

## Asztrofizikai modellek tesztelése és kozmikus távolságmeghatározás csillagpulzációval

Kutatásaink során olyan szabályosan pulzáló változócsillagokkal foglalkoztunk, amelyek észlelési adatokon nyugvó részletes elemzéséből következtetni lehet a csillagok szerkezetére, fejlődésére, ezáltal lehetővé téve egyes elméleti asztrofizikai modellek empirikus ellenőrzését, illetve új tények feltárásával irányt szabni az elméleti modellek továbbfejlesztésének. Kutatásaink másik lényeges célja az e csillagokra érvényes periódus-luminositás összefüggés precíz kalibrálásához való hozzájárulás, amely végső soron a kozmikus távolságskála pontosítását segíti elő.

Vizsgálataink során RR Lyrae, cefeida és Delta Scuti típusú változócsillagokkal foglalkoztunk. Saját, hazai műszerekkel kapott fotometriai adataink mellett külföldi nagytávcsövekkel, nemzetközi együttműködés keretében cefeidákról végzett spektroszkópiai és fotometriai észlelések adatait is elemeztük, illetve a szakirodalomban és on-line hozzáférhető más megfigyelési adatokat is figyelembe vettünk.

### Fontosabb eredményeink

#### *RR Lyrae típusú csillagok*

Évtizedek óta folytadjuk az RR Lyrae típusú változócsillagok fénygörbéjének modulációjával kapcsolatos kutatásokat. Bár e modulációk Blazsko-effektusként ismert fajtája már egy évszázada ismert, a jelenség fizikai magyarázata mind a mai napig nincs tisztázva. Két, egymással össze nem egyeztethető modell létezik a szakirodalomban: az egyik ferde rotátorként írja le a Blazsko-effektusos RR Lyrae-változócsillagokat, a másik a pulzáció során kialakuló rezonancia következményének tartja a modulációt. Mindkét modell összhangban van számos észlelési ténnyel, de egyik sem magyarázza az összes megfigyelt jelenséget. Tisztázásra vár az is, hogy a Blazsko-effektus időleges jellegű-e az RR Lyrae fejlődési állapotban levő csillagoknál.

Az elméleti modellek obszervációs ellenőrzésére, illetve további finomításuk szükségességének igazolására folytattuk az RR Lyrae típusú változócsillagok korábban megkezdett fotometriai megfigyeléseit a svábhegyi 60 cm-es távcsővel. Ezek jól kiegészítik a fénygörbe csak meghatározott fázisaira (felszálló ág, fényességmaximum) koncentrált, évtizedekkel korábbi megfigyeléseinket, és a hosszú, ciklikus változások is tanulmányozhatók. A hosszú ciklusok létre a legkézenfekvőbb magyarázat a napciklus-analógia.

Az RR Geminorum fotometriai viselkedésnek tanulmányozására gazdag anyagunk volt: a budapesti archív fotografikus és fotoelektromos észleléseket újabb, CCD-megfigyelésekkel egészítettük ki. Az 1930-as évek közepén bekövetkezett éles periódusnövekedés előtt a csillag erős Blazsko-effektust mutatott. Az 1953–1980 közötti fotoelektromos észlelésekből is kimutatható az effektus, gyengén változó modulációs periódussal. Az elmúlt években végzett saját észleléseink elemzéséből viszont megállapítottuk, hogy az RR Gem Blazsko-effektusának amplitúdója rendkívül kicsi (kisebb 0,1 magnitúdónál). Ilyen kis amplitúdó létezése ellentmond a korábbi feltételezéseknek. A Blazsko-ciklus során a csillag intenzitásközepelt V fényessége nem változik, míg hőmérséklete igen. A moduláció a felszálló ág körül egy szűk fázistartományra koncentrálódik. Sikerült kimutatni az átlagos pulzációs amplitúdó hosszú időskálájú változását is, és ez az első eset ilyen jelenségre az RR Lyrae típusú csillagoknál. Ezek az eredmények az alternatív modellek egyikével sem magyarázhatók.

Első alkalommal sikerült kapcsolatot kimutatni a Blazsko-effektust mutató RR Lyrae-csillagok pulzációs és modulációs periódusa között: a modulációs frekvencia lehetséges tartománya függ a pulzációs frekvenciától. 0,4 napnál rövidebb pulzációs periódus esetén a modulációs periódus néhány nap is lehet, míg a hosszú (0,6 napnál hosszabb) pulzációs periódusú változócsillagok modulációs periódusa mindig 20 napnál hosszabb. Ez a megfigyelési

tény közvetlen bizonyítéka annak, hogy a modulációs periódus a csillag rotációs periódusa. Ugyanis a forgási periódus hasonló eloszlása várható, ha a vörös óriás állapotból a horizontális ágra fejlődő csillagok impulzusmomentumának létezik egy felső határa. A horizontális ági vörös és kék csillagok vetületi rotációs sebességének eloszlása hasonló tulajdonságú, mint az RR Lyrae csillagok modulációs periódusából meghatározott tengelyforgási sebesség.

Az SS Cancríról kimutattuk az eddig ismert legrövidebb, 5,3 napos periódusú amplitúdó- és fázismodulációjú Blazsko-effektus jelenlétét.

Az UZ UMa erős Blazsko-effektusának felfedezésével tovább nőtt a Blazsko-effektust mutató csillagok aránya az RRab csillagok között (50%). Az UZ UMa az első eset, amelynél a Blazsko-effektus egyidejűleg két modulációs periódussal jellemezhető.

Ezen eredményeink illetve felfedezéseink mind további megszorításokat jelentenek a Blazsko-effektus magyarázatára szolgáló elméleti modellek számára. Az itt említett új eredményeinket közlő cikkekre már röviddel a megjelenésük után számos független, mértékadó külföldi hivatkozást regisztráltunk.

### *Delta Scuti csillagok*

Az AD Canis Minoris nagy amplitúdójú Delta Scuti csillag keringési periódusa a korábban publikáltnál (34 év) lényegesen hosszabb. Az O-C diagram kielégítően leírható egy 43 éves periódusú, 0,7 excentricitású pályával és a pulzációs periódus  $1,146 \times 10^{-8}$  nap/év ütemű változásával.

A GP And fényváltozásában korábban több módus mellett irregularitásokat is felfedezni véltek. Eredményeink szerint viszont a GP And egy módusban szabályosan pulzáló csillag.

Négy szín-fotometriai CCD-méréseinkre alapozva tanulmányoztuk a három módusban radiálisan pulzáló V823 Cassiopeiae csillag viselkedését. A megfigyelt frekvenciák arányai nem értelmezhetők a pulzációs és csillagfejlődési modellekkel, ami nem a modellek hiányosságára utal, hanem arra, hogy a V823 Cas egy rezonancia által meghatározott, tranzienst, gyors fejlődési fázisban van. Erre utal az alaplómódus és a második felhang anomális periódusváltozása is. Felvetettük, hogy a hárommódusú pulzátorokban szerepe lehet az  $f_2 = 2f_1 - f_0$  rezonanciának. Ez esetben a hárommódusú pulzátorokban kialakuló periódusarányok nem szükségképpen tükrözik a csillag valódi fizikai paramétereit.

A 2006 decemberében indított COROT fotometriai űrszonda új kutatási irányt inspirált: az individuális Delta Scuti csillagok helyett a Delta Scuti csillagokat mint csoportot vizsgáltuk. 30 ilyen változócsillag domináns amplitúdójú módusainak viselkedését tanulmányozva kimutattuk, hogy a dominánsan gerjesztett módusok frekvenciái szűk tartományba esnek. A módusok azonosítását az elméleti modellek alapján, nemzetközi együttműködésben végezzük.

### *Cefeidák*

Az ún. anomális cefeidákról az elmúlt évek részletes modellszámításai alapján kiderült, hogy azok a cefeidák nehéz elemekben rendkívül szegény képviselői, ezért található az anomális cefeidák instabilitási sávja magasabb hőmérsékleten a HR-diagramon, mint a normális cefeidáké. Ilyen anomális cefeidák már 17 extragalaxisban ismertek, de a saját Tejútrendszerünk mezőcsillagai között mindössze egyről (XZ Ceti) biztos, hogy a cefeidák e típusába tartozik. A típusra vonatkozó új paradigma indokolta a legfényesebb anomális cefeida, az XZ Ceti korábban nem tervezett részletes vizsgálatát. Az 0,81 napos periódusú XZ Ceti fotometriai és spektroszkópiai megfigyelései alapján az amplitúdóarányokból megállapítottuk, hogy a csillag az első felhangban pulzál. A megfigyelések az ausztráliai

Siding Spring Obszervatórium távcsöveivel történtek. A pulzációs periódus hosszú távú viselkedésének vizsgálatához pedig igénybe vettük a Harvard Obszervatórium (USA) rendkívül gazdag lemezarchívumát is. Lényeges eredmény, hogy a csillag egészen rövid (néhány hetes) és hosszú időskálán egyaránt rendkívül erős periódusváltozásokat mutat. A pulzációs periódus változásai mellett a fénygörbe ugyancsak instabilnak mutatkozott.

Az extragalaktikus anomális cefeidákról ez idáig nem született hasonlóan részletes vizsgálat. Viszont a BW Comae és a DT Geminorum szakirodalomból vett fotometriai megfigyelési adatai alapján arra lehet következtetni, hogy azok is anomális cefeidák (az ilyen csillagoknak megfelelő rövid pulzációs periódussal), és miként az XZ Ceti esetében, a BW Com és a DT Gem fénygörbéje is rövid (néhány napos) időskálán instabil. Ezt a viselkedést a pulzációs és csillagfejlődési elméletek további finomításával kell megmagyarázni. A látóirányú sebesség változása alapján egyébként nem zárható ki az XZ Ceti kettős rendszerhez tartozása.

A reflexiós ködbe ágyazott RS Puppis körüli porburok fényességváltozásában kialakuló fáziskésésből meghatároztuk a cefeida távolságát. A módszer kivitelezhetőségét évtizedekkel ezelőtti fotografikus felvételek alapján már kimutatták, a CCD-technikával kapott felvételekből azonban sokkal pontosabb eredményt lehetett kapni. A CCD-képek az Európai Déli Obszervatórium 3,6 m-es NTT teleszkópjára szerelt EMMI kamerájával készültek (La Silla, Chile). A 41,4 napos pulzációs periódusú RS Puppis körüli reflexiós köd fényességváltozásában tapasztalható fáziskéséseket elemezve – a jelenséget fényechóként értelmezve – figyelemre méltó pontossággal megállapítottuk az RS Pup cefeida távolságát: az  $1992 \pm 28$  parszek érték az eddigi legpontosabb távolság, amelyet valaha is cefeidára meghatároztak. A módszer különlegessége, hogy pusztán geometriai alapokon nyugszik, minden egyéb előfeltevéstől mentesen. Erre az eredményre az ESO sajtótájékoztatóban hívta fel a figyelmet (<http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2008/pr-05-08.html>), az ehhez kapcsolódó felvételt pedig a NASA a nap csillagászati képévé választotta (Astronomy Picture of the Day, 2008. február 12., <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>). A várhatóan nagy nemzetközi visszhangot kiváltó eredmény alapján jelentősen pontosítható a cefeidák periódus–luminozitás összefüggésének kalibrálása a hosszabb pulzációs periódusoknál. Az RS Puppis fejlődési állapotával, tömegvesztésével és periódusváltozásaival kapcsolatos eredmények publikálásra való előkészítése folyamatban van.

A kozmikus távolságskála megállapításában alapvető szerepet betöltő periódus–luminozitás összefüggésről az elmúlt évtizedben kiderült, hogy pontos kalibrálását megnehezíti a cefeidák luminozitásának függése a csillag légkörének nehézelem-tartalmától. Mivel a fémtartalom a cefeidák más jellemzőit is befolyásolhatja, több mint 200 tejtrendszerbeli cefeida fénygörbéjéből és radiálissebesség-változásának fázisgörbéjéből meghatározható fenomenológiai paraméterek fémtartalomfüggését is vizsgáltuk. Ehhez összeállítottunk egy több száz klasszikus cefeidát tartalmazó, homogén adatbázist, melynek továbbfejlesztett változata on-line hozzáférhető lesz. Kimutattuk, hogy az adott pulzációs periódushoz tartozó amplitúdók és amplitúdóarányok is függenek a cefeida légköri nehézelem-tartalmától. Kisebb fémtartalom esetén nagyobb a pulzációs amplitúdó. A csillagfejlődési effektusok mellett a fémtartalombeli eltérésekkel magyarázható az a megfigyelt tény, hogy a cefeidák periódus–amplitúdó-diagramjában rögzített periódusnál egészen eltérő amplitúdók is előfordulnak. A különféle amplitúdók közötti összefüggéseket is vizsgáltuk egyebek között a kísérőcsillag hatásának kimutatására, illetve a klasszikus cefeidák viselkedésében kb. 10 napos pulzációs periódusnál bekövetkező változás elemzésére. A hosszú ill. rövid periódusú cefeidák eltérő pulzációs viselkedésének magyarázatához a csillagszerkezeti és pulzációs modellek finomítására van szükség.

Negyven déli cefeidáról sikerült nagyszámú radiálissebesség-adatot meghatározni ausztráliai távcsövel végzett spektroszkópiai mérések alapján. Tíz csillagról ezek a legelső ilyen jellegű adatok. A többinél az újabb radiálissebesség-adatok az esetleges kettősség vizsgálatát segítik elő, amihez a pulzációs periódus időbeli viselkedését is meg kell határozni az O–C módszerrel. A V898 Cen spektroszkópiai kettőssége azonban enélkül is nyilvánvaló. E cefeida keringésből származó radiálissebesség-változása a második legnagyobb a kettős rendszerbe tartozó ismert cefeidák közül. Kimutattuk továbbá, hogy az MY Puppis 5,7 napos pulzációs periódusú fényes cefeida ugyancsak spektroszkópiai kettős rendszer tagja. A többi programcsillag O–C-diagramjának elkészítése folyamatban van.

Az ugyancsak kettős rendszerbe tartozó ST Puppis, II. típusú cefeida pulzációs periódusát vizsgálva szinte példátlanul

erős periódusváltozást mutattunk ki: 17,7 és 19,2 nap között ingadozó értékekkel. A változások a megfigyelések egy évszázada alatt egészen hevesek voltak, és jellegük nem egyeztethető össze a csillagfejlődési modellekkel.

A 2,4 napos pulzációs periódusú (és 53,26 napos keringési periódusú kettős rendszerhez tartozó) AU Pegasi cefeida fotometriai viselkedéséből a csillag kétmódusú pulzációjára következtettünk (szegedi kollégákkal). Ehhez a saját piszkéstartó észleléseinket és a szakirodalomban található fotometriai adatokat is használtuk. A két gerjesztett módus periódusaránya 0,706, a kétmódusú klasszikus cefeidákra jellemző érték, ami megkérdőjelezi, hogy az AU Pegasi II. típusú cefeida lenne. Folyamatban van az AU Pegasiról korábban kapott színképek elemzése.

Magyar–olasz együttműködés keretében, az ESO La Silla-i 2,2 m-es távcsövére szerelt FEROS spektrográffal kapott nagyfelbontású echelle-színképeket elemezve meghatároztuk 16 déli kétmódusú cefeida vastartalmát, és ennek alapján pontosítottuk a két gerjesztett módus periódusarányának fémtartalomfüggését:

$$P_1/P_0 = -0,01429 \times \log P_0 - 0,02647 \times [\text{Fe}/\text{H}] + 0,710132$$

Ez az összefüggés azt mutatja, hogy a hagyományos Petersen-diagram csak részben írja le a kétmódusú cefeidák viselkedését, mivel a két gerjesztett módus periódusaránya nemcsak az alpmódus periódusától függ, hanem jóval erősebben a  $[\text{Fe}/\text{H}]$  légköri vastartalomtól.

A Hipparcos asztrometriai mesterséges hold fotometriai mérései alapján felfedezett fényes cefeida, a V411 Lacertae Hipparcos-adatait a Piszkéstartón kapott fotometriával kiegészítve pontosítottuk a pulzációs periódus értékét. A fénygörbe szórása alapján gyanítható, hogy a V411 Lac két módusban pulzál.

Napra készen tartottuk a kettős cefeidák korábban általunk létrehozott internetes adatbázisát, valamint információszolgáltatást végeztünk a 2011-ben felbocsátandó GAIA asztrometriai mesterséges hold tudományos programjának összeállítása érdekében.

A Springer Verlag-gal kötött szerződés alapján a témavezető elkészíti a cefeidákról szóló angol nyelvű monográfiát. A kézirat nagyobb része elkészült, de a befejezés és a könyv megjelenése a futamidőn túlra toódik.

A futamidő során felkérésre összesen négy áttekintő előadást tartottunk nemzetközi konferenciákon, részben saját eredményeinkről, részben pedig az általunk vizsgált változócsillag-típusok kutatásának általános aspektusairól.

## **A szerződésben tervezett kutatásokról való eltérés**

A cefeidák esetében nemzetközi együttműködésben spektroszkópiai észlelésekre nyílt lehetőség, ezért a tervezett fotometriai kutatások egy része helyett inkább a kapott színképek feldolgozásával és értelmezésével foglalkoztunk. A Magellán-felhők cefeidáinak adatait (fotometria + radiális sebesség) viszont már előkészítettük a feldolgozáshoz.

Az ismert kettős rendszerekbe tartozó cefeidák pulzációs periódusának nyomon követése (a Magyarországról is észlelhető csillagok esetében rendszeres fotometriai megfigyelésekkel kiegészítve) időigényes feladat. Az O–C-diagramok elkészítésével és a megfelelő cefeidák észlelésével a futamidő alatt mindvégig foglalkoztunk, de publikálható tudományos eredmények csak a feldolgozottság magasabb fokán, 1–2 év múlva várhatók.

A COROT fotometriai űrszonda programjához kapcsolódva a munkatervben szereplő Delta Scuti csillagok helyett az űrprojektben szereplő változócsillagok fotometriai észlelésébe kapcsolódtunk be (HD 44195, HD 44283, HD 181555, HD 170782, spanyol és olasz kollégákkal együttműködve). Az ezekkel a csillagokkal kapcsolatos eredmények közzlése a COROT-adatok feldolgozása után a közeljövőben történik.