . . . . .	26
<b>HS 0705+6700</b>	<b>32</b>
<b>Összefoglalás</b>	<b>39</b>
<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>40</b>

## Bevezetés

A szubtörpe B (sdB) csillagokat 1968-ban definiálta Sargent és Searle. Olyan B színképtípusú csillagok amelyek spektrumában a hidrogén Balmer vonalai sokkal szélesebbek, mint a hasonló színképosztályba tartozó I. populációs fősorozati csillagok vonalai. Fejlődési állapotukat tekintve sokszor az extrém horizontális ág tagjaiként hivatkoznak rájuk a szakirodalomban. Általánosan elfogadott kép, hogy ezek a csillagok magbéli héliumégető csillagok rendkívül vékony hidrogén burokkal ( $< 0.02 M_{\odot}$ ), össztömegük csak kis mértékben tér el a  $0.5 M_{\odot}$ -tól.

Több szempontból is kiemelkedő a szubtörpe B csillagok vizsgálata. A galaktikus csillagászat terén fontos tény, hogy ezek a csillagok a kék és ultraibolya felmérések domináns tagjai. Feltételezve, hogy az óriás elliptikus galaxisok UV többletsugárzásának forrásai a szubtörpe csillagok, ezek számának és eloszlásának vizsgálatával határokat adhatunk meg a galaxisok korára. Ezáltal szerepük van a galaxisképződés és a galaxisszerkezet kutatásában és a nagyobb kozmológiai skálákat is tanulmányozhatjuk. Az extrém horizontális ág csillagai - hasonlóan a horizontális ághoz - standard gyertyák, így távolságmérésre is felhasználhatók.

Továbbá önmagukban is fontosak ezek az objektumok, mint egzotikus csillagok. A pulzáló szubtörpék megfigyelésével asztroszeizmológiai módszerekkel pontos csillagszerkezeti információk nyerhetők. A kialakulásuk vizsgálatával pedig mélyebb betekintést nyerhetünk a csillag és kettőscsillag-fejlődés részleteibe.

Dolgozatom első részében a szubtörpe csillagok kialakulását és fejlődését mutatom be irodalmi elméleti megfontolásokra építve. Ez jelenleg hiányzik a magyar nyelvű szakirodalomból. Majd az eddig ismert 3 szubtörpe-fősorozati törpe fedési kettős rendszerből kettő spektroszkópiai és fotometriai vizsgálatával folytatom. Végezetül pedig rövid összefoglalással fejezem be dolgozatom.

## A forró szubtörpe csillagok tulajdonságai

A halvány kék csillagok meglehetősen homogén osztályát alkotják a B típusú szubtörpe (subdwarf B, sdB) csillagok. Elfejlődött objektumok, a horizontális ág (Horizontal Branch, HB) kék oldali kiterjesztésében. A normál HB csillagok megegyeznek abban, hogy magjukban stabil hélium fúzió, külső hidrogén burkuk magot övező részében pedig hidrogén fúzió zajlik. Ezekkel ellentétben az extrém horizontális ág (EHB) csillagait legjobban olyan modellel tudjuk leírni, amely szerint a magban hélium fúzió zajlik, de az azt övező hidrogén burkuk túl vékony ahhoz, hogy fenntartsa a nukleáris égést. Ezek a csillagok valószínűleg elvesztették külső rétegeiket. Az eltűnő hidrogén burkuk tömegétől függően az extrém horizontális ágbéli csillagok  $0.5 M_{\odot}$  körül találkoznak a hélium fősorozattal<sup>1</sup>. További különbség, hogy az EHB csillagai az aszimptotikus óriáságot (AGB) elkerülve közvetlenül a fehér törpék irányába fejlődnek. Az O típusú szubtörpék egy része poszt-AGB fejlődési állapotban van. Mivel az EHB evolúciós állapot hosszú élettartamú ( $10^8$  év), ezek a csillagok elég gyakoriak ahhoz, hogy az elliptikus galaxisokban és a galaktikus dudorokban megfigyelhető "UV többletsugárzás" forrásainak tekintsük őket. Az sdB csillagok jövőjét csak modellek alapján tudjuk előre vetíteni, úgy tűnik fejlődésük a fehér törpe szekvencia felé tart a Hertzsprung-Russell diagramon és elkerülik a második vörös óriás állapotot. Keletkezésük még jelenleg is kérdéses és intenzív vizsgálatok tárgya.

Már Shapley is megfigyelt szubtörpe csillagokat gömbhalmazokban a múlt század elején. A mező szubtörpék felfedezése Humason és Zwicky 1947-es kutatásaihoz fűződik. Fehér törpéket kerestek magas galaktikus szélességeken négy színfotometriai és spektroszkópiai megfigyelésekkel, de helyettük sok olyan halvány és kék csillagot találtak, amelyek spektrumuk alapján nem lehettek fehér törpék. Másrészt viszont, ha normális B színképtípusú csillagok lettek volna, mint ahogy azt a spektrumuk mutatta, akkor nagyon távol kellett volna lenniük tőlünk. Ez pedig felvetné azt az ellentmondást, hogy a galaktikus halo tele van fiatal objektumokkal.

Mindössze három évvel korábban vezette be Walter Baade a csillagpopulációk fogalmát a Tejútrendszer csillagaira, ezzel magyarázva a Hertzsprung-Russell-diagramon (HRD) tapasztalható morfológiai különbségeket. Humason és Zwicky feltételezték, hogy az általuk felfedezett objektumok idős II. populációs csillagok,

---

<sup>1</sup>A horizontális ágot szokás még hélium égető fősorozatnak is nevezni.

amelyek a horizontális ág kék oldalán, 0 magnitúdós abszúlt fényesség környékén helyezkednek el.

A felfedezést követő fotometriai és spektroszkópai felmérések során kiderült, hogy ezek a szubluminózus csillagok sokkal elterjedtebbek, mint azt korábban gondolták. Az 80-as évek elején végrehajtott Palomar-Green Survey of UV-Excess Stellar Objects (Green et al. 1986) felmérés számos szubtörpe csillagot fedezett fel. Az eredeti cél kvazárok keresése volt. A katalógus 1874 objektumot tartalmaz, de legtöbbjük kék csillagnak bizonyult. Ez arra utal, hogy a forró szubluminózus törpecsillagok a legnépesebb csillagtípus nagy galaktikus szélességeken  $B=16^m1$  fényességig. A felmérés szerint számuk meghaladja a fehér törpék számát.

A forró szubtörpe csillagok színeképük alapján több altípusba sorolhatók. A jelenleg használt besorolások és főbb jellemzőik az 1. táblázatban találhatóak.

Altípus	Spektrális jellemzők
HBB (horizontális ág B)	keskeny Balmer vonalak, HeI és MgII abszorpció
sdB (szubtörpe B)	széles Balmer vonalak, gyenge HeI, nincs MgII vonal
sdOB (szubtörpe OB)	átmeneti osztály, hasonló mint az sdB + HeII abszorpció
sdO (szubtörpe O)	erős HeI és HeII abszorpció

1. táblázat. A szubtörpe csillagok altípusai és azok főbb spektrális jellemzői.

A B színeképtípusra jellemző erős hidrogénvonalak mellett előfordulhatnak még fémvonalak (C, N, O és Si) is a spektrumban, de ezek rendszerint nagyon gyengék. A négyféle besoroláson kívül létezik még néhány pekuliáris típus, például: He-sdB (sdB csillag szokatlanul erős He abszorpcióval).

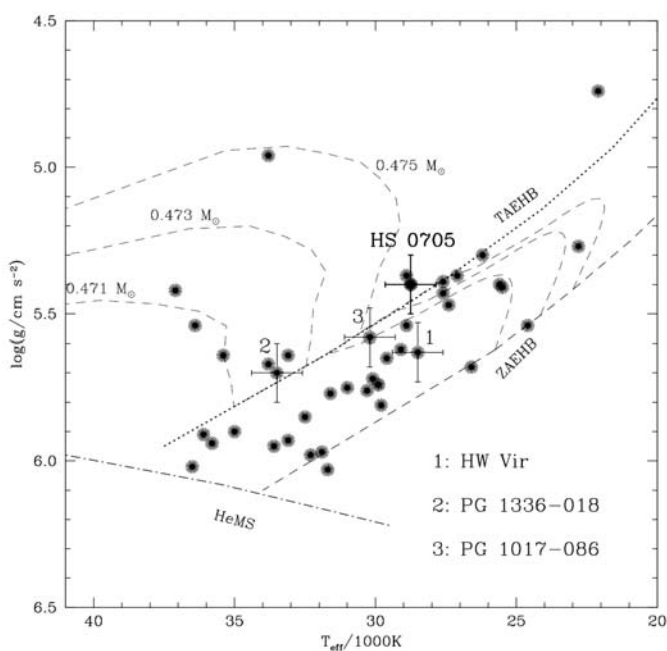
A forró szubtörpe csillagok első átfogó, a témában úttörőnek mondható tanulmányát Greenstein és Sargent (1974) dolgozta ki. Atmoszférikus paramétereket ( $\log g$ ,  $T_{\text{eff}}$ ,  $N[\text{He}]/N[\text{H}]$ ) határoztak meg és asztrofizikai értelmezést is adtak a csillagok állapotára. Ők alkalmazták először az "EHB" kifejezést, mivel ezek az objektumok a gömbhalmazok szín-fényesség diagramján megjelenő horizontális ágtól balra helyezkednek el. A különböző szubtörpe csillagok felszíni hőmérsékletük és gravitációjuk tekintetében eltérő pozíciókat foglalnak el az EHB-n, a jellemző effektív hőmérsékletek és felszíni gravitációs értékek a 2. táblázatban találhatóak.

A felszíni gravitáció értéke tipikusan  $\log g = 5.0 - 6.0$  közötti. HBB csillagokra ez az érték kisebb mint 5. A szubtörpe csillagok állapotának ábrázolására elter-

Altípus	$T_{eff}$ (K)	$\log g$
HBB	15000 – 20000	$\sim 5$
sdB	20000 – 27500	5 – 6
sdOB	27500 – 35000	5 – 6
sdO	35000 <	$\sim 6$

2. táblázat. A szubtörpe csillagok felosztása effektív hőmérsékletük és felszíni gravitációjuk szerint.

jedt módszer az 1. ábrán látható, Hertzsprung–Russell-diagrammal analóg Kiel-diagram ( $T_{eff} - \log g$  ábra) használata, mivel bonyolult és sokszor még közelítőleg sem határozható meg a csillagok abszolút fényessége.



1. ábra. A szubtörpe B csillagokra vonatkozó Hertzsprung–Russell diagram. (H. Drechsel et al. 2001)

Egy másik fontos jelenség a csillagok fémességére vonatkozik. A forró szubtörpe csillagokat, hasonlóan a horizontális ágbeli csillagokhoz, II. populációs idős objektumoknak tekintjük, (Greenstein és Sargent, 1974). Azonban ezt a feltételezést nem támasztja alá a csillagok fémessége. A csillaglégkör alacsony fém- és héliumtartalma

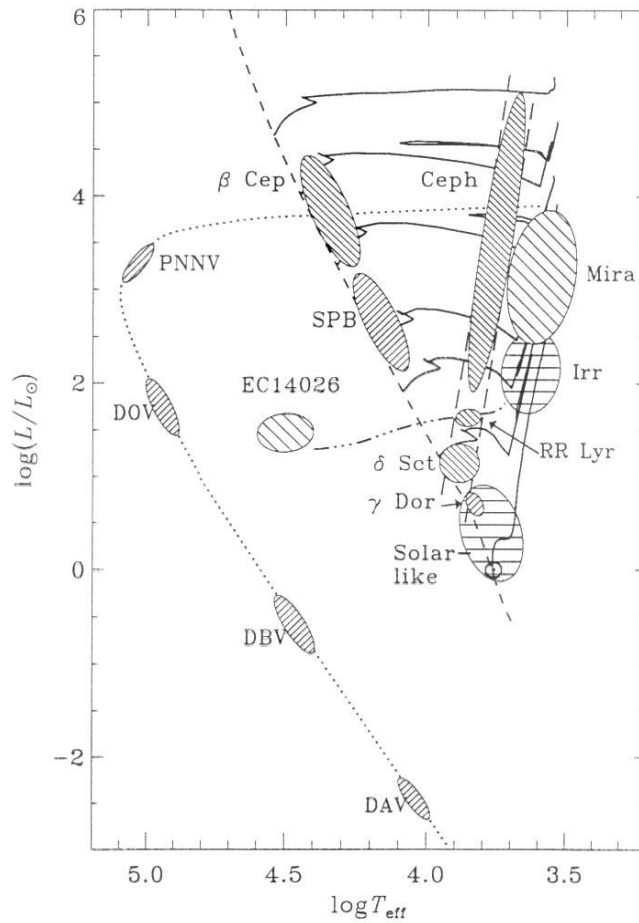
egy nem konvektív és nem forgó atmoszférával magyarázható, azonban lokális difúziós folyamatok miatt fémfeldúsulások teszik ezt pekuliárisá. Végeredményben a szubtörpe csillagok felszíni elemösszetétele nem képezheti a populációba sorolás alapját. Az sdO csillagok magasabb héliumtartalma a HeII ionizációja miatti opacitásváltozásból eredő konvektív felkeveredés következménye.

A csillagok kinematikáját először Baschek és Norris vizsgálta 1975-ben egy 17 objektumból álló mintán. Ezek közül néhány a halo objektumokra jellemző mozgást mutatott, tehát ez is alátámasztja, hogy a szubtörpék zöme idős csillag. A legtöbb csillag mozgása a galaktikus fősík felé koncentrálódott, ami arra utal, hogy az öreg korong-komponens tagjai. Újabb és még részletesebb kinematikai tanulmány hasonló eredményre vezetett (Colin et al. 1994). A csillagok eloszlásának skálamagassága 200 - 1000 pc közötti. Valószínűleg a korong komponensen kívül létezik még egy halo komponens is, ami a galaktikus fősíktől távolodva számbelileg felülmúlja a korongbeli szubtörpe csillagokat. Az eloszlás feltérképezéséhez további statisztikus vizsgálatokra lesz szükség. Ehhez jó alapot nyújt a Hamburg Quasar Survey felmérés objektumlistája. A halohoz tartozó csillagok vörösebbek.

Távolság-meghatározáshoz fotometriai vagy spektroszkópiai mérések szükségesek. Strömngren uvby fotometriával a Balmer-ugrás helyének mérésével meghatározható az effektív hőmérséklet és a felszíni gravitáció értéke. Ugyanezek a paraméterek megkaphatók a Balmer-vonalak profilillesztésével is spektroszkópiából. Felhasználva azt a megfigyelésekből származó ténytet, hogy a szubtörpe csillagok tömege nagyon közel esik a  $0.5 M_{\odot}$ -hez, meghatározható az abszolút fényességük. Ezzel a megfontolással a szubtörpe csillagok felhasználhatók távolságmérésre.

Fordított gondolatmenetet követve, ha ismerjük egy szubtörpe csillag felszíni gravitációs gyorsulását, effektív hőmérsékletét, valamint távolságát, a tömege meghatározható. Ezáltal kalibrálható a tömegeloszlás. Ismert távolságú szubtörpék gömbhalmazokban fordulnak elő nagy számban, de a Hipparcos-műhold mérései közt is szerepelt néhány mező szubtörpe csillag.

A horizontális ággal való rokonság a szubtörpe csillagok keletkezését is felvázolja. A normál HB csillagok progenitorai vörös óriások, amelyek ledobják tömegük jelentős részét, ezért hiányzik a hidrogén rétegük nagy része. Ezzel analógiában a forró szubtörpék is tömegvesztés útján születnek vörös óriásokból. Ez esetben azonban a tömegvesztés mértéke jóval nagyobb, mint a normál horizontális ág csillagainál. Csupán magányos csillagfejlődés jelenségeivel nehezen magyarázható az ilyen



2. ábra. A pulzáló változócsillagok elhelyezkedése a HRD-n. A szubtörpe pulzátorok az elsőként felfedezett változóról elnevezett EC14026 csoportban tömörülnek.

mértékű tömegvesztés, de ígéretes lehetőséget kínál erre a szoros kettőscsillagok fejlődése. Jelenlegi elképzelés szerint a szubtörpe csillagok altípusuktól függetlenül azonos módon keletkeznek.

Az sdO csillagok kevésbé jól definiáltan helyezkednek el az EHB mentén, mint az sdB és az sdOB csillagok. Ennek oka, hogy a HRD ezen részén vonulnak keresztül az AGB utáni állapotban lévő csillagok is. Tehát az sdO csillagok nem csak az EHB állapottal magyarázhatók, többnyire eloszlott planetáris ködök központi objektumai. Ezeket az sdO csillagokat nevezhetjük "újraszülető AGB csillagoknak" is mivel a poszt-AGB fejlődési állapotban lévő csillagok a fehér törpe állapot elérése előtt keresztülmehetnek még egy hélium-villanáson, ezáltal újra vörös óriások lesz-



nek, majd megkezdik végső fejlődésüket a fehér törpe hűlési szekvencia felé.

A csillagok többsége kettő vagy több komponensből álló rendszer tagja, ezt a Naprendszer környezetében bizonyítani is lehet. Allard és munkatársai mérései szerint a szubtörpe csillagok 31%-a kettőscsillagokban van, (Allard et al. 1994). Újabb vizsgálatok alapján feltételezhetjük, hogy a szubtörpe csillagok több mint kétharmada kettős rendszer tagja, (Maxted et al. 1994). Az ilyen rendszerek vizsgálati nagy fontosságúak, mivel lehetőséget adnak a közvetlen tömeg-meghatározásra. Továbbá, mivel a szubtörpék keletkezése a jelenlegi modellek szerint szorosan összefügg a kettős-rendszer jellegükkel, az ilyen több tagú rendszerek gyakori előfordulása a keletkezésük megértésének kulcsát is jelentheti. Az első megfigyelt szubtörpét tartalmazó kettőscsillag a HD128220 volt, amely a jelenlegi álláspont szerint egy  $0.54 \pm 0.01 M_{\odot}$  tömegű sdO és egy G színképtípusú fősorozati csillagból áll. A kettős átesett egy gyors tömegátadási szakaszon, amikor az sdO csillag progenitora vörös óriás volt. Májig sok kettős kompozit spektrumát fedezték fel, néhány közülük fedési kettős csillag is. A fedési kettősök könnyen felismerhetők jellegzetes fénygörbéjükről. Több ilyen rendszert is találtak a kompozit spektrumok CaI  $\lambda 4227$  vonalának jelenlétével. De hasonlóan a jellemzően G spektráltípushoz tartozó vonalak is másodkomponensre utalnak a spektrumban. Azonban ez kiválasztási effektushoz vezethet, mivel ezen vonalak hiányában is lehet másodkomponens, ezek kimutathatók az infravörös többletsugárzás vizsgálatával. Egy másik kiválasztási effektus pedig megakadályozza a fősorozati törpe másodkomponensek kimutatását. Az ilyen hideg csillagok ugyanis túl halványak, sem abszorpciós vonalaik, sem pedig a kompozit kontinuum sugárzásuk nem észlelhető. Ha a forró komponens túl halvány, a kompozit színek vörösebbek lesznek, ezért ezek az objektumok nem szerepelnek a kék csillagokat tömörítő katalógusokban. Figyelembe véve ezeket a kiválasztási effektusokat, feltételezhetjük, hogy a forró szubtörpe csillagok nagy része - majdnem az összes - kettős rendszerekben van.

## **Forró szubtörpe csillagok kialakulása**

A szubtörpe csillagok kialakulására vonatkozóan több elméleti modell is versenyben van. Alapvetően két nagy csoportra oszthatók ezek az elméletek, a magányos csillagfejlődésre és a csillagok kettős rendszerben való kialakulására.

Általánosan igaz, hogy a szubtörpéket a kis tömegű ( $0.7 \leq \frac{M}{M_{\odot}} \leq 2$ ) csillagok egy fej-

lódási állapotának tekintjük. A csillagok élettartamát, energiatermelését és a HRD-n bejárt fejlődési útvonalait egyértelműen meghatározza kezdeti tömegük. A közepes és nagy tömegű csillagok fejlődése a fősorozat után vörös óriás állapottal, majd az aszimptotikus óriáságon folytatódik, végül planetáris köd kialakulásával fehér törpeként fejeződik be. A 3 - 5  $M_{\odot}$  tömegű csillagok esetében a fúzió elmeget egészen a vasig, a folyamat végét a fúzió leállása, vagy a csillag megsemmisülése jelenti. A 4 - 8  $M_{\odot}$ -ú tömegű csillagok esetében a szénégés degenerált<sup>2</sup> magban megy végbe ami, szén-flash<sup>3</sup>-t okoz. A nagy energiatermelés hatására a csillag II. típusú szupernóvaként megsemmisül, helyén csak egy táguló gázfelhő marad. A legnagyobb tömegű csillagok esetén nincs szén-flash, a fúzió elmeget a vasig és hagymahéjszerű szerkezet alakul ki több fúziós réteggel. A folyamat végét a szilícium égése, valamint az ezzel együtt fellépő neutronizáció jelenti, és ez is II. típusú szupernóvához vezet. A fejlődési végállapot pedig neutroncsillag vagy fekete lyuk.

Dolgozatomban a kis és közepes tömegű csillagok fejlődésével foglalkozom. A szubtörpe csillagok születése szempontjából a 2  $M_{\odot}$ -nél kisebb tömegű objektumok a legérdekesebbek. Ezért a következőkben ezek fejlődését részletesebben is be szeretném mutatni. A fősorozaton töltött több mint tízmilliárd év után a csillagok magjában annyira lecsökken a hidrogén koncentrációja, hogy az már nem elegendő a fúzió további fenntartásához. A hidrogénmagok egyesülése leáll, a csillag egyensúlyi állapota megbomlik. Az izotermikus, héliumból álló magot hidrogénben dús burok veszi körül. Fúzió hiányában a sugárnyomás lecsökken és gravitációs összehúzódás indul meg, ami továbbra is fenntartja a luminozitást. Az összehúzódás Kelvin-Helmholtz-időskálán zajlik ( $\tau = 10^7$  év), ez a csillagászatban nagyon gyors folyamatnak számít. Az összehúzódás miatt a mag és a konvektív burok határán a hőmérséklet eléri a hidrogénfúzió beindulásához szükséges nagyságot. A mag körül kialakuló hidrogénégető réteg begyulladásával a csillag átkerül a HRD-n a szubóriás ágra. Mivel a fősorozatról a szubóriás ágra való áthaladás karakterisztikus ideje kicsi, a HRD-n egy új jelenik meg, ezt Hertzsprung-űrnek nevezzük.

A mag körül égő hidrogénhéj egyre kijebb kerül, ahogy üzemanyaga fogy, közben a hátrahagyott hélium miatt növekszik a mag mérete és tömege. A fokozódó hőmérséklet és nyomás miatt a hidrogénhéj fúziója is egyre nagyobb ütemben zaj-

---

<sup>2</sup>A csillag anyaga elfajult állapotú gáz, az elektronok nyomása tart egyensúlyt a gravitációval. Az elfajult állapotú gáz nyomása független a hőmérsékletétől.

<sup>3</sup>Degenerált állapotú szén csillagmag fúziójának robbanásszerű beindulása.

lik, az energiatermelés növekszik. A csillag külső rétegei miatt az energia nem tud szabadon távozni a rendszerből, egy része a gáz fűtésére fordítódik. A csillag külső rétegei kitágulnak, akár a fősorozati méret több százszorosát is elérhetik, közben a mag tovább zsugorodik. A csillag átkerül az óriáságra. A nagy luminozítás hatására a csillag külső részei konvektívvá válnak, mivel a konvekció hatékonyabban szállítja el az energiát, mint a korábbi radiatív energiáttranszport. A konvekció anyagmozgást is jelent, a csillag anyaga felkeveredik (*first dredge-up*), felszínén megfigyelhetővé válnak a hidrogénfúzió során termelődő katalizátor elemek (C, N, O).

A mag ezalatt tovább zsugorodik és melegszik, benne a nyomás addig emelkedik, míg degenerált állapotba kerül. A fokozott hidrogénhéjbeli energiatermelés miatt a csillagok gyorsan emelkednek a Hayashi-vonal<sup>4</sup> mentén az óriáság csúcsáig. Amikor a maghőmérséklet eléri a  $10^8$  K-t, az atommagok hatáskeresztmetszete elegendően nagy lesz a  $3\alpha$ -reakció beindulásához, és megkezdődik a hélium fúziója széné. Mivel degenerált állapotú a mag, a benne termelődő energia ellenére sem tágul ki és hőmérséklete tovább emelkedik, ami nukleáris túlfutáshoz vezet. Az önmagát gerjesztő folyamat következményeként a kis tömegű csillagokban a hélium fúziója robbanásszerűen indul be (*core helium flash*). A hélium villanás során felszabaduló energiamennyiség miatt megszűnik a mag degenerált állapota, a nyomás hőmérsékletfüggése hirtelen bekapcsol. A hélium mag gyorsan kitágul és új egyensúlyi állapotba kerül. Egy ilyen lecsupaszított csillagmag a hélium-fősorozaton helyezkedne el a HRD-n. A héliumfúzió mellett hidrogénhéj-égés is zajlik a csillagban és továbbra is ez szolgáltatja a luminozítás jelentősebb részét. A tágulás miatt azonban annyira lecsökken a héj hőmérséklete, hogy a csillag fényteljesítménye az új egyensúlyi állapotban jóval alacsonyabb lesz, mint az óriáság tetején. A kisebb energiatermelés miatt a külső rétegek összehúzódnak. A csillag átkerült a horizontális ágra (*Horizontal Branch, HB*). Amennyiben az anyagvesztés következtében a csillag magjának és hidrogénrétegének tömege még nagyobb mértékben különbözik, a hidrogénhéj-égés nem maradhat fenn azonos szinten. Ekkor a csillag luminozitása még alacsonyabb, így értelmezhető a HB és az EHB "balra lógása". Ha a tömegarány meghaladja a:

$$\frac{M_c}{M_c + M_e} \geq 0.96 \quad (1)$$

---

<sup>4</sup>A HRD jobb oldalán elhelyezkedő függőleges vonal, amely mentén a teljesen konvektív szerkezetű csillagok helyezkednek el.

értéket, ahol  $M_e$  a hidrogén héj  $M_c$  pedig a mag tömege, akkor a hidrogén-héj fúzió nem maradhat fenn, (Janet H. Wood et al. 1993). Tehát a  $0.02 M_\odot$ -nél kisebb tömegű hidrogén burokkal rendelkező csillagok már nem a HB-re, hanem az EHB-re kerülnek. Azon belül is a kezdeti tömegtől, fémtartalomtól és főképpen az óriáságon elszenvedett tömegvesztés nagyságától függően eltérő helyekre.

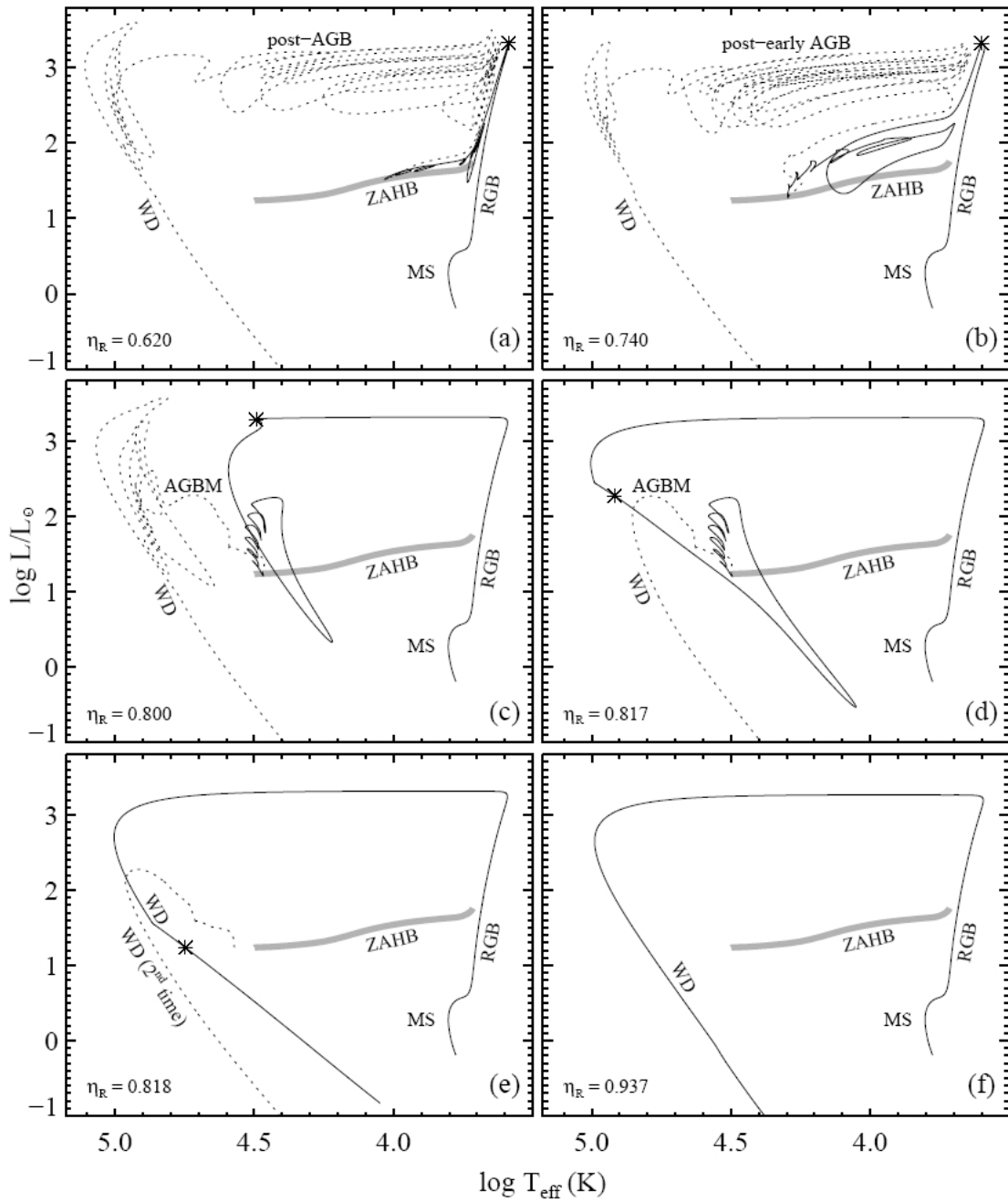
A csillagok tömegvesztését leíró Reimers-szél egyenlete:

$$\dot{M} = 4 \cdot 10^{-13} \cdot \eta_R \cdot \frac{RL}{M} \quad (2)$$

ahol  $\eta_R$  a tömegvesztés hatékonyságát jellemző Reimers-paraméter. A 3. ábrán láthatók a horizontális, és extrém horizontális ág csillagainak fejlődési útvonalai különböző Reimers-paraméterek mellett. Az útvonalakon szereplő csillagok a hélium-flash bekövetkezését jelölik. Növekvő tömegvesztés mellett egyre magasabb hőmérsékleten indul be a hélium fúziója. Az  $\eta_R = 0.936$  érték feletti tömegvesztésnél már nem következik be hélium felvillanás. Az *a* és *b* paneleken a horizontális ághoz tartozó csillagok fejlődése szerepel. Ezek a csillagok a vörös óriáság (RGB) után a horizontális ágon (ZAHB) helyezkednek el, majd az aszimptotikus óriáságon keresztül vándorolnak a fehér törpék közé, közben planetáris ködöt dobnak le magukról. Nagyobb mértékű tömegvesztés mellett a csillagok az extrém horizontális ágra kerülnek, további felődésük során pedig elkerülik az AGB-t és az AGBM-en (AGB-manqué) keresztül közvetlenül a fehér törpék irányába fejlődnek.

\*\*\*

A korábbiakkal ellentétben a kis tömegű ( $< 0.5M_\odot$ ) csillagok élete nyugodtabban és sokkal lassabban zajlik, hidrogén tartalékuk kimerülése után magjuk degenerált állapotba kerül, a csillag belsejében kialakul egy fehér törpe. Innen a további fejlődés a termális energia kisugárzásán keresztül a csillag kihűléséhez vezetne. Azonban ilyen fehér törpe még nem létezik. A  $0.5 M_\odot$ -nél kisebb tömegű csillagok élettartama ugyanis az Univerzum jelenlegi korának többszöröse is lehet. Tehát egy ilyen kis tömegű csillag még javában a fősorozaton van. Viszont a megfigyelt szubtörpe csillagok tömege jellemzően ebbe a tartományba esik. Ezért úgy gondoljuk, hogy a szubtörpe csillagok erős tömegvesztést elszenvedő közepes tömegű csillagokból keletkeznek. Azonban ez a tömegvesztés még nem teljesen tisztázott módon megy végbe.



3. ábra. A horizontális ág csillagainak fejlődési útvonalai. (T. Brown et al. 2001)

A nagyarányú tömegvesztést magyarázó jelenlegi csillagfejlődési modellek:

- ★ Roche-üreg túlhízása, RLOF
- ★ Fehér törpe kettőscsillag összeolvadása, WDM
- ★ Közös burok fejlődési állapot, CE

## A Roche-üreg túlnövése, RLOF

Megfontolásait tekintve talán a legegyszerűbb modellt a Roche-üreg túlcsordulása (Roche Lobe Overflow, RLOF) adja a szubtörpe csillagok kialakulására. Tág kettős rendszerben lévő kis tömegű csillag a vörös óriás állapota során kitölti a Roche-térfogatát és intenzív csillagszél formájában elveszti külső hidrogéngazdag rétegét. A tömegvesztés csak akkor áll le, mikor a külső rétegek jelentős része már ledobódott és a csillag mérete csökkenni kezd. Ha a degenerált mag tömege elég nagyvá válik közben, a csillag egy hélium felvillanással magbéli héliumégető szubtörpeként kerül az EHB-ra. Mivel ez tág kettős-rendszerben történik - szemben a közös burok modellel - a keringési periódus nem változik jelentős mértékben. Jellemzően  $P \gtrsim 1000$  nap marad.

A korábbiakban ez a fejlődési útvonal kisebb figyelmet kapott a gyors tömegátadás hibás értelmezéséből kifolyólag. Ha egy teljesen konvektív nagy tömegű csillag anyagot veszít egy kisebb tömegű másodkomponens javára, akkor sugara növekszik, ezzel szemben a Roche-térfogata csökken. Tehát a nagyobb tömegű csillag egyre jobban túlnövekszik a Roche-térfogatán. Konzervatív tömegátadás (össztömeg nem változik) esetén az anyagáramlás instabil lesz ha a tömegarány megforul. Ahhoz, hogy a hélium fúziója beindulhasson a vörös óriáság tetején, a főszorozati csillagnak legalább  $1,6 M_{\odot}$  tömegűnek kell lenni. Azonban az  $1,6 M_{\odot}$ -nél nagyobb tömegű főszorozati csillagok esetén a másodkomponens tömegének legalább  $1,34 M_{\odot}$ -nek kell lenni, ami fehér törpék esetén közel esik a Chandrasekhar-határhoz.

A kezdeti tömegtől függően eltérő fejlődési utak alakulnak ki. Ha a csillag tömege a hélium-flash-hez szükséges kezdeti tömegnél ( $M_0$ ) kisebb a Roche-üreg kitöltése az FGB tetején jelenik meg.  $M_0$  értéke első populációs ( $z = 0,02$ ) csillagokra  $1,99 M_{\odot}$ , második populációs ( $z = 0,004$ ) csillagokra pedig  $1,80 M_{\odot}$ . A keletkező sdB csillagok tömegeloszlása a modellszámítások alapján ez esetben éles csúcsot mutat  $0,46 M_{\odot}$ -nél. Ha  $M_{ZAMS} > M_0$ , és már a Hertzsprung-úrbén elkezdődik az anyagvesztés, a folyamat szintén sdB csillag keletkezéséhez vezet. Ez esetben a tömegeloszlás széles lesz  $0,33$  és  $1,1 M_{\odot}$  közötti. A nagyobb tömegű szubtörpék előfordulása ritkább a kezdeti tömegfüggvény következtében.

Hasonlóan a főkomponenshez, fejlődése során a kisebb tömegű másodkomponens is kitöltheti Roche-térfogatát. Hasonló folyamat játszódik le, mint a nagyobb tömegű komponens esetén. A tömegátadás stabilitásához szükséges, hogy a vörös



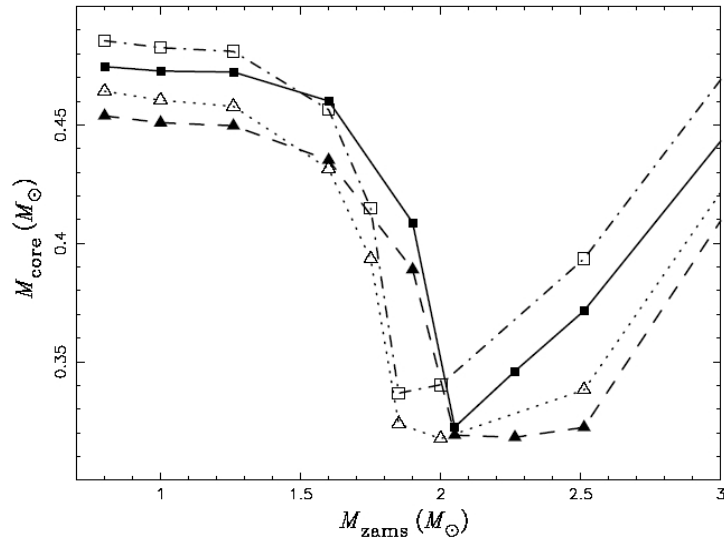
óriás másodkomponens és a főkomponens tömegaránya csak egy szűk tartományban legyen  $R_{RG}/R_{WD} \leq 1,1 - 1,3$ . Ez nagyon nagy tömegű fehér törpét követel meg, mivel ezek ritkák, valószínűleg az sdB-k nagy része nem a másodkomponensekből keletkezik.

### **Közös burok, CE**

A közös burok (Common Envelope, CE) fejlődési modell szerint az sdB csillagok szoros kettős rendszerekben keletkeznek. Hasonló módon mint az előző esetben, itt is a Roche-üreg túlnövéséről van szó. Azonban ez esetben a csillagok tömege és impulzusmomentuma nem zárt rendszerben változik, aminek következtében a csillagok szeparációja és keringési periódusa is csökken.

Az óriáság tetejéhez közeli állapotban lévő vörös óriás kitölti Roche-térfogatát. Ha ez akkor fordul elő, mikor az óriáscsillag sugara nagyobb ütemben nő, mint Roche-üregének mérete, akkor tömegátadáshoz vezet dinamikai időskálán. Az ilyen gyorsan átáramló anyagot nem képes a másodkomponens befogni, a csillagok körül egy közös burok alakul ki. Ebben a konvektív atmoszférában kering az óriáscsillag degenerált magja és a másodkomponens is. A csillagok egyre közelebb spiráloznak egymáshoz a burokkal való súrlódás következtében. A felszabaduló gravitációs energia azonban elegendően nagy is lehet a csillagokat körülvevő anyag lefújásához. Ennek következtében a folyamat végén egy nagyon szoros kettős rendszer marad vissza sdB főkomponenssel. Ez a Bohdan Paczyński által 1976-ban felvett forgatókönyv, amely során egy kezdetben tág kettős rendszer szoros kettőssé transzformálódik. Amennyiben a folyamat így zajlik le és az elején a progenitor elegendően közel volt a vörös óriás állapot végéhez (pl.: hélium villanás előtt), a csillag nem kerülheti el a hélium-flasht. Kialakul egy sdB kettős rendszer amelyben, a másodkomponens fehér törpe vagy kis tömegű fősorozati csillag is lehet. Azoknál a csillagoknál amelyek a vörös óriáság tetején töltik ki Roche-térfogatukat a mag tömege a hélium-flashez szükséges tömeg közelében van. Az így keletkező szubtörpe csillagok tömegeloszlása  $0,46 M_{\odot}$  tömegnél éles csúcsot mutat. A másodkomponens elvileg lehet fősorozati törpe vagy nagyobb tömegű ( $1-2 M_{\odot}$ ) fősorozati csillag is, ez a tömegátadás körülményeitől függ. Az ilyen rendszereknek összetett spektrumuk van, mindkét komponens spektrumvonalai megjelennek.

Z. Han és munkatársai 2003-ban modellezték az sdB csillagok keletkezését. A csil-



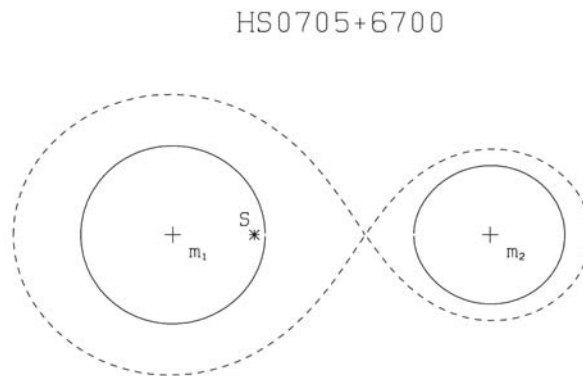
4. ábra. A magbéli héliumégető csillagok magtömege a kezdeti tömegük függvényében. A folytonos és szaggatott vonalak az I. populációs ( $Z = 0.02$ ) csillagokra, a pontozott és pont-vonalas görbék pedig a II. populációs ( $Z = 0.004$ ) csillagokra vonatkoznak. Mindkét populáció esetében a nagyobb tömegeket jelölő görbék az óriáságra jellemző magtömegeket, a kisebb magtömegeket jelölő görbék pedig a hélium égéséhez szükséges minimális tömeget jelzik. (Z. Han et al. 2002)

lagfejlődési modellek kimeneteit Monte Carlo szimulációval vizsgálták. Ezen vizsgálatok részeként modellezték a hélium fúzió beindulásához szükséges minimális magtömeg változását a csillagok kezdeti tömegének függvényében. Azt találták, hogy az sdB csillagok progenitorainak magtömege nagyon közel ( $\sim 5\%$ ) kell hogy essen az óriáság csúcsán lévő csillagok magjának tömegéhez. Azonban ez a kis tömegkülönbség jelentős különbséget okoz a csillagok sugarában ( $\sim 15\%$ ). A vörös óriások az FGB<sup>5</sup>-n haladva egyre jobban kitágulnak. Ez következménye az egyre magasabb magbéli hőmérsékletnek és az egyre nagyobb felületen zajló hidrogénhéj-égésnek. A 4. ábrán látható a héliumégető mag tömegének kezdeti tömegtől való függése. A  $2 M_{\odot}$ -nél nagyobb tömegű csillagokban a hélium nem degenerált magban lobban be. A sokkal nagyobb tömegű csillagokban pedig már jóval korábban beindul a hélium fúziója, még mielőtt a csillag kitágulna, így ezeknek az objektumoknak a

<sup>5</sup>Az óriáságot angol terminológiában First Giant Branch-nek, vagy Red Giant Branch-nek is nevezik, ezzel utalva arra, hogy a csillagoknak több vörös óriás állapotuk van.



külső rétegei is kötöttebbek. Mivel a csillagok körül kialakuló közös burok csak kisebb tömegű csillagok esetén dobódhat le, sokkal valószínűbb, hogy a nagy tömegű főkomponenst tartalmazó kettősok inkább teljesen összeolvadnak, minthogy szoros kettőscsillag maradjon vissza. Amennyiben a csillagok elkerülik az összeolvadást a keletkező sdB-k száma a kisebb tömegek felé tolódik el.



5. ábra. Egy sdB kettős rendszer méretarányai. Az ábrán be van jelölve az  $L_1$  Lagrange ponthoz tartozó ekvipotenciális felület is. A másodkomponens jól láthatóan nagyobb mértékben tölti ki Roche-térfogatát. (H. Drechsel et al. 2001)

A közös burok fejlődés részletei a burok ledobódásának körülményeit tekintve még nincsenek kidolgozva. Jelenleg csupán elméleti modellek állnak rendelkezésre. Ahhoz, hogy ezek közül kiválszthassuk a legmegfelelőbbet még sok olyan rövid periódusú kettőscsillag megfigyelésére lesz szükség, amelyek nyilvánvalóan átesetek ezen az állapoton. Az eddigi megfigyelésekből, az derült ki, hogy a keringési periódusok nagyon eltérőek, 2 óra és 10 nap közöttiek.

Hasonlóan mint az előző modellnél a CE fejlődés során is elképzelhető, hogy a másodkomponens fejlődése miatt kialakulhat egy második közös burok. Ekkor azonban a főkomponens már fehér törpe, ennek következtében sokkal mélyebbre kell spiráloznia a vörös óriás légkörében a burok ledobódásáig. Mivel ez nagyobb energiavesztéssel jár a kettőscsillag periódusa rendkívül alacsony lesz. Az első közös burok állapottal szemben a nagyobb tömegű csillagok több szubtörpét eredményeznek, mivel fehér törpe másodkomponens esetén ezek külső rétege könnyebben ledobódik. Az így keletkező sdB-k tömegeloszlása  $0,46 M_{\odot}$  tömegnél koncentráldik.

## Fehér törpék összeolvadása, WDM

Egy másik elméletileg lehetséges modell két fehér törpe összeolvadásával (White Dwarf Mergers, WDM) magyarázza a magányos sdB csillagok keletkezését. Szoros hélium fehér törpe kettősök egy és két CE fejlődési szakasz, vagy egy RLOF és egy CE fázis után keletkezhetnek, (Webbink 1984, Iben and Tutukov 1986, Han 1998). Például két  $0,3 M_{\odot}$  tömegű fehér törpe, 6,76 órás kezdeti keringési periódus mellett a gravitációs sugárzás következtében 15 milliárd év alatt egyesül. A rendszer szeparációja addig csökken, míg - körülbelül 2 perces keringési periódus mellett - a kisebb tömegű kitölti Roche-térfogatát. A tömegátadás instabil, ha a kisebb fehér-törpe tömege nagyobb mint a nehezebb tömegének  $2/3$ -a. A folyamat a csillag szétrombolásához vezet, és akkréciós korong alakul ki a nagyobb tömegű fehér törpe körül. A későbbi evolúció még nincs kidolgozva részletesen, de azt feltételezhetjük, hogy az akkréciós korong anyagának nagy része a főkomponensre kerül. Ez a tömegbefogás dinamikai (szabadesési) időskálán zajlik, de ahogy a korong anyaga csökken és kiterjed, a tömegátadási sebesség is csökkenni kezd és végül a belső súrlódása (viszkózitás) határozza meg a korong további fejlődését. Ahogy a fehér törpe tömege nő, elérkezik egy ponthoz, ahol a hélium fúziója beindul a csillag egy rétegében. Végül a fúziós héj szétterjedése miatt magbéli hélium-égető csillag lesz. Az így keletkező szubtörpék tömegeloszlása  $0,4$  és  $0,6 M_{\odot}$  közötti. A hélium égésének körülményeit a fehér törpe kezdeti tömege, hőmérsékletének eloszlása és az akkréciós folyamat határozza meg. A másik két csillagkeletkezési elmélettel szemben ebben az esetben magányos sdB csillag alakul ki.

A három különböző folyamat eltérő arányban felelős a kialakuló sdB csillagok számáért. A jelenleg elfogadott keletkezési arányok, (Thorsten Lisker, 2003):

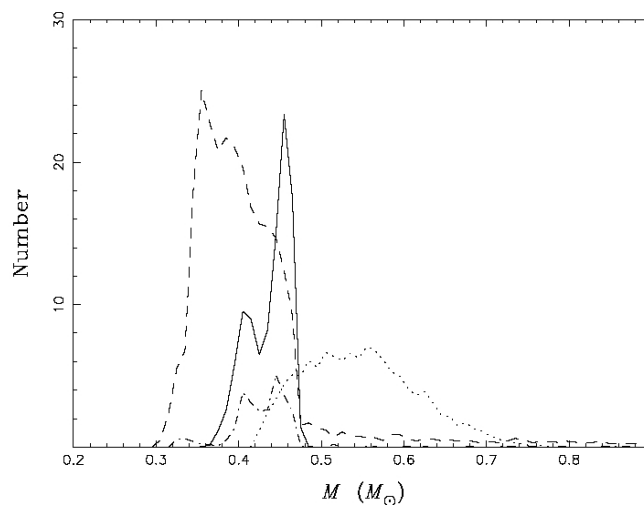
$$\text{CE} = 23\%$$

$$\text{RLOF} = 55\%$$

$$\text{WDM} = 22\%$$

## Szubtörpe B csillagok fősorozati kísérővel

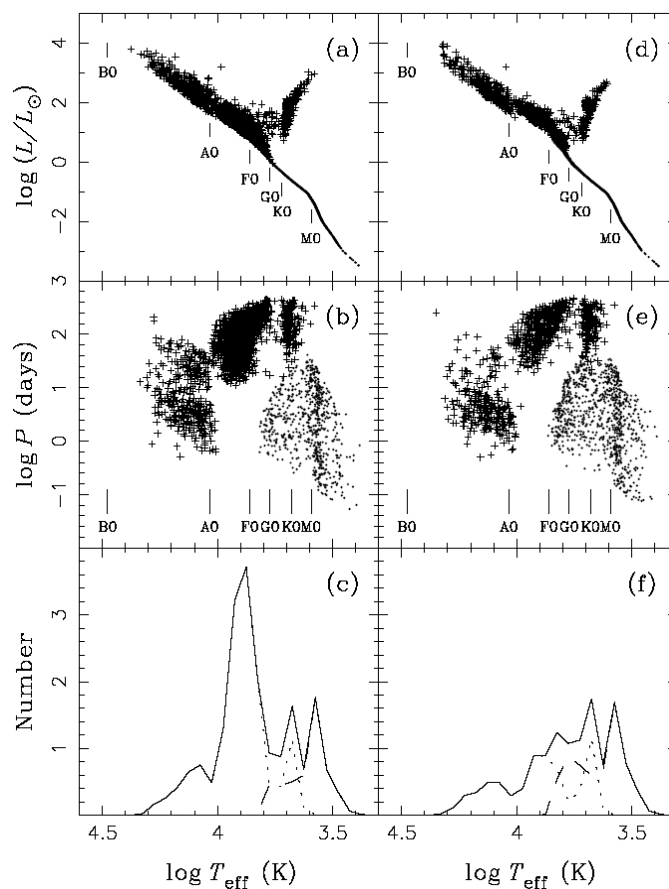
A leggyakoribb másodkomponensek a fehér törpék, (Z. Han et al. 2002). Az sdB komponenset tartalmazó kettőscsillagok vizsgálatai során derült ki, hogy fősorozati másodkomponens is lehet a rendszerben. A modellek által így adott paraméterek



6. ábra. A különböző fejlődési modelleken keresztül keletkező szubtörpe csillag tömegeloszlása. folytonos vonal: első CE, szaggatott: első RLOF, pont-vonal: második CE, pontozott: WDM. (Z. Han et al. 2002)

hasonlóan jól írják le a rendszert, mint fehér törpe másodkomponens esetén. A 7. ábrán a fősorozati másodkomponensek néhány jellemző tulajdonságát mutatom be. A felső ábrákon a HRD-n a középső ábrákon a  $T_{\text{eff}} - \log g$  diagramon, az alsó ábrákon pedig a csillagok eloszlása látható az effektív hőmérséklet függvényében. A bal oldali ábrákon  $q_{\text{krit}} = 1, 5$ , a jobb oldaliakon pedig  $q_{\text{krit}} = 1, 2$ . A közös atmoszféra ledobódásával keletkező rendszereket pontok, míg a Roche-térfogat túlnövésével keletkezőket keresztek jelölik.

Az ábrákon jól megkülönböztethető négy csoport, ezek a csoportok jelentkeznek az effektív hőmérséklet-eloszlás csúcaiban is. A közös atmoszféra ledobódásával születő kettősök keringési ideje a legrövidebb, a bennük található másodkomponensek pedig a legkésőbbi színeképosztályokhoz tartoznak (F-M). Mivel a másodkomponensek tömege jelentősen kisebb mint, a sdB csillag fősorozati progenitorainak tömege, ezek a csillagok lassabban fejlődnek és a közelebb helyezkednek el a nullkorú fősorozathoz (ZAMS). A modellszámítások alapján a másodkomponensek zöme M színeképtípusú. A CE ledobódással keletkező 12 órás orbitális periódusnál gyorsabban keringő kettős rendszerek nagy része, a 6 óránál rövidebb orbitális periódusú rendszereknek pedig mindegyike M típusú törpe másodkomponenst tartalmaz. Ezzel egyezésben a 3 eddig ismert fősorozati és sdB csillagokból álló fedési



7. ábra. A forró szubtörpe csillagok fősorozati másodkomponenseinek jellemzői, az ábra magyarázata a szövegben található. (Z. Han et al. 2003)

rendszer másodkomponense is M-törpe. Ez egyszerűen annak a következménye, hogy az ilyen kis tömegű csillagoknak sokkal mélyebbre kell spirálozniuk a közös burok lelökődéséhez szükséges energia fedezéséhez. Eredményül pedig nagyon rövid periódusú kettős rendszert kapunk. A 12 órás periódus felett egyre több korai színeképosztályú csillagot találhatunk, annak ellenére, hogy az M típusú törpék továbbra is dominánsak.

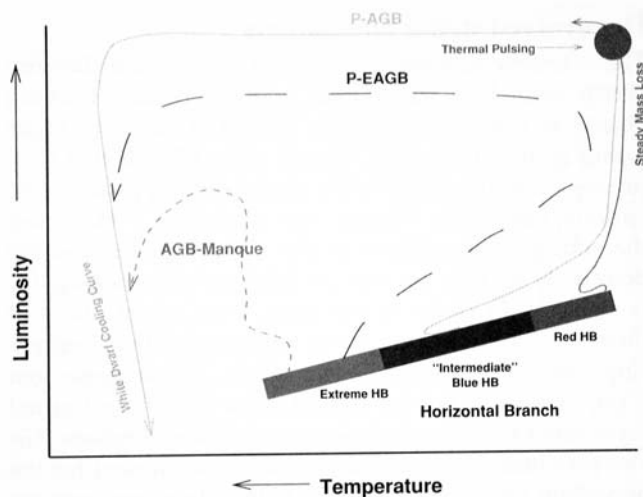
A leghosszabb keringési periódusú rendszerek másodkomponensei A-K színeképtípus közöttiek. Ezek a csillagok az első Roche-túlcsordulással keletkeztek. A két csoport közötti üres rész a Hertzsprung-űr következménye. A legkorábbi spektráltípusú rendszerek szintén az első Roche-túlcsordulással keletkeztek, de itt a tömegátadás akkor indult be mikor a szubtörpe csillag progenitora éppen a Hertzsprung-

űrön haladt át.

Az alsó ábrák jól mutatják, hogy mennyire függ a szubtörpe-fősorozati törpe kettős rendszerek száma a kritikus tömegaránytól.

### A kettőscsillagok jövője

A kis tömegű csillagok fejlődése oly lassan történik, hogy a kettős rendszer jövője szempontjából ez el is hanyagolható. A főkomponens is hasonló módon stabil állapotba kerül azzal, hogy fehér törpévé válik és megszűnik benne a héliumfúzió. A termális energia kisugárzása miatt vándorol az egyre hidegebb és halványabb állapot felé a HRD-n.



8. ábra. A horizontális ág csillagainak további fejlődési útvonalai. (Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, 2. kötet, 1162. oldal)

Azonban csupán a gravitációs sugárzás és a mágneses fékeződés impulzusmomentum-csökkentő hatása miatt a csillagok kölcsönös távolsága egyre csökken. A nagytengely csökkenése miatt viszont a Roche-üregek is kisebb térfogatúak lesznek:

$$R_{Roche} = A \cdot (0,38 \pm 0,2 \cdot \log q) \quad (3)$$

ahol  $R_{Roche}$  a Roche-térfogat sugara,  $A$  a pálya fél nagytengelye és  $q$  a csillagok tömegaránya.

Csupán a gravitációs sugárzás hatását figyelembe véve a szükséges idő, hogy a másodkomponens kitöltse Roche-térfogatát:

$$\frac{1}{P} \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{1}{2,8 \cdot 10^7 \text{év}} \left( \frac{M_1 + M_2}{M_\odot} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu}{M_\odot} \right) \left( \frac{1 \text{óra}}{P} \right)^{8/3} \quad (4)$$

ahol  $\mu = M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$ ,  $P$  a csillag jelenlegi orbitális periódusa,  $\Delta P$  pedig az orbitális periódus változása a Roche-üreg kitöltéséig.

A gravitációs energia kisugárzása következtében egy  $q = 0,2$  tömegarányú rendszer másodkomponense 126 perces keringési periódus mellett nagyságrendileg  $3 \cdot 10^8$  év elteltével eléri Roche-üregének határát és anyagáramlás indul meg a főkomponens felé. Egy ilyen rendszerben, ahol a kisebb tömegű tag veszít anyagot a tömegarány változása miatt az anyagátadás szakaszos lesz. A tömegátadás periodikusan megszakad, amikor a Roche-üreg kitöltöttsége lecsökken. Az átáramlott anyag akkréciós-korongon keresztül jut a fehér törpe felszínére. Közben a rendszer kataklizmikus változó (CV) lesz, tehát a sdB-MSd rendszerek ígéretes pre-kataklizmikus csillagok. Végeredményképpen a kisebb tömegű komponens teljesen eltűnhet, hátrahagyva egy gyorsan forgó fehér törpét.

### HW Virginis rendszerek

Ezek a kettőscsillagok szubtörpe B és fősorozati törpe komponensekből álló rendszerek. A keringési periódusuk nagyon rövid – kevesebb mint 3 óra – ezért feltételezzük, hogy a CE fejlődésen keresztül keletkeztek, (Sonja L. Schuh, 2003). A csillagok hasonló méretűek, tömegarányuk  $\sim 0,3$  körüli, távolságuk pedig kisebb mint egy napsugár. A komponensek nagyon eltérő felszíni hőmérséklete ( $T_1 = 26000 - 35000K$ ,  $T_2 \approx 3000K$ ) és a csillagok kis távolsága együttesen határozza meg az ilyen fedési rendszerek fénygörbéinek különlegességeit. A fényváltozás egyik karakterisztikus jellemzője az erős reflexiós effektus. A másodkomponens szubtörpe felé eső része annak sugárzása miatt 12500 - 14500 K-re melegszik fel a főkomponens hőmérsékletétől függően, (László L. Kiss et al. 2000). Mivel a másodkomponens így felfűtött részének fényessége feketetest-sugárzással közelíthető, a besugárzott félgömb albedója közel egységnyi. A csillag, hasonlóan mint egy tükör, visszaveri a főkomponens fényét, ez okozza a több mint  $0,^m2$ -s reflexiós fényesedést a fénygörbén. Az ismert kettősök estében a főminimumok és a mellékminimumok szimmetrikusak, ez alól csak a HW Virginis kivétel. Közvetlenül a mellékminimum előtt a

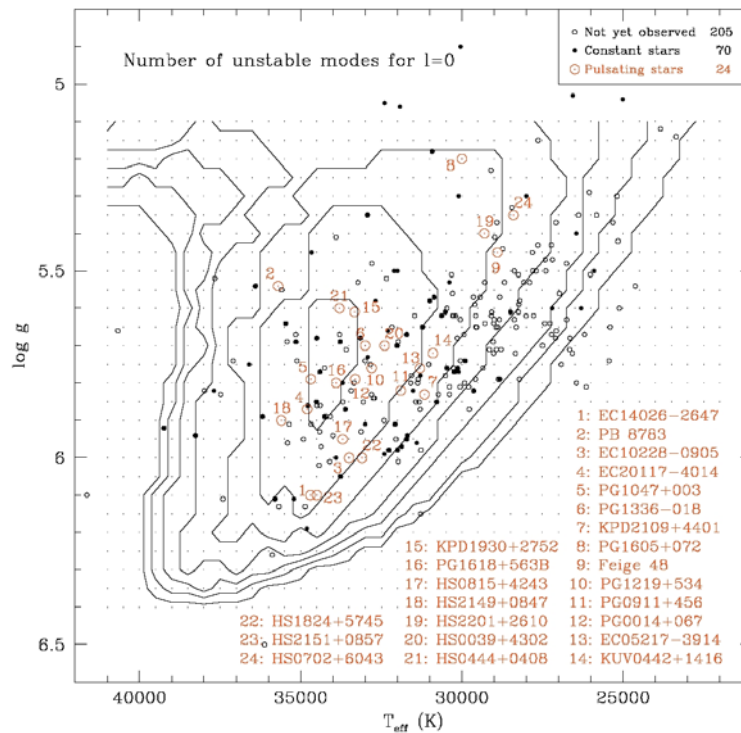
fényesség  $0,^{m}02$ -val nagyobb, mint a fedés után. A differenciális forgás miatt a másodkomponens közvetlenül fűtött része eltorzul. A forró folt a forgás irányában az egyenlítő mentén megnyúlik míg a másik oldalon benyomódik és aszimmetrikussá válik. Ezért a fedés kezdetén és végén eltérő nagyságú felületet látunk a foltból, ami fényességkülönbségként jelenik meg a fénygörbén. Ennek a jelenségnek egy másik megnyilvánulása okozza az ilyen kettős rendszerekben elhelyezkedő főszorozati törpék spektráltípusba sorolásának nehézségét. A differenciális rotáció következtében a felfűtött félgömb körbe vándorol a csillagon, ezáltal az egész csillaglégkört felmelegíti. Így a csillag felszíni hőmérséklete magasabb lesz mint a hasonló tömegű és méretű főszorozati csillagokra jellemző érték. A főkomponens besugárzása miatt a másodkomponens balra eltolódva, a szubtörpék között helyezkedik el a HRD-n, spektráltípusa pedig korábbi, mint egy hasonló méretű és tömegű, de magányos csillagnak. A HW Vir másodkomponense  $M2,5$  színképosztályú a spektruma alapján, de a hasonló, magányos főszorozati törpék színképtípusa  $M5$ , (Krzysztof Włodarczyk et al. 1994).

## A szubtörpe B típusú pulzátorok

Fontos esemény volt az sdB csillagok mélyebb megértése felé vezető úton az a felfedezés, hogy ezen csillagok egy része rövid periódusú pulzáló változócsillag. Néhány perces időskálán változtatják fényességüket, tipikusan néhány millimagnitúdós amplitúdóval. Az sdB csillagok pulzációját a  $\kappa$ -mechanizmus kelti a vasionizációs réteg opacitás-változásai miatt. A pulzáció elméleti lehetőségét Stephan Charpinet (S. Charpinet, 1996) mutatta ki röviddel az első sdB pulzátor 1997-es felfedezése előtt. Szubtörpe csillagmodellek és nem-adiabatikus hidrodinamikai kódok felhasználásával derült ki, hogy a vascsoport elemeinek létezik egy részleges ionizációs zónája (Z-bump), ami modulálhatja a csillagból kifelé áramló energiát. Hasonlóan mint például a cefeidák esetén létező hidrogénionizációs-zóna, ez a réteg is képes a csillagokat rezgésekre gerjeszteni. Azonban a  $\kappa$ -mechanizmus önmagában nem elegendő a csillagpulzáció magyarázatára. Szükséges még a fémfeldúsulás és a lokális diffúziós folyamatok jelenléte is. A diffúzió jelenségei csak a csillagatmoszférában megfigyelhetők és mérhetők, de közvetlen kapcsolatban állnak a mélyebb rétegekkel. A felszíni elemösszetételt a gravitációs erő, a sugárnyomás és a gyenge csillagszél együttesen alakítják ki. Bár látszólag független folyamat, a diffúzió mégis



meghatározó szerepet játszik a pulzáció hajtásában. Az elemösszetétel-számítások a hidrogénburok alján jeleznek vas feldúsulást, pont abban a rétegben, ahol az instabilitási zóna is elhelyezkedik. Ezek a vas feldúsulások szükségesek a  $\kappa$ -effektus fokozásához és az alacsony rendű, alacsony fokú p-módusok generálásához. Még az első sdB pulzátor felfedezésének évében találtak három másik változót, azóta az ismert pulzátorok száma meghaladta a 30-at. A fényváltozás jellemző periódusa 120-160 s közé esik.

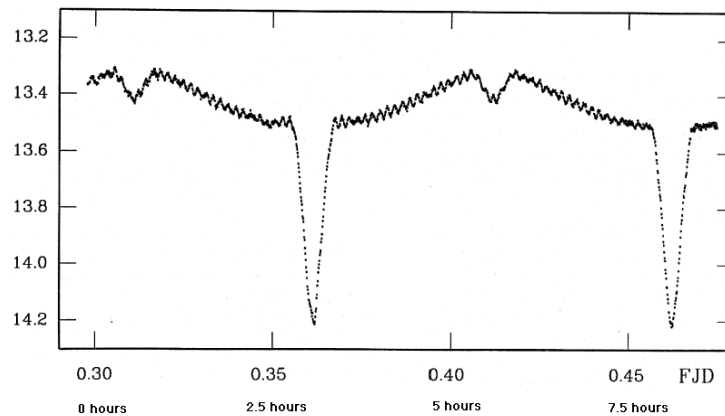


9. ábra. A szubtörpe B típusú csillagokra vonatkozó instabilitási sáv. (S. Charpinet, 2001)

Az ismert változócsillagok nagy része a  $\log g \sim 5,8$ ,  $T_{\text{eff}} \sim 33500$  K paraméterekkel leírható halmazba tartozik. A Kiel-diagram ezen részét szokták hélium instabilitási sávnak is nevezni. De a pulzáló sdB-k egy része kilóg ebből a tartományból, eltérő felszíni hőmérsékletük és gravitációs gyorsulásuk miatt. Ezek a csillagok többnyire hosszabb periódussal rendelkeznek,  $P=250-600$  s. Továbbá előfordulnak konstans csillagok is amelyek beszennyezik az elméleti instabilitási régiót, ezek fizikai hátterére még nincs magyarázat. Valószínűleg a pulzációt kiváltó okok bonyolultsága okozza ezt az eltérést. A 9. ábrán látható az sdB csillagokra vonatkozó instabilitási sáv. A számozott jelek az ismert tulajdonságú radiális pulzátorokat je-



lölük. A kontúrvonalak a gerjesztett radiális módusokat mutatják. A legkülső vonal az alaplómódusban rezgő, a legbelső pedig a 7. felhangban pulzáló csillagok helyét jelöli. Az ismert pulzátorok a 3 legmagasabb kontúron belül helyezkednek el. A pulzációt alacsonyrendű radiális és nem-radiális ( $l \leq 3-4$ ) akusztikus módusokkal lehet leírni. Az alacsony felszíni gravitációjú csillagoknál figyelhető csak meg a gravitációs módusok jelenléte és a móduskeveredés. Az oszcillációk amplitúdója általában 10 millimagnitúdó alatti.



10. ábra. Az NY Virginis (PG1336-018) szubtörpe és fősorozati törpe komponensekből álló fedési kettős fénygörbéje. A fedési kettősök jellegzetes fénygörbéjére szuperponálódik az sdB főkomponens pulzációjából eredő rövid periódusú fényváltozás. (Kilkenny et al. 1998)

## HW Virginis

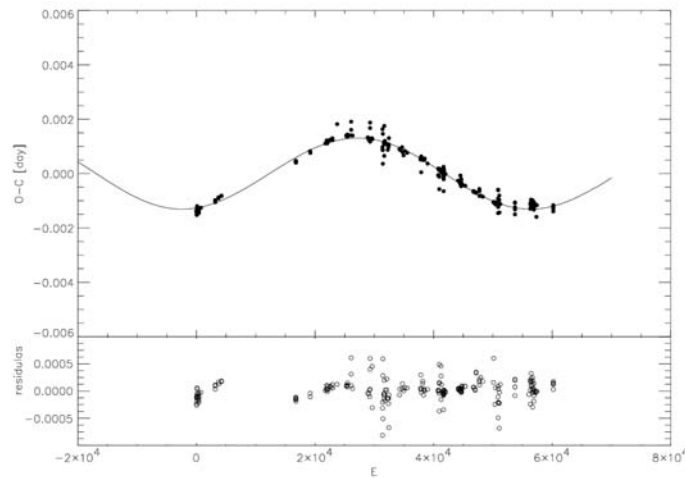
A HW Virginis először ultraibolya felmérések felvételein tűnt fel, mint forró szub-törpe csillag. Vizuális fényessége  $10^m5$ . 1986-ban Menzies és Marang vizsgálatai után derült ki, hogy nagyon szoros kettős rendszerről van szó ( $P_{\text{orb}} = 2,8$  óra). A fénygörbén a jellegzetes fő és mellékminimumok mellett nagyon erős reflexiós effektus figyelhető meg. A rendszer jelenlegi állapotának eléréséhez át kellett esnie a közös burok fejlődési állapoton. Többszín-fotometria segítségével kimutatható, hogy a főkomponens hőmérséklete  $29000 - 36000$  K közötti, a másodkomponens pedig  $\sim 3700$  K, a pálya inklinációja  $80,6 \pm 0,2$ . Spektroszkópiai vizsgálatok segítségével a főkomponens HeI vonalakkól megállapított radiális sebessége  $K_1 = 83,0 \pm 1,2$  km/s, a rendszer  $\gamma$ -sebessége  $v_\gamma = -9,1 \pm 0,9$  km/s, (Hilditch és mtsai., 1996). A rendszer egyvonalas kettős, színeképében eddig nem sikerült kimutatni a másodkomponens vonalait.

### A keringési periódus változása

A HW Virginis orbitális periódusának változása érdekesen alakult a felfedezése óta eltelt 19 év alatt. 1986 és 1994 között konstans periódus eltérés volt megfigyelhető. 1994-től azonban ez a tendencia megfordult. Az O–C görbe meredeksége negatív lett és két egyenes illesztésével volt legjobban leírható, arra utalva ezzel, hogy a törésponthoz tartozó időpontban valami hirtelen változás történt a rendszerben. Ilyen gyors változást szinte csak tömegátadással lehet magyarázni. De hasonló jelenséghez vezethet a mágneses fékeződés és egy harmadik komponens által okozott fényidő-effektus is. Az utóbbi évek mérései szerint az O–C ismét pozitív meredekségű, tehát ciklikus változásról van szó. Valószínűleg egy barna törpe méretű harmadik komponense okozza ezt az ingadozást az O–C görbén. Az O–C 112 másodperces változásának periódusa  $18,8 \pm 0,4$  év, amiből a harmadik komponens fél nagytengelye:  $A \cdot \sin i = 0,204 \pm 0,033$  Cs.E., a pálya excentricitása pedig 0,12. A harmadik komponens tömege legalább  $0,022 M_\odot$ , ami bolygónak túl nagy viszont hidrogénégető csillagnak túl kicsi, (İbanoğlu et al. 2004).

A HW Virginisre vonatkozó efemerisz:

$$\text{HJD}_{\text{min}} = 2\,445\,730,5565 + 0,116719582 \cdot E$$



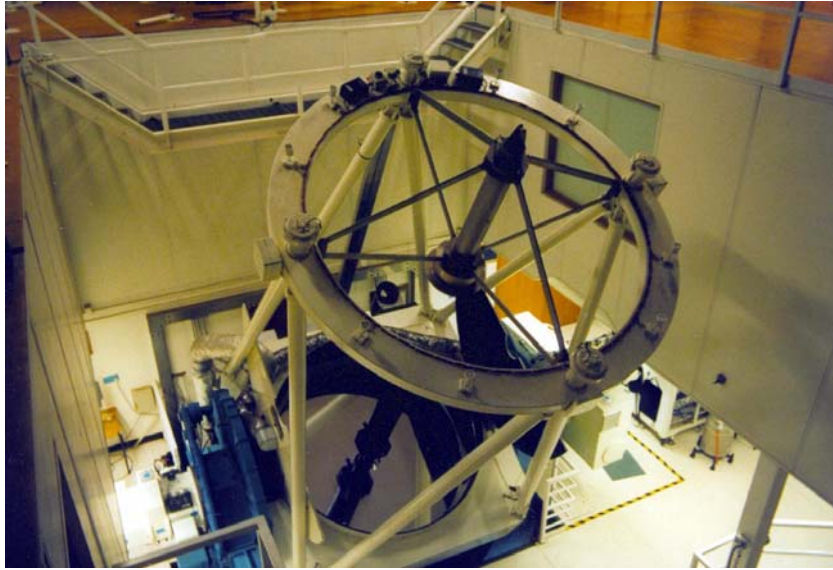
11. ábra. A HW Virginis O–C diagrammja. Az alsó panelen az illesztett periodikus függvény levonása utáni reziduál látható. (İbanođlu et al. 2004)

## A HW Virginis spektroszkópiája

Vizsgálataim során a 2003. május 11-22. és 2004. február 3-7. közötti 5-5 éjszakán felvett adatokat használtam. A spektrumok az ausztráliai Siding Spring Observatórium 2,3 méteres ( $f/2,05$ ) Cassegrain-Nasmyth rendszerű azimutális szerelésű távcsövével készültek. A műszer szerelésének érdekessége, mozgatását az egész dóm elforgatásával együtt oldották meg.

A DBS (Double-Beam Spectrograph) spektrográf ennek a távcsőnek a Nasmyth A fókuszában van elhelyezve. Az optikai hullámhossztartomány ( $3200\text{-}9000 \text{ \AA}$ )  $6000 \text{ \AA}$ -nél ketté van választva, és a sugarak külön spektrográfba jutnak. Technikailag ezek a spektrográfok csak abban különböznek, hogy CCD detektoraik (SiTE  $1752 \times 532$  pixel,  $15 \mu\text{m}/\text{pixel}$ ) érzékenysége a kék, illetve a vörös tartományra vannak optimalizálva. A rés hosszúsága  $6,7$  ívperc. A bontóelem  $158$  és  $1200$  vonal/mm között változtatható  $4$  fokozatban, ezzel a diszperzió  $4$  és  $0,6 \text{ \AA}/\text{pixel}$  között változik. Az  $1200\text{B}$  rácsot másodrendben használva  $0,3 \text{ \AA}/\text{pixel}$  érhető el a  $3200\text{-}5000 \text{ \AA}$  tartományon.

A spektrumok kinyeréséhez az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) vonatkozó taszkjait használtam. Minden éjszakán készültek a redukáláshoz és hullámhossz-kalibrációhoz szükséges képek. Közvetlenül az objektumképek felvétele előtt, vagy után készültek bias és flat képek. A  $0$  integrációs idővel felvett bias képek



12. ábra. A Siding Spring Observatórium 2,3 méteres távcsöve.

levonásával érhető el a pixelek különböző előfeszültségeinek a lenullázása. A flat képekkel pedig a pixelek eltérő érzékenységét lehet korrigálni. Az objektum képek között időnként készültek réz-argon spektrállámpa-képek is.

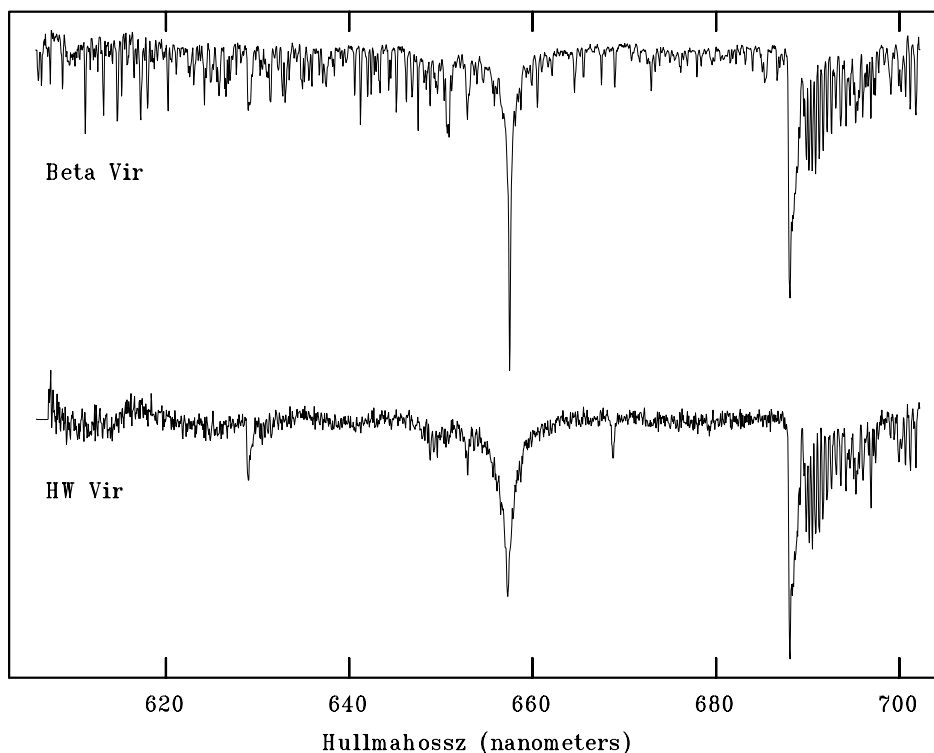
Redukálás során a jobb korrekció érdekében a flat és bias képek átlagával dolgoztam. Flatezés során nem alkalmaztam apertúrákat a CCD képre, hanem a korrekció elvégzése után a diszperziós tengellyel párhuzamosan megjelenő nagy intenzitású területeket levágtam. A spektrográf leképezése miatt nem lineáris a diszperziós tengely, ezért azokat nyomkövetni kell. Erre 5. rendű köbös spline függvény illesztése bizonyult a legjobbnak. Az rms (residual mean scatter) értékek tipikusan 0.003 - 0.01 között változtak. A spektrumok hullámhossz-kalibrációjához réz-argon lámpa vonalait használtam. Sajnos a közepes felbontású képek és a kis felbontású vonallisták közötti azonosságok megtalálása nem volt egyszerű feladat. A diszperziós tengely nyomkövetését az *apall* taszkkal hajtottam végre. Ez a program végzi még a háttér levonását és a spektrum kiextraktálását a CCD képből. Ez után következett a hullámhossz-kalibráció, amit a *dispcor* taszkkal lehet elvégezni. Azonban előbb szükséges a diszperziós tengely meghatározása, amit a spektrállámpák és az *identify* csomag segítségével csináltam meg. A felvett kalibrációs képeken és a standard laboratóriumi felvételeken ideális esetben kölcsönösen megfeleltethetők egymásnak a vonalak. Ezen vonalak helyzetének megadásával lehetséges a diszperziós tengely

Dátum	Expozíciós idő	Színképtartomány	Képek száma
2003. május 11.	180 s	5800 – 9000 Å	36
2003. május 16.	300 s	3600 – 4400 Å	24
2003. május 16.	300 s	6100 – 7000 Å	24
2003. május 17.	180 s	3600 – 4400 Å	61
2003. május 17.	120 s	6100 – 7000 Å	10
2003. május 19.	150 s	3600 – 4400 Å	20
2003. május 19.	300 s	6100 – 7000 Å	6
2003. május 22.	180 s	3600 – 4400 Å	18
2003. május 22.	90 s	6100 – 7000 Å	6
2004. február 3.	180 s	6100 – 7000 Å	28
2004. február 3.	180 s	3900 – 4400 Å	28
2004. február 4.	180 s	6100 – 7000 Å	43
2004. február 4.	180 s	3900 – 4400 Å	43
2004. február 5.	180 s	6100 – 7000 Å	25
2004. február 5.	180 s	3900 – 4400 Å	25
2004. február 6.	180 s	6100 – 7000 Å	72
2004. február 6.	180 s	3900 – 4400 Å	72
2004. február 7.	180 s	6100 – 7000 Å	8
2004. február 7.	180 s	3900 – 4400 Å	8

3. táblázat. A HW Virginisről készült spektrumok adatai

definiálása, a hullámhossz-tartomány és felbontás pontos beállítása. Majd az így nyert diszperziós tengelyt használtam az objektum képekhez is. Végül már csak a spektrum intenzitásának normalizálására volt szükség. Ezt a *continuum* taszkkal hajtottam végre.

A különböző időpontokban felvett spektrumok hasonló módon, mint a fénygörbe pontjai, fázisba rendezhetők. Így vizsgálhatjuk a keringés különböző fázisaihoz tartozó spektrális jellemzőket. A Doppler-effektus miatt a keringő csillagok spektrumvonalai periodikusan eltolódnak a laboratóriumi hullámhosszhoz képest. A hullámhosszak eltolódását vizsgálva megkaphatjuk a keringési sebességet (radiálissebesség-görbe), amiből származtathatjuk a pályaelemek egy részét. A HW Virginis főkomponenséhez tartozó  $H_\alpha$  vonal periodikus eltolódása jól látható a 14.



13. ábra. A HW Vir és a sebesség-standard  $\beta$  Vir spektrumai.

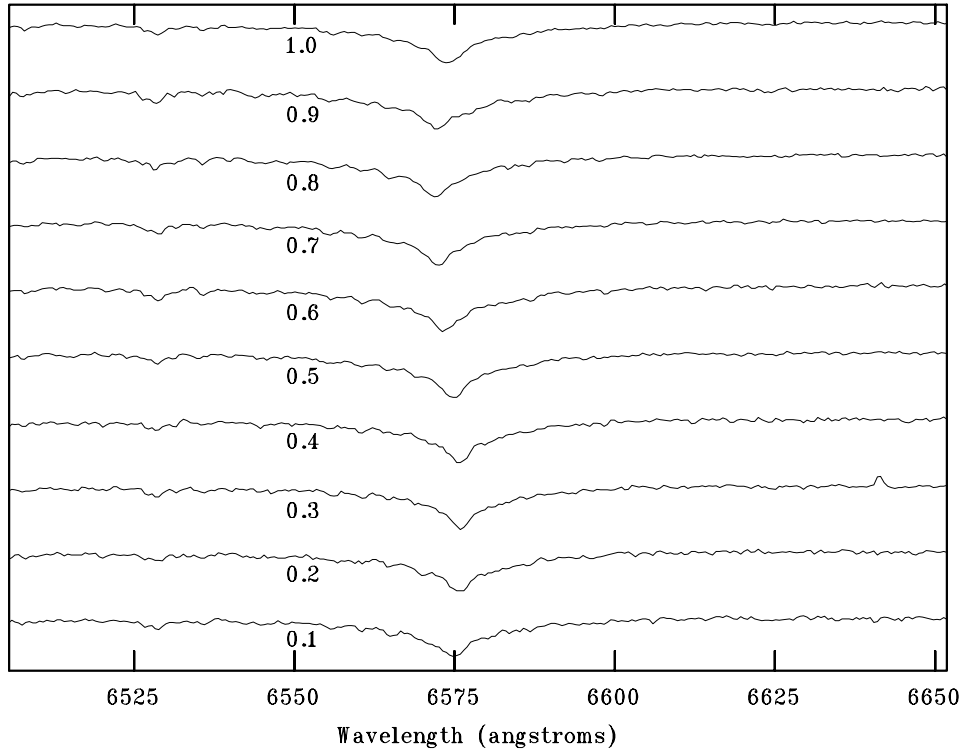
ábrán fázisba rendezett spektrumokon.

A 3900 – 4400 Å tartományban készült spektrumok hullámhossz-kalibrációja még folyamatban van. Az SSO honlapján<sup>6</sup> elérhető kalibrációs képek felbontása alacsony az ívlámpa-képeken megjelenő vonalak azonosításához. A vas-argon és a réz-argon lámpa megfelelő vonalainak azonosítása eddig szintén eredménytelennek bizonyult. Próbálkozást tettem az objektumképek ismert hullámhosszú hidrogén vonalai és a pixelkoordináta-rendszer közötti összefüggés segítségével az ívlámpa képeken látható vonalak hullámhosszainak azonosítására, sajnos ez a kísérlet is negatív eredménnyel zárult.

A 6100 – 7000 Å közötti spektrumok kalibrációja könnyebben zajlott. A kiredukált spektrumokból az *fxcor* taszk segítségével keresztkorrelációs módszerrel mértem a hidrogén  $\alpha$  vonalának eltolódását. Az *fxcor* a standard csillag (ismert radiális

<sup>6</sup>[http://msowww.anu.edu.au/observing/2.3m/DBS/dbs\\_arcs.html](http://msowww.anu.edu.au/observing/2.3m/DBS/dbs_arcs.html)

NOAO/IRAF V2.11EXPORT pnemeth@alcor Tue 22:50:40 04-May-2004  
Separation step = 0.5705111



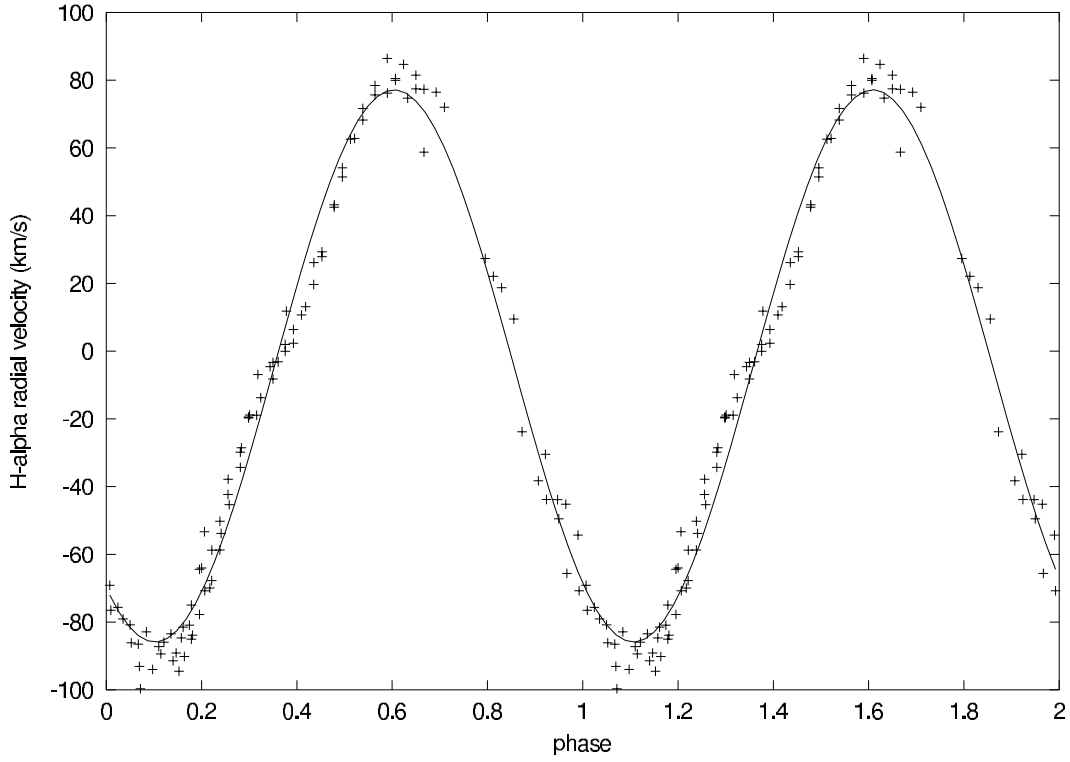
14. ábra. A  $H_\alpha$  vonal Doppler eltolódása kinagyítva.

sebességű) és az objektum spektrumok elcsúsztatásával keresi az azonos struktúrák eltolódását. Az így mért hullámhossz-különbségből a

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c \quad (5)$$

nem-relativisztikus Doppler-összefüggés alapján kapjuk meg a radiális sebességet, ahol  $\Delta\lambda$  a hullámhossz-különbség a  $\lambda$  hullámhosszú vonalon mérve,  $c$  pedig a fénysebesség.

A HW Vir Nap középpontjára vonatkoztatott radiális sebesség-görbéje a 15. ábrán látható. A görbe illesztésével megkaphatjuk a radiális sebesség-amplitúdóját és a rendszer tömegközépponti sebességét. A HW Virginis radiális sebesség-amplitúdója



15. ábra. A  $H_\alpha$  vonal hullámhosszán mért radiális sebesség-görbe.

$K_1 = 81,53 \pm 0,8$  km/s, tömegközépponti sebessége  $v_\gamma = -4,36 \pm 0,65$  km/s. Felhasználva a komponensek  $q = 0.3$  (H. Drechsel et al. 2001) tömegarányát, valamint a radiális sebesség és a tömegarány közötti  $q = K_1/K_2$  összefüggést, kiszámítható a csillagok tömegfüggvénye. A tömegfüggvény Kepler 3. törvényéből:

$$f(m_1, m_2) = \frac{4\pi^2}{G} \frac{(a_1 \sin i)^3}{P^2} = \frac{m_2^3 (\sin i)^3}{(m_1 + m_2)^2} \quad (6)$$

A tömegfüggvény származtatása a radiális sebességből és a keringési periódusból:

$$f(m_j) = \frac{m_j^3 (\sin i)^3}{(m_1 + m_2)^2} = 1,0385 \cdot 10^{-7} \sqrt{(1 - e^2)^3} \cdot (K_{3-j})^3 \cdot P \quad (7)$$

ahol  $j = 1; 2$ ,  $e$  a pálya excentricitása,  $i$  pedig az inklinációja. Mivel nagyon szoros kettőscsillagról van szó és a tagok közötti kölcsönhatás során az excentricitás nagy mértékben csökken feltételezhetjük, hogy a csillagok körpályán ( $e = 0$ ) keringenek. Ezzel a feltételezéssel a HW Virginis komponenseinek tömegfüggvényei:

$$f(m_1) = 1,0385 \cdot 10^{-7} \cdot (K_2)^3 \cdot P = 0,24329 M_\odot$$

$$f(m_2) = 1,0385 \cdot 10^{-7} \cdot (K_1)^3 \cdot P = 0,00657 M_\odot$$



## HS 0705+6700

A HS0705+6700 felfedezése Horst Drechsel és munkatársai nevéhez kötődik, (H. Drechsel et al. 2001). A Hamburg Schmidt Survey objektumaiból kiválasztott lehetséges sdB pulzátor csillagként vizsgálták 2000 októberében. Meglepő módon azonban fedési fényváltozást mutatott, a HW Virginiséhez hasonló Algol-típusú fénygörbével. Megelőző spektroszkópiai megfigyelések után kiderült, hogy a rendszer szubtörpe főkomponense a Kiel-diagramon az instabilitási sávon belül helyezkedik el, ezért várhatóan pulzáló csillag. A megfigyelések során azonban ez nem bizonyosodott be.

További mérések keretében a fedési fényváltozás 13 főminimumát figyeltek meg. Az ezekből számított efemerisz:

$$\text{HJD}_{\min} = 2\,451\,822,75982(\pm 2,2 \cdot 10^{-4}) + 0,09564665(\pm 3,9 \cdot 10^{-7}) \cdot E$$

A HS0705+6700-ról 2 éjszakán sikerült fotometriai méréseket végeznie Sárnecky Krisztiánnak a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet (MTA-CSKI) 90/60/180cm-es Schmidt-távcsövével.



16. ábra. A Magyar Tudományos Akadémia piszkéstetői 60/90/180 cm-es Schmidt távcsöve.

A felvételek adatait a 4. táblázat tartalmazza. Célom minél teljesebb fénygörbe felvétele volt, fő és mellékminimum-időpontok meghatározására valamint fénygörbe illesztésével a kettős paramétereinek kinyerésére.

Dátum	Expozíciós idő	Szűrő	Képek száma
2004. január 6.	90 s	V	149
2004. március 6.	90 s	I	181

4. táblázat. A HS0705+6700-ról készült képek adatai

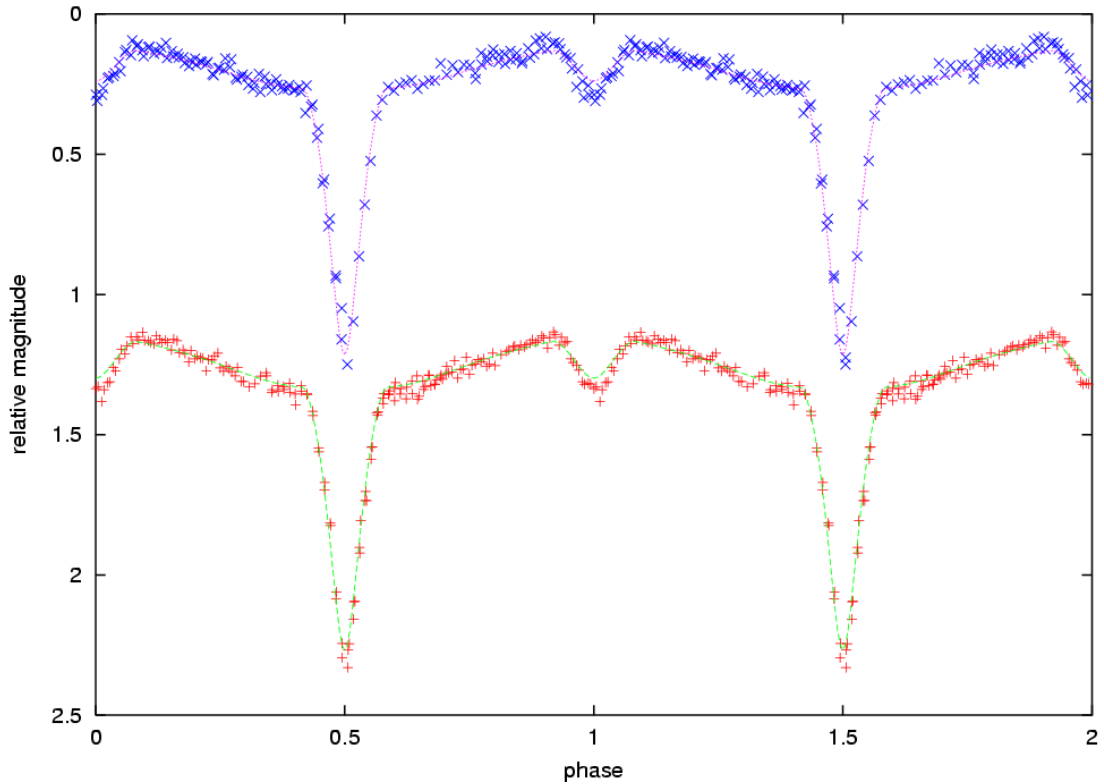
A képek redukálását és kiértékelését az IRAF programcsomaggal végeztem, a fotometriát a *phot* taszk segítségével csináltam. A *phot* apertúra fotometriát valósít meg. A program az apertúrába eső pixelek intenzitásait összegzi, majd a kapott fényességből levonja az apertúra körül mért égi háttér intenzitását. A fotometriát elvégezve a változócsillagra és legalább egy összehasonlítóra kinyerhetjük a vizsgált objektum fényességét. Sorozatban felvett képek kimérésével juthatunk a változócsillag idő-fényesség összefüggéséhez, amit ábrázolva nyerjük az instrumentális fénygörbét.

A fénygörbe pontjait fázisba rendezhetjük a periódus meghatározása után. Az I és V szűrős fázisgörbe a 17. ábrán látható.

Egy korábbi alap epocha és periódus használatával kiszámítható az O–C görbe, ami a változócsillagok pontos periódusának és a periódus esetleges változásának nyomonkövetését teszi lehetővé. Az O–C számítása:

$$O - C = t_E - (t_0 + E \cdot P_0) \quad (8)$$

ahol  $t_E$  a ciklusszám,  $t_0$  és  $P_0$  az elfogadott alap epocha és periódus. Mivel kis hiba a periódus idejében nagy ciklusszám után mérhető nagyságú elérést okoz a minimumidőpontok bekövetkezésében, nagy időtartamokon átívelő megfigyelések segítségével pontosítható a fényváltozás periódusa. A pontosabb periódust megkaphatjuk az O–C-re illesztett egyenes meredekségének meghatározásával. Az illesztett egyenes hibája adja a az újonnan megkapott periódus hibáját. Az 5. táblázatban foglalom össze a V és I színszűrős fénygörbékről leolvasott minimumidőpontokat és az azokból meghatározott O–C mennyiségeket. A minimumidőpontok meghatározása céljából kiválasztottam a fénygörbék fő és mellékminimumokat tartalmazó



17. ábra. A HS0705+6700 fázisgörbéje és a Nightfall-lal illesztett fénygörbe. A felső fázisgörbe V, az alsó I szűrővel készült. Az I görbe 1 magnitúdóval el lett tolva a jobb szemléltetés végett.

szakaszait és ezekre parabolákat illesztettem. Majd a parabolák minimumát meghatározva nyertem a fedések időpontjait. A minimumidőpontok hibáit az illesztett parabolák félértékszélességével közelítettem.

A 18. ábrán látható a HS0705+6700 új minimumidőpontokkal kiegészített O–C diagramja. A  $HJD = 2451800 - 2452000$  napok közötti pontok irodalmi adatok (H. Drechsel et al. 2001). Az O–C illesztésével kapott perióduskorrekció és az új periódus hibája a HS0705+6700 esetében:

$$\Delta P = +1,551118 \cdot 10^{-7} \text{ nap}$$

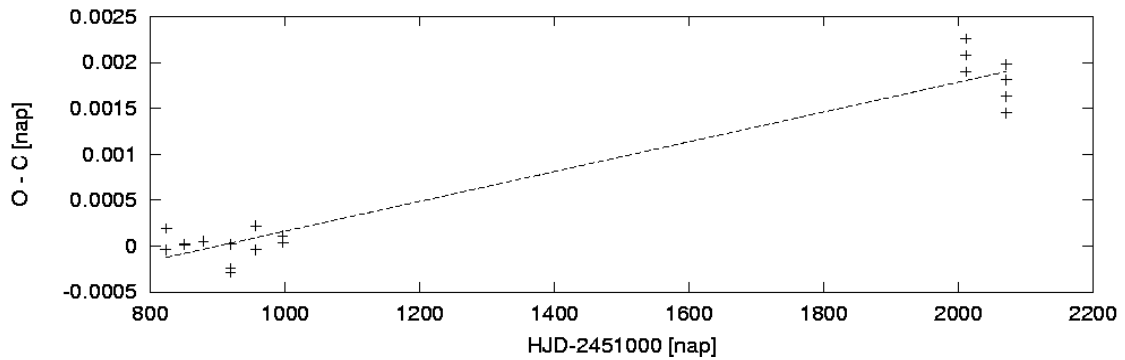
$$\delta P = \pm 9,374 \cdot 10^{-9} \text{ nap}$$

Az új minimumidőpontok és periódus felhasználásával nyert efemerisz:

$$HJD_{min} = 2\,453\,011,3621 + 0,095646805(\pm 9,374 \cdot 10^{-9}) \cdot E$$

MJD	Hiba	Minimum típusa	Szűrő	Fedés száma	O–C
53011.31422	$\pm 0,0045$	<i>II</i>	V	12426.5	0.00190
53011.36210	$\pm 0.0035$	<i>I</i>	V	12427	0.00208
53011.41093	$\pm 0.006$	<i>II</i>	V	12427.5	0.00226
53071.28492	$\pm 0.004$	<i>II</i>	I	13053.5	0.00145
53071.33278	$\pm 0.0035$	<i>I</i>	I	13054	0.00163
53071.38043	$\pm 0.0055$	<i>II</i>	I	13054.5	0.00181
53071.42819	$\pm 0.004$	<i>I</i>	I	13055	0.00198

5. táblázat. A HS0705+6700 fő és mellékminimum-időpontjai (MJD=HJD-2400000)

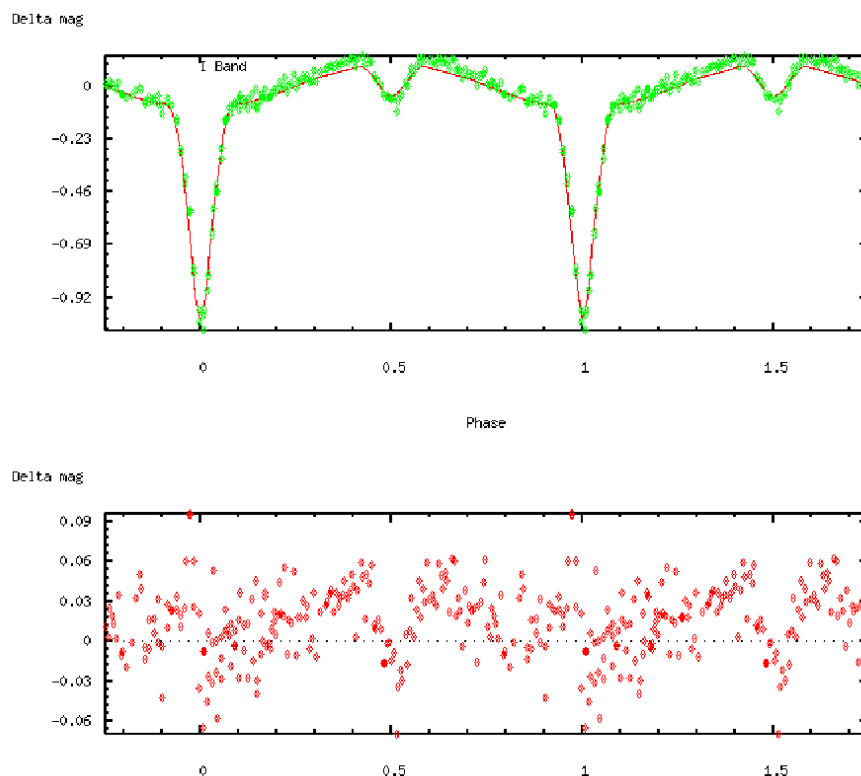


18. ábra. A HS0705+6700 O–C ábrája.

A fénygörbe illesztésével kinyerhetők a rendszer olyan asztrofizikai paramétereit, mint: tömegarány ( $q$ ), pálya inklináció ( $i$ ), a csillagok sugarai ( $R_1, R_2$ ) és effektív hőmérsékletei ( $T_1, T_2$ ), valamint a Roche-üregek kitöltöttségei. Erre a célra a *Nightfall* programot használtam. A program bemenete egy fejléccel ellátott ASCII adatfájl, amely tartalmazza az időpont-fényesség értékpárokat.

A program közelítő kezdeti értékek megadása után legkisebb négyzetes illesztéssel keresi az adatsort legjobban leíró paraméter-konfigurációkat. Az több dimenziós paraméterterben az illesztés konvergenciája lassú, ezen gyorsíthatunk a közelítő kezdeti értékek megadásával és az illesztendő paraméterek csökkentésével.

A fénygörbe illesztése során törekedtem a fő-, és mellékminimumok, valamint a reflexió pontos követésére. A V és I szűrős fénygörbék szimultán illesztésével  $\chi^2 = 273,52$  értéknél sikerült a megfelelő görbe előállítás. Sajnos a *Nightfall*-al nem lehet 3000 K-nél hidegebb csillagokat modellezni. A másodkomponens hőmérsék-



19. ábra. A Nightfall-lal illesztett fénygörbe. Az alsó ábrán az illesztett görbe levonása után maradó reziduál látható.

lete viszont  $2900 \pm 600$  K, (H. Drechsel és mtsai., 2001). Ezért a csillag hőmérsékletét 3000 K körül tartva változtattam a főkomponens hőmérsékletét. A csillagok össztömegét induláskor  $0,6 M_{\odot}$  tömegnek választottam, távolságukat pedig  $0,9 R_{\odot}$ . Az első néhány iterációs lépés után a csillagok tömegaránya beállt  $q = 0,232$  értékre, a továbbiakban a gyorsabb illesztés érdekében a tömegarányt is fix értéken tartottam, csak a többi paramétert illesztettem. Az így nyert adatok a 6. táblázatban szerepelnek.

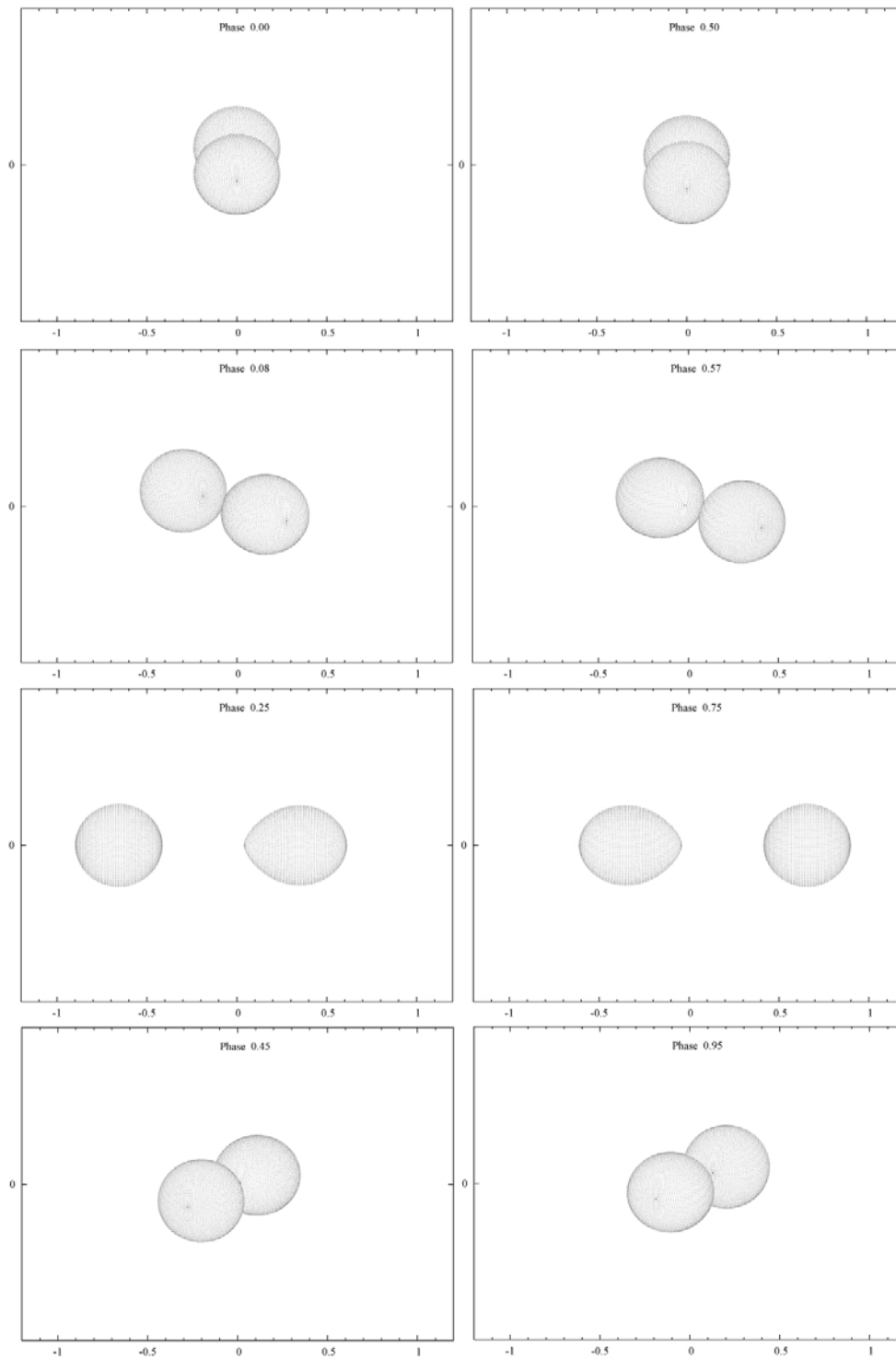
A csillagok Roche-üregének kitöltési faktora:  $\Omega_1 = 0.547$ ,  $\Omega_2 = 0.982$ .

A csillagok távolsága  $0,74 R_{\odot}$ .

	HW Vir	NY Vir	HS 0705+6700
Szerző	Wood et al. 1993	Kilkenny et al. 1998	saját eredmények
Szűrő	UBVR	UVR	VI
$P$	2 óra 48 perc	2 óra 25 perc	2 óra 17 perc
$q$	$\sim 0,3$	0,3	0,232
$i$	$80,6^\circ$	$81^\circ$	$81,21^\circ$
$K_1^a$	87,9 km/s	78 km/s	73,1 km/s
$T_1$	$\sim 33000$ K	33000 K	29400 K
$T_2$	$\sim 3700$ K	$\sim 3000$ K	$\sim 3057$ K
$M_1^a$	$0,54 M_\odot$	$\sim 0,50 M_\odot$	$0,487 M_\odot$
$M_2^a$	$0,18 M_\odot$	$0,17 M_\odot$	$0,113 M_\odot$
$R_1^a$	$0,183 R_\odot$	$0,165 R_\odot$	$0,193 R_\odot$
$R_2^a$	$0,188 R_\odot$	$0,175 R_\odot$	$0,182 R_\odot$

6. táblázat. A 3 ismert szubtörpe-fősorozati törpe adatai. A HS0705-re vonatkozó értékek saját eredmények.

<sup>a</sup> A jelölt mennyiségek nem kaphatók meg csupán a fénygörbe illesztésével.



20. ábra. A fénygörbe modellezésével felbontott HS0705+6700 különböző keringési fázisok mellett.

## Összefoglalás

Dolgozatomban a forró szubtörpe csillagok legfontosabb tulajdonságait tekintetem át, részletezve a keletkezésük jelenleg elfogadott elméleti modelljeit. Általánosan bemutattam a szubtörpe B színképtípusú és fősorozati törpe komponensekből álló csillagrendszerek főbb jellemzőit.

Fotometriai adatok felhasználásával pontosítottam a HS0705+6700 kettőscsillag keringési periódusát és fénygörbéjének modellezésével meghatároztam a rendszer egyéb paramétereit, úgy mint: tömegarány, inklináció, komponensek hőmérsékletei.

A rendelkezésemre álló spektroszkópai adatok részbeli feldolgozásával nyert radiálissebesség-görbe segítségével meghatároztam a HW Virginis főkomponensének keringési sebességét és a rendszer tömegközéppont sebességét.

A későbbiekben a spektrumok teljes kiértékelésével csillaglégköri paramétereket szeretnék meghatározni a HW Vir-re, valamint a másodkomponens közvetlen kimutatását akarom elérni a spektrumok alapján. Ezek eredményeit referált szakirodalomban tervezem közölni. Továbbá szándékomban áll fotometriai méréseket végezni a dolgozatban szereplő egyéb csillagokról is.



## **Köszönetnyilvánítás**

Ez úton szeretném megköszönni témavezetőimnek, Dr. Kiss L. Lászlónak és Dr. Szatmáry Károlynak, a munkám során nyújtott segítségüket, támogatásukat és türelmüket. Továbbá köszönöm Dr. Kiss L. Lászlónak és Sárneczky Krisztiánnak az észlelői munkát. Végül de nem utolsó sorban köszönöm Mészáros Szabolcsnak, Székely Péternek és Csák Balázsnak építő észrevételeiket és segítségüket.

## Hivatkozások

- [1] H. Drechsel, U. Heber, R. Napiwotzki, R. Østensen, J.-E. Solheim, F. Johannesen, S. L. Schuh, J. Deetjen, and S. Zola, 2001, *A&A* 379, 893-904
- [2] C. İbanoğlu, Ö. Çakirli, G. Taş, and S. Evren, 2004, *A&A* 414, 1043-1048
- [3] Z. Han, Ph. Podsiadlowski, P. F. L. Maxted, T. R. Marsh and N. Ivanova, 2002, *MNRAS* 336, 449-466
- [4] Z. Han, Ph. Podsiadlowski, P. F. L. Maxted and T. R. Marsh, 2003, *MNRAS* 341, 669-691
- [5] S. Charpinet, 2001, *Astron. Nachr.* 322, 387-393
- [6] L. L. Kiss, B. Csák, K. Szatmáry, G. Fűrész, and K. Sziládi, 2000, *A&A* 364, 199-204
- [7] Janet H. Wood and R. Saffer, 1999, *MNRAS* 305, 820-828
- [8] Krzysztof Włodarczyk and Piotr Olszewski, 1994, *Acta Astr.* 44, 407-416
- [9] Ronald E. Taam, 1994, *ASP Conf.* 56, 208-218
- [10] Steven D. Kawaler and Shelbi R. Hostler, 2004, *astro-ph/0401118*, 1-8
- [11] D. Kilkenny, D. O'Donoghue, C. Koen, A. E. Lynas-Gary and F. van Wyk, 1998, *MNRAS* 296, 329-338
- [12] Sonja L. Schuh, 2003, *EAS Publications Series Vol. 6*, 287-289
- [13] Janet H. Wood, Er-Ho Zhang and E. L. Robinson, 1993, *MNRAS* 261, 103-112
- [14] Thomas M. Brown, Allen V. Sweigart, Thierry Lanz, Wayne B. Landsman, and Ivan Hubeny, 2001, *ApJ* 562, 368-393
- [15] Thorsten Lisker, 2003,  
<http://home.arcor.de/thorsten.lisker/diplom/diplom.html>

# Nyilatkozat

Alulírott Németh Péter V. éves csillagász szakos hallgató kijelentem, hogy a diplomadolgozatomban foglaltak a saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem, hogy diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

Szeged, 2004 április 30.

Aláírás