

IV. félévi beszámoló

Hegedűs Viola (vhegedus@gothard.hu)

Csillagászat és Űrfizika PhD program

Témavezető: Dr. Mészáros Szabolcs

A dolgozat címe: A Tejútrendszer kémiai feltérképezése

1. Bevezetés

A Tejútrendszer jelenlegi struktúráját részleteiben bár ismerjük, a múltbeli eseményekre és ezáltal kialakulásának folyamatára számos módon következtethetünk. Ezért fontos Galaxisunk minél pontosabb és precízebb kemodinamikai feltérképezése, amihez fotometriai mérések és spektroszkópia egyaránt szolgáltat információt. Az SDSS-hez tartozó APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment) közel 700 ezer csillagról készített nagyfelbontású, közeli infravörös spektrumot, a GALAH (Galactic Archeology with HERMES) ezzel szemben 600 ezer csillagról rögzített hasonló felbontású optikai színeképet, a GES-nek (Gaia-ESO Survey) pedig szintén 100 ezernél több célobjektuma volt, az észlelés pedig a látható színekép tartományában történt.

A Tejútrendszer jelentős tömegét szolgáltató csillagok jó közelítéssel azt a gázösszetételt őrzik, amelyből születtek, azaz spektrumuk ujjlenyomatoként hordozza a Tejútrendszer korai anyagának alkotórészeit és azok egymáshoz viszonyított arányát. Ezáltal a csillagokban található kémiai elemek mennyiségének vizsgálatával betekintést nyerhetünk galaxisunk időbeli fejlődésébe. A spektroszkópiai észlelésekben a nagytömegű csillagok életének végén keletkezett ún. α -elemek (O, Mg, Si, S, Ca, Ti) eloszlásából látszódik, hogy a Galaxis korongjának két komponense, az ún. vékony és vastag korong eltérő kémiai összetételt mutat. Ezen kémiai kettősség (bimodalitás) lekövetésével és magyarázatával valósítható meg a kémiai evolúció modellezése.

2021 szeptemberétől kezdődően a Dr. Mészáros Szabolcs által vezetett MTA-ELTE Lendület Tejútrendszer Kutatócsoport tagja vagyok, és ennek keretein belül végeztem el az APOGEE, GALAH és GES nagyszabású spektroszkópiai programok adatainak összehasonlító analízisét, amelyből megjelent az elsőszerzős referált publikációm. Jelenleg pedig DKÖP-23 ösztöndíjasként modellezem a Tejútrendszer kialakulását és kémiai fejlődését.

2. Az előző három félévben elért kutatási eredmények összegzése

A Tejútrendszer feltérképezésénél alapvető probléma, hogy a különböző égboltszemlélő programok (SDSS, GALAH és GES) más-más adatokkal szolgálnak. A spektroszkópiai eredmények szisztematikus eltéréseinek oka, hogy a programok különböző elméleti modelleket alkalmaznak a csillagok kémiai analíziséhez, így paramétereik modelfüggők. A mérési eredmények összehasonlításával, ill. az eltérések korrelációinak ismeretében céloim a galaxisunk kémiai fejlődésének modellezése.

A doktori képzésem első évében arra kerestem a választ, hogy a Tejútrendszer kémiai térképe hogyan változik a felmérések közötti szisztematikus különbségek figyelembevételével. Amint az 1. ábrán megfigyelhető, a kémiai térkép mintázata függhet attól, hogy melyik adatsort használjuk (ld: Hegedűs *et al.* 2023, *A&A*, 670, A107). Ezen ábra az APOGEE DR17 és GALAH DR3 adatok által felvázolt elemgyakoriság-trendeket mutatja a magnéziumhoz viszonyítva.

Mindezeket követően, a harmadik félévben galaxisunk kémiai térképével és annak szimulációkkal történő reprodukálásával foglalkoztam. A Tejútrendszer kémiai fejlődésének modellezését numerikus kódokkal végezhetjük, ezért az OMEGA (One-zone Model for the Evolution of Galaxies) nevű programcsomagot használom. Ez a legfejlettebb nyílt forráskódú szoftver, amellyel galaxisok kémiai fejlődését modellezhetjük. Legújabb fejlesztésében a galaxis körül létesíthető egy forró gázhaló („hot gas reservoir”), avagy cirkumgalaktikus gáz, amelyben nincsenek csillagok. A modell így kétzónássá

vált, ezáltal a gáz behullása és kifúvása kétlépcsős. Ezen forráskódba saját munkaként, illetve kis részben a Kutatócsoport tagjaival együttesen, implementáltam számos paraméterezési lehetőséget, többek között a kettős behullású modell karakterisztikus idejeire, az időlépések beosztására, csillagok elemtermelési táblázataira, valamint a behulló anyag felületi tömegsűrűségeire vonatkozóan.

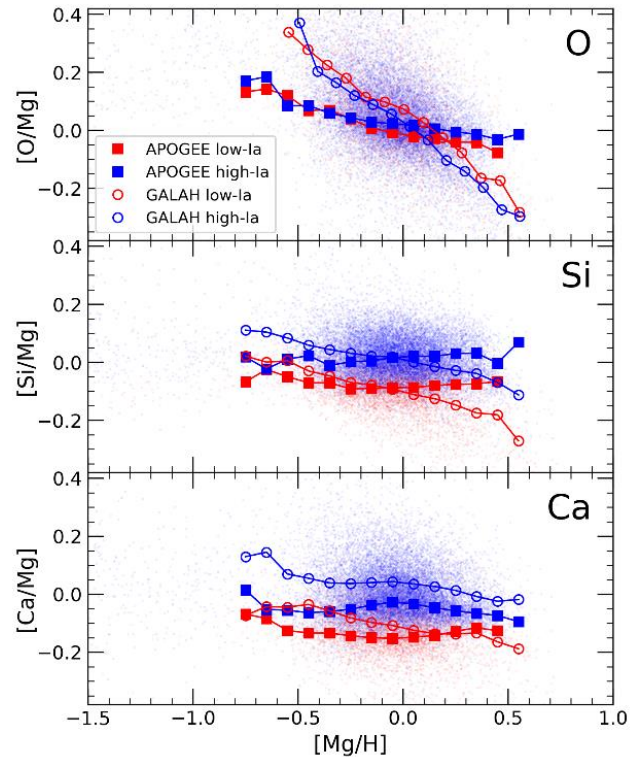
Az SDSS-V MWM (Milky Way Mapper) elemgyakoriságokkal foglalkozó munkacsoportjának megbeszélésein rendszeresen részt veszek, szükség esetén egyénileg végzek el rám bízott munkát, ill. a belső adatközlésekben lévő spektroszkópiai mérések privát eredményeit használom a galaktikus modelljeim illesztéséhez. Ahhoz, hogy az észlelésekhez illesszem az aktuális modellt, kiválogattam a MWM adatbázisából a Tejútrendszer csillagait, amely végett az eredeti adatsort ezért spektroszkópiai, asztrometriai, kinematikai, valamint mérési pontossági szempontok szerint megvágtam.

A modellezésem eredményeinek értelmezése céljából az elméleti görbét három különböző szakaszra bontottam az anyagbehullási epizódok tekintetében. Az első fázis a kezdeti, gyors anyagbehullást foglalja magába, majd elérve a behullási ráta minimumát a ~2 milliárd éves galaktikus kornál, ismét megindul a már nagyobb karakterisztikus lecsengési idejű második anyagbehullás 4 milliárd év körül. Számos feltételezés szerint ekkor ugyanis a korai Tejútrendszer ütközhetett egy törpegalaxissal, amelytől jelentős mennyiségű anyagot szívott el gravitációja által. Ezt a feltevést az általam implementált második anyagbehullást tartalmazó szimulációk is alátámasztják. Munkám során a behullási paraméterek (pl. gázbeáramlási időpontok, akkréciós idők stb.) variálásával keresem a megfigyelésekre legjobban illeszkedő galaktikus fejlődési görbét. Összességében pedig arra fókuszálok, hogy a csillagok elméleti úton meghatározott elemtermelési rátájának, valamint a galaxis egészét érintő, globális paraméterek (pl. csillagkeletkezési ráta, kezdeti tömegfüggvény stb.) együttes finomhangolásával reprodukáljam a MWM megfigyeléseivel felállított kémiai térképeket.

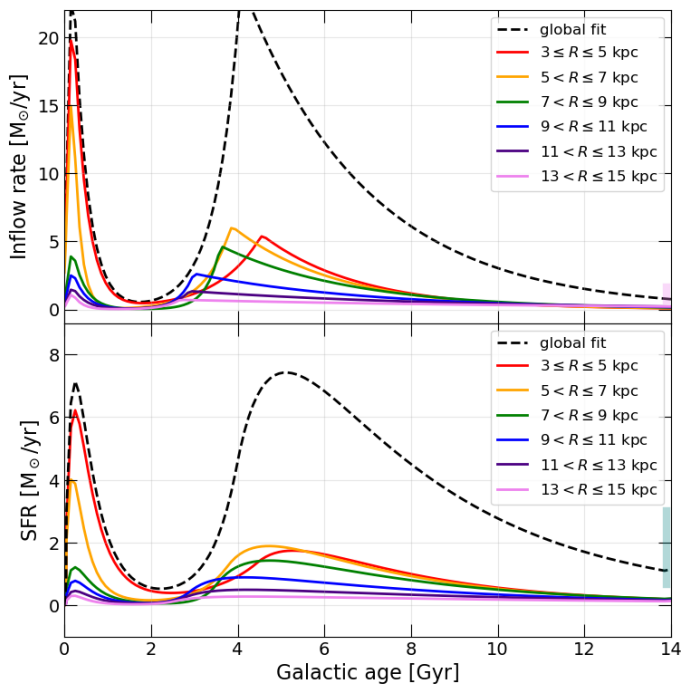
3. Az aktuális félévben elvégzett kutatások

A negyedik szemeszterben elkészítettem az illesztő algoritmust, amely segítségével a variálható paraméterek (pl. a már említett behullási paraméterek, illetve és a csillagok elemtermelési értékeihez, azaz yieldekhez rendelt szorzófaktorok) optimalizálhatók. Az illesztés jóságát maximalizálendő a python lmfit és scipy programcsomagjára esett a választásom, amelyet összefűztem a modellező szoftverrel. Az automatizált kód minden iterációban meghívja az OMEGA-t, és az adott paraméterek mellett lefutott elméleti evolúciós eredmény, valamint a megfigyelési adatok közötti reziduált számítja ki, és célja azt minimalizálni. Mindehhez a legkisebb négyzetek módszerén alapuló Levenberg-Marquardt algoritmust használom.

Ezzel a módszerrel tehát előálltak a Tejútrendszert globálisan modellező eredményeim, amelyre vonatkozóan a 2. ábra fekete szaggatott görbéi reprezentálják az anyagbehullási, valamint a csillagkelet-



1. ábra. A két csillagpopuláció APOGEE és GALAH felmérésekből származó medián α -elemgyakoriság trendjei $[Mg/H]$ függvényében. A háttérbe pöttyözött egyedi csillagok binnelése 0.1 dex-enként történt. (Forrás: Hegedűs et al. 2023)



2. ábra. A Tejútrendszerbe behulló anyag, valamint a csillagkeletkezés rátájának alakulása galaktikus kor [milliárd év] függvényében. (Forrás: Hegedűs et al. 2024, in prep.)

13., előadás: *Comparative analysis of atmospheric parameters from high-resolution spectroscopic sky surveys: APOGEE, GALAH and Gaia-ESO*

- ARIEL Consortium Meeting; Bologna, 2022. október 10-12., előadás: *Crossmatches with APOGEE*
- The Gaia Benchmark Stars Workshop; ESO headquarters Santiago, Vitacura, 2022. november 14-18., előadás: *Comparative analysis of atmospheric parameters from high-resolution spectroscopic sky surveys: APOGEE, GALAH and Gaia-ESO*
- SDSS-V/IRENA Science Festival; KU Leuven, Leuven, 2023. április 3-7., előadás: *Modelling the Galactic Chemical Evolution with OMEGA+*
- Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes III Conference; Tátralomnic, Slovakia, 2023. szeptember 11-15., poszter: Sz. Kálmán, Sz. Csizmadia, A. Derekas, V. Hegedűs, Gy.M. Szabó: *Tidal heating of the eccentric hot Jupiter WASP-186b*
- 2023. július 31. – augusztus 4.: SDSS-V Collaboration Meeting, New York előadás: *Modelling the Chemical Evolution of the Milky Way with Omega+*
- 2024. június 3-7.: SDSS-V Collaboration Meeting, New Mexico, előadás: *Reconstructing the Milky Way chemical map with Galactic Chemical Evolution tool OMEGA+*
- 2024. július 1-5., European Astronomical Society éves konferencia, Padova, Olaszország, poszter: *Reconstructing the Milky Way chemical map with Galactic Chemical Evolution tool OMEGA+*

5. Tanulmányi és oktatási tevékenység

- Az aktuális félév során elvégzett tárgy: A Naprendszer peremén szeminárium II. (FIZ/5/048)
- Demkó Petra SZTE TTIK fizika BSc, harmadéves hallgató témavezetése (Dr. Mészáros Szabolcs, Hegedűs Viola), *téma*: A Kis és Nagy Magellán-felhők csillagainak kiválogatása, illetve galaktikus kémiai evolúciójának modellezése

keletkezési ráta időfejlődését a galaktikus kor függvényében. A továbbiakban felosztottam a Galaxis korongját hat, egyenlő szélessésű koncentrikus gyűrűre, és azok kémiai fejlődését is illesztettem (ld. 2. ábra színes görbéi). Eközben pedig készítem elő az elsőszerzős referált publikációt, amely a fent tárgyalt eredményeket tárgyalja, egészen a Tejútrendszer csillagainak kiválogatásától kezdve, a kémiai kettősség analizálásán át, a különböző zónák evolúciójáig. A publikáció újítását ezen területen többek között az adja, hogy a MWM privát adatait elsőre használja kémiai evolúció modellezésére, az OMEGA+ szoftver módosított verziójával, valamint nem csupán az alfa-elemgyakoriságot, hanem 14 különböző elemmel felvázolt kémiai térképet modellez mind globálisan, mind pedig hatzónás megközelítéssel is.

4. Konferenciák

- AsteroCatS - A Legacy Catalogue for Spectroscopic Surveys; Bern, 2022. május 9-

6. **Publikációs lista:** <https://ui.adsabs.harvard.edu/public-libraries/axZOTqdESGK0cug4wRix8w>

- Sz. Kálmán, A. Bókon, A. Derekas, Gy. M Szabó, **V. Hegedűs**, *et al.*: Gravity darkening and tidally perturbed stellar pulsation in the misaligned exoplanet system WASP-33, 2022, A&A, 660, L2, DOI:10.1051/0004-6361/202
- Gy. Szabó M, Sz. Kálmán, L. Borsato, **V. Hegedűs**, *et al.*: Sub-Jovian desert of exoplanets at its boundaries: Parameter dependence along the main sequence, 2023, A&A, 671, A132, DOI: 10.1051/0004-6361/202244846
- **V. Hegedűs**, Sz. Mészáros, P. Jofré, G. S. Stringfellow, D. Feuillet, D. Aníbal García-Hernández, C. Nitschelm, *et al.*: Comparative analysis of atmospheric parameters from high-resolution spectroscopic sky surveys: APOGEE, GALAH, Gaia-ESO, 2023, A&A, 670, A107, DOI: 10.1051/0004-6361/202244813
- Sz. Kálmán, A. Derekas, Sz. Csizmadia, Gy. Szabó M, **V. Hegedűs**, *et al.*: Discovery of a substellar companion in the TESS light curve of the δ Scuti/ γ Doradus hybrid pulsator HD 31221, 2023, A&A, 673, L14, DOI:10.1051/0004-6361/202245654
- Sz. Kálmán, A. Derekas, Sz. Csizmadia, A. Pál, R. Szabó, A. M. S. Smith, K. Nagy, **V. Hegedűs**, *et al.*: The phase curve of the ultra-hot Jupiter WASP-167b as seen by TESS, 2024, A&A, <https://arxiv.org/abs/2403.19468>
- Z. Dencs, A. Derekas, T. Mitnyan, B. Cseh, **V. Hegedűs**, *et al.*: Atmospheric parameters and abundances of cool red giant stars, PASP, 2024, <https://arxiv.org/abs/2404.13176>
- *revízió alatt*: Sz. Kálmán, Sz. Csizmadia, Gy. M. Szabó, A. M. S. Smith, **V. Hegedűs**, *et al.*: Detection of secondary eclipse in the TESS phase curve of WASP-186b and the effects of eccentricity tides, MNRAS, 2024
- *előkészítés alatt*: **V. Hegedűs**, Sz. Mészáros, *et al.*: Reconstructing the Milky Way chemical map with Galactic Chemical Evolution tool OMEGA+ from SDSS-MWM
készültségi szint: 75%