

Kóspál Ágnes

Fiatal eruptív csillagok és szerepük a csillagkeletkezésben

MTA doktori értekezés tézisei

Budapest, 2017

1. A kutatások előzménye

A Föld és a Nap keletkezése egyike az emberiség legősibb talányainak. Ugyanakkor a Naprendszer, és általában a csillagok körüli bolygórendszerek keletkezése a modern asztrofizikának is az egyik fő kutatási területe. A téma fontosságát jelzi, hogy a legnagyobb távcsövek és legkifinomultabb műszerek építését ma is gyakran a csillag- és bolygókeletkezés nyitott kérdései motiválják. Ma már tudjuk, hogy a Nap mintegy 4,6 milliárd éve keletkezett, így erről a folyamatról csak közvetett úton szerezhetünk információt. Egy másik, kézenfekvő lehetőség a jelenleg születő csillagok vizsgálata. A Naphoz hasonló csillagok keletkezéséről a legtöbb adatunk a Gould-övben található közeli csillagkeletkezési területekről származik.

Mai tudásunk szerint a csillagok keletkezése a csillagközi anyag legsűrűbb felhőcsomóinak gravitációs összeomlásával kezdődik. A felhőmag közepén létrejön a protocsillag, a környező anyag pedig a perdületmegmaradás miatt egy lapult csillagkörüli korongot alkot. Kezdetben egy burok formájában az egész rendszert még körülveszi a felhőmag maradéka is. A protocsillag a korongból tovább gyűjti magába az anyagot, ezt a folyamatot hívjuk tömegbefogásnak vagy akkrécióknak, a burok pedig anyagbehullás révén pótolja a korong anyagát. A korongban közben összeállnak a planetézimálok és bolygók is. Néhány millió év után a burok és a korong anyagának elfogyásával a behullás és az akkréció leáll, a maradék anyag széteszik, és a bolygórendszerrel körülvelt csillag megkezdí évmilliárdokig tartó fősorozati életét. Ilyenkor a csillag körül még létrejöhet a planetézimálok ütközése és széttöredezése nyomán egy törmelékkorong.

A csillagkeletkezésnek tehát nagyon lényeges lépése az akkréció, azaz a korongról a csillagra való tömegátadás. Ez a folyamat nem egyenletes, hanem ingadozik, melynek következménye a fiatal csillagok jól ismert változékonysága. A legszélsőségesebb fényváltozásokat az FU Orionis és EX Lupi típusú fiatal csillagokban (FUorok és EXorok) láthatjuk, amelyek az akkréció ütemének több nagyságrenddel való gyors megnövekedése miatt akár százszoros kifényesedéseket is mutatnak. Az akkréciós ráta megemelkedésének fizikai mechanizmusa ezekben a rendszerekben nem teljesen ismert, annak ellenére, hogy ma már több tucat ilyen kitörést megfigyeltek, és felismerték a kitörések csillag- és bolygókeletkezésre kifejtett lényeges hatását is.

A fősorozat előtti csillagok kutatásának több évtizedes előzményei vannak az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézetében (CSFK CSI). Kezdetben ezek statisztikai jellegű vizsgálatok voltak, főleg optikai hullámhosszakon, a piszkéstartói Schmidt-távcső méréseit felhasználva, melynek segítségével hatékonyan lehetett egész csillagkeletkezési területekről fotometriai és $H\alpha$ -felméréseket készíteni. Később a CSI-ben és az ELTE-n dolgozó kutatók bekapcsolódtak az infravörös űrcsillagászati vizsgálatokba is az Infrared Astronomical Satellite (*IRAS*), Infrared Space Observatory (*ISO*) és *Herschel* űrtávcsövek segítségével, amelyekkel egyedi fiatal csillagok mélyrehatóbb vizsgálata is elvégezhető volt. Az űrműszerek kalibrációjában való részvétel révén komoly technikai tudás gyűlt össze. Az infravörös mérésekkel közvetlenül a csillagkörüli korongok és burkok termikus sugárzását figyelhetjük meg, így e téma természetes folytatása volt a lehető legjobb térbeli felbontást biztosító interferométerek, elsősorban az Európai Déli Obszervatórium (ESO) chilei Very Large Telescope-ján (VLT) található MIDI műszer használata is, mellyel kapcsolatban szintén sok tapasztalat gyűlt össze a CSI-ben. Ezzel egyidejűleg sok más ESO-műszer használata is rutinszerűvé vált. Közben folyamatos volt a piszkéstartói távcsövek használata is, hiszen a fiatal csillagok

hosszútávú monitorozásával és változékonyságuk vizsgálatával szintén következtetni lehetett a csillagközi anyag szerkezetére.

A változatos műszerek sokoldalú vizsgálatokat tettek lehetővé, amelynek köszönhetően mind a fiatal csillagok körüli protoplanetáris korongok, mind a fősorozati csillagok körüli törmelékcorongok kutatása a magyar csillagászat egyik legsikeresebb területévé vált. E területen belül a magyar kutatók a fiatal eruptív csillagok témájában is nemzetközi elismertséget szereztek. Én magam is ezen a területen kezdtem el dolgozni 2003-ban: a diplomamunkámban FUor és EXor típusú csillagok hosszútávú időfejlődését vizsgáltam az *ISO* űrtávcső adatai segítségével, míg a doktori disszertációmban három fiatal eruptív csillag részletes vizsgálatát végeztem el a legmodernebb optikai és infravörös mérések felhasználásával. Többéves külföldi kutatómunka után, melynek során a milliméteres és rádiócsillagászatba is beletanultam, az MTA Lendület-programjának köszönhetően tértem haza Magyarországra. A Lendület-projektem egyik altémája szintén a fiatal eruptív csillagok vizsgálata volt. Ennek egyik maradandó hozadéka lett a milliméteres interferometria (NORthern Extended Millimeter Array azaz NOEMA és Atacama Large Millimeter/submillimeter Array azaz ALMA rádióantenna-rendszerek) használatának meghonosítása a magyar csillagászatban. A Lendület keretében végzett munka, és a felmerült újabb kérdések és kihívások adták az alapját az eruptív jelenség megértését célzó sikeres ERC Starting Grant pályázatnak.

A korábbiakban az én PhD disszertáción kívül két olyan dolgozatot nyújtottak be magyar kollégák, ahol a vizsgált objektumok listája részben vagy egészen fiatal eruptív csillagokból állt:

- Ábrahám Péter MTA doktori értekezése „Korongok a csillagfejlődés során: a korai anyagbefogástól az állatövi fényig” címmel (2008). Ebben a dolgozatban szó van a V1647 Ori részletes vizsgálatáról, néhány FUor típusú csillag (többek közt a V346 Nor) infravörös fényváltozásairól, valamint a fiatal csillagok közép-infravörös színeképtárazában is szerepel két fiatal eruptív csillag, a Reipurth 50 és az EX Lup. A V346 Normaeről szól az én 11. és 12. tézispontom, de ezek új vizsgálatokon alapulnak és nem fednek át a korábbi disszertációval. A Reipurth 50-re és az EX Lupira én új eredményeket mutatok az 1., 2., 3., 4. és 9. tézispontban, amelyek szintén nem fednek át Ábrahám Péter disszertációjával.
- Sipos Nikoletta PhD disszertációja „The circumstellar environment of eruptive young stars” címmel (ELTE, 2012). Ez a doktori dolgozat az EX Lup és a V1647 Ori nevű fiatal eruptív csillagról szól. Az EX Lupival kapcsolatos eredményeket én az 1. tézispontomban meghivatkozom, és használom a kitörésről alkotott teljes kép kialakításához.

Az én PhD disszertációm „An Infrared and Optical View of Young Eruptive Stars” címmel (ELTE, 2009) három fiatal eruptív csillag, az OO Ser, a V1647 Ori és a Parsamian 21 részletes vizsgálatát mutatja be. A jelen disszertáció és a PhD dolgozatom közt átfedés nincs, mivel a jelen műben az OO Serre és a Parsamian 21-re új, 2014-ben felvett milliméteres észlelések analízisét mutatom be a 9. tézispontban, tehát a jelen munka új eredményeken alapul. A PhD fokozatszerzésem óta eltelt nyolc évben magyar és külföldi kollégákkal együttműködésben számos kutatási projektet végeztünk fiatal eruptív csillagokra, amelyek többségében vezetőként vagy együttműködőként magam is részt vettem. A jelen dolgozat ezekről az eredményekről ad részletes magyar nyelvű beszámolót, egyben ez a fősorozat előtti csillagokban megfigyelhető eruptív jelenségeket célzottan vizsgáló első MTA doktori értekezés.

2. Célkitűzések

A FUorok osztályát 1977-ben George Herbig három klasszikus példa, az FU Ori, a V1057 Cyg és a V1515 Cyg alapján definiálta, míg az EXorok osztályának az EX Lup, a VY Tau és az UZ Tau E szolgált mintapéldányként. Amatőr csillagászok hozzájárulása nyomán és az egyre szaporodó monitorozó égboltfelméréseknek köszönhetően jelenleg már több tucat olyan fiatal csillagot ismerünk, amelyek akkréciós kitörés miatt több magnitúdós optikai vagy infravörös kifényesedést mutattak. A fiatal csillagok számának és a kitörések időskálájának ismeretében nem lehetetlen, hogy minden Naphoz hasonló kis tömegű csillag átmegy a kialakulása során ilyen megnövekedett akkréciós fázison. Ezt az is alátámasztja, hogy nyugalomban, kitörés előtt ezeket a csillagokat jellemzően semmi nem különbözteti meg a többi kis tömegű fősorozat előtti csillagtól. Ha ez így van, akkor a fiatal eruptív csillagok kutatása nem egy speciális, különleges objektumcsoport öncélú vizsgálata, hanem egy központi jelentőségű szakterület, amely választ adhat olyan alapvető kérdésekre, mint hogy milyen időskálán épül fel a fiatal csillag, miként oszlik szét a csillagkörüli burok, miért olyan a korongok anyagi összetétele, mint amit megfigyelünk, és ez hogyan befolyásolja a korongban létrejövő bolygók összetételét.

A fiatal eruptív csillagok kapcsán több más nyitott kérdés is van. Jelenleg is vitatott, hogy mi okozza ezekben a rendszerekben az akkréciós ráta hirtelen megnövekedését. Erre különféle elméletek vannak az szakirodalomban, a termikus instabilitástól kezdve a gravitációs fragmentáción keresztül a kísérő által okozott perturbációig. Ahhoz, hogy ezek között döntenünk tudjunk, meg kell vizsgálni a csillagkörüli anyag hőmérséklet- és tömegeloszlását, és közeli kísérőket kell keresni. Nem nyilvánvaló az a kérdés sem, hogy milyen változásokat okoz a megnövekedett akkréció és az ezzel járó luminozitásnövekedés a csillagkörüli anyag szerkezetében és anyagi összetételében. Ehhez feltétlenül szükséges a kitörésbeli és a kitörés előtti állapot összehasonlítása. Nem egyértelmű az sem, hogy milyen szerepe van a kitörésekben a buroknak, van-e egyáltalán minden fiatal eruptív csillagnak burka, és arról hogyan áramlik az anyag befelé. Ehhez olyan érzékeny mérések kellenek, amelyek képesek detektálni a halvány burkokat, és olyan jó térbeli és spektrális felbontás, amely lehetővé teszi a csillagkörüli gázanyag mozgásának vizsgálatát is.

A jelen dolgozat célja, hogy a rendelkezésre álló legmodernebb műszerek használatával, új mérések elvégzésével minél több információt szerezzünk a fiatal eruptív csillagokról, hogy ezzel is közelebb jussunk a fenti kérdések megválaszolásához. Ennek egyik módja az, hogy az adott csillagtípus névadó objektumát minél több oldalról, minél több hullámhosszon, minél több különböző technikával megvizsgáljuk, és ezáltal információt szerezzünk arról, milyen a szerkezete és felépítése a prototípus rendszereknek különböző térbeli skálákon, a csillag felszínétől a korongon keresztül az esetleges burokig. Erre nyújt példát az EX Lup részletes vizsgálata az 1 – 4. tézispontokban. Az utóbbi években újonnan kitört fiatal csillagok esetében a korábbi égfelméréseknek köszönhetően elegendő archív adat áll rendelkezésre ahhoz, hogy részletesen megvizsgálhassunk nyugalmi állapotukat, és új mérések segítségével nyomon kövessük, milyen változások történtek a csillagkörüli anyagban a kitörés hatására és azt követően. Erre mutat példát a V2492 Cyg, HBC 722, V960 Mon, V582 Aur és V346 Nor vizsgálata az 5 – 8. és 11. tézispontokban. Egy másik vizsgálati módszerünk az, hogy egy adott hullámhosszon, egy adott technikával homogén felmérést készítünk a fiatal eruptív csillagok lehető legteljesebb mintájáról, és ebből próbálunk a csoportra általános következtetéseket levonni. A 9 – 10. és 12. tézispont arra mutat példát, mit tanulhatunk a csillagkörüli anyag szerkezetéről és kinematikájáról nagyobb milliméteres felmérésekből.

3. Vizsgálati módszerek

A csillagkörüli anyagban változatos sűrűségű és hőmérsékletű területek találhatók. Ennek megfelelően különböző hullámhosszakon és különféle technikákkal végzett mérésekkel a rendszer különböző részeiről szerezhetünk információt. A legrövidebb, optikai és közeli infravörös hullámhosszakon a központi csillagot és a korong felszínéről szóródó fényt láthatjuk. A hőmérséklet-gradiens miatt a közép infravörös tartományban a korong belső, melegebb részei sugároznak, távoli infravörösben és (szub)milliméteres hullámhosszakon pedig a külső, hidegebb régiók. A csillagkörüli poranyagból a Planck-törvénynek megfelelő kontinuum sugárzás származik, míg a gázanyag elsősorban a benne található atomok és molekulák vonalaiban figyelhető meg. Ezekre mind szükség van ahhoz, hogy egy fiatal csillagról és környezetéről teljes képet alkothassunk.

Ennek megfelelően ebben a dolgozatban rendkívül változatos hullámhosszú és technikájú mérésekről lesz szó. Használtam kisebb földi telepítésű távcsövek szélessávú szűrővel készült optikai és infravörös fotometriai méréseit (pl. Piskéstető és a Teide Observatórium eszközei), a legnagyobb tükörátmérőjű teleszkópokat (VLT), amelyek az adaptív optikás technikának és más egyedülálló mérnöki fejlesztéseknek köszönhetően a Földről jelenleg elérhető legjobb térbeli és spektrális felbontást biztosítják, és olyan űrtávcsöves adatokat (*Spitzer*, *Herschel*), amelyek a földfelszínről elérhetetlen vagy csak nehezen és nagy bizonytalansággal mérhető hullámhossztartományokat is elérhetővé tették. Lesz szó interferometriás adatokról is (NOEMA, ALMA), melynek során több rádióantenna jelét összekapcsolva lényegében egy óriástávcsővel szerezünk információkat. A dolgozat különlegessége, hogy a világ minden tájáról (és még az űrből is) mintegy 20 különböző távcsőre nyertem távcsőidőt és kaptam adatokat, nem egyszer úgy, hogy a legkiválóbb szakemberek segítségével a helyszínen szerezhettem tapasztalatot a műszerek használatával és az adatfeldolgozással kapcsolatban.

Időben változó objektumokról lévén szó, fontos szerepe van a monitorozó programoknak, ahol mérések sorozatával követjük nyomon a rendszer változásait. A fotometriai adatokból készített szín-szín és szín-fényesség diagramok segítségével vizsgálhatjuk a színváltozásokat. Ezeket összevethetjük a vörösödési úttal vagy más fizikai jelenség által jósolt viselkedéssel. A spektrumokban azonosíthatjuk a színekp vonalakat, megmérhetjük az erősségüket vagy arányaikat, megvizsgálhatjuk a vonalprofilokat, és ezekből következtethetünk a vonalakat kibocsátó anyagban uralkodó fizikai körülményekre. Ha összeállítjuk egy adott rendszer optikai – milliméteres spektrális energiaszételását több időpontban, például a kitörés előtt és a kitörés közben, akkor tanulmányozható a kitörés során a csillagkörüli anyagban történt változások fizikai háttere, például hogyan változott az akkréció vagy az extinkció. A spektrális energiaszételésekhez illesztett analitikus korongmodellel pontosan nyomon követhető e paraméterek időfejlődése.

Az űrműszerek, a legnagyobb tükörátmérőjű távcsövek és legnagyobb bázisvonalú interferométerek azért lényegesek, mert nagy térbeli felbontású térképeket nyújtanak a por- és gázanyag eloszlásáról a fiatal csillagok környezetében. A Hubble-űrtávcsőnek köszönhetően az 1990-es években pillanthattuk meg először közvetlenül a csillagkörüli korongokat (pl. McCaughrean & O'Dell 1996, AJ, 111, 1977). Az azóta eltelt húsz év műszertechnikai fejlesztéseinek eredményeképpen ma már korábban elképzelhetetlenül apró részletek figyelhetők meg a csillagkörüli anyagban. Szinte hetente jelennek meg újabb publikációk látványos koncentrikus gyűrűket, spirálkarokat vagy más azimutális egyenetlenségeket tartalmazó korongokról, amelyekkel a fizikai magyarázathoz szükséges elméleti és numerikus modellezési háttér szinte alig tud lépést tartani.

4. Új tudományos eredmények

EX Lup: az EXor osztály prototípusa

1. Az EX Lup rendszer és a 2008-as extrém kitörés

Az EX Lup 2008-as kitörése során elsőként tanulmányoztam a rendszer optikai spektrumát, és megállapítottam, hogy azt ionizált fémvonalak dominálják, amely különbözik a normál T Tauri spektrumoktól, de még az EXorokon belül is extrém. További optikai és infravörös színeképek alapján azt találtam, hogy a kitörés a belső néhány tized CSE területre koncentrálódott, az anyagbehullás útja pedig alapvetően a magnetoszférikus akkréció, csak megnövekedett akkréciós rátával. A kitöréssel kapcsolatos saját és irodalmi eredményeket egy konzisztens képbe integráltam, és arra következtettem, hogy az EX Lup a legmegfelelőbb laboratórium az EXor-jelenség során zajló fizikai folyamatok megértésére.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények: [1], [2], [3], [4], [5]

2. Forró gáz az EX Lup körül a 2008-as kitörés során

Újonnan felvett közeli infravörös színeképek felhasználásával, azok spektro-asztrometriai vizsgálatával megállapítottam, hogy a kitörés során CO-gáz keringett a csillag körül a korong belső peremén vagy az akkréciós oszlopok külső részein. Ugyanerről a területről semleges atomi vonalak is származtak. A hidrogéngáz eloszlása és mozgása szintén akkréciós oszlopokra vagy korongszélre utal. Ez is alátámasztja, hogy az EX Lup kitörésben is magnetoszférikus akkréciót folytatott. A csillagkörüli anyag megfigyelt szerkezete és kinematikája konzisztensnek tűnik d'Angelo & Spruit (2010, MNRAS, 406, 1208) kitörés-elméletével.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemény: [6]

3. Radiális sebesség-változások az EX Lup-ban

Öt éven át tartó színeképi monitorozás segítségével 7,417 nap periodicitású, $2,2 \text{ km s}^{-1}$ félamplitúdójú radiális sebesség-változásokat fedeztem fel az EX Lupiban. Ellenőriztem, hogy egyik szokásos csillagaktivitás-indikátor sem periodikus, kivéve a keskeny emissziós vonalak radiális sebességét. Modellszámítások alapján kimutattam, hogy hideg vagy forró foltok nem tudják megmagyarázni a megfigyelt spektroszkópai és fotometriai változásokat. Két lehetséges magyarázatot vetettem fel: a csillaggal együtt forgó akkréciós oszlop(ok), vagy a csillag körül keringő közeli kísérő. Az utóbbi feltételezés esetében, a kísérő tömege $m_2 \sin i = 14,7 \text{ M}_{\text{Jup}}$, amely a legvalószínűbb inklinációval a barna törpe tartományba esik.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemény: [7]

4. Hideg molekuláris gáz az EX Lup korongjában

Új szubmilliméteres CO-vonalmérések segítségével megvizsgáltam az EX Lup hideg gázkorongjának alapvető tulajdonságait. A megfigyelt vonalak erősségét és alakját radiatívtranszfer-modellekkel reprodukáltam. A kapott paramétereket összehasonlítottam

más T Tauri korongok tulajdonságaival, és azt találtam, hogy az EX Lup korongja sokkal kisebb tömegű ($2,3 \times 10^{-4} M_{\odot}$), de csak mérsékelt (10–100-szoros) CO-kiürülést mutat.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemény: [8]

Újonnan kitört fiatal eruptív csillagok

5. A V2492 Cyg fiatal eruptív csillag körüli anyag szerkezete

5.1. Meghatároztam, hogy a V2492 Cyg kitörés előtt egy I. osztályú protocsillag volt, $14 L_{\odot}$ bolometrikus luminozitással és 280 K bolometrikus hőmérséklettel.

5.2. Több hullámhosszon való fotometriai monitorozás alapján megállapítottam, hogy az objektum nagy amplitúdójú fényváltozásokat mutat, amelyek mögött egyetlen fizikai mechanizmus, a változó látóirányú extinkció áll. Ennek magyarázatára egy, a belső korongban a csillagtól néhány tized CSE-re keringő, hosszú élettartamú porcsomót vettem fel, melynek tömege $10^{-10} M_{\odot}$.

5.3. A V2492 Cyg tágabb környezetének vizsgálatával megállapítottam, hogy egy sötét csillagközi felhő csúcsán helyezkedik el, melynek legsűrűbb részei 15 K hőmérsékletűek, és akár 30^m extinkciót is okozhatnak. Ebben a felhőben felfedeztem egy másik fiatal csillagot is, a HH 57 IRS-t.

5.4. A V2492 Cyg emissziós vonalakkal teli spektruma és hosszú (> 6 év) kitörése alapján megállapítottam, hogy az objektum nem illik sem az EXorok, sem a FUorok csoportjába, hanem inkább egy köztes állapotot képvisel.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények: [9], [10]

6. A HBC 722 fiatal eruptív csillag és környezete több hullámhosszon

6.1. Meghatároztam, hogy a HBC 722 kitörés előtt egy tipikus T Tauri csillag volt, $0,85 L_{\odot}$ bolometrikus luminozitással. Látható azonban némi infravörös többletsugárzás, ami arra utal, hogy már ekkor is vagy az akkréciós ráta, vagy a sugárzó terület viszonylag nagy volt.

6.2. Az optikai és infravörös fénygörbék akkrécióskorong-modellezésével megmutattam, hogy a kitörés elején megfigyelt több hónapos csúcsot a belső korongban felhalmozódott anyagnak a csillagra való gyors ráhullása okozta. Ezt egy monoton fényesedés követte, amelyet a növekvő akkréciós rátával és a sugárzó terület növekedésével magyaráztam, összhangban Bell et al. (1995, ApJ, 444, 376) modelljeivel.

6.3. Megvizsgáltam a HBC 722-t és a környezetében lévő forrásokat milliméteres kontinuum- és CO-vonalemisszióban. A HBC 722 korongját nem detektáltam kontinuumban, de elsőként sikerült CO-ban detektálni, amely alapján a csillagkörüli anyag teljes tömege kb. 1700 CSE-es skálán $0,03 M_{\odot}$. Feltérképeztem számos más molekula térbeli eloszlását is, amely alapján a HBC 722 és a szomszédos fiatal csillagok egy sűrű, hideg gázfelhőbe vannak ágyazva.

6.4. Az abszorpciós jellegű spektrumokból, továbbá a fénygörbék és spektrális energiaeloszlások alakjából arra következtettem, hogy a HBC 722 egy FUor, csak éppen jóval kisebb luminozitású és tömegű, mint a klasszikus FUorok. Az, hogy egy ilyen kis tömegű korong is kitörhet, arra utal, hogy az eruptív jelenség lehetséges a beágyazott

fázistól egészen a II. osztályú objektumokig, és hogy valószínűleg minden fiatal csillag átesik megnövekedett akkréciós időszakokon.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények: [9], [11]

7. A V960 Mon fiatal eruptív csillag és kitörése

7.1. Archív földi és űrcsillagászati adatok vizsgálatával elsőként határoztam meg a V960 Mon távolságát (450 pc). Ennek felhasználásával megállapítottam, hogy az objektum kitörés előtt egy átlagos T Tauri rendszer volt elhanyagolható vörösödéssel. A központi csillag egy 4000 K effektív hőmérsékletű, $0,75 M_{\odot}$ tömegű fiatal csillag, melyet $0,01 - 0,06 M_{\odot}$ anyag vesz körül. A rendszer bolometrikus luminozitása $4,8 L_{\odot}$, bolometrikus hőmérséklete pedig 1190 K, amely alapján a V960 Mon egy 6×10^5 év korú II. osztályú fiatal rendszer. Eredményeim arra utalnak, hogy az objektum egy idősebb FUor, viszonylag ritka burokkal, már közel a T Tauri állapothoz.

7.2. Optikai fotometriai mérésekkel monitoroztam a V960 Mon kitörést követő elhalványodását. A fénygörbékben felfedeztem egy 17,2 napos periódusú hullámhosszfüggetlen oszcillációt. Ennek magyarázatára felvettem azt a lehetőséget, hogy a rendszer közepén egy szoros kettőscsillag található, melynek keringése hatására periodikusan változik az akkréció.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények: [12], [13]

8. UXor a FUorok között: extinkciós fényváltozások a V582 Aur-ban

8.1. A Csillagászati Intézet archív fotolemezeinek vizsgálatával és irodalmi adatok segítségével meghatároztam, hogy a V582 Aur 1986 során tört ki. A kitörés előtti spektrális energiaeloszlás vizsgálata alapján azt javasoltam, hogy az objektum nyugalomban egy tipikus, nem túlságosan vörösödött T Tauri típusú csillag volt.

8.2. Új optikai és infravörös színeképek felvételével megerősítettem, hogy az objektum spektroszkópiailag a FUor típusú csillagok osztályába tartozik. Megvizsgáltam a kitörés során mért fénygörbékben látható két mély minimumot. Megállapítottam, hogy mindkét elhalványodást a csillag irányában tapasztalható megnövekedett extinkció okozta, amely ugyanakkor a szórt fény komponensét nem befolyásolta, éppúgy, ahogy az az UXor típusú változóknál szokásos. A minimumok magyarázatára egy porcsomót vetettem fel, amely a csillagtól 2,8 CSE-re kering, hossza a pálya mentén $\approx 3,5$ CSE, tömege pedig $0,004 M_{\oplus}$.

8.3. Milliméteres mérések segítségével detektáltam kontinuum- és CO-vonalemissziót a V582 Aur irányában, melyből a csillagkörüli korong tömegére $0,03 - 0,05 M_{\odot}$ -et határoztam meg. A rendszer tágabb környezetében több kontinuumforrást és $\approx 10\,000$ CSE-es skálán kiterjedt CO-emissziót találtam.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemény: [14]

A FUorok hideg környezete

9. Hideg molekuláris gáz a FUorok burkában

Milliméteres CO-mérések segítségével feltérképeztem nyolc déli és egyenlítői FUor burkát. Azt találtam, hogy a minta fele jelentős mennyiségű gázt tartalmaz ($>0,3 M_{\odot}$), míg a

másik felében mindössze $\leq 0.02 M_{\odot}$ csillagkörüli anyag található. Megállapítottam, hogy a nagyobb tömegű burkok melegebbek (> 40 K) és a CO-vonalak szélesebbek, míg az alacsony tömegű burkok jellemzően hidegebbek ($5 - 7$ K) és keskenyebb vonalakat mutatnak, vagy nem is detektálható a vonal a forrás irányában. Vizsgálataim alapján ez a felosztás jól egybevághat Quanz et al. (2007, ApJ, 668, 359) fejlődési sorrendjével, amely szerint a $10 \mu\text{m}$ -es abszorpciót mutató objektumok fiatalabbak, és még beágyazottak a sűrű burokbba, míg a szilikátemissziót mutató objektumok idősebbek, ritkább körülöttük a burok.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemény: [15]

10. Cygnus csillagképbeli FUorok milliméteres interferometriás mérései

Elsőként vizsgáltam meg milliméteres interferometriás mérések segítségével négy Cygnus-beli FUor burkának molekuláris gáztartalmát. Azt találtam, hogy a V1515 Cyg kivételével a kibocsátó terület mérete néhány ezer CSE-en belül van, ami összhangban van tipikus csillagkörüli burkok méretével. A V1515 Cyg esetében a ^{13}CO emisszió egybeesik a csillag körül látható kb. 20 000 CSE átmérőjű gyűrű alakú optikai reflexiós köddel. Megállapítottam, hogy a források irányában detektált ^{13}CO emisszió egy viszonylag kompakt, csillagkörüli burokból származik, kivéve a V1735 Cygnit, ahol valószínűleg egy kis előtérfelhő van jelen. A csillagkörüli anyag tömegére $0,06$ és $0,43 M_{\odot}$ közötti értékeket kaptam.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemény: [16]

A V346 Nor kitörése és környezete

11. A V346 Nor fiatal eruptív csillag fényváltozásainak fizikai háttere

11.1. Új mérésekkel és korábbi észlelések újrafeldolgozásával összeállítottam a V346 Nor jelű FUor típusú fiatal eruptív csillag $1,25 - 3,5 \mu\text{m}$ közötti fénygörbéit. Ebből megállapítottam, hogy a kitörés maximuma 1992-ben volt, és saját adatokkal megerősítettem, hogy 2010 – 2011-ben a fénygörbéken egy mély minimum látható. A minimumot követően az objektum újra fényesedni kezdett, de a legújabb méréseim azt mutatják, hogy a V346 Nor nem érte el a korábbi szintet, hanem jelenleg egy köztes fényességi állapotban stagnál.

11.2. A fénygörbék akkréciós korongmodellezésével megmutattam, hogy a kitörés maximumában az akkréciós ráta elérte a $10^{-4} M_{\odot}/\text{év}$ értéket. Megállapítottam, hogy míg a 2008 előtti kisebb fényváltozásokat az akkréciós ráta és a vörösödés korrelált változásai okozták, addig a mély minimum főleg az akkréciós ráta csökkenésének volt tulajdonítható. Mindezek arra utalnak, hogy a V346 Nor hasonló a fiatal eruptív csillagok egy mélyen beágyazott csoportjához, amelyekben akkréciós és extinkciós változások is zajlanak.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemény: [17]

12. Anyagáramlások a V346 Nor fiatal eruptív csillag környezetében

12.1. Nagy térbeli és spektrális felbontású milliméteres ALMA-észlelések segítségével feltérképeztem a V346 Nor környezetében a hideg por és CO-gáz emisszióját. A

poreloszlásban találtam egy fényes központi forrást, amely egybeesik a csillag pozíciójával, és amelynek tömege $7 \times 10^{-4} M_{\odot}$. Megfigyeltem továbbá halványabb kiterjedt emissziót is, amely valószínűleg a kifújás falait jelzi egészen 6300 CSE távolságig. A V346 Nor irányában mindhárom CO-izotópot, (^{12}CO , ^{13}CO és C^{18}O) detektáltam, és a vonalprofilok hasonlóak ahhoz, amit beágyazott protocsillagok körüli burkoknál szoktak észlelni. Megállapítottam, hogy a célpont sok tekintetben jól illeszkedik a 0/I. osztályú protocsillagok közé, tehát a V346 Nor a FUorok fiatal, beágyazott alcsoportjához tartozik.

12.2. Elvégeztem a C^{18}O adatok spektro-asztrometria analízisét, amelyből kiderült, hogy a sugárirányú sebességprofil 350-től 700 CSE-ig megfelel egy pszeudo-korongnak, míg a belső 350 CSE jobban hasonlít egy kepleri korongra. A kepleri profilból meghatároztam a központi csillag tömegét, amely $0,1 M_{\odot}$ -nek adódott. A teljes gáztömeg 350/700 CSE-en belül $0,01/0,03 M_{\odot}$. A csatornatérképeken nagy sebességeknél pedig olyan struktúrákat találtam, amelyek egy kifújás által vájt viszonylag keskeny üreg falaként értelmezhetők.

12.3. Meghatároztam a burokról a korongra való behullási rátát, ennek értéke $6 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{év}$. Ez magasabb, mint a korongról a csillagra való nyugalmi akkréciós ráta, ami arra utal, hogy a behullási ráta és az akkréciós ráta nem egyezik meg. Ez az első megfigyelési jelzés ilyen jellegű eltérésre egy FUorban. Ez azért fontos eredmény, mert ezzel az eltéréssel magyarázták korábban a szakirodalomban a FUor-kitöréseket.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemény: [18]

5. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

[1] Audard, M.; Ábrahám, P.; Dunham, M. M.; Green, J. D.; Grosso, N.; Hamaguchi, K.; Kastner, J. H.; Kóspál, Á.; Lodato, G.; Romanova, M. M.; Skinner, S. L.; Vorobyov, E. I.; Zhu, Z.: *Episodic Accretion in Young Stars*, 2014, Protostars and Planets VI, Henrik Beuther, Ralf S. Klessen, Cornelis P. Dullemond, and Thomas Henning (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 387

[2] Kóspál, Á.: *My favorite object: EX Lupi*, 2015, Star Formation Newsletter, 269, 8, <http://www.ifa.hawaii.edu/~reipurth/newsletter/newsletter269.pdf>

[3] 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, IBVS, 5819, #1

[4] Goto, M.; Regály, Zs.; Dullemond, C. P.; van den Ancker, M.; Brown, J. M.; Carmona, A.; Pontoppidan, K.; Ábrahám, P.; Blake, G. A.; Fedele, D.; Henning, Th.; Juhász, A.; Kóspál, Á.; Mosoni, L.; Sicilia-Aguilar, A.; Terada, H.; van Boekel, R.; van Dishoeck, E. F.; Usuda, T.: *Fundamental Vibrational Transition of CO During the Outburst of EX Lupi in 2008*, 2011, ApJ, 728, 5

[5] Sicilia-Aguilar, A.; Kóspál, Á.; Setiawan, J.; Ábrahám, P.; Dullemond, C. P.; Eiroa, C.; Goto, M.; Henning, Th.; Juhász, A.: *Optical spectroscopy of EX Lupi during quiescence and outburst. Infall, wind, and dynamics in the accretion flow*, 2012, A&A, 544, A93

[6] Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Goto, M.; Regály, Zs.; Dullemond, C. P.; Henning, Th.; Juhász, A.; Sicilia-Aguilar, A.; van den Ancker, M.: *Near-infrared Spectroscopy of EX Lupi in Outburst*, 2011, ApJ, 736, 72

- [7] Kóspál, Á.; Mohler-Fischer, M.; Sicilia-Aguilar, A.; Ábrahám, P.; Curé, M.; Henning, Th.; Kiss, Cs.; Launhardt, R.; Moór, A.; Müller, A.: *Radial velocity variations in the young eruptive star EX Lupi*, 2014, A&A, 561, A61
- [8] Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Csengeri, T.; Gorti, U.; Henning, Th.; Moór, A.; Semenov, D. A.; Szűcs, L.; Güsten, R.: *Cold CO Gas in the Disk of the Young Eruptive Star EX Lup*, 2016, ApJL, 821, L4
- [9] Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Acosta-Pulido, J. A.; Arévalo Morales, M. J.; Carnerero, M. I.; Elek, E.; Kelemen, J.; Kun, M.; Pál, A.; Szakáts, R.; Vida, K.: *The outburst and nature of two young eruptive stars in the North America/Pelican Nebula Complex*, 2011, A&A, 527, A133
- [10] Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Acosta-Pulido, J. A.; Arévalo Morales, M. J.; Balog, Z.; Carnerero, M. I.; Szegedi-Elek, E.; Farkas, A.; Henning, Th.; Kelemen, J.; Kovács, T.; Kun, M.; Marton, G.; Mészáros, Sz.; Moór, A.; Pál, A.; Sárneczky, K.; Szakáts, R.; Szalai, N.; Szing, A.; Tóth, I.; Turner, N. J.; Vida, K.: *Exploring the circumstellar environment of the young eruptive star V2492 Cygni*, 2013, A&A, 551, A62
- [11] Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Acosta-Pulido, J. A.; Dunham, M. M.; García-Álvarez, D.; Hogerheijde, M. R.; Kun, M.; Moór, A.; Farkas, A.; Hajdu, G.; Hodosán, G.; Kovács, T.; Kriskovics, L.; Marton, G.; Molnár, L.; Pál, A.; Sárneczky, K.; Sódor, Á.; Szakáts, R.; Szalai, T.; Szegedi-Elek, E.; Szing, A.; Tóth, I.; Vida, K.; Vinkó, J.: *Multiwavelength study of the low-luminosity outbursting young star HBC 722*, 2016, A&A, 596, A52
- [12] Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Moór, A.; Haas, M.; Chini, R.; Hackstein, M.: *The Progenitor of the FUor-Type Young Eruptive Star 2MASS J06593158-0405277*, 2015, ApJL, 801, L5
- [13] Hackstein, M.; Haas, M.; Kóspál, Á.; Hamsch, F.-J.; Chini, R.; Ábrahám, P.; Moór, A.; Pozo Nuñez, F.; Ramolla, M.; Westhues, Ch.; Kaderhandt, L.; Fein, Ch.; Barr Domínguez, A.; Hodapp, K.-W.: *Light curves of the latest FUor: Indication of a close binary*, 2015, A&A, 582, L12
- [14] Ábrahám, P.; Kóspál, Á.; Kun, M.; Fehér, O.; Zsidi, G.; Acosta-Pulido, J. A.; Carnerero, M. I.; García-Álvarez, D.; Cseh, B.; Moór, A.; Hajdu, G.; Hanyecz, O.; Kelemen, J.; Kriskovics, L.; Marton, G.; Mező, Gy.; Molnár, L.; Ordasi, A.; Rodríguez-Coira, G.; Sárneczky, K.; Sódor, Á.; Szakáts, R.; Szegedi-Elek, E.; Szing, A.; Farkas-Takács, A.; Vida, K.; Vinkó, J.: *An UXor among FUors: extinction related brightness variations of the young eruptive star V582 Aur*, 2017, közlésre elfogadva az ApJ-nél, <https://arxiv.org/abs/1712.04968>
- [15] Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Csengeri, T.; Henning, Th.; Moór, A.; Güsten, R.: *Cold CO Gas in the Envelopes of FU Orionis-type Young Eruptive Stars*, 2017, ApJ, 836, 226
- [16] Kóspál, Á.: *Millimeter interferometric observations of FU Orionis-type objects in Cygnus*, 2011, A&A, 535, A125
- [17] Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Westhues, Ch.; Haas, M.: *Brightness variations of the FUor-type eruptive star V346 Normae*, 2017, A&A, 597, L10
- [18] Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Csengeri, T.; Fehér, O.; Hogerheijde, M. R.; Brinch, Ch.; Dunham, M. M.; Vorobyov, E. I.; Salter, D. M.; Henning, Th.: *Mass Transport from the Envelope to the Disk of V346 Nor: A Case Study for the Luminosity Problem in an FUor-type Young Eruptive Star*, 2017, ApJ, 843, 45