

Kóspál Ágnes

„Fiatal eruptív csillagok és szerepük a csillagkeletkezésben”

című, az **MTA doktora** cím megszerzéséért benyújtott értekezéséről

Kóspál Ágnes 2009-ben védte meg PhD értekezését. A következő hat évben Hollandiában dolgozott, előbb a leideni obszervatóriumban, majd Noordwijken volt ESA-ösztöndíjas. Külföldi munkája során a legkorszerűbb csillagászati észlelési eszközök és technikák széles spektrumával ismerkedett meg, a szó átvitt és szoros értelmében is. 2014-ben az MTA Lendület programjának támogatását (2014–2019) elnyerve hazatért az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetébe, hogy a külföldön szerzett tapasztalatait itthon is kamatoztathassa. A Konkoly Obszervatórium tudományos főmunkatársaként 2017-ben sikeresen pályázott az Európai Kutatási Tanács „ERC Starting Grant” támogatására (2017–2022). A komoly anyagi forrásokat biztosító pályázatokkal a jelölt megfelelő kereteket teremtett ahhoz, hogy saját kutatócsoportokkal komplex, a korábbi vizsgálatok mélységét meghaladó módon tanulmányozhassa a kitöréseket mutató fiatal csillagokat, és azoknak a csillagkeletkezésben betöltött szerepét.

Az értekezés témája

A csillagkeletkezés vizsgálata a modern asztrofizika egyik súlyponti területe. Az észlelési technika fejlődésének, a nagy földi távcsöveknek és az űrteleszkópoknak köszönhetően az utóbbi évtizedekben a fizikai folyamatok megértésében hatalmas előrelépés történt, amelynek a magyar kutatók – köztük a jelölt – is aktív részesei. Az eredmények szerint a csillagkeletkezési folyamatoknak kulcsfontosságú eleme a kialakuló objektumok, valamint az azokat övező gáz- és porkorong, illetve a rendszert még körülvevő felhőmag maradékának kölcsönhatása: az anyagbehullás a burokból a korongba és az akkréció a korongból a formálódó csillag felszínére. A témában az egyik legérdekesebb kérdés az, hogy mi okozza a tömegbefogás ütemének kitörésekhez vezető hirtelen megnövekedését, vagy éppen annak lecsökkenését. Mivel ezek a folyamatok, illetve az általuk okozott átmeneti változások hatással vannak a bolygókeletkezésre is, ezért vizsgálatuk alapvető fontosságú, nem csak az eruptív fázisban, de lehetőleg a kitörések közötti nyugodt periódusokban is. Jelölt az értekezésben bemutatott munkája során azt a célt tűzte ki maga elé, hogy az elérhető legmodernebb műszerekkel elvégzett új mérésekkel gyűjtsön minél több információt az eruptív csillagokról, így kerülve közelebb a velük kapcsolatos problémák megválaszolásához. **Az értekezés témája szelete egy pezsgő tudományterületnek, amelynek a jelölt aktív, nem csak magyar, de nemzetközi szinten is vezetőnek számító művelője.**

Az értekezés felépítése

Az értekezés részei: **előszó, bevezetés**, az eredményeket tárgyaló **négy nagy fejezet, tézisszerű összefoglalás, köszönetnyilvánítás és irodalomjegyzék.**

- Az értekezés kb. ötödét kitevő **bevezetés** hivatkozásokkal bőségesen ellátva a téma megfigyelési és elméleti hátterét vázolja, majd főleg azok honlapjára támaszkodva röviden bemutatja azt a több tucatnyi távcsövet, műszert és égboltfelmérő programot, amelyekkel méréseit a jelölt felhasználta a dolgozatban.

- A **2. fejezet** az EX Lup, az eruptív csillagok EXor osztálya prototípusának részletes vizsgálata során nyert eredményeket mutatja be.
- A **3. fejezetben** a jelölt három újonnan kitört eruptív csillag, a V2492 Cyg, a HBC 722 és a V960 Mon vizsgálatának eredményeit részletezi, illetve kitér a korábban kitört, de mostanában ismét érdekesen viselkedő V582 Aur tanulmányozására is.
- A **4. fejezet** – példaként szintén több csillag vizsgálatát felvonultatva – azt a kérdést járja körbe, hogy a csillagot övező burokból miként pótlódhat a kitörések során a korongból a csillagra hullott anyag.
- Az **5. fejezet** a V346 Nor kitörésével és annak a csillag környezetére gyakorolt hatásával kapcsolatos eredményeket összegzi.

Az eredményeket tárgyaló fejezetek és azok részeinek felépítése egységes, mindegyik a téma, majd a motiváció bemutatásával indul, amit az észlelések ismertetése és az eredmények értelmezése követ, végül a részt a következtetések zárják, a fejezetek végén pedig összegzést és kitekintést olvashatunk. A részek kezdetén a jelölt azt is feltünteti, hogy az adott blokkhoz melyik szakcikk tartozik.

Az értekezés felépítése logikus és átgondolt, jól vezeti az olvasót a téma és az eredmények megismerése során. A dolgozat információanyaga rendkívül gazdag – ez nyilván el is várható egy akadémiai doktori értekezéstől, és a jelölt szempontjából is érthető a szándék, hogy az általa elvégzett munka minél több eredményét építse be az értekezésbe –, a rengeteg adat és hivatkozás azonban talán nem mindig segíti az eligazodást.

Az értekezés vizsgálati módszerei

Az értekezésben bemutatott tudományos eredmények eléréséhez a jelölt az általa elérhető megfigyelési eszközök igen széles tárházát vetette be, amelyek sora felöleli a látható és az elektromágneses spektrum optikainál hosszabb hullámhosszúságú tartományainak szinte valamennyi fontos szegmensét. A „minél több eszközzel minél több hullámhossz-tartományban észlelni az objektumot” megközelítés nyilván kiterjedt nemzetközi kapcsolatrendszert és sok-sok munkát igényel, az eredmény azonban igazolja a „módszer” jogosultságát. Az értekezés tehát alapvetően obszervációs (fotometriai, spektroszkópiai, spektrális energiaeloszlási) eredményeken alapul, de természetesen nem hiányoznak belőle a megfigyelési tények elméleti, kvalitatív magyarázatai, értelmezései sem, amelyeket a jelölt modellezéssel és számszerűsített alátámasztásokkal is megerősít. Az eredmények elérésének alapvető fontosságú eleme a szakirodalom mélyreható ismerete. A dolgozathoz mellékelt imponáló méretű, 450 elemet tartalmazó irodalomjegyzék, de maga az értekezés is ékesen bizonyítja, hogy a jelölt a szakterület minden rezdülésével tisztában van.

Az értekezés alapjául szolgáló tudományos közlemények

Az értekezés téziseinek alapjául **18 tudományos közlemény szolgál**, amelyek közül **15 referált nemzetközi folyóiratban** jelent meg, ezek közül 11-nek a jelölt első szerzője, de a maradék 4 esetben is a szerzőlista 2-3. helyén áll a neve. A NASA ADS adatbázisa alapján a bíráló készítésének idején a jelölt összes publikációinak száma 129, ebből **76 referált**, a munkáira kapott **mértékadó hivatkozások száma meghaladja az 1400-at**, a legmagasabb éves értéket 2017-ben elérve. A jelölt *h*-indexe 24.

Az értekezés tézisei

A főként általa gyűjtött óriási észlelési anyagon alapuló eredményeket a jelölt **12 tézis** formájában foglalja össze, amelyek fele alpontra tagolódnak. Az első négy tézispont az EX Lup rendszerrel kapcsolatos eredményeket vonultatja fel, az 5-8. tézispontok újonnan kitört fiatal eruptív csillagok vizsgálata során nyert eredményeket mutatnak be, a 9-10. tézispontok a FUorok hideg környezetéről, míg a 11. és 12. tézispont a V346 Nor kitöréséről és környezetéről szólnak.

A tézispontokban felsoroltak a fiatal eruptív csillagokra, azok akkréciós folyamataira vonatkozó új, észlelési oldalról nagyon alaposan alátámasztott, előremutató tudományos megállapítások, amelyek mindegyikét hiteles, önálló eredménynek ismerem el.

A teljesség igénye nélkül a tézispontok fő csoportjai a következőkben foglalhatók össze:

- Az EX Lup komplex vizsgálatával a jelölt megmutatta, hogy az EXorok prototípusának tekinthető objektum valóban kiváló laboratórium a kitörés mögötti akkréciós folyamatok ütemének, a behulló anyag utánpótlásának, és az esetleges kísérő hatásának tanulmányozásához.
- A V2492 Cyg nagyon fiatal beágyazott protocsillag, valamint a HBC 722, V960 Mon és a V582 Aur klasszikus T Tauri csillagok vizsgálatával a jelölt meggyőzően mutatta ki, hogy az eruptív folyamatok a csillagkeletkezés legkorábbi időszakától a fő akkréciós fázis befejeződése utánig jelen vannak a Naphoz hasonló, kis tömegű fiatal csillagok életében.
- A jelölt milliméteres hullámhosszakon végzett CO-, illetve interferometrikus mérésekkel feltérképezte nyolc déli és egyenlítői FUor burkát, valamint elsőként vizsgálta négy Cygnus-beli FUor molekuláris gáztartalmát, a mérésekből pedig a fejlődésre és a csillagok körüli geometriai viszonyokra vonatkozó következtetéseket vont le.
- A V346 Nor fiatal eruptív csillag esetében a jelölt szintén komplex vizsgálatokat végzett a fizikai paraméterekre, a geometriára, illetve az akkréciós és behullási rátára vonatkozóan. Utóbbiakról elsőként mutatta ki, hogy eltérnek egymástól, ez pedig a FUor-kitörések magyarázata szempontjából fontos eredmény.

Az értekezéssel kapcsolatos kérdések

- [3. tézispont] Az EX Lup esetében a mért 7,417 nap periódusú és $2,2 \text{ km s}^{-1}$ félamplitúdójú rádiálssebesség-változás magyarázatára a kísérő mellett természetes módon felvetődött a csillagaktivitás eredményeként fellépő foltosság is, amely lehetőséget a jelölt alaposan körbe is jár, eredményül pedig arra a következtetésre jut, hogy a periodicitást és a sebességamplitúdót csak egy extrém kiterjedésű folt magyarázhatná, amely a látható tartományban $4-8^m$ 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?***
- [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 $M_{\star} = 0,75 \pm 0,25 M_{\odot}$ 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.)

- [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. $1,2 \cdot 10^{-8} M_{\odot}$ 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?**
- [12.3. tézispont] A V346 Nor esetében a csillagot övező burokból a korongra jutó anyag behullási rátája $6 \cdot 10^{-6} M_{\odot}/\text{év}$, 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?**
- 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?**

Az értekezés külalakja, nyelvezete

Az értekezés magyar nyelven készült, nyelvezete, megfogalmazásai világosak, érthetőek, olvasását csak a rengeteg adat nehezíti időnként. Elgépelés, „magyartalan” vagy esetleg értelemzavaró megfogalmazás, egyeztetési hiba a dolgozat terjedelméhez viszonyítva minimális számban található benne. Előfordul néhány apróbb következetlenség is, ezekre csak egy példa: a 24. oldalon az 1.4 pont alatt a piszkéstetői 1 méteres RCC távcső egyik műszere, az $R = 20\,000$ -es felbontású ACE spektrográf a „kis felbontású” jelzőt kapta, míg más, ennél ténylegesen kisebb felbontású műszerek a „közepes felbontású” jelzőt (lásd pl. a 28. oldalon a WHT távcső ISIS spektrográfját, amelynek felbontása $R = 10\,000$).

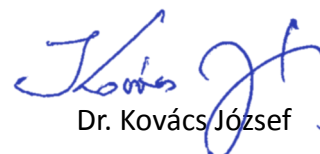
Az értekezés kivitelezése tetszetős, látszik, hogy a jelölt a tartalmi részen túl erre is megfelelő időt és energiát fordított. Az ábrák szépek, informatívak. Utóbbi alól talán csak a 3.1., 3.9. és 3.28. ábrák egy része kivétel: a felső vízszintes tengelyen bezúfolt hónapprövidítések inkább zavaróak, mint informatívak. Az ábrák feliratait – nagyon helyesen – magyar nyelvűek, azaz a jelölt sikeresen leküzdötte az ilyenkor fellépő kísértést, hogy az angol nyelvű publikációkból változtatás nélkül átemelje az ábrákat a magyar nyelvű dolgozatba. Néhány apró megjegyzés: Az értekezésben elég sok ún. árva- (pl. 57. o.) és özvegy-sor (pl. 84. o.) található. Gyakorlatilag az összes ábra a lap tetején helyezkedik el, ami szintén rontja az összképet. Bár a $\text{\LaTeX}$ hajlamos erre az elrendezésre, ébersége viszonylag könnyen kijátszható. Az olvasást néha kényelmetlenné teszi, hogy sok ábra több oldalnyi távolságban helyezkedik el a hivatkozási helyétől.

Összefoglaló vélemény

A jelölt az elmúlt tíz év során széles mérettartományt lefedő földi távcsövekkel és űrteleszkópokkal, a legváltozatosabb észlelési technikákat alkalmazva, szintén változatos hullámhossz-tartományokban gyűjtött nagy mennyiségű megfigyelési adatot fiatal eruptív csillagokról. A munka számos új szemponttal és eredménnyel gazdagította a tudományterületet, hozzájárulva a fiatal csillagok, valamint az azokat övező burkok és korongok közötti kölcsönhatások, ezáltal pedig a kitöréseiket okozó fizikai folyamatok jobb megértéséhez.

A jelölt által benyújtott értekezés tartalmi és formai szempontból is megfelel az *MTA doktora* cím elnyeréséhez szükséges feltételeknek, ezért javaslom annak nyilvános védésre bocsátását, sikeres védés esetén pedig az *MTA doktora* cím odaitélését.

Szombathely, 2018. augusztus 15.



Dr. Kovács József

a fizikai tudomány kandidátusa