

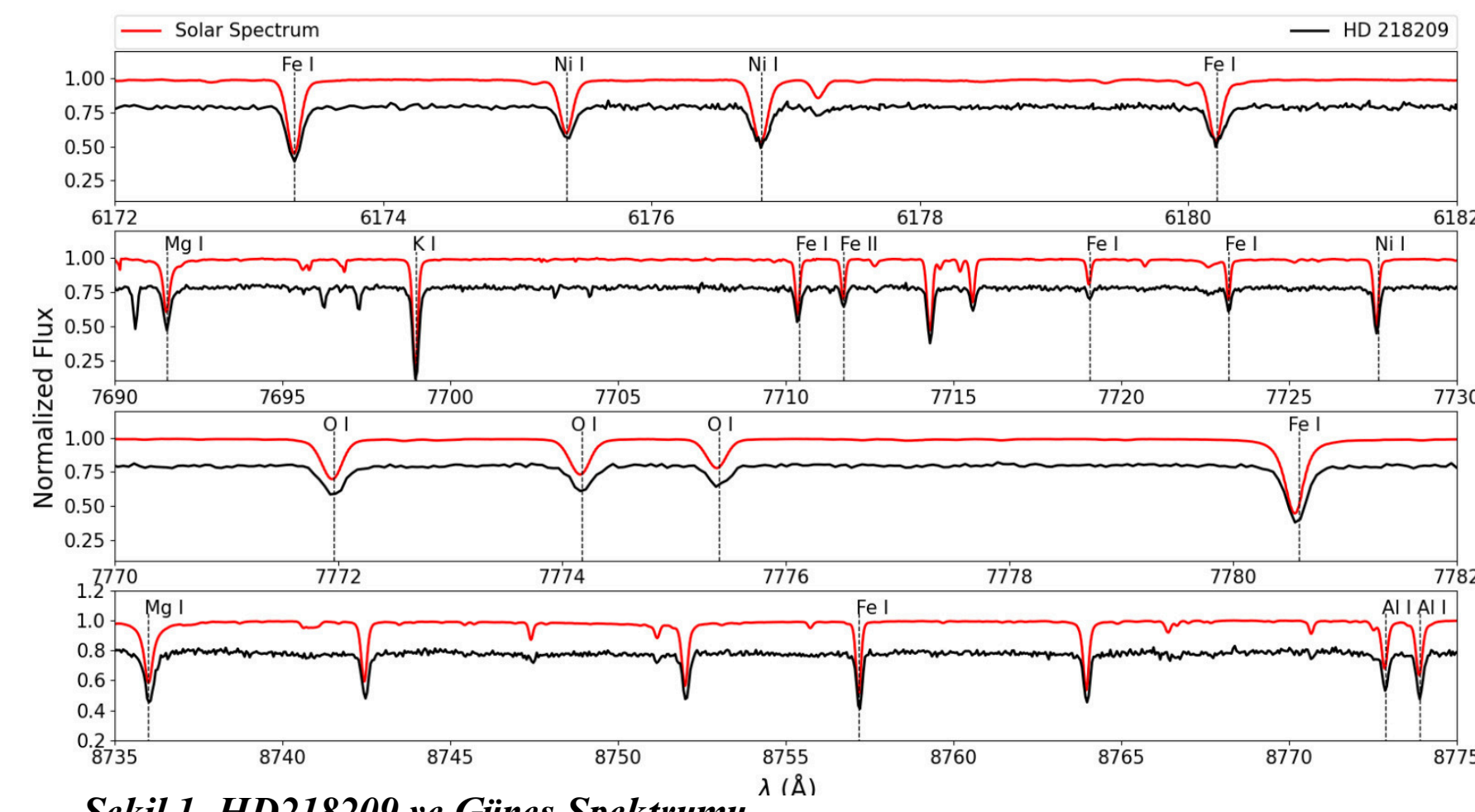
Giriş

Galaksimizin kimyasal yapısı ve evrim senaryolarının sınanması aşamasında Güneş komşuluğunda F ve G tayf türünden metaltce fakir rolü büyüktür. Bu yıldızların atmosferlerinde gözlemlenen ağır element bolluklarının analizi, Galaktik kimyasal evrim hakkında önemli bilgiler sağlar. Ayrıca bu yıldızlar Samanyolu'nun erken dönemlerinde oluşmuş ve ana-kol evreleri, Galaksinin yaşıyla karşılaştırılabilir düzeyde olan yıldızlardır.

Metaltce fakir F-G-K türü yıldızların iç yapısı, radyatif bir çekirdek ve bu çekirdeği çevreleyen geniş bir zarfla karakterize edilir. Böyle bir iç yapı, çekirdekte meydana gelen ağır elementlerin yıldız atmosferine karışmasını engelleyerek yıldızların doğdukları moleküler bulutun kimyasal izlerini korumasını sağlar. Bu tür yıldızların doğasının anlaşılması ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi aşamasında tayfsal analiz methodu önemli rol oynar. Tayfsal analizler, yıldızların temel fiziksel parametrelerinin (T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ ve mikrotürbülans hızlarını) belirlenmesini sağlar. Belirlenen $[\text{Fe}/\text{H}]$ bollukları yaş tayini için de son derece kritik bir öneme sahiptir. Bu yıldızların tayfsal analizlerinin güvenilirliği kullanılan çizgi listesi ve atomik verilerin hassasiyetine bağlıdır. Bu çalışma **121F265 nolu Güneş Civarındaki Orta Tayf Türündeki Metaltce Fakir Yıldızların Kökeni** başlıklı TÜBİTAK projesinde yürütülen tayfsal analizler kapsamında 10.000Å sınırına kadar ulaşan tayfların EW analiz yöntemiyle analizini mümkün kılacak şekilde geliştirilen atomik çizgi listesine dair detaylar içerilmektedir.

Elde edilen bu geçişler yüksek çözünürlüklü ($R=700.000$) Güneş tayfı üzerinde test edilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen çizgi listesi Şahin vd. (2023)'te yayımlanan çizgi listesinin sınırlarını önemli ölçüde genişletmektedir. Yüksek çözünürlüklü Güneş tayfındaki (O,C,Al,S,K) makalenin ilk çalışması olan Şahin vd. (2023) metaltce fakir F ve G türü yıldızların tayfsal analizlerinde kullanılmak üzere 4000 – 6800Å dalgaboyu aralığındaki geçişleri kapsayan çizgi listesi yayımlanmışlardır. Şahin vd. (2023)'nin devamı niteliği taşıyan bu çalışma, dalgaboyu aralığını 4000 – 10.000Å'a genişleterek revize edilmiştir. İlk çalışmada EW yöntemi temelli olarak rapor edilen element bollukları spektrum sentez tekniğiyle güncellenmiştir. Co yeni eklenen elementler arasında yer almaktadır.

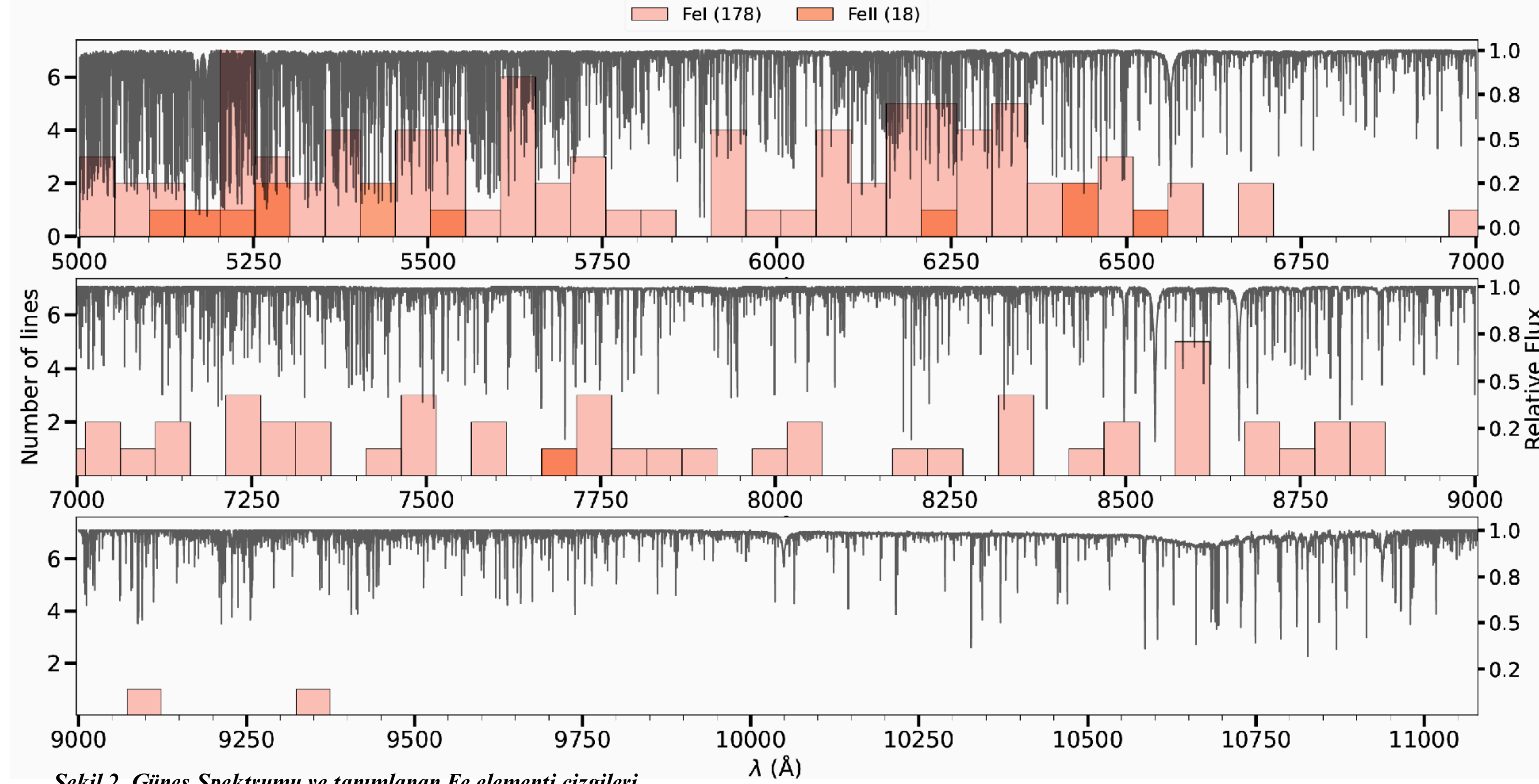
Gözlemler



Şekil 1. HD218209 ve Güneş Spektrumu

Star	T_{eff} (K)	$\log g$ (cgs)	$[\text{Fe}/\text{H}]$ (dex)	ξ (km s^{-1})
HD 218209	5630^{+170}_{-170}	$4.51^{+0.27}_{-0.31}$	$-0.35^{+0.13}_{-0.13}$	$0.73^{+0.50}_{-0.50}$
Sun	5777^{+135}_{-160}	$4.40^{+0.12}_{-0.10}$	$0.00^{+0.11}_{-0.11}$	$0.83^{+0.50}_{-0.50}$

Tablo 1. HD218209 ve Güneş Model Atmosfer Parametreleri



Şekil 2. Güneş Spektrumu ve tanımlanan Fe elementi çizgileri

Species	HD 218209		Sun		$\Delta \log \epsilon_{\odot}(X)$ (dex)	
	$[\text{X}/\text{Fe}]^*$ (dex)	n	$\log \epsilon_{\odot}(X_{\text{TS}})$ (dex)	n		
C I	0.09 ± 0.19	2	8.51 ± 0.05	2	8.43 ± 0.05	0.08
O I	0.16 ± 0.18	3	8.96 ± 0.04	3	8.69 ± 0.05	0.27
Na I	0.05 ± 0.20	3	6.12 ± 0.06	3	6.24 ± 0.04	0.12
Mg I	0.14 ± 0.23	3	7.51 ± 0.12	8	7.60 ± 0.04	0.09
Al I	0.20 ± 0.23	5	6.42 ± 0.07	5	6.45 ± 0.03	0.03
Si I	0.17 ± 0.21	13	7.48 ± 0.07	18	7.51 ± 0.03	0.03
S I	0.59 ± 0.17	1	6.96 ± 0.00	1	7.12 ± 0.03	0.16
K I	0.33 ± 0.17	1	5.10 ± 0.00	1	5.03 ± 0.09	0.07
Ca I	0.12 ± 0.21	20	6.29 ± 0.08	21	6.34 ± 0.04	0.05
Sc I	-0.26 ± 0.17	1	3.05 ± 0.00	1	3.15 ± 0.04	0.10
Sc II	0.18 ± 0.22	7	3.20 ± 0.06	7	3.15 ± 0.04	0.05
Ti I	0.21 ± 0.23	50	4.91 ± 0.07	53	4.95 ± 0.05	0.04
Ti II	0.18 ± 0.22	12	4.95 ± 0.08	13	4.95 ± 0.05	0.00
V I	0.07 ± 0.19	5	3.90 ± 0.03	5	3.93 ± 0.08	0.03
Cr I	0.00 ± 0.21	19	5.65 ± 0.07	21	5.64 ± 0.04	0.01
Cr II	0.02 ± 0.22	3	5.60 ± 0.12	3	5.64 ± 0.04	0.04
Mn I	-0.23 ± 0.25	12	5.57 ± 0.13	13	5.43 ± 0.05	0.14
Fe I	0.00 ± 0.24	178	7.46 ± 0.11	194	7.50 ± 0.04	0.04
Fe II	0.00 ± 0.24	18	7.46 ± 0.08	18	7.50 ± 0.04	0.04
Co I	-0.03 ± 0.27	6	4.94 ± 0.14	6	4.99 ± 0.07	0.05
Ni I	0.03 ± 0.33	59	6.23 ± 0.10	66	6.22 ± 0.04	0.01
Zn I	0.19 ± 0.17	2	4.60 ± 0.00	2	4.56 ± 0.05	0.04
Sr I	-0.31 ± 0.17	1	2.86 ± 0.00	1	2.87 ± 0.07	0.01
Y II	-0.23 ± 0.17	2	2.20 ± 0.04	2	2.21 ± 0.05	0.01
Zr II	0.12 ± 0.17	1	2.70 ± 0.00	1	2.58 ± 0.04	0.12
Ba II	0.16 ± 0.18	4	2.24 ± 0.06	4	2.18 ± 0.09	0.06
Ce II	0.30 ± 0.18	2	1.58 ± 0.02	2	1.58 ± 0.04	0.00
Nd II	0.16 ± 0.18	1	1.33 ± 0.09	3	1.42 ± 0.04	0.09
Sm II	-	-	0.95 ± 0.00	1	0.96 ± 0.04	0.01

(*): This study (TS)

 $\Delta \log \epsilon_{\odot}(X) = \log \epsilon_{\odot}(X_{\text{TS}}) - \log \epsilon_{\odot}(X_{\text{ASP}})$

Bu çalışmada çizgi listesinin oluşturulması için Güneş ve HD 218209 yıldızı kullanılmıştır. HD 218209'un yüksek çözünürlüklü ($R \approx 76.000$) ve yüksek sinyal-gürültü oranına sahip ($S/N = 140$, 550 nm'de) PolarBASE Petit vd. (2014) Narval spektrumu (HJD 2456232.48238; poz süresi 400 s) kullanılmıştır. Çizgi ölçüm işlemine başlamadan önce, PolarBASE spektrumu da yeniden normalize edilmiş ve radyal hız (RV) düzeltilmiştir. Güneş spektrumu, yıldız astrofizik ve yıldızlardaki fiziksel süreçlerin yorumlanması için doğal bir laboratuvar referans kaynağıdır.

Bu çalışmada kullanılan Güneş'in yüksek çözünürlüklü ($R \approx 700.000$) spektrumu, Kitt Peak Fourier Transform Spektrometresi Kurucz vd. (1984) ile elde edilmiştir. HD 218209 ve Güneş'in spektrumlarının karakteri Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çizgi Listesi ve Bolluk Analizi

Bir yıldızın bolluk analizi için gerekli olan temel prensip, güvenilir atomik verilere sahip tanımlanmış çizgilerdir. Çizgi teşhisi için ilk olarak yıldız tayfındaki çizgilerin merkez dalgaboyları belirlenmiştir. Belirlenen bu merkez pozisyonlar MOORE kataloğunda bulunan dalgaboyları ile karşılaştırılarak çizgiler teşhis edilmiştir. Bu çizgilerin teyiti için multipllet analizi yapılmıştır. Teşhis edilen çizgilerin atomik verileri (alt uyarılma potansiyeli, LEP ve geçiş olasılıkları, $\log gf$) literatürde sıklıkla kullanılan NIST ve VALD gibi atomik veritabanlarından derlenmiştir. Atomik verilere ($\log gf$) ilişkin belirsizliklerin tespiti için yıldız tayfında teşhis edilen çizgiler ile Güneş bollukları hesaplanmıştır. Elde edilen Güneş bollukları baz alınarak [element/Fe] oranları hesaplanmıştır. Böylece bu çalışmada elde edilen bolluk analizi, fark bolluk analizi (differential abundance analysis) olarak belirlenmiştir. Böyle bir yaklaşım geçiş olasılıkları kaynaklı belirsizliklerin ortadan kaldırılması aşamasında avantaj sağlar.

Teşhis edilen ve atomik verileri derlenen çizgilerin eşdeğer genişlik ölçümü, LIME Şahin (2017) kodu kullanılarak yapılmıştır. Model atmosfer parametreleri, yerel termodinamik denge koşulu altında çalışan ATLAS9 Castelli & Kurucz (2003) kodu ile hesaplanmıştır. Element bolluklarının belirlenmesi aşamasında ise LTE koşulu dikkate alan MOOG Sneden (1973) kodu kullanılmıştır. Bolluk analizinin detayları için bkz. Şahin & Lambert (2009), Şahin vd. (2011, 2016) ve Şahin & Bilir (2020).

Model Parametreler ve Bolluklar

Model atmosfer parametrelerini, yani etkin sıcaklık, yüzey kütleçekimi, mikrotürbülans ve metalisite belirlemek için nötr ve iyonize demir çizgileri kullanılmıştır. İlk olarak, elde edilen bolluğun alt LEP'den bağımsız olmasını sağlayarak etkin sıcaklık hesaplanmıştır. Tüm çizgiler aynı LEP ve benzer bir dalga boyuna sahipse, mikrotürbülans (ξ), hesaplanan bolluğun indirgenmiş eşdeğer genişlikten (EW) bağımsız olmasını sağlayarak belirlenir. Mikrotürbülans hızının belirlenmesindeki hassasiyet $\pm 0.5 \text{ km s}^{-1}$ 'dir. Yüzey kütleçekimini ($\log g$), iyonizasyon dengesi sağlayarak belirledik; bu, Fe I ve Fe II çizgilerinin aynı demir bolluğunu vermesini gerektirir. Güneş analizi sonucunda elde edilen Güneş için model parametreleri $T_{\text{eff}} = 5777 \text{ K}$, $\log g = 4.4 \text{ cgs}$, $[\text{Fe}/\text{H}] = 0 \text{ dex}$ ve $\xi = 0.83 \text{ km s}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler, Heiter vd. (2015) tarafından önerilen değerlerle ($T_{\text{eff}}, \log g = (5771, 4.438)$) benzerdir. HD 218209 için elde edilen model yıldız parametreleri ve Güneş için model parametrelerinin belirlenmesi sonuçları Tablo 1'de listelenmiştir. $\log \epsilon$, bollukların logaritmasıdır. $\log \epsilon$ bolluklarında rapor edilen hatalar, bolluklardaki 1σ çizgi-çizgi saçılma değerlerini ifade etmektedir. hatadan-hataya yayılmazdır. $[\text{X}/\text{Fe}]$ değeri Fe I bolluğunu dikkate alan logaritmik bolluktur. $[\text{X}/\text{Fe}]$ içindeki hata, $[\text{X}/\text{H}]$ ve $[\text{Fe}/\text{H}]$ içindeki hataların karelerinin toplamının kareköküdür.

Sonuç

Bu çalışmada orta tayf (F-G-K) türünden yıldızların tayfsal analizlerinde, 4000 - 10.000Å dalgaboyu aralığında kullanılacak bir çizgi listesi sunulmaktadır. Bu çizgi listesi 25 farklı element içermektedir. Çizgi listesindeki atomik geçişlerin ve atomik verilerin güvenilirliği, yüksek çözünürlüklü Güneş tayfı üzerinde test edilmiştir. Güneş için model atmosfer parametreleri belirlenmiş ve element bollukları hesaplanmıştır. Güneş tayfı üzerinde test edilen çizgi listesi, HD 218209 yıldızının tayfsal analizinde de kullanılmış ve yıldızla ait model atmosfer parametreleri ve element bollukları belirlenmiştir. Yeni çizgi listesi ile Güneş ve yıldız için elde edilen sonuçlar literatür ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

Şahin vd. (2023) Şahin vd. (2024) Şentürk vd. (2024)

4000-6800 Å

6800-10 000 Å

4000-25 000 Å

TÜBİTAK 121F265

Kaynaklar



Bu çalışma TÜBİTAK MFAG-121F265 tarafından desteklenmiştir.