

III. félévi beszámoló

Hegedűs Viola (vhgedus@gothard.hu)

Csillagászat és Űrfizika PhD program

Témavezető: Dr. Mészáros Szabolcs

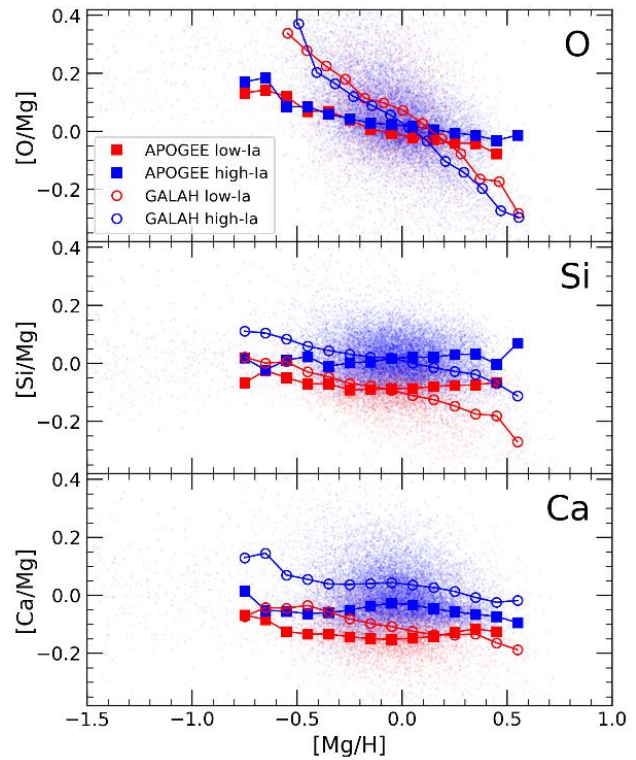
A dolgozat címe: A Tejútrendszer kémiai feltérképezése

1. Bevezetés

A Tejútrendszer jelenlegi struktúráját részleteiben bár ismerjük, a múltbeli eseményekre és ezáltal kialakulásának folyamatára számos különböző módon következtethetünk. Ezért döntő jelentőségű Galaxisunk minél pontosabb és precízebb kemodinamikai feltérképezése, amihez fotometriai mérések és spektroszkópia egyaránt szolgáltat információt. Az APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment; Majewski *et al.* 2017, AJ, 154, 94) közel 700 ezer csillagról készített nagyfelbontású, közeli infravörös spektrumot, a GALAH (Galactic Archeology with HERMES; De Silva *et al.* 2015, MNRAS, 449, 2604) ezzel szemben 600 ezer csillagról rögzített szintén nagyfelbontású optikai színeképet, a GES-nek (Gaia-ESO Survey; Gilmore *et al.* 2012, The Messenger, 147, 25) 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, azok spektruma ujlenyomatoként hordozza a Tejútrendszer korai anyagának alkotórészeit és azok egymáshoz viszonyított arányát. Ezáltal a csillagokban található kémiai elemek mennyiségének vizsgálatával betekintést nyerhetünk galaxisunk összetételének időbeli fejlődésébe. A spektroszkópiai észlelésekben a nagytömegű csillagok életének végén keletkezett ún. α -elemek (O, Mg, Si, S, Ca, Ti) eloszlásából az 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.

A Tejútrendszer feltérképezésénél alapvető probléma, hogy a különböző égboltfelmérő programok más-más adatokkal szolgálnak. A spektroszkópiai eredmények szisztematikus eltéréseinek oka pedig abban keresendő, hogy ezen programok (MWM, APOGEE, GALAH és GES) különböző elméleti modelleket alkalmaznak a csillagok kémiai összetételének meghatározásakor, emiatt a fizikai paramétereik modellfüggők. A mérési eredmények



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

összehasonlításával, majd az eltérések közötti korrelációk ismeretében célozom a galaxisunk kémiai fejlődésének modellezése.

A doktori képzésem első évében arra kerestem a választ, hogy a Tejútrendszer kémiai térképe hogyan változik a mérések közötti szisztematikus különbségek figyelembevételével. Amint az 1. ábrán megfigyelhető, a kémiai térkép mintázata függhet attól, hogy melyik adatsort használjuk (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. Az oxigén esetén tudjuk, hogy azt kizárólagosan kollapszár szupernóvák szolgáltatják, így feldúsulásuk időben azonos módon történik, függetlenül a fémtartalomtól. A GALAH adatok alapján mégis látunk [Mg/Fe]-függést, ezért körültekintést igényel az oxigén használata. Ismert tény, hogy mind optikai, mind infravörös tartományban vannak nehézségek az elemgyakoriságának meghatározásakor. Szilícium és kalcium szerint a populációk élesebb szeparációt mutatnak a kémiai térképen, ugyanis mindkét elem nem-elhanyagolható mértékben származik termonukleáris szupernóva-robbanásokból is. Ennek ellenére megfigyelhető az 1. ábra középső és alsó paneljein, hogy az APOGEE és GALAH felmérések eredményei kissé eltérő helyen – bár azonos meredekséggel – futnak a kémiai térképen.

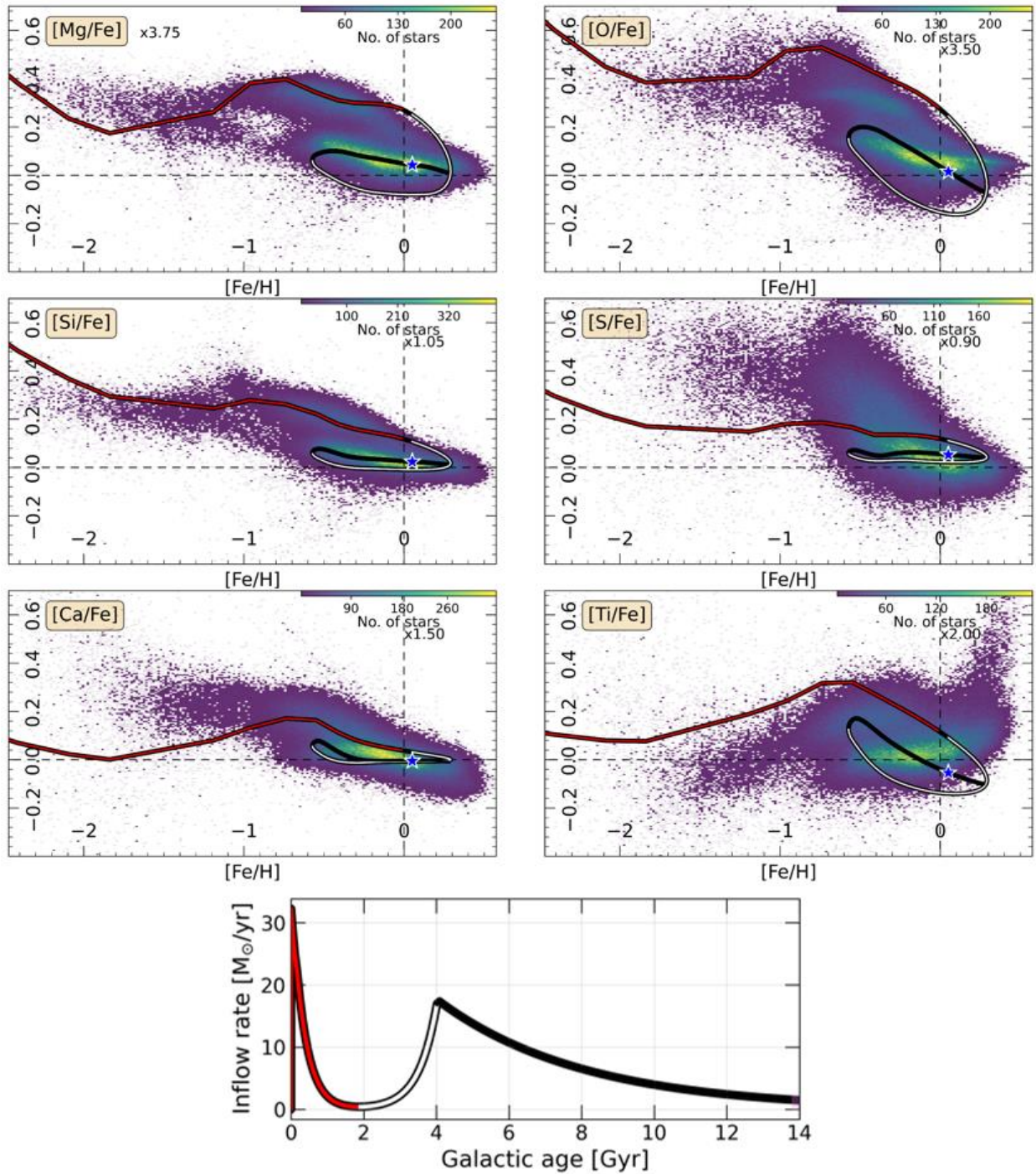
2021 szeptemberétől kezdődően a Dr. Mészáros Szabolcs által vezetett MTA-ELTE Lendület Tejútrendszer Kutatócsoport tagja vagyok, és ennek keretein belül végeztem el az APOGEE, GALAH és GES nagyszabású spektroszkópai programok adatainak összehasonlító analizisét, amelyből megjelent az elsőszerzős referált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

2. Elvégzett kutatások

Ebben a félévben galaxisunk kémiai térképével és annak szimulációkkal történő egyre pontosabb és precízebb reprodukálásával foglalkoztam. A Tejútrendszer kémiai fejlődésének modellezését numerikus kódokkal végezhetjük, ezért az OMEGA (One-zone Model for the Evolution of Galaxies, Cote *et al.* 2017, ApJ, 835, 128) nevű, python alapú 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 kétfázisúvá vált, ezáltal a gáz behullása és kifűvése kétfázisú. A galaktikus kémiai evolúció terén szerzett elméleti tudásomat pedig a Matteucci *et al.* (1989, MNRAS, 239, 885) munka adta.

Az SDSS-V MWM (Milky Way Mapper, Kollmeier *et al.* 2019, BAAS, 51) elemgyakoriságokkal foglalkozó munkacsoportjának megbeszélésein rendszeresen részt veszek, illetve a belső adatközlésekben lévő spektroszkópai mérések – jelenleg privát – eredményeit használom arra, hogy a modelljeimet ezen adatokra illesszem. A fő csillaglégköri paraméterek és az elemgyakoriságok közötti esetleges korrelációkat gyakran ellenőrzöm, ugyanis ezen privát adatbázis jelenleg a kalibráció és validáció stádiumában van, többek között témavezetőm vezetésével.

Ahhoz, hogy az észlelésekhez illesszem az aktuális modellt, alapos megfontolásokkal kellett kiválogatnom a MWM adatbázisából a Tejútrendszer csillagait. Az eredeti Milky Way Mapper adatsort ezért számos szempont szerint megvágtam, hogy azok minél pontosabb képet szolgáltatassanak a valódi eloszlásokról, így tehát az alábbi kritériumoknak megfelelő csillagok találhatóak a modellezéshez használt mintában: jel/zaj arány (SNR) 50-nél nagyobb, effektív



2. ábra. Felső 6 panel: az alfa-elemek (Mg, O, Si, S, Ca, Ti) eloszlásának modellezése a Tejútrendszer kémiai térképén. Alsó panel: a Galaxisba behulló anyag időszerinti rátája (naptömeg/év) az idő (milliárd év) függvényében. Az elsődleges behullási fázist az összes panelen piros, a másodlagos behullás fel-, ill. lefutó ágait pedig rendre fehér, ill. fekete görberészletek jelölik.

hőmérséklet (T_{eff}) 3500 K és 5500 K közötti érték, felszíni gravitációs gyorsulás ($\log g$) 1,0 dex-nél nagyobb, de 3,8 dex-nél kisebb. Ezen felül a galaktocentrikus pozíciók alapján eltávolítottam azokat a csillagokat, amelyek vélhetően a halo, vagy esetleg másik galaxis részei. Tehát további

kritériumok, hogy a korong síkjától mért maximális Z_{\max} távolság 5 kpc-nél kisebb, a pálya excentricitása 0,5-nél kisebb, a fém tartalom pedig -0,8 dex-nél nagyobb és [Mg/Fe] elemgyakoriság 0,2 dex-nél nagyobb legyen. A 2. ábra különböző alfa-elemek esetén mutatja a – már szelekción átesett csillagokkal felrajzolt – kémiai térképeket, azaz az $[\alpha/\text{Fe}]$ –[Fe/H] elemgyakoriság grafikonokat.

A modellezés elsődleges, valamint majd a végleges eredményeinek értelmezése céljából az elméleti görbét három különböző szakaszra bontottam az anyagbehullási epizódok tekintetében. Az első (ld. 2. ábra, piros jelölés) fázist úgy definiáltam, hogy az a kezdeti, gyors anyagbehullást foglalja magába, majd elérve a behullási ráta minimumát ~2 milliárd éves kornál, ismét megindul a már kisebb karakterisztikus lecsengési idejű második anyagbehullás 4 milliárd év körül (ld. 2. ábra, fekete jelölés). 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. Behullási paraméterek alatt a gázbeáramlások időpontjait, illetve azok karakterisztikus fel- és lecsengési (akkréciós) idejét, valamint az egyes fázisokban beáramló anyag mennyiségét értem. Munkám során ezen behullási paraméterek variálásával keresem a megfigyelésekre legjobban illeszkedő galaktikus fejlődési görbét. Összességében pedig arra fókuszálok a jelenlegi munkámmal, hogy a csillagok elméleti úton meghatározott elemtermelési rátájának, valamint a galaxis egészét érintő, globális paraméterek (csillagkeletkezési ráta, kezdeti tömegfüggvény stb.) együttes finomhangolásával reprodukáljam a MWM megfigyeléseivel felállított kémiai térképeket, ezáltal lehetséges folyamatokkal leírni a Tejútrendszer kialakulásának történetét.

3. Publikációk

- *beküldve*: 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, MNRAS, 2023
- *beküldve*: Z. Dencs, A. Derekas, T. Mitnyan, B. Cseh, **V. Hegedűs**, *et al.*: Reliable atmospheric parameters and abundances from high resolution spectrographs mounted on 1m telescopes, A&A, 2024
- *beküldve*: 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, 2023

4. Tanulmányi és oktatási tevékenység

- Az aktuális félév során elvégzett tárgyak listája:
 - (Exo)Bolygóléggörök szeminárium I. (FIZ/5/043)
- Demkó Petra SZTE TTIK fizika BSc szakos hallgató témavezetése (Dr. Mészáros Szabolcs, Hegedűs Viola)
téma: A Kis és Nagy Magellán-felhők csillagainak kiválogatása, illetve galaktikus kémiai evolúciójának modellezése

5. Konferenciák

- SDSS-V Collaboration Meeting, New York, 2023. július 31-augusztus 4.
konferencia előadás: *Modelling the chemical evolution of the Milky Way with OMEGA+*