

**Szegedi Tudományegyetem TTIK
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék**

Exobolygóval rendelkező csillagok abundancia-analízise

Diplomamunka

**Készítette: Barna Barnabás
Csillagász MSc szakos hallgató**

**Témavezető: Dr. Szabó M. Gyula
igazgató, Gothard Asztrofizikai Obszervatórium**

**Konzulens: Dr. Vinkó József
egyetemi docens**

**Szeged
2014**

Tartalomjegyzék

Tartalmi összefoglaló	2
I. Exobolygók és csillagaik	3
I.1. Megfigyelési módszerek	4
I.2. Exobolygókutatás napjainkban	5
II. Színképek elméleti háttere	7
II.1. Sugárzás terjedése csillagatmoszférákban	7
II.2. Abszorpciós vonalak létrejötte	9
II.3. Vonalszelekció kialakulása	11
II.4. Modell atmoszférák	13
III. Elemgyakoriság-analízis	15
III.1. Kontinuum-normálás	15
III.2. Vonalszelekció I.	17
III.3. Illesztés és vonalszelekció II.	18
III.4. Atmoszferikus paraméterek meghatározása	19
III.5. Hibabecslés	21
III.6. MOOG	22
IV. Exobolygóval rendelkező csillagok elemgyakoriság-analízise	24
IV.1. Színképek eredete	24
IV.2. VWA-kalibráció	25
IV.3. Eredmények I. – Atmoszferikus paraméterek	27
IV.4. Eredmények II. – Elemgyakoriságok	29
V. Összefüggések és korrelációk	32
V.1. Porkorong jelenléte	32
V.2. C/O arány	32
V.3. Abundancia-trendek	34
V.4. Alumínium-gyakoriságok	36
VI. Összefoglalás	38
Köszönetnyilvánítás	39
Hivatkozások	40
Nyilatkozat	42

Tartalmi összefoglaló

Az exobolygó kutatás a csillagászat egyik legdinamikusabban fejlődő ága. A megfigyelési technikák és műszerek új generációjának köszönhetően az utóbbi tíz évben több ezerre emelkedett a megerősített bolygók száma, a rendelkezésre álló nagy minta pedig lehetőséget teremt korrelációk keresésére és elméletek tesztelésére. Mindaddig jobbra a bolygók felfedezése kapott nagy hangsúlyt, mivel a megfigyelési eszközök mai generációja még nem alkalmas behatóbb vizsgálatra. Ezen oknál fogva néhány paraméteren kívül, mint pl. a pálya, tömeg, sugár, nem rendelkezünk mélyebb információkkal az exobolygókkal kapcsolatban.

Az egyik hiányzó láncszem a bolygók kialakulása és az ezzel összefüggésben álló kémiai összetételük. Ez utóbbi megállapítása közvetlenül csak spektroszkópiai mérésekből történhet, amelyre azonban – mivel a bolygók túl halványak csillagukhoz képest – csak néhány speciális esetben van lehetőség. Amennyiben megfelelő modellekkel rendelkeznénk a bolygórendszerek kialakulását illetően, úgy akár már a kiindulási feltételekből, vagy még közvetettebben csillaguk minőségéből is következtethetnénk jellegükre. Mivel az exobolygóval rendelkező csillagok mindegyikéről készültek jó minőségű, nagy felbontású színeképek (a bolygó megerősítésének feltétele a radiális sebességmérésen alapuló módszerrel történő kimutatása), ezért utóbbira már rendelkezésre is áll a megfelelő adathalmaz.

Munkám során exobolygóval rendelkező csillagok színeképét vizsgáltam, melyeket korábbi kutatások két különböző csoportba soroltak: egyik felük rendelkezik porkoronggal, míg másik részük bizonyítottan nem. Spektrumuk alapján megállapítottam a légkörüket jellemző főbb paramétereket, valamint néhány kiemelt fontosságú elem esetében relatív gyakoriságukat is. Bár mindkét minta csak hat-hat elemet tartalmaz, a precíz és ellenőrzött analízis így is lehetővé teszi, hogy korrelációkat találjunk a kapott eredményekben.

Dolgozatom első fejezetében betekintést adok az exobolygókkal kapcsolatos legfrissebb eredményekbe és ismeretekbe. A második fejezetben tárgyalom a színeképek elméleti hátterét, valamint azok analízisét, különös tekintettel az atmoszferikus paraméterekre és az elemgyakoriságra. A harmadik fejezetben mutatom be a munkám során használt módszereket és programokat, amelyekből kapott eredményeimet a negyedik fejezetben ismertetem. Az ötödik fejezetben ezen eredményekből levont következtetéseimet teszem közzé, az utolsó, hatodik fejezetben pedig összegzem munkámat.

I. Exobolygók és csillagaik

A távoli planéták gondolata már a 16. században is felmerült Giordano Bruno által, hiszen a Nap egyedi szerepének elvetése után logikus feltételezés, hogy a többi hasonló csillag is rendelkezzen a Földhöz hasonló égitestekkel. Bár az exobolygók kimutatásának módszereit már csaknem húsz évvel korábban megjósolták, a felfedezésekre mégis a 1990-es évekig kellett várni, ekkora érték el a mérési technikák a kívánt pontosságot. Hogy melyik az elsőként felfedezett exobolygó, nem is annyira egyértelmű. 1988-ban bukkantak először bolygóra utaló jelekre a γ Cephei körül (Campbell et al., 1988), de mivel a módszer radiális sebességméréseken alapult, így csak a csillag körül keringő égitest alsó tömegkorlátját tudták egyértelműen megállapítani. Az objektum így beleeshet a barna törpék kategóriájába, melyek átmenetet képeznek az óriásbolygók és a törpecsillagok között. Bár a következtetéseiket a kutatók a későbbiekben visszavonták, 2003-ban újabb mérések megerősítették, hogy bolygóról van szó (Hatzes et al., 2003). Egyértelműbb volt a helyzet a PSR 1257+12 katalógusszámú milliszekundumos pulzár esetében, amely körül a rádiójelek modulációja alapján Wolszczan és Frail 1990-ben és '92-ben két exobolygót is egyértelműen azonosított az Arecibo rádióteleszkóppal (Wolszczan & Frail, 1992). Tudományos körökben azonban még nagyobb érdeklődést váltott ki az első, Naphoz hasonló csillag körül keringő bolygó 1995-ös kimutatása. Mayor és Queloz az 51 Pegasi-t vizsgálva szintén radiális sebességméréssel talált rá a planétára (Mayor & Queloz, 1995). A felfedezések kezdetben lassan növekvő száma a 2000-es években felbocsátott űrtávcsöveknek és földfelszíni programoknak köszönhetően ugrott meg, ma pedig már csaknem kétezer bolygót ismerünk.

A Földtől való nagy távolságuk, csillagukhoz képest alacsony tömegük miatt az exobolygók kimutatása igen bonyolult feladat. A módszerek többsége a csillaguk fényességére vagy mozgására gyakorolt hatásukat vizsgálja. A legnagyobb változásokat ezekben az ún. forró Jupiterok okozzák, így a legtöbb felfedezés is ebbe a kategóriába esik. Ezek a bolygók igen kis sugarú pályán keringenek, ebből származik a magas hőmérsékletük; tömegük pedig nagyságrendileg több száz Föld-tömeg, akár csak a Jupiteré. Az első, Neptunuszhoz hasonló bolygót 2004-ben mutatták ki (Butler et al., 2004), 2005-ben pedig már a Földnél nem sokkal nagyobbakat is felfedeztek (Rivera et al., 2005). A legérdekesebb objektumok ezek közül kétségtelenül a lakhatósági zónában keringő kőzetbolygók, amelyeken – a csillaguktól mért távolság alapján – akár folyékony víz is található.

I.1. Megfigyelési módszerek:

Közvetlen megfigyelés: Mivel az extraszoláris bolygók igen kis szögtávolságra keringenek csillaguktól és saját fénnel nem rendelkeznek, ezért közvetlen kimutatásuk általában nem lehetséges. A kevés kivételes esetben is egy óriástávcső felbontóképessége szükséges a detektáláshoz, mint például a Gemini- vagy a Keck-távcsövek. Ezek a megfigyelések kivétel nélkül az infravörös tartományban készülnek, mivel a csillagától kapott fényt ilyen hullámhosszakon sugározza vissza a bolygó. Amennyiben a csillag-bolygó rendszert nem lehet megfelelően felbontani, úgy az infravörös többletsugárzás is utalhat a bolygó létezésére, amely hozzáadódik a csillagának hőmérsékleti sugárzásához.

Spektroszkópiai módszer: Amennyiben a vizsgált csillag nincs egyedül, úgy maga is keringést végez a rendszer tömegközéppontja körül. Ennek a mozgásnak a Földről látszó vetületét – a radiális komponens – vizsgálhatjuk spektroszkópiai mérésel. A színekvonalak hullámhosszai a Doppler-eltolódásnak megfelelően a sebességgel arányos mértékben növekednek, illetve csökkennek. Az eltolódás viszont igen kismértékű, aminek kimutatása komoly technikai kihívás. A jelenlegi rekorder az Alpha Centauri B körül a közelmúltban felfedezett (ám még meg nem erősített) exobolygó, melynek hatására a csillag mindössze 0,51 m/s-os sebességgel mozog hozzánk képest (Dumusque et al., 2012). Fontos megjegyezni, hogy mivel pusztán spektroszkópiai úton nem tudjuk megállapítani a Naprendszer és a vizsgált bolygórendszer síkja által bezárt szöveget (az inklinációt), a tangenciális sebességkomponens nem ismerjük. Következésképpen a sebességváltozás legalább akkora, mint a kimért radiális sebességváltozás. Mivel a csillag sebessége egyenes arányban áll a bolygó tömegével, így utóbbi értékére is csak alsó korlátot tudunk megállapítani.

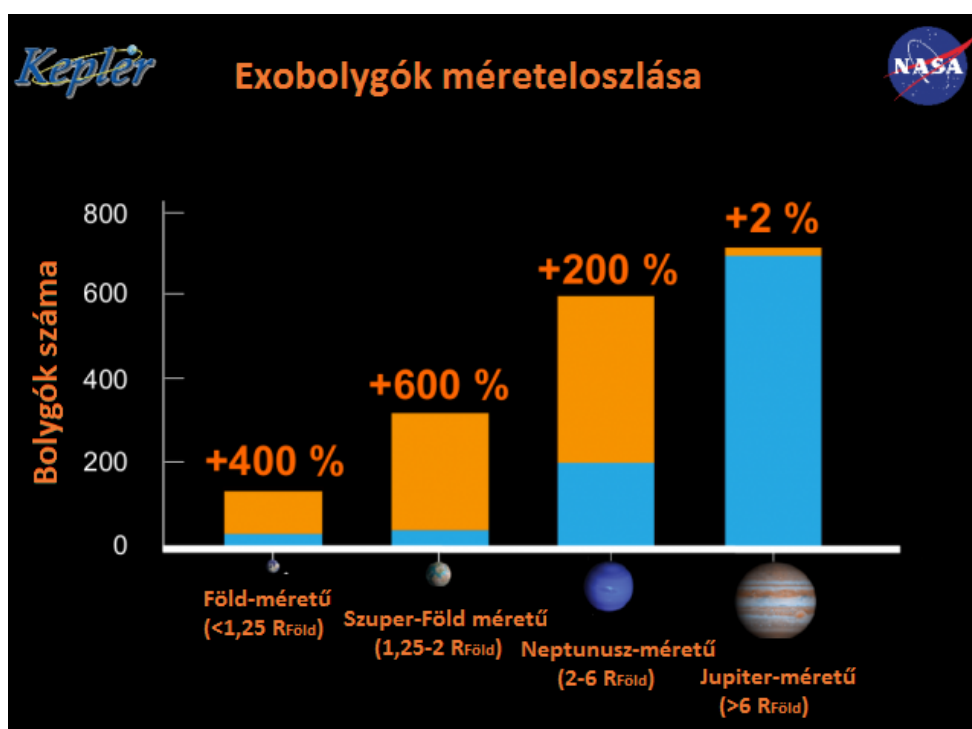
Fedési rendszerek: Abban az esetben, ha a bolygórendszer pályahajlásszöge 90 fokhoz közeli, a bolygó bizonyos időközönként elvonul csillaga előtt, 'csillagfogyatkozást' hozva létre. A földi megfigyelő ezt úgy érzékeli, hogy a csillag fényessége kis mértékben lecsökken, majd visszatér eredeti állapotába. A változás legfeljebb néhány század magnitúdós, így a felszínről vizsgálható rendszerek száma tovább csökken - az utóbbi tíz évben felbocsátott űrtávcsövek viszont már tízezred magnitúdós pontossággal bírnak. Az ismert inklináció miatt számos paraméter becsülhető a tranzit jellegéből, ilyen például a bolygó csillaghoz viszonyított méretaránya.

Az utóbbi években működő földfelszíni keresőprogramok (HAT-Net, WASP) valamint űrtávcsövek (Kepler, COROT) a tranzit módszert használták, így mostanra a megerősített exobolygók közel kétharmada fedési rendszerekben található. Továbbá nagyjából kétezer, főleg a Kepler által talált bolygójelölt vár spektroszkópiai megerősítésre.

Mindezek mellett még számos, speciális esetekben használható módszer létezik exobolygók kimutatására, többek között a pulzárjelek modulációja, asztrometria, gravitációs lencsehatás vagy a csillag körüli porkorong perturbálásának megfigyelése.

I.2. Exobolygó kutatás napjainkban

A Kepler misszió legutóbbi bejelentése után már 1713 megerősített exobolygót ismerünk¹, melyek 1042 csillag körül keringenek. A felfedezett rendszerek kisebb részében (430 csillag körül) találtak egynél több bolygót, de ez minden bizonnyal pusztán szelekciós effektus. Hasonló a helyzet a bolygók méreteloszlása terén is: ugyan legnagyobb számban Jupiter-méretű objektumokat találtak, a 2014 februárjában nyilvánosságra hozott mintában már jóval nagyobb számban képviseltették magukat a Neptunusz- és a Szuper-Föld kategóriájú bolygók. Szintén kiválasztási effektussal kell számolni, amikor a bolygók csillaguktól mért távolságeloszlását vizsgáljuk: a radiális sebességamplitúdó a távolság gyökének reciprokával arányos, így közeli forró bolygókat mindeddig nagyobb számban fedeztek fel.



1. ábra A megerősített exobolygók tömegeloszlása a februári bejelentés előtt (kék) és után (sárga).

Mintegy ötven tranzitos (és a csekély számú direkt képalkotással is detektálható) exobolygó esetében készült a légkörükről spektroszkópiai vizsgálat. Ilyenkor a csillag bolygólégkörön átjutó fényét detektálják, ezért főleg a csillaglégkörben jelen nem lévő elemeket és molekulákat lehet azonosítani. A gyakran detektált molekulák közé tartozik a víz, a szén-monoxid, a szén-dioxid és a metán is (Teske et al., 2013). A spektrumokból egyéb fizikai paraméterekre is következtethetünk, mint például a légkör hőmérséklete, nyomása és vertikális struktúrája; a bolygó fémességét a csillagával összevetve pedig a bolygókeletkezések elméletét lehet pontosítani.

Mivel a bolygókról csak kevés, ám nagy bizonytalanságú adat áll rendelkezésünkre, érdemes a

¹ <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

csillagokkal való korrelációkat vizsgálni, mivel utóbbiak fizikai paraméterei jobban megállapíthatóak. A felfedezett exobolygók többsége F-, G- illetve K-színképtípusú csillag körül kering. Ennek egyik oka, hogy a forróbb, A-színképtípusú csillagok túl gyorsan forognak, a kiszélesedett vonalak pedig lehetetlenné teszik a kismértékű Doppler-eltolódások kimérését. A vörös törpék (M-színképosztály) esetében arányosan nagyobbak a kimutatható hatások (egy kisebb tömegű csillagot jobban 'rángat' egy ugyanakkora bolygó), ám az eddigi felfedezések azt mutatják, hogy kisebb a valószínűsége egy körülöttük keringő, nagyobb tömegű bolygónak.

A fémesség-eloszlások érdekes képet adnak a különböző tömegű bolygók csoportjait vizsgálva. A bolygóval rendelkező csillagok döntő többségének $[Fe/H]$ értéke (ahol jelen esetben Fe az összes héliumtól nehezebb elemet jelenti) -0.5 és $+0.6$ közötti intervallumban található, vagyis egy kontrollmintával összevetve (vegyesen 'bolygótlan' illetve még nem vizsgált csillagokkal) átlagosan nagyobb a fémtartalmuk. A kutatásokból ugyanakkor az is kirajzolódik, hogy a nagy tömegű bolygók (Jupiter-méretkategória) gazdacsillagainak közepes fémessége $\sim +0.1$ dex (Sousa et al. 2011), vagyis jóval több nehezebb elemet tartalmaznak, mint a kistömegű bolygók (Szuper-Neptunuszok és az alatti méretkategória), melyek átlagos fémessége alig nagyobb a kontrollmintáknál.

II. Színképek elméleti háttere

II.1. Sugárzás terjedési csillagatmoszférákban

A csillagok légkörében a sugárzás terjedését az ún. transzfer-egyenletekkel írható le. Az alábbiakban ismertetett modell² számos egyszerűsítést alkalmaz; feltételezzük, hogy a csillag sztatikus, a közeg elektromosan semleges, mágneses tere pedig elhanyagolható. A fotonok és a közeg részecskéi között ilyenkor háromféle kölcsönhatás léphet fel: abszorpció, szóródás és spontán emisszió, míg az indukált emisszió járuléka szintén elhanyagolható. Egy kis ds útszakaszon a sugárzás fajlagos intenzitásának (egységnyi felületről egységnyi idő alatt egységnyi térszögbe, valamint egységnyi frekvenciatartományban kisugárzott energia) megváltozása ezen három folyamat járulékainak összege:

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_{abs} + \left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_{em} + \left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_{sct} \quad (1)$$

Az abszorpció esetében tiszta abszorpcióról beszélhetünk, ilyenkor a foton teljesen elnyelődik az adott frekvencián. Az abszorpciós tényező (κ_ν) és a sűrűség (ρ) szorzata megadja a folyamat hatáskeresztmetszetét (σ), így az intenzitásváltozás:

$$\left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_{abs} = -n \cdot \sigma \cdot I_\nu = -\kappa_\nu \cdot \rho \cdot I_\nu \quad (2)$$

A spontán emisszió járuléka abból áll, hogy a gerjesztett részecske éppen a megfigyelő irányába sugároz ki egy foton. A folyamat így a sűrűséggel arányosan növeli az intenzitást, az arányossági tényező pedig a spontán emissziós koefficiens (j_ν):

$$\left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_{em} = j_\nu \cdot \rho \quad (3)$$

A szórás által okozott intenzitásváltozás kétféle lehet. Az eredetileg a megfigyelő irányába haladó fotonok a részecskékkal való kölcsönhatás folytán kiszóródhatnak, míg mások beszóródhatnak a látóirányba. Mindkét esetben feltételezzük, hogy a szórás rugalmasan megy végbe, vagyis a beérkező

² A számítások részletes leírása megtalálható C. Dullemond: Radiative transfer in astrophysics c. kurzusának anyagában. http://www.ita.uni-heidelberg.de/~dullemond/lectures/radtrans_2012/index.shtml

és a szórt foton hullámhossza megegyezik. A kiszóródás intenzitáscsökkentése az abszorpcióhoz hasonló alakú (együttes hatásuk az extinkció), az arányossági tényezőt pedig szórási koefficiensnek nevezzük (χ_ν):

$$\left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_{sct,ki} = -\chi_\nu \cdot \rho \cdot I_\nu \quad (4)$$

Bármely, eredetileg más irányba haladó foton beszóródhat a látóirányba; a valószínűségének kiszámításához integrálni kell a térszögre (Ω):

$$\left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_{sct,be} = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \chi_\nu \cdot \rho \cdot I_\nu d\Omega \quad (5)$$

Feltételezhető, hogy a szórás izotróp, vagyis minden irányba egyenlő valószínűséggel hagyhatja el a foton a részecskét. Ekkor a szórási koefficiens kihozható az integrálásból, a visszamaradó mennyiség pedig az ún. közepes intenzitás (J_ν):

$$\left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_{sct,be} = \chi_\nu \cdot \rho \cdot J_\nu \quad (6)$$

Az abszorpció, a spontán emisszó és a szórás járulékát összegezve a teljes intenzitásváltozás:

$$\left(\frac{dI_\nu}{ds}\right) = -\kappa_\nu \cdot \rho \cdot I_\nu - \chi_\nu \cdot \rho \cdot (I_\nu - J_\nu) + \rho \cdot j_\nu \quad (7)$$

Az egyenletet átrendezve kapjuk a sugárzási transzferegyenletet:

$$\frac{1}{\rho(\kappa_\nu + \chi_\nu)} \left(\frac{dI_\nu}{ds}\right) = -I_\nu + \frac{\chi_\nu J_\nu + j_\nu}{\kappa_\nu + \chi_\nu} = -I_\nu + S_\nu \quad (8)$$

Ahol a megfigyelő számára keletkező és elvesző fotonok aránya S_ν , a forrásfüggvény. Látható, hogy amennyiben a szórás elhanyagolható ($\chi_\nu=0$), a Kirchoff-törvény értelmében a forrásfüggvény a Planck-függvénnyel egyezik meg. A légkör ilyenkor kis távolságokon egyensúlyi állapotú (a hőmérséklet-gradiens kicsi), így ezt az állapotot lokális termodinamikai egyensúlynak (LTE) nevezik. Ellenkező esetben, ha a szórás dominál ($\chi_\nu \gg \kappa_\nu$), a forrásfüggvény a közepes intenzitással lesz

egyenlő.

Ha a vizsgált atmoszféraréteg vékony, plánparallel alakúnak tekinthető. Ekkor a tetszőleges irányban mért optikai mélység az alábbi képlettel közelíthető:

$$d\tau_\nu = -(\kappa_\nu + \chi_\nu) \cdot \rho \cdot \cos \theta \cdot ds \quad (9)$$

ahol θ a sugárzás terjedése és a réteg normálisa által bezárt szög.

Amennyiben a csillag nem bontható fel a mérőeszközzel, úgy csak fluxust (egységnyi felületen, egységnyi idő alatt, egységnyi frekvenciatartományban átáramló energia) tudunk mérni. A fluxusra értelmezett transzferegyenlet plánparallel atmoszférára:

$$\frac{1}{4\pi} \left(\frac{dF_\nu}{d\tau_\nu} \right) = J_\nu + S_\nu \quad (10)$$

II.2. Abszorpciós vonalak létrejötte

A továbbiakban egységnyi frekvenciatartomány helyett egységnyi hullámhossztartományra ismertetem az egyenleteket. Megmutatható, hogy a csillag felszínén a fluxus legnagyobb része a $\tau=2/3$ -os optikai mélységből érkezik:

$$F_\lambda = S_\lambda \left(\tau_\lambda = \frac{2}{3} \right) \quad (11)$$

Amennyiben a színek olyan tartományát vizsgáljuk, ahol nincs spektrumvonal, az ott tapasztalható kontinuum-szintet a $\tau_k=2/3$ -os optikai mélységben lévő, közel feketetest-sugárzó fotoszféra alatti réteg hozta létre. A vonalak hullámhosszán a vonal és kontinuum optikai mélységek összeadódnak:

$$\tau_\lambda = \tau_\nu + \tau_k \quad (12)$$

A forrásfüggvény jó közelítéssel lineáris függvénye a kontinuum-optikai mélységnek. Ezért abszorpciós vonal esetén ($\tau_\nu > 0$, ha a hőmérséklet befelé növekszik) a forrásfüggvény alacsonyabb lesz, mint a vonal hullámhossztartományán kívül, ezért ott alacsonyabb fluxust fogunk detektálni.

Mindez a Schuster-Schwarzschild-elmélettel modellezhető (Caroll & Ostlie, 2006): a kibocsátott feketetest sugárzás fluxusa ($F_{\lambda f}$) az atmoszférát alkotó hidegebb gázrétegekben exponenciálisan csökken:

$$F_\lambda = F_{\lambda_f} \cdot \exp(-\tau_\lambda) = F_{\lambda_f} \cdot \exp(-\tau_k) \cdot \exp(-\tau_v) = F_k \cdot \exp(-\tau_v) \quad (13)$$

Az abszorpciós vonalak erősségének jellemzésére használják az ekvivalens szélességet, melynek definíciója:

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{F_k - F_\lambda}{F_k} d\lambda \quad (14)$$

ahol λ_1 és λ_2 az abszorpciós vonal hullámhossztartományának kezdete és vége. A két egyenletből könnyen belátható, hogy az ekvivalens szélesség csak a a vonal optikai mélységének a függvénye:

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} 1 - \exp(-\tau_v) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} 1 - \exp(-\kappa_v \cdot \rho \cdot s) d\lambda \quad (15)$$

ahol s a hideg gázréteg vastagsága. Az abszorpciós koefficiens és a sűrűség szorzatára atomfizikai összefüggést lehet felírni:

$$\kappa_v \cdot \rho = \frac{\pi e^2}{mc} \cdot \frac{\lambda^2}{c} \cdot f_{ij} \cdot N_i \cdot \nu(\lambda) \quad (16)$$

ahol e és m az elektron töltése illetve tömege, c a fénysebesség, f_{ij} az atom i . és j . energiaszintje közti átmenet oszcillátorerőssége, N_i az alsó szint populációja, $\nu(\lambda)$ pedig a későbbiekben részletezett vonalprofil. Az energiaszint populációja a Boltzmann-formulával adható meg:

$$\frac{N_i}{N} = \frac{g_i}{z(T)} \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad (17)$$

ahol N az adott elem koncentrációja, g_i és E_i az i . energiaszint statisztikai súlya illetve energiája (abszorpciós átmenetknél az alsó szint gerjesztési energiája a lényeges, így E_{low} -ként szokták megadni), $z(T)$ az állapotösszeg, k a Boltzmann-állandó, T pedig a hőmérséklet. A (16) egyenletbe visszahelyettesítve látszik, hogy vékony vonalakra ($\tau_v \ll 1$) vett közelítés esetén $\nu(\lambda)$ kivételével minden kivihető az integrálás elé. Így egy adott profilú vonal erősségét az elem teljes koncentrációja, az átmenethez tartozó kvantumállapot populációja, valamint az oszcillátorerőssége határozza meg (ez utóbbit a szakirodalomban általában $\log(g_i f_{ij})$ formában adják meg):

$$W = \frac{\pi e^2}{mc^2} \cdot \lambda^2 \cdot g_i \cdot f_{ij} \cdot \frac{1}{z(T)} \cdot N \cdot h \cdot \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} v(\lambda) \quad (18)$$

A fenti közeítés csak vékony vonalakra működik, a tapasztalatok szerint a határ 150 mÅ ekvivalens szélesség környékén van. A későbbiekben ez fontos szerepet játszik a vonalszelekció során.

II.3. Vonprofil kialakulása

A vonprofil jól modellezhető, ha a gerjesztendő atomot egy harmonikus oszcillátornak tekintjük. A gerjesztő sugárzás (elnyelt foton) elektromágneses terének hatására az atom elektronja csillapódó kényszerrezgésbe kezd (Lorentz-elmélet). Megmutatható, hogy ez a folyamat egy Lorentz-függvényt eredményez vonalprofilnak, amely jó egyezést mutat a megfigyelésekkel:

$$L(\lambda) = C \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \Gamma}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \left(\frac{1}{2\Gamma}\right)^2} \quad (19)$$

ahol C konstans, λ_0 a vonal centrális hullámhossza, Γ pedig a vonalszélességet meghatározó paraméter. Utóbbi számos fizikai folyamat befolyásolja. A Heisenberg-féle határozatlansági relációból következik, hogy a gerjesztett állapotok rövid élettartama (spontán emisszió) miatt az $i \rightarrow j$ átmenet energiája bizonytalan lesz, így a vonatkozó hullámhossz is szórni fog, ebből származik a *természetes vonalszélesség*:

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{2\pi c} \left(\frac{1}{\Delta t_i} - \frac{1}{\Delta t_j} \right) \quad (20)$$

Ez a mennyiség az optikai tartományban 10^{-4} Å nagyságrendű, így kimutathatatlan.

A nagy nyomás miatt a gázban az atomok ütköznek egymással, ami lerövidíti az állapotok élettartamát. Az ütközések között eltelt idő ($\Delta\tau$) fordítottan arányos a vonal szélességével, ez a *nyomási vonalkiszélesedés*:

$$\Delta\lambda \approx \frac{1}{\Delta\tau} = \frac{v}{l} = N \cdot \sigma \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (21)$$

ahol l a közepes szabad úthossz, σ az ütközési hatáskeresztmetszet, a sebességet pedig a Maxwell-Boltzmann sebességfüggvény átlagos értékével közelíthetjük.

A forró gázban az atomok nagy sebességekkel mozognak, ezek látóirányú komponense pedig véletlenszerű. Az egyazon átmenethez tartozó fotonok eltérő Doppler-eltolódást mutatnak, így a vonal szimmetrikusan kiszélesedik. Újra Maxwell-Boltzmann sebességeloszlást feltételezve egy Dirac-deltával leírható keskeny vonal Gauss-függvénnyé szélesedik ki:

$$G(\lambda) = \frac{C}{\Delta\lambda} \cdot \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2 \quad (22)$$

ahol C konstans. A *Doppler-kiszélesedés* esetében a félértékszélesség:

$$\Delta\lambda \sim \frac{2\lambda}{c} \cdot \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (23)$$

Fontos azonban megjegyezni, hogy ez az elméleti számítás nem ad pontos képet a Doppler-kiszélesedésekre, a mérések pontos reprodukálásához szükség van egy plusz empirikus tagra:

$$\Delta\lambda \sim \frac{2\lambda}{c} \cdot \sqrt{\frac{3kT}{m} + v_{turb}^2} \quad (24)$$

Feltételezhetően a légköri turbulens áramlások miatt kell az atomok hőmozgásánál nagyobb sebességekkel számolni. Megjegyzendő továbbá, hogy a szakirodalom a méretskála alapján megkülönböztet mikroszkópikus és makroszkópikus sebességturbulenciát, az analízisek során azonban gyakorta a kettőt egy paraméterre vonják össze.

A csillag rotációja szintén vonalkiszélesedést okoz, melynek értéke:

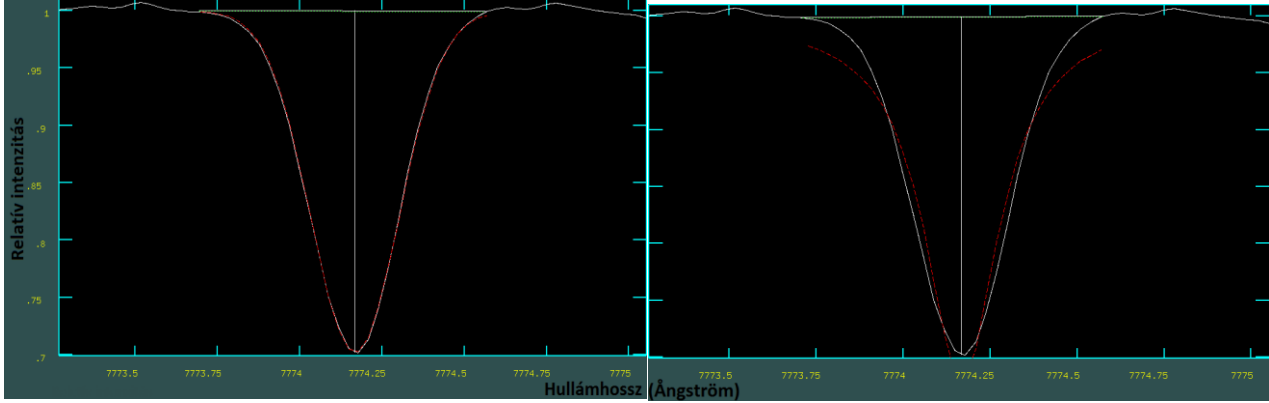
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{c} \cdot v_{rad} \cdot \sin i \quad (25)$$

ahol i a csillag forgástengelyének inklinációja. A megfigyelő az eltérő hosszúsági körökön más látóirányú sebességeket észlel, ezért más lesz a Doppler-eltolódás is. Integrálva a teljes csillagkorongra (ismét Dirac-deltát feltételezve kiindulási profilnak) a vonalprofil eredménye parabola-függvény lesz. Az egyes spektrumvonalakat az ekvivalens szélesség mérése során általában Lorentz- és Gauss-függvénnyel is meg lehet illeszteni, egy parabola illesztése azonban már komoly hibával járhat. A legpontosabb eredményt a nyomási- és Doppler-kiszélesedés együttes

figyelembevételével lehet kapni, melyet a fenti két függvény konvolúciójaként kapott Voigt-függvény írja le:

$$V(\lambda, \Delta\lambda_L, \Delta\lambda_G) = \int L(\lambda', \Delta\lambda_L) G(\lambda - \lambda', \Delta\lambda_G) d\lambda' \quad (26)$$

ahol $\Delta\lambda_L$ és $\Delta\lambda_G$ a Lorentz- illetve Gauss-függvények félértékszélességei.



2. ábra A HD50499 O I $\lambda 7774$ vonalának illesztése Gauss- (balra, $EW=99,4 \text{ m}\text{\AA}$), valamint Lorentz-profillal (jobbra, $EW=128,9 \text{ m}\text{\AA}$). A Voigt-profil illesztése szinte teljesen megegyezett a gaussival ($EW=99,4 \text{ m}\text{\AA}$).

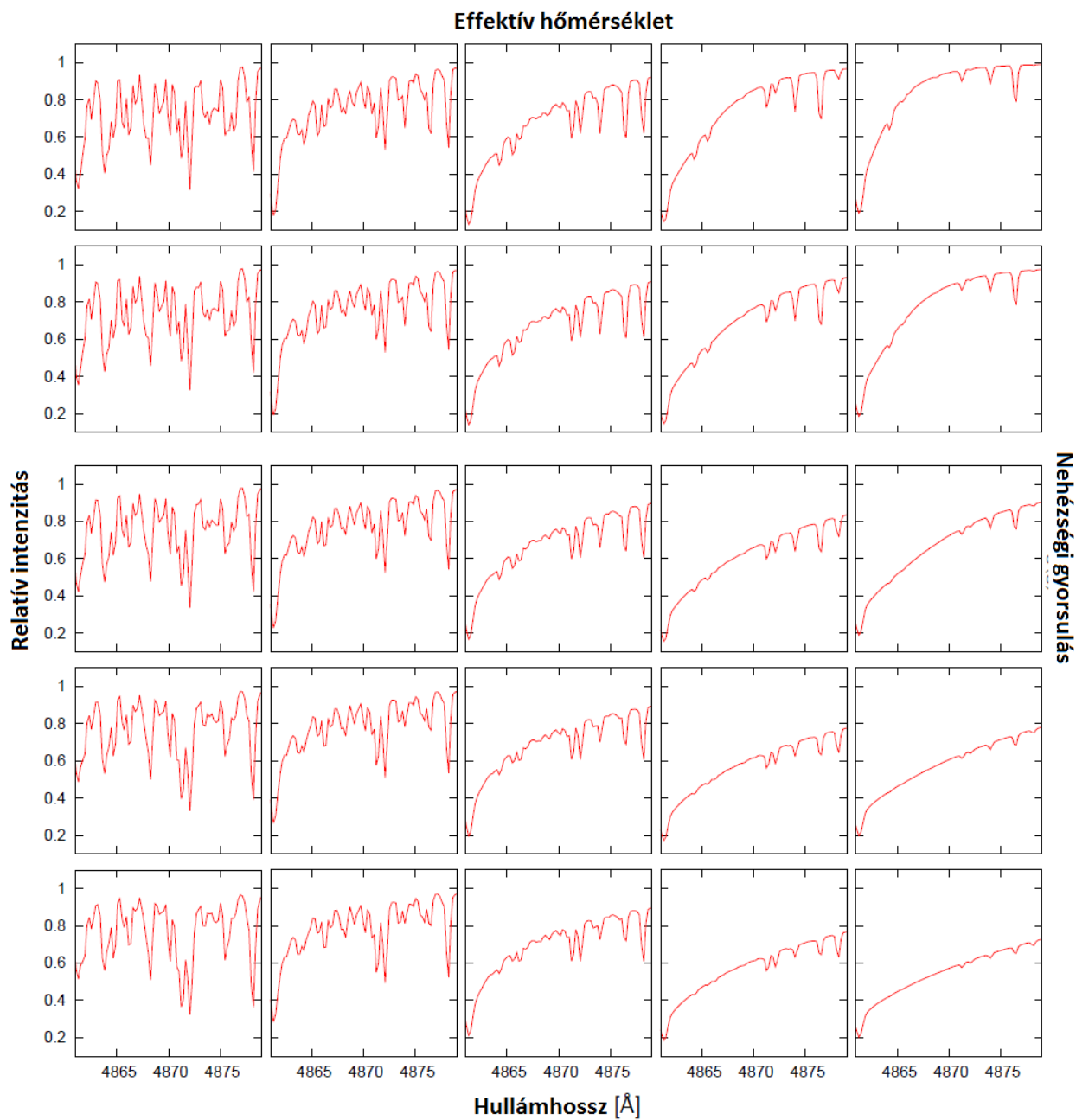
II.3. Modell atmoszférák

A sugárzási transzferegyenlet alapján modellezni lehet a csillagok fotoszféráját. Ennek során a légkört rétegekre osztják fel, melyeken belül a paraméterek gradiense elég kismértékű ahhoz, hogy az LTE feltételek teljesüljenek. A bemenő paraméterek rendszerint az effektív hőmérséklet (T_{eff}), a nehézségi gyorsulás logaritmus (log(g), ahol g általában a cgs-rendszerbeli érték) a sebességturbulencia (v_{mic}), valamint a fémesség értéke. Ez utóbbi nem más, mint a vas abundanciája:

$$[Fe/H] = \left(\log \frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{csillag} - \left(\log \frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{Nap} \quad (27)$$

Megjegyzendő, hogy az **abundancia** más elemek esetében hasonlóan számolható. A kimenő paraméterek modellenként változóak, de mindig szerepel a rétegenként a hőmérséklet, az abszorpciós koefficiens és a nyomás. A modell atmoszféra alapján szintetikus spektrumokat lehet generálni; az atmoszferikus paraméterek ezekre gyakorolt hatását szemlélteti a 3. ábra.

A leggyakrabban használt modell atmoszférák az eredetileg az 1970-es években készült (azóta többször újraszámolt és javított) ATLAS (Kurucz, 1993) és MARCS (Gustafsson et al., 2008) modellek. A kimeneti értékeket fix ΔT_{eff} , $\Delta \log(g)$ és $\Delta [Fe/H]$ közönként adják meg, amely hálózat alapján lineáris interpolációval kapható meg a szükséges modell.



3. ábra A T_{eff} és $\log(g)$ paraméterek hatása a szintetikus színeképekre. A huszonöt ábra mindegyike a $H\beta$ vörös oldali szárnyát ábrázolja $[Fe/H]=0$, $v_{\text{mic}}=0$ illetve $v \cdot \sin(i)=0$ értékeknél. Az egyes sorokban az effektív hőmérséklet balról jobbra haladva 4750, 6000, 7250, 8500 és 9750 K, míg az egyes oszlopokban a $\log(g)$ értéke fentről lefelé haladva 2.0, 2.5, 3.5, 4.5 és 5.0 dex.

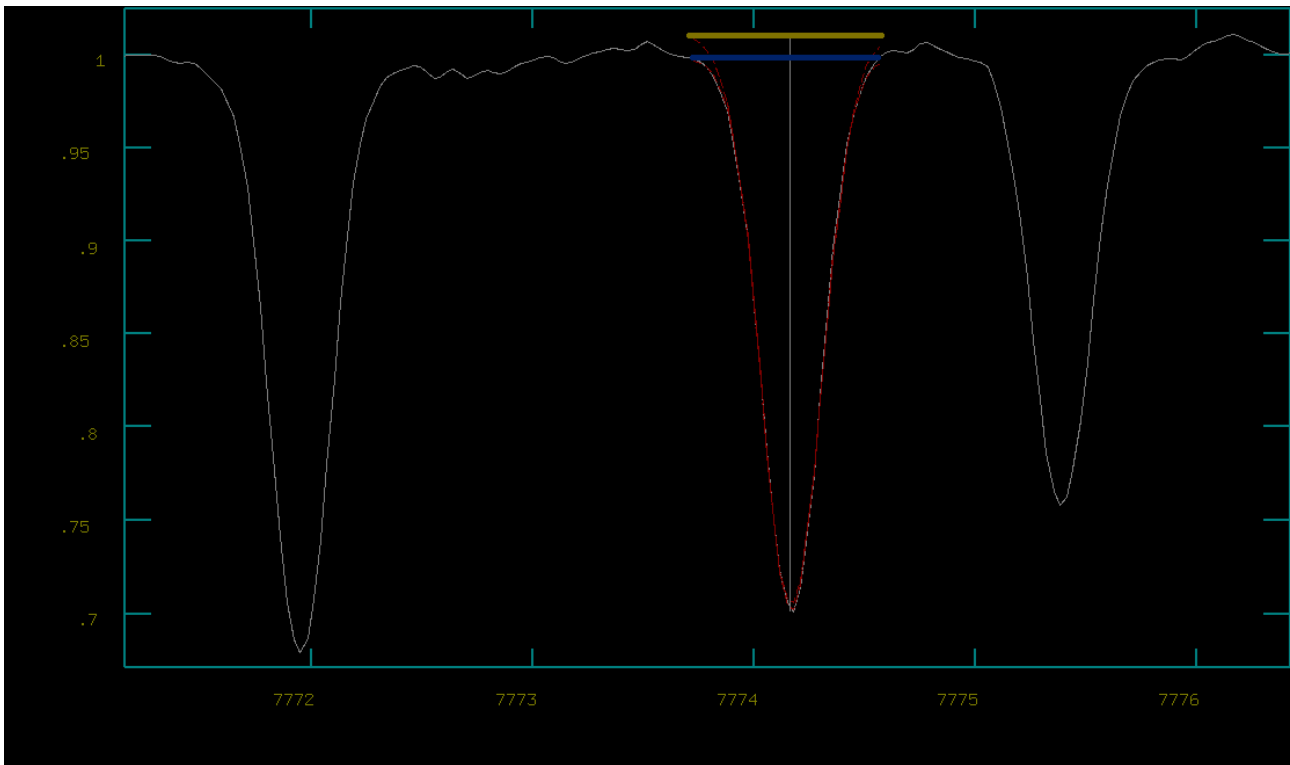
III. Elemgyakoriság-analízis

Az előző fejezetben ismertetett összefüggések alapján az atomfizikai paraméterek ($\log(gf)$, E_{low}) ismeretében, valamint az atmoszferikus (T_{eff} , $\log(g)$, v_{mic} , $[\text{Fe}/\text{H}]$, $v \cdot \sin(i)$) paraméterek ismeretében kiszámított atmoszféra modellek alapján az egyes vonalak ekvivalens szélességéből meghatározható az adott vonalat létrehozó elem koncentrációja. Az atomfizikai paramétereket rendszerint valamely laboratóriumi mérésekre épülő adatbázisból kerülnek kiválasztásra, mint pl. a VALD (Vienna Atomic Line Database) (Kupka et al., 1999). Csillagászati módszerekkel való pontosításukra azonban sor kerülhet, különösen a $\log(gf)$ paraméter esetében; ekkor a más módszerekkel pontosan meghatározott elemgyakoriságok alapján lehet következtetni az átmenetek valószínűségeire.

Az abundancia analízisek során kritikus fontosságú a megfelelő atmoszferikus paraméterek meghatározása. Kellően pontos értékek csak igen kevés objektum esetében állnak rendelkezésre. A legtöbb, erre a célra kifejlesztett szoftver azonban lehetőséget nyújt az atmoszferikus paraméterek iteratív meghatározására az elemgyakoriságok kiszámítása során, így kiindulási alapnak elegendő bármely más mérésből származó, közel helytálló érték használata. Egy ilyen program az általam is használt a **Versatile Wavelength Analysis (VWA)**, melyet Hans Bruntt fejlesztett IDL programnyelven (Bruntt et al., 2010). Az alábbiakban ezen szoftver használatán keresztül mutatom be az abundancia analízis tipikus lépéseit.

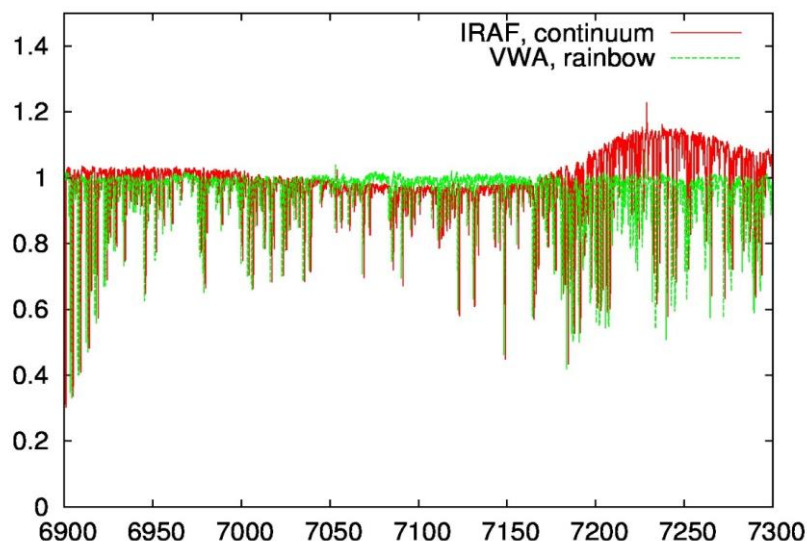
III.1. Kontinuum normálás: continuum & rainbow

A VWA indítása után első feladatunk a spektrum megfelelő előkészítése az ekvivalens szélességek mérésére. Mivel ehhez elengedhetetlen a kontinuum-szint pontos meghatározása, először pontos normálást kell végezni. Ehhez első közelítésben az *iraf* programcsomag *continuum* taszkját használtam, mivel az echelle színeképekből kapott bonyolult kontinuum-függvénnyel rendelkező spektrumokat jól illeszti meg (erre a célra tipikusan huszad fokú köbös spline függvényeket használtam). Az illesztett függvénnyel való leosztás után a spektrum kontinuum-szintje nagyjából 10%-os hibán belül az 1 körül mozog. Ez azonban nem elegendő pontosságú a későbbiekben: az automatizáltan működő EW-mérő programok a függvény értékétől függetlenül a kontinuumszintet 1-nek veszik, ami jelentős (akár szisztematikus) hibát okozhat a számolt elemgyakoriságban.



4. ábra A HD50499 semleges oxigén NIR tripletje, jelölve az 1,00 (kék) illetve az 1,01-es (sárga) relatív intenzitásokhoz tartozó kontinuum-szinteket. A három vonal ekvivalens szélességeit mindkét szintnél mérve átlagosan 0,1 dex-es differencia adódott az abundanciákat illetően.

A VWA *rainbow* programjával lehetőség van precíz, egyszerű kézi normálásra, melynek folyamán egy összehasonlító, szintetikus spektrum alapján kézzel lehet kijelölni a színek kontinuum pontjait (lapos platók a spektrumban). Első lépésként (ha ez korábban nem történt meg) a Doppler-eltolódásra kell korrigálni a radiális sebesség megadásával, hogy a szintetikus és a vizsgált színek átfedésbe kerüljön. Ezután átlagosan 4-6 Ångströmönként érdemes kijelölni a kontinuum-szintet, hogy a rainbow kellően pontosan tudja megilleszteni a normáló függvényt. A munkafolyamat egy 5000 Ångström spektráltartományú színek esetében több, mint két órát is igénybe vehet, azonban csak így válik lehetővé a későbbi pontos vonalillesztés.



5. ábra A HD50499 szinképének részlete, az IRAF continuum taszkjával (piros), valamint a VWA rainbow programjával (zöld) való normálás után.

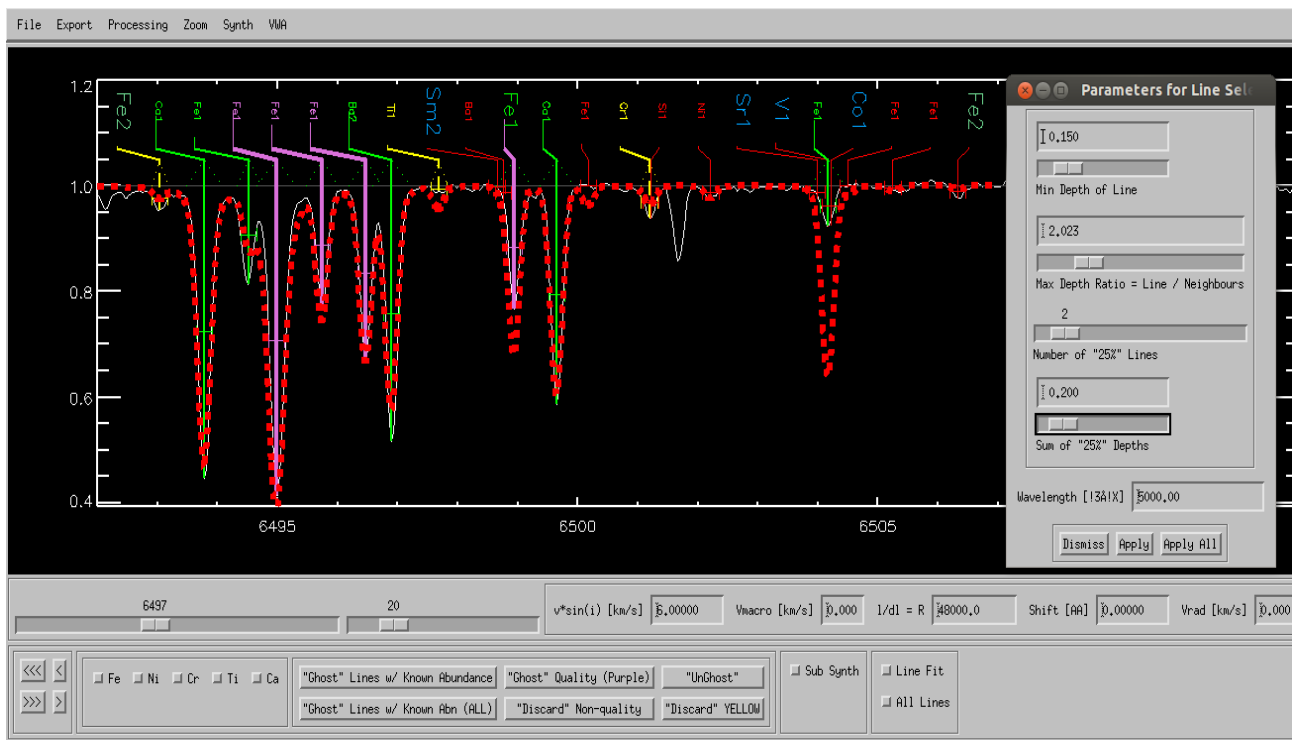
III.2. Vonalszelekció I. – vwa_setup & vwawares

A *vwa_setup* a megadott kiindulási atmoszferikus paraméterek alapján lineáris interpolációval létrehoz egy atmoszferikus modellt a MARCS vagy ATLAS9 modellek lineáris interpolációjával. Az atmoszféra modell alapján szintetikus spektrumot generál, amelyben azonosítja a VALD adatbázisban szereplő abszorpciós vonalakat. Emellett legyárt több más segédfájlt is, melyek többek között tartalmazzák a vonalak atomfizikai paramétereit és az egyes elemek kiinduló abundanciáját.

Mindezek után futtatható a *vwaview*, mely szemlélteti a *rainbow* által normált szinképet, a *vwa_setup* által azonosított vonalakat, valamint a legyártott szintetikus spektrumot. Ez utóbbi módosításaival beállítható két paraméter, a rotációs sebesség projekciója ($v \cdot \sin(i)$), valamint a makroszkópikus sebességturbulencia (v_{mac}). Utóbbi hatása, a szakirodalom és a saját tapasztalataim alapján is igen kismértékű az analízis során, ezért minden esetben 0-ra állítottam az értékét, hogy a későbbiekben meghatározott v_{mic} paraméterrel jellemezhessem a sebességturbulenciát.

Az illesztendő vonalak kiválasztása a *vwaview* programon belül történhet manuálisan vagy megadott paraméterek alapján. Ez utóbbiak a következők (zárójelben az általam használt értékek):

- Minimális vonalmélység: relatív fluxus az 1-es kontinuum-szinthez viszonyítva (0,15).
- Vonalmélység-arány minimuma: az adott vonal és környezete lenagyobb vonalmélységének aránya (2,0).
- "25%"-os vonalak száma: az adott vonalnál legalább 25%-kal mélyebb, környező vonalak száma.
- "25"-os vonalak összege: az előző paraméter által összeszámolt vonalak összvonalmélysége.



6. ábra A HD50499 szinképeének részlete a vwaview program futtatása során. Piros szaggatott vonallal a modell atmoszférából számított szintetikus spektrum.

Mind a négy feltételt teljesítő vonalak kerülnek kiválogatásra (az ábrán zölddel ill. lilával jelölve); ez a fent ismertetett értékekkel tipikusan 1600-1700 vonalat jelentett a FEROS szinképekben. A véglegesítés előtt a vwaview meghatározza a vonalak félértékszélességét (full-width at half maximum, FWHM), valamint az illesztési tartományait.

III.3. Illesztés és vonalszelekció II. – vwa_task & vwaexam

A vonallista exportálása után elindítható a *vwa_task*. Ez a program a számolt modellspektrum alapján iteratív módon illeszti meg az adott abszorpciós vonalat; az illesztési változó az adott vonalat létrehozó elem gyakorisága. A *vwa_task* lefutása időigényes folyamat asztali számítógépeken, ezer vonalat jellemzően két óra illeszt meg. Ezért van szükség az előző pontban bemutatott előzetes vonalszelekcióra, továbbá lehetőség van csak a vas-vonalakra futtatni a programot, melyek kulcsfontosságúak az atmoszférikus paraméterek meghatározása során. A *vwa_task* lefutása után minden eredményt egy *res.idl* fájlban tárol el.

Mindezek után lehetőség van az illesztések megtekintésére a *vwaexam*-mal. Ez a program egyesével szemlélteti az összes illesztett vonalat és kis környezetét, lehetőséget nyújtva az illesztés minőségének vizsgálatára, továbbá a rosszul illesztett vonalak elvetésére. Az egyes ablakokban emellett megjeleníthető az adott vonal pontos hullámhossza, gerjesztési energiája (mindkettő a VALD alapján), ekvivalens szélessége (az illesztés alapján) és az ebből számolt **relatív elemgyakoriság**.

Utóbbi némileg különbözik az abundancia definíciójától:

$$\log \varepsilon(x) = \frac{\log N_X}{\log N_H} + 12 \quad (28)$$

ahol N_H a hidrogén-, N_X pedig az adott elem koncentrációja. A szoláris elemgyakoriságok (a VWA Asplund et al., 2009 értékeit használja) ismeretében az abundanciák ebből könnyen kiszámolhatóak. Bár az elméleti háttér szerint szerint egy elem minden egyes vonalának ugyanazt az abundanciát kellene visszaadnia, az elemgyakoriság még a legjobb spektrumok esetében is jelentős szórást mutat. Az eltéréseknek számos oka lehetséges: pontatlan atomfizikai paraméterek, rossz kontinuum-szint, erős vonal (pl. H β) közelsége, NLTE effektusok, valamint nem megfelelő atmoszferikus paraméterek. Utóbbiak meghatározása, valamint az az abundancia-eltérések kiátlagolása miatt érdemes egy elemtől minél több vonalat felhasználni az analízis során.

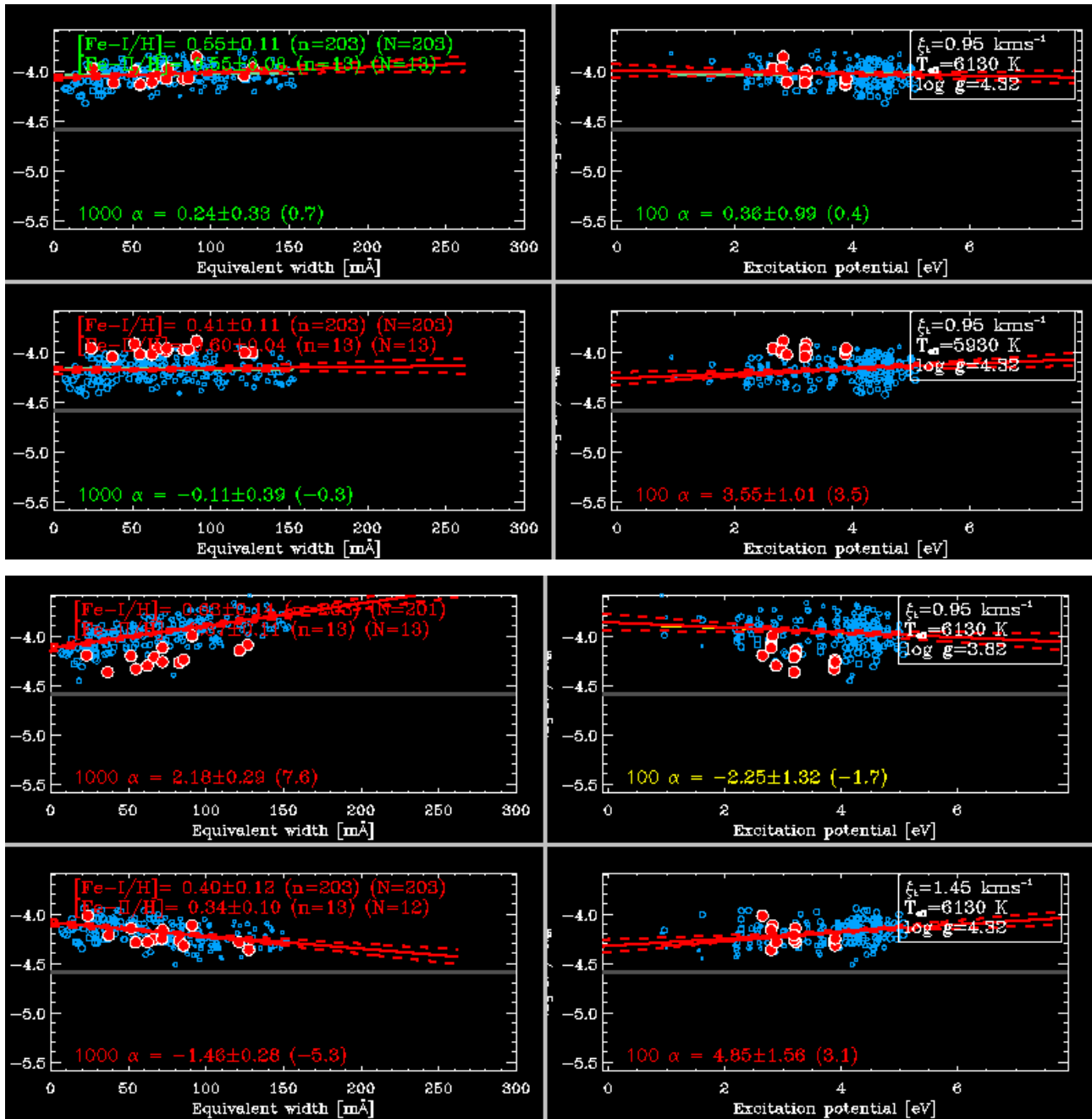
III.4. Atmoszferikus paraméterek meghatározása – vwares

A illesztések elvégzését, valamint a vonalszelekciót követően a *vwares* programmal tekinthetjük meg a mért elemgyakoriságok eloszlását. Ennek előkészítését végzi a *vwa_merge_res* program, mely két *vwa_task* kimeneti fájlt hasonlít össze. A két fájl lehet akár egyazon *res.idl* vagy pedig két különböző atmoszféra modellből származó illesztések eredménye is. Ez utóbbi az atmoszferikus paraméterek pontosításánál kap fontos szerepet.

A *vwares* minden egyes, a *select.idl* fájlban megjelölt vonal alapján kapott elemgyakoriságot ábrázol az ekvivalens szélesség, valamint a gerjesztési potenciál függvényében. A panel alsó felén lévő csúszkával beállítható a vizsgálni kívánt tartomány mind a négy ábra esetében. A kapcsolókkal egyszerűen válthatunk az egyes elemek ábrázolása között, valamint ha a vizsgált vonalak száma meghaladja a húszat, a Fit gombbal lineáris függvényt illeszthetünk az adatpontokra.

Az abundanciaértékek korrelációival az atmoszféra modellünk pontatlanságait lehet felderíteni. A szakirodalom alapján az E_{low} -val való korreláció érzékeny az effektív hőmérsékletre: magasabb hőmérséklet esetén a felső energiaszintek populációja megnő (lsd. Boltzmann-egyenlet), így alacsonyabb elemgyakorisággal lehet elérni helyes illesztést. Ugyanez figyelhető meg az EQW függvényében való ábrázolás esetén a sebességturbulenciával kapcsolatban; utóbbi nagyobb értékei esetén a szintetikus vonalak kiszélesednek, így kisebb abundanciák mutatnak jó illeszkedést a mért vonalakra. Mindkét esetben a helyes atmoszferikus paraméterekkel a korreláció eltűnik (Shuler et al., 2011) és (közel) nulla meredekségű egyenest adnak vissza az adatpontokra való illesztések. A *vwares* továbbá feltünteti a vizsgált elem, valamint (ha van) ionjának vonalai alapján kapott közepes-abundanciaértéket. Ez utóbbi elsősorban a $\log(g)$ paraméter változtatására érzékeny. Mivel a semleges

és ionizált vonalaknak ugyanazt az elemgyakoriságot kell mutatniuk, hangolásukkal a $\log(g)$ is pontosítható.



7. ábra A HD50499 kiválasztott vasvonalai által mutatott relatív gyakoriságok ($\log(\epsilon) - 12$) az ekvivalens szélességeik és a gerjesztési potenciálok függvényében, különböző modell atmoszférák esetében. A legfelső panel a helyes paraméterkombinációval kapott modellt, majd ettől lefelé sorrendben $\Delta T_{\text{eff}} = -200 \text{ K}$ -el, $\Delta \log(g) = -0,5 \text{ dex}$ -szel, $\Delta v_{\text{mic}} = +0,5 \text{ km/s}$ -mal eltérő modelleket ábrázolja. Az adatpontok (kék: Fe I, piros: Fe II vonalak) alatti értékek az illesztett egyenesek merekségei.

Saját tapasztalataim némileg árnyalják ezt a képet. Bár az egyes korrelációk valóban a fent leírtaknak megfelelően érzékenyek a paraméterek változtatására, a sebességturbulenciának ezenfelül jelentős befolyása volt az E_{low} -val való abundancia-korrelációra is (7. ábra, alsó panel, jobb oldal), mivel a v_{mic} növelése esetén rendre nőtt az illesztett függvény meredeksége. Kismértékben a hőmérséklet is kihatással volt a EQW-ábra adatpontjaira (5. ábra, második panel, balra), magasabb értékeire az abundanciák trendje szintén növekedést mutatott. A tapasztalt "keresztbe-hatás" csökkenthető, ha előzetesen kiiktatjuk az EQW és az E_{low} értékek közti korrelációt az ilyen mutató vonalak elvetésével (Teske et al., 2014b). Ez a lépés gyakran hiányzik a szakirodalomban leírtakból, a végső, helyes paraméterértékeket pedig nem befolyásolja számottevően. Mivel a szakcikkekben leírtaknál jóval nagyobb vonallistákkal dolgoztam, továbbá a VWA nem nyújt lehetőséget rá, ezért én sem szűrtem ki az EQW- E_{low} korrelációt. Ennek hiánya az atmoszferikus paraméterek iteratív pontosítása során okozott nehézségeket.

Az atmoszferikus paraméterek akkor bizonyulnak megfelelőnek, ha az EQW- és E_{low} -ábrákra illesztett egyenesek meredeksége a konfidencia-határon belül van a nullához képest (a szám adatok ilyenkor zölden jelennek meg, lsd. 7. ábra, felső panel). Amennyiben az egyenes illesztése után nem ilyen értéket kapunk, a fent leírtak alapján megváltoztatott paraméterek alapján új modellt kell alkotni. Ezt megtehetjük a *vwa_model* taszkkal, melyben a viszonyítási alapként megadott modellhez képest változtathatjuk meg a T_{eff} , $\log(g)$, v_{mic} , $v \cdot \sin(i)$ értékét. A $[Fe/H]$ kivételt képez ez alól, a *vwa_model* a viszonyítási modell fémesség értékét veszi át erre a célra. Az új modell legyártása után a *vwa_task* újbóli futtatása szükséges. Az eredmények összehasonlításával kézzel iterálva juthatunk el a helyes paraméter-kombinációhoz.

III.5. Hibabecslés

A hibahatárok megállapítása jelentős nehézségekbe ütközik, mivel közvetetten határozzuk meg az atmoszferikus paramétereket. Egy gyakran használt módszer, hogy a helyes paraméter-kombinációtól eltérve (az 7. ábrán látottakhoz hasonlóan) az adatpontok szórását vizsgálják (Teske et al., 2013). Tipikusan az egyes objektumok paramétereikhez tartozó hibahatárok nem különböznek jelentősen egymástól: a ΔT_{eff} 30 és 60 K, a $\Delta \log(g)$ 0,05 és 0,20 dex, a Δv_{mic} 0,05 és 0,20 km/s, a $\Delta [Fe/H]$ pedig 0,04 és 0,12 dex között változik (Santos et al. 2004, Sousa et al. 2008). Mivel ezekben az esetekben is becsült hibaértékekről van szó, valamint a különböző cikkekben számolt hibahatárok kis tartományon szórnak, a saját munkámban az egyszerűség kedvéért fix hibahatárokat szabtam meg. Ezek a későbbiekben rendre $\Delta T_{eff} = \pm 60$ K, $\Delta \log(g) = \pm 0,15$ dex, $\Delta v_{mic} = \pm 0,15$ km/s.

A *vwares* taszk az adott elem abundanciájára ad hibabecslést az adatpontok szórásából (7. ábra, a panelek bal felső sarkában látható). Ezek a vas, a titán és a nikkelt esetében elhanyagolható mértékben szórnak a 0,1 dex-es érték körül, ami jó összhangban van a szakirodalomban becsült hibahatárokkal.

Az eredmények ismertetésénél ezért rendre $\Delta[X/H]=\pm 0,1$ dex-et adtam meg, ahol X megfelel a Fe, Ni, Ti, O, C és Al elemeknek. Kivételt képez a szilícium, melynél a vonalak elemgyakoriságai rendre jelentős szórást mutattak, ezért $\Delta[Si/H]=\pm 0,2$ dex értéket alkalmaztam.

III.6. MOOG

A MOOG³ egy Chris Sneden által Fortran környezetre írt analízis programcsomag (Sneden, 1973), melynek elsődleges felhasználása csillagok kémiai összetételének megállapítása LTE feltételek mellett. A számítások elméleti háttere és a munkafolyamat megegyezik a VWA ismertetése során leírtakkal, gyakorlati felhasználása azonban praktikusabbá teszi kevés vonallal rendelkező elemek abundancia-analíziséhez. A MOOG-ban grafikus kezelőfelület helyett egy paraméter fájlal lehet beállításokat eszközölni. Szintén a paraméter fájlban kell megadni a kimeneti fájl helyét, valamint a modell atmoszféra és a vonallista elérési útvonalát. Az összes beállítható paraméter leírását, valamint a bemeneti adatok formátumát részletesen tárgyalja Sneden honlapján található leírás.

A használandó modell atmoszférát előzetesen a felhasználónak kell előkészítenie a megfelelő formátumban. A VWA könyvtárában talált MARCS grid tartalmazta a KURUCZ típusú modellek információit (hőmérséklet, elektron koncentráció, sűrűség, Rosseland-féle abszorpciós koefficiens), így ezeket alakítottam át a követelményeknek megfelelően. Erre a célra interpoláló programot írtam *python* nyelven, mely kiszámolta a három dimenziós paraméterterben (T_{eff} , $\log g$, $[Fe/H]$) a modell bemenő adatait 72 LTE rétegre. A sebességturbulencia értékét a modellek végén kell megadni, akárcsak az egyes elemek specifikus abundanciát (ez utóbbira nem volt szükség az analízis során). Minden esetben a VWA-val meghatározott atmoszferikus paraméterek alapján gyártottam le az aktuális modell atmoszférát.

A VWA-val ellentétben a MOOG nem közvetlenül az adott vonal illesztését végzi, hanem a kimért ekvivalens szélességeket igyekszik reprodukálni. Ehhez más szoftverrel előzetesen meg kell határozni az egyes vonalak EQW-jét, melyeket az atomfizikai paraméterekkel (E_{low} , $\log(gf)$) együtt a vonallistában kell megadni. Erre a célra egy előzetes, bő vonallistát állítottam össze, mely az analízis során vizsgált elemek 5-10 legerősebb vonalának paramétereit tartalmazták. Az adatokat a NIST (National Institute of Technology) Atomic Spectra Database-ből, valamint a Hirata és Horaguchi vonalkatalógusából nyertem. A mérésekhez az IRAF *splot* taszkját használtam, melyben a mérhető vonalakra Voigt- és Gauss-függvényeket illesztettem. A végleges vonallistákba a két profil átlagai kerültek.

A paraméterfájl megadása után a MOOG *abfind* taszkja⁴ kiszámítja az egyes vonalak relatív elemgyakoriságait. A MOOG továbbá grafikusan is megjeleníti az eredményeket a SuperMONGO

³ <http://www.as.utexas.edu/~chris/moog.html>

⁴ http://www.pas.rochester.edu/~ebubar/abfind_moog.ps

szoftver segítségével. Az ábrák teljesen hasonlóak a VWA *vwares* programjánál bemutatottakkal, itt azonban további beállításokat nem lehet megadni. Bár a korábbiakban ismertetett trendek itt is feltűntek időnként, az alacsony vonalszám (elemenként 3-6) nem tette lehetővé az atmoszferikus paraméterek felülvizsgálatát. A továbbiakban ezért az *abfind* által megadott relatív gyakoriságok számtani közepét használtam fel.

IV. Exobolygós csillagok elemgyakoriság-analízise

Munkám során 12 exobolygóval rendelkező csillagra végeztem el a III. fejezetben ismertetett munkafolyamatot és állapítottam meg hét elem abundanciáit. Az eredeti elképzelések szerint hozzáférést kaptam volna a McDonald obszervatórium spektrum-adatbázisához, azonban az illetékes személy doktoranduszai éppen hasonlóabundancia-analíziseket végeznek, így más adatforrás után kellett nézmem. A választás az European Southern Observatory (ESO) két spektrográfjára, a FEROS-ra és HARPS-ra esett, mivel eredményeik többnyire nyilvánosak, célobjektumaik között gyakran szerepelnek exobolygós csillagok és kellően nagy felbontással rendelkeznek az analízishez (Isd. alább). Nem elhanyagolható szempont továbbá a színeképek homogén forrása sem.

Az előzetes célok között szerepelt a csillag körüli porkorongok és a csillagok, esetleg bolygók fizikai paramétereik közti kapcsolat vizsgálata, ezért a programobjektumok szelekciója során szempont volt előbbi jelenléte. Ennek megfelelően hat csillag a Kóspál et al. (2009) cikk által vizsgált mintából került ki, melyeknél egyértelműen sikerült kimutatniuk porkorong jelenlétét, valamint korábbi kutatások megerősítették legalább egy bolygó létezését is. A programobjektumok másik fele Trilling et al. (2008) listája alapján olyan exobolygós csillagok, melyeknél ugyanúgy vizsgálták a porkorong által okozott infravörös többletsugárzást, de nem találtak erre utaló jelet.

IV.1. Színeképek eredete

A HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher, Mayor et al., 2003) echelle spektrográf a La Silla Obszervatórium 3,6 méter átmérőjű teleszkópjára van telepítve. Elsődleges feladata exobolygó-jelölttel rendelkező csillagok radiális sebességmérése. Ennek megfelelően nagy felbontású ($R=115.000$), mellyel akár 1 m/s-os Doppler-eltolódás is kimérhető. Hullámhossztartománya 3780 Å-től 6910 Å-ig terjed. A FEROS (Fibre-fed, Extended Range, Échelle Spectrograph, Kaufer et al., 1999) szintén a La Silla Obszervatórium teleszkópján működik. Felbontása ugyan kevesebb, mint a fele a HARPS-ének ($R=48.000$), a vizsgálható spektráltartomány viszont 3500 Å-től 9200 Å-ig tart.

Az ESO archívumában⁵ objektumnév (bármilyen Symbad-katalógusbeli nevet felismer) alapján lehet rákeresni mindkét spektrográf méréseire. Minden esetben letölthető a spektrográfra kifejlesztett egyedi pipeline által kiredukált eredményspektrum; az előkészítési folyamatból csak a III. fejezetben részletezett kontinuum-normálás és Doppler-korrekció maradt. Az első objektum (HD216435) esetében mind a HARPS, mind a FEROS színeképre elvégeztem a VWA analízist, hogy megállapítsam, elégséges-e a FEROS alacsonyabb felbontása. Továbbá ez jó lehetőséget biztosított

⁵ <http://archive.eso.org/wdb/wdb/eso/repro/form>

annak ellenőrzésére, hogy két különböző forrású színekép esetében ugyanarra az eredményre jutok-e.

HD216435	Fe I vonalak	Fe II vonalak	T_{eff}	$\log(g)$	v_{mic}	[Fe/H]
HARPS	167	21	5980	4,17	0,8	0,46
FEROS	151	14	5990	4,25	0,7	0,49

1. táblázat A HD216435 csillag HARPS és FEROS színeképeinek VWA-val elemzéséből kapott atmoszferikus paraméterek összehasonlítása. A HARPS több vasvonala annak tudható be, hogy a vonalszelekció során kisebb vonalmélységet is megengedtem (min. mélység = 0,1), mint a FEROS spektrum esetében(0,15).

Az összevetés alapján a FEROS spektrumok is megfelelnek a precíz VWA-analízishez. Bár szignifikánsan nem jutottam több, jól használható vonalhoz, a nagyobb spektráltartomány lehetővé teszi több szén- és alumínium-vonal vizsgálatát, valamint az O I NIR triplettel az oxigén-abundancia is meghatározható. Mivel az oxigén és szén relatív mennyisége fontos indikátora az exobolygók kialakulásának és összetételének, ezért minden esetben a FEROS spektrumot részesítettem előnyben. A HD46375 esetében az ESO archívum csak HARPS spektrumot tartalmazott.

Objektum	Spektrográf	Törmelékkorong
HD142	FEROS	nem
HD1237	FEROS	nem
HD23079	FEROS	nem
HD27442	FEROS	nem
HD28185	FEROS	nem
HD46375	HARPS	igen
HD50499	FEROS	igen
HD73526	FEROS	igen
HD114729	FEROS	nem
HD187085	FEROS	igen
HD202206	FEROS	igen
HD216435	FEROS, HARPS	igen

2. táblázat A tizenkét program-objektum felhasznált színeképei, valamint a csillag körüli esetleges porkorong jelenléte.

IV.2. VWA-kalibráció

A program-objektumok vizsgálata előtt a VWA pontosságának ellenőrzése céljából analizáltam a Nap, valamint egy fényes csillag a HARPS színeképét. A Napnál pontosan ismerjük az atmoszferikus

paramétereket, így az esetleges eltérések a program pontatlanságának vagy a munkafolyamat szisztematikus hibájának tudható be. A Procyont gyakran használják a módszerek kalibrációjához (Doyle et al. 2012), mert a gyakori, változatos mérések miatt az átlagosnál pontosabb paraméterekre számíthatunk. A Nap vas-abundanciája definíció szerint 0, míg számos mérés alapján a Procyonban vas elemgyakorisága nem különböztethető meg a Napétól.

Objektum	T_{eff}	$\log(g)$	v_{mic}	[Fe/H]	T_{eff}	$\log(g)$	v_{mic}	[Fe/H]	Referencia
Nap	5810	4,43	0,60	0,17	5777	4,44	0,85	0,0	Gray et al. 2008
	± 60	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$					
Procyon	6625	4,01	1,52	0,19	6566	4,01	2,2	0,0	Liebert et. al. 2013
	± 60	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	± 65	$\pm 0,03$			

3. táblázat A Nap és a Procyon HARPS színekéből kapott atmoszferikus paraméterek (bal oldal) összehasonlítása a szakirodalomban szereplő értékekkel (jobb oldal).

Ahogy az a 3. táblázatból leolvasható, az effektív hőmérsékletet és a nehézségi gyorsulást kis eltéréssel (hibahatáron belül) sikerült reprodukálni. A sebességturbulencia empirikus paraméter, így az itt tapasztalt differenciából messzemenő következtetés nem vonható le (a különbség részben annak is tudható be, hogy a v_{mac} paraméter értékét következetesen nullának vettem). Jelentős az eltérés azonban a fémesség értékeket illetően: a szisztematikus, átlagosan -0,18-as eltérés a korábbi mérésektől azt jelenti, hogy ezt a mennyiséget illetően zérusponthi korrekcióra van szükség. Az eltérés pontos oka a dolgozat megírásakor még nem ismert.

Elem	Vonalak száma	[X/H]
szilícium	16	$0,15 \pm 0,20$
titán	37	$0,10 \pm 0,10$
nikkel	63	$0,1 \pm 0,10$

4. táblázat A Nap HARPS színekének VWA-analíziséből kapott fém-abundanciák.

A többi elemet illetően a szilícium, a nikkell és a titán mutatott elégséges számú, jól illeszthető vonalat ahhoz, hogy abundanciájukat a VWA-val megállapíthassam. Mivel a Procyon esetében a korábban mért értékek jelentős szórást mutattak, ezért a három fém elemgyakoriság-korrekciójának megállapításakor csak a Nap adataira támaszkodtam. Eltérő mértékű negatív korrekció ezeknél az elemeknél is szükségesnek látszik.

Ahogy a későbbi program-objektumoknál, így itt is előfordult, hogy a már pontosan behatárolt modell ellenére az adatpontok lineáris trendet mutattak az ekvivalens szélesség vagy a gerjesztési potenciál

függvényében. Mivel minden esetben a vasvonalak száma volt a domináns, ezért az atmoszferikus paraméterek további pontosítására nem került sor és a kiválogatott vonalak abundanciáinak számtani közepét fogadtam el végső értéknek. A szilícium esetében két jól elkülöníthető csoportban szórtak az adatpontok, melyek nem a lineáris trendeknek, hanem valószínűleg a pontatlan $\log(gf)$ paramétereknek voltak betudhatóak. A két góc eltérése jelentős, $\sim 0,4$ dex értékű volt, ezért a kisebb (nagyjából fele annyi vonalat számláló) vonalcsoport elemeit következetesen kizártam az analízisből. Gyakran azonban így is jelentős maradt az adatpontok szórása, ezért a szilícium esetében mindenképpen magasabb hibahatárt kell megállapítani az elemgyakoriságot illetően.

IV.3. Eredmények I. – Atmoszferikus paraméterek

Az 5. táblázatban láthatóak a VWA-analízisből kapott atmoszferikus paraméterek. Az eredmények ellenőrzéséhez hasonló munkamódszert választó szakcikkeket kerestem. Sousa et al. (2008) átlagosan kétszáz vasvonalat mért ki az ARES programmal, Santos et al. (2004) és Sousa et al. (2006) pedig egy kisebb, nagyjából 40 vasvonalból álló listát használt a MOOG-hoz. Egyedül a HD187085 esetében nem találtam a szakirodalomban abundancia-analízisből kapott atmoszféra paraméterek.

A Santos-féle cikkben objektumonként külön-külön számoltak hibahatárok (ΔT_{eff} : 30-60 K, $\Delta \log(g)$: 0,05-0,2 dex, Δv_{mic} : 0,05-0,15 km/s, $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]$: 0,04-0,1 dex) igen közel estek az általam tapasztalati úton becsültekhez, így ezeket nem tüntettem fel az alábbi táblázatban. Sousa et al. (2011) által számolt hibahatárok ($\Delta T_{\text{eff}} \sim 10$ K, $\Delta[\text{F}/\text{H}] \sim 0,02$ dex) irreálisan alacsonynak tűnnek, főleg más szakcikk megfontolásaival összevetve, mely szerint az effektív hőmérséklet hibájának becslése nem mehet ± 50 K alá (Torres et al., 2008)

Megállapítható, hogy az említett cikkek eredményeivel (többségében) közel megegyező értékeket kaptam. A mikroszkópikus turbulenciákra kapott értékek következetesen elmaradtak a cikkek sebességértékeitől, ennek okai a korábbiakban említett okoknak tudható be. Jelentősnek számító, a becsült hibahatárokon túlmenő eltérés mutatkozott a HD1237, a HD27442, HD28185, valamint a HD 46375 T_{eff} és/vagy $\log(g)$ értékeinél, ezek esetében további összehasonlítási lehetőségeket kerestem a szakirodalomban.

A Ghezzi et al. (2010) kis (~ 30) vonalszámú minta alapján az ARES programmal analizálta a HD1237-et: az általa talált 5572 K-es effektív hőmérséklet az általam kapott és a Santos-féle eredmény között van, míg a 4,58 dex-es $\log(g)$ érték utóbbit erősíti. Az analízis fő célját jelentő fémesség értékekben azonban gyakorlatilag nincs eltérés ($[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{Ghezzi}} = 0,12 \pm 0,04$).

Hasonló a helyzet a HD28185-t illetően, mely szintén szerepel a Sousa et al. (2008) alapján készült VizieR katalógusban. Az ebben lévő effektív hőmérséklet alapján az 5750 K-es eredményem valóban túlzónak tűnik, ám a $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{Sousa}} = 0,21 \pm 0,02$ egybevág a VWA-analízisem eredményével.

Objektum	T_{eff}	$\log(g)$	v_{mic}	Referencia	T_{eff}	$\log(g)$	v_{mic}
HD142	6350	4,35	1,15	Santos et al. 2004	6302	4,34	1,86
HD1237	5620	4,73	1,05	Santos et al. 2004	5536	4,56	1,33
HD23079	6000	4,50	0,65	Sousa et al. 2008	5980	4,48	1,12
HD27442	4710	3,47	0,75	Santos et al. 2004	4825	3,55	1,18
HD28185	5750	4,45	0,80	Santos et al. 2004	5656	4,45	1,01
HD46375	5390	4,68	0,67	Santos et al. 2004	5268	4,41	0,97
HD50499	6130	4,32	0,95	Sousa et al. 2006	6060	4,29	1,23
HD73526	5700	4,30	0,90	Santos et al. 2004	5699	4,27	1,26
HD114729	5900	4,20	1,00	Santos et al. 2004	5886	4,28	1,25
HD187085	6200	4,45	1,05	-	-	-	-
HD202206	5810	4,75	0,80	Santos et al. 2004	5752	4,50	1,01
HD216435	5990	4,25	0,80	Santos et al. 2004	5938	4,12	1,28

5. táblázat A program-objektumok VWA analízise alapján kapott atmoszferikus paraméterek (bal oldali blokk) összehasonlítása a szakirodalomban szereplő, azonos módszerrel kapott eredményekkel (jobb oldali blokk). A becsült hibaértékek rendre $\Delta T_{\text{eff}} = \pm 60 \text{ K}$, $\Delta \log(g) = \pm 0,15 \text{ dex}$, $\Delta v_{\text{mic}} = \pm 0,15 \text{ km/s}$.

A HD27442-et Randich et al. (1999) vizsgálta (szintén kevés vonal alapján), az általuk talált paraméter értékek $T_{\text{eff}}=4789 \text{ K}$, $\log(g)=3,3 \text{ dex}$ és $[\text{Fe}/\text{H}]=0,22$. Mindez kiváló egyezésben van a saját VWA-analízissel, ellentétben az 5. táblázatban foglalt referencia értékekkel.

A HD46375 szerepel Butler et al. (2006) közeli exobolygókat összesítő katalógusában. Az ebben lévő paraméterértékek sorra $T_{\text{eff}}=5285 \text{ K}$, $\log(g)=4,53 \text{ dex}$ illetve $[\text{Fe}/\text{H}]=0,24 \text{ dex}$, amelyek inkább a Santos et al. analízist támasztják alá. A diszkusszió során figyelembe fogom venni az általuk kapott 0,2 dex-es fémesség értéket is.

Összességében elmondható, hogy az általam számított atmoszferikus paraméterek nem térnek el jelentősen a szakirodalomban szereplő értékektől, szignifikáns trend pedig (a sebességturbulenciákat leszámítva) egyáltalán nem jelentkezett. Továbbá megállapítható, hogy az egyes szakcikkek azonos módszerrel kapott eredményei között is jelentős, a megadott hibahatárokat meghaladó különbségek adódhatnak, ami alátámasztja, hogy az alkalmazott hibaszámítási módszerek nem megfelelőek.

Objektum	Fe-I vonalak	Fe-II vonalak	[Fe/H]	[Fe/H]	Fe-I vonalak	Fe-II vonalak
HD142	72	18	0,07	0,14	28	8
HD1237	198	10	0,13	0,12	37	7
HD23079	260	17	-0,12	-0,12	252	35
HD27442	95	5	0,21	0,39	36	6
HD28185	181	8	0,18	0,22	38	6
HD46375	197	9	0,30	0,20	37	4
HD50499	203	13	0,37	0,39	39	13
HD73526	225	13	0,23	0,27	37	6
HD114729	220	23	-0,32	-0,25	26	5
HD187085	245	29	0,13	-	-	-
HD202206	199	13	0,27	0,35	39	6
HD216435	185	18	0,30	0,24	33	6

6. táblázat A program-objektumok semleges és ionizált vasvonalai alapján megállapított fémességek (bal oldali blokk) összehasonlítása az 5. táblázat cikkei által kapott értékekkel (jobb oldali blokk). A VWA által kalkulált hibaértékek mindegyike elhanyagolható különbséggel $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]=\pm 0,10$ dex.

IV.4. Eredmények II. - Elemgyakoriságok

Az alábbi táblázatban a nagy vonalszámú elemek VWA-analízisből kapott elemgyakoriságai vannak feltüntetve. A kiválasztott vonalak száma ingadozó, ez az átfedések okozta nehéz illesztéseknek tudható be. A vwa_warek által az átlagos abundanciaértékekre megadott hibataromány átlagosan +0,15 dex volt a titán és a nikkelt esetében, a szilíciumnál azonban (a fentiekben leírt vonalszelekció ellenére is) néhány csillagnál a 0,2 dex-et is meghaladta. A vas vonalakhoz képest nagyobb hibatarományt egyértelműen a kisebb vonallisták okozzák.

Az előző fejezetben leírt munkamenet szerint a VWA-analízist követően interpolációval legyártottam a megfelelő Kurucz-modelleket, majd az előzetes vonallistáim alapján ekvivalens szélességeket mértem az IRAF *splot* taszkjával. Az alacsony vonalszámú elemek közül a szén, az oxigén és az alumínium mutatott (majdnem) minden objektumban egynél több, Gauss-profillal jól illeszthető vonalat. Az alábbi táblázatban ezen elemek MOOG-gal számolt elemgyakoriságait tüntettem fel.

Objektum	Si	[Si/H]	Ti	[Ti/H]	Ni	[Ni/H]
	vonalak		vonalak		vonalak	
HD142	16	0,05	4	-0,04	28	0,01
HD1237	16	0,15	26	0,11	30	0,09
HD23079	30	-0,14	30	-0,13	77	-0,19
HD27442	12	0,19	38	0,31	31	0,37
HD28185	20	0,25	25	0,19	57	0,27
HD46375	10	0,37	44	0,37	29	0,32
HD50499	33	0,31	13	0,34	62	0,41
HD73526	18	0,32	16	0,27	30	0,27
HD114729	18	-0,21	14	-0,22	43	-0,38
HD187085	30	0,11	18	0,08	60	0,06
HD202206	13	0,31	11	0,26	41	0,29
HD216435	23	0,30	22	0,26	46	0,32

7. táblázat A program-objektumok VWA-analíziséből nyert szilícium-, titán- és nikkell-abundanciák. Az VWA által számolt hibaértékek mindegyike csak kismértékben különbözik $\Delta[\text{Ti}/\text{H}]=\pm 0,10$ dex illetve $\Delta[\text{Ni}/\text{H}]=\pm 0,10$ dex-től, míg a szilícium esetében becsült hibahatár $\Delta[\text{Si}/\text{H}]=\pm 0,20$ dex.

Az mért oxigénvonalak minden esetben a közeli infravörös O I tripletjének komponensei voltak. Számos szakcikk értekezik ezen vonalakat befolyásoló NLTE-hatások fontosságáról, de a szükséges korrekció kiszámítása és mértéke igen változatos. A bizonytalanság legfőbb oka hidrogén-atomokon való rugalmatlan szóródás becslése, mivel sem kísérleti, sem optikai számítások nem állnak rendelkezésre ezt illetően. A méréseket követően a Takeda (2003) cikkben szereplő közelítő formulát használtam az oxigén relatív elemgyakoriságának NLTE-korrekciójára:

$$\Delta[\text{O}/\text{H}]_{\text{NLTE}} = a \cdot 10^{b \cdot \text{EQW}} \quad (29)$$

ahol EQW az egyes vonalak ekvivalens szélessége mÅ-ben, a és b pedig a cikkben megadott táblázatokból (az atmoszferikus paraméterek alapján) lineáris interpolációval megkapható paraméterek. A 8. táblázatban a már NLTE-korrigált oxigén-abundanciák szerepelnek.

Objektum	O	[O/H]	C	[C/H]	Al	[Al/H]
	vonalak		vonalak		vonalak	
HD142	3	0,23	4	0,22	2	-0,06
HD1237	3	0,13	3	0,09	5	0,01
HD23079	3	0,02	5	-0,06	6	-0,25
HD27442	-	-	-	-	5	0,23
HD28185	3	0,21	4	0,26	4	0,19
HD46375	-	-	-	-	1	0,11
HD50499	3	0,28	4	0,35	5	0,28
HD73526	3	0,24	3	0,29	4	0,23
HD114729	3	-0,01	4	-0,17	6	-0,26
HD187085	3	0,10	5	0,10	4	-0,12
HD202206	3	0,25	4	0,30	4	0,11
HD216435	3	0,26	5	0,33	4	0,15

8. táblázat A program-objektumok kevés vonalat mutató elemeinek MOOG-gal számolt abundanciái. A becsült hibahatárok rendre $\Delta[X/H]=\pm 0,10$ dex.

V. Összefüggések és korrelációk

V.1. Porkorong jelenléte

Ahogy azt a IV.1. alfejezetben is kifejtettem, a program-objektumok kiválasztása az alábbi szempontok alapján történt:

- A csillagok megerősített exobolygóval rendelkeznek.
- A program-objektumokról szabadon elérhető színekép készült a FEROS vagy a HARPS spektrográfokkal.
- A program objektumok minden tagjánál vizsgálták korábban az esetleges infravörös-többletsugárzást. Ez alapján a minta egyik felénél porkorongot fedeztek fel, míg a másik felénél kizárták ennek lehetőségét.

Utóbbi szempont azért merült fel az objektumlista összeállításánál, hogy megvizsgáljam az esetleges korrelációkat a törmelékkorongok valamint csillaguk fizikai paraméterei között. A következő táblázatban előbbieket szerepelnek; a paraméterek definíciói és értékei a Kóspál et al. (2009, porkoronggal rendelkezők), valamint a Trilling et al. (2008, porkoronggal nem rendelkezők) cikkekből származnak.

A számos próbálkozás és vizsgálat nem hozott pozitív eredményt, a csillagok jellemzői és a körülöttük lévő törmelékkorongok egyetlen mérhető paramétere között sem mutatkozott szoros korreláció. Ha viszont a törmelékmező létezésének függvényében keresünk összefüggéseket, észrevehető, hogy a porkoronggal rendelkező hat csillag átlagos fémessége jelentősen nagyobb, mint a porkoronggal nem rendelkezőké. A fentiekben leírt kiválasztási szempontokon túl a minta összeállítása véletlenszerű volt, csökkentve a szelekciós effektusok fellépésének valószínűségét. A minta elemszáma túl alacsony eloszlásfüggvények megalkotásához, a 9-10-11-12. ábrák azonban jól szemléltetik a két minta vas-abundanciáinak különbségeit (piros: porkorongos csillagok, kék: porkorong nélküliek).

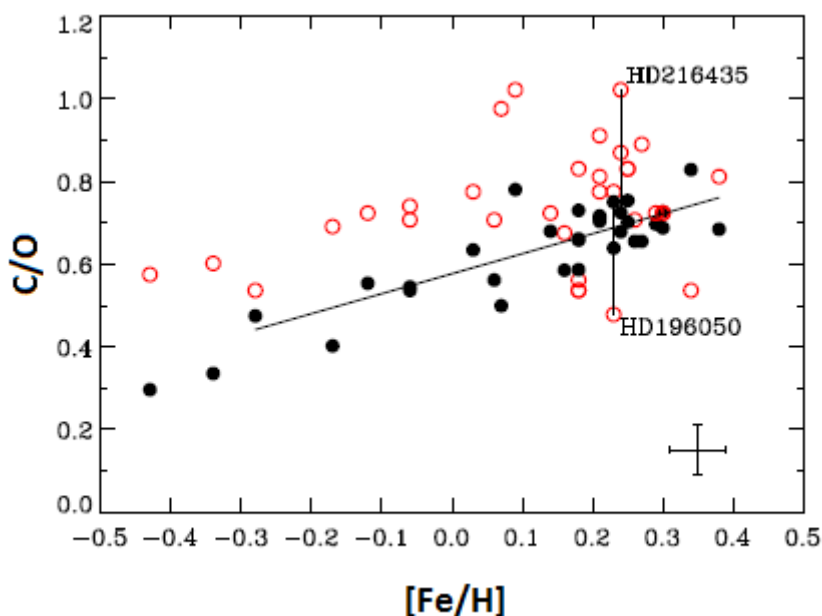
VI.2. C/O arány

Az exobolygók szén-oxigén aránya fontos indikátora a légkör hőmérséklet-struktúrájának, molekuláris összetételének, valamint keletkezési helyének a protoplanetáris diszkben (Öberg et al., 2011). Számos szakcikk tanulmányozta a bolygóval rendelkező csillagok C/O értékeit:

$$C/O = \frac{\epsilon_C}{\epsilon_O} \quad (30)$$

ahol az ε értékek az egyes elemek koncentrációjának felelnek meg. Delgado Mena et al. (2010) 100 bolygós csillagot vizsgálva arra a következtetésre jutott, hogy a magas C/O arány ($>0,8$) gyakoribb (34%), mint a kontrollmintában (20%, 270 csillagra). Petigura & Marcy (2011) hasonló eredményt kapott más mintákat használva (34% 99 exobolygós- és 27% 457 bolygó nélküli csillagra). A későbbi tanulmányok azonban azt mutatták, hogy mindkét mintatípusban túlbecsülték a magas C/O csillagok arányát, mivel szelekciós effektusok miatt a szén-gazdag csillagok felülreprezentáltak voltak. (Fortney et al., 2012).

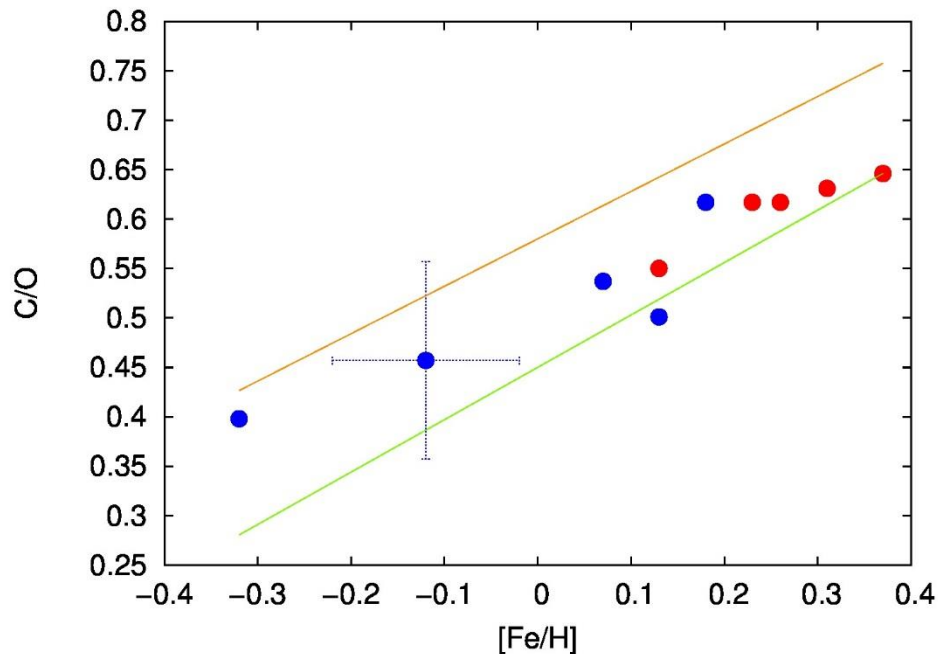
Nissen (2013) az én kutatásomhoz hasonlóan FEROS spektrumokat vizsgált a MOOG-gal 33, Delgado Mena et al. (2013) exobolygós mintájából származó csillag esetében. Utóbbi analizisével ellentétben NLTE-korrekcíót alkalmazott az oxigén tripletből nyert abundanciára, melyet Fabbian et al. (2009) vizsgálataira alapozott. Az eredményül kapott C/O értékek nagyon szoros korrelációt mutattak a fémességgel ($C/O_{\text{Nissen}}=0,48 \cdot [Fe/H]+0,58$) és jelentős javulás látszott az LTE-analízishez képest.



8. ábra A Delgado Mena et al. (2013) (piros karika) és a Nissen (2013) (fekete pont) által számolt C/O arányok a fémesség függvényében. A fekete vonal a Nissen által illesztett függvényt jelöli. A szemléltetés végett két csillag esetében összekötötték a megfelelő értékeket. Forrás: Nissen (2013).

A lineáris trend jól magyarázható a galaxis kémiai evolúciójával, pontos értéke azonban bizonytalanak tűnik. Teske et al. (2014) szintén a MOOG-gal határozta meg 16 forró Jupiter csillagának atmoszferikus paramétereit és elemgyakoriságait, az oxigén-vonalakra azonban eltérő forrásból származó NLTE-korrekcíót alkalmazott. Az így kapott C/O értékek szintén lineáris trendet mutattak a $[Fe/H]$ függvényében, azonban következetesen alatta maradtak a Nissen (2013) által illesztett függvénynek ($C/O_{\text{Teske}}=0,53 \cdot [Fe/H]+0,45$).

A 8. táblázatban szereplő, NLTE-korrigált értékeket felhasználva sikerült reprodukálni a fémességgel való lineáris kapcsolatot. A tíz adatpont mindegyike a Nissen-féle függvény alatt helyezkedik el; a differencia oka minden bizonnyal az eltérő NLTE-számítás, mivel ugyanazon csillag, egyenlő szélességűnek mért vonalára is jelentős különbségek mutatkoztak a korrekció értékére. Mindezt alátámasztja Teske et al. (2013b) is, amelyben az 55 Cnc oxigén-vonalain hasonlította össze a kétféle NLTE-korrekciót.



9. ábra Az általam számolt C/O arányok a fémesség függvényében, valamint a Nissen (2013) (sárga) és Teske et al. (2014) (zöld) által illesztett lineáris függvények. Pirossal a porkoronggal rendelkező csillagok, kékkel a porkorong nélküliek szerepelnek. Szemléltetésül a HD114729 esetében megadtam a becsült hibasávokat.

A magasabb fémességű adatpontok jó egyezést mutatnak a Teske et al. (2014) által meghatározott egyenessel, az alacsonyabbak viszont jelentősen eltérnek tőle. A legjobb illeszkedést adó függvény a $C/O_{\text{Barna}} = 0,35 \cdot [Fe/H] + 0,50$. Következtetésként elmondható, hogy az NLTE-korrekció alkalmazása elengedhetetlen az oxigén.vonalak abundancia-analízise során, annak mikéntje azonban egyelőre a feketemágia körébe tartozik.

VI.3. Abundancia trendek

Mind a mai napig nem tisztázott, hogyan befolyásolja egy bolygó jelenléte a csillag kémiai összetételét, illetve megfordítva az összefüggést, a csillag abundancia értékeiből lehet-e következtetni a bolygó fizikai paramétereire és összetételére. Az egyetlen biztosnak látszó összefüggés a bolygótípusok csillag [Fe/H]-ja szerinti eloszlásából következik. Ez alapján a forró Jupiterek szignifikánsan a nagyobb fémességű csillagok körül keringenek; az eloszlás maximuma ~0,2 dex-szel nagyobb, mint a bolygótlan kontrollmintáé (Sousa et al., 2011). A trend gyengébb a Neptunusz-

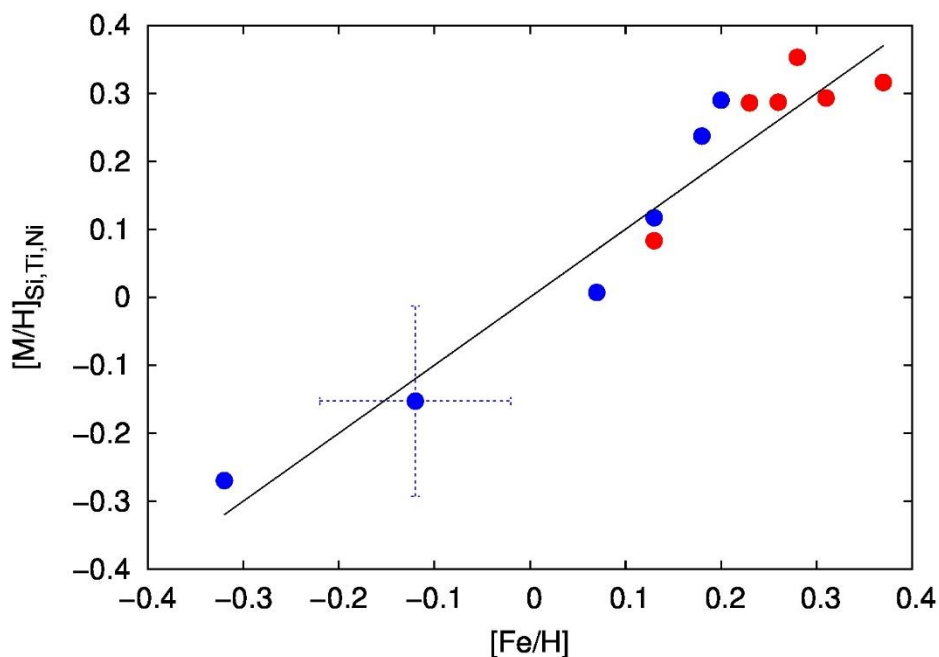
méretű bolygókra nézve (Ghezzi et al., 2010), míg Szuper-Földdel rendelkező csillagok esetében nem látszik különbség a kontrollmintával (Buchhave et al., 2012).

Amennyiben az elemgyakoriságok bolygókeletkezésre gyakorolt hatását (vagy fordítva) vizsgáljuk, érdemes csoportosítani a kőzet-formáló elemeket (az angol terminológia a 'refractory elements'-et használja, az ellentmondások elkerülése végett az alábbiakban ezt a kifejezést használom), mint pl. a szilícium, a titán, az alumínium, a nikkel és a magnézium, valamint az illékony ('volatile elements') elemeket, mint pl. a szén, a nitrogén és az oxigén. A 10. és 11. ábrákon ezen két csoport átlagos abundanciáit tüntettem fel a fémesség függvényében, ahol:

$$[M/H]_{refractory} = \frac{[Si/H] + [Ti/H] + [Ni/H]}{3} \quad (31)$$

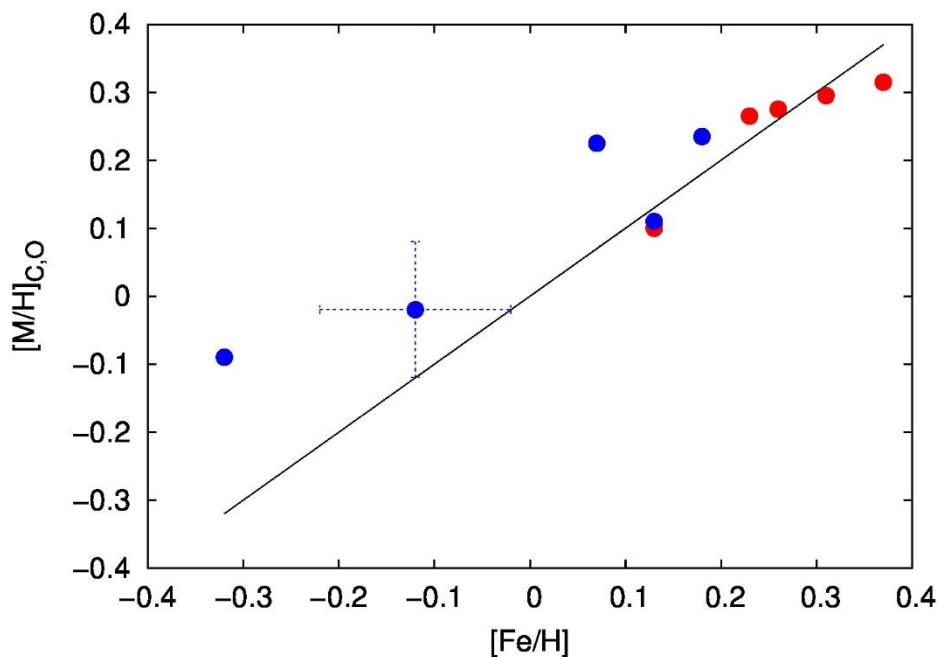
$$[M/H]_{volatile} = \frac{[O/H] + [C/H]}{2} \quad (32)$$

Látható, hogy a fémek átlagos abundanciája szorosan követi a fémesség változását, minden adatpont hibahatáron belül van a $[Fe/H]$ értékhez képest. Ez jó összhangban van számos szakcikk azon felvetésével, miszerint a csillagok esetleges relatív refractory elemekbeli hiányát az okozza, hogy a hiányzó hányad kőzetbolygókká állt össze a protoplanetáris diszkból (Meléndez et al., 2009). Mivel a mintában szereplő összes csillag bolygó Jupiter-méretkategóriájú, ezért az elmélet szerint nem várható feldúsulás a refractory elemekből.



10. ábra A 'refractory' elemek átlagos abundanciái a fémesség függvényében. A szemléltetés végett a $[Fe/H]$ értékeket fekete vonal jelöli.

Ettől eltérő tendencia rajzolódik ki a 11. ábrán. Az illékony elemek átlagos abundanciái csak a magas vastartalmú csillagok esetében egyeznek meg a $[Fe/H]$ értékével, míg alacsonyabb fémességeknél az oxigén és szén feldúsulása figyelhető meg. A kettősség magyarázata nem egyértelmű, az előző bekezdésben említett elmélet alapján ugyanis minden fémesség-értéknél meg lehetne figyelni az illékony elemek feldúsulását a fémekhez képest. Nem kizárható, hogy kapcsolat van porkorong hiánya és a magasabb oxigén- és szén-abundanciák között, mivel a feldúsulásokat csak ezen csillagoknál mutatható ki. Lehetséges magyarázat továbbá, hogy Meléndez et al. (2009) a magasabb $[Fe/H]$ értékeken "hiányzó" mennyiség az illékony elemekből a porkorongokban található, a csökkenés pedig csak véletlenül épp olyan mértékű, hogy a szén- és oxigén-abundanciák megegyeznek a vaséval.

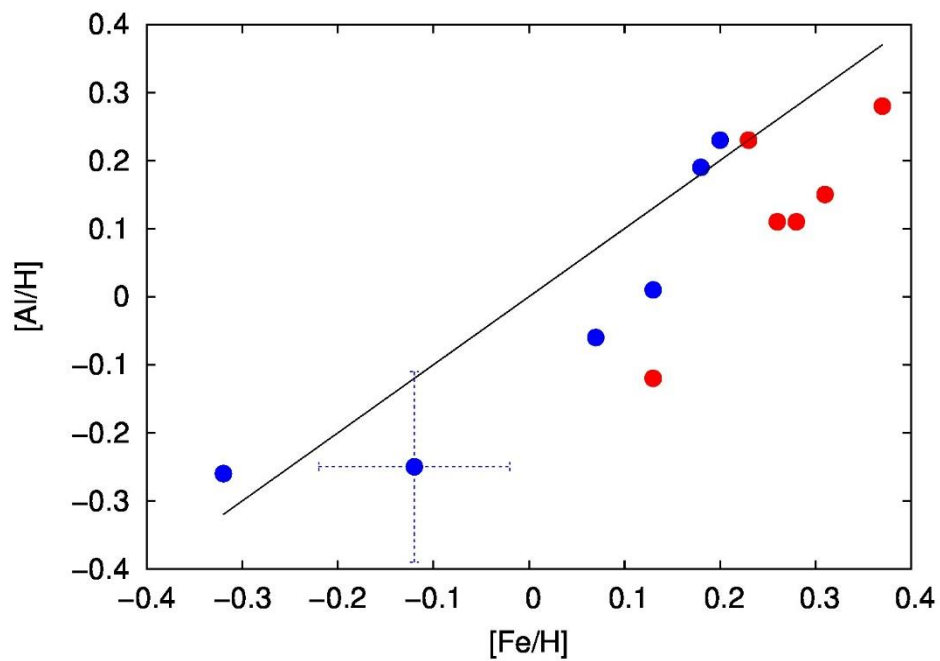


11. ábra Az illékony elemek átlagos abundanciái a fémesség függvényében. A szemléltetés végett a $[Fe/H]$ értékeket fekete vonal jelöli.

V.4. Alumínium-gyakoriságok

Habár az alumínium 'refractory' elemnek számít, az abundanciáit nem használtam fel a 10. ábrán feltüntetett átlagértékhez. Ennek oka, hogy több esetben jelentősen alacsonyabb értékeket kaptam az alumínium elemgyakoriságára, ezek az adatpontokra pedig a fémességgel megegyező meredekségű egyenes illeszthető. Kézenfekvő magyarázat lenne a viszonyítási alapul szolgáló relatív elemgyakoriságban keresni a problémát, azonban Asplund et al. (2009) ennek megállapításánál nem jelzett ekkora mértékű bizonytalanságot az $\log(\epsilon_{Al})$ értékét illetően, valamint az adatpontok harmada

jól követi a fémesség változását. Az eltérés így valószínűsíthetően az ekvivalens- szélességek mérésében keresendő. Az egyes csillagok színképeiben általában 4-5 alumínium-vonalat sikerült megilleszteni, azonban ezek többségének szárnyai átfedésekkel voltak terhelve.



12. ábra Az alumínium-abundanciák a fémesség függvényében. A szemléltetés végett a $[Fe/H]$ értékeket fekete vonal jelöli.

VI. Összefoglalás

Munkám során tizenkét exobolygóval rendelkező csillag esetében vizsgáltam nagyfelbontású színeképeket. Mindegyik esetében meghatároztam a VWA abundancia-analízis programmal a csillagok atmoszferikus paramétereit (effektív hőmérséklet, nehézségi gyorsulás, sebességtubulencia, fémesség). Bár hasonló analíziseket végeztek már a program-objektumokon, a legtöbb esetben először történt meg ez nagy elemszámú vonallistával (ötvennél több vasvonal), amelytől az értékek pontosítása várható. Eredményeim jó összhangban vannak a korábbi vizsgálatokkal.

A VWA valamint a MOOG használatával megállapítottam a nikkelt, a titánt, a szilíciumot, valamint a szént, az oxigént és az alumínium elemgyakoriságait. Ezt megelőzően csak kevés szakcikk foglalkozott exobolygós csillagok abundanciáival a vason kívül: négy programcsillag esetében ez az első alkalom, hogy a szén és oxigén gyakoriságukat vizsgálták; a másik négy elem abundanciáit pedig korábban még egyiknél sem állapították meg.

Sikerült reprodukálni a szén-oxigén arányok várt lineáris trendjét a fémesség függvényében. Az adatpontok a két, szakirodalomban vázolt modell között helyezkedtek el; az eltérések az NLTE-korrekciók bizonytalanságainak tudhatóak be.

A 'refractory' (szilícium, titán, nikkelt) és az illékony (szén, oxigén) elemek átlagos abundanciáinak fémesség szerinti ábrázolásában trendek mutatkoznak. Előbbi igen pontosan követi a csillagok fémességváltozását, míg utóbbira ez csak magas $[Fe/H]$ értékeken igaz. Az alacsonyabb fémességű csillagok szén- és oxigén-feldúsulására nincs elfogadott magyarázat, de valószínűsíthető a bolygókeletkezéssel való szoros kapcsolat.

A program-objektumok fele törmelékgoronggal is rendelkezik, míg a másik felénél ezt kizárták a megfigyelések. Bár szoros összefüggést nem sikerült találni a porkorongok és csillagaik fizikai paramétereit között, a csillagok fémessége szignifikánsan nagyobbak látszik a porkorongos mintában.

Mindegyik fenti megállapítás esetében elmondható, hogy az általam vizsgálnál nagyobb elemszámú minta szükséges a pontos tendenciák kimutatásához. A felfedezett exobolygók, valamint a róluk készült nagyfelbontású, széles spektráltartományú színeképek számának növekedésével a közeljövőben az eloszlások pontosan feltérképezhetőek. Így a számunkra csak közvetetten ismert bolygók számos fizikai és kémiai paramétere megismerhetővé válik, akárcsak a bolygókeletkezési- és fejlődési folyamatok. A precíz abundancia-analízis azonban egyelőre időigényes, a folyamat felgyorsításához erre a célra kifejlesztett automata programok szükségesek. Mindezen kihívások és a várható érdekes eredmények miatt kutatásomat szeretném a jövőben is folytatni.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet témavezetőmnek, Dr. Szabó M. Gyulának a diplomamunkám elkészítésében nyújtott segítségéért.

Köszönöm továbbá konzulensemnek, Dr. Vinkó Józsefnek a tanácsokat és kritikákat, amelyekkel színvonalasabbá tehettem munkámat.

Hivatkozások

Asplund, M. et al., 2009, ARA&A, 47, 481

Bruntt et al., 2010, Astronomy and Astrophysics, 519, A51

Buchhave, L. A. et al., 2012, Nature, 486, 375

Butler, P. et al. 2004, ApJ, vol. 617, 580

Campbell, B., Walker, G. A. H., Yang, S. 1998, Astrophysical Journal, 331, 902

Caroll, B. W., Ostlie, D. A.: An Introduction to Modern Astrophysics, 2nd edition, Addison-Wesley, 2006

Delgado Mena, E. et al. 2010, ApJ, 725, 2349

Doyle A. P., 2013, MNRAS, 428, 3164

Dumusque, X. et al. 2012, Nature, vol. 491, p. 207-211.

Fabbian, D. et al., 2009, A&A, 500, 1221

Fortney, J. J. 2012, ApJ, 747, L27

Fortney, J. J. 2012, ApJ, 747, L27

Gustafsson, B. et al., 2008, A&A, 486, 951

Hatzes, A. P. et al. 2003, ApJ, vol. 599, p. 1383-1394.

Kaufer, A., Stahl, O., Tubbesing, K., et al. 1999, The Messenger, 95, 8

Kóspál et al. 2009, The Astrophysical Journal Letters, 700, L73

Kupka, F. et al., 1999, A&AS, 138, 119

Kurucz, R., 1993, CD-ROM No. 13. Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophysical Observatory

Liebert et al., 2013, ApJ által elfogadva, astro-ph: [arXiv:1305.0587](https://arxiv.org/abs/1305.0587)

Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D., et al. 2003, The Messenger , 114, 20

Mayor, M., Queloz, D. 1995, Nature, vol. 378, p. 355-359.

Meléndez, J. et al., 2009, ApJ, 704, L66

Nissen, P. E. 2013, astro-ph: [arXiv:1303.1726](https://arxiv.org/abs/1303.1726)

Öberg, K. I., Murray-Clay, R., Bergin, E. A. 2011, ApJ, 743, L16

Petigura, E. A., Marcy, G. W., 2011, ApJ, 735, 41

Rivera, E. J. et al. 2005, ApJ, vol. 634, 625

Schuler, S. C. et al., 2011, ApJ, 732, 55

Snedden, C., 1973, ApJ, 184, 839

Sousa, S. G. et al., 2008, A&A, 487, 373

Sousa, S. G. et al., 2011, A&A, 533, A141

Takeda, 2003, Astron.Astrophys.402:343-360

Teske et al., 2013, Astrophysical Journal Letters, 768, L12

Teske et. al. 2014b, ApJ által elfogadva, astro-ph: [arXiv:1403.6891](https://arxiv.org/abs/1403.6891)

Torres G., Winn J.N., Holman M.J., 2008, ApJ, 677, 1324

Trilling, D. E. et al., 2008, ApJ, 674, 1086

Wolszczan, A., Frail, D. A. 1992, Nature, vol. 355, p. 145-147.

Nyilatkozat

Alulírott **Barna Barnabás**, Csillagász MSc szakos hallgató (ETR azonosító: BABRAET.SZE) az **Exobolygóval rendelkező csillagok abundancia-analízise** című diplomamunka szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Szeged, 2014. május 17.

.....

Barna Barnabás