

Válaszok Dr. Kovács József kérdéseire

Kóspál Ágnes

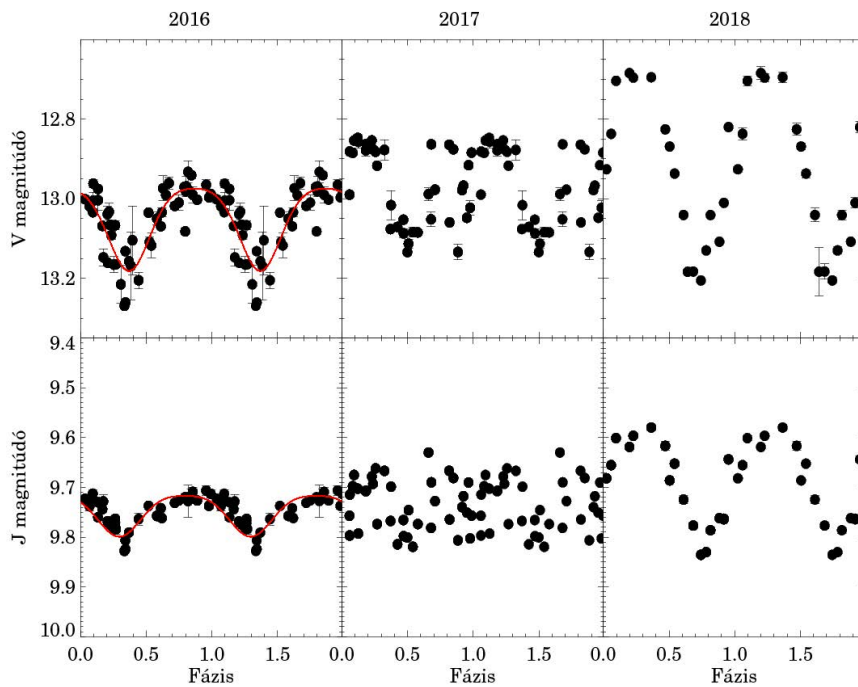
2018. október 8.

1. [3. tézispont] Az EX Lup esetében a mért 7,417 nap periódusú és $2,2 \text{ km s}^{-1}$ f lamlit d j  radiálissebesség-v ltoz s magy razat ra a kísérő mellett természetes módon felvetődött a csillagaktivitás eredményeként fellépő foltosság is, amely lehetőséget a jelölt alaposan körbe is jár, eredményül pedig arra a k vetkezt tesre jut, hogy a periodicitást és a sebess gamlit d t csak egy extrém kiterjedésű folt magy razhatn , amely a látható tartományban $4\text{--}8^m$ periodikus fényességváltozást okozna, ez viszont ellentmond a megfigyelt fénygörbének. Ismerünk-e egyáltalán olyan példát, ahol ilyen nagyságú, de legalább az 1^m amplitúdót meghaladó periodikus V -beli fényességváltozást nagy valószínűséggel csillagfolt vagy csillagfoltok jelenléte okoz?

Idősebb csillagok esetében előfordulhatnak viszonylag nagy fényváltozások. Ez figyelhető meg a szok sosan l aktívabb K-típusú óriáscsillagok esetében. Ezek a rendszerek tipikusan RS CVn típusú kett s k, amelyek erősen foltos, erős mágneses mezővel rendelkező, kromoszferikusan aktív csillagok. Az MTA CSFK CSI-ben Oláh Katalin és munkatársai három ilyen csillagnál találtak $0^m65 - 1^m05$ közötti V sávbeli amplitúdót, b r eredményeik szerint a változékonyságnak csak fele-harmada magy razhat  csillagfoltokkal (Oláh et al. 2014).

Fiatal csillagok esetében ezt a kérdést Herbst et al. (1994) vizsgálta egy nagy (80 elem ) mintán. Azt tapasztalták, hogy a hideg csillagfoltok által okozott változékonyság leginkább gyengevonal  T Tauri csillagokban (WTTS) látható, de előfordul klasszikus T Taurikban (CTTS) is. A változékonyság periódusa $0,5$ és 18 nap közötti, amplitúdója tipikusan néhány tized magnitúdó a V sávban, a legnagyobb v ltoz s 0^m8 V -ben és 0^m5 I -ben. Egy másik tanulmányban Bouvier & Bertout (1989) 0.1% és 17% közötti foltlefedetts get találtak egy 11 csillagból álló mintában, de itt is minden esetben 1 magnitúdó alatt maradt a V sávbeli amplitúdó.

Az MTA CSFK CSI-ben dolgozó kollégákkal mi is végeztünk foltmodellez st egy különleges fiatal kettőscsillagra, a DQ Tau-ra, melynek Kepler K2 fénygörbéjén nagyon szabályos rotációs moduláció látható (Kóspál et al. 2018). Azt találtuk, hogy a K2 monitorozás során a csillag felszínének 30% - t borították foltok, m g korábban, Tofflemire et al. (2017) monitorozása során 50% - t (feltéve, hogy csak az egyik komponens foltos). Azonban ezek is is mindössze $\Delta Kp = 0^m9$ és $\Delta V = 0^m22$ változékonyságot okoztak.

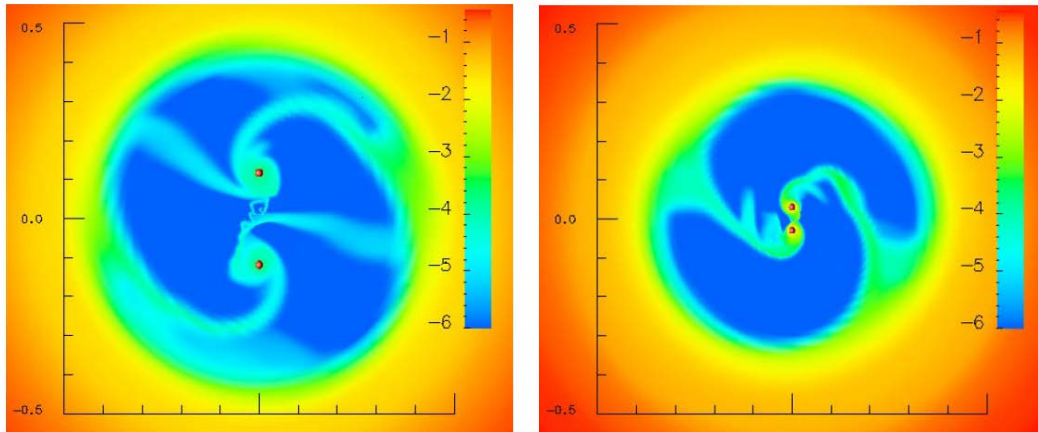


Az EX Lup optikai és közeli infravörös fénygörbéi (forrás: Kóspál et al. előkészületben).

Az EX Lup további monitorozása során (2016-ban, 2017-ben és 2018-ban is végeztünk fotometriai monitorozást V és J sávban, minden évben legalább két héten át) azt találtuk, hogy nagyon stabil periódusú rotációs moduláció látható a csillag fénygörbéjében. Amint az a fenti ábrán látható, ennek amplitúdója évről évre változik (valószínűleg a folt vándorlása miatt), a V sávban $0^m,2$ és $0^m,5$ közötti. Ezek modellezése az MTA CSFK CSI-ben dolgozó Vida Krisztián, Kriskovits Levente és Kővári Zsolt segítségével jelenleg is folyamatban van. A 2016-os adatokat pl. egy olyan folttal tudtuk modellezni, amely 300 K-nel hidegebb a csillagfotoszféránál, és a sugara 45° , tehát a csillagfelszín közelítőleg 15%-át fedi le (piros görbe a fenti ábrán). A korábbiak alapján ez nem kirívó a T Tauri csillagok között.

2. [7.2. tézispont] A V960 Mon esetében felfedezett 17,2 nap periódusú hullámhosszfüggetlen oszcilláció egyik lehetséges magyarázata, hogy a rendszer közepén egy szoros kettőscsillag található, a komponensek keringése pedig a 17,2 nap periódussal modulálja az akkréciót. A 103. oldal tetején olvasható $M_* = 0,75 \pm 0,25 M_\odot$ tömegértéket elfogadva a komponensek szeparációja az adott keringési periódussal 0,1 CSE körüli lehet. Ekkora szeparáció mellett elképzelhető-e, hogy mindegyik komponensnek külön akkréciós korongja legyen? (A 104. oldal tetején olvasható bekezdés nem fogalmaz egyértelműen: az egyik mondatban a modellszámításokra utalva a szoros kettőst övező közös korongról, majd a következőben már két egyedi akkréciós korongról és azok kölcsönhatásáról van szó.)

Numerikus szimulációk alapján egy szoros kettős rendszerben a kettőst övező közös korongról induló anyagáramlás kialakíthat kisebb csillagkörüli korongokat is. Erre mutat példát Günther & Kley (2002) ábrája (lásd lent), amelyen két konkrét rendszerre, az AK Sco és a DQ Tau nevű fősorozat előtti kettőscsillagra végzett numerikus modellszámítások eredménye látható. A dolgozatban említett oszcilláció tehát egy ilyen szoros kettős rendszerben a kettős körüli korong belső pereme és a komponensek csillagkörüli korongjainak bonyolult kölcsönhatásából eredhet. A numerikus szimulációk azt mutatják, hogy ilyen esetekben az akkréciós rátában megfigyelhető egy periodikus moduláció a kettős keringési periódusával, vagy annak felével.

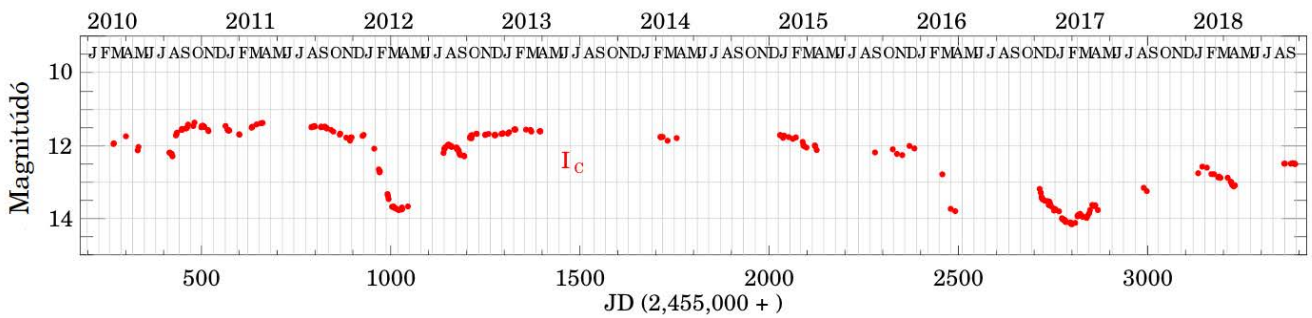


Numerikus szimulációk az AK Sco és DQ Tau rendszerekre. A színskála a felületi sűrűséget jelöli, a tengelyek skálája CSE-ben van (forrás: Günther & Kley 2002). A szeparáció a DQ Tau esetében 0.135 CSE, amely nagyon közel esik az V900 Mon 0.11 CSE szeparációjához.

3. [8.2. tézispont] A V582 Aur esetében a kitörés során megfigyelt két mély minimum magyarázatára a jelölt egy porcsomó kitakaró hatását javasolja, amely a csillagtól 2,8 CSE távolságban kering, hossza pedig a pályája mentén 3,5 CSE körüli. A tömege kb. $1,2 \times 10^{-8} M_\odot$ vagy $0,004 M_\oplus$, ha a dolgozat 119. olvasható feltételezéssel élünk,

miszerint a magassága 1 CSE. Mi alapozza meg ez utóbbi feltételezést, illetve mi alakíthat ki ilyen furcsa geometriájú sűrűsödést a porban?

Andrews et al. (2010) mérései szerint egy tipikus T Tauri korongnak a fősík feletti skálamagassága 100 CSE-nél 5–20 CSE. Ebből (lapos geometriát feltételezve) a korong teljes vastagsága 2,8 CSE-nél 0,3–1,1 CSE. A korong geometriája persze nem ismert, de ahhoz, hogy egy viszonylag vékony korongból kiemelkedjen egy sűrű porstruktúra, ami fedéseket okoz, logikus feltételezésnek tűnik 1 CSE vastagságot venni. Ebben a konkrét esetben ennek a sűrűsödésnek az eredete nem ismert, de elképzelhető egy örvény a korongban, és/vagy egy a korongba ágyazott bolygóval való kölcsönhatás (pl. Richard et al. 2013, Lobo Gomes et al. 2017). A V582 Aur-ról szóló, jelenleg referálás alatt álló cikkünkben egy másik lehetőséget is felvetettünk: elképzelhető, hogy a rendszer külső részéből jött be a belsőbe egy szuper-üstökös (Zsidi et al., bírálóat alatt). Valószínűleg nem stabilan keringő objektumról van szó, mert a legújabb méréseink alapján már tudjuk, hogy a V582 Aur 2016–2018 között is mutatott a 2012-eshez hasonló, de sokkal hosszabb idejű minimumot, tehát a két fedés fénygörbéje különbözik. Ez arra utal, hogy a keringés során megváltozott a poreloszlás, valószínűleg szétterült a porcsomó a pálya mentén.



A V582 Aur I_C sávbeli fénygörbéje (forrás: Zsidi et al., bírálóat alatt).

4. [12.3. tézispont] A V346 Nor esetében a csillagot övező burokból a korongra jutó anyag behullási rátája $6 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{év}$, ez az érték pedig magasabb, mint a korong és a csillag felszíne között zajló nyugalmi akkréció üteme, ami viszont a FUor-kitörések magyarázata szempontjából fontos eredmény. A 157. oldalon az 5.2. táblázat néhány jól ismert protocsillag korongjának és burkának szakirodalomból származó paramétereit listázza. Látható, hogy a behullási ráta ezeknél is akkora, mint a V346 Nor esetében viszonylag nagynak mondott érték. Ez alapján várható-e más esetekben is a behullási és az akkréciós ráta közötti szignifikáns különbség megállapítása?

Tobin et al. (2013) a L1527 IRS jelű rendszer spektrális energiaeloszlásának modellezéséből $3 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{év}$ akkréciós rátát (a belső korongból a csillagra) valamint $10^{-5} M_{\odot}/\text{év}$ behullási rátát (a burokból a külső korongra) kapott. Ez utóbbi ugyan 30%-kal magasabb, mint a táblázatomban szereplő (Tobin et al. 2012-ből vett) $7 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{év}$, de valóban arra utal, hogy ebben az esetben is eltérés lehet az akkréciós és a behullási ráta között. Várható tehát, hogy az L1527 IRS ki fog törni valamikor a jövőben. A VLA 1623 A-t Pudritz et al. (1996) $0,3 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{év}$ akkréciós rátával modellezték, és ezzel jól le tudták írni a rendszer teljes luminozitását. Itt tehát a behullási ráta nem szignifikánsan magasabb, így ebből az objektumból valószínűleg nem lesz FUor. Hasonló a helyzet a HH 112 esetében, ahol Lee et al. (2014) egyenlő behullási és akkréciós rátát feltételezett, és ez jól reprodukálta a rendszer bolometrikus luminozitását, itt sem várható tehát FUor-kitörés. Az L1551 IRS 5 esetében Momose et al. (1998) $6 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{év}$ behullási rátát és $7,7 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{év} - 2,6 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{év}$ közötti akkréciós rátát adtak meg, jelenleg tehát ebben a rendszerben a csillag felszínére nagyobb rátával hullik az anyag, mint a burokban a behullási ráta. Ez nem meglepő, hiszen az L1551 IRS 5 egy jelenleg kitörésben lévő FUor.

5. Az értekezés alapjául szolgáló munkákban nagy szerepet játszik a csillagok körüli korongok spektrális energiaeloszláson nyugvó modellezése. A porkorongok numerikus modellezése az utóbbi években vált az MTA CSFK KTM CSI egyik jelentős kutatási területévé. Elképzelhető-e ez utóbbi módszereinek, eredményeinek felhasználása az eruptív csillagok tanulmányozásában?

A fiatal eruptív csillagok spektrális energiaeloszlásának radiatív transzfer-moddal való illesztésének már vannak hagyományai a MTA CSFK CSI-ben, lásd pl. az EX Lup nyugalmi méréseinek illesztését Sipos et al. (2009) cikkében, vagy a V1647 Ori kitöréses adatainak illesztését Mosoni et al. (2013) cikkében. Jelenleg is folynak ilyen irányú projektek, Kun Mária például a 2MASS 22352345+7517076 jelű nemrégiben kitört fiatal csillag modellezésén dolgozik Whitney et al. (2003) radiatív transzfer kódjával, Lei Chen pedig az EX Lup kitörése után több időpontban felvett infravörös színképének időfejlődését modellezi a RADMC3D kóddal (Dullemond & Dominik 2004). Egy másik modellezési aspektus a csillagkörüli anyag mozgásának numerikus hidrodinamikai szimulációja, amelyekkel Kundan Kadam (együttműködve a Bécsi Egyetemről Eduard Vorobyovval) vizsgálja a gravitációs fragmentációt, mint a FUor-kitörések egy lehetséges eredetét. A fiatal eruptív csillagok numerikus modellezése az egyik témája a jelenleg futó SACCRED ERC Starting Grant projektemnek is.

Irodalomjegyzék

- Andrews et al. 2010, ApJ, 723, 1241 • Bouvier & Bertout 1989, A&A, 211, 99 • Dullemond & Dominik, 2004, A&A, 417, 159 • Günther & Kley 2002, A&A, 387, 550 • Herbst et al. 1994, AJ, 108, 1906 • Kóspál et al. 2018, ApJ, 862, 44 • Lee et al. 2014, ApJ, 786, 114 • Lobo Gomes et al. 2015, ApJ, 810, 94 • Momose et al. 1998, ApJ, 504, 314 • Mosoni et al. 2013, A&A, 552, A62 • Olát et al. 2014, A&A 572, A94 • Pudritz et al. 1996, ApJ, 470, L123 • Richard et al. 2013, A&A, 559, A30 • Sipos et al. 2009, A&A, 507, 881 • Tobin et al. 2012, Nature, 492, 83 • Tobin et al. 2013, ApJ, 771, 48 • Tofflemire et al. 2017, ApJ, 835, 8 • Whitney et al. 2003, ApJ, 591, 1049

Budapest, 2018. október 8.



Kóspál Ágnes