

# DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

## A csillagkeletkezési folyamat kezdete

A különösen hideg csillagközi anyag szerkezeti elemei és a bennük zajló csillagkeletkezés multispektrális leírása

**Zahorecz Sarolta**

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola

Részecskefizika és csillagászat program

Doktori iskola vezetője: Dr. Tél Tamás

Doktori program vezetője: Dr. Palla László

Témavezető: Dr. Tóth L. Viktor, adjunktus

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar, Csillagászati Tanszék

Budapest

2016



## Bevezetés

A csillagkeletkezés korai szakaszának vizsgálata és a fiatal csillagok fizikai paramétereinek meghatározása az egyik legtöbbet kutatott téma az asztrofizikában. Magyarországon évtizedek óta magas szinten végeznek a csillagkeletkezéshez és fiatal csillagokhoz kapcsolódó kutatómunkát az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetében, illetve az Eötvös Loránd Tudományegyetem Csillagászati Tanszékén, a Szegedi Tudományegyetemen és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Gothard Asztrofizikai Observatórium és Multidiszciplináris Kutatóközpontban Szombathelyen is.

A csillagkeletkezés helyszíne a hideg, sűrű csillagközi anyag, mely elsősorban infravörös és szubmilliméteres hullámhosszakon figyelhető meg. A Planck űrtávcső teljes égbolt felmérése lehetővé tette a Tejútrendszerben található hideg felhők azonosítását. Ezt a feladatot a nemzetközi Galactic Cold Cores projekt munkatársai végezték el, mely csoport munkájához 2009-ben csatlakozott az Eötvös Loránd Tudományegyetem Csillagászati Tanszéke témavezetőm, Tóth L. Viktor vezetésével. Doktori kutatómunkám során ebben a nemzetközi csoportban dolgoztam. A Planck űrtávcső által észlelt felhők eloszlásának, fizikai tulajdonságainak statisztikus vizsgálata mellett a csoport a Herschel űrtávcső adatait és földi multipsektális méréseket felhasználva egy elfogulatlanul kiválasztott részmintára részletes vizsgálatát tűzte ki célul.

## Célkitűzések

A Galaktikus csillagkeletkezés vizsgálata hagyományosan néhány, elsősorban közeli csillagkeletkezési régióban történik. Ezért ismereteink is a Tejútrendszer kiválasztott részeire korlátozódnak. A Planck űrtávcső teljes égbolt felmérése lehetővé tette, hogy a hideg felhőcsomókat azonosítsuk a teljes Tejútrendszerben és kiegészítő nagy felbontású mérések segítségével fizikai paramétereiket meghatározzuk. Hogyan oszlanak el ezek a hideg sűrű felhőcsomók? Látszik-e az eloszlásban valamilyen szerveződés? Felmerül a kérdés, hogy a csillagközi anyag hideg felhőcsomóinak fizikai paramétereik galaxisunk különböző részein azonosak-e? A vizsgálat során különleges objektumokat is találunk, pl. nagyon nagy tömegű, és/vagy sűrűségű, illetve az aktív csillagkeletkeztető molekulafelhőktől távolabb lévő, izolált felhőcsomókat. Minden

sűrű, hideg felhőcsomóban zajlik csillagkeletkezés? Mutatnak-e csillagkeletkezést a magasabb galaktikus szélességen lévő diffúzabb felhőcsomók? Milyen és mennyi csillag keletkezik a Planck hideg csomókban?

Dolgozatom során a fenti kérdésekre kerestem választ. Kutatásom célkitűzései az alábbiak voltak:

- A Planck hideg felhőcsomó katalógus forrásai közepes skálájú (50-100 pc) eloszlásának vizsgálata. Felhőcsomó csoportok azonosítása és a csoportok geometriai tulajdonságainak leírása korszerű matematikai módszer alkalmazásával.
- A Planck hideg felhőcsomók szerkezetének leírása a nemzetközi kutatócsoport mérései és saját megfigyelések felhasználásával, infravörös fotometriai (Herschel) és molekulaszpektroszkópiai ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ) adatok alapján.
- Hideg sűrű felhőmagok azonosítása és fizikai, geometriai paraméterei meghatározása szimulációs módszerek felhasználásával.
- Csillagkeletkezés leírása kiválasztott felhőcsomókban. Fiatal csillagok azonosítása, koruk, fizikai tulajdonságaik megállapítása multispektrális fotometriai adatok és modellek felhasználásával.
- A csillagkeletkezés időbeli és térbeli lefutásának vizsgálata, környezeti paraméterek figyelembe vételével.

## Alkalmazott módszerek

A Planck hideg felhőcsomók eloszlását a minimális kifizető módszerrel vizsgáltam meg. Az eredményeket Monte Carlo szimulációkkal vettem össze.

A fiatal csillagok jellemzéséhez archív adatbázisokból gyűjtöttem össze a fotometriai adatokat és egy online elérhető spektrális energialeoslás adatbázis segítségével választottam ki a legjobban illeszkedő modelleket, amelyekből a fiatal csillag és körülötte lévő korong-burok rendszer paramétereit megbecsültem.

A G163.82-8.44-es jelű forrás esetében az ammónia rádióspektroszkópiai mérések modellezéséhez felhasználtam a CPPSIMU nevű szoftvert. A háromdimenziós modell eloszlását a mag hőmérsékletének és sűrűségének Python programmal hoztam létre, az eredmények kiértékelését is az általam írt Python rutinokkal végeztem.

A kutatás során Python és IDL nyelven írtam az adatfeldolgozáshoz szükséges rutinokat. A molekulavonalas mérések tervezéséhez, feldolgozásához és elemzéséhez a Gildas programcsomag megfelelő programjait (ASTRO, CLASS, GREG) használtam, mind az effelsbergi távcső, mind a PdBI interferometrikus rendszer adataira.

## Tézisek

1. A Planck hideg felhőcsomók eloszlását vizsgáltam meg a teljes égbolton és egy jól ismert, közeli csillagkeletkezési területekből álló régióban. A Planck hideg felhőcsomók eloszlása nem véletlenszerű, hanem párokat, csoportokat alkotnak. A teljes égbolton lévő források esetén 1,5-szer több ( $25\sigma$ ) csoportot találtam, mint véletlen eloszlással jellemezhető Monte Carlo szimulált mintákban. Az azonosított csoportok 1/3-a legalább 4 taggal rendelkezik a valós mintában. E csoportok aránya a teljes mintában kétszer annyi, mint véletlen eloszlással jellemezhető Monte Carlo szimulált mintákban. A csoportok jellemzéseként megvizsgáltam az elnyúltságukat és ez független a csoportok meghatározásakor használt csoporttagok közötti maximális távolságtól. A csoportok a megfigyelt mintában és a véletlenszerű szimulált mintában is azonos ellipszissel közelíthetők, melyek tengelyeinek aránya 1:5.
2. A Galaxis fősíkjában kiválasztott Planck hideg felhőcsomók fizikai paramétereit (tömeg, méret, porhőmérséklet, oszlopsűrűség) határoztam meg. A Hi-GAL felmérés által lefedett és az első nyilvánosan elérhető Planck katalógusban (ECC) szereplő felhőcsomók közül azokat vizsgáltam, melyek hőmérséklete 15 K-nél alacsonyabb és a Planck távcső jó jel/zaj aránnyal detektálták őket. A vizsgált objektumokat egymáshoz hasonlóknak találtam, csak a Galaxis közép-pontjának irányában elhelyezkedő forrásokra találtam szignifikáns eltérést a paraméterekben. A vizsgált felhőcsomók 15%-a nem mutat sem kis- sem nagytömegű csillagkeletkezésre utaló jelet. 2/3-ad részük a Galaxis külső részén helyezkedik el, ezen források a használt vizsgálati módszerek miatt nem voltak részei az eddigi, nagytömegű csillagkeletkezést vizsgáló munkáknak. Kiválasztottam és elemeztem azt a 3 objektumot, amelyek még nem mutatnak nagytömegű csillagkeletkezést, de fizikai paramétereik alapján erre képesek, illetve azt a 2 objektumot, amelyek a Galaxis külső részében helyezkednek el és

képesek nagytömegű csillagkeletkezésre. Megmutattam, hogy bennük ennek jelei már megfigyelhetők.

3. A  $|b| > 30$  galaktikus szélességen felfedezett csillagközi felhők jellemzője, hogy hozzánk közel helyezkednek el, alacsony sűrűségűek és általában nem mutatnak csillagkeletkezésre utaló jeleket. Az eddigi vizsgálatok alapján azonban van két felhő közöttük, az LDN1642 és az MBM12 jelűek, amelyek mutatnak aktív csillagkeletkezést. Az LDN1642 jelű felhő irányában 4 infravörös pontforrást elemeztem. Egy eddig a felhő előterében található mondott barnatörpét a felhőhöz tartozó fiatal objektumnak azonosítottam. Három fiatal kistömegű csillag fizikai paramétereit meghatároztam, tömegük 0,2-1,6 naptömeg közötti, a becsült hőmérsékletük 2800-4600 K.
4. A California nebulára kimutattam, hogy benne néhány millió évvel ezelőtt indult a csillagkeletkezés és jelenleg is tart a kis- és közepes tömegű csillagok keletkezése. 62 infravörös pontforrás részletes elemzését végeztem el a G163.82-8.44-es Planck hideg felhőcsomóban. 11 kistömegű és 2 közepes tömegű fiatal csillagot azonosítottam különböző fejlődési állapotukban, meghatároztam a korukat és fizikai paramétereiket modellek felhasználásával. A kapott becsült tömegek  $0,1-5,5 M_{\odot}$ , míg a hőmérsékletek 3500-7500 K közöttiek.
5. A California nebulában, a G163.82-8.44-es jelű Planck hideg felhőcsomóban a Herschel űrtávcső mérései alapján azonosítottam a legsűrűbb részt. Erre rádióspektroszkópiai méréseket végeztem az Effelsbergben található 100 m-es rádiótávcsővel. Egy kettős felhőmagot fedeztem fel. Az adatok feldolgozása után radiatív transzfer modell segítségével határoztam meg a jó jel/zaj arányú és nagy spektrális felbontású mérésekből a sűrű magok méretét, sűrűség és hőmérséklet eloszlását. A kettős mag komponensei azonos hőmérsékletűek, míg méretükben és tömegükben rendre 6-szoros és 10-szeres eltérés van.
6. G11.09-0.10 jelű infravörös sötét felhőben korábbi vizsgálatok a Herschel űrtávcső adatai alapján 24 különböző fejlődési állapotban lévő felhőmagot azonosítottak. Egy kisebb részterületét, mely három felhőmagot fedett le, a PdBI interferométer rendszer adatai alapján elemeztem. Összesen 9 fragmentu-

mot azonosítottam az interferometrikus mérések alapján, melyek mérete 0,08-0,17 pc, tömegük pedig 6-45  $M_{\odot}$  közötti. Két felhőmag gravitációsan kötött.

## Következtetések és kitekintés

A Planck hideg felhőcsomók eloszlásában erős csoportosulás látszik az MST módszer alkalmazásával. A hideg csomók eloszlásvizsgálata alapján a hideg csillagközi anyag szerveződése a tipikus izolált molekulafelhőknél is nagyobb alegyégeket alkot.

A hideg felhőcsomókra a Tejútrendszer középpontja közelében az átlagosnál magasabb hőmérséklet és oszlopsűrűség értékeket mutattam ki.

A Planck felhőcsomók csillagkeletkezését alacsony, közepes és magas galaktikus szélességeken is vizsgáltam. Mindhárom galaktikus szélesség tartományban találtam csillagkeletkezést, de nem minden egyes Planck hideg felhőcsomó mutat csillagkeletkezést. A nagyobb felhőcsomó csoportokban akár több millió éven át folyamatosan keletkezhetnek csillagok.

A galaxisunkban zajló csillagközi anyag szerkezetének alapos megismerése irányában a következő lépés nagyszámú objektumra rádióspektroszkópiai mérések végzése, a molekuláris tartalom felmérésére. Extenzív felmérést végeztünk az Osaka 1,85m-es távcsővel a Taurus-Auriga-Perseus és California csillagkeletkeztető területekre, melynek eredményeit még idén tervezem publikálni.

A Planck hideg felhőcsomók sokfélék paramétereik és a csillagkeletkezést tekintve, a nemzetközi csillagász közönség is levonta ezt a következtetést, ezért nagyszabású felmérések indultak. Több ezer felhőcsomó részletes vizsgálatát végzik a legjobb elérhető műszerekkel. A 3 legjelentősebb a TOP (TRAO Observations of Planck cold clumps), SCOPE (SCUBA-2 Continuum Observations of Pre-protostellar Evolution<sup>1</sup>) és SAMPLING (SMT "All-sky" Mapping of PLanck Interstellar Nebulae in the Galaxy<sup>2</sup>). A SAMPLING keretében az arizonai 12 m-es SMT távcsővel ~600 kiválasztott Planck hideg felhőcsomót mérünk a  $^{12}\text{CO}$  (2-1) és  $^{13}\text{CO}$  (2-1) vonalakon az ESO Garching koordinálásával.

11 különböző fejlődési állapotban lévő Hi-GAL sűrű felhőmagra az APEX 12 m-es távcsövének segítségével végzünk kémiai vizsgálatot az ESO, Arcetri Astrophysical Observatory, Queen Mary University of London és ELTE együttműködésével. A

---

<sup>1</sup><https://www.eaobservatory.org/jcmt/science/large-programs/scope/>

<sup>2</sup><http://sky-sampling.github.io/>

felhőmagok kémiai fejlődését vizsgálom molekulagyakoriságok és deuterizáció segítségével. A deuterizáció a fejlődési állapot előrehaladtával csökken, az első eredményeket 2016 őszén publikálom.

Amint azt dolgozatomban a G163.82-8.44-es jelű felhőcsomóra és a California nebulára bemutattam, fiatal csillagokat eredményesen jellemezhetjük multispektrális adatok felhasználásával, a csillagkeletkezésre becslést adhatunk. Az arizoniai egyetemmel együttműködve további csillagkeletkezési területeken végezzük a fiatal csillagok jellemzését.



## A tézisek alapjául szolgáló publikációk

1. **Zahorecz, S.**; Jimenez-Serra, I.; Wang, K.; Testi, L.; Tóth, L. V.; Molinari, S.: *Physical properties of Galactic Planck cold cores revealed by the Hi-GAL survey*, 2016, A&A, 591, 105
2. Ragan, S. E.; Henning, T.; Beuther, H.; Linz, H.; **Zahorecz, S.**: *Fragmentation and kinematics of dense molecular cores in the filamentary infrared-dark cloud G011.11-0.12*, 2015, A&A, 573, 119
3. Malinen, J.; Juvela, M.; **Zahorecz, S.**; Rivera-Ingraham, A.; Montillaud, J.; Arimatsu, K.; Bernard, J.-Ph.; Doi, Y.; Haikala, L. K.; Kawabe, R.; Marton, G.; McGehee, P.; Pelkonen, V.-M.; Ristorcelli, I.; Shimajiri, Y.; Takita, S.; Tóth, L. V.; Tsukagoshi, T.; Ysard, N.: *Multiwavelength study of the high-latitude cloud L1642: chain of star formation*, 2014, A&A, 563, 125
4. **Zahorecz, S.**; Tóth, L. V.; Marton, G.; Ueno, M.; Tamura, M.; Kawamura, A.; Kitamura, Y.: *Observability of YSOs with the WISE and AKARI infrared space observatories*, 2013, AN, 334, 928
5. **Zahorecz, S.**; Tóth, L. V.; Marton, G.; Onishi, T.; Balázs, L. G.; Fehér, O.; Kawamura, A.; Kitamura, Y.; Lisztes, M.; Nishimura, A.; Pásztor, L.; Pintér, S.; Rácz, I.; Tamura, M.; Sese, R. M. D.; Ueno, M.: *YSOs in Taurus-Auriga-Perseus and Orion*, 2013, IAUS, 292, 64
6. Juvela, M.; Ristorcelli, I.; Pagani, L.; Doi, Y.; Pelkonen, V.-M.; Marshall, D. J.; Bernard, J.-P.; Falgarone, E.; Malinen, J.; Marton, G.; McGehee, P.; Montier, L. A.; Motte, F.; Paladini, R.; Tóth, L. V.; Ysard, N.; **Zahorecz, S.**; Zavagno, A.: *Galactic cold cores. III. General cloud properties*, 2012, A&A, 541, 12
7. Planck Collaboration; Ade, P. A. R.; Aghanim, N. ... Marton, G.; Toth L. V.; **Zahorecz, S.** : *Planck early results. XXIII. The first all-sky survey of Galactic cold clumps*, 2011, A&A, 536, 23

## A dolgozat témájában megjelent további publikációk

1. Marton, G.; Tóth, L. V.; Paladini, R.; Kun, M.; **Zahorecz, S.**; McGehee, P.; Kiss, Cs.: *An all-sky support vector machine selection of WISE YSO candidates*, 2016, MNRAS, 458, 3479
2. Ginsburg, A.; Kruijssen, J. M. D.; Longmore, S. N.; Koch, E.; Glover, S. C. O.; Dale, J. E.; Commercon, B.; Giannetti, A.; McLeod, A. F.; Testi, L.; **Zahorecz, S.**; Rathborne, J. M.; Zhang, Q.; Fontani, F.; Beltrán, M. T.; Rivilla, V. M.: *CAMELOT: Cloud Archive for METadata, Library and Online Toolkit*, 2016, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1605.006
3. Fehér, O.; Tóth, L. V.; Ward-Thompson, D.; Kirk, J.; Kraus, A.; Pelkonen, V.-M.; Pintér, S.; **Zahorecz, S.**: *Structure and stability in TMC-1: Analysis of NH<sub>3</sub> molecular line and Herschel continuum data*, 2016, A&A, 590, 75
4. Montillaud, J.; Juvela, M.; Rivera-Ingraham, A.; Malinen, J.; Pelkonen, V.-M.; Ristorcelli, I.; Montier, L.; Marshall, D. J.; Marton, G.; Pagani, L.; Toth, L. V.; **Zahorecz, S.**; Ysard, N.; McGehee, P.; Paladini, R.; Falgarone, E.; Bernard, J.-P.; Motte, F.; Zavagno, A.; Doi, Y.: *Galactic cold cores. IV. Cold submillimetre sources: catalogue and statistical analysis*, 2015, A&A, 584, 92
5. Toth, L. V.; Marton, G.; **Zahorecz, S.**: *Massive cold cloud clusters*, 2015, IAU General Assembly, Meeting #29, id.2256922
6. Toth, L. V.; Fehér, O.; Ward-Thompson, D.; **Zahorecz, S.**; Pelkonen, V.-M.: *Structure and stability in TMC-1*, 2015, IAU General Assembly, Meeting #29, id.2256848
7. Marton, G.; **Zahorecz, S.**; Toth, L. V.; McGehee, P. M.; Kun, M.: *Machine learning in infrared object classification - an all-sky selection of YSO candidates*, 2015, IAU General Assembly, Meeting #29, id.2256704
8. Tóth, L. V.; **Zahorecz, S.**; Marton, G.; Verebélyi, E.: *A statistical view on the galactic cold ISM distribution*, 2015, Highlights of Astronomy, Volume 16, pp. 579-579

9. Tóth, L. V.; Marton, G.; **Zahorecz, S.**; Balázs, L. G.; Ueno, M.; Tamura, M.; Kawamura, A.; Kiss, Z. T.; Kitamura, Y.: *The AKARI Far-Infrared Surveyor young stellar object catalog*, 2014, PASJ, 66, 17
10. Tóth, L. V.; **Zahorecz, S.**; Marton, G.; Onishi, T.; Balázs, L. G.; Fehér, O.; Kawamura, A.; Kitamura, Y.; Lisztes, M.; Nishimura, A.; Pásztor, L.; Pintér, S.; Racz, I.; Tamura, M.; Ueno, M.: *Pattern analysis of young stellar clusters*, 2013, IAUS, 292, 113
11. Marton, G.; Kiss, Z. T.; Tóth, L. V.; **Zahorecz, S.**; Pásztor, L.; Ueno, M.; Kitamura, Y.; Tamura, M.; Kawamura, A.; Onishi, T.: *YSO Clusters on Galactic Infrared Loops*, 2012, ASSP, 29, 97