

Borkovits Tamás

A FEDÉSI KETTŐS ÉS TÖBBES CSILLAGRENDSZEREK
VIZSGÁLATÁNAK JÁRATLAN ÚTJAIN

DR SZABADOS LÁSZLÓ OPPONENS KÉRDÉSEIRE ADOTT VÁLASZOK

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM BAJAI OBSZERVATÓRIUMA,
BAJA, 2018

1. kérdés: Az 1.1.2 fejezetben a fedésikettős-fénygörbék fenomenológiai osztályozásánál a Jelölt így fogalmaz: „... E felosztásban a fedési események egymáshoz viszonyított mélységén, illetve a keringési (pontosabban: fedési) periódushoz viszonyított hosszúságán felül a fénygörbe fedéseken kívüli viselkedése is szerepet játszik.” KÉRDÉS: van-e példa a keringési és a fedési periódus mérhető különbségére?

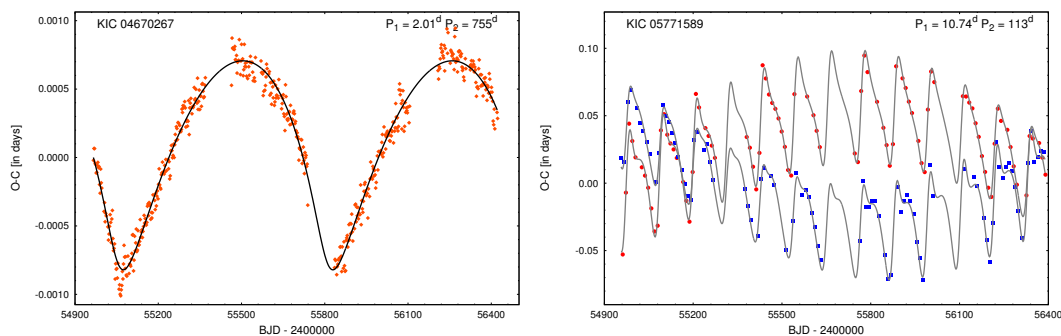
Válasz: Igen, számtalan példa van e kettő mérhető különbségére. A dolgozatomban vizsgált több mint 200 fedési kettőscsillag mindegyike jó példát szolgáltat erre a jelenségre. A Bevezetés 1.2.3 alfejezetében tárgyalom a fedési kettőscsillagok látszólagos periódusváltozásait előidéző két leggyakoribb jelenséget. E két klasszikus jelenség a fény véges terjedési sebessége következtében fellépő fényidőeffektus, illetve az excentrikus pályán keringő kettősök esetében megfigyelhető apszismozgás. Az első esetben arról van szó, hogy a fedési kettősnek van legalább egy, általában jóval távolabbi, további, gravitációsan kötött kísérője. Ennek következtében a fedési kettős mozgása többé szigorúan véve nem lesz perturbálatlan kepleri mozgás. Azonban amennyiben a harmadik komponens elegendően messze van (és csillagkeletkezési, illetve stabilitási okokból a legtöbb ismert hármas csillagrendszer esetében ez az eset valósul meg), a szoros kettőscsillag mozgása gyakorlatilag továbbra is perturbálatlannak tekinthető (azaz a keringési periódus állandó marad), és a harmadik komponens jelenléte dinamikailag annyiban nyilvánul meg, hogy a szoros, fedési kettőscsillag tömegközéppontja és a harmadik csillag egymás körül egy további, szintén perturbálatlan, kepleri mozgást valósít meg. Ennek azonban az lesz a következménye, hogy, ha csak e tágabb „kettőscsillagnak” a keringési síkja nem esik pontosan egybe az égbolt érintősíkjával (a fedési kettős tömegközéppontjának látóirányára merőleges síkkal), akkor a fedési kettőscsillag tömegközéppontjának az észlelőtől való távolsága a tág pálya keringési periódusával megegyező periódussal változni fog. Ezért pedig, a fény véges terjedési sebessége következtében a Földről nézve az egymást követő csillagfedések között eltelt idő is ciklikusan változni fog, amely változást ki is tudunk mutatni. Mindezt részletesen tárgyalom a dolgozatban, ezért ehelyütt csupán egy, szintén a dolgozatból vett ábra bemutatására szorítkozom, pusztán illusztrációként (1. ábra, baloldali panel).

A másik, fentebb említett effektus az apszismozgás jelensége. Ezt is részletesen tárgyalom a dolgozatomban, ezért itt csak egyetlen aspektusra térnék ki ezzel kapcsolatosan. Ehelyütt ugyanis szigorúan véve legalább háromféle periódust kell megkülönböztetnünk. Az egyik az anomalisztikus periódus, amely a két egymást követő pericentrum-átmenet között eltelt idő. A második, a szakirodalomban általában sziderikus periódusnak nevezett időtartam, amely az anomalisztikus periódussal a következő viszonyban áll:

$$P_{\text{sid}} = \frac{P_{\text{anom}}}{1 + \frac{\dot{\omega}}{2\pi} P_{\text{anom}}}, \quad (1)$$

ahol $\dot{\omega}$ az apszisvonal mozgásának szögsebessége. (Ez utóbbi mind az általános relativitáselmélet, mind a klasszikus forgási- és árapálytorzultság következtében fellépő apszismozgás esetében időben állandó, és a pályamenti keringés irányával megegyező irányú.¹) A sziderikus periódus azonban szigorúan véve még mindig nem azonos a fedési periódussal, azaz az egymást követő hasonló fedések között eltelt idővel, ugyanis ez utóbbit az is befolyásolja,

¹E kijelentés szigorúan véve a klasszikus árapálytorzultság esetében csak akkor érvényes, ha feltesszük, hogy a csillagok forgástengelye merőleges a pályasíkra.

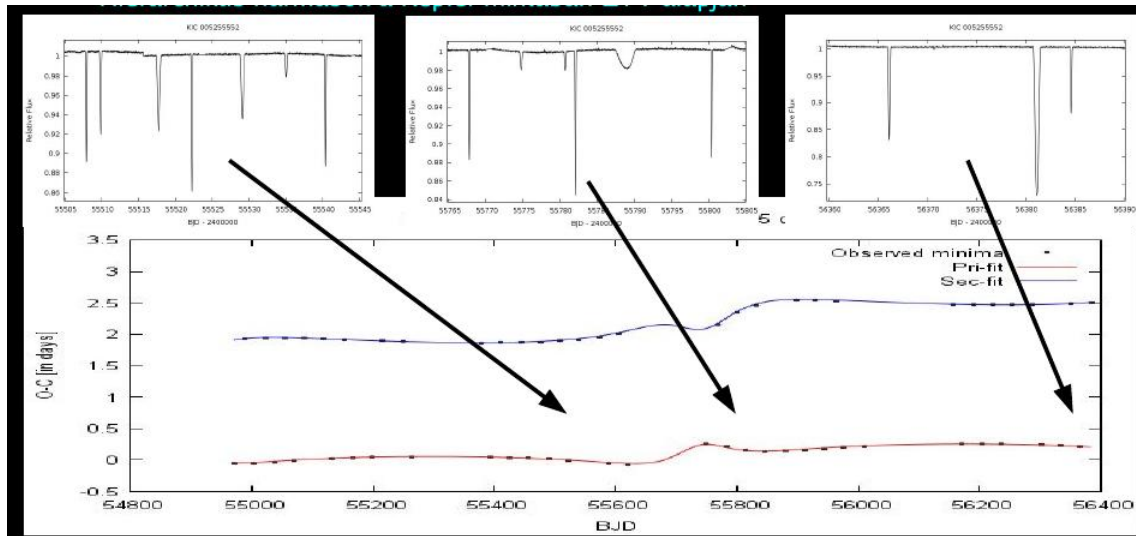


1. ábra. Példa fényidőeffektus, illetve apszismozgás okozta látszólagos periódusváltozásra. A bal oldali ábrán a KIC 4670267 esetében egy tipikus, tisztán a fényidőeffektus okozta ETV görbét láthatunk. A jobb oldali ábrán, a KIC 5771589 hierarchikus hármascillag esetében a piros körök a főminimumokat, a kék négyzetek a mellékminimumokat mutatják. Ezen a görbén a hosszabb időskálájú, a kétféle minimum esetén ellentétes fázisú változás a dinamikai apszismozgás következménye, míg a rövidebb periódusú, és mind a fő- mind a mellékminimumok esetében azonos fázisú, bár nem egészen azonos alakú változás a hosszú periódusú dinamikai perturbációk, illetve a fényidőeffektus eredőjeként jön létre. Ezekben a kettősökben a keringési periódus, illetve a fedési periódus szemléltetést mérhetően különböző.

hogyan éppen milyen irányból látunk rá a Földről nézve a pályára, és ezért a fedési események bekövetkezési idejében ezúttal is megjelenik egy periodikus tag, amelynek periódusa az apszismozgási periódussal egyezik meg, fázisa azonban a fő- illetve mellékminimumok esetében egymással éppen ellentétes (1. ábra, jobboldali panel).

Mindezen felül, a *Kepler* és CoRoT űrtávcsövek működése óta már ismerünk olyan fedési rendszereket is, amelyek esetében bár a keringési periódus jól ismert, fedési periódust, legalábbis a szokványos módon, nem is tudunk definiálni. Ezek egyrészt az úgynevezett triplán fedő hármascillagok, ahol időnként a távoli pályán keringő harmadik komponens is elfedi a szoros kettős egyik vagy másik tagját, vagy azok takarásába kerül. Ezekben az esetekben a harmadik komponenshez köthető fedések általában nem egészen szabályos időközönként ismétlik egymást, sőt a távoli pálya egy-egy (alsó vagy felső) konjunkciója környékén akár kettő-négy fedési esemény is bekövetkezhet (ld. 2. ábra), vagy éppen ki is maradhat megfigyelhető fedés.

Másrészt a harmadik komponens perturbációi hatására az is előfordulhat, hogy a szoros kettős két tagja is szabálytalan időközönként fed el egymást. Ez akkor történhet meg, amikor a szoros kettős pályasíkja gyors precessziót végez, és ezért időszakosan, vagy akár csak esetenként valamennyi fedés a lecsökkenő inklináció miatt kimarad. Erre például az elsőként felfedezett triplán fedő hierarchikus hármas, a KOI-126 (Carter és mksai., 2011) mutat jó példát.



2. ábra. A KIC 5255552 triplán fedő hierarchikus hármas csillag három külső fedési eseménysora. A *Kepler*-űrtávcső által megfigyelt egyetlen, a tág pályához tartozó pericentrum-átmenet előtt röviddel bekövetkezett alsó konjunkció során négy extra fedési esemény figyelhető meg. Az ezt (és a pericentrum-átmenetet) követő felső konjunkció környékén három, kisebb amplitúdójú elhalványodás következett be, amelyekből az utolsó két és fél nap hosszúságú volt mutatván, hogy a fedésben részt vevő két objektum egymáshoz képesti, az égboltra vetített sebessége a *Kepler*-űrtávcsőről nézve egészen kicsi volt. Végül, közvetlenül a második giroszkóp meghibásodása előtt (amely véget vetett az eredeti *Kepler*-küldetésnek) előbb egy alig 4 ezrelékes elhalványodás volt megfigyelhető, majd 10 nappal később az egész fénygörbe legnagyobb amplitúdójú elhalványodása következett be.

2. kérdés: A Kepler-mező észlelési folyamatos adatsora páratlan hosszúságú, de nem lebecsülendő az utódmisszió, a K2 különféle mezőiben észlelt adattömeg sem. KÉRDÉS: A dolgozat témájához kapcsolódva milyen kutatásokra lehet használni a negyedéves K2-adatokat?

Válasz: A K2 adatsorai valóban rövidek a fedési minimumok időpontváltozásainak érdemi vizsgálatához. Éppen ebből kifolyólag 2013-ban magam is csatlakoztam egy olyan white paper-hez, amelyben arról kívántuk meggyőzni a *Kepler* űrtávcsövet üzemeltető konzorciumot, hogy a K2 misszió során továbbra is a primordiális *Kepler*-mezőt figyeljék meg az űrtávcsővel, még tovább növelve a már amúgy is páratlan hosszúságú és precizitású, folyamatos adatsort (Molnár és mksai., 2013). Ugyanakkor a K2 misszió összességében jóval több csillagot ér el, és szinte mindegyik észlelési mezőben előkerül 1-2 vagy akár több különleges, vagy legalábbis különböző okokból érdekes fedési kettős vagy többes rendszer, amelyek fényváltozásainak vizsgálatával, modellezésével, jelentős új eredmények érhetők el.

Az elmúlt másfél évben valóban, elsősorban ilyen kutatásokkal foglalkoztam. Ehhez a jelen dolgozat 5. és 6. fejezetében ismertetett és alkalmazott fénygörbemodellező kódot (az NKFIH-OTKA K113117 pályázati keret támogatásával) folyamatosan egy komplex, fotodinamikai analízisek elvégzésére képes programcsomaggá fejlesztettem, amely immáron nem csak fedési kettősök, illetve triplán fedő hierarchikus hármasok fénygörbemodellezésére képes, hanem 2+2 hierarchiájú, azaz két fedési kettős alkotta fedési négyes rendszerek kompozit fénygörbéjét is modellezi, valamint ezzel egyidejűleg a radiális sebesség-görbét, illetve a fedésiminimumidőpont-változásokat leíró $O-C$ diagramokat is képes kezelni, valamint opcionálisan a komponensek mozgásának numerikus integrálására is képes. Az elmúlt bő másfél évben külföldi, illetve hazai társszerzőimmel két, a K2 misszió során felfedezett, fedési kettősöket tartalmazó négyes, illetve ötös rendszer komplex analízisét publikáltuk (Rappaport és mksai., 2016, 2017), míg egy harmadik, szintén a K2 misszió keretében megfigyelt négyes rendszerre kapott eredmények publikálás alatt állnak (Borkovits és mksai., 2018, előkészületben), továbbá asztali számítógépen ebben a pillanatban is fut egy további, frissen talált triplán fedő, szoros, hierarchikus fedési hármas rendszer fotodinamikai analízise.

3. kérdés: A dolgozat elkészítése óta közzétették a Gaia asztrometriai űrszonda működésének első 16 hónapjában végzett méréseinek eredményeit (Gaia DR1). KÉRDÉS: Mennyire egyezik a HD 181068 és a HD 183648 rendszerekre a Gaia-mérések alapján meghatározott távolság a Kepler-fénygörbék alapján kapott értékekkel?

Válasz: A HD 181068 triplán fedő hármas rendszer dolgozatom 5. fejezetében tárgyalt analízise során a rendszer távolságának meghatározásával szigorúan véve nem foglalkoztam. Ennek oka a következő. A hármas rendszer Derekas Aliz általi felfedezését követő mérési kampány során a Palomar-hegyen található CHARA/PAVO nagyfelbontású, optikai interferométerrel sikerült meghatározni a vörös óriás komponens szögátmérőjét, amely (a szélsőtétedésre való korrekciót követően) $\Theta_{LD} = 0,461 \pm 0,011$ mas-nak adódott (Derekas és mksai., 2011). Ezt az értéket az akkor elérhető legpontosabb, $\pi_{HIP} = 4,0 \pm 0,4$ mas Hipp-

arcos parallaxissal kombinálva, a szerzők a vörös óriás fizikai sugarára $R = 12,4 \pm 1,3 R_{\odot}$ értéket kaptak. Ez az eredmény pedig gyakorlatilag megegyezik az általam vezetett kutatás során, a fentiektől teljesen független módon, egy nagyságrenddel nagyobb pontossággal kapott $R = 12,46 \pm 0,15 R_{\odot}$ sugárral. Ez az eredmény ily módon tökéletes összhangban van mind a Hipparcos, mind a tőle csak hibahatáron belül különböző új, Gaia parallaxissal.

Mindazonáltal a dolgozat, illetve az alapjául szolgáló publikáció ezirányú mulasztását kiküszöbölendő, tisztán a *Kepler*-fotometriából, illetve a felfedezést követő földi spektroszkópiából kiindulva is meghatározom a hármas rendszer távolságát, és összevetem a Gaia DR1 katalógusból nyerhető távolságértékkel. A spektroszkópia használatára azért van szükség, mert a *Kepler*-fénygörbék önmagukban szigorúan véve nem, illetve csak közvetve alkalmasak távolságmérésre. Ennek fő okai, hogy a *Kepler*-űrtávcső egyszínfotometriai adataiból önmagukban sem a csillagok effektív hőmérséklete, sem fizikai mérete nem határozható meg. Ugyanakkor a HD 181068 triplán fedő hármas esetében a vörös óriás komponens radiális sebesség-görbéjének, illetve a két vörös törpe alkotta szoros kettőscsillag fedésiminimumidőpont-változásainak kombinálásával, dinamikai úton meghatároztam a hármas rendszer összes fluxusának 99,2%-át adó vörös óriás komponens tömegét. Ezt kombinálva a fedési fénygörbéből meghatározott fajlagos (a pálya fél nagytengelyéhez viszonyított relatív) sugárral, a vörös óriás komponens sugara $R = 12,46 \pm 0,15 R_{\odot}$ -nak adódott. Figyelembe véve a spektroszkópiából kapott $T = 5100 \pm 100$ K effektív hőmérsékletet (Derekas és mtsai., 2011), a vörös óriás luminozitására $L = 93 \pm 8 L_{\odot}$ -t kapunk. Így módon a vörös óriás abszolút fényességére (a bolometrikus korrekció alkalmazása után) $M_V = 0,0 \pm 0,1$ magnitúdó adódik. A SIMBAD adatbázis alapján a csillag látszó vizuális magnitúdója: $m_V = 7,09$ magnitúdó, amelyből (a csillagközi vörösödést elhanyagolva) a rendszer távolságára, valamint parallaxisára

$$d = 263 \pm 12 \text{ pc}$$

és

$$\pi = 3,8 \pm 0,2 \text{ mas}$$

adódik, amely hibahatáron belül összhangban van a Gaia DR1 katalógusban található

$$\pi_{\text{DR1}} = 4,18 \pm 0,22 \text{ mas}$$

parallaxis értékkel.

A HD 183648 esetében a rendszer abszolút vizuális összfényessége: $M_V = 0,9 \pm 0,1$ magnitúdó, míg a SIMBAD katalógus szerinti látszó vizuális fényesség $m_V = 8,48$ magnitúdó. Ebből a távolságra, illetve a parallaxisra a következőket kapjuk:

$$d = 328 \pm 15 \text{ pc},$$

illetve

$$\pi = 3,0 \pm 0,1 \text{ mas}.$$

Ezzel szemben a Gaia DR1 katalógusban található érték

$$\pi_{\text{DR1}} = 2,30 \pm 0,31 \text{ mas},$$

amely szignifikánsan különbözik az általunk végzett analízisből számított fenti eredménytől. Ennél a pontnál azonban fontosnak érzem megjegyezni, hogy a Hipparcos műhold mérései ugyanerre a kettőscsillagra

$$\pi_{\text{HIP}} = 4,12 \pm 0,73 \text{ mas}$$

trigonometrikus parallaxist eredményeztek. Jól látható tehát, hogy a két korábbi, nagy pontosságú asztrometria mérés között is jelentős (sőt még nagyobb) inkonzisztencia található. Elképzelhetőnek tartom, hogy ennek oka éppen a rendszer kettős természetében található. Ezért egyelőre nem vonnék le semmilyen következtetést a saját analízisünk és a Gaia eredmények közti eltéréssel kapcsolatban. Ehhez célszerű lesz mindenképpen megvárni a Gaia katalógus későbbi, várhatóan még nagyobb pontosságú kiadásait.

Irodalomjegyzék

- Carter, J. A.; Fabrycky, D. C.; Ragozzine, D.; Holman, M. J.; Quinn, S. N.; Latham, D. W.; Buchhave, L. A.; Van Cleve, J.; Cochran, W. D.; Cote, M. T.; Endl, M.; Ford, E. B.; Haas, M. R.; Jenkins, J. M.; Koch, D. G.; Li, J.; Lissauer, J. J.; MacQueen, Ph. J.; Middour, Ch. K.; Orosz, J. A.; Rowe, J. F.; Steffen, J. H.; Welsh, W. F. , 2011, *KOI-126: A Triply Eclipsing Hierarchical Triple with Two Low-Mass Stars*, Science, 331, 562
- Derekas, A.; Kiss, L. L.; Borkovits, T.; Huber, D.; Lehmann, H.; Southworth, J.; Bedding, T. R.; Balam, D.; Hartmann, M.; Hrudkova, M.; Ireland, M. J.; Kovács, J.; Mező, Gy.; Moór, A.; Niemczura, E.; Sarty, G. E.; Szabó, Gy. M.; Szabó, R.; Telting, J. H.; Tkachenko, A.; Uytterhoeven, K.; Benkő151, J. M.; Bryson, S. T.; Maestro, V.; Simon, A. E.; Stello, D.; Schaefer, G.; Aerts, C.; ten Brummelaar, T. A.; De Cat, P.; McAlister, H. A.; Maceroni, C.; Mérand, A.; Still, M.; Sturmann, J.; Sturmann, L.; Turner, N.; Tuthill, P. G.; Christensen-Dalsgaard, J.; Gilliland, R. L.; Kjeldsen, H.; Quintana, E. V.; Tenenbaum, P.; Twicken, J. D., 2011, *HD 181068: A Red Giant in a Triply Eclipsing Compact Hierarchical Triple System*, Science, 332, 216
- Molnár, L.; Szabó, R.; Kolenberg, K.; Borkovits, T.; Antoci, V.; Vida, K.; Ngeow, C. C.; Guzik, J. A.; Plachy, E.; Castanheira, B., 2013, *The Kep-Cont Mission: Continuing the observation of high-amplitude variable stars in the Kepler field of view*, An answer to the Call for White Papers to repurpose the Kepler spacecraft, 2013arXiv1309.0740M
- Rappaport, S.; Lehmann, H.; Kalomeni, B.; Borkovits, T.; Latham, D.; Bieryla, A.; Ngo, H.; Mawet, D.; Howell, S.; Horch, E.; Jacobs, T. L.; LaCourse, D.; Sódor, Á.; Vanderburg, A.; Pavlovski, K., 2016, *A quintuple star system containing two eclipsing binaries*, MNRAS, 462, 1812
- Rappaport, S.; Vanderburg, A.; Borkovits, T.; Kalomeni, B.; Halpern, J. P.; Ngo, H.; Mace, G. N.; Fulton, B. J.; Howard, A. W.; Isaacson, H.; Petigura, E. A.; Mawet, D.; Kristiansen, M. H.; Jacobs, T. L.; LaCourse, D.; Bieryla, A.; Forgács-Dajka, E.; Nelson, L., 2017, *EPIC 220204960: A Quadruple Star System Containing Two Strongly Interacting Eclipsing Binaries*, MNRAS, 467, 2160

Baja, 2018. február 13.

Borkovits Tamás