



Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizika Doktori Iskola

Szilágyi Máté (mateszilagyi1994@gmail.com)

Részecskefizika és Csillagászat PhD

A csillagkeletkezés vizsgálata az ESA Gaia-küldetésének legújabb eredményeivel

Témavezetők: Kun Mária, Ábrahám Péter

4. félévi beszámoló

1. Bevezetés

A csillagok csoportosan, csillagkeletkezési régiókban keletkeznek. A csillagkeletkezési régiókban egyaránt vizsgálható a csillagkeletkezés alapanyaga (a hideg csillagközi gáz és por), a csillagfejlődés legkorábbi fázisai (protocsillagok és fősorozat előtti csillagok), valamint a fiatal csillagok és környezetük kölcsönhatásai. A legtöbb csillagképző felhőnek csupán a kétdimenziós szerkezetét ismerjük, látóirányú struktúráikról és sebességükről alig rendelkezünk információval.

A Gaia az Európai Űrügynökség (ESA) asztrometriai űrobszervatóriuma, melynek fő feladata a Tejútrendszer fejlődésének vizsgálata. Ehhez több, mint egymilliárd csillag távolságát, fényességét és sajátmozgását fogja a lehető legpontosabban meghatározni. A Gaia eredményei lehetőséget teremtenek a csillagkeletkezés környezetének jobb megismerésére, a csillagkeletkezési régiók háromdimenziós szerkezetének és a fiatal csillagok sebességeloszlásának vizsgálatára.

2. Előző három félév

Az előző félévek alatt a Cepheus Flare csillagkeletkezési régió fiatal csillagokból (young stellar object, YSO) álló csoportjait vizsgáltam. Ezen a területen több, látszólag különálló felhőben keletkeznek csillagok (Kun és mtsai, 2009). A kutatás során olyan csillagokat kerestem, melyek hasonló parallaxissal és sajátmozgással rendelkeznek, mint az ismert fiatal csillagok. Ehhez Kun és mtsai (2009), Kirk és mtsai (2009) és Tachihara és mtsai (2005) fiatalcsillag-katalógusait, továbbá Zari és mtsai (2018) YSO-jelölt katalógusát használtam. Ezeknek a csillagoknak az 1"-es környezetében kerestem a Gaia-adatait, és továbbiakban azokat a csillagokat használtam, melyeknek parallaxis és sajátmozgás-hibája rendre 10 és 50–50 %-nál, továbbá RUWE-adatuk (re-normalized unit weight error) 1,6-nál kisebb.

Figyelmen kívül hagytam azokat a csillagokat is, melyek távolságuk alapján biztosan elő-, vagy háttér-csillagok. A megmaradt csillagokra felhőnként kiszámoltam a távolságok medián abszolút eltérését (median absolute deviation, MAD):

$$\text{MAD}(d) = \text{median}(|d_i - \text{median}(d)|).$$

A $d_{\text{med}} \pm 5 \text{MAD}(d)$ intervallumokon belüli csillagokra kiszámoltam a tangenciális sebesség-komponensek MAD-jeit is. Azokat a csillagokat tekintetem csoporttagoknak, melyek $v_{1,\text{med}} \pm 5 \text{MAD}(v_1)$ és $v_{b,\text{med}} \pm 5 \text{MAD}(v_b)$ intervallumokon belül találhatóak. A Gaia adatbázisából letöltöttem az összes csillagot, ahol:

- $100^\circ < l < 125^\circ$,
- $d < 500 \text{ pc}$,
- $|\mu_\alpha^*/\sigma_{\mu_\alpha^*}| > 2$,
- $\text{RUWE} < 1.6$.
- $8^\circ < b < 22^\circ$,
- $\varpi/\sigma_\varpi > 10$,
- $|\mu_\delta/\sigma_{\mu_\delta}| > 2$,

Ezek közül a $d_{\text{med}} \pm 5 \text{MAD}(d)$, $v_{1,\text{med}} \pm 5 \text{MAD}(v_1)$ és $v_{b,\text{med}} \pm 5 \text{MAD}(v_b)$ intervallumokon belüli csillagok számítanak YSO-jelölteknek. AllWISE adatok és Koenig & Leisawitz (2014) klasszifikációs sémájának segítségével megállapítottam, hogy ezen csillagok közül 38 csillag Class II típusú fiatal csillag, továbbá 2 csillag rendelkezik átmeneti koronggal. A többi csillag szín-fényesség diagramok alapján kistömegű, korong nélküli fiatal csillag.

Nemcsak a molekulafelhőkhöz köthető csoportokat, de a közelebbi, 150–200 pc közti YSO-kat is tanulmányoztam, melyek két csoportra oszthatók. Egyik az ún. Cepheus asszociáció, melynek néhány együttmozgó csillagáról született már publikáció (Guillout és mtsai, 2010; Faherty és mtsai, 2018; Klutsch és mtsai, 2020). A másíkról még nem született publikáció. A legfényesebb csillag után HD 190833 csoportnak neveztük el.

A 3. félév során többedmagammal elkezdtem tanulmányozni az úgynevezett Radcliffe-hullámot. Zucker és mtsai 2019, 2020 közeli csillagkeletkezési régiók irányába vetülő fősorozati csillagok extinkciójának segítségével meghatározták a molekulafelhők és sötétfelhők távolságát. A felhők eloszlása nem véletlenszerű, nagy részük az északi galaktikus pólus irányából nézve egy körülbelül 2,7 kpc hosszúságú egyenest, oldalirányból nézve egy 160 pc amplitúdójú szinuszhullám alakú struktúrát alkot.

Azonban kérdéses, hogy a fiatal csillagok eloszlása ugyanezt a struktúrát mutatja-e. Ennek vizsgálatához Marton és mtsai (2019) fiatalcsillag-katalógusát használom. E katalógus több, mint 100 millió AllWISE-forrásról állapítja meg gépi tanulmányos módszerrel, hogy az adott forrás fiatal csillag, fősorozati csillag, elfejlődött csillag, avagy extragalaktikus objektum-e. További vizsgálatokhoz a 90%-nál nagyobb valószínűségű YSO-kat használtam.

3. Aktuális félév

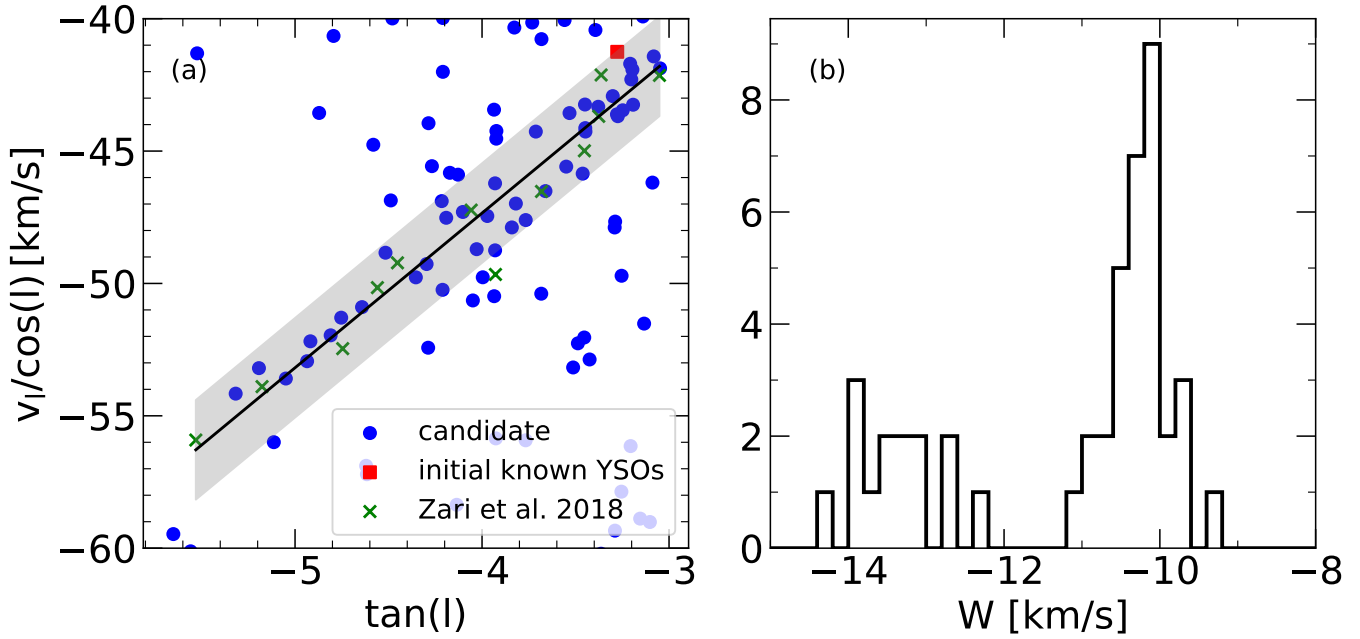
Doktori tanulmányaim kezdetén a Gaia második adatközlése (DR2) volt elérhető, 2020. decemberében elérhetővé vált a harmadik adatközlés előzetes változata (EDR3). A félév elején mindkét kutatásom esetén áttértem az EDR3-as adatok használatára.

A Cepheus Flare 200 pc-nél közelebbi csillagainak esetén az előző fejezetben leírt módszerrel sok együttmozgó, de nem fiatal csillagot is megtalálunk, ezért új, Damiani és mtsai (2019)-ben leírt módszerhez folyamodtam. Az egy csoporthoz tartozó csillagoknak hasonló UVW sebességekkel kell rendelkezniük:

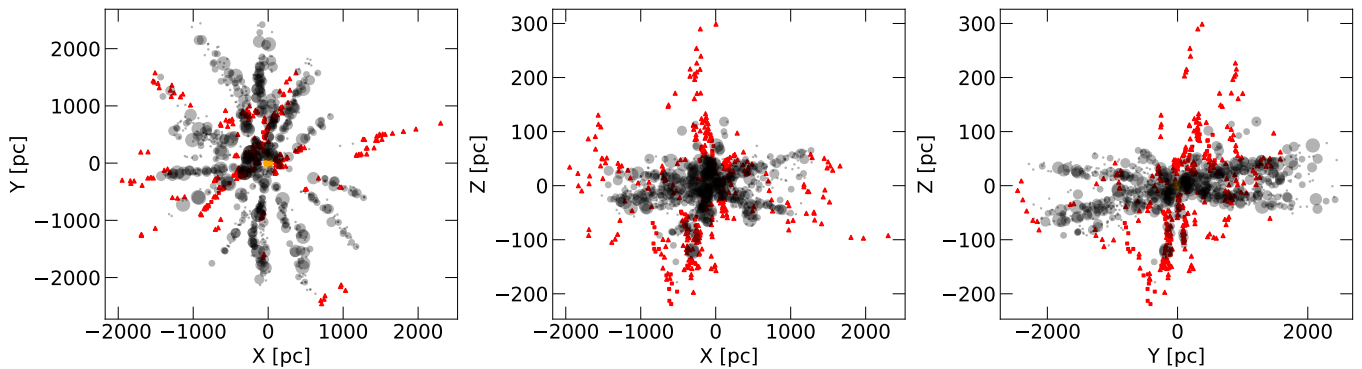
$$\begin{aligned} U &= v_R \cos b \cos l - R \sin b \cos l \mu_l - R \sin l \mu_l, \\ V &= v_R \cos b \sin l - R \sin b \sin l \mu_l + R \cos l \mu_l, \\ W &= v_R \sin b + R \cos b \mu_b. \end{aligned}$$

A v_R radiális sebességek a legtöbb csillag esetén nem ismertek, ezért ezek a sebességkomponensek nem számolhatóak ki. Azonban az egyenletek átrendezhetőek:

$$\begin{aligned} v_l / \cos l &= V - U \tan l, \\ W &= \frac{R \mu_b + (V_0 \sin l + U_0 \cos l) \sin b}{\cos b}. \end{aligned}$$



1. ábra. Az (a) panelen HD 190833 csoportra vetülő, a bementi listánkban lévő YSO(-jelöltek) vannak ábrázolva. A rájuk illesztett egyenes és az illesztés hibája által körülhatárolt terület megadja, mely csillagokra számoltuk ki a W sebességkomponenseket. A (b) panelen ábrázolt csillagok tekinthetők csoporttagoknak.



2. ábra. Az ábra a csoportkeresésekből kapott halmazokat (fekete körök), illetve Zucker és mtsai, 2019, 2020-ban publikált felhőket (piros három-, illetve négyszögek) mutatja.

Vagyis a $\tan l - v_l/\cos l$ fázistérben az egy csoportba tartozó csillagok egy egyenes mentén helyezkednek el, melynek meredeksége az U , az y -tengely metszéspontja pedig V komponenseket határozza meg. Ezek segítségével kiszámolható egyenként a csillagok W sebességkomponense, melyek eloszlása meghatározza, mely csillagok tartoznak egy csoportba.

Összesen 418 csillagról állapítottuk meg, hogy csoporttagok. A kapott eredményekből született publikációt a *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* elfogadta közlésre. Az L1251-ben található YSO-jelöltek spektroszkópiai megfigyelésére OPTICON-pályázatot nyújtottunk be a Calar Alto-i 2,2 méters távcsőre, azonban a pályázatot elutasították.

A Radcliffe-hullám vizsgálatához azokat a YSO-jelölteket használtam, melyeknek parallaxis-hibája 5 %, sajátmozgás-hibái 10–10 %-nál, RUWE-jük 1,4-nél kisebb. A csillagokat galaktikus hosszúság szerint 30 fok szélességű, szélesség szerint 10 fok szélességű, illetve távolság szerint 500 pc szélességű szeletre osztottam fel. Minden szeletben egy Python-alapú, 5D-s (galaktikus koordináták, távolság, tangenciális sebességek) HDBSCAN algoritmust használtam csoportok keresésére. A minimum csoportméretet 30-nak állítottam be. A kapott eredmények a 2. ábrán láthatóak. Ezek azonban még nem adják vissza a Radcliffe-hullám jellegzetes struktúráját, ezért a paraméterek még módosításra szorulnak.

Doktori tanulmányaim folytatásaként tervbe van véve a Radcliff-hullám tanulmányozásának befejezése, illetve a Cepheus Flare-től délre található Cepheus Buborék irányára vetülő csillagkeletkezési régiók analizálása a Cepheus Flare vizsgálatához alkalmazott módszerek segítségével.

4. Publikációk

- M. Szilágyi, M. Kun, P. Ábrahám: A Gaia view of Cepheus Flare (MNRAS-ban elfogadva) ([arXiv](#), [MNRAS](#))
- Az ESO Hungary számára 3 cikket fordítottam le:
 - [Lebegő távcső?](#)
 - [Akvarell az égről](#)
 - [Csillagászok képet alkottak az M87-beli fekete lyukat körülvevő mágneses mezőről](#)

5. Konferenciák & előadások

- European Astronomical Society Annual Meeting 2020
 - poszter: Szilágyi et al.: 3D structure of the Cepheus flare star forming region revealed by Gaia DR2
- 2. félév elején az addigi eredményeinket Kun Máriával egy csoportszeminárium keretében bemutattuk.
- A 4. félév végén a Cepheus Flare-ről szóló kutatásunkat a Csillagászati Intézet szemináriumán mutattam be. ([videó](#))

6. Tanulmányi tevékenység

- Asztrostatisztika II. (FIZ/2/059E)
- Fejezetek a többes csillag-és bolygórendszerek elméleti és megfigyelési kérdéseiből II. (FIZ/2/100E)

Hivatkozások

Damiani, F., Prisinzano, L., Pillitteri, I., Micela, G., & Sciortino, S. 2019, A&A, 623, A112

Faherty, J. K., Bochanski, J. J., Gagné, J. és mtsai. 2018, ApJ, 863, 91

Guillout, P., Frasca, A., Klutsch, A., Marilli, E., & Montes, D. 2010, A&A, 520, A94

Kirk, J. M., Ward-Thompson, D., Di Francesco, J. és mtsai. 2009, ApJS, 185, 198

Klutsch, A., Frasca, A., Guillout, P. és mtsai. 2020, A&A, 637, A43

Koenig, X. P. & Leisawitz, D. T. 2014, ApJ, 791, 131

Kun, M., Balog, Z., Kenyon, S. J., Mamajek, E. E., & Gutermuth, R. A. 2009, ApJS, 185, 451

Marton, G., Ábrahám, P., Szegedi-Elek, E. és mtsai. 2019, MNRAS, 487, 2522

Tachihara, K., Neuhäuser, R., Kun, M., & Fukui, Y. 2005, A&A, 437, 919

Zari, E., Hashemi, H., Brown, A. G. A., Jardine, K., & de Zeeuw, P. T. 2018, A&A, 620, A172

Zucker, C., Speagle, J. S., Schlafly, E. F. és mtsai. 2020, A&A, 633, A51

Zucker, C., Speagle, J. S., Schlafly, E. F. és mtsai. 2019, ApJ, 879, 125

A kutatás az ELKH CSFK Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézetében történt. Köszönöm a CSI igazgatóságának, hogy lehetővé teszik számomra az intézeti munkavégzést.