

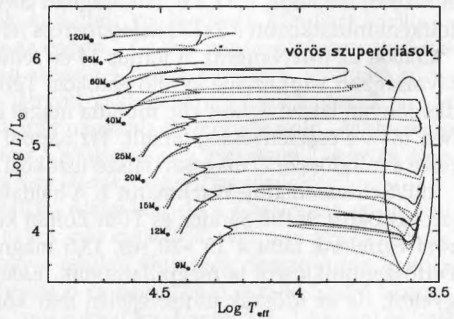


# Változócsillagok

## A Tejútrendszer legnagyobb csillagai: pulzáló vörös szuperóriások

A közepesen nagy tömegű (kb. 10 és 30 naptömeg között) csillagok rövid, mindössze néhány tízmillió éves életének fontos szakasza a felfúvódott vörös szuperóriás állapot. Minden csillag a fősorozaton kezdi fejlődését, ahol a magbéli hidrogén-hélium fúziós reakciók termelik az energiát. Az említett tömegtartományba eső objektumok a főszorozat tezején, fényes kék csillagokként tűnnek fel a csillagkeletkezési régiókban, majd a pazarló energiafogyasztás mellett gyorsan kimerítik a csillagmag hidrogénkészleteit. Ezek után a magban, majd a mag körüli koncentrikus héjakban egyre nagyobb hőmérsékleteket igénylő, illetve fajlagosan nagyobb energiákat termelő fúziós reakciók indulnak be, amelyek eredményeként az új egyensúlyi állapot eléréséhez a csillag nagy mértékben kitágul, illetve felszíni hőmérséklete lecsökken – megszületik egy vörös szuperóriás. A 0,5–1 milliós évig tartó fejlődési állapot végén a csillag II-es típusú szupernóvaként felrobban (bizonyos esetekben elképzelhető, hogy a robbanás előtt még visszafejlődik a kék szuperóriások közé), amivel nagy mennyiségben feldúsítja nehéz elemekkel a csillagközi anyagot.

Mellékelt ábránkon Meynet és Maeder számításai alapján mutatjuk be a 9 és 120 naptömeg közé eső csillagok fejlődését a Hertzsprung-Russell-diagramon. A diagram vízszintes tengelyén a felszíni hőmérséklet logaritmus látható fordított irányban, azaz a hidegebb csillagok jobbra helyezkednek el. A berajzolt fejlődési útvonalak azt mutatják, hogy a megadott kezdő tömegű objektumok hogyan vándorolnak a fényteljesítmény (luminozitás) és hőmérséklet által kifeszített síkon, ahol a kiinduló főszorozati pozíciók a bejelölt tömegértékek-nél találhatóak. A fejlődési útvonalak az ábra jobb oldalán érik el a vörös szuperóriások hőmérséklet-tartományát ( $T_{\text{eff}} < 5000 \text{ K}$ ), és jól látszik, hogy itt a különböző tömegű csillagok közel azonos hőmérsékletre hűlnek le, illetve erős tömegfényesség arányosság áll fenn (a nagyobb tömegű csillagok nagyobb luminozitásúak).



Nagy tömegű csillagok fejlődési útvonalai, illetve a vörös szuperóriások helyzete a Hertzsprung-Russell-diagramon

A vörös szuperóriás csillagok fantasztikus objektumok. A látható-közeli infravörös tartományban galaxisuk legfényesebb csillagai közé tartoznak, azaz több milliőtízmillió fényévről is detektálhatók a mai csillagászati műszerekkel. Légköri („felszíni”) hőmérsékletük 3500–5000 K közötti, kisugárzott össz fényteljesítményük pedig 10 ezer napluminozitástól 300 ezer napluminozitásig terjed. A nagy luminozitáshoz és alacsony hőmérséklethez óriási méret tartozik: e csillagok sugara 500–2000 napsugár közé esik, ami a Csillagászati Egység 214 napsugárnyi hossza mellett akár 8–10 Cs.E. sugarat jelent – azaz akár a Szaturnusz pályájáig is elérhetet egy Napunk helyére tett vörös szuperóriás!

Ritka objektumok, ám nagy abszolút fényességüknek köszönhetően a Kedves Olvasó is látott már ilyen galaktikus szörnyet: elég utalni a Betelgeuze-re ( $\alpha$  Ori), illetve az Antaresre ( $\alpha$  Sco), mint a két legnagyobb látszó fényességű vörös szuperóriásra. Hasonlóan félszóséges csillag az  $\alpha$  Her és a  $\mu$  Cep; utóbbit Gránátcsillag néven is ismerjük (feltűnő vörös színének köszönheti a William Herscheltől eredő elnevezést). Közös tulajdonságuk a nem túl szabályos fényváltozás, amelyet ismétlődő kitágulásuk és összehúzódásuk, azaz pulzációjuk okoz.

Amatőr csillagászok hada már sok évtizede folyamatosan észleli a legfényesebb vörös szuperóriásokat. A Változócsillag-észlelők Amerikai Társasága (AAVSO) nagy mennyiségű megfigyelési adatot gyűjtött össze a 20. sz. során, ami felbecsülhetetlen értékű információt hordoz erről az érdekes változócsillag-osztályról. Jelen cikkben azokat az eredményeket mutatjuk be, melyeket 48 változóról összesen 2900 évnyi vizuális fénygörbe elemzésén keresztül értünk el.

## Vörös szuperóriás változócsillagok

A Változócsillagok Általános Katalógusa (GCVS) két altípusba sorolja a pulzáló vörös szuperóriásokat:

**SRc:** kései típusú (M, C, S vagy Me, Ce, Se) félszabályos szuperóriások ( $\mu$  Cep) 1 magnitúdó körüli amplitúdóval, illetve 30-tól több ezer napig terjedő periódusokkal;

**Lc:** szabálytalanul változó kései spektráltípusú szuperóriások 1 magnitúdó körüli amplitúdóval a V sávban (TZ Cas).

A két definíció egyetlen különbsége a félszabályos (szemireguláris), illetve a szabálytalan (irreguláris) jelzők használata, amit a fényváltozás ismétlődésének eltérő mértéke indokol(hat). A tapasztalat szerint azonban az Lc típusú változók fizikai paraméterei nagyon hasonlóak az SRc csillagokéhoz, így a vörös szuperóriások, mint csillagtípus szempontjából a két kategória megkülönböztetése nem feltétlenül szükséges (ugyanaz a helyzet az SRb és Lb típusú aszimptotikus óriásági változókkal, melyek elsődlegesen csak a fényváltozás amplitúdójában különböznek és a szabálytalanak minősített Lb-k is ugyanolyan többszörösen periodikus változók, mint az SRb-k). Ennek jegyében vizsgálatunk során az összes szóba jöhető SRc és Lc típusú változót megvizsgáltuk a fénygörbéik periodikussága, illetve a periódusok stabilitása szempontjából.

## Adatok és elemzésük

Az AAVSO számítógépes adatbázisában 2005-tel bezárólag több mint 6000 változócsillagról 12 milliónyi egyedi fényességbecslés található. Habár az AAVSO-t 1911-ben alapították, néhány csillagra még korábbi adatok is fellelhetők a szervezet archívu-

mában. Ezek közül egyenként megnéztük a különböző szakirodalmi forrásokban város szuperóriásként említett csillagok fénygörbéit, hogy azonosítsuk a megbízható analízisre alkalmas adatsorokat. Közel 100 csillagból végül 48-at találtunk legalább 400 fénygörbe-ponttal, és ezekből állt össze a végső csillaglista.

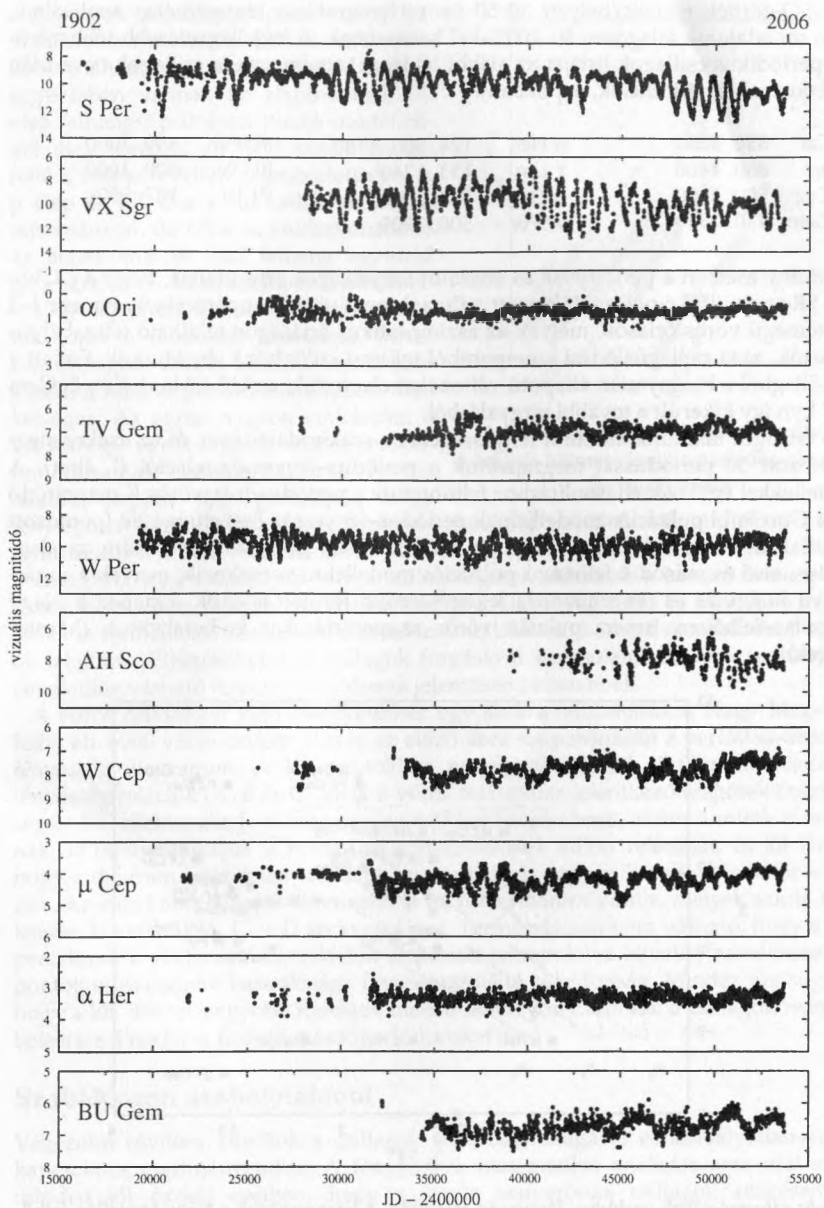
A minta legfényesebb objektuma az  $\alpha$  Ori, amely  $0^m,3$  és  $1^m,2$  között változott az elmúlt közel 90 évben. A sor másik végén a két legnagyobb amplitúdójú változó, az S Per és a VX Sgr áll, melyek minimumban a  $13^m,0$ -s fényességet is megközelítik. A leghosszabb adatsor az S Per és a T Per görbéje, mindkettő 103 év hosszú, ráadásul csak rövid kihagyásokkal a 20. sz. során. A legtöbb észlelés a  $\mu$  Cep-ről áll rendelkezésre, hajszállal 40 ezer egyedi becslés fölött. A teljes mintára vonatkozóan csillagonként átlagosan 61 évnyi fénygörbe tanulmányozható a közel negyed millió fénybecslés alapján, ami minden korábbinál részletesebb és megbízhatóbb elemzést tesz lehetővé erre a csillagfejlődési állapotra.

A következő oldalon bemutatott ábrán néhány jellegzetes fénygörbetípust mutatunk be. Legtöbb esetben két, jól elkülönülő időskálájú változást látunk, melyek egyike sem szigorúan ismétlődő, míg a fénygörbe teljes amplitúdója nem haladja meg az 1 magnitúdót. Legjobb példa erre az  $\alpha$  Ori és a TV Gem, melyek változékonyság szempontjából szinte ikreknek tekinthetők: a 400 nap körüli periódusú „gyors” oszcillációk mellett hangsúlyosak a 6 évhez közeli időskálájú, lassabb ingadozások. Ezzel szemben áll néhány nagy amplitúdójú változó, melyek akár 3–4 magnitúdónyit is ingadoznak, jellemzően 600–800 nap közé eső periódusokkal és erős fénygörbeváltozásokkal (S Per, VX Sgr). A két véglét között pedig szép számmal találunk 1–2 magnitúdós amplitúdójú csillagokat, viszonylag jól definiált periódusokkal, melyek általában néhány száz nap hosszúak (AH Sco, W Per). Végezetül néhány csillagnál egyértelmű, hogy változik a fényesség, ugyanakkor nincs egyetlen egy jól definiált periódus sem (pl. CE Tau, W Cep, BU Gem).

A fénygörbéket a Meteorban rendszeresen közölt feldolgozások módszereivel elemeztük. Mivel az egyedi fényességbecslések hibája több tized magnitúdó, a görbéket átlagoltuk 10 napos átlagolási idővel. Az átlagpontok hibája ezzel jelentősen csökkenthető, a fénygörbék pedig tisztábban mutatják az észlelt változásokat. Az adatokat ezután többféle periódus-meghatározó módszerrel is feldolgoztuk (Fourier-analízis, wavelet-analízis, a frekvenciaspektrum statisztikus vizsgálata), amelynek eredményeként periódusokat rendeltünk hozzá azokhoz a csillagokhoz, melyekre ez lehetséges volt, illetve jellemeztük a fénygörbék (asztrofizikai eredetű) zajosságát. Megvizsgáltuk a minta által kirajzolt periódus–fényesség–relációkat azon változók alapján, melyek nyílthalmazok, ill. OB-asszociációk tagjaként ismert abszolút fényességűek. Kevés esetben a Hipparcos asztrometriai műhold parallaxismérései is használhatóknak bizonyultak. A csillagok rezgéseire vonatkozó következtetésekhez pedig összehasonlítottuk a periódusok és abszolút fényességek eloszlását elméleti modell-számításokkal.

## Többszörös periodicitás, periódus–fényesség–relációk

A fénygörbék alapján összesen 56 periódust határoztunk meg 37 csillagra. Ezek közül 28 csillagra 33 periódust találtunk korábbi vizsgálatokban, melyekkel az egyezés igen jó. Mivel az AAVSO adatai a valaha elemzett leghosszabbak a tanulmányozott csillagokra, várható, hogy a kapott periódusok pontosabbak az irodalmiaknál. Az utolsó széles körű periódusvizsgálatot Stothers és Leung közölte 1971-ben, akik az akkori



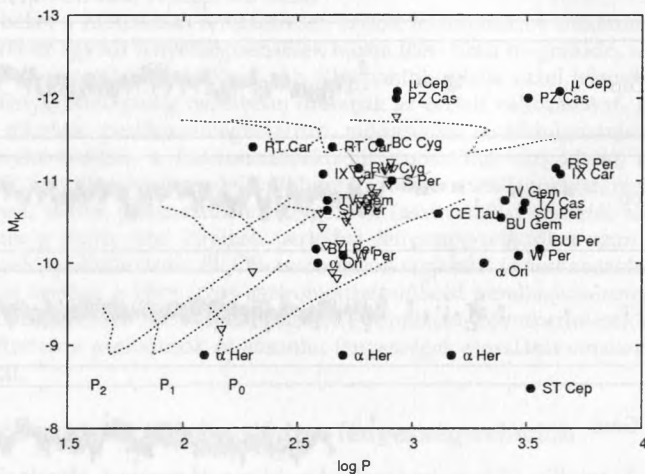
Néhány jellegzetes SRC változó fénygörbéje AAVSO-adatak alapján

AAVSO-görbék mellett/helyett 30–50 évnvi fotografikus fénygörbéket analizáltak, így a mi adataink átlagosan 50–100%-kal hosszabbak. A legjellegzetesebb többszörösen periodikus csillagok listáját az alábbi táblázat tartalmazza (a csillagok neve után következnek a periódusok, napokban):

PZ Cas	850, 3200	$\alpha$ Her	124, 500, 1480	SU Per	430, 3000
$\mu$ Cep	860, 4400	Y Lyn	133, 1240	BU Per	380, 3600
AZ Cyg	500, 3300	$\alpha$ Ori	388, 2050	W Tri	107, 590
TV Gem	430, 2550	W Per	500, 2900		

Néhány esetben a periódusok és abszolút fényességek arra utaltak, hogy a GCVS-ben SRc-nek, ill. Lc-nek osztályozott változók nem vörös szuperóriások, hanem 1–2 naptömegű vörös óriások, melyek az aszimptotikus óriáságon található félszabályos változók, azaz csillagfejlődési szempontból teljesen különböző objektumok. Emiatt a 48 csillagból a bizonytalan állapotú változókat elvetettük, az UZ CMA, T Cet, IS Gem és Y Lyn így kikerült a további tárgyalásból.

18 csillagra találtunk abszolút fényességeket a szakirodalomban, és az ezekre meghatározott 30 periódussal megrajzoltuk a periódus–fényesség–relációt (1. ábra). A modellelkel való összehasonlításához feltüntettük a periódus–infravörös K magnitúdó síkra Guo és Li pulzációs modelljeinek periódus–fényesség összefüggéseit (pontozott vonallal az ábrán). A három, egymás mellett látszó görbesorozat rendre az alpmódus, első és második felhangú pulzációs modellekre vonatkozik, melyek a sugárirányú kitágulás és összehúzódás legegyszerűbb formáit jelentik. Emellett a Nagy Magellán-felhőben ismert pulzáló vörös szuperóriásokat is berajzoltuk (háromszögek).



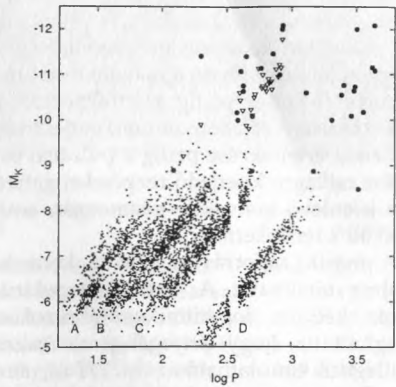
Vörös szuperóriások periódus–fényesség–relációja. A háromszögek a Nagy Magellán-felhő csillagait, míg a pontozott vonalak Guo és Li elméleti számításait mutatják különböző pulzációs módusokra

A pontok eloszlása alapján néhány következtetés vonható le. Először is, a rövidebb (néhány száz napos) periódusok jó egyezésben vannak az alaplódiusú, ill. első felhangú pulzációt jósló modellekkel. Egy esetben, az RT Car-nál gyanítható a második felhang gerjesztettsége. A  $\mu$  Cep és PZ Cas kívül esik a modellek tartományán, de rájuk is valószínűsíthető az alaplódius és első felhang egyidejű gerjesztettsége. Ezzel szemben a hosszabb (>1500 nap) periódusok nem egyeztetők össze a modellek jóslataival. Mivel sok csillagnál látunk hasonló kettős időskálát, a hosszú periódusok létezése nem kétséges. Az egész nagyon emlékeztet a kis tömegű vörös óriások hosszú másodperiódusainak tulajdonságaira, és az adatok alapján úgy gondoljuk, hogy ténylegesen hasonló fizikai mechanizmus okozhatja mindkét csillagtípusban a lassú fluktuációkat. Ennek részletei mind a mai napig rejtélyesek, és csak annyit tudunk a jelenségről, hogy valamilyen furcsa csillagrezgések állhatnak a hosszú másodperiódusok hátterében, melyek a konvekcióhoz (a csillaganyag forró és hűvösebb gázburorékok formájában történő ciklikus fel-le áramlásához) köthető nemradiális pulzációk lehetnek. Elképzelhetők a csillagok forgásával kapcsolatos hatások is, habár az elméletileg várható rotációs periódusok jelentősen hosszabbak.

A vörös óriásokkal való összevetéshez egy ábrára feltüntettük a Nagy Magellán-felhő kb. 6000 vörös óriását, illetve az előző ábra szuperóriásait a periódus–abszolút fényesség diagramon. A kis pontokban megfigyelhető, jól elkülönülő periódus–fényesség-reláció (A, B és C) jelzik a vörös óriásokban jelentkező rezgések összetettségét. A C szekvencia felel meg az alaplódiusú rezgéseknek, ahova a mirák is tartoznak. D betűvel jelöljük a hosszú másodperiódusok külön relációját, és jól látszik, hogy a diagram felső felén található szuperóriások nagyon hasonló eloszlást követnek. Az előző ábra alapján azonosítható az  $\alpha$  Her három pontja, melyek szinte tökéletesen követik az A, C és D szekvenciákat. Természetesen nem várható, hogy a szuperóriások a vörös óriások relációit pontosan extrapolálva követik, mindenesetre a pontok eloszlásának hasonlósága figyelemreméltó tulajdonság. Mindez azt sugallja, hogy a kb. tízszer nagyobb tömegek mellett is nagyon hasonlóak a csillagok rezgései, beleértve a rejtélyes hosszú másodperiódusokat is.

## Szabályosan szabálytalanul

Végezetül röviden kitérünk a csillagok félszabályosságával és szabálytalanságával kapcsolatos eredményeinkre. A fénygörbék matematikai analízise arra utal szinte minden jól észlelt esetben, hogy a vörös szuperóriás csillagok rezgéseit két (asztrófizikai eredetű) zajkomponens terheli. Egyrészt a domináns, néhány száz napos rezgési periódusok látszólag véletlenszerűen ingadoznak az átlagértékek 5–10%-os környezetében. Ez a véletlenszerű ingadozás azonban nagyon szabályos struktú-



Vörös óriások (pontok) és szuperóriások (körök és háromszögek) a periódus–abszolút fényesség síkon

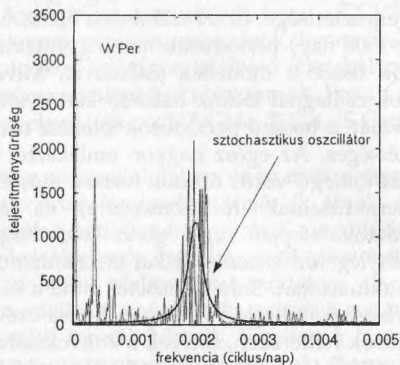
ráként jelentkeznek a fénygörbék Fourier-spektrumában: míg pl. egy miránál a legerősebb periódus éles csúcsként figyelhető meg a spektrumban, addig legtöbb SRC típusú csillagban kiszélesedett csúcshalmaz látszik, melyek átlagos amplitúdóeloszlása nagyon jól közelíthető a matematikában és fizikában Lorentz-profilként ismert függvényvel. Mindez pedig azért érdekes, „mert pontosan ilyen eloszlást várunk sztochasztikusnak (véletlenszerűen) gerjesztett csillapított rezgések esetén. A jelenség asztrofizikai értelmezése pedig a pulzáció és a konvekció szoros csatolása: miközben az egész csillagra kiterjedő rezgéseket gerjednek, ezeket nem hagyja érintetlenül a szintén jelenlevő konvektív gázmozgás, ami természeténél fogva véletlenszerű időfüggést ad a rendszernek.

A másik zajforrás szintén a konvekcióhoz társítható. A frekvenciaspektrumok kétszer logaritmikus ábrázolása megmutatta, hogy lényegében az összes csillagban kimutatható az ún.  $1/f$  zaj, ami azt jelenti, hogy a frekvenciával fordított arányban nő a zaj erőssége. Ez azt jelenti, hogy minél hosszabb időskálán tekintjük a változásokat, egyre markánsabb, de mégis csak zajszerű fluktuációkat tapasztalunk. A szignifikáns periódust nem tartalmazó, ám egyértelműen változó csillagok teljes mértékben megmagyarázhatók az  $1/f$  zajjal (pl. W Cep, CE Tau, BU Gem), ami összhangban áll a Martin Schwarzschild által 1975-ben felvetett granulációs zajjal vörös óriásokban és szuperóriásokban. Kiszámítható ugyanis, hogy a konvektív gázcsomók mérete ezekben a csillagokban akár összevethető méretűvé válhat az egész csillag sugarával, így az időnként feltűnő, majd eltűnő hatalmas forró foltok véletlenszerű fényességingadozást okoznak. A Nap esetében a granuláció sötét és világosabb foltjai a mikromagnitúdós nagyságrendbe eső változásokat okoznak. Ezzel szemben állnak a vörös szuperóriások, ahol több tizedmagnitúdóra növekszik az effektus, ami a pulzációtól függetlenül extra zajként jelenik meg az évtizedes fénygörbékben.

Mindezek azért érdekesek, mert az említett zajok jellemzőit a hosszú időn átívelő amatőr észlelések alapján nagy pontossággal kimérhetjük, melyek – a jelenleg még nem létező – valóság-hű modellelkel összevetve fontos információkat árulhatnak el a konvekció és pulzáció tulajdonságairól, illetve kölcsönhatásairól. Utóbbi folyamatok elméleti modellezése ezen nagy luminozitású objektumokban jelenleg még eléggé gyerekcipőben jár, így elképzelhető, hogy az amatőr észlelésekből kiködölhető információ fontos megkötéseket adhat a vonatkozó asztrofizikai elméletekre.

Számunkra azonban talán az a legfontosabb, hogy az SRC és Lc típusú csillagok észlelése izgalmas feladat. A nagy(obb) amplitúdójú változók, mint az S Per és a W Per, pedig szinte miraészleléshez hasonló örömeket szerezhetnek a megfigyelőknek.

Kiss, L.L., Szabó, Gy.M. és Bedding, T.R., 2006, MNRAS alapján:



A W Per Fourier-spektruma és az alapmódus kiszélesedett eloszlása az illesztett Lorentz-profilal (vastag vonal)