

Az OTKA K81966 pályázat:

Protoplanetáris korongok fejlődése és a bolygókeletkezés körülményei különböző csillagkeletkezési környezetekben

záró szakmai beszámolója

Kutatásaink követték a szerződésben definiált irányt, de több részletben eltértünk az előre kitűzött céloktól. Az eltérések egyik oka, hogy 2010 szeptember 1-től Elek Elza PhD hallgató csatlakozott a projekthez. PhD témájának egyik része, az I. osztályú spektrális energiaeloszlású fiatal csillagok változásainak elemzése szerepelt a projekt kitűzött feladatai közt. Másik része, H α emissziós csillagok keresése és többhullámhosszú vizsgálata csillagkeletkezési régiókban, a University of Hawaii 2,2 m-es távcsövén kapott megfigyelési időre épült. Ez új lehetőség volt a tervekhez képest, ami beleillik a szerződésben vállalt kutatásokba. Eközben Balog Zoltán új kutatócsoportba került, ami szintén módosította a tervezett kutatásokat. A pizskés-tetői kifelbontású spektrográffal tervezett kutatásokat a távcső felújítása miatt előre nem látott akadályok hátráltatták: a műszert át is kell tervezni, így ez a program majd csak a távcső átadása után folytatható. A kért hat hónap hosszabbítás alatt az átépítendő műszerhez szükséges alkatrészeket sikerült beszereznünk. A műszer leírása és az első eredményekről tartott szemináriumi előadás prezentációja megtalálható a <http://www.konkoly.hu/staff/racz/Spectrograph/Medium-resolution.html> lapon. A *WISE* és a *Spitzer Enhanced Imaging Products* adatbázisok egymást követő verzióinak publikálása 2011 és 2013 közt minden folyamatban levő munkánkat kibővítette ezeknek az adatoknak a beépítésével és elemzésével. Ezért több tervezett publikációt nem fejeztünk be mostanáig.

Fiatal csillagok változékonysága mint korong-diagnosztikai eszköztár

Tizenkét I. osztályú és lapos spektrális energiaeloszlású fiatal csillag spektrális és fotometriai változásait követtük több éven át hazai és külföldi, földi és űreszközökkel. Az akkréciós korongon kívül e csillagok körül még megtalálhatók a protosztelláris burok maradványai. Optikai hullámhosszakon sok esetben csak a korongról szóródó fényt figyelhetünk meg. A megfigyelhető változások a csillag és a korong változékonny kölcsönhatásait tükrözik. A projekt végéig az alábbiakban felsorolt eredményeket publikáltuk referált folyóiratcikkekben. További vizsgált csillagokról Szegedi-Elek Elza posztert mutatott be 2013-ban a *Protostars and Planets VI* konferencián. Az eredmények Szegedi-Elek Elza 2014-ben benyújtott PhD dolgozatában is láthatók.

PV Cep: A PV Cep fényessége az I_c sávban 2005 és 2009 között mintegy 4 magnitúddal csökkent. Az akkréció-nyomjelző CaII emissziós vonalak luminozitásából számolt akkréciós ráták azt mutatják, hogy a PV Cep akkréciós luminozitása a fotoszféráival azonos nagyságrendű, és a vonalak fluxusváltozása szerint ebben az időszakban az akkréciós ráta csökkenése csak nagyjából 1 magnitúdó halványodásról adhat számot. A halványodás nagyobb része a cirkumsztelláris extinkció növekedésének eredménye. A változások időskálája kizárja, hogy a többlet-extinkciót a korong aszimmetriája vagy egyéb inhomogenitásai okozzák. Megmutattuk, hogy az extinkcióváltozás szorosan összefügg a változó akkrécióval: a centrális luminozitás és hőmérséklet esése miatt az akkréciós korong belső tartományainak hőmérséklete is lecsökkent, ezért por kondenzálódott ki benne. Az újonnan keletkezett por a többlet-extinkció forrása. Mivel a por szublimációs tartománya a csillag-korong-rendszer 2 mikronos többletsugárzásának fő forrása, a szublimációs sugar csökkenése a K_s magnitúdó esésében is tetten érhető (M. Kun, E. Szegedi-Elek, A. Moór, et al. 2011, MNRAS, 413, 2689).

[KOS94] HA11: A [KOS94] HA 11 Nap típusú fiatal csillag a Lynds 1340 molekulafelhőben. Az elmúlt másfél évtizedben néhány éves időskálájú, az I_c sávban 5–6 magnitúdós amplitúdójú változásokkal hívta fel magára a figyelmet. Fényességváltozásait a pizskés-tetői RCC, Schmidt és Cassegrain-távcsövekkel követtük. Színképi változásainak vizsgálatához a Calar Alto-i 2,2 m-es, a 2,5 m-es Nordic Optical Telescope és a William Herschel Telescope közepes felbontású spektrográfjaival, valamint a University of Hawaii 2,2-es m-es távcsövén működő WFGS2 rés nélküli spektrográffal gyűjtöttünk adatokat. Közeli-infravörös fotometriai méréseket a Calar Alto-i 2,2 m-es távcső MAGIC kamerájával, a Nordic Optical Telescope NOTCam kamerájával, és az Apache Point Observatory 3,5 m-es távcsövén működő NICFPS kamerával végeztünk a csillag különböző fényességi állapotaiban. 2009 márciusában és október-novemberben a Spitzer űrtávcső IRAC és MIPS műszerei mérték ezt a csillagot

középinfravörös hullámhosszakon. A saját méréseket kiegészítettük a 2MASS, SDSS és Akari felmérések nyilvános adataival.

A [KOS94] HA 11 spektrális energiaeloszlásának alakja azt mutatja, hogy a csillag a protosztelláris és a fősorozat előtti fejlődési fázisok közötti határ közelében tart a fejlődésben. Színképében rendkívül erős, a klasszikus T Tauri csillagokra jellemzőnél majdnem egy nagyságrenddel erősebb $H\alpha$ emissziós vonal figyelhető meg ($300 \text{ \AA} < EW < 900 \text{ \AA}$), valamint számos egyéb, intenzív akkrécióra és szélre utaló emissziós vonal. A 2004–2005-ös fotometriai minimumban felvett színképekből K7–M0 színképtípust határoztam meg. A közeli-infravörös színindexek változása kizárja, hogy a nagy amplitúdójú fotometriai változások oka a változó előtér-extinkció. Az emissziós vonalak változásai arra utalnak, hogy a fotometriai változásokkal párhuzamosan változik a tömegbefogási ráta és a szél. A nagyléptékű fotometriai változásokat a változó tömegbefogási ütem, valamint a korong szerkezetében az ingadozó centrális luminozitás hatására bekövetkező szerkezeti átalakulások – a por elpárolgása és kondenzálódása, a porkorong belső sugarának és skálamagasságának változásai – együttesen okozzák. A [KOS94] HA 11 tehát eruptív csillag, amelynek változásai mögött a néhány éves időskálákon nagyságrendekkel változó akkréciós ráta áll. A kitörések időskálája nagyon eltér a két jól ismert eruptív fiatalcsillag-típusnál – az FU Orionis (FUor) és EX Lupi (EXor) típusú csillagoknál – megfigelhetőktől. A [KOS94] HA 11 spektrális energiaeloszlása, fejlettségi állapota, akkréciós tulajdonságai, a változások időskálái azt bizonyítják, hogy ez a csillag az eruptív fiatal csillagok újabban kirajzolódó harmadik típusát képviseli: hasonlít az általunk korábban vizsgált PV Cepheihez és V1647 Orionishoz. Ezek a csillagok az EXor típushoz hasonlóan ismétlődő kitöréseket produkálnak, de mivel sokkal mélyebben beágyazottak, mint az EXorok, a meglödulő akkréció nyomán megemelkedett centrális hőmérséklet és luminozitás erősen átalakítja a cirkumsztelláris korong és burok belső régióit. A [KOS94] HA11 a röviddel a cikkünk megjelenése után a V1180 Cas változócsillag-nevet kapta. (M. Kun, E. Szegedi-Elek, A. Moór, et al. 2011, ApJL, 733, L8)

V2492 Cyg: Földi és űrtávcsöves (Spitzer, Herschel) méréseink alapján vizsgáltuk a V2492 Cygni fiatal eruptív csillag fluxusváltozásait a 0,55-160 μm hullámhossztartományon 2010 augusztus és 2012 december közt, valamint a csillag cirkumsztelláris és intersztelláris környezetét. Főbb eredményeink a következők:

A V2492 Cyg egy kis sötét felhő szélénél van. A felhőt feltérképeztük a Herschel űrtávcsövel. Legsűrűbb részén 30 magnitúdó extinkciót és 15 K hőmérsékletet mértünk. A felhőben másik fiatal csillag is található, az újonnan felfedezett HH 570 IRS.

A V2492 Cyg fénygörbéi nagy amplitúdójú változásokat mutatnak, többek között két nagyon mély minimumot. Elemzéseink felfedték, hogy a változásokért egyetlen fizikai mechanizmust felelős, és a színváltozások azt sugallják, hogy a legvalószínűbb magyarázat a látóirány menti extinkció változása. Eszerint a V2492 Cyg az UX Orionis típusú csillagok fiatalabb, beágyazott megfelelője.

A változó extinkciót eredményező struktúra a belső korongban keringő porfelhő lehet. Optikai vastagsága a 13–20 mag tartományon változik. Nagyságrendi becsléseink szerint tömege $10^{-10} M_{\odot}$ körül van, és néhány tized Cs. E. távolságban kering a csillagtól. A fénygörbe mély minimumai azt sugallják, hogy majdnem eléről látunk rá a korongra. A leghalványabb állapotban eltűnő hidrogénvonalak alátámasztják ezt az elképzelést.

Méréseink azt mutatják, hogy a forrás közeli infravörösben nagyobb amplitúdóval változik, mint az a standard extinkció hullámhosszfüggéséből következne. Ezt a keringő porfelhő közvetlenül megvilágított oldaláról szóródó fény és a forró por termikus sugárzása okozhatja. Annak eldöntésére, hogy a keringő porfelhő átmeneti vagy tartós képződmény lehet, monitoroztuk a távoli infravörös fluxusok változásait a Herschellel. Az eredmények viszonylag hosszú élettartamú struktúrára utalnak. A 2010 augusztus előtti fényesedés nem magyarázható extinkcióváltozással. Eredményeink szerint a teljes 0,55-70 μm tartományon nőttek a fluxusok, és fényesedés nem illeszthető egyetlen feketetést hozzáadásával. Ez a többletkomponens a fénygörbe csúcsától kezdve nagyjából állandó, ami a kitörés hosszú időtartamát (> 2 év) bizonyítja (Á. Kóspál, P. Ábrahám, J. A. Acosta-Pulido, M. J. Arévalo Morales, Z. Balog, M. I. Carnerero, E. Szegedi-Elek, A. Farkas, Th. Henning, J. Kelemen, T. Kovács, M. Kun, G. Marton, Sz. Mészáros, A. Moór, A. Pál, K. Sárneczky, R. Szakáts, N. Szalai, A. Szing, I. Tóth, N. J. Turner, K. Vida. 2013, A&A, 551, A62).

V1647 Ori : A V1647 Ori kis tömegű fiatal csillagot vizsgáltuk a 2003 novemberre és 2006 februárja között lezajlott kitörése alatt. Ez idő alatt két nagy szögfelbontású közép-infravörös interferometriás és számos fotometriai mérést végeztünk, hogy a csillag körüli anyagban lezajló folyamatokat, szerkezeti átrendeződéseket tetten érhessük. Az Európai Déli Observatórium Very Large Telescope Interferometer (ESO/VLTI) MIDI műszerével olyan felbontást értünk el, amivel azt a csillaghoz közeli régiót vizsgáljuk, ahol a Föld-típusú bolygók születnek. A lassú halványodás

mellett rövid időskálájú fényességváltozásokat is megfigyeltünk. Optikai-infravörös spektrális energiaeloszlást öt időpontra tudtunk összeállítani. Radiatívtranszfer modellezéssel megmutattuk, hogy az anyagbefogás mértékének lassú változásával leírható a forrás lassú halványodása. Továbbá azt is megmutattuk, hogy a kitörés elején a csillag körüli porstruktúrák, a korong és a burok belső sugara meg kellett nőjenek – feltehetőleg a kitörés során keletkező hő hatására a porszemcsék szublimáltak.

A modell-illesztésben a nagy szögfelbontású MIDI adatokat is figyelembe vettük. Az első MIDI adatok a lassú, míg a második a kitörés végi gyors halványodás idejéből vannak. Az adatok közti különbség jelentős eltérést mutat a forrás közép-infravörös hullámhosszakon megfigyelhető szerkezetében. A várakozásainkkal ellentétben a második MIDI mérés időpontjában a forrás kiterjedtebbnek tűnik. Egy lehetséges magyarázat szerint a belső 3 Cs. E. sugarú térrészből kb. fél év alatt eltűnt az ott lévő por nagy része. Az egyik forgatókönyvünk szerint az anyag a kitörés végén tűnik el (kifújt üreg modell), míg egy másik esetben a kitörés legelején, de a kitörés végéig folyamatosan feltöltődik valamennyire (meleg porhalo modell). Elképzelhető az is, hogy a központi forrás elhalványulását a környezet nem követte kellően gyorsan, ezért tűnik kiterjedtebbnek. A forrás valószínűleg nincs egyensúlyi állapotban a második mérés időpontjában, ezért időben változó radiatívtranszfer modellezésre volna szükségünk az adatok pontos értelmezéséhez.

Megmutattuk, hogy a V1647 Ori körüli anyag szerkezete (a korong és a burok paraméterei) alapvetően hasonlít más beágyazott fiatal csillagokéhoz. Ez erősíti azt a feltételezést, miszerint az eruptív fiatal csillagok nem különleges források, hanem a kitörések a kis tömegű csillagok egy fontos életfázisát jelölik. (L. Mosoni, N. Sipos, P. Ábrahám, A. Moór, Á. Kóspál, Th. Henning, A. Juhász, M. Kun, Ch. Leinert, S. P. Quanz, Th. Ratzka, A. A. Schegerer, R. van Boekel, S. Wolf, 2013, A&A, 552, A62)

V1117 Her: A projekt támogatásával a piszkás-tetői RCC távcsőre készített kis felbontású spektrográffal végzett optikai spektroszkópiai méréseink, valamint saját és publikus optikai és infravörös fotometriai adatok alapján vizsgáltuk a V1117 Her változócsillag hosszútávú fénygörbéjét, optikai spektrumát és spektrális energiaeloszlását. A csillag fénygörbéje az UX Orionis típusú fiatal csillagokra jellemző kvázi-ciklikus, fedés-jellegű halványodásokat mutat. Spektráltípusa A8–A9, erős H α emisszióval. Spektrális energiaeloszlásában a Herbig Ae csillagokra jellemző, kb. 1350 K hőmérsékletű feketetest-sugárzással közelíthető infravörös többlet figyelhető meg. Fényessége, színindexei és égi koordinátái azonban a fiatal korral nem összeegyeztethető, mintegy 430 pc galaktikus sík fölötti távolságot sugallnak. Ha a V1117 Her valóban fiatal csillag, akkor valószínű, hogy közelebb van hozzánk és a galaktikus síkhoz, és eléről látszó korongja miatt optikai hullámhosszakon csak a külső korongról szórt fényt látjuk, ami 4–5 magnitúdóval halványabb, mint a fotoszféra. Az évtizedes időskálán stabil, 408 napos periódusú fedés-jellegű halványodásokat a korongban a csillagtól ~ 1,3 Cs. E. távolságban található, mintegy 0,5 Cs. E. kiterjedésű, és nagyságrendi becsléseink szerint ~ $6 \times 10^{-9} M_{\odot}$ tömegű sűrűsödés okozhatja (M. Kun, M. Rácz, & L. Szabados 2014, IBVS, 6089).

Protoplanetáris korongok különböző csillagkeletkezési környezetekben

Új H α felmérés az Orion-ködben

587 H α emissziós csillagot azonosítottunk az Orion-köd 1 négyzetfokos környezetében. Közülük 99 nem szerepel korábbi H α felmérésekben. 559 csillag spektrumában meghatároztuk a vonal ekvivalens szélességét, és ennek alapján 372 csillagot klasszikus, 187-et gyenge vonalú T Tauri csillagként azonosítottunk. Valójában a gyenge vonalúak többségben vannak az ONC-ben, de a H α felmérés elsősorban a klasszikus T Tauri csillagok detektálására alkalmas. Irodalmi H α mérésekkel összehasonlítva az eredményeinket néhány éves időskálákon tipikusan 2–3-szoros változásokat látunk az ekvivalens szélességekben. A H α emissziós csillagok felületi eloszlásában egy csomós eloszlású és egy szétszórt populációt azonosítottunk. A Herschel Űrobszervatórium által készített 500 μ m-es képpel összehasonlítva az emissziós vonalú csillagok felületi eloszlását megmutatuk, hogy a csomós eloszlású alrendszer szorosabb kapcsolatban van a hideg por felületi eloszlásával, mint a szétszórt, és átlagfényessége minden hullámhosszon nagyobb. Valószínű, hogy a szétszórt alrendszer tagjai kisebb tömegű előtér csillagok, az Orion csillagkeletkezési komplexum egyik öregebb alrendszerének tagjai. Megvizsgáltuk a H α vonal ekvivalens szélességének korrelációját a csillagok egyéb paramétereivel, és a következő eredményeket kaptuk:

(a) Minden klasszikus T Tauri csillag II. osztályú spektrális energiaeloszlást mutat. A gyenge vonalú T Tauri

csillagok viszont két csoportra hasadnak fel: egy korong nélküli és egy klasszikusokhoz hasonló korongosra.

(b) A klasszikus T Tauri csillagaink átlagos rotációs periódusa hosszabb, mint a gyenge vonalúaké.

(c) Fiacialcsillag-mintánkat az *XMM-Newton* röntgenforrás-adatbázisával összehasonlítva azt látjuk, hogy a gyenge vonalú T Tauri csillagok nagyobb hányadát detektálta az *XMM-Newton* röntgen-obszervatórium, mint a klasszikusakét, és a röntgenforrásként detektált klasszikus T Tauri csillagaink átlagos $H\alpha$ ekvivalens szélessége szignifikánsan kisebb, mint a nem detektáltaké. (E. Szegedi-Elek, M. Kun, B. Reipurth, A. Pál, L. G. Balázs, & M. Willman 2013, *ApJS*, 208, 28). Ezek az eredmények Szegedi-Elek Elza 2014-ben benyújtott PhD értekezésében is megtalálhatók.

Csillagkeletkezés a Lynds 1340 molekulafelhőben

Optikai, közeli és közép infravörös fotometriai és spektroszkópiai adatok alapján vizsgáltuk a Lynds 1340 molekulafelhőben születő csillagok tulajdonságait. A Lynds 1340 különleges csillagkeletkezési régió: viszonylag kicsi, mindössze 2–3 ezer naptömegnyi molekuláris gázt tartalmazó, különálló felhő $+11^\circ$ galaktikus szélességen, nem része semmilyen nagyobb felhőkomplexumnak. Kis- és közepes tömegű csillagok keletkeznek benne. Mind a születő csillagok tömegét, mind csoportosulási tulajdonságaikat tekintve a L1340 valahol közepén van a Taurus- és az Orion-típusú csillagkeletkezési régiók közt, miközben a felhő tömege legalább egy nagyságrenddel kisebb. A felhőben születő csillagok térbeli, tömeg- és koreloszlásának, az akkréciós korongok tulajdonságainak vizsgálatából azokra a sajátos környezeti hatásokra, csillagközi folyamatokra következtethetünk, amelyek ehhez a „közbenső” csillagkeletkezési formához vezetnek, amely valószínűleg a csillagkeletkezés domináns módja Tejútrendszerben.

A *Spitzer* Űrobszervatórium IRAC és MIPS detektoraival 2009. márciusában készültek képek a L1340-ről 3,6, 4,5, 5,8, 8,0, 24 és 70 μm -en. A lefedett, kb. 1 négyzetfokos területen több, mint 19000 infravörös pontforrás található: nagy részük mezőcsillag vagy extragalaxis. Különböző publikált színindex-kritériumok alapján (Harvey et al. 2007, Gutermuth et al. 2009, Kryukova et al. 2012) 203, koronggal övezett és beágyazott fiatal csillagot azonosítottam. További infravörös többszögű fiatal csillagokat azonosítottam a *WISE* űrtávcső 2011 elején publikussá vált, majd 2012-ben és végül 2013 novemberében frissített adatbázisában (Koenig et al. 2012). A University of Hawaii 2,2 m-es távcsövén működő WFGS2 spektrográffal készült felvételeinken 74 $H\alpha$ emissziós csillagot találtunk a felhő területén. Az infravörös színindexek és a $H\alpha$ emisszió alapján kiválasztott populációk részben átfedik egymást, és tartalmazzák a korábban már ismert fiatal csillagokat is.

A *WISE*, *2MASS*, és *SDSS* fotometriai adatokkal felrajzoltam a csillagok spektrális energiaeloszlását (SED). A 2,2 és 24 μm közötti spektrálindex alapján (Lada, 19 48 beágyazott protocsillagot (0/I. osztályú), 24 lapos spektrális energiaeloszlású (Flat SED) forrást, és 121 klasszikus T Tauri csillagot (II. osztályú infravörösforrás) azonosítottam. A SED-ek BVRJI szakaszához vörösödött fotoszférák SED-jeit illetve megbecsültem a csillagok spektráltípusát és extinkcióját, majd az extinkcióra korrigált I_c magnitúdókból és a spektráltípushoz tartozó bolometrikus korrekcióval a luminozitásukat, és végül fősorozat előtti fejlődési modellek segítségével a tömegüket és korukat.

A felhőben született közepes tömegű csillagok színképtípusait a Calar Alto Obszervatórium 2.2 m-es távcsövével, az arizonai Whipple Observatory FAST spektrográfiájával és a piskés-tetői RCC távcső új spektrográfiájával felvett kis felbontású optikai színképekből határoztam meg. Optikai (*SDSS*) és közeli infravörös (*2MASS*) fotometriai adatokkal kiegészítve a színképi információt pontosítottam a L1340 korábban publikált távolságát. Összesen 12, G0-nál korábbi típusú, optikai vagy infravörös reflexiós ködhöz társuló csillag van a felhő területén, amelyek a HRD-n 730 pc távolságban a nullkorú fősorozaton vagy fölötté vannak. Többségüknek kis infravöröstöbblete van 12 és 22 mikrométeren (3. osztályú SED).

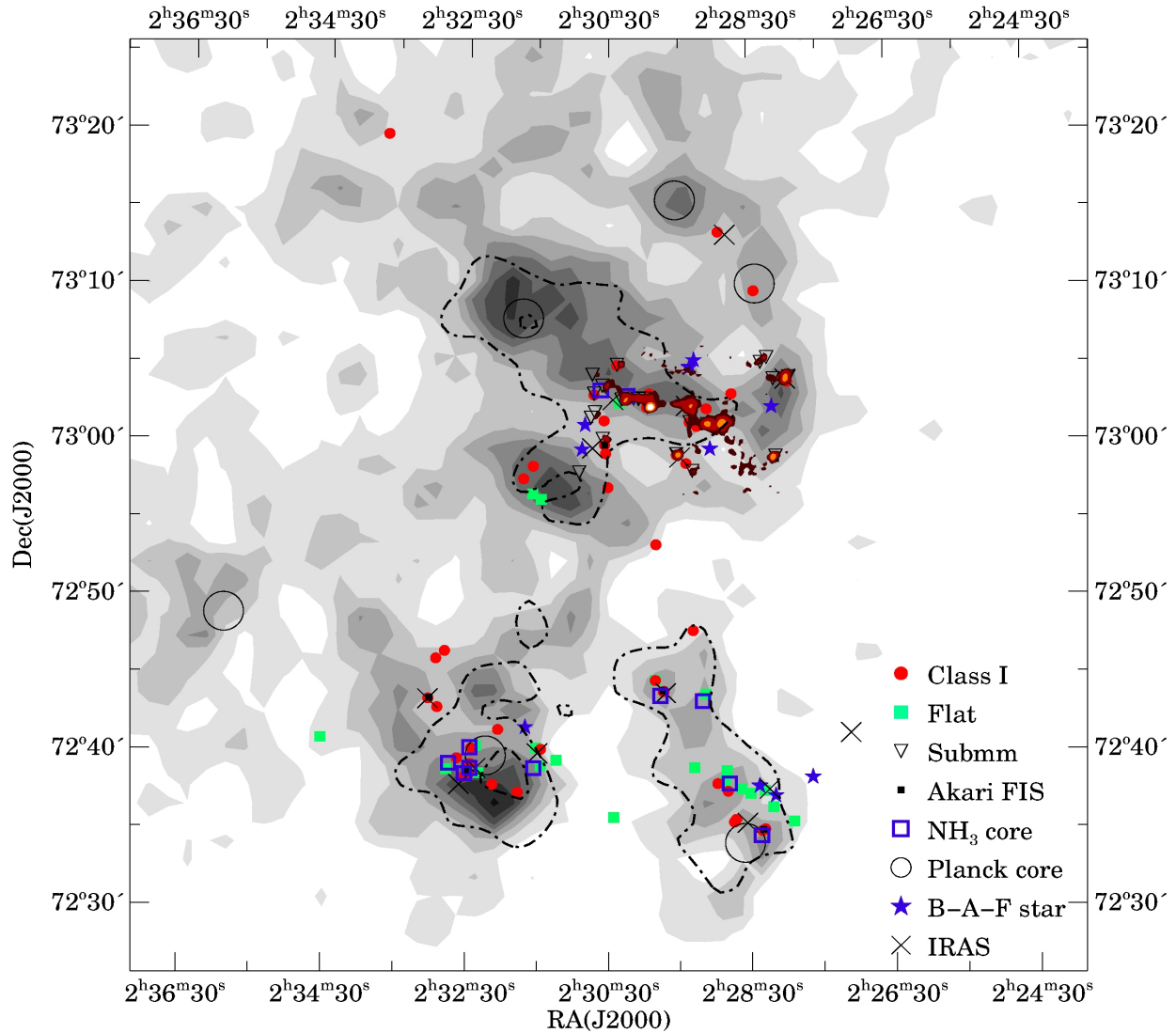
A fiatal csillagok eloszlása részben követi a felhő szerkezetét: a három $C^{18}O$ -mag mindegyikében van egy-egy, 50–60 különböző SED-típusú objektumokból álló halmaz (RNO 7, RNO 8, RNO 9), néhány, 5–10 csillagból álló szoros csoport, és van egy szétszórt populáció a felhő egész területén.

Három új eruptív fiatal csillagot fedeztünk fel: egy FU Ori, egy EX Lupi típusút és egy beágyazott eruptív protocsillagot. Új Herbig–Haro objektumokat fedeztünk fel a *Spitzer*-képeken, és pontosítottuk a korábban publikált HH-objektumok adatait.

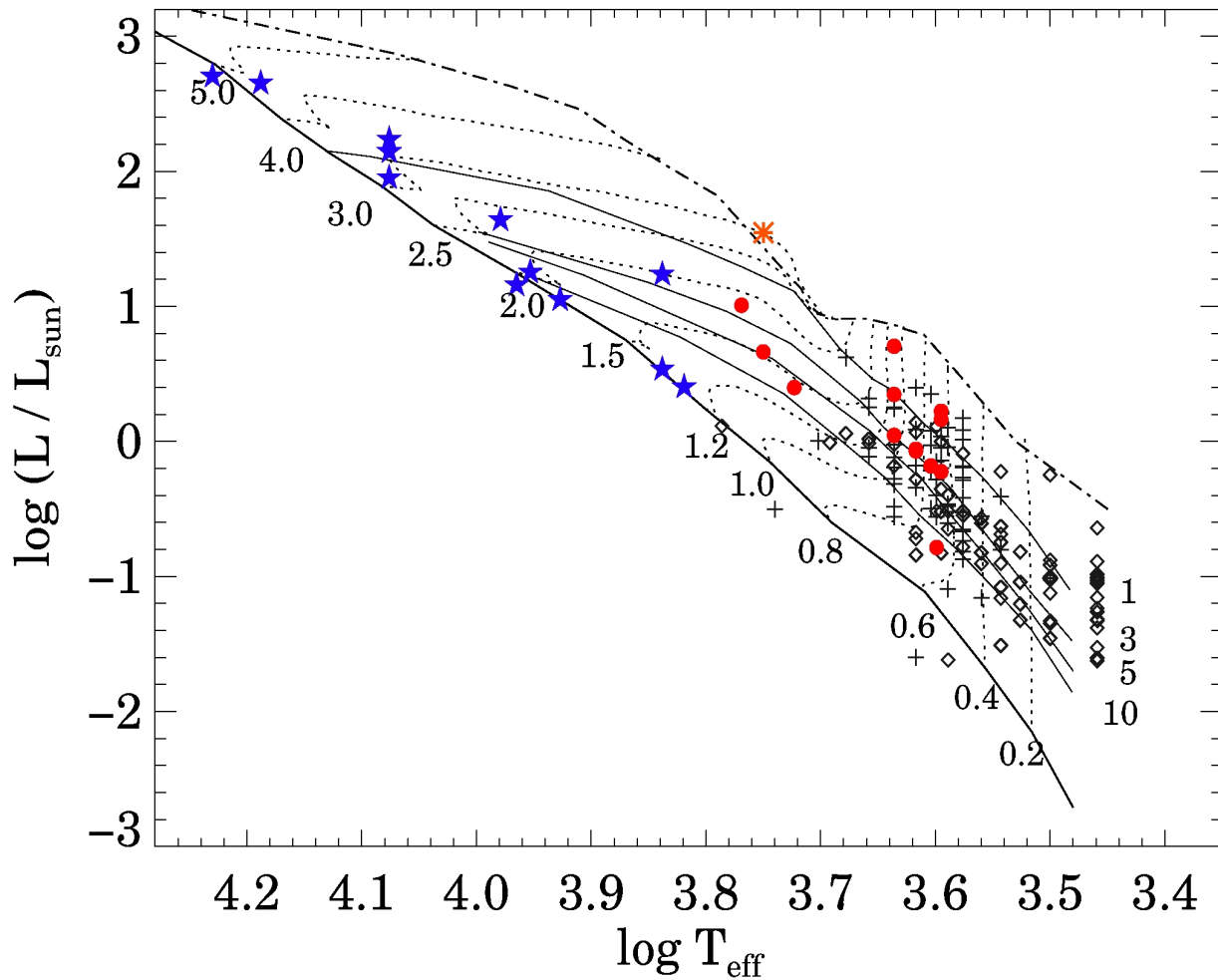
Az *SDSS* adatokon végzett csillagszámlálás alapján új extinkciós térképet készítettem a L1340-ről, és ebből meghatároztam az egyes felhőcsomók tömegét és a csillagkeletkezés hatásfokát. Ugyancsak az *SDSS* adatbázisban szín-fényesség és szín-szín diagramok alapján ~180 korong nélküli fiatalcsillag-jelöltet azonosítottam.

Ezeket az eredményeket várhatóan 2015-ben láthatjuk kész folyóiratcikkekben. Az első cikket a zárójelentés írásával egyidőben küldtük be az *Astrophysical Journal Letters*-nek (M. Kun, D. Apai, J. O’Linger-Luscusk, A. Moór,

B. Stecklum, E. Szegedi-Elek, & G. Wolf-Chase: New Candidate Eruptive Young Stars in Lynds 1340). Az alábbi ábrák a folyamatban levő munka néhány eredményét foglalják össze.



1. ábra: A beágyazott presztelláris és protosztelláris kompakt források és a közepes tömegű fiatal csillagok a L1340 SDSS adatokon alapuló extinkciós térképén. A leghalványabb árnyalat $A_V=1$ mag vizuális extinkciónak felel meg, és a lépésköz 0.5 mag. A szaggatott-pontozott vonal a $T_A=0.36$ K (5σ) és 0.72 K-es $C^{18}O$ kontúrokat jelzik (Kun et al. 1994), a színes kontínuum-térkép a por 850 mikrométeres termikus sugárzását (Di Francesco et al. 2009, az árnyalatok a sötétől a halvány felé 25, 50, 100 és 250 mJy / nyaláb).



2. ábra: A L1340 optikai hullámhosszakon megfigyelt fiatal csillagai a Hertzsprung–Russell diagramon. A kék csillag-szimbólumok a G0-nál korábbi, a piros körök az ennél későbbi színképtípusú csillagok, saját spektroszkópiai méréseink alapján. A narancsszínű szimbólum az IRAS 02224+7227 újonnan felfedezett FU Ori típusú csillag. A fekete szimbólumok azokat a csillagokat mutatják, amelyek színképtípusát a SED alapján becsültük meg: + jelek a H α emissziós csillagokat, a rombuszok az infravörös színindexek alapján azonosított fősorozat előtti csillagokat jelzik. A nullkorú fősorozat (vastag folytonos vonal), a fősorozat mentén jelzett tömegű csillagok fejlődési útvonalai (pontozott vonalak), az 1, 3, 5, és 10 millió éves izokronok (vékony folytonos vonal) és a születési vonal (szaggatott-pontozott) Palla & Stahler (1999) fejlődési modelljeit mutatják. A csillagok bolometrikus luminozitásainak meghatározásához 730 pc távolságot fogadtunk el.

Törmelékkorongok vizsgálata

F-típusú csillagok körüli törmelékkorongok szerkezetét és fejlődését vizsgáltuk a *Spitzer Space Telescope* MIPS kamerájával és IRS spektrográfjával nyert adatok alapján. A 82 vizsgált F típusú csillagból 27 esetben detektált törmelékkorongot a Spitzer, ezek közül kilenc új felfedezés. Két csillag, a HD 50571 and HD 170773 körül marginálisan kiterjedt a por eloszlása a 70 mikronos képeken. A MIPS és IRS-méréseket további infravörös és szubmilliméteres adatokkal kombinálva a legtöbb törmelékkorong spektrális eloszlását jól lefedtük. 22 törmelékkorong emisszióját jól leírja egy homogén hőmérsékletű porgyűrű, öt korong két, különböző hőmérsékletű porgyűrűből állhat. A korongok luminozitása az idő haladtával csökken. A halványodás üteme méréseink szerint megfelel a modellek jóslatainak. A por radiális eloszlása a kor függvényében többféle modellel is összeegyeztethető. (Moór, A., Pascucci, I., Kóspál, Á., Ábrahám, P., Csengeri, T., Kiss, L. L., Apai, D., Grady, C., Henning, Th., Kiss, Cs., Bayliss, D., Juhász, A., Kovács, J., Szalai, T. 2011: ApJS, 193, 4)

Kisbolygóvek a Vega és a Fomalhaut törmelékkorongjaiban

A Vega and Fomalhaut, két egymáshoz nagyon hasonló csillag szintén nagyon hasonló törmelékkorongjainak vizsgálatában vettünk részt. A Spitzer Űrtávcső 10–35 m közötti spektroszkópiai adatait elemezve mindkét csillag körül kimutattunk egy ~170 kelvines fekete test sugárzásával közelíthető, felbontatlan infravörös többletet. Az infravörös többletsugárzás forrása a törmelékkorong és a csillagok között van, hasonló lehet a Nap körüli állatövi porhoz, de jóval nagyobb a tömege. Más törmelékkorongos csillagok körül is találtak hasonló hőmérsékletű port, tehát a létrehozó folyamatok is közesek lehetnek, és a víz olvadási hőmérsékletéhez köthetők. A meleg és hideg porgyűrűk nagy távolságban vannak egymástól, keringési idejük aránya mindenütt $> \sim 10$.

(Su, K. Y. L., Rieke, G. H., Malhotra, R., Stapelfeldt, K. R., Hughes, A. M., Bonsor, A., Wilner, D. J., Balog, Z., Watson, D. M., Werner, M. W. 2013, ApJ, 763, 118)

Molekuláris gáz törmelékkorongokban

Húsz, infravörösben fényes törmelékkorongban kerestünk CO J = 3-2 emissziót az Atacama Pathfinder Experiment műszerrel. Felfedeztük a második 49 Ceti-szerű korongot a HD21997 30 millió éves A3 típusú csillag körül. (Moór, A., Ábrahám, P., Juhász, A., Kiss, Cs., Pascucci, I., Kóspál, Á., Apai, D., Csengeri, T., Henning, T., Grady, C. 2011, ApJL, 740, L7)

Törmelékkorongok ütközései fejlődése

A törmelékkorongok tömegének és infravörös sugárzásának fejlődését numerikus modellezéssel vizsgáló kutatásban vettünk részt. A korongok portartalmát, a porszemcsék méreteloszlását és ezáltal a korong infravörös sugárzását a nagyobb testek ütközései szabályozzák. A modellezés eredményei szerint a korongok tömege kezdetben gyorsan csökken, majd a csökkenés lassul. Nagy számú, különböző korú törmelékkorongos csillag 24, 70, és 100 mikronos, Spitzer és Herschel mérései alátámasztják a modellezés eredményeit. (A. Gáspár, G. H. Rieke, & Z. Balog 2013, ApJ, 768, 25)

Egyéb

Az OTKA és az Élet és Tudomány cikkpályázatára 2013-ban ismeretterjesztő cikket írtam ezekről a kutatásokról *Múltunk a csillagokban* címmel. Még nem jelent meg.

Irodalom

Di Francesco J., Johnstone D., Kirk, H., MacKenzie, T., Ledwosinska, E. 2008, ApJS, 175, 277

Gutermuth, R. A. et al., 2009, ApJS, 184, 18

Harvey, P. M., Chapman, N., Lai, S.-P., et al. 2006, ApJ, 644, 307

Koenig, X. P., et al. 2012, ApJ, 744, 130

Kryukova, E., Megeath, S. T., Gutermuth, R. A., et al. 2012, AJ, 144, 31

Kun, M., Obayashi, A., Sato, F., et al. 1994, A&A, 292, 249

Lada, C. J. 1991, in: The Physics of Star Formation and Early Stellar Evolution, szerk. C.J. Lada & N. D. Kylafis, Kluwer, p. 329

Palla, F. & Stahler, S. 1999, ApJ, 525, 772