

Fiatal eruptív csillagok vizsgálata infravörös és optikai hullámhosszakon

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

SZERZŐ: Kóspál Ágnes

FIZIKA DOKTORI ISKOLA
RÉSZECSKEFIZIKA ÉS CSILLAGÁSZAT DOKTORI PROGRAM
EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM,
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

A Doktori Iskola vezetője: Prof. Horváth Zalán
A Doktori Program vezetője: Prof. Csikor Ferenc

Témavezető: Dr. Petrovay Kristóf, egyetemi docens,
ELTE TTK Csillagászati Tanszék
Külső konzulens: Dr. Ábrahám Péter, tudományos főmunkatárs,
MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

Budapest

2008

1. Bevezetés

A csillagok általában óriás molekulafelhőkben, azok legsűrűbb részeiben keletkeznek. A felhőmag gravitációs összeomlása következtében közepesen kialakul a protocsillag, amelyre kívülről tovább hullik az anyag. Mivel a felhőmagnak kezdetben nullától eltérő perdülete volt, az anyag nem tud közvetlenül a protocsillag felszínére hullani, hanem kialakul egy lapos, korongszerű képződmény. A korongról a protocsillagra nem állandó ütemben hull az anyag, hanem vannak időszakok, amikor az akkréciós ráta erősen megnövekszik (a szokásos 10^{-7} – $10^{-8} M_{\odot}/\text{év}$ helyett akár 10^{-4} – $10^{-3} M_{\odot}/\text{év}$ is lehet). A megemelkedett akkréció miatt a rendszer kifényesedik. A földi megfigyelő ezt a fényességnövekedést észleli FUor- vagy EXor-típusú kitörésként (a két típust az FU Orionis és az EX Lupi után nevezték el). Egy FUor-kitörés során a csillag néhány hónap vagy év alatt 4-5 magnitúdót fényesedik, és több évig vagy évtizedig fényes marad. Az EXorok hasonló kitöréseket mutatnak, de rövidebb időskálán. Jelenlegi elképzeléseink szerint a megemelkedett akkréció oka a korong belső szélén bekövetkező termikus instabilitás, melyet bizonyos esetekben egy kísérő közeli elhaladása is okozhat. A jelöltekkel együtt jelenleg mintegy 20 FUort ismerünk. Statisztikák szerint feltételezhető, hogy *minden* kis tömegű ($M < 2 M_{\odot}$) fiatal csillag keresztülmegy megemelkedett akkréciós fázisokon, és végső tömege jelentős részét ezen időszakok alatt gyűjti össze. A FUor- és EXor-jelenség tehát a fősorozat előtti fejlődés fontos állomása.

2. A dolgozat célkitűzései

A fiatal kitörő csillagok körüli anyag szerkezetével kapcsolatban máig sok a nyitott kérdés. Vajon minden kis tömegű csillag ki tud törni? Vajon a FUor-kitörések ismétlődőek? Mi indíthatja be a kitörést? Minden ilyen csillagot hasonló szerkezetű anyag vesz körül? Hogyan fejlődnek az ilyen csillagok?

A jelenlegi FUor-modellek általában a csillag és az azt körülvevő anyag spektrális energiaeloszlását és a fénygörbét veszik figyelembe. Ezekből az adatokból azonban nem határozható meg egyértelműen a csillagkörüli anyag szerkezete, elhelyezkedése. Ezért van szükség a csillag környezetének közvetlen megfigyelésére. Ugyancsak a közvetlen megfigyelés tudná igazolni, hogy vajon minden FUornak van-e kísérője.

A doktori munka során célom az volt, hogy minél többet megtudjak a FUor-jelenségről és megpróbáljak – legalább részben – választ adni a fenti kérdésekre. Ennek érdekében doku-

mentáltam és tanulmányoztam két fiatal eruptív csillag, az *OO Ser* és a *V1647 Ori* kitörését optikai és infravörös hullámhosszakon, továbbá feldolgoztam és értelmeztem a *Parsamian 21* nevű, éléről látott koronggal körülvelt FUor nagyfelbontású méréseit. Az értekezésben ennek a három csillagnak a részletes vizsgálatát mutatom be. Figyelembe véve a jelenleg ismert fiatal eruptív csillagok kis számát, eredményeim érdemi módon hozzájárulhatnak a fősorozat előtti fejlődés eme érdekes epizódjának megértéséhez.

3. Alkalmazott módszerek

Optikai és infravörös hullámhosszakon kapott adatok segítségével tanulmányoztam a három fent említett fiatal eruptív csillag tulajdonságait és fejlődési állapotát. A V1647 Ori esetében a földi mérések nagyrészt Pizskéstetőn és a Teide Observatóriumban (Kanári-szigetek) készültek, több észlelő bevonásával. A Parsamian 21 esetében, ahol nagyobb térbeli felbontású adatokra volt szükség, differenciális polarimetriás méréseket használtam, melyek a VLT/NACO műszerével (ESO, Chile) készültek. Az OO Ser és a Parsamian 21 esetében a közép- és távoli-infravörös adatokat az Infrared Space Observatory (ISO) és a Spitzer Űrtávcső archívumából vettem. A Parsamian 21 esetében a Hubble űrtávcső archív adatainak is hasznát vettem.

Az adatok feldolgozása során a legtöbb esetben az adott műszernek megfelelő szokásos eljárást követtem. Az ISO fotometria, VLT/NACO polarimetria és Spitzer/IRS spektroszkópia esetében azonban saját magam is fejlesztettem új adatfeldolgozási algoritmusokat.

Az adatok többsége élvonalbeli nemzetközi távcsövektől/műszerektől származik. Az adatokat összekombinálva elkészítettem a dolgozatomban tárgyalt három objektum optikai-infravörös spektrális energiaeloszlását. Az eredményeket ezután összevetettem a fiatal kitörő csillagok irodalomban fellelhető modelljeinek jóslataival (Bell et al. 1995, ApJ 444, 376; Hartmann & Kenyon 1996, ARA&A 34, 207), és becslést tettem különböző fizikai paraméterek értékére.

4. Tézisek

Az OO Serpentis kitörése 1995 és 2006 között

- (1) Archív ISO adatokat és új észleléseket felhasználva dokumentáltam és megvizsgáltam

az OO Ser fényességének időbeli fejlődését közvetlenül az 1995-ös kitöréstől kezdve 2006-ig. A kitörés előtti fluxusokat összehasonlítottam a kitörés során mért spektrális energiaeloszlással és megállapítottam, hogy a kitörés miatt a rendszer nemcsak $2,2 \mu\text{m}$ -en (ahol a kitörést felfedezték), hanem az egész $2,2\text{--}100 \mu\text{m}$ -es infravörös tartományban kifényesedett. A csillag a maximális fényesség elérése óta halványodik. Megállapítottam, hogy a halványodás jelenleg is tart, és az objektum valószínűleg nem fog visszatérni a kitörés előtti állapotba 2011 előtt. A halványodás üteme egyre csökken és gyakorlatilag hullámhosszfüggetlen.

- (2) Elemeztem az OO Ser fizikai paramétereit és fejlődési állapotát. A spektrális energiaeloszlása és bolometrikus hőmérséklete alapján az OO Ser egy korai 1. osztályú objektumnak tűnik, kora $< 10^5$ év. A kitörés időtartama (legalább 16 év) és a viszonylag kis luminozitás ($4.5 L_{\odot}$ a kitörés előtt, $\approx 31 L_{\odot}$ a legnagyobb fényesség idején) arra utal, hogy az objektum mind a FUoroktól, mind az EXoroktól különbözik, és inkább a V1647 Ori-val mutat hasonlóságokat.
- (3) A rendelkezésre álló mérési adatokat összehasonlítottam a fiatal eruptív csillagok általánosan elterjedt modelljével (Bell et al. 1995) és azt találtam, hogy az OO Ser-t valószínűleg egy akkréciós korong és sűrű burok veszi körül. Ezt a képet az is alátámasztja, hogy a halványodás hullámhosszfüggetlen. A fényváltozások időskálája azonban rövidebb, mint a FUoroknál szokásos. Ezért a FUor-modellek csak akkor alkalmazhatók az OO Ser-re is, ha a korong viszkozitása egy nagyságrenddel nagyobb, mint a FUoroknál szokásos érték.

Kapcsolódó publikáció: Kóspál et al., 2007, A&A 470, 211–219

A V1647 Ori 2004 és 2006 közötti kitörése és környezete

- (4) Hozzájárultam a V1647 Ori optikai monitorozásához, és megvizsgáltam a központi forrás és az azt körülvevő köd fényességének változásait és színét. Eredményeim:

4/1 A V1647 Ori a nyugalmi fényességéhez képest több mint 4 magnitúdóval fényesebb volt mintegy két éven keresztül. Ezután a csillag gyors halványodásba kezdett 2005 októberében, melyről a Kóspál et al. (2005, IBVS 5661, 1) cikkben elsőként számoltam be.

- 4/2 Kiszámítottam a központi csillag és a reflexiós köd bizonyos pontjainak fényessége közti időeltolódást, amiből megállapítottam a köd tengelye és a látóirány által bezárt szöget (61°).
- 4/3 A V1647 Ori körülötti köd J–H és H–K_S színtérképeiből egy csillagkörüli burok jelenlétére következtettem, melynek legnagyobb kiterjedése $\approx 18''$ (0,03 pc).
- (5) A kitörés különböző fázisaiban felvett optikai és közeli-infravörös spektrumaink felhasználásával megvizsgáltam számos színekpvonal időfejlődését. A hidrogén vonalainak fluxusa folyamatos csökkenést mutatott, amit úgy lehet értelmezni, hogy az akkréciós ráta közelítőleg egy nagyságrenddel csökkent a maximális fényesség és a nyugalmi állapot közt. Érdekes eredmény, hogy az CO 2,2 μm -es emissziója a kitörés során végig észlelhető volt, a nyugalmi spektrumban azonban nincs jelen.
- (6) A V1647 Ori megfigyelt tulajdonságait összehasonlítottam a Bell et al. (1995) cikkben közölt termális instabilitási modellel, és azt találtam, hogy a modell a legtöbb megfigyelést jól visszaadja, ha a korong viszkozitását egy nagyságrenddel nagyobbra állítjuk. Elképzelhetőnek tartom, hogy a V1647 Ori a fiatal eruptív csillagok egy új osztályába tartozik, melyet a viszonylag rövid kitörési időskála, ismétlődő kitörések, a bolometrikus luminozitás mérsékelt növekedése és a tipikus FUoroknál korábbi fejlődési állapot jellemez.

Kapcsolódó publikációk: Kóspál et al., 2005, IBVS 5661, 1–4; Acosta-Pulido et al., 2007, AJ 133, 2020–2036

Megjegyzés: Az Acosta-Pulido et al. (2007) cikkben szereplő eredmények javarésze a társ-szerzők közös munkája nyomán jött létre és az egyes szerzők részmunkái közt nagyon nehéz pontos határvonalat húzni. A dolgozatban és a tézisek között csak azokat az eredményeket emeltem ki, amelyek kimunkálásában jelentős szerepet játszottam.

A Parsamian 21 nagyfelbontású polarimetriás mérései

- (7) Optikai és közeli-infravörös szín-szín diagramokon tanulmányoztam a Parsamian 21 környezetében található csillagokat, és megállapítottam, hogy – sok más FUorral ellentétben – a csillag meglehetősen izolált, nem tagja semmilyen fiatal csillaghalmaznak. Nem találtam olyan közeli kísérőt sem, amely kitörést idézhetett volna elő.

- (8) A közvetlen és polarimetriás méréseink azt bizonyítják, hogy a csillagot egy burok veszi körül, melyen a csillag pólusai irányában nyílás van, továbbá egy éléről látott csillagkörüli korong is jelen van a rendszerben. A korong laposnak tűnik, belső sugara legfeljebb 48 cs.e., külső sugara pedig 360 cs.e. A korong meglepően vékony, legfeljebb 80 cs.e. a vastagsága, síkja legfeljebb 6° -ot zár be a látóiránnyal.
- (9) A Quanz et al. (2007, ApJ 668, 359) és Green et al. (2006, ApJ 648, 1099) által FUorokra kidolgozott fejlődési sorozatban a Parsamian 21-et egy középkorú FUorként osztályoztam. Erre utal a gyenge $10\ \mu\text{m}$ -es szilikát emisszió, a burok 60° -os nyílásszöge, továbbá a spektrális energiaeloszlás alakja és a bolometrikus hőmérséklet, mely az 1. és 2. osztály közti átmeneti objektumokra jellemző.

Kapcsolódó publikáció: Kóspál et al., 2008, MNRAS 383, 1015–1028

5. Következtetések

A dolgozat jól mutatja, hogy a több időpontban, több hullámhosszon, illetve a nagy térbeli felbontással végzett vizsgálatok nemcsak hogy kivitelezhetőek, hanem nagyon fontosak is a fiatal kitörő csillagok kutatásában. A különböző műszerekkel, különböző időpontokban végzett mérések együttes használata nagy körültekintést és a műszereffektusok alapos ismeretét kívánja. A szokásostól eltérő mérési módszerekkel nyert adatok (pl. a differenciális polarimetria) feldolgozása is odafigyelést igényel. Mindezen munka elvégzése azonban megéri a fáradságot, hiszen az eredmények segítségével olyan ismeretekre tehetünk szert, amelyek semmilyen más, hagyományos módszerrel nem hozzáférhetőek.

Az OO Ser-rel, a V1647 Ori-val és a Parsamian 21-gyel kapcsolatos megfigyelési anyag általános egyezést mutat a FUorok szokásos modelljével. Az OO Ser és a V1647 Ori fénygörbéje konzisztens Bell et al. (1995) cikkében leírt kitörési modellel. A modellben feltételezett geometria (amely egy központi csillagból, egy akkréciós korongból és egy csillagkörüli burokból áll) szintén konzisztens a három vizsgált objektum spektrális energiaeloszlásával, továbbá a Parsamian 21 polarimetriás felvételein megfigyelt csillagkörüli anyageloszlással is.

Vizsgálatom különbségeket is felfedezett a három vizsgált csillag közt, ezzel is alátámasztva azt a korábbi sejtést, hogy a FUorok csoportja nagyon inhomogén. Lehetséges, hogy folytonos átmenet van a fiatal eruptív csillagok két csoportja, a FUorok és EXorok közt, és az OO Ser

és a V1647 Ori a két csoport közti átmenetet képviseli. Ma még messze vagyunk attól, hogy egységes képünk legyen a fősorozat előtti fejlődés során fellépő eruptív jelenségekről. Ígéretes kutatási koncepciónak tűnik azonban az, hogy az egyes objektumok közti különbségeket a különböző evolúciós állapot magyarázza.

6. A tézispontok alapjául szolgáló publikációk

- (1) Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Apai, D.; Ardila, D. R.; Grady, C. A.; Henning, Th.; Juhász, A.; Miller, D. W.; Moór, A.: *High-resolution polarimetry of Parsamian 21: revealing the structure of an edge-on FU Ori disc*, 2008, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **383**, 1015–1028.
- (2) Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Prusti, T.; Acosta-Pulido, J.; Hony, S.; Moór, A.; Siebenmorgen, R.: *The outburst of the eruptive young star OO Serpentis between 1995 and 2006*, 2007, Astronomy and Astrophysics, **470**, 211–219
- (3) Acosta-Pulido, J. A.; Kun, M.; Ábrahám, P.; Kóspál, Á.; Csizmadia, Sz.; Kiss, L. L.; Moór, A.; Szabados, L.; Benkő, J. M.; Delgado, R. Barrena; Charcos-Llorens, M.; Eredics, M.; Kiss, Z. T.; Manchado, A.; Rácz, M.; Almeida, C. Ramos; Székely, P.; Vidal-Núñez, M. J.: *The 2004-2006 Outburst and Environment of V1647 Ori*, 2007, The Astronomical Journal, **133**, 2020–2036.
- (4) Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Acosta-Pulido, J.; Csizmadia, Sz.; Eredics, M.; Kun, M.; Rácz, M.: *The rapid fading of V1647 Orionis: the sudden end of a FUor-type eruption?*, 2005, Information Bulletin on Variable Stars, **5661**, 1–4.

7. A értekezés témájában megjelent további publikációk

- (1) Kóspál, Á.; Németh, P.; Ábrahám, P.; Kun, M.; Henden, A.; Jones, A. F.: *The Extreme Outburst of EX Lup in 2008: Optical Spectra and Light Curve*, 2008, Information Bulletin on Variable Stars, **5819**, 1–4
- (2) Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Ardila, D.: *Long-term Infrared Variability of FU Ori and EX Lup-type Stars*, 2007, 2007 AAS/AAPT Joint Meeting, American Astronomical Society

- (3) Kóspál, Á.; Apai, D.; Ábrahám, P.: *Parsamian 21: a FUor surrounded by an edge-on disc*, 2006, Proceedings of the 4th Workshop of Young Researchers in Astronomy & Astrophysics; Budapest, Hungary, 11-13 January, 2006; Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University (PADEU), Edited by E. Forgács-Dajka, **17**, 141–147
- (4) van Boekel, R.; Ábrahám, P.; Correia, S.; de Koter, A.; Dominik, C.; Dutrey, A.; Henning, Th.; Kóspál, Á.; Lachaume, R.; Leinert, Ch.; Linz, H.; Min, M.; Mosoni, L.; Preibisch, Th.; Quanz, S.; Ratzka, Th.; Schegerer, A.; Waters, R.; Wolf, S.; Zinnecker, H.: *Disks around young stars with VLTI/MIDI*, 2006, Advances in Stellar Interferometry. Edited by John D. Monnier; Markus Schöller; William C. Danchi. Proceedings of the SPIE, **6268**, 62680D
- (5) Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Prusti, T.; Siebenmorgen, R.; Acosta-Pulido, J.; Moór, A.: *Infrared Monitoring of the Outburst of OO Serpentis*, 2006, Astrophysics of Variable Stars, Pécs, Hungary, 5-10 September 2005, C. Sterken and C. Aerts (eds). ASP Conference Series, **349**, 269–272. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific.
- (6) Ábrahám, P.; Mosoni, L.; Henning, Th.; Kóspál, Á.; Leinert, Ch.; Quanz, S. P.; Ratzka, Th.: *First AU-scale observations of V1647 Orionis with VLTI/MIDI*, 2006, Astronomy and Astrophysics, **449**, L13–L16
- (7) Kóspál, Á.; Apai, D.; Ábrahám, P.: *Parsamian 21: High-Contrast Infrared Mapping of an Edge-on FUor Disc*, 2006, Visions for Infrared Astronomy, Instrumentation, Measure, Métrologie, **6/1-4**, 181–186, Proc. of the Conference held in Paris, March 20-22, 2006. Publisher: Lavoisier
- (8) Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Prusti, T.; Acosta-Pulido, J.: *OO Serpentis, an Intermediate Object between FUors and EXors?*, 2006, Visions for Infrared Astronomy, Instrumentation, Measure, Métrologie, **6/1-4**, 87–90, Proc. of the Conference held in Paris, March 20-22, 2006. Publisher: Lavoisier

- (9) Ábrahám, P.; Csengeri, T.; Juhász, A.; Kóspál, Á.: *Infrared Variability as a New Possibility to Explore Circumstellar Disk Structure*, 2006, Visions for Infrared Astronomy, Instrumentation, Measurement, Métrologie, **6/1-4**, 79–82, Proc. of the Conference held in Paris, March 20-22, 2006. Publisher: Lavoisier
- (10) Kóspál, Á.; Csizmadia, S.; Eredics, M.; Kun, M.; Rácz, M.: *V1647 Orionis*, 2005, Central Bureau Electronic Telegrams, **308**, 1. Edited by D. W. E. Green
- (11) Mosoni, L.; Ratzka, T.; Ábrahám, P.; Kóspál, Á.; Henning, Th.: *First AU-scale observations of V1647 Ori: The outbursting young star in the McNeil's Nebula*, 2005, Astron. Nachr., **326**, 565–565
- (12) Ábrahám, P.; Kóspál, Á.; Csizmadia, Sz.; Kun, M.; Moór, A.; Prusti, T.: *Long-term evolution of FU Orionis objects at infrared wavelengths*, 2004, Astronomy and Astrophysics, **428**, 89–97
- (13) Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Kun, M.; Csizmadia, Sz.; Verdugo, E.: *Long-Term Evolution of FU Ori-Type Stars at Infrared Wavelengths*, 2004, Astrophysics and Space Science, **292**, 547–551
- (14) Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Csizmadia, Sz.; Kun, M.; Moór, A.; Prusti, T.: *The long-term evolution of 7 FU Orionis-type stars at infrared wavelengths*, 2004, Proceedings of the 3rd Workshop of Young Researchers in Astronomy & Astrophysics; Hungary, 3-7 February 2004; Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University (PADEU), Edited by E. Forgács-Dajka, K. Petrovay and R. Erdélyi, **14**, 119–125
- (15) Ábrahám, P.; Kóspál, Á.; Csizmadia, Sz.; Moór, A.; Kun, M.; Stringfellow, G.: *The infrared properties of the new outburst star IRAS 05436-0007 in quiescent phase*, 2004, Astronomy and Astrophysics, **419**, L39–L42
- (16) Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Csizmadia, Sz.: *Long-Term Evolution of FU Ori Type Stars at Infrared wavelengths*, 2004, Baltic Astronomy, **13**, 518–521