

# ZÁRÓJELENTÉS

Hogyan keletkeztek a csillagok és bolygórendszereik? - új irányok a csillagkörüli korongok fizikájának megértésében

NKFIH K-101393

## Motiváció

A csillagok és bolygórendszereik keletkezésének megértése a 21. századi asztrofizika egyik legnagyobb erővel kutatott területe. A születőfélben lévő csillagok kis mérete és a környező sűrű molekulafelhőbe való beágyazottsága megköveteli a legmodernebb asztrofizikai műszerek és modellezési eljárások használatát. Jelen pályázat keretében 2012 és 2016 között sikeres kutatási programok sorozatát hajtottuk végre, hogy tisztább képet nyerhessünk a fiatal csillagok környezetéről, kezdve a kialakulások legelső lépcsőjét jelentő pre-protosztelláris csomóktól a csillagkörüli akkréciós, protoplanetáris, majd törmelékkorongokig. A kutatásokat nemzetközi együttműködésben hajtottuk végre, gyakran a világ legmodernebb űrbázisú vagy földi berendezéseit használva, és az eredményeket a csillagászat legtekintélyesebb folyóirataiban publikáltuk. Az eredményekről a publikációs lista illetve az éves szakmai jelentések adnak számon. A zárójelentésben csak arra nyílik lehetőség, hogy a pályázat valamennyi kutatási területéről a teljesség igénye nélkül néhány reprezentatív projektet bemutassunk.

## Pre-protosztelláris csomók

Nagyszámú földi és űreszközzel (Herschel űrteleszkóp, Osaka-1.85m, Arizona Radio Observatory, Onsala-25m, Effelsberg-100m rádióteleszkóp) vizsgáltuk a Planck űrtávcsővel azonosított galaktikus hideg felhők szerkezetét és kinematikáját. A mérések közül kiemelten érdemes említeni a HCL2 jelű csillagközi felhőben az Effelsberg-100m rádiótávcsővel végzett több mint 100 órás megfigyeléseket. Az ammónia cm-es vonalain térképezve Planck hideg felhőkben felhőmagokat azonosítottunk, melyek előtörténetét és 3D elhelyezkedését szerkezeti és kémiai modellezéssel próbáltuk meghatározni. Kiemelt jelentőségű a Taurusban a TMC-1 jelű molekulafelhő vizsgálata. Megmutattuk, hogy a felhő négy részre bomlik, melyből kettő gravitációsan kötött. A TMC-1 felhőgerincben a csillagközi molekulák relatív gyakoriságát általunk implementált időfüggő kémiai modellel vetettük össze, mely szerint a négy rész "kémiai kora" is eltérő. Nagy számú hideg felhő mintán vizsgáltuk a sűrű felhőrészekben a szálak strukturálódást meghatározva annak tipikus fizikai és geometriai paramétereit.

## Fiatal csillagpopulációk, csillagkeletkezési területek

Az Akari infravörös űrtávcső távoli-infravörös pontforrás-katalógusát kombinálva a Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) méréseivel kvadratikus diszkriminancia analízisen alapuló klasszifikációt végeztünk, fiatal csillagok azonosítása céljából. Összesen 44001 AKARI jelöltet azonosítottunk, melyek túlnyomó többsége Class I és II típusú fiatal csillag. A jelöltek eloszlása jól korrelál a csillagközi anyag eloszlásával: helyi sűrűség-többségek figyelhetők meg az infravörös hurkok és a Planck által detektált hideg felhőcsomók irányában. Egy hasonló projektben a WISE és a közeli-infravörös 2MASS felmérés adataiból azonosítottunk fiatal csillagokat, egy szofisztikált statisztikai módszert, a *support vector machine-t* használva. A módszer gépi tanítása már ismert fiatal csillagok listáján történt. Ez a teljes eget lefedő új fiatal csillag katalógusunk 133 980 I/II osztályú fiatal csillagot tartalmaz, és minden korábbinál nagyobb biztonsággal azonosítja a születő csillagpopulációt.

A teljes eget lefedő, mégolyan megbízható fiatal csillag katalógusok nem pótolják az egyedi csillagkeletkezési területek részletesebb analizisét, mert itt az egyes forrásokról már korábban az irodalomban rendelkezésre álló információ is felhasználható. A pályázat keretében feltártuk a Cassiopeia csillagképben található Lynds 1340 molekulafelhő fiatal csillag populációját, amely korábban messze nem volt ilyen részletességgel ismert. 170 II. osztályú (T Tauri), 27 lapos színeképű, és 45 korai 0/I osztályú forrást találtunk, amelyek térbelileg három csoportot alkotnak a molekulafelhő három fő csomójának irányában. A Lynds 1340 egy prototipikus közepes-csillag keletkezési terület, ahol a Herbig Ae/Be csillagok kialakulásának jellegzetességeit lehet különös részletességgel vizsgálni.

### **Fiatal többes csillagrendszerek**

Nagy szögfelbontású és nagy kontrasztú képek segítségével tanulmányoztuk a T Tauri típusú csillagok névadóját, a T Tauri többes rendszert. Méréseinket a VLT/SPHERE-rel, az ESO egyik legújabb műszerével végeztük közeli-infravörös hullámhosszon. Megvizsgáltuk a csillagrendszerben a komponensek időbeli fejlődését és elvégeztük rájuk a pályaszámítást. Felvételeink megerősítik az irodalomban már leírt kiterjedt emisszió létét. Új keskenysávú képeinken először láthatóak a T Tau Sa atomos és molekuláris hidrogén vonalai, a szélessávú képek szerint pedig a T Tau Sa megint változékony időszakba lépett. A T Tau N-től délre  $144 \pm 3$  milliív másodperc távolságban egy új pontforrást észleltünk, amely a rendszer lehetséges új komponense.

### **Protoplanetáris korongok**

A fizikai paraméterek jelentősen változhatnak a csillagkörüli korongon belül, és ez részben azzal kapcsolatos, hogy milyen színeképű sugárzás éri a korongfelszínt a csillag irányából. A Spitzer űrtávcső IRS műszerével 56 fiatal átmeneti korong kisfelbontású spektrumában az [Ar II], [Ne II] és [Ne III] ionokra kapott vonalarányok alapján megvizsgáltuk, hogy a neon illetve argon atomok ionizációját lágy/kemény röntgen vagy inkább extrém ultraibolya fotonok okozhatják-e. A mérések nem engednek egyértelműen döntést a két lehetőség között, de inkább a lágy röntgen és/vagy lágy extrém ultraibolya, mintsem a kemény röntgen spektrumú csillagsugárzásra utalnak.

A fiatal csillagok nem csak optikai és közeli-infravörös tartományban, hanem közép-infravörösben is változékonyak. Az ISO és Spitzer Űrtávcső adataiból elkészítettünk egy közép-infravörös színeképatlaszt, amelyben 68 kis- és közepes tömegű fiatal csillagról kb. 10 év különbséggel készült mérések szerepelnek. A források egy része hullámhossz-független változásokat mutat, az időben változó akkréció következményeként. Más esetben a 10 mikrométeres szilikát csúcs és a környező kontinuum sugárzás gyengén korrelált, ami valószínűleg a korongstruktúra változásaira utal. A közép-infravörös változékonyság láthatólag sokkal gyakoribb, mint korábban gondoltuk, és ez felhasználható lehet a korong szerkezetének és dinamikai folyamatainak a felderítésére is.

### **Fiatal eruptív csillagok**

A V2492 Cygni jelű fiatal csillag 2010-as kitörése óta a megnövekedett fényesség azóta is tart. Csoportunk földi és űrtávcsövekkel tíz hullámhosszon monitorozta a kitörést. A fénygörbék és a szín-szín diagramok arra utalnak, hogy a rendszer fényváltozásai a változó extinkciónak köszönhetőek, amit valószínűleg a belső diszkben keringő porfelhő okoz. Megvizsgáltuk a csillag tágabb környezetét is, hőmérséklet és optikai mélység térképeket készítve a távoli-infravörös adatokból. A V2492 Cyg esete azt példázza, hogy egy fiatal eruptív csillag kitörése nem feltétlen írható teljes mértékben a megnövekedett akkréció számlájára. A megfigyelt változékonyság így információt szolgáltatott a belső korong szerkezetéről, ami segítheti a bolygóképződés kezdeti feltételeinek megértését.

Az EX Lupi-típusú fiatal eruptív csillagok kitörési mechanizmusa máig nem tisztázott. Egyes elméletek szerint a csillaghoz közeli kistömegű kísérő perturbálja a csillagkörüli korong belső peremét, és okoz időszakosan megnövekedett tömegakkréciót a csillagra. Vizsgálatunkban egy ilyen kísérő létezését, továbbá a csillag felszínét és a korong belső peremét összekötő akkréciós oszlopokat vizsgáltuk az EX Lupi rendszerben optikai fotometriai és nagyfelbontású spektroszkópiai monitorozással. Bár a megfigyeléseink konzisztensek lehetnek egy közeli barna törpe kísérővel is, valószínűbb, hogy itt a csillaggal együtt forgó stabil akkréciós oszlopokat látjuk.

Mindössze egy tucat FU Orionis (FUor) típusú fiatal eruptív csillag ismert, ezért egy újabb FUor-kitörést mindig nagy érdeklődés kísér. Az egyik legutóbbi ilyen felfedezés a V960 Mon kitörése volt. Összeállítottuk az objektum kitörés előtti spektrális energiaeloszlását, amely arra utal, hogy a forrás nyugalomban egy tipikus II. osztályú fiatal csillag. Emellett nyomon követtük a V960 Mon optikai és infravörös fénygörbéjét, amelyen a maximális fényességet követő halványodás során periodikus oszcillációkat találtunk, talán egy közeli excentrikus kísérőnek köszönhetően.

A szénmonoxid (CO) molekula milliméteres rotációs vonalai felhasználhatók a fiatal csillagok körüli hideg gázanyag szerkezetének és mozgásának vizsgálatára. Az APEX rádiótávcső mérései segítségével megvizsgáltuk az EX Lup körüli korongban lévő CO sugárzást. A megfigyelt vonalprofil asztrokémiai és radiatív transzfer modell segítségével reprodukáltuk. A korongban a vártnál kevesebb CO-t találtunk, de más hasonló korongokkal összevetve nem kirívóan keveset. Hasonló méréseket végeztünk 8 FUor-típusú csillagra is, de mivel ezek a csillagok fiatalabbak és beágyazottabbak az EX Lup-nál, így itt a mérésekkel a csillagkörüli burkokat tudtuk vizsgálni. Eredményeink azt mutatják, hogy korreláció figyelhető meg a FUorok csillagkörüli burkának tömege, a CO-vonal szélessége, és a gáz hőmérséklete között. Jellemző továbbá, hogy a CO-mérések alapján nagy gázanyaggal rendelkező objektumok 10 mikrométeren szilikát abszorpciós spektrálarakzatot mutatnak. Eredményeink szerint a FUor-jelenség már az egészen fiatal objektumoknál fellép, és az I és II. osztály átmenetéig biztosan tart.

1980 előtti kitörésével a V346 Nor az egyik legrégebben ismert FUor. 2010 körül ez a csillag váratlanul elhalványodott. Saját és archív infravörös mérések segítségével összeállítottuk a csillag fénygörbéjét napjainkig. Most éppen a 2010-11-es minimumot követő fényesedés történik, bár a csillag még nem ért vissza a maximális fényesség szintjére. Az adatokat egy változó vörösödésű és akkréciós rátájú korong-moddellel illesztettük. Eredményeink szerint 1992-ben volt az akkréciós ráta maximális, ekkor a csillagra évente  $10^{-4}$  naptömegnyi anyag hullott, míg 2010 során az akkréciós ráta leesett  $4 \times 10^{-7}$  naptömeg/év alá. Több más fiatal eruptív csillaghoz hasonlóan a V346 Nor fényváltozásai is a változó akkréció és változó vörösödés együttes hatásának köszönhetőek.

### **Bolygók hatása a korongra**

Numerikus hidrodinamikai modellezéssel megvizsgáltuk, hogy okozhatják-e a bizonyos protoplanetáris korongokban megfigyelt kettős csúcsú, aszimmetrikus CO vonalprofilokat a korongba ágyazódott,  $q=4.7 \times 10^{-3}$  csillag-bolygó tömegarányú óriásbolygók gravitációs perturbációi. Szimulációink szerint a korong globálisan excentrikussá válik a bolygópályán belül, ezért a CO-molekula vonalainak fluxus- és hullámhosszbeli aszimmetriái érzékenyek a korongba ágyazódott bolygó jelenlétére. A vonalprofil alakjának torzulása (pl. a csúcsok távolsága, centrális bemélyedés nagysága, aszimmetriája és pozíciói) a gerjesztési energiáktól (azaz az átmenet rotációs kvantumszámától, J) függenek. Arra a következtetésre jutottunk, hogy a bemutatott spektroszkópiai jelenség segítségével vizsgálhatóak a bolygókeletkezési elméletek jóslatai hiszen ezzel a módszerrel egészen fiatal bolygórendszerekről is nyerhetők információk.

## **Protoplanetáris korongok interferometrikus vizsgálatai**

A V1647 Ori jelű kistömegű fiatal csillag 2003 novembere és 2006 februárja között lezajlott kitérése során két nagy szögfelbontású közép-infravörös interferometriás végeztünk az Európai Déli Observatórium Very Large Telescope Interferometer (ESO/VLTI) MIDI műszerével. Az első MIDI adatok a lassú, míg a második a kitérés végi gyors halványodás idejéből származnak. Várakozásainkkal ellentétben a második MIDI mérés időpontjában a forrás kiterjedtebbnek tűnt. Egy lehetséges magyarázat szerint a belső 3 csillagászati egység sugarú térrészből kb. fél év alatt a kitérés hatására eltűnt az ott lévő por nagy része, de az is elképzelhető, hogy a központi forrás elhalványulását a környezet nem követte kellően gyorsan, ezért tűnik viszonylag kiterjedtebbnek.

A MIDI archívumából összegyűjtve az összes kistömegű fiatal csillagra vonatkozó publikus mérést, egységes adatfeldolgozás után egy atlaszt állítottunk össze mintegy 50 csillag körüli korongról. Saját fejlesztésű programmal modelleket illesztettünk a redukált adatokra, amivel megállapítottuk a csillagok körüli korongok méretét, és néhány esetben a korongon belüli rész jelenlétét is kimutattuk. Az atlasz egyik objektuma a DG Tauri, aminek fényváltozásairól egy alaposabb egyedi vizsgálatot végeztünk. Az interferometrikus észlelések alapján kimutattuk, hogy a DG Tauri körüli korong belső része sokkal kevésbé változékony, mint a korong külső része, és markáns különbséget találtunk a két rész mineralógiai tulajdonságaiban is, belül inkább amorf míg kívül elsősorban kristályos porszemcséket észlelve. Az interferometrikus atlasz adatfeldolgozási része elkészült, az eredmények már nyilvánosak egy weboldalon keresztül. A kapcsolódó publikáció benyújtása 2017 első felében fog megtörténni.

## **Törmelékkorongok**

A gázban gazdag primordiális korongokat és a ritkásabb portartalmú, gázban szegény törmelékkorongokat általában a csillagkörüli anyag fejlődése két jól elkülönülő fázisának tekintik. Az ALMA interferométer "Early Science" programjának keretében felbontottuk a HD 21997 körüli korongot mind a kontinumban (870 mikrométeres hullámhosszon), mind pedig a szénmonoxid 2-1-es illetve 3-2-es rotációs átmeneteiben. A CO emisszió szerint a molekuláris gáz egy korongban található és rotációja kepleri a központi csillag körül. A korongot nem csak  $^{12}\text{CO}$ , hanem a ritkább  $^{13}\text{CO}$  és  $\text{C}^{18}\text{O}$  izotópokban is sikerült detektálni, ami nagymennyiségű szénmonoxid jelenlétére utal, ezért úgy véljük, hogy a megfigyelt gáz nem a bolygócsírák ütközéseiből a porszemcsékhez hasonlóan keletkező másodlagos, hanem inkább az eredeti gázkomponens maradványaként primordiális eredetű. Ez komoly kihívást jelent a jelenlegi korong fejlődési elméleteknek, melyek szerint a primordiális gáznak már jóval hamarabb ( $<10$  millió év) el kellene tűnnie a rendszerből.

Az APEX és az IRAM rádióteleszkópok felhasználásával 20 további fényes törmelékkorongban kerestünk szénmonoxid molekulát. A 16 millió éves A-színképtípusú HD 131835-nél detektáltuk a CO 3-2-es rotációs átmenetét, így egy új gázt is tartalmazó törmelékkorongot találunk. A HD 131835-öt - hasonlóan a HD 21997-hez - egy hibrid korong veszi körül, amiben a gázanyag primordiális eredetű, míg a porszemcsék nagyrészt planetézimálokból származnak. A 125 parszeknél közelebbi törmelékkorongok statisztikája alapján a 40 millió évesnél fiatalabb A-színképtípusú csillagok körüli masszívabb törmelékkorongokban a mérhető mennyiségű gáz jelenléte gyakori jelenség.

A HD 95086 egyike azon kevés rendszereknek, ahol a csillag körül megtalálható mind egy törmelékkorong, mind egy közvetlen képalakítási technikával azonosított, viszonylag távoli, nagytömegű bolygó. A korong szerkezetének és esetleges gáztartalmának megismeréséhez, valamint a bolygó és a korong lehetséges kölcsönhatásainak vizsgálatához optikai, infravörös és milliméteres hullámhosszakon végeztünk méréseket. A szubmilliméteres szénmonoxid emisszió

hiánya azt mutatta, hogy a korongunk nem egy idősebb gázban gazdag átmeneti rendszer hanem egy törmelékkorong. A rendszer spektrális energiaeloszlása arra utal, hogy a por két különálló gyűrűben található. A Herschel Űrtávcsővel készített távoli infravörös képeken a korongot térbelileg felbontottuk, meghatároztuk méretét és inklinációját. Feltételezve, hogy a bolygópálya inklinációja is hasonló, a bolygó nagyon közel keringhet a korong belső pereméhez. Egyszerű modelleket használva megállapítottuk, hogy ha a bolygópályája excentricitása 0.4-nél nagyobb, akkor az szekuláris perturbációja révén gerjesztheti a korong külső szélénél található planetezimálok mozgását.

A Herschel Űrtávcső segítségével megvizsgáltuk a gerjesztési folyamatokat nagytömegű, fiatal törmelékkorongokban. Távoli infravörös képeinket 11 korong méretét határoztuk meg. Hét esetben a korong mérete konzisztensnek bizonyult az öngerjesztéses modell jóslataival, négy korong azonban egyszerűen túl nagy ahhoz, hogy ez a folyamat lehessen a dinamikai gerjesztésük hátterében. Utóbbi esetekben valószínűbb, hogy óriásbolygó okozza a gerjesztést. Vizsgálataink szerint tehát a fiatal, masszív törmelékkorongok egy részében igen valószínű, hogy az öngerjesztés mellett nagybolygók hatása is szükséges a korong dinamikai gerjesztéséhez. Az, hogy jó néhány esetben maga a perturbáló égitest is megtalálható, azzal kecsegtet, hogy ez a kapcsolat megfordítva is felhasználható: az ilyen rendszerek jó célpontjai lehetnek a bolygókeresési kutatásoknak.

## **Összefoglalás**

Az OTKA pályázat támogatásával végrehajtott projektek az elmúlt években előrevitték a magyarországi csillagkeletkezési kutatásokat. Az eredmények közül kiemelendők a nagyműszeres méréseken alapuló eredmények (A T Tauri rendszer VLT/SPHERE mérése; a VLT/MIDI interferométer használata fiatal csillagokra), a fiatal eruptív csillagokkal kapcsolatos nagyszámú vizsgálat, és a törmelékkorongokban az addig szinte ismeretlen gázkomponens felfedezése.