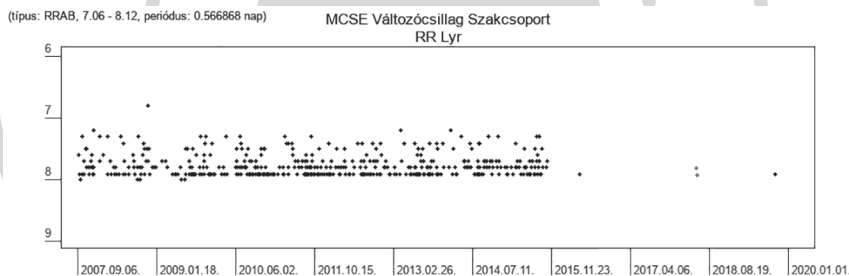


# Az RR Lyrae csillagok csodálatos világa I.

## Amatőrök és profik

Az RR Lyrae csillagok nem kimondottan az amatőr csillagászok által megfigyelt objektumok, bár található amatőr észlelések is különféle adatbázisokban. A talán túlságosan is szabályos pulzáció, a nagyjából 1 magnitúdót elérő amplitúdót elérő változások – valljuk be – kevés amatőrszívet dobogtatnak meg. Pedig fotoelektromos fotometriával, és még inkább CCD-technikával lenne keresnivaló ezen a területen is. A pulzációs periódus emberi időskálán is kimutatható változásai és a különféle „zavarok” (Blazskó-moduláció, kétmódusú pulzáció) az unalmas kategóriától azért jó messzire pozicionálják a Galaxis „idős tanúiként” is aposztrofálható változócsillag kategória képviselőit.

módban rezgő, aszimmetrikus fénygörbét mutató csillagokat RRab, a szimmetrikusabb, szinuszszerű változásokat mutató, első felhangban pulzáló csillagokat RRc, míg a két, előbb említett rezgési módban egyidejűleg rezgő csillagokat RRd (kétmódusú) csillagoknak hívjuk. Az RRab csillagok mintegy felére, az RRc csillagok 10–15%-ára jellemző az amplitúdó és a pulzációs periódus (legtöbbször együtt járó) modulációja, amit Blazskó-effektusnak nevezünk. Megjegyezzük, hogy a legfrissebb megfigyelések alapján az RRd-k között is léteznek modulált csillagok. Bár a Blazskó-jelenségnek az eredete máig nem teljesen értett, az extrém precízitású űrfotometriai mérések, a nagy mennyiségű földi adat és az ezek nyomán finomított elméleti számítások és



1. ábra. A változócsillag-osztály névadó csillagának fénygörbéje az MCSE VCSSZ adatbázisában

Az RR Lyrae csillagok nagy amplitúdójú pulzációt mutató horizontális ági, magjukban héliumot égető csillagok. Zömében az idős populációhoz tartoznak, megtalálhatók a gömbhalmazokban (korábban halmazváltozóknak is hívták őket), a galaktikus dudorban és halóban egyaránt. Jól definiált luminozitásuknak köszönhetően távolságmérésre is használhatók. Periódusuk 0,2 és 1,0 nap közé esik, a fényváltozás amplitúdója az 1 magnitúdót is meghaladhatja vizuális tartományban. A több évtizedre visszanyúló rendszerezés szerint az alap-

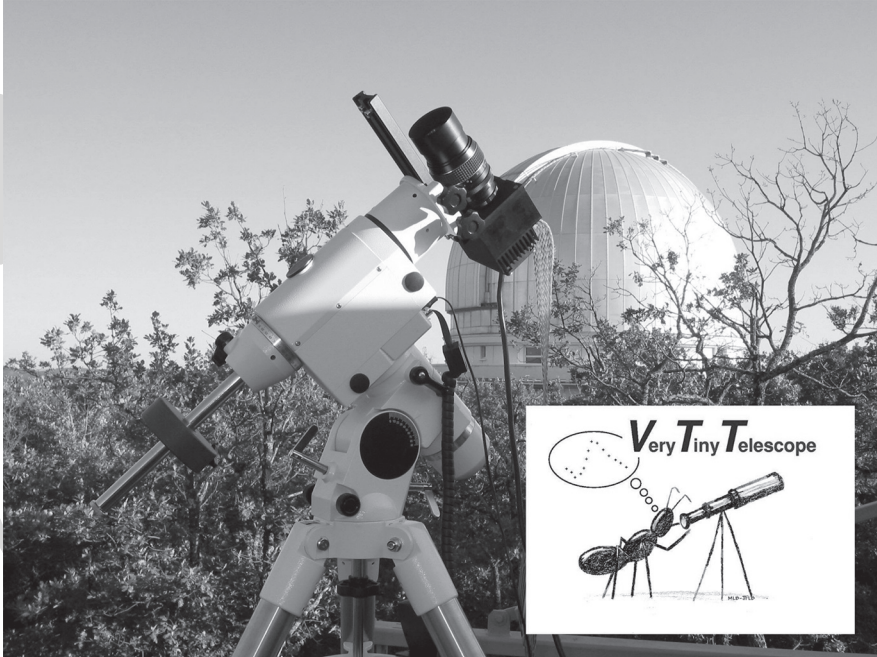
megközelítések következtében és a biztató (többek között hazai) eredmények tükrében a megfejtés talán már nem várta magára sokáig.

A Blazskó-effektussal kapcsolatban itt csak annyit jegyzünk meg, hogy a jó hat évtizede Szergej Blazskó orosz csillagászról (aki később a Moszkvai Observatórium – ma Sternberg Állami Csillagászati Intézet – igazgatója lett) elnevezett jelenséget valójában egy vele dolgozó hölgy, Ligijja Petrovna Ceraszkaja fedezte fel, aki egyébiránt 219 változócsillag felfedezője, megkapta az

Orosz Csillagászati Társaság kitüntetését, és akiről a Vénuszon krátert is elneveztek. Ma tehát minden bizonnyal helyesebb lenne az RR Lyrae csillagok modulációját Blazskó–Ceraszkaja-effektusnak nevezni (további információ a témáról és maga a javaslat Donald W. Kurtz: *Asteroseismology Across the Hertzsprung–Russell Diagram* című kitűnő összefoglalójában olvasható, ami az *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* folyóiratban jelent meg 2022-ben).

hogy a hegyes csúcsokat és gyors felfutást mutató változás következménye az, hogy az RRab csillagok több időt töltenek halványabb állapotban, mint maximum közelében.

Visszatérve az amatőrök szerepére: profi-amatőr együttműködés hozta létre például a VTT-hálózatot (Very Tiny Telescopes) kimondottan a névadó RR Lyrae Blazskó-effektusának hosszú távú nyomon követésére. A rendszer lelkét a kereskedelmi forgalomban kapható Sky-Watcher HEQ5 Pro Goto mechanikával mozgattott, 512×768



2. ábra. A VTT az Haute Provence-i Obszervatórium 1,93 méteres távcsövének kupolája előtt, valamint a projekt emblémája (Poretti és mtsai, EPJ Web of Conferences, Vol. 101, id 01004, 2015)

Érdeemes az RR Lyrae, a névadó csillagra rákeresni az MCSE VCSSZ adatbázisában (l. 1. ábra). A 456 vizuális megfigyelés túlnyomó többségét Kovács Adrián (KVD) végezte, aki 2007 szeptembere és 2015 októbere között rendszeresen rápillantott a névadó objektumra. Ha az egyedi pulzációs ciklusok nem is láthatók, a változás amplitúdója tökéletesen leolvasható. Ahogy az a tény is,

pixelszámú, ka400-as chippel szerelt AUDINE CCD-vel ellátott, 2×3 fok látómezőt biztosító 135 mm-es fotografikus f/2,8-as teleobjektívek adják.

Hasonlóképpen, F. Hambsch belga amatőr-csillagász – aki Chilében elhelyezett 40 cm-es Dall–Kirkham-teleszkópot üzemeltet távvezérléssel – rendszeresen észlel RR Lyrae csillagokat a déli égbolton 4k×4k-s FLI CCD-

vel, olyannyira, hogy a TESS első RR Lyrae megfigyeléseinek magyar vezetőségű feldolgozásánál hasznosan egészítette ki földfelszíni adataival és hosszú időtávot lefedő méréseivel a viszonylag rövid, ámde annál nagyobb pontosságú űrfotometriát (Molnár és mtsai: First Results on RR Lyrae Stars with the TESS Space Telescope: Untangling the Connections between Mode Content, Colors, and Distances, The Astrophysical Journal Supplement, 258, 8, 2022).

Jelen kétrészesre tervezett cikk célja több kurrens érdekességgel demonstrálni, hogy az RR Lyraeek vizsgálata korántsem lezárt terület. Nézzük tehát, hogy mi újság az RR Lyraeek csodálatos világában?

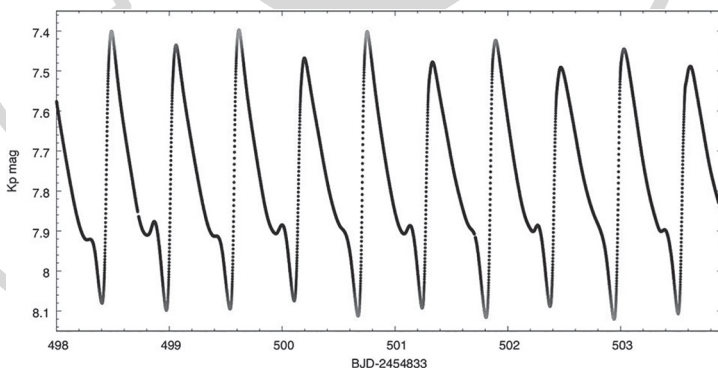
## A Kepler-fénygörbe

A NASA Kepler-űrtávcsöve (és azt megelőgezve a CoRoT űrteleszkóp is) 2009 és 2013 között az elsődleges, majd 2018-ig a meghosszabbított K2 misszióban, sok tekintetben áttörést hozott az RR Lyrae csillagok kutatásában. Addig nem látható részletességgel tárult fel a fényváltozás sokfélesége, a Blazskó-moduláció összetettsége és többszörössége, a korábban zajba vesző kis amplitúdójú változások jelenléte, ami számos új dinamikai jelenség felfedezéséhez vezetett. Ilyen a 3. ábrán látható perióduskettőződés

(Szabó R. és mtsai, 2010), és azt okozó jelenség: egy magas rendű, 9:2-es rezonancia az alapmódus és az (egyébként nem gerjesztett) radiális 9. felhang között (Kolláth Z. és mtsai 2011). Ez utóbbi számos hidrodinamikai modell futtatása alapján született eredmény, hiszen ez a rezonancia közvetlenül nem látszik a fénygörbéken, csak közvetett hatásait látjuk (pl. magát a perióduskettőződést), de érdekes módon közrejátszhat magának a Blazskó-modulációnak a létrehozásában is (Buchler és Kolláth, 2011)! Érdemes megjegyezni, hogy a bemutatott fénygörbeszakasz nem egy számítógéppel rajzolt beépített függvény, hanem mintegy 8600 egyedi mérési adatpont alkotja, ahol az egyedi mérések hibája sok nagyságrenddel kisebb a pontok méreténél.

## Háttérbe húzó csillagok

A Kepler-mérések olyan pontosak, hogy a fő célpontok háttérben megbúvó változó fényességű objektumok fényességmérése is lehetséges, sőt összevethető bármely földi fotometriai pontossággal. Arról nem is szólva, hogy legtöbbször négy évnyi folyamatos Kepler-adatsor áll rendelkezésre. Mivel a Kepler űrtávcső a Nap körül keringett (sőt kering még most is) 372 napos keringési idővel, a Földtől egyre távolodó űreszközzel az

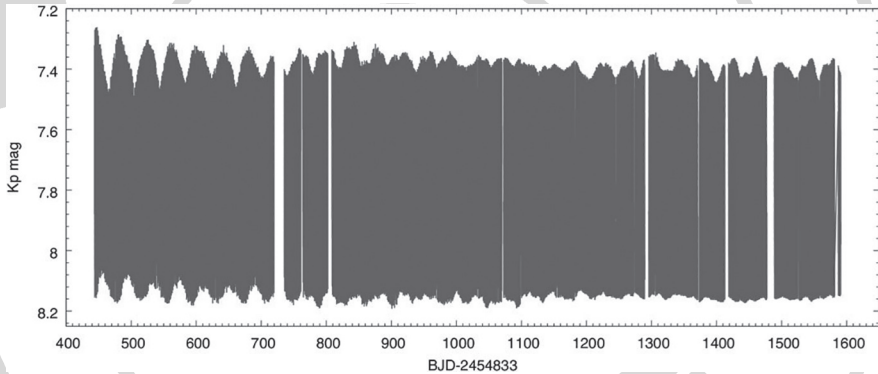


3. ábra. A Kepler 1 perces mintavételezésű, megszakításmentes, csaknem mikromagnitúdó pontosságú megfigyeléseinek hatnapos szakasza a névadó RR Lyrae csillagról, melyen rengeteg apró részlet figyelhető meg. A legszembetűnőbb az egymás utáni maximumok (és minimumok) váltakozó fényessége, aminek háttérben a perióduskettőződés nevű dinamikai jelenség húzódik (Plachy és Szabó, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, Vol 7., id 577695, 2021)

elérhető adatátviteli sávszélesség nem tette lehetővé a teljes látómező letöltését. Ehelyett 150–200 ezer egyedi, célszámú körüli maszkban töltötték le a pixeleket (átlagosan 12–20 pixelt célpontonként). Így mindössze az összes pixel 5–6%-át kellett a Földre sugározni. Ezekben a maszkokban, a fő célpontok háttérben, az egyedi pixelek analizésével a „Kepler Pixel Projekt” keretében fedeztünk fel 26 RR Lyrae csillagot. Közülük többet a Gaia-katalógus is RR Lyraeként ismer, de ezek a projekt kezdetekor még nem voltak elérhetőek. Az új felfedezések közül két RRd is akadt, ami azért különleges, mert a Kepler fő célpontjai között nem volt RRd. A Kepler mintegy 50 RR Lyrae csillagot figyelt meg fő célpontként, így a projektünk 50%-kal növelte a Kepler által megfigyelt RR Lyraek

### Északról erős Blazskó-moduláció várható

Ha azt gondolnánk, hogy a szabályos pulzációt „elrontó” Blazskó-moduláció szabályos, nagyot tévedünk. A Kepler megmutatta, hogy a legtöbb esetben nem egyszerű szinuszos amplitúdóváltozással van dolgunk: egyes csillagoknál többszörös ciklusok figyelhetők meg, és időben változhat a moduláció jellege, de a periódusa is valamelyest, akár ciklusról ciklusra. Mi a helyzet névadó csillagunkkal? Az RR Lyrae modulációjában korábban sejtettek egy négyéves periódust, ami alatt az amplitúdó-moduláció leáll, majd más fázissal újraindul. Ezt az eredményt Detre László és Szeidl Béla – mindketten a CSFK CSI jogelődjének korábbi igazgatói – 1973-ban tették közzé.



4. ábra. Az RR Lyrae 1200 napos Kepler-fénygörbéje. Az egyedi pulzációs ciklusok nem láthatók a skálán, viszont szépen mutatkozik a körülbelül 40 nap periódusú, kezdetben szabályos, később egyre szabálytalanabb Blazskó-moduláció (Plachy és Szabó, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, Vol 7, id 577695, 2021)

számát. Az új objektumok zömében 17–20 magnitúdósak, azaz halványak és távoliak, így a galaktikus halót reprezentálják. Fontos eredmény, hogy nem találtunk lényeges különbséget az RR Lyrae csillagok közelebbi és távolabbi populációi között. Az eredmények Forró Adrienn doktorandusz vezetésével az *Astrophysical Journal Supplement*ben jelentek meg (Forró A. és mtsai, *ApJS*, 260, 20, 2022). A pulzáló csillagok mellett felfedeztünk mintegy 1200 fedési változót is, ezek analízise folyamatban van.

Mit mondanak erről a Kepler adatok? A 4. ábrán több mint 3 évnyi (2010–2013) megszakításlan adatsor látható. A kezdetben szabályos és egyre csökkenő amplitúdójú Blazskó-moduláció később egyre kevésbé szabályos, sőt, talán multiperiodikus formát ölt, de mindvégig jelen van az adatsorban. A korábban említett VTT-hálózat adatai azt mutatják, hogy 2014-re szinte teljesen leállt a Blazskó-moduláció, igaz a VTT nem az amplitúdó nagyságát mérte elsősorban, hanem a maximumok bekövetkeztek pontos idő-

## meteor

pontjait, így a fázismodulációt ragadta meg a Janus-arcú (amplitúdó + fázis moduláció) jelenségből. Ezzel szemben 2019 és 2021 nyarán, amikor a TESS látómezejébe esett csillagunk, szabályosnak tűnő amplitúdó-moduláció volt látható, igaz, mindkétszer viszonylag szerény amplitúdóval.

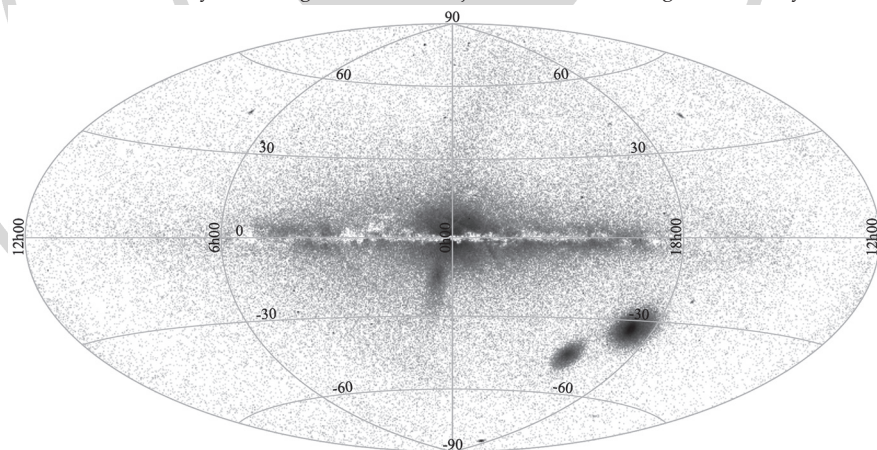
### A Gaia-forradalom

A Gaia harmadik adatkibocsátása (DR3) és a korábbi adatkibocsátások elhozták az RR Lyrae kánaánt is. Habár léteznek korábbi nagy változócsillag-katalógusok és adatbázisok, például az OGLE égboltfelmérést 126 ezer RR Lyrae csillagot katalogizált a Magellán-felhőkben és a válogatott galaktikus mezőkben (a legtöbbet a galaktikus dudorban), a Gaia az egész égbolton, homogén módon feltérképezve nyújt magnitúdó-limitált mintát 21,1 magnitúdóig. A megfelelő keresőkifejezést beírva több mint 270 ezer Gaia RR Lyrae tűnik fel a monitorunkon, ezekből 70 ezer feletti az új felfedezések száma. 170 ezer RRab, 95 ezer RRC és 2000 kétmódusú RR Lyrae várja, hogy szisztematikusan vizsgáljuk őket. Nem csak a galaktikus mezőben, de 95 gömbhalmazban, és a Tejútrendszer 25 kiséregalaxisában is mért RR Lyrae csillagokat az ESA

zászlóshajója. Ide tartoznak a Magellán-felhők, 7 törpe szferoidális galaxis, valamint 16 ultrahalvány törpegalaxis (5. ábra). A legtöbb csillagra a fénygörbék is használhatók (csillagonként 80–300 adatpont született, de van olyan objektum, ahol 500-nél is több adatpont áll rendelkezésre). Több mint ezer RR Lyrae csillagra radiálissebesség-mérési adatok is elérhetőek, melyek a Gaia kifelbontású spektrográfiával. Készültek Hasonló minőségi és mennyiségi ugrás mondható el szinte minden változócsillag-típus esetén. Mindez azt eredményezte, hogy most már nem csak csillagpopulációs vizsgálatok, távolság- vagy parallaxisadatok miatt nyúlunk rutinszerűen a Gaia-adatbázishoz, hanem változócsillagokkal kapcsolatos kutatások esetében is.

### Fiatal, fémben gazdag RR Lyrae populáció?

Egy nemzetközi kutatócsoport A. Bobrick vezetésével RR Lyrae from Binary Evolution: Abundant, Young, and Metal-Rich c. friss cikkükben (melyet a Monthly Notices of the Royal Astronomical Society nevű folyóirathoz küldtek be) azokat a lehetőséget vizsgálták, hogy milyen fejlődési utakon keresztül juthatnak el a csillagok az RR Lyrae álla-

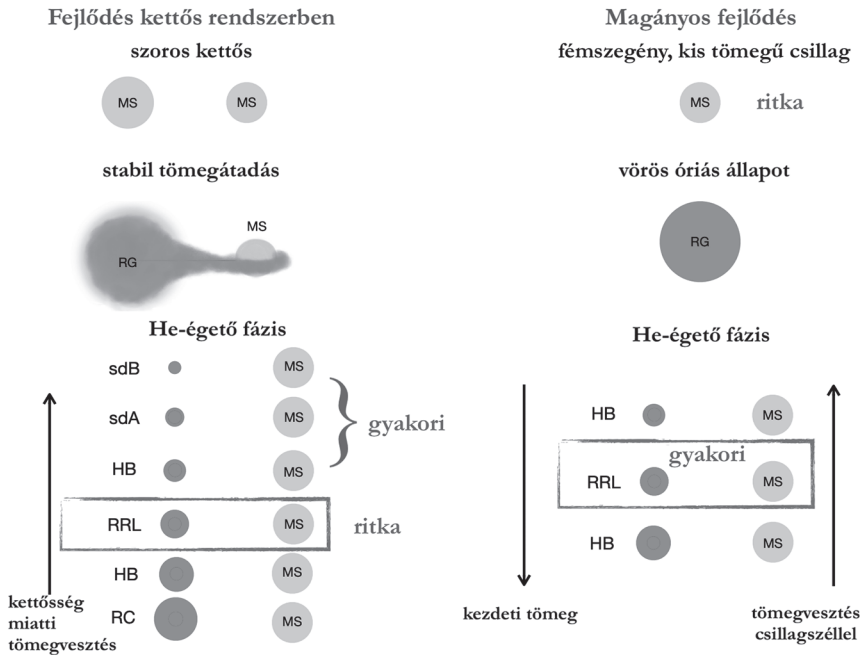


5. ábra. A Gaia DR3 adatkibocsátásában közzétett 270 ezer RR Lyrae csillag égi eloszlása galaktikus koordináta-rendszerben. Figyeljük meg a galaktikus dudor kirajzolódó foltját középen és a Magellán-felhőket a középtől jobbra lefelé (Clementini és mtsai, arXiv:2206.06278)

potba, azaz az instabilitási sávot jelentő, meghatározott effektív hőmérséklet és luminositás értékpárral jellemezhető állapotba.

A klasszikus kép alapján ezek az RR Lyrae csillagok öregek (legalább 9–10 milliárd évesek), fémekben szegények, a Tejútrendszerrel közel egyidőben alakultak ki és a Tejútrendszer legidősebb struktúráit követik, ezáltal nyomjelzőknek is tekinthetők. Zömében magányosak, legalábbis

lag a vörös óriás ági fejlődés során viszonylag jelentős tömeget veszít (ennek mértéke nagyon bizonytalan, hiszen nehezen mérhető, de több tízed naptömeget is kitehet), majd a He-égető horizontális ágon folytatja fejlődését, akár közvetlenül az instabilitási sávba érkezve a vörös óriás ágról, akár a későbbi fejlődés során keresztezve azt. Ez tehát a jól ismert, „tankönyvi” módja egy csillag RR Lyraevé válásának.



6. ábra. Két különböző, végül RR Lyrae csillagot eredményező fejlődési útvonal Bobrick és munkatársai szerint. A jobb oldali a kanonikus, magányos csillagfejlődést mutatja, a bal oldali pedig egy lehetséges kettőscsillag eredetét vázol. A feltételezett társ minden esetben fősorozati csillag. A végkimenet pedig a tömegvesztéstől függ (arXiv:2208.04332)

elnyesző részük mutat kettősségre utaló jeleket, s ezek is leginkább hosszú keringési periódusú, tág rendszereket jelentenek. Ez egyben azt is jelenti, hogy még ezen kettőscsillagok életútja egy magányos csillagénak tekinthető, hiszen a távolság miatt kísérője alig, vagy egyáltalán nem befolyásolja a csillagfejlődést. Ez alapján a Naphoz hasonló, vagy kissé nagyobb tömegű fősorozati csil-

Ezzel szemben a cikk felvázol egy másik lehetséges útvonalat is (6. ábra), mely szerint két fősorozati csillag esetén a tömegátadás révén is eljuthat az egyik komponens az RR Lyrae állapotba, igaz, a tömegvesztés mértéke alapján általában kevés anyag marad az RR Lyrae pulzáció gerjesztésére a csillag külső részeiben, és egy forró, kb. fél naptömegű héliumból álló csillagmagunk

## meteor

marad, nagyon vékony hidrogén-légkörrel, amit forró szubtörpének, vagy extrém horizontális ági csillagnak hívunk. A ritkább kimenetel – amikoris elegendő tömegű hidrogénburok marad csillagunkon – bekövetkezési esélye sem nulla, így kettős rendszerben is születhetnek RR Lyrae csillagok. Ezek zömében jelentősen fiatalabbak (1–7 milliárd évesek) lesznek, mint a magányos csillagfejlődés során keletkezett társaik. Az elméletek szerint ezek a csillagok nem csak a galaktikus haloban, hanem más galaktikus alrendszerekben is jelen vannak, így például a galaktikus korongban. Sőt, a Nap közelében található RR Lyrae csillagok zöme valószínűleg fiatal, kettős rendszerből származó objektum. Valóban láttunk ilyen fémgazdag RR Lyrae csillagokat korábban, melyek eredetét nehéz lett volna a magányos csillagfejlődés révén megmagyarázni. Ha az elméletet sikerül igazolni, akkor alaposan át kell írni a tankönyveket az RR Lyrae eredetével kapcsolatban.

Hogyan lehet szétválasztani a két populációt részletes spektroszkópiai vizsgálat nélkül? Egyrészt Galaxisban végzett mozgásuk utalhat az eredetükre, így a Gaia parallaxisok és sajátmozgások alapján elvileg megkülönböztethető a kétfajta RR Lyrae típus. Az, hogy vannak-e eltérések más megfigyelhető paraméterekben (periódus, fénygörbe alakja, egyéb, kis amplitúdójú periodicitások, vagy éppen két radiális módusok jelenléte stb.) további kutatásokat igényel. A helyzet kísértetiesen hasonlít az Ia típusú szupernó-

vák esetére, ahol a klasszikus kép szerint a Chandrasekhar-tömeg közelében levő fehér törpe fősorozati vagy elfejlődött kísérőtől kap anyagot, ami szupernóva-robbanáshoz vezet, miközben két fehér törpe összeolvadása is nagyon hasonló kataklizmához vezet, és máig tartó tudományos vita tárgya, hogy a két lehetséges forgatókönyv milyen arányban járul hozzá a megfigyelt SN Ia mintához.

Sokkal ritkább, de valószínűleg szintén kettőscsillag rendszerben való fejlődés eredményei az ún. RR Lyrae „imposztorok”, ahol nem a megszokott 0,5–0,6 naptömegű, hanem egy körülbelül fele akkora tömegű csillag kerül az instabilitási sávba és az RR Lyrae csillagokra jellemző pulzációt mutat. Ez a fejlődési állapot csillagászati értelemben rövid ideig tart (százszor gyorsabban lezajlik, mint a normál RR Lyrae fázis) és becslések szerint mindössze néhány ezrelékét adhatja a megfigyelt RR Lyrae populációnak (Pietrzynski és mtsai, 2012, Nature).

A következő részben kitérünk a hazai kutatásokra és azok történetére is, hiszen a CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézete (külföldön: Konkoly Observatory) több évtizede meghatározó (némi szerénytelenséggel azt is mondhatjuk: vezető) intézménye a szűkebb területnek.

Szabó Róbert  
CSFK Csillagászati Intézet

(Folytatjuk)

### Pest-budai csillagséták: régi csillagászok emléke

Pest-budai csillagsétáink következő állomása a Fiumei Úti Sírkert, ahol nemzetünk nagyjain, kiemelkedő alakjain kívül csillagászok és jeles csillagászatkedvelők is nyugszanak. November 19-én (szombaton) 14 órakor találkozunk a Sírkert bejáratánál, majd sorra járjuk az itt végső nyughelyet kapott egykori csillagászok nyughelyeit. Ez a temetői séta önmagában is élmény, mi több, időutazás, hiszen a csillagászsírok végiglátogatása közben óhatatlanul meg-megállunk majd elmúlt idők híres magyarjainak síremlékeinél is. Ez a séta akár történelemóraként is felfogható. Sétavezető: Kuli Zoltán és Mizser Attila  
Regisztráció: <https://regisztracio.mcse.hu>