



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



Doktora Tezi

**SKANDİYUM ve TULYUM ELEMENTLERİNİN FOURIER
TRANSFORM SPEKTRUMUNUN ANALİZİ**

Taha Yusuf KEBAPCI

Fizik Anabilim Dalı

Atom ve Molekül Fiziği Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. İpek KANAT ÖZTÜRK**

**II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Sophie KRÖGER**

Mayıs, 2024

İSTANBUL

Bu çalışma, 20.05.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Atom ve Molekül Fiziğı Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. İpek KANAT ÖZTÜRK(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Günay BAŞAR
İstanbul Teknik Üniversitesi
Fen Edebiyat Fakültesi

Prof. Dr. Feyza GÜZELÇİMEN
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Serda KECEL GÜNDÜZ
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Doç. Dr. Zehra CAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Edebiyat Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Proje Destekleri

Bu tez, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 33657 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri

Kebapcı T. Y., Sert S., Parlutan Ş., Öztürk İ., Başar Gö., Başar Gü., et al., 2022, Experimental investigation of the hyperfine structure of Tm I with Fourier transform spectroscopy part B: In the NIR wavelength range from 700 nm to 2250 nm, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 287, 108196.

Kebapcı, T. Y., Parlutan, Ş., Sert, S., Öztürk, İ., K., Başar, G., Şahin, T., Bilir, S., Ferber, R., Tamanis, M., Kröger, S., 2024, Hyperfine Structure Investigation of Singly Ionized Thulium in FT Spectra, The Astrophysical Journal, kabul edildi.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında bilimsel ve manevi anlamda bana yardımcı olan ve yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. İpek Kanat Öztürk'e içtenlikle teşekkür ederim.

Yüksek Lisans ve Doktora öğrenimim süresince hem derslerde hem de tez çalışması sürecinde bana aktardıkları bilgi, tecrübe ve yeni fikirlerden dolayı başta Prof. Dr. Gönül Başar'a, Prof. Dr. Feyza Güzelçimen'e ve bütün İstanbul Üniversitesi Atom ve Molekül Fiziği Öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Doktora tezi ikinci danışmanım olan Berlin Teknoloji ve Ekonomi Yüksekokulu öğretim üyelerinden Prof. Dr. Sophie Kröger'e ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, manevi desteklerini hissettiğim aileme ve Pamukkale Üniversitesi'ndeki öğretim üyesi arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

Mayıs, 2024

Taha Yusuf KEBAPCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	4
2.1. SKANDİYUM ELEMENTİNİN LİTERATÜR İNCELEMESİ	4
2.2. TULYUM ELEMENTİNİN LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	18
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	26
3.1. ÇOK ELEKTRONLU ATOMİK YAPI HAKKINDA TEMEL BİLGİLER	26
3.1.1. Yaklaşıklık Yöntemleri	26
3.1.2. Atomlarda İnce Yapı (Fine Structure-FS)	30
3.1.3. Atomlarda Aşırı İnce Yapı (Hyperfine Structure-HFS)	32
3.1.3.1. Manyetik Etkileşim.....	32
3.1.3.2. Elektrik Etkileşim.....	33
3.2. SPEKTRAL ÇİZGİ GENİŞLEME TÜRLERİ	34
3.3. SKANDİYUM	35
3.4. TULYUM.....	36
3.5. DENEYSEL YÖNTEM	37
3.5.1. Fourier Transform (FT) Spektroskopisi	37
3.5.2. Deney Koşulları.....	38
3.6. SPEKTRAL VERİ ANALİZ PROGRAMLARI	40
3.6.1. Sınıflandırma (Elements) programı	41
3.6.2. Fitter programı.....	45
4. BULGULAR.....	48
4.1. SKANDİYUM ELEMENTİNE AİT BULGULAR.....	48
4.1.1. Nötral skandiyuma (Sc I) ait çizgi sınıflandırılması.....	48

4.1.2. Bir kez iyonlaşmış skandiyuma (Sc II) ait çizgi sınıflandırılması	57
4.2. TULYUM ELEMENTİNE AİT BULGULAR.....	59
4.2.1. Nötral tulyuma (Tm I) ait çizgi sınıflandırılması	59
4.2.2. Nötral tulyuma (Tm I) ait aşırı ince yapı analizi	72
4.2.3. Bir kez iyonlaşmış tulyuma (Tm II) ait çizgi sınıflandırılması	79
4.2.4. Bir kez iyonlaşmış tulyuma (Tm II) ait aşırı ince yapı analizi	88
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	128
KAYNAKLAR.....	132
EK-1	138
ÖZGEÇMİŞ	145



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1: 5624.015 Å dalga boyuna sahip spektral geçiş için Elements programından alınan örnek görüntü.	44
Şekil 4.1: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13531.95 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 39277.087 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 2.5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2.5$) çizgisinin için en iyi fit spektrumu.	74
Şekil 4.2: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13725.36 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 39470.489 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 2.5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2.5$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	75
Şekil 4.3: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13857.78 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 39602.902 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 1.5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2.5$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	76
Şekil 4.4: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13544.55 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4.5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 24957.469 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 5.5$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	78
Şekil 4.5: $\sigma_{\text{deneysel}} = 12981.04 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4.5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 25520.987 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 5.5$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	79
Şekil 4.6: İlgili enerji seviyeleri ile birlikte analiz edilen Tm II çizgilerinin şematik gösterimi.	91
Şekil 4.7: $\sigma_{\text{deneysel}} = 8355.37 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 17624.65 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin bilinen A sabitleri (Mansour ve diğ., 1989) ile yapılan başarısız fit işlemi.	92
Şekil 4.8: $\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 21713.74 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin bilinen A sabitleri (Mansour ve diğ., 1989) ile yapılan başarısız fit işlemi.	93
Şekil 4.9: $\sigma_{\text{deneysel}} = 8355.37 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 17624.65 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin bu çalışmada yeniden bulunan A değeri ile yapılan fit işleminden elde edilen en iyi fit spektrumu.	94
Şekil 4.10: $\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 21713.74 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin bu çalışmada revize edilen A değeri ile gerçekleştirilen fit işleminden bulunan en iyi fit spektrumu.	95
Şekil 4.11: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25980.03 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	97
Şekil 4.12: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25743.09 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	98

Şekil 4.13: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29424.98 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 29424.98 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.....	100
Şekil 4.14: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29183.40 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 29183.39 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	101
Şekil 4.15: $\sigma_{\text{deneysel}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.....	102
Şekil 4.16: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27702.44 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 27702.42 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.....	103
Şekil 4.17: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27009.40 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 27009.39 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit işleminin görüntüsü.....	104
Şekil 4.18: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26578.78 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 26578.77 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.....	105
Şekil 4.19: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26574.67 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 26574.66 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.....	106
Şekil 4.20: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25257.53 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25257.52 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.....	107
Şekil 4.21: $\sigma_{\text{deneysel}} = 23803.29 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 23803.28 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.....	108
Şekil 4.22: $\sigma_{\text{deneysel}} = 23768.85 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 23768.84 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.....	109
Şekil 4.23: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22308.84 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 22308.82 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit işleminin görüntüsü.....	110
Şekil 4.24: $\sigma_{\text{deneysel}} = 21608.26 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 21608.26 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.....	111
Şekil 4.25: $\sigma_{\text{deneysel}} = 18291.38 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 18291.37 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.....	112
Şekil 4.26: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22071.89 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 22308.82 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit işleminin görüntüsü.	114
Şekil 4.27: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25020.58 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25257.52 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	115
Şekil 4.28: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26337.72 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 26574.66 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	116
Şekil 4.29: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26772.46 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 27009.39 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	117

Şekil 4.30: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27017.48 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 27254.42 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	118
Şekil 4.31: $\sigma_{\text{deneysel}} = 28030.94 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit işleminin görüntüsü.	119
Şekil 4.32: $\sigma_{\text{deneysel}} = 28946.45 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 29183.39 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	120
Şekil 4.33: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29730.23 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 29967.17 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 2 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	121
Şekil 4.34: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22266.94 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 31036.61 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 8769.68 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin simulasyon programındaki görüntüsü.	123
Şekil 4.35: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22266.94 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 31036.61 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 8769.68 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	123
Şekil 4.36: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25628.62 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 34398.30 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 8769.68 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	124
Şekil 4.37: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25440.83 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 34398.30 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 8957.47 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.	125
Şekil 4.38: Lorentz ve Gauss FWHM ile birlikte çizgi dalga sayısının bir fonksiyonu olarak Voigt profilinin FWHM grafiği.	126

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Sc I'e ait çift pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.	7
Tablo 2.2: Sc I'e ait tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.	12
Tablo 2.3: Sc II'ye ait ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.	16
Tablo 2.4: Tm I'e ait çift pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.	20
Tablo 2.5: Tm I'in tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.	23
Tablo 2.6: Tm II için bilinen manyetik dipol hfs sabitleri (Mansour ve diğ. 1989).	25
Tablo 3.1: Sc atomunun kararlı izotopunun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri.	36
Tablo 3.2: Tm atomunun kararlı izotopunun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri.	37
Tablo 3.3: Her iki metale ait ölçüm parametreleri.	40
Tablo 4.1: 400 nm ile 730 nm bölgeleri arasında Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler.	48
Tablo 4.2: 400 nm -730 nm spektral bölgeleri arasında Sc II olarak sınıflandırılan çizgiler.	57
Tablo 4.3: 400 nm -730 nm bölgeleri arasında Sc I veya Sc II olarak tanımlanan çizgiler.	58
Tablo 4.4: 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.	59
Tablo 4.5: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13531.95 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	75
Tablo 4.6: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13725.36 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	76
Tablo 4.7: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13857.78 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametrelerin sayısal değerleri.	77

Tablo 4.8: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13544.55 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	78
Tablo 4.9: $\sigma_{\text{deneysel}} = 12981.04 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	79
Tablo 4.10: 330 nm - 400 nm ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm II olarak sınıflandırılan çizgiler.	80
Tablo 4.11: 330 nm - 400 nm ile 700 nm -1000 nm bölgeleri arasında Tm I veya Tm II olarak tanımlanan çizgiler.	83
Tablo 4.12: Mansour ve diğ. (1989) tarafından belirlenen deneysel manyetik dipol hfs sabitleri.	88
Tablo 4.13: Yeni manyetik dipol hfs sabitlerini belirlemek için analiz edilen Tm II çizgileri.	89
Tablo 4.14: $\sigma_{\text{deneysel}} = 8355.37 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	94
Tablo 4.15: $\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	96
Tablo 4.16: 25980.02 cm^{-1} enerji düzeyini içeren dört spektral geçişin listesi.	96
Tablo 4.17: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25980.03 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	97
Tablo 4.18: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25743.09 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	99
Tablo 4.19: Temel ince yapı enerji seviyesine olan ve incelenen geçişler.	99
Tablo 4.20: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29424.98 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	100
Tablo 4.21: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29183.40 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	101
Tablo 4.22: $\sigma_{\text{deneysel}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	102
Tablo 4.23: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27702.44 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	103
Tablo 4.24: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27009.40 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	104
Tablo 4.25: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26578.78 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	105

Tablo 4.26: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26574.67 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	106
Tablo 4.27: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25257.53 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	107
Tablo 4.28: $\sigma_{\text{deneysel}} = 23803.29 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	108
Tablo 4.29: $\sigma_{\text{deneysel}} = 23768.85 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	109
Tablo 4.30: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22308.84 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	110
Tablo 4.31: $\sigma_{\text{deneysel}} = 21608.26 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	111
Tablo 4.32: $\sigma_{\text{deneysel}} = 18291.38 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	112
Tablo 4.33: Temel seviyenin A değerini sabit tutarak belirlenen manyetik dipol hfs sabitleri.	113
Tablo 4.34: Birinci uyarılmış seviyeye (236.95 cm^{-1}) olup incelenen geçişler.	113
Tablo 4.35: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22071.89 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	114
Tablo 4.36: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25020.58 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	115
Tablo 4.37: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26337.72 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	116
Tablo 4.38: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26772.46 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	117
Tablo 4.39: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27017.48 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	118
Tablo 4.40: $\sigma_{\text{deneysel}} = 28030.94 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	119
Tablo 4.41: $\sigma_{\text{deneysel}} = 28946.45 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	120
Tablo 4.42: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29730.23 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	121

Tablo 4.43: Temel ve birinci uyarılmış düzey için bulunan A değerlerinin sabit tutulması ile belirlenen ortak üst seviyelerin yeni bulunan A değerleri.	122
Tablo 4.44: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22266.94 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	124
Tablo 4.45: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25628.62 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	125
Tablo 4.46: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25440.83 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.	126
Tablo 5.1: Tm I için revize edilen ve yeni bulunan A manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri.	130
Tablo 5.2: Tm II için tek ve çift pariteli enerji düzeylerine ait revize edilen ve yeni bulunan A manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri.	130

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler

Açıklama

$Tm\ I$	: Nötral tulyum
$Tm\ II$	: Bir kez iyonlaşmış tulyum
$Sc\ I$	: Nötral skandiyum
$Sc\ II$	: Bir kez iyonlaşmış skandiyum
μ_i	: Çekirdek spin manyetik momenti
μ_J	: Elektron toplam açısal manyetik momenti
μ_F	: Atomun toplam manyetik dipol momenti
A	: Manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti
B	: Elektik kuadrupol aşırı ince yapı sabiti
L	: Elektronun yörüngesel açısal momentum vektörü
S	: Elektronun spin açısal momentum vektörü
J	: Elektronun toplam açısal momentum vektörü
I	: Çekirdeğin spin açısal momentum vektörü
F	: Atomun toplam açısal momentum vektörü
Ψ	: Dalga fonksiyonu
H	: Hamiltonyen
σ	: Dalga sayısı

Kısaltmalar

Açıklama

FTS	: Fourier Transform Spektroskopisi
FS	: Floresans spektroskopisi
LIFS	: Laser uyarılmış floresans spektroskopisi
OGS	: Optogalvanik spektroskopi
SAS	: Saturasyon absorpsiyon spektroskopisi
ABMR	: Atomik Işın Manyetik Rezonans
HFS	: Aşırı ince yapı
CFIBLS	: Doğrusal hızlı iyon ışını laser spektroskopisi
FPI	: Fabry-Perot İnterferometresi

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SKANDİYUM ve TULYUM ELEMENTLERİNİN FOURIER TRANSFORM SPEKTRUMUNUN ANALİZİ

Taha Yusuf KEBAPCI

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. İpek KANAT ÖZTÜRK

II. Danışman : Prof. Dr. Sophie KRÖGER

Bu tez çalışmasında skandiyum (Sc) elementinin 400 nm -730 nm dalgaboyu bölgesinde ve tulyum (Tm) elementinin 330 nm - 400 nm ile 700 nm - 1000 nm dalgaboyu bölgesinde alınan Fourier Transform (FT) spektrumlarının analizi gerçekleştirildi.

Sc elementine ait 532 tane spektral çizginin analizi gerçekleştirildi. Toplam 474 tane çizgi Sc I olarak sınıflandırıldı. Bu çizgilerden 32 tanesi hem daha önce belirlenmemiş yeni çizgi olup hem de ilk defa bu çalışmada sınıflandırılmıştır. Ayrıca 26 tane çizgi Sc II olarak sınıflandırıldı. Sc metaline ait olduğu belirlenip sınıflandırılmayan 32 tane çizgi ise Sc I veya Sc II olarak tanımlandı.

Toplam 953 tane Tm elementine ait spektral çizginin analizi yapıldı. Toplam 571 tane spektral çizgi Tm I olarak sınıflandırıldı. Bu çizgilerden 90 tanesi hem daha önce belirlenmemiş yeni çizgi olup hem de ilk defa bu çalışmada sınıflandırılmıştır. Toplam 151 tane çizgi Tm II olarak sınıflandırıldı. Bu çizgilerden 49 tanesi hem daha önce belirlenmemiş yeni çizgi olup hem de ilk defa bu çalışmada sınıflandırılmıştır. Ayrıca beş tane bilinen çizginin Tm II olarak sınıflandırılması ilk kez bu çalışmada yapıldı. Metal çizgisi olarak tespit edilip sınıflandırılmayan 231 çizgi ise Tm I veya Tm II olarak tanımlandı.

Tezin ikinci kısmında Tm elementinin aşırı ince yapı analizi (hfs) yapıldı. Tm I için bir tane ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol hfs sabiti, A, revize edilirken bir tane Tm I ince yapı enerji seviyesinin A sabiti ilk defa bu çalışmada bulundu. Ayrıca iki tane Tm II ince yapı enerji seviyesinin A sabiti revize edildi ve 27 tane Tm II ince yapı enerji seviyesinin A sabiti ilk defa bu çalışmada bulundu.

Mayıs 2024, 163 sayfa.

Anahtar kelimeler: Spektral çizgi sınıflandırması, aşırı ince yapı, skandiyum, tulyum



SUMMARY

Ph.D. THESIS

ANALYSIS of the FOURIER TRANSFORM SPECTRA of SCANDIUM and THULIUM ELEMENTS

Taha Yusuf KEBAPCI

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. İpek KANAT ÖZTÜRK

Co-Supervisor : Prof. Dr. Sophie KRÖGER

In this thesis, the analysis of Fourier Transform (FT) spectra obtained in the wavelength regions of 400 nm - 730 nm for scandium (Sc) and 330 nm - 400 nm, as well as 700 nm - 1000 nm for thulium (Tm) elements, were performed.

Analysis of 532 spectral lines belonging to the Sc element was carried out. A total of 474 lines were classified as Sc I. 32 of these lines are new lines that have not been identified before and are classified for the first time in this study. Additionally, 26 lines were classified as Sc II. 32 lines that were determined to belong to Sc metal but could not be classified were defined as Sc I or Sc II.

A total of 953 spectral lines belonging to Tm were analyzed. A total of 571 lines were classified as Tm I. Among these, 90 lines were identified as new lines not previously determined, and were classified for the first time in this study. A total of 151 lines were classified as Tm II. Among these, 49 lines were identified as new lines not previously determined and were classified for the first time in this study. Furthermore, five known lines were classified for the first time in this study as Tm II. 231 lines identified as metal lines that could not be classified were labeled as either Tm I or Tm II.

In the second part of the thesis, a hyperfine structure (hfs) analysis of Tm was conducted. While one hyperfine structure energy level's magnetic dipole hfs constant, A , for Tm I was revised, one A constant for an energy level of Tm I was found for the first time in this study. Additionally, two A constants for energy levels of Tm II were revised, and 27 A constants for energy levels of Tm II were found for the first time in this study.

May 2024, 163 pages.

Keywords: Spectral line classification, hyperfine structure, scandium, thulium



1. GİRİŞ

Spektroskopinin anlaşılması ve gelişmesinde, 1600'lü yılların ortalarında Newton'un, güneşten gelen beyaz ışığın, spektrum adını verdiği sürekli bir renk dizisi halinde dağılabileceğini göstermesi önemli bir kilometre taşıdır. Bir ışık demetini tanımlamak için küçük bir açıklık, onu hizalamak için bir mercek sistemi, ışığı dağıtmak için bir cam prizma ve ortaya çıkan spektrumu görüntülemek için bir ekran kullanan Newton'un ilk spektroskopu, modern bir spektroskopik aletin tüm temel gereksinimlerini karşılamaktadır. 19.'yy da ise Fraunhofer, Kirchhoff ve Bunsen gibi Fizikçilerin yanı sıra Janssen gibi astronomların da katkıları ile spektroskopi alanında çok önemli adımlar atılmıştır. Hatta Fransız astronom Janssen, bir spektroskop yardımıyla güneş spektrumunda yeni bir sarı çizgi gözlemlemiştir ve bu çizginin helyum adı verilen bir elemente ait olduğunu ilk kez belirlemiştir. Böylece spektroskopi yardımıyla, güneş sisteminin başka bir bölümünde, dünyada tespit edilmeden önce bir element keşfedilmiştir.

Işık üzerine yapılan basit deneyler, spektroskopi biliminin başlangıcını oluştururken, ışık niceliğinin soğurulmasının ve emisyonunun açıklanması, Kuantum Mekaniği adı verilen en modern fizik dalını doğurdu.

Laserlerin icadı, yüksek çözünürlüklü spektroskopi tekniklerinin geliştirilmesi ve böylece atomik/moleküler yapıların daha iyi anlaşılması, son birkaç on yılda dünya çapında binlerce araştırmacının ilgisini çekmiştir ve günümüzde de ivme kaybetmeden çalışmalara devam edilmektedir. Spektroskopi, fizik ve kimya başta olmak üzere bir çok alanda çok özel bir konuma sahiptir. Bunun en güzel örneklerinden biri astronomidir. Astrofiziğin amacı evrenin nasıl çalıştığını anlamaktır. Yıldızlar ve galaksiler nasıl doğar ve nasıl gelişir? Yıldızlar nelerden yapılmıştır ve hayatları nasıl sona erer? Bu soruları yanıtlayacak ipuçları, yıldızların yaydığı radyasyonda bulunabilir. Yıldız spektrumlarını hassas olarak analiz etmek için doğru atomik verilerin dikkate alınması çok önemlidir. Örneğin; yıldız bolluğunu bilmek önemlidir, çünkü bu bilgi galaksilerin kimyasal evrimi hakkında bilgi verebilir (Matteucci, 2001). Yıldız spektrumlarının analizinde geçiş olasılıklarının ve aşırı ince yapının (hyperfine structure-hfs) ihmal edilmesinin element bolluklarında hatalara yol açabileceği iyi bilinmektedir. Yıldız tayflarında karışık (blend) çizgiler gözlemlendiğinde eğer hfs bilgisi yok ise, böyle bir çizgi profilinin hfs tarafından mı yoksa hemen hemen eşit dalga boyuna sahip ancak başka bir

elementten gelen bir çizgi tarafından mı oluşturulduğunu anlamak zordur. Bu geçişte yer alan seviyeler için hfs sabitleri biliniyorsa, multiplet içindeki tüm hfs geçişlerinin dalga boyları ve yoğunlukları hesaplanarak böyle bir profilin hfs tarafından üretilip üretilmeyeceği belirlenebilir (Deelen, 2017).

Spektral çizgilerdeki hfs etkileri ve izotop kaymalarının ihmal edilmesi halinde, astrofizik ve yıldızlardaki bolluk hesaplamaları için çok keskin birtakım hataların yapılması kaçınılmazdır. Bu hatalar aşağıda maddeler halinde listelenmiştir (Aboussaid, 1996):

- Güneş veya uydu bolluklarının aşırı derecede yukarı değerlerde hesaplanması
- Sönümlenme sabitlerinin yanlış tahmin edilmesi
- Bisektör tekniğini kullanarak vektör alanının yanlış tayin edilmesi

Konu ile ilgili olarak yapılan detaylı literatür taramasında elementlere ait atomik verilerin tam olarak mevcut olmadığı belirlendi. Atomik verilerdeki eksiliğin giderilmesi yönündeki bu tez çalışmasında skandiyum (Sc) ve tulyum (Tm) elementlerine ait yüksek çözünürlüklü Fourier Transform spektroskopisi (FTS) yöntemini kullanılarak elde edilen spektrumların analizi yapıldı. Analizler sonucunda her iki elemente ait spektral çizgi sınıflandırması ve aşırı ince yapı sabitlerinin belirlenmesi hedeflendi.

Sc ve Tm elementlerinin FT spektrumları Letonya Üniversitesi Laser Merkezi'nde çekildi. Her bir elemente ait emisyon spektrumlarındaki spektral çizgilerin sınıflandırılması için “Elements” programı (Windholz, 2003) kullanıldı. Çizgilerin aşırı ince yapı analizi kısmında ise tüm Tm-FT spektrum verisinden incelenen çizgiye ait deney verisinin alınması işlemi Python programlama dili kullanılarak yazılan bir kod ile yapıldı. Aşırı ince yapı sabitlerinin belirlenmesi için ise Fitter programından (Zieser, 2022) yararlanıldı.

Bu tez çalışmasında literatürde bilinen deneysel ince yapı enerji seviyelerinin kullanılması ile Sc elementine ait 534 tane spektral çizginin analizi 400 nm -730 nm dalga boyu aralığında gerçekleştirildi. Sc I ve Sc II olarak tanımlanan çizgi sayıları sırasıyla 474 ve 26 adettir. Buna ek olarak 32 tane çizgi ise Sc I veya Sc II olarak tasnif edildi. İlk kez bu tez çalışmasında sınıflandırılan çizgi sayısı Sc I için 32 olarak belirlendi.

Benzer şekilde, FTS yöntemi ile elde edilen tulyum elementine ait spektrumun 330 nm - 400 nm dalga boyu aralığındaki ve 700 nm - 1000 nm dalga boyu aralığındaki spektral çizgiler analiz edildi. Toplam 953 tane Tm çizgisi analiz edildi. Bu çizgilerden 90 tanesi ilk

defa bu tez çalışmasında olmak üzere, 571 tanesi Tm I olarak sınıflandırıldı. Diğer taraftan, incelenen bu çizgilerden 15 tanesi ilk defa bu tez çalışmasında olmak üzere 151 tanesi Tm II olarak sınıflandırıldı. Metal çizgisi olarak tespit edilip sınıflandırılmayan (Tm I veya Tm II) çizgi sayısı ise 231 tanedir. Tm elementinin aşırı ince yapı analizinde ise;

- bir tane Tm I ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti revize edildi,
- bir tane Tm I ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti ilk defa bu çalışmada bulundu,
- iki tane Tm II ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti revize edildi,
- 27 tane Tm II ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti ilk defa bu çalışmada bulundu.

Tezin genel kısımlar başlığı altında Sc ve Tm elementleri için ayrı ayrı literatür tarama sonuçları sunuldu. Elementlere ait çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikler, deney düzeneği ve deneysel yöntem, kullanılan spektral veri analiz programları ise malzeme ve yöntem bölümünde anlatıldı. Bulgular kısmında veri analiz sonuçları, spektral çizgi sınıflandırması, fit işlemi sonucu belirlenen yeni aşırı ince yapı sabitlerine ait tablolar verildi. Elde edilen tüm bu sonuçlar tartışma ve sonuç kısmında değerlendirilerek ileriye yönelik motivasyonlar belirlendi.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. SKANDİYUM ELEMENTİNİN LİTERATÜR İNCELEMESİ

Literatürde Sc elementinin nötral (Sc I) ve iyon (Sc II, Sc III,...) halleri için hem deneysel hem de teorik olarak yapılan bir çok çalışma mevcuttur.

Sc elementi ile yapılan deneysel çalışmaların ilki Kopfermann ve Rasmussen (1934) tarafından gerçekleştirildi. Söz konusu bu çalışmada, Sc I elementinin hfs analizinde çift pariteli temel seviye konfigürasyonu ve tek pariteye sahip $3d4s4p$ uyarılmış seviyesi incelendi ve elementin nükleer momenti hakkında bilgi verildi. Fricke ve diğ. (1959), $3d4s^2$ konfigürasyonunun aşırı ince yapısını atomik ışın manyetik rezonans (ABMR) yöntemi ile inceledi. Sc atomunun aşırı ince yapısı ile ilgili yapılan ilk teorik çalışma ise Desclaux ve Bessis (1970) tarafından gerçekleştirildi. Yaptıkları çalışmada hem sınırlandırılmış hem de sınırlandırılmamış rölativistik Hartree-Fock yöntemlerini kullandılar ve çekirdek polarizasyon katkısını da dikkate alarak iki seviye için hfs sabitlerini belirlediler. Childs (1971) tarafından yapılan çalışmada $3d4s^2$ konfigürasyonunun aşırı ince yapısı ABMR metodu ile incelendi ve aşırı ince yapı parametrik analizi gerçekleştirildi. Ertmer ve Hofer (1976) tarafından floresans spektroskopisi (FS) ve ABMR yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmada ise çift pariteli $3d^24s$ konfigürasyonuna ait $^4F_{3/2-9/2}$ ve tek pariteli $3d^24p$ konfigürasyonuna ait $^4G_{5/2-11/2}$ seviyelerinin hfs analizi gerçekleştirildi. Aynı konfigürasyonun diğer iki seviyesi ($^4F_{5/2,7/2}$) ise ABMR yöntemi ile Zeiske ve diğ. (1976) tarafından incelendi. Siefert (1977) tek pariteli konfigürasyonlar için elementin fs ve hfs çalışmasını yaptı. Young ve diğ. (1988) bir kez iyonlaşmış skandiyum (Sc II) için hem deneysel hem de teorik olarak elde ettikleri sonuçları çalışmalarında sundu. Doğrusal laser iyon ışını spektroskopisini kullanarak Sc II'nin $3d^2$ konfigürasyonuna ait üç düzeyin ve $3d4p$ konfigürasyonuna ait altı düzeyin aşırı ince yapı sabitlerini ölçtü. Elde edilen deneysel veriler çoklu-konfigürasyon Dirac-Fock ab-initio hesaplamaları ile karşılaştırıldı. Singh ve diğerlerinin (1991) cw boya laser kullanarak optogalvanik spektroskopisi (OGS) yöntemi ile yaptıkları ölçümlerde, çift pariteli $3d^24s$ konfigürasyonundan dört seviye için ve tek pariteli $3d^24p$ konfigürasyonundan beş seviye için manyetik dipol ve elektrik kuadrupol hfs sabitleri belirlendi. Villemoes ve diğ. (1992) doğrusal hızlı-iyon-ışını-laser spektroskopisi yöntemini kullanarak Sc II'nin $3d4s$, $3d^2$ ve $3d4p$ konfigürasyonlarına ait 12 düzeyin hfs sabitlerini ölçtü. Aynı çalışmanın teorik kısmında ise $3d4s$, $3d5s$, $3d6s$, $3d^2$ ve $3d4p$ konfigürasyonlarındaki seviyeler için hfs sabitlerini hesaplamak

için çoklu konfigürasyon Dirac-Fock yöntemi kullanıldı. Guo-xin Chen (1994) Sc II'nin $3d^2$ düzeyi için hfs sabitlerini çoklu-konfigürasyon Hartree-Fock ve Konfigürasyon-Etkileşim (CI) yöntemleri ile hesapladı. Bu çalışmada özellikle core-polarizasyon ve core-core polarizasyonun hfs sabitleri üzerine olan etkisi ele alındı. Loginov (1995) konfigürasyon karışımının Sc I'un hfs spektrumuna ait parametreler üzerine olan etkisini araştırdı. Niceliksel bir tahmin metodu önerilen bu çalışmada, Sc II'nin $3d4s$ ve $4d5s$ konfigürasyonlarının aşırı ince yapısı ve konfigürasyon karışımları ele alındı. Aboussaid ve diğ. tarafından (1996) Sc spektrumu, yüksek çözünürlüklü FT spektrometresi ve içi boş katot deşarjı kullanılarak kırmızıaltı bölgede kaydedildi. Söz konusu bu çalışmada 12 seviye için yeni hfs sabiti değeri bulundu. Bieron ve diğ. (2002) çoklu-konfigürasyon Dirac-Fock modelini kullanarak $3d4s4p$ ve $3d^24s$ konfigürasyonlarına ait seviyelerin manyetik dipol aşırı ince yapı sabitlerini belirledi. Başar ve diğ. (2004) Sc I'e ait çift ve tek konfigürasyonlarının hfs sabitlerini OGS yöntemi ile inceledi. 645 nm ile 780 nm arasındaki 13 spektral çizginin hfs sabitleri bu çalışmada bulundu. Bu çalışmanın devamı olarak teorik bir çalışma yapan Öztürk ve diğ. (2007), daha önce bulunan deneysel hfs verilerine dayanarak, konfigürasyon etkileşim etkilerini dikkate alıp Sc I'in tek pariteli $3d4s4p$, $4s^24p$ ve $3d^24p$ konfigürasyonlarının ince yapısını hesaplamak için çoklu konfigürasyon yöntemi kullandı. Üç konfigürasyonun tüm seviyeleri için manyetik dipol aşırı ince yapı sabitlerine ilişkin teorik tahminler verildi. Oreshkina ve diğ. (2007) kuantum elektrodinamik pertürbasyon teorisini kullanarak Li-benzeri Sc elementinin aşırı ince yapısını inceledi. Dembczynski ve diğ. (2007) Sc I'in çift pariteli konfigürasyonlarının çoklu-konfigürasyon yöntemi ile yarı-deneysel analizini gerçekleştirdi. Krzykowski ve Stefaska (2008) silindir katot akım içerisinde laser-uyarılmış floresans metodu ile 19 çift elektron düzeyi için hfs sabitlerini ölçtü. Söz konusu düzeylerden 17 tanesinin A değeri ilk kez elde edildi. Konu ile ilgili olarak gerçekleştirilen en son teorik çalışma Dutta ve diğ. (2015) Sc^{2+} için birkaç düşük düzeyli durumların A ve B hfs sabitlerini ve dinamik kutuplanabilirliklerini hesapladılar. Coupled-cluster teorisinin kullanıldığı bu çalışmada A ve B sabitleri yüksek bir hassasiyetle hesaplandı. Deelen (2017) IR spektroskopisini kullandığı bir projede, Sc I'e ait hfs sabitlerini deneysel olarak ölçtü. Ölçülen 95 düzeyden 52 tanesi için hfs sabitleri ilk kez bu projede verildi. Lawler ve diğ. tarafından (2019) yapılan çalışmada Sc I'in güneşteki bolluğu ve Sc I ve Sc II'ye ait geçiş olasılıkları araştırıldı. FT spektrumundan Sc I ve Sc II çizgilerinin yeni "dallanma oranı (BF)" ölçümleri standart lambalar kullanılarak yeniden kalibre edildi. Liu ve diğ. tarafından (2019) yapılan çalışmada zaman-çözünürlüklü laser spektroskopisi tarafından Sc I düzeylerinin radyal yaşam ömürleri ölçüldü. Yapılan literatür çalışmasına göre 32 seviyenin

yaşam ömrü ilk kez bu çalışmada verildi. Bu yeni bulunan yaşam ömürlerinin Sc I için bilinen osilatör şiddetlerinin genişletilmesinde önemi büyük olacağı belirtildi. Xu ve diğ. (2019) FT spektrumu kullanarak Sc I ve Sc II'nin aşırı ince yapısını 3998 cm^{-1} ile 39979 cm^{-1} aralığı içinde inceledi. Sc I için 56 adet ve Sc II için 12 adet enerji seviyesi için A sabitlerini belirlediler. 2022 yılında Hala ve diğ. (2022) FT spektroskopisi yöntemini kullandı ve 200 nm ile 2500 nm dalga boyu aralığında hfs sabitlerini araştırdı. Söz konusu bu çalışmada Sc I için 80 adet, Sc II için 6 adet enerji düzeyinin hfs sabitleri ilk kez bildirildi. Kaleem ve diğ. (2023) Sc elementine ait FT spektrumunu inceledikleri çalışmada, 104 çift pariteli enerji seviyesi ve 95 tek pariteli enerji seviyesi için hfs sabiti belirlenmiştir. Bu seviyelerden 8 tek pariteli ve 10 çift pariteli enerji düzeyi için A değeri ilk kez söz konusu bu çalışmada önerildi. Pek çok hfs sabiti literatürdeki değerler ile iyi bir uyum sergilemekle birlikte toplamda 7 adet hfs sabiti bu çalışma ile düzeltilerek yeni değerler önerildi.

NIST veritabanına göre (NIST, 2024) Sc I için 478 adet deneysel ince yapı enerji seviyesi bulunmaktadır. Tablo 2.1'de Sc I için çift pariteli ince yapı enerji seviyelerine ait literatürden bilinen A ve B hfs sabitleri, incelendikleri yöntemler ile birlikte verildi. A sabiti bilinen toplam çift pariteli enerji seviyesi sayısı 110 olup hem A hem de B sabitleri bilinen çift pariteli enerji seviyesi sayısı ise sadece sekizdir.

Tablo 2.1: Sc I'e ait çift pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
0.0000	269.556(1)	-26.346(4)	ABMR	(Childs, 1971)
	269.560 (20)	-26.37(10)	ABMR	(Fricke, 1959)
168.3371	109.032(1)	-37.387(12)	ABMR	(Childs, 1971)
	109.034(10)	-37.31(10)	ABMR	(Fricke, 1959)
11519.9611	-158.513(3)	-5.19(2)	ABMR	(Ertmer, 1976)
	-155(5)		FS	(Ertmer, 1976)
	-159.0(5)	-50(20)	OGS	(Singh, 1991)
11557.6556	154.035(2)	-6.45(4)	ABMR	(Zeiske, 1976)
	151(5)		FS	(Ertmer, 1976)
11610.2357	250.012(2)	-9.07(4)	ABMR	(Zeiske, 1976)
	245(8)		FS	(Ertmer, 1976)
11677.3121	285.967(9)	-15.46(70)	ABMR	(Ertmer, 1976)
	280(9)		FS	(Ertmer, 1976)
	294.3(2)	-32(23)	OGS	(Singh, 1991)
14926.061	283(10)		FTS	(Xu, 2021)
	290(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
15041.902	-16.2(5)		FTS	(Deelen, 2017)
	-25(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
17012.753	551(10)		FTS	(Abusaid, 1996)
	425.4(4)	-0.6(30)	OGS	(Singh, 1991)
	560(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
17025.127	-285(25)		FTS	(Abusaid, 1996)
	596.8(7)	-55(20)	OGS	(Singh, 1991)
	-289(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
17226.025	1086.44(48)		FTS	(Hala, 2022)
	1086(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
17255.076	502(32)		FTS	(Xu, 2021)
	493(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
17307.069	435(22)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	475(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
20236.877	350.8(1)		FTS	(Deelen, 2017)
	355(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
20239.65	-3.07(11)		FTS	(Xu, 2021)
	-114(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
20681.41	351(5)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	363(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
20719.833	-206(10)		OGS	(Başar, 2004)
	-220(10)		OGS	(Başar, 2004)
	-211(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
26936.971	2456(12)		FTS	(Xu, 2021)
	2461(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
33763.534	275(4)		FTS	(Xu, 2021)
	279(2)		FTS	(Kaalem, 2023)

Tablo 2.1 (devam): Sc l'e ait çift pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
33798.633	96(4)		FTS	(Xu, 2021)
	96(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
33846.568	32.6(2)		FTS	(Xu, 2021)
	40(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
33906.361	7.6(2)		FTS	(Xu, 2021)
	8(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
34390.253	-738(3)		OGS	(Başar, 2004)
	-738(3)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	-735(9)		OGS	(Başar, 2004)
	-738(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
34422.829	447(3)		OGS	(Başar, 2004)
	448(2)		SAS	(Krzykowski, 2008)
	447(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
34479.99	592(2)		FTS	(Krzykowski, 2008)
34567.18	617(6)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	604(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
35671.033	-166(6)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	-166(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
35745.635	606(5)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	606(8)		FTS	(Kaalem, 2023)
36276.607	43(1)		SAS	(Krzykowski, 2008)
	50(6)		FTS	(Kaalem, 2023)
36330.59	171(1)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	170(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
36492.64	-335(6)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	-332(6)		FTS	(Kaalem, 2023)
36515.76	-27.28(21)		FTS	(Hala, 2022)
	-38(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
36572.77	-25(2)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	-20(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
36977.491	154.1(1)		FTS	(Deelen, 2017)
	148(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
37054.479	52.5(1)		FTS	(Deelen, 2017)
	50(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
37085.8	50(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
37148.196	90(40)		FTS	(Xu, 2021)
	85(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
37780.858	293(3)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	302(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
37855.603	-15.3(1)		FTS	(Deelen, 2017)
	6(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
38871.628	-109(1)		FTS	(Xu, 2021)
	-99(10)		FTS	(Kaalem, 2023)

Tablo 2.1 (devam): Sc I'e ait çift pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
38959.131	316(1)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	332(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
39164.092	112(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
39225.31	59.7(1)		FTS	(Deelen, 2017)
	60(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
39701.428	-868(50)		FTS	(Xu, 2021)
	-886(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
39721.755	288(17)		FTS	(Xu, 2021)
	288(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
39754.983	440.39(18)		FTS	(Hala, 2022)
	440(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
39799.959	503.05(6)		FTS	(Hala, 2022)
	500(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
39861.348	-291.10(18)		FTS	(Hala, 2022)
	-290(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
39902.698	92(2)		FTS	(Xu, 2021)
	100(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
39957.75	261.12(66)		FTS	(Hala, 2022)
	260(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
40028.31	337(60)		FTS	(Xu, 2021)
	360(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
40063.875	730.59(33)		FTS	(Hala, 2022)
	735(6)		FTS	(Kaalem, 2023)
40070.288	-689(100)		FTS	(Xu, 2021)
	-740(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
40257.516	494(21)		FTS	(Xu, 2021)
	485(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
40282.159	694(3)		FTS	(Xu, 2021)
	709(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
40334.288	157.99(5.7)		FTS	(Hala, 2022)
	161(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
40418.538	141(15)		FTS	(Xu, 2021)
	121(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
40521.261	-215.25(96)		FTS	(Hala, 2022)
	-224(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
40554.96	213(19)		FTS	(Xu, 2021)
	187(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
40562.044	113(3)		FTS	(Deelen, 2017)
	90(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
40603.933	282(14)		FTS	(Xu, 2021)
	275(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
40670.822	326(80)		FTS	(Xu, 2021)
	300(2)		FTS	(Kaalem, 2023)

Tablo 2.1 (devam): Sc I'e ait çift pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
40802.738	2.23(5)		FTS	(Hala, 2022)
	70(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
40825.755	79.4(6)		FTS	(Deelen, 2017)
	92(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
41446.839	1678.52(31)		FTS	(Hala, 2022)
	1698(8)		FTS	(Kaalem, 2023)
41474.854	794(11)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	770(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
41505.582	667(9)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	667		FTS	(Kaalem, 2023)
41921.904	-1.80(15)		FTS	(Hala, 2022)
	10(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
41960.949	173.28(26)		FTS	(Hala, 2022)
	176(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
42015.557	-85.44(12)		FTS	(Hala, 2022)
	188(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
42085.132	98.9(8)		FTS	(Deelen, 2017)
	187(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
42149.641	89.64(18)		FTS	(Hala, 2022)
	92(7)		FTS	(Kaalem, 2023)
42198.825	34.2(1)		FTS	(Deelen, 2017)
	145(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
42445.509	241(10)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	232(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
42466.369	-6(17)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	-82(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
42877.58	2460(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
42917.84	399.92(39)		FTS	(Hala, 2022)
	407(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
42937.526	-161.59(37)		FTS	(Hala, 2022)
	-194(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
42942.49	320(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
42969.76	-149(4)		FTS	(Krzykowski, 2008)
	-175(15)		FTS	(Kaalem, 2023)
43429.62	224.54(33)		FTS	(Hala, 2022)
	225(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
43435.39	-59.06(16)		FTS	(Hala, 2022)
	-60(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
43597.133	316.28(87)		FTS	(Hala, 2022)
	265(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
43658.502	1.50(8)		FTS	(Hala, 2022)
	2(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
43988.16	43(3)		FTS	(Kaalem, 2023)

Tablo 2.1 (devam): Sc I'e ait çift pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
43814.472	-330.97(15)		FTS	(Hala, 2022)
44030.3	1444.39(57)		FTS	(Hala, 2022)
	1455(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
44107.228	696.11(72)		FTS	(Hala, 2022)
	690(6)		FTS	(Kaalem, 2023)
44238.228	644.25(78)		FTS	(Hala, 2022)
	650(7)		FTS	(Kaalem, 2023)
44594.955	68.95(96)		FTS	(Hala, 2022)
	70(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
44690.637	144.50(30)		FTS	(Hala, 2022)
	150(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
44823.187	332.77(66)		FTS	(Hala, 2022)
44838.556	90.24(17)		FTS	(Hala, 2022)
	60(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
44909.52	103.73(81)		FTS	(Hala, 2022)
	100(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
44941.779	221.84(33)		FTS	(Hala, 2022)
	225(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
45016.415	122.91(33)		FTS	(Hala, 2022)
	120(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
45125.673	81.24(15)		FTS	(Hala, 2022)
	80(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
45514.98	1046.57(53)		FTS	(Hala, 2022)
45574.626	180(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
45659.077	182.27(69)		FTS	(Hala, 2022)
45715.771	20(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
45737.15	266.21(24)		FTS	(Hala, 2022)
	260(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
45870.86	21.58(69)		FTS	(Hala, 2022)
	125(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
45927.799	-512.64(70)		FTS	(Hala, 2022)
45988.912	270(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
46042.651	-103.4(1.1)		FTS	(Deelen, 2017)
	50(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
46054.3	31.5 (5)		FTS	(Deelen, 2017)
	28(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
46403.267	327(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
46458.59	427(7)		FTS	(Kaalem, 2023)
46623.481	570(6)		FTS	(Kaalem, 2023)

Tablo 2.2'de Sc I'in tek pariteli ince yapı enerji seviyelerine ait literatürden bilinen *A* ve *B* aşırı ince yapı sabitleri listelendi. *A* sabiti bilinen toplam tek pariteli enerji seviyesi sayısı 94 olup hem *A* hem de *B* sabitleri bilinen tek pariteli enerji seviyesi sayısı ise 13'tür.

Tablo 2.2: Sc I'e ait tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
15672.5595	-138.9(7)		FTS	(Abusaid, 1996)
	-137.9(5.7)		FTS	(Abusaid, 1996)
	-138(3)		OGS	(Başar, 2004)
	-133(8)		OGS	(Başar, 2004)
	138(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
15756.5295	289(1.5)		OGS	(Başar, 2004)
	289.8(3)		FTS	(Abusaid, 1996)
	288.4(1.8)		FTS	(Abusaid, 1996)
	289(1)		FTS	(Kaalem, 2023)
15881.7082	356.7(1.5)		OGS	(Başar, 2004)
	356.8(3.5)		FTS	(Abusaid, 1996)
	359.3(2)		FTS	(Abusaid, 1996)
	358.6(1.5)		FTS	(Abusaid, 1996)
	360(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
16009.7432	-517.6(1.4)		FTS	(Abusaid, 1996)
	-511(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
16021.7788	348.3(1.1)		FTS	(Abusaid, 1996)
	344(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
16022.7219	644.8(2.6)		FTS	(Abusaid, 1996)
	663(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
16026.5528	390.4(2)		FTS	(Abusaid, 1996)
	390(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
16096.8834	-372.0(1.3)		FTS	(Abusaid, 1996)
	-372.0(1.4)		FTS	(Abusaid, 1996)
	-368(5)		OGS	(Başar, 2004)
	-373(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
16141.0012	306.53(45)		FTS	(Abusaid, 1996)
	306.11(54)		FTS	(Abusaid, 1996)
	308(6)		FTS	(Kaalem, 2023)
16210.814	457.87(18)		FTS	(Abusaid, 1996)
	457.69(54)		FTS	(Abusaid, 1996)
	457(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
18504.058	1198(3)		OGS	(Başar, 2004)
	1197(3)		OGS	(Başar, 2004)
	1201(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
18515.665	734(3)		OGS	(Başar, 2004)
	734(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
18571.386	590(5)		OGS	(Başar, 2004)
	592(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
18711.029	87.1(1)		FTS	(Xu, 2021)
	84.3(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
18855.734	612.4(2)		FTS	(Xu, 2021)
	610(1)		FTS	(Kaalem, 2023)

Tablo 2.2 (devam): Sc I'e ait tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
21032.732	-37(16)		FTS	(Abusaid, 1996)
	-40.7(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
21085.829	371(8)		FTS	(Abusaid, 1996)
	373(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
24656.712	429.3(2)		FTS	(Deelen, 2017)
	448(7)		FTS	(Kaalem, 2023)
24656.866	-28.2(4)		FTS	(Deelen, 2017)
	10(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
24866.172	256.9(7)	-17.1(6.9)	FTS	(Deelen, 2017)
	305(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
25014.19	33(5)		OGS	(Başar, 2004)
	28(40)		FTS	(Kaalem, 2023)
25584.627	168(10)		FTS	(Xu, 2021)
	170(20)		FTS	(Kaalem, 2023)
25724.658	127.7(3)	57.0(7.5)	FTS	(Deelen, 2017)
	126(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
29022.864	278(3)		FS	(Ertmer, 1976)
	280.5(3)	-60(30)	OGS	(Singh, 1991)
	280(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
29096.178	147(3)		FTS	(Xu, 2021)
	146(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
29189.842	86(3)		FS	(Ertmer, 1976)
	83(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
29303.485	45(3)		FS	(Ertmer, 1976)
	41(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
30573.163	198.8(6)		FTS	(Deelen, 2017)
	240(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
30706.696	307.6(3)	17.4(3.3)	FTS	(Deelen, 2017)
	330(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
31172.621	280.30(30)		FTS	(Hala, 2022)
	285(7)		FTS	(Kaalem, 2023)
31215.78	121(4)		FTS	(Xu, 2021)
	121(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
31275.4	68.5(3)		FTS	(Xu, 2021)
	68(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
31350.789	44.37(30)		FTS	(Hala, 2022)
	44(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
32637.409	439(2)		FTS	(Xu, 2021)
	431(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
32659.285	75(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
32696.808	73(2)		FTS	(Xu, 2021)
	75(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
32751.474	44(3)		FTS	(Xu, 2021)
	42(1)		FTS	(Kaalem, 2023)

Tablo 2.2 (devam): Sc I'e ait tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
33055.957	274(10)		FTS	(Xu, 2021)
	170(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
33151.185	70.8(4)		FTS	(Deelen, 2017)
	69(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
33153.779	260(12)		FTS	(Xu, 2021)
	227(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
33278.37	-82.2(4)	-2.2(2)	OGS	(Singh, 1991)
	45(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
33614.869	225(8)		OGS	(Başar, 2004)
	240(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
33707.034	44(8)		OGS	(Başar, 2004)
	42(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
35346.32	-287(50)		FTS	(Xu, 2021)
	-320(12)		FTS	(Kaalem, 2023)
36666.416	167(10)		FTS	(Xu, 2021)
	150(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
36730.11	97(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
36764.195	358.85(22)		FTS	(Hala, 2022)
	360(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
36793.645	66(33)		FTS	(Xu, 2021)
	58(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
36860.209	35(34)		FTS	(Xu, 2021)
	30(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
36933.899	153(11)		FTS	(Xu, 2021)
	162(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
36959.027	-6(22)		FTS	(Xu, 2021)
	24(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
37039.559	105(21)		FTS	(Xu, 2021)
	138(8)		FTS	(Kaalem, 2023)
37086.02	217(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
37125.419	121(25)		FTS	(Xu, 2021)
	112(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
37486.929	-136(35)		FTS	(Xu, 2021)
	-139(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
37877.776	-52.16(75)		FTS	(Hala, 2022)
	-47(6)		FTS	(Kaalem, 2023)
37908.484	44.37(21)		FTS	(Hala, 2022)
	44(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
37964.868	61(9)		FTS	(Xu, 2021)
	60(1)		FTS	(Kaalem, 2023)
39153.14	139.70(39)		FTS	(Hala, 2022)
	139(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
39248.91	109.72(39)		FTS	(Hala, 2022)
	110(3)		FTS	(Kaalem, 2023)

Tablo 2.2 (devam): Sc I'e ait tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
39392.8	228(11)		FTS	(Xu, 2021)
	128(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
39423.36	111.22(27)		FTS	(Hala, 2022)
	110(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
39949.757	-330.7(3)		FTS	(Deelen, 2017)
	-396(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
39989.575	110(14)		FTS	(Xu, 2021)
	112(1)		FTS	(Kaalem, 2023)
40044.619	-735.1(3)		FTS	(Deelen, 2017)
	-705(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
40048.736	316(16)		FTS	(Xu, 2021)
	320(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
40073.492	350.8(3)	-24.6(1.2)	FTS	(Deelen, 2017)
	360(7)		FTS	(Kaalem, 2023)
40104.143	232(13)		FTS	(Xu, 2021)
	97(6)		FTS	(Kaalem, 2023)
40128.136	418.2(3)		FTS	(Deelen, 2017)
	410(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
40145.869	444(8)		FTS	(Xu, 2021)
	433(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
40151.072	444.3(2)	-100.4(4.5)	FTS	(Deelen, 2017)
	447(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
40210.868	505.5(1)	30.6(1.8)	FTS	(Deelen, 2017)
	509(7)		FTS	(Kaalem, 2023)
40347.323	-5(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
40351.308	270(4)		FTS	(Xu, 2021)
	282(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
40499.698	29(1)		FTS	(Kaalem, 2023)
40594.018	131(3)		FTS	(Xu, 2021)
	135(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
40595.283	1707(1)		FTS	(Deelen, 2017)
	1702(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
40644.644	926.4(5)	16.8(4.2)	FTS	(Deelen, 2017)
	955(10)		FTS	(Kaalem, 2023)
40715.416	664.0(4)	-45.6(5.1)	FTS	(Deelen, 2017)
	662(7)		FTS	(Kaalem, 2023)
41153.414	-196(20)		FTS	(Xu, 2021)
	-196(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
41162.506	478(21)		FTS	(Xu, 2021)
	469(3)		FTS	(Kaalem, 2023)
42780.397	777.4(8)	-233.5(6.6)	FTS	(Deelen, 2017)
	748(4)		FTS	(Kaalem, 2023)

Tablo 2.2 (devam): Sc I'e ait tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
42819.458	-390(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
42978.799	67.2(2)		FTS	(Deelen, 2017)
	80(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
43170.439	332.2(4)	-36.6(4.5)	FTS	(Deelen, 2017)
	350(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
43252.557	219.45(1)		FTS	(Hala, 2022)
	-45(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
43830.118	11.39(51)		FTS	(Hala, 2022)
	10(2)		FTS	(Kaalem, 2023)
43860.111	251.52(33)		FTS	(Hala, 2022)
	255(7)		FTS	(Kaalem, 2023)
44105.43	462.58(2)		FTS	(Hala, 2022)
	507(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
44189.284	-62(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
46206.76	135(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
46369.17	97(5)		FTS	(Kaalem, 2023)
46570.34	87(4)		FTS	(Kaalem, 2023)
46641.603	65(3)		FTS	(Kaalem, 2023)

Tablo 2.3'de Sc II'ye ait enerji seviyelerinin literatürden bilinen *A* ve *B* aşırı ince yapı sabitleri verilmektedir. Sc II'ye ait *A* sabiti bilinen enerji seviyesi sayısı 27'dir. Hem *A* hem de *B* sabiti bilinen Sc II'ye ait enerji seviyesi sayısı ise 21'dir.

Tablo 2.3: Sc II'ye ait ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
0.00	-480(2)	-13(3)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
67.72	510(1)	-30(12)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
177.76	654.8 (6)	-63(23)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
2540.95	128.2 (8)	-39(11)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
4802.87	290.67 (4)	-10.5(2)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
4883.57	113.672 (6)	-12.62(8)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
4987.79	38.357 (4)	-16.5(2)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
10944.56	149.361 (4)	7.818(6)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
	149.9 (3)	2(6)	CFIBLS	(Young, 1988)
	151.8 (6)	12(6)	CFIBLS	(Arnesen, 1982)
12101.5	-108.1 (4)	-13(2)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
	-107.501 (4)	-12.30(2)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
	-107.3 (6)	-9(3)	CFIBLS	(Arnesen, 1982)

Tablo 2.3 (devam): Sc II'ye ait ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Referans
12154.42	-27.2 (4)	26(3)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
	-27.732 (4)	22.127(6)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
	-27.9 (4)	19(6)	CFIBLS	(Young, 1988)
	-27.7 (8)	8(8)	CFIBLS	(Amesen, 1982)
14261.32	135.232 (2)	-63.44(8)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
	135.2 (1.6)	-52(32)	CFIBLS	(Young, 1988)
26081.34	215.7 (8)	18(7)	CFIBLS	(Amesen, 1982)
27443.71	366.8 (3)	-40(28)	CFIBLS	(Young, 1988)
	366.8 (1.1)	-40(14)	CFIBLS	(Young, 1988)
27602.45	205.4 (12)	-70(36)	CFIBLS	(Young, 1988)
	205.4 (6)	-70(18)	CFIBLS	(Young, 1988)
27841.35	102.3 (2)	-84(4)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
27917.78	307 (2)	1(8)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
	304.7 (4)	4(2)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
	303.2 (1.5)	10(5)	CFIBLS	(Young, 1988)
	304.3 (8)	2(3)	CFIBLS	(Amesen, 1982)
28021.29	125.7 (3)	6(3)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
	125.3 (2)	10(2)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
	125.4 (1.0)	7(7)	CFIBLS	(Amesen, 1982)
28161.17	101.8(6)	24(9)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
	99.5(2)	21(4)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
	101.4(6)	-23(12)	CFIBLS	(Amesen, 1982)
29742.16	258(2)	12(6)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
	255.0(4)	10(16)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
	255.0(2.4)	10(8)	CFIBLS	(Young, 1988)
	257.7(1.4)	9(6)	CFIBLS	(Amesen, 1982)
29823.93	105.6(5)	-21(4)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
	106.2(2)	-20(2)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
	106.3(9)	-24(18)	CFIBLS	(Young, 1988)
32349.98	193.1(8)	-65(14)	CFIBLS	(Villemoes, 1992)
	191.1(6)	-82(8)	CFIBLS	(Mansour, 1989)
	190.6(2.1)	-69 (34)	CFIBLS	(Young, 1988)
30815.7	162(45)		FTS	(Xu, 2021)
39115.04	1082.24(21)		FTS	(Hala, 2022)
39345.52	1343.96(11)		FTS	(Hala, 2022)
60267.16	205(62)		FTS	(Xu, 2021)
60348.46	86.64(37)		FTS	(Hala, 2022)
60457.12	104.33(75)		FTS	(Hala, 2022)

2.2. TULYUM ELEMENTİNİN LİTERATÜR İNCELEMESİ

Tulyum elementine ait günümüze dek yapılan çalışmalar bu kısımda derlenerek sunuldu.

Literatürde Tm elementinin hfs ile ilgili bilinen ilk çalışma 1955 yılında Lindenberger tarafından gerçekleştirildi. Bu çalışmada, Fabry-Perot interferometresi (FPI) kullanılarak Tm'un manyetik dipol momenti ilk kez $\mu = -0.20 \pm 0.02\mu_N$ olarak ölçülerek bildirildi (Lindenberger, 1955). Manyetik dipol moment üzerine Ritter tarafından 1962 yılında yapılan deneysel bir çalışmada, atomik ışın manyetik rezonans tekniği kullanıldı ve Tm I'e ait manyetik dipol momenti $\mu = -0.2229 \pm 0.03\mu_N$ olarak literatürde mevcut olan değerlerden daha hassas bir düzeyde bildirildi. Aynı deneysel çalışmada $4f^{13}6s^2$ konfigürasyonuna ait $^2F_{7/2}$ aşırı ince yapı düzeyi için ilk kez A manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti belirlendi (Ritter, 1962). Atomik ışın manyetik rezonans tekniği kullanılarak Tm çekirdeğinin manyetik dipol momentinin araştırıldığı bir başka çalışma 1967 yılında Giglberger ve Penselin tarafından gerçekleştirildi. Uygulanan dış manyetik alanın 2200 - 3000 Gauss düzeyinde tutulduğu bu çalışmada Tm'a ait çekirdek dipol momenti $\mu_i = -0.2310(15)\mu_N$ olarak bildirildi (Giglberger, 1967).

1969 yılında Handrich ve diğerleri tulyum atomunu iki ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabitini level crossing (LC) yöntemi ile buldu. 1971 yılında Kuhl tarafından yapılan deneysel çalışma ile Tm I'in $4f^{13}6s6p$ ve $4f^{12}5d6s^2$ konfigürasyonlarına ait beş enerji düzeyi için hfs yarılmalari incelenerek A sabitleri bulundu (Kuhl, 1971). Sugar ve Meggers tarafından 1973 yılında gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada Tm spektrum analizi çok geniş bir dalga boyu aralığı olan 2513-11750 Å için gerçekleştirildi (Sugar, 1973). 1977 yılında Brandt ve Camus Tm I'in $4f^{13}6s6p$ ve $4f^{12}5d6s^2$ konfigürasyonlarını inceleyerek 20 adet seviyenin A değerlerini deneysel olarak elde etti (Brandt, 1977). Van Leeuwen ve diğ. 1980 yılında yapılan deneysel çalışmada, yüksek çözünürlük değerli laser spektroskopi yöntemi kullanılarak Tm I'e ait 10 adet enerji seviyesi için A değeri belirlendi (Leeuwen, 1980).

Angelova ve diğ. boya laseri kullanarak 1984 yılında gerçekleştirilen deneysel çalışmada Tm atomunun yüksek derecede uyarılmış durumlarının spektrumu hakkında yeni veriler elde etmeyi sağladı (Angelova, 1984). Child ve diğ. tarafından 1984 yılında gerçekleştirilen iki farklı laser spektroskopi temelli deneysel çalışmada aralarında ^{169}Tm elementinin de bulunduğu üç farklı element için $4f^N 6s^2$ uyarılmış konfigürasyonlar için aşırı ince yapı ölçümleri yapıldı. Laser floresans yöntemi ile ^{169}Tm elementine ait uyarılmış enerji düzeylerine ait 10 adet A sabitleri literatürdeki veriler ile kıyaslamalı olarak bir tabloda sunuldu (Child, 1984).

1985 yılında yüksek çözünürlüklü ABMR spektroskopi yönteminin kullanıldığı bir diğer deneysel çalışmada, Pfeufer 5758 Å ile 5683 Å dalga boyu aralığını inceledi. Bu çalışmada Tm I'e ait 17 tane enerji seviyesi için A değerleri tespit edildi (Pfeufer, 1985). Yüksek çözünürlüklü ABMR spektroskopi yöntemini 1986 yılında yeniden kullanan Pfeufer, $4f^{12}5d6s^2$ konfigürasyonuna ait yarı-kararlı enerji düzeyleri arasındaki geçişleri belirledi. Literatürde $4f^{13}6s6p$ ve $4f^{12}5d6s^2$ konfigürasyonları için bilinen teorik A değerleri ile kendisinin yapmış olduğu deneysel çalışmada elde edilen A değerlerini karşılaştırdı. Bu karşılaştırmada elde edilen birbirleriyle uyumlu teorik ve deneysel A değerleri aynı zamanda bu konfigürasyonlar için kullanılan dalga fonksiyonlarının da güvenilirliğini ispatladığı bildirildi (Pfeufer, 1986). Pfeufer tarafından 1987 yılında gerçekleştirilen diğer bir deneysel çalışmada aralarında Tm'un da bulunduğu lantanit serisi elementleri için $4f^n6s^2$, $4f^n5d6s$, $4f^n6s6p$, $4f^{n-1}5d6s^2$ konfigürasyonlarının hfs radyal integral setleri belirlendi (Pfeufer, 1987).

1992 yılında Tripplett ve diğ. elektron relaksasyon mekanizmasından yararlanarak Mössbauer etkisi ile metalik özellik sergileyen Tm elementinde meydana gelen hfs spektrumunu inceledi (Triplet, 1992). 1993 yılında Zhan-Kui ve diğ. deneysel olarak Yb ve Tm elementlerinin bazı uyarılmış enerji seviyelerinin izotop kayması ve aşırı ince yapısı üzerine floresans teknikleri ve laser-atomik-hüzme spektroskopisini kullanarak bir çalışma yaptı. Bu inceleme sonucu Tm I için $4f^{12}5d6s6p$ konfigürasyonunun seviyelerine ait A değerleri ilk kez bu çalışmada bulundu (Zhan-Kui, 1993). Kröger ve Kronfeldt 1996 yılında Doppler indirgenmiş soğurma spektroskopisi kullanarak $4f^{13}6s7s$ konfigürasyonuna ait altı enerji seviyesi için A sabitini hesapladı. Bu konfigürasyon için hfs parametreleri parametrik yöntemler kullanılarak belirlendi (Kröger, 1996). Tm I ve Tm II için FTS yöntemi kullanılarak 1997 yılında gerçekleştirilen bir diğer deneysel çalışmada, Wickliffe ve Lawler atomik geçiş olasılıklarını tespit etti (Wickliffe, 1977).

1997 yılında Kröger ve diğ. tarafından gerçekleştirilen Laserle Uyarılmış Floresans Spektroskopi (LIFS) yöntemi kullanılan deneysel çalışmada, Tm I'e ait yeni bir enerji seviyesi bulundu. Ayrıca 51 tane Tm I'e ait geçiş ölçüldü ve bunlara ek olarak 24 tanesi tek pariteli ve 19 tanesi çift pariteli olmak üzere 43 enerji seviyesi için A değeri belirlendi (Kröger, 1997). Nakamura ve diğ. 1997 yılında 250 Gauss manyetik alan şiddeti uygulayarak Zeeman etkisinin belirli konfigürasyonlara karşılık gelen enerji düzeylerine olan etkisini araştırdıkları bir diğer deneysel çalışmada, bu enerji seviyelerine ait A sabitleri ve üst enerji seviyelerine ait g faktörlerinin tespit edilmesi sağlandı (Nakamura, 1977). 2003 yılında Biomet ve Quinet

aralarında Tm elementinin de bulunduğu, 57-71 atom numarası aralığındaki lantanit serileri ile ilgili nötr ve iyonlarını kapsayan spektroskopik özelliklerle ilgili bir derleme çalışması yaptı (Biomet, 2003).

2005 yılında Başar ve diğ. laser optogalvanik spektroskopi (LOGS) yöntemini kullanarak gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada 570-595 nm dalga boyu aralığında bulunan 31 spektroskopik geçiş ölçtü ve 43 adet enerji seviyesi için A hfs sabiti belirlendi (Başar, 2005). 2009 yılında aralarında Tm'un da bulunduğu nadir toprak elementlerinin güneşteki bolluk miktarının belirlenmesi üzerine Sneden ve diğ. tarafından spektroskopik gözlemler ve analizler yapıldı (Sneden, 2009). 2011 yılında Smirnov tarafından yapılan çalışmada Tm II için 54 eksite tesir kesiti ilk kez ölçülerek literatüre eklendi (Smirnov, 2011). Fedorov ve diğ. 2015 yılında laser soğutma yöntemi kullanılarak $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$ ($J = 9/2$) konfigürasyonunu deneysel olarak incelediler (Fedorov, 2015).

LIFS yöntemi ile 2016 yılında Tian ve diğ. gerçekleştirdikleri çalışmada Tm I için 88 enerji seviyesinin ve Tm II için 29 enerji seviyesinin yaşam ömürlerini deneysel olarak belirledi (Tian, 2016).

Tablo 2.4'te Tm I'e ait 68 adet çift pariteli enerji seviyelerine ait literatürden bilinen A değeri verildi.

Tablo 2.4: Tm I'e ait çift pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	Yöntem	Referans
13119.610	-441.5(1.2)	FTS	(Parlatan, 2022)
15271.002	-345.18(23)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-345.1(6)	OGS	(Başar, 2005)
15587.811	-390.46(28)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-360.38(31)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
16456.913	-308.89(17)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-308.82(21)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
16742.237	-736.6(1.0)	LIF	(Childs, 1984)
	-737.53(45)	ABMR	(Nakamura, 1997)
16957.006	-491.1(1.0)	LIF	(Childs, 1984)
	-491.45(7)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
	-490.8(1.0)	SAS	(Kröger, 1997)

Tablo 2.4 (devam): Tm I'e ait çift pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	Yöntem	Referans
17343.374	-166.0(7)	LIF	(Lee, 1980)
	-166.56(14)	ABMR	(Nakamura, 1997)
17454.818	-365.91(55)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
18837.385	-422.4(9)	ABMR	(Kuhl, 1971)
	-422.7(1.5)	LIF	(Kröger, 1997)
	-421(5)	OGS	(Başar, 2005)
18853.823	-476.51(27)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-476.41(31)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
	-477(2)	OGS	(Başar, 2005)
18990.406	-581.4(1.3)	OGS	(Kröger, 1997)
	-582 (2)	OGS	(Başar, 2005)
19466.663	-342.84(28)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-342.76 (34)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
19548.834	-57(2)	ABMR	(Brandt, 1977)
19748.543	-694.8(4)	OGS	(Kröger, 1997)
	-694.5 (1.5)	OGS	(Başar, 2005)
19753.83	-536.6(9)	ABMR	(Brandt, 1977)
	-528 (6)	OGS	(Başar, 2005)
21120.836	-384 (7)	LIF	(Kröger, 1996)
21161.401	-490(4)	LIF	(Kröger, 1997)
21737.685	-357.1(1.5)	ABMR	(Brandt, 1977)
21997.473	-342.8(1.3)	OGS	(Başar, 2005)
22791.176	-574.1(1.2)	ABMR	(Kuhl, 1971)
22929.717	-574(3)	ABMR	(Kuhl, 1971)
23873.207	-360.7(3)	LC	(Handrich, 1969)
24137.196	-308.0(1.4)	OGS	(Başar, 2005)
24348.692	-333.9(7)	LC	(Handrich, 1969)
24348.692	-371.3 (5)	OGS	(Kröger, 1997)
24418.018	-659(2)	ABMR	(Brandt, 1977)
25656.019	-410.7(1.4)	LIF	(Childs, 1984)
	-410.9(5)	SAS	(Kröger, 1997)
25717.197	-527.6(9)	ABMR	(Brandt, 1977)
25745.117	-493.38(1.00)	OGS	(Zhou, 1993)
	-593(5)	FTS	(Kebapcı, 2022)
26126.907	-1161.47(1.20)	OGS	(Kröger, 1996)
	-1160.3(1.0)	LIF	(Childs, 1984)
26439.491	-904.98(1.00)	OGS	(Kröger, 1996)
	-908.3(1.1)	LIF	(Childs, 1984)
26488.7	-739.3(1.8)	LIF	(Childs, 1984)
	-737.5(1.0)	SAS	(Kröger, 1997)
26646.214	-474.3(1.5)	ABMR	(Brandt, 1977)
26701.325	-426(15)	ABMR	(Pfeufer, 1986)

Tablo 2.4 (devam): Tm I'e ait çift pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	Yöntem	Referans
27509.4	-797.1(9)	LIF	(Kröger, 1997)
28024.01	-916(3)	ABMR	(Brandt, 1977)
28051.37	-768(3)	ABMR	(Brandt, 1977)
28143.67	-475.6(8)	LIF	(Kröger, 1997)
28448.585	-746.4(1.3)	LIF	(Kröger, 1997)
28555.799	-992.4(1.5)	LIF	(Kröger, 1997)
30082.18	-562(2)	LIF	(Kröger, 1997)
30124.02	-454(2)	LIF	(Kröger, 1997)
30302.42	-490(2)	LIF	(Kröger, 1997)
32174.49	-390(9)	ABMR	(Brandt, 1977)
32446.26	-392(6)	ABMR	(Brandt, 1977)
33489.36	-204(12)	ABMR	(Brandt, 1977)
37138.57	-718.3(20)	OGS	(Krüger, 1986)
37557.25	-848.7(3.1)	OGS	(Krüger, 1986)
37724.84	-2263.3(3.9)	OGS	(Krüger, 1986)
	-15.9(1.8)	FTS	(Kebapcı, 2022)
38502	41.0(1.6)	FTS	(Kebapcı, 2022)
40360.37	-225.1(8)	OGS	(Başar, 2005)
40693.63	-381(6)	OGS	(Başar, 2005)
41074.45	-280.6(3)	OGS	(Başar, 2005)
41151.1	-379(4)	FTS	(Parlatan, 2022)
41430.237	-231(5)	OGS	(Kröger, 1997)
41493.034	-537(8)	OGS	(Başar, 2005)
41646.129	-277(3)	OGS	(Kröger, 1997)
42080.152	-398.1(1.4)	OGS	(Başar, 2005)
42133.263	-326(3)	FTS	(Kröger, 1997)
42325.81	-396(11)	FTS	(Parlatan, 2022)
42357.42	-286.4(1.8)	OGS	(Başar, 2005)
42429.385	-393.4(6)	OGS	(Başar, 2005)
42456.47	-500.2(3)	OGS	(Başar, 2005)
42576.01	-395.2(1.2)	OGS	(Başar, 2005)
42595.791	-423.0(1.7)	OGS	(Başar, 2005)
42667.745	-445.8(1.6)	OGS	(Başar, 2005)
42764.664	-692.1(1.2)	OGS	(Başar, 2005)
42868.255	-383.7(1.0)	OGS	(Başar, 2005)
42869.748	-200(2)	OGS	(Başar, 2005)
43196.848	-501(3)	FTS	(Parlatan, 2022)
43715.572	-262.3(1.0)	OGS	(Başar, 2005)
44518.91	-338(3)	FTS	(Parlatan, 2022)
44419.302	-348(7)	FTS	(Parlatan, 2022)

Tablo 2.5'te Tm I'e ait tek pariteli enerji seviyelerine ait literatürden bilinen A aşırı ince yapı sabitleri verildi. Toplam 77 tek pariteli enerji seviyesinin A sabiti bilinmektedir.

Tablo 2.5: Tm I'in tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	Yöntem	Referans
0.00	-374.40(35)	ABMR	(Nakamura, 1997)
8771.243	-704.8(1.0)	LIF	(Childs, 1984)
20406.84	-1193.1(4.8)	OGS	(Krüger, 1986)
22419.764	40.7(1.6)	OGS	(Krüger, 1986)
	40.8(1.0)	FTS	(Kebapcı, 2022)
23335.111	-819.3(1.1)	OGS	(Başar, 2005)
23431.844	-520(4)	OGS	(Başar, 2005)
23941.071	-678.7(3)	OGS	(Başar, 2005)
24160.63	336(4)	LIF	(Kröger, 1997)
24246.425	-197(5)	OGS	(Başar, 2005)
	-80.9(1.2)	FTS	(Kebapcı, 2022)
24611.303	-9.9(2.0)	FTS	(Kebapcı, 2022)
24701.058	-441.7(1.5)	FTS	(Kebapcı, 2022)
24708.041	-207.5(1.2)	FTS	(Kebapcı, 2022)
24957.469	-538.7(1.5)	OGS	(Başar, 2005)
25207.732	-1524(3)	OGS	(Başar, 2005)
25520.987	-234.8(8)	OGS	(Başar, 2005)
25536.116	-354(2)	OGS	(Başar, 2005)
25699.714	-457(4)	OGS	(Başar, 2005)
26368.412	-394(5)	OGS	(Kröger, 1997)
27440.858	-166.8(1.6)	FTS	(Kebapcı, 2022)
28514.423	-453.8(5)	LIF	(Kröger, 1997)
29308.69	-842.9(1.2)	LIF	(Kröger, 1997)
30921.58	-82.4(2.2)	FTS	(Kebapcı, 2022)
31007.6	-534.3(1.3)	FTS	(Kebapcı, 2022)
31080.846	-762.8(1.1)	LIF	(Kröger, 1996)
31367.728	-397.3(1.8)	LIF	(Kröger, 1996)
31694.749	-403.9 (1.1)	LIF	(Kröger, 1997)
31773.78	-1243(3)	FTS	(Kebapcı, 2022)
32112.98	-137.29 (30)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-137.26 (22)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
32217.195	-967.3(1.2)	SAS	(Kröger, 1997)
	-967.4 (5)	SAS	(Kröger, 1997)
32359.372	-613.9(1.2)	SAS	(Kröger, 1997)
	-612.5 (1.0)	SAS	(Kröger, 1997)
32441.714	-363.9 (4)	OGS	(Kröger, 1997)
32479.326	383.0(1.0)	SAS	(Kröger, 1997)
	383.0 (2)	SAS	(Kröger, 1997)
32761.54	-422.4(2)	OGS	(Başar, 2005)
	-422.21(90)	ABMR	(Pfeufer, 1986)

Tablo 2.5 (devam): Tm I'in tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	Yöntem	Referans
	-421.12 (95)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
32856.613	-701.9(2.6)	FTS	(Kebapcı, 2022)
32950.1	-654.97(37)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-654.83 (43)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
33240.362	-923.1(2.1)	FTS	(Kebapcı, 2022)
33292.78	25.7(2.3)	FTS	(Kebapcı, 2022)
33395.984	-555.4(1.9)	FTS	(Kebapcı, 2022)
33644.74	-482.64(50)	ABMR	(Kui, 1993)
33793.154	-472.9(1.0)	OGS	(Kröger, 1997)
33943.282	-354.8(3.2)	OGS	(Kröger, 1986)
33961.044	-313.2(1.5)	LIF	(Kröger, 1997)
34046.54	-513.19(35)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-513.08 (40)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
34310.33	-472.5(1.5)	OGS	(Kröger, 1997)
34365.624	-278.1(30)	ABMR	(Kui, 1993)
34194.09	-197.7(1.0)	ABMR	(Kui, 1993)
34449.774	-455.63(59)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-455.54 (66)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
34457.853	-426.4(1.3)	OGS	(Kröger, 1997)
34532.898	-473.1(2.5)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-473.0 (2.5)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
34587.982	-434.4(2.4)	FTS	(Kebapcı, 2022)
34691.802	-362.2(1.2)	SAS	(Kröger, 1996)
34999.008	-889(6)	OGS	(Başar, 2005)
35557.7	-594.7(1.5)	FTS	(Parlatan, 2022)
35633.01	-519.33(30)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-519.22 (36)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
35682.251	-152.00(20)	ABMR	(Kui, 1993)
35958.88	-307.34(22)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-307.28 (25)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
36179.6	-436.03(50)	ABMR	(Kui, 1993)
36223.628	-307.2(1.5)	OGS	(Başar, 2005)
36329.786	-71.22(10)	ABMR	(Kui, 1993)
36653.924	-259.24(28)	ABMR	(Pfeufer, 1986)
	-259.18 (32)	ABMR	(Pfeufer, 1985)
37010.534	-258(2)	OGS	(Başar, 2005)
37159.51	-550.6(7)	FTS	(Parlatan, 2022)
37276.778	-714.0(9)	FTS	(Parlatan, 2022)
37657.928	-96.1(8)	FTS	(Parlatan, 2022)
38012.795	-142.4(1.0)	FTS	(Parlatan, 2022)
38499.016	-256(5)	FTS	(Parlatan, 2022)
38664.184	-550(2)	OGS	(Başar, 2005)
38877.211	-288(4)	OGS	(Başar, 2005)
39089.533	-700.6(1.8)	FTS	(Parlatan, 2022)

Tablo 2.5 (devam): Tm I'in tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin bilinen hfs sabitleri ve kullanılan deneysel yöntemler.

Enerji (cm ⁻¹)	A (MHz)	Yöntem	Referans
39244.584	-140.1(1.0)	FTS	(Parlatan, 2022)
39277.087	-1280.1 (2.0)	FTS	(Parlatan, 2022)
39362.651	15.5(1.4)	OGS	(Kröger, 1996)
39386.959	-17(12)	FTS	(Parlatan, 2022)
39434.151	-504.0(9)	OGS	(Başar, 2005)
39470.489	175(5)	FTS	(Parlatan, 2022)
39542.165	-98(5)	LIF	(Kröger, 1996)
39602.902	-1811(9)	FTS	(Parlatan, 2022)
39627.996	185(5)	OGS	(Kröger, 1997)
39658.852	389(7)	FTS	(Parlatan, 2022)
39737.58	691.7(1.0)	LIF	(Kröger, 1997)
39741.913	203(3)	LIF	(Kröger, 1997)
40989.73	234.6(1.0)	SAS	(Kröger, 1997)
	234.6 (4)	SAS	(Kröger, 1997)
41074.399	-899.4(1.0)	SAS	(Kröger, 1997)
	-899.7 (5)	SAS	(Kröger, 1997)
41189.162	-1061.4(1.0)	SAS	(Kröger, 1997)
	-1061.4 (5)	SAS	(Kröger, 1997)
41211.943	-1107(3)	LIF	(Kröger, 1997)
41274.9	-499.7(1.2)	OGS	(Başar, 2005)
41325.87	306.6(1.2)	LIF	(Kröger, 1997)
41646.129	-277(3)	OGS	(Kröger, 1997)
42133.263	-326(3)	OGS	(Kröger, 1996)
42735.208	-795(2)	LIF	(Kröger, 1997)
42742.008	-696(5)	FTS	(Parlatan, 2022)

Tablo 2.6'da sekiz adet Tm II'ye ait enerji seviyelerinin literatürden bilinen A sabitleri verildi.

Tablo 2.6: Tm II için bilinen manyetik dipol hfs sabitleri (Mansour ve diğ. 1989).

Enerji (cm ⁻¹)	J	p	A (MHz)
8769.68	2	Tek	914.9(1.0)
8957.47	3	Tek	-1537.7(8)
17624.65	2	Tek	-341.8(1.3)
21713.74	3	Tek	-313.5(1.9)
25980.02	3	Çift	-89.8(7)
26578.77	3	Çift	-136.6(1.0)
34913.84	3	Çift	-493.2(1.6)
39162.07	4	Çift	-614.9(9)

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. ÇOK ELEKTRONLU ATOMİK YAPI HAKKINDA TEMEL BİLGİLER

Atomlarda enerji seviyelerinin değerleri ve durumları bir enerji özdeğer denklemi olan Schrödinger denkleminin kuantum mekaniksel çözümü (3.1) kullanılarak elde edilir.

$$H\Psi = E\Psi \quad (3.1)$$

Burada Ψ özfonksiyondur veya dalga fonksiyonu olarak da adlandırılır ve bir olasılık genliği olarak yorumlanabilir. H ile verilen ise Hamilton enerji operatörüdür ve sistemin toplam enerjisini temsil eder. Bir atom sisteminde Hamiltonyen'e hangi süreçlerin katkıda bulunduğunu anlamak önemlidir. Çünkü bu süreçler atomun enerji yapısını belirler. Öncelikle tüm elektronların ve çekirdeğin kinetik ve potansiyel enerjisi dikkate alınmalıdır. Potansiyel enerji, elektron-elektron itmesinden etkilenir. İlk olarak merkezi alan yaklaşımı ele alınacaktır. Daha sonra, ince yapıya yol açan elektronların spin-yörünge etkileşimleri incelenecek ve son olarak, aşırı ince yapıya neden olan iki etkileşim tartışılacaktır.

3.1.1. Yaklaşıklık Yöntemleri

Schrödinger dalga denkleminin tam olarak çözülebildiği fiziksel problem sayısı sınırlıdır. Tam çözümün elde edilebildiği başlıca problemler arasında çekirdeğin etrafında dönen tek elektronlu bir sistemde bulunmaktadır. Çekirdeğin etrafındaki elektron sayısının birden fazla olduğu çok elektronlu sistemlerde tam çözüm kuantum mekaniksel olarak mümkün olmamakla birlikte, ancak yaklaşık metotlar kullanılarak gerçek çözüme benzer yaklaşık bir çözüm elde edilebilmektedir (Taylor, 1996).

Çok elektronlu atomlar için Schrödinger denkleminin yaklaşık çözümünün başlangıç varsayımı merkezi alan yaklaşıklığıdır. Merkezi alan yaklaşıklığının temel aldığı iki düşünce vardır (Bransden, 1999):

- Atomik elektronlar küresel simetrik bir $U(r)$ potansiyelinde hareket etmektedir. Herhangi bir seçilen elektron için hesaplanan $U(r)$ küresel simetrik potansiyelin kaynağı atom çekirdeği ve söz konusu seçilen elektron dışındaki diğer elektronlardır.

- Çok elektronlu sisteme ait tüm elektronlar için dinamik elektron korelasyonu ihmal edilmiştir. Başka bir deyişle, her bir elektronun hareketi bir başka elektronun hareketinden etkilenmez.

Merkezi alan yaklaşıklığında bir elektron konfigürasyonu toplam dalga fonksiyonu ile tanımlanır. Her bir elektron için baş kuantum sayısı n_i ve yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı l_i ile tanımlama yapılabilir. Bu doğrultuda N adet elektrona sahip çok elektronlu bir sistem için Schrödinger denklemi (3.2) eşitliği ile verilir:

$$H\Psi(q_1, q_2, \dots, q_N) = \left[\sum_{i=1}^N \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 - \frac{Ze^2}{(4\pi\epsilon_0)r_i} \right) + \sum_{i>j=1}^N \frac{e^2}{(4\pi\epsilon_0)r_{ij}} \right] \Psi(q_1, q_2, \dots, q_N) \\ = E\Psi(q_1, q_2, \dots, q_N) \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte $1/r_{ij}$ terimi değişkenlerine ayıramaz ve bu denklemin tam bir çözümünü kuantum mekaniksel olarak elde etmek mümkün değildir (Windholz, 1985). Ancak, küresel simetrik $U(r)$ potansiyelinde her bir elektron birbirlerinden bağımsız parçacıklar olarak ele alınır ve herhangi bir elektron için diğer elektronların durumunun bilinmesi zorunluğu ortadan kalkar. Bu durum bize Hartree-Fock yöntemiyle yaklaşık çözüm üretmemize olanak sağlar (Haken, 2000).

Küresel simetrik ve açılardan bağımsız $U(r)$ potansiyeli merkezi bir alan tanımlar ve Schrödinger denkleminin bileşenlerine ayrılarak yaklaşık bir çözümünün elde edilmesine yol açar. Bileşenlerine ayırma radyal ve açısal kısım olmak üzere iki kısımda gerçekleştirilir (Aygün, 1988). $U(r)$ küresel simetrik potansiyel enerjisinin hesaplanışını Schrödinger denkleminin yaklaşık olarak çözülme işlemi takip eder. Sonucunda her bir elektron için kuantum sayılarına bağlı olarak dalga fonksiyonlarının ve enerji öz değerlerinin bulunuşu mümkün hale gelir (Woodgate, 1970).

Çok elektronlu bir sistemde Hartree modelinde her bir elektronun, diğer tüm elektronların hareketinden bağımsız olarak küresel simetrik etkin bir potansiyel alanda hareket ettiği varsayılır. Bu varsayımdaki etkin potansiyelin kaynağı ise çekirdeğin çekici kuvveti ve seçilen elektron dışındaki diğer elektronlardan kaynaklanan itici etkileşimlerdir. Çok elektronlu sistemdeki her bir elektron için bir dalga fonksiyonu tanımlanır. Hartree tarafından öz uyumlu alan içerisinde tek elektron dalga fonksiyonlarının denklemlerinin çözülmesi için bir tekrarlama

sürecinin gerekliliği önerilmiştir. Başka bir deyişle, bu yöntemde öz uyumlu alan içerisinde bulunan çok elektronlu sisteme ait Schrödinger denkleminin tekrarlı olarak çözülmesi önerilir.

Pauli, literatürdeki helyum spektrum analizi ve gözlemlerini içeren deneysel sonuçları esas alarak 1925 yılında Pauli dışarlama ilkesi olarak da bilinen genel simetri kuralını önerdi. Bu ilkeye göre, birden fazla elektrona sahip bir sistemin toplam dalga fonksiyonu iki elektronun yer değişimine nazaran daima anti simetriktrir. Pauli dışarlama ilkesine göre toplam dalga fonksiyonu anti-simetrik olmak zorundadır. Bir atomik durumun toplam dalga fonksiyonu ise uzaysal dalga fonksiyonu ve spin dalga fonksiyonlarının çarpımı olarak ifade edilebilir. Buna göre eğer iki elektronun uzaysal dalga fonksiyonu simetrik ise spin dalga fonksiyonu anti simetrik olmak zorundadır. Sonuç olarak, bir atomik düzeyde iki elektron ancak zıt spin yönelimi ile bulunabilir (Demtröder, 2005).

Pauli dışarlama ilkesine uymayan deneme dalga fonksiyonlarının kullanımı Hartree yönteminin en önemli dezavantajıdır. 1930 yılında Fock ve Slater tarafından Hartree yönteminin geliştirilmesi yapılmıştır. Bu geliştirmeye göre Hartree yönteminde Pauli prensibine uyan Slater determinant formunda deneme dalga fonksiyonları kullanılmaya başlanmıştır. Determinant tip deneme dalga fonksiyonlarının kullanılması ile bu yöntem daha karmaşık bir hale gelse bile Pauli dışarlama ilkesinin dikkate alınması önemli bir avantaj olarak görülmektedir (Aygün, 2000).

Hartree-Fock yönteminde, Pauli dışarlama ilkesine uyan her bir elektronun diğer elektronların hareketinden bağımsız olduğu varsayımına uyan N elektronlu dalga fonksiyonunu Slater determinantı formunda yazılmaktadır. Bu sayede çok elektronlu bir sistemin atomik dalga fonksiyonlarının ve enerji seviyelerinin hesaplanması mümkün olabilmektedir (Bransden, 1999).

Çok elektronlu bir sisteme ait elektronların birbirleri ile etkileşime girmediği varsayımı altında Hamiltonyen denklemi tek elektron Hamiltonyenlerinin toplamı formunda yazılabilir.

Eğer elektronlar arası karşılıklı etkileşim dikkate alınırsa, i ve k elektron çifti arasındaki Coulomb etkileşim enerjisi dikkate alınmalıdır.

Bu terim nedeniyle Schrödinger denkleminin tam bir çözümünü bulmak mümkün değildir. Yaklaşık çözümün elde edilebilmesi için Hartree-Fock yaklaşıklığı kullanılarak çok elektron

problemi tek elektron problemine indirgenir. Ele aldığımız tek elektronun atom çekirdeğinin çekici ve diğer tüm elektronların itici etkileşim alanında hareket ettiği varsayılır. Bu durumda ele aldığımız elektron dışındaki diğer tüm elektronların yoğunluğu tek elektron dalga fonksiyonu ile verilebilir. Yük dağılımı $\rho(r_i)$ belirlenirken dalga fonksiyonları eşitlik (3.3)'de gösterildiği şekilde kullanılır:

$$\rho(r_i) = e|\Psi_Q(R_i)|^2 \quad (3.3)$$

Yukarıda ifade edilen $\rho(r_i)$ yük dağılımı ile r konumundaki yük arasındaki elektrostatik enerji, yük miktarı ile elektrostatik potansiyelin çarpımı olarak verilebilir. Bu bağlamda Coulomb etkileşim enerjisi eşitlik (3.4) ile verilir.

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\text{bütün hacim}} \frac{e\rho(r_i)}{|r-r_i|} d\tau_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\text{bütün hacim}} \frac{e^2|\Psi_Q(R_i)|^2}{|r-r_i|} d\tau_i \quad (3.4)$$

- Eşitlikteki $d\tau_i$ hacim elemanıdır.

Çekirdeğin çekici özellikteki Coulomb potansiyeli ve seçilen elektron dışında kalan diğer elektronların etkileşim enerjisi dikkate alınarak seçtiğimiz elektronun dalga fonksiyonu hesaplanabilir. İndisi k ve koordinatı R_k ile gösterilen seçilen bir elektronun bireysel dalga fonksiyonları için Schrödinger eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$H = \left[-\frac{\hbar^2}{2m_0} \nabla_k^2 - \frac{Ze^2}{(4\pi\epsilon_0)r_k} + U_k^0(r_k) \right] \Psi_k^{(1)}(R_k) = E\Psi_k^{(1)}(R_k) \quad (3.5)$$

$U_k^0(r_k)$ terimi k elektronu haricinde diğer tüm elektronları içeren Coulomb etkileşim enerjisidir ve matematiksel ifadesi (3.6) eşitliği ile verilir.

$$U_k(r) = \sum_{i \neq k}^N \int_{\text{Bütün hacim}} \frac{e^2|\Psi_{Q_i}(R_i)|^2}{4\pi\epsilon_0|r-r_i|} d\tau_i \quad (3.6)$$

Yaklaşık enerji hesaplama işlemlerinin başlatılabilmesi için (0) üst indise sahip tahmini bir dalga fonksiyonu kullanılır. Hesaplanan ilk yaklaşık Coulomb etkileşim enerjisi için kullanılan Ψ_{Q_i} bulunması için, $\Psi_{Q_i}^0$ dalga fonksiyonunun yerine konulması ile elde edilir. (1) üst indisi k elektronu için elde edilen dalga fonksiyonun tekrarlı işlemlerin ilk basamağında elde edilen dalga fonksiyonu olduğunu gösterir.

Eğer Ψ_{Qi} yerine Ψ_{Qi}^0 deneme fonksiyonu yazarsak, $U_k^0(r_k)$ potansiyel değeri hesaplanmış olur. $\Psi_k^{(1)}(R_k)$ dalga fonksiyonunu bulmak için ise $U_k^0(r_k)$ potansiyel değeri Schrödinger dalga denkleminde yazılmalıdır. Yöntem yakınsamanın elde edilmesine yani $\Psi_k^{(i)}(R_k)$ dalga fonksiyonunda önemli bir değişim görülmeyene kadar döngüsel olarak devam eder. Söz konusu bu durum için Schrödinger denklemi aşağıdaki (3.7) eşitliği ile verilir.

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_0} \nabla_k^2 - \frac{Ze^2}{(4\pi\epsilon_0)r_k} + U_k(r_k) \right] \Psi_{Qi}(R_k) = E \Psi_{Qi}(R_k) \quad (3.7)$$

İlk aşamada bağımsız elektron dalga fonksiyonu için yaklaşık bir deneme fonksiyonu seçilir ve bu seçim her bir elektron için tanımlıdır. Atomlardaki ortalama yük dağılım hesaplamaları bu deneme fonksiyonları için hesaplanır ve akabinde ortalama merkezi alan potansiyeli bulunmuş olur. Bu potansiyel değeri Schrödinger denklemi içerisinde kullanıldığı zaman, elektronun daha gerçeğe yakın dalga fonksiyonları elde edilmiş olacaktır (Haken, 2000).

Her bir yeni dalga fonksiyonu kullanılarak, yeni bir $U(r)$ potansiyeli hesaplanır. İşlemin sonlandırılması için dalga fonksiyonu ile hesaplanan yeni $U(r)$ potansiyelinin birbiri ile yeterince uyumlu olması gerekmektedir. Bu döngüsel işlem dizisine Hartree-Fock yöntemi ismi verilir (Siddiqui, 2010).

3.1.2. Atomlarda İnce Yapı (Fine Structure-FS)

Atomların yörüngelerinde bulunan negatif yüklü elektronların yörünge hareketi sebebi ile bir iç manyetik alan meydana gelir. Atom üzerine uygulanan dış manyetik alan sıfır olsa bile, meydana gelen bu iç manyetik alan nedeni ile atomun enerji düzeylerinde küçük yarılmalar ortaya çıkar. Enerji düzeylerindeki bu ufak yarılmalara ince yapı denilir (Taylor, 1996).

Atomlardaki ince yapıyı anlamak için atom çekirdeği ve elektronlar arasındaki Coulomb etkileşimini ele almak yeterli olmaz. İnce yapı, çekirdek etrafında yörüngesel hareket yapan elektronun yörünge manyetik momenti ile spin manyetik momenti arasındaki etkileşim ile açıklanabilir. Bu etkileşime spin-yörünge çiftlenimi adı verilir. Spin-yörünge çiftlenimini meydana getiren iki manyetik momentin paralel veya antiparalel olmak üzere iki farklı durumda bulunma olasılığı söz konusudur.

Yörünge açısal momentum ve spin açısal momentumların hem paralel hem de antiparalel dizilimi için enerji farklarının hesaplanmasında Bohr modeli ve kuantum mekaniksel yöntem

esas alınır. Bohr atom modeline göre çekirdeğin etrafında yörüngesel hareket eden elektron bu yörünge üzerinde bir B_l manyetik alanı üretir. Üretilen bu manyetik alan ile elektronun manyetik momenti arasındaki etkileşim söz konusu olur. Einstein'ın görelilik teorisinden yararlanarak elektronun durgun ve çekirdeğin elektron etrafındaki yörüngesel hareket ettiği durumu esas alarak üretilen manyetik alan büyüklüğü hesaplanabilir. Çekirdek yerine elektronun sabit olduğu sistemi ele almak için ilk değiştirilecek husus r pozisyon vektörünün $-r$ olarak gösterilmesi olacaktır.

Elektronun yörünge manyetik momenti μ_L ve elektronun spin manyetik momenti μ_S arasındaki manyetik etkileşimden kaynaklanan elektronun toplam manyetik momenti μ , denklem (3.8) ile gösterilir.

$$\vec{\mu}_J = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_S \quad (3.8)$$

Manyetik momentlerden herhangi biri kendisini üreten açısal momentum ile anti-paralel bir ilişkiye sahip olmak zorunda olmakla birlikte, herhangi iki manyetik moment ise birbirlerine paralel veya anti-paralel özellikte de bulunabilir.

Elektrona ait yörünge açısal momentum ve spin açısal momentumların vektörel toplamı, elektronun toplam açısal momentumunu meydana getirir. Elektronun toplam açısal momentumu (3.9) eşitliği ile verilir.

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S} \quad (3.9)$$

Toplam açısal momentumun alabileceği değer aralığı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$|L - S| \leq J \leq L + S \quad (3.10)$$

Hamiltonyen enerji denklemi içerisine dâhil edilen V_{L-S} ek enerji terimi (3.11 ve 3.12) spin yörünge etkileşmesi olarak adlandırılır ve yalnızca radyal koordinatların bir fonksiyonu olarak spin-dipol ve yörüngesel-dipol momentlerin etkileşme sabiti $\xi(r)$ katsayısına bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanır.

$$V_{L-S} = \xi(r) \boldsymbol{\mu}_L \cdot \boldsymbol{\mu}_S = \xi(r) \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} \quad (3.11)$$

$$H = \sum_{i=1}^N \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 - \sum_{i=1}^N \frac{Ze^2}{r_i} \right) + \sum_{i>j=1}^N \frac{e^2}{r_{ij}} + \sum_{i=1}^N \xi(r_i) \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{l}_i \quad (3.12)$$

3.1.3. Atomlarda Aşırı İnce Yapı (Hyperfine Structure-HFS)

Atomlarda nükleer etkileşimler nedeniyle ince yapı enerji düzeyleri aşırı ince yapı enerji düzeylerine ayrılır. Sadece tek sayıda kütle numarasına sahip atomlarda aşırı ince yapı yarılmaları meydana gelir.

Atomlarda nükleer etkileşimler iki grupta incelenebilir.

- Çekirdek spininden kaynaklanan manyetik moment ile elektronun spin ve yörüngesel hareketinden kaynaklanan manyetik alanın etkileşimi,
- Çekirdeğin küresel simetriden sapması sonucu meydana gelen elektrik kuadrupol momentinin elektrik alan ile etkileşmesi.

3.1.3.1. Manyetik Etkileşim

Çekirdeğin sahip olduğu I spin açısal momentumu nedeniyle meydana gelen nükleer manyetik dipol moment denklem (3.13) ile verilmiştir.

$$\mu_I = \frac{\mu_N g_I}{\hbar} I \quad (3.13)$$

- μ_N Nükleer manyeton,
- g_I Pozitif veya negatif sabit,
- $\hbar$ İndirgenmiş Planck sabitidir.

Elektronların spin ve yörünge hareketi nedeni ile çekirdek çevresinde meydana gelen toplam manyetik alan B_J ve çekirdeğin manyetik momenti μ_I arasındaki etkileşim enerjisinin ortaya çıkışına sebep olur. Bu enerji çekirdek manyetik moment ve toplam manyetik alan vektörlerinin skaler çarpımına eşittir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$E_{mhf s} = -\mu_I \cdot B_J \quad (3.14)$$

Manyetik oriyantasyonel enerjiyi çekirdek spin açısal momentumu I ve toplam elektronik açısal momentum J terimleri cinsinden denklem (3.15) ile gösterilebilir (Cowan, 1981).

$$E_{mhf s} = A \frac{I \cdot J}{\hbar^2} \quad (3.15)$$

Yukarıdaki eşitlikte A manyetik aşırı ince yapı sabiti olarak tanımlanır.

I ile J vektörleri arasındaki noktasal çarpım değerini bulmak için F toplam atomik açısal momentum vektörü denklem (3.16) ile tanımlanır.

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} + \mathbf{J} \quad (3.16)$$

- F toplam atomik açısal momentum vektörü
- I çekirdek spin açısal momentum vektörü
- J toplam elektronik açısal momentum vektörü

Vektörel toplam gereği, F toplam atomik açısal momentumun alabileceği sayısal değerler denklem (3.17) ile verilmektedir (Gurell, 2009).

$$F = I + J, I + J - 1, \dots, |I - J| \quad (3.17)$$

I ile J vektörleri arasındaki skaler çarpımın değerini kuantum sayıları cinsinde bulmak için aşağıdaki bir dizi matematiksel işlemler (3.18-3.20) yapılır (Gurell, 2009).

$$F^2 = I^2 + J^2 + 2 \mathbf{I} \cdot \mathbf{J} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{J} = \frac{1}{2}(F^2 - I^2 - J^2) \quad (3.19)$$

$$\langle \mathbf{I} \cdot \mathbf{J} \rangle = \frac{\hbar^2}{2}[F(F + 1) - I(I + 1) - J(J + 1)] \quad (3.20)$$

Yukarıdaki üç matematiksel eşitlikleri kullanarak enerji ifadesi denklem (3.21) şeklinde yazılabilir (Gurell, 2009).

$$E_{mhf_s} = \frac{A}{2}[F(F + 1) - I(I + 1) - J(J + 1)] \quad (3.21)$$

3.1.3.2. Elektrik Etkileşim

Çekirdekteki küresel simetrik olmayan yük dağılımı elektrik kuadrupol momente sebep olur. Bir çekirdeğin kuadrupol momenti olan Q , çekirdek yükünün küresel simetrik dağılımdan ortalama sapma ölçüsü olarak tanımlanır (Uddin, 2006).

- $Q = 0$, küresel simetrik dağılım,
- $Q > 0$, elipsoidal dağılım,
- $Q < 0$, yassı dağılım

Elektrik kuadropol etkileşimi ile oluşan enerji denklem (3.22) ile verilmektedir (Cowan, 1981).

Denklem (3.23)'de ise C ifadesinin açık hali görülmektedir.

$$E_{ehfs} = B \frac{\left(\frac{3C}{4}\right)(C+1)-I(I+1)J(J+1)}{2I(2I-1)J(2J-1)} \quad (3.22)$$

$$C = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1) \quad (3.23)$$

3.2. SPEKTRAL ÇİZGİ GENİŞLEME TÜRLERİ

Spektral çizgi genişliğini ölçmek için FWHM terimi kullanılır. Bu terim, maksimum genliğin yarısı olan noktalar arasındaki spektrum eğrisinin genişliğini ifade eder. Basitçe çizgi genişliği terimi kullanılabilir. Çizgi genişliği, çözünürlüğü belirlemek için önemli bir göstergedir. FWHM değeri küçükse, çizgi daha incedir ve daha iyi bir çözünürlüğü temsil eder, büyükse, çizgi daha geniştir ve çözünürlük daha düşüktür.

Gözlemlenen spektral çizgiler, kısmen spektrometrenin sonlu çözünürlüğüne ve kısmen de içsel fiziksel nedenlere bağlı olarak her zaman genişler. Çizgi genişlemeleri homojen ve homojen olmayan (inhomojen) genişlemeler şeklinde iki sınıfa ayrılır. Eğer yüksüz bütün atom ve moleküller için radyasyonun absorpsiyonu ve emisyonu, yönden bağımsız olarak izotropik ise homojen çizgi genişlemesi, değilse homojen olmayan çizgi genişlemesi olarak isimlendirilir.

Çizgi genişlemesi için dört temel mekanizma bulunmaktadır. Bunlar doğal genişleme, Doppler genişlemesi, basınç (çarpışma) genişlemesi ve saturasyon genişlemesidir. Bu bağlamda başlıca çizgi genişlemeleri ve nedenleri aşağıda maddeler halinde verilmektedir:

- Doğal çizgi genişlemesi; uyarılmış enerji düzeylerinin sonlu yaşam ömründen kaynaklanır. Diğer çizgi genişlemelerine kıyasla oldukça küçüktür. Hiçbir yöntem ile bu genişleme indirgenemez. Homojen olan bu genişlemenin şiddet profili Lorentz dağılımına uyar.
- Doppler çizgi genişlemesi; atomların veya iyonların termal hareketinden kaynaklanır. Termal denge durumunda, bir gazdaki atomlar rastgele bir hız dağılımıyla hareket ederler ve bu dağılım, Maxwell-Boltzmann fonksiyonu olarak modellenebilir. Homojen olmayan bir çizgi genişlemesidir ve Gauss profiline uyar. Sıcaklığın kontrolü ile indirgenebilir.

- Basınç (çarpışma) genişlemesi; atom ve moleküller arası çarpışmalardan kaynaklanmaktadır. Lorentz profiline uyar ve homojen çizgi genişlemesidir.
- Saturasyon genişlemesi; enerji seviyesinin nüfus yoğunluğu değişiminden kaynaklanır. Atomik bir sistem belirli bir spektral geçişin rezonans frekansı civarında yüksek şiddetli bir laser ile uyarılırsa, çok fazla sayıda meydana gelen uyarılmış soğurma ve salınım yoluyla atomik sisteme ait enerji seviyelerinin nüfus yoğunlukları dikkate değer bir şekilde değişir. Bu değişimle meydana gelen spektral çizgilerdeki ek genişlemeye saturasyon genişlemesi denilir. Çizgi profili hem Lorentz hem de Gauss profiline uyar. Eğer şiddet dağılımı, Lorentz profiline uyuyor ise homojen genişleme, Gauss profiline uyuyor ise inhomojen genişlemedir (Demtröder, 2005).

3.3. SKANDİYUM

Gümüş görünümlü bir geçiş metali olan skandiyum elementi periyodik cetvelin 3d elementleri grubunda yer alır. Skandiyum elementi nadir bulunan toprak elementleri ile benzer kimyasal özellik sergiler. Literatürde skandiyumun kütle numarası 36'dan 59'a kadar uzanan 23 adet izotopu olduğu bildirilmektedir, ancak en yükseği 83.81 gün olan son derece kısa yarı ömürlere sahip olan kararsız radyoizotoplar olarak sınıflandırılır (Pehlivan, 2012). Atom numarası 21 olan skandiyumun doğada sadece tek bir kararlı izotopu (^{45}Sc) vardır ve bu nedenle, izotop kayması gözlemlenmez (Deelen, 2017). ^{45}Sc 'in nükleer spini $I = 7/2$ ve nükleer manyetik momenti $\mu = 4.756 \mu_N$ dir ve burada μ_N ile gösterilen nicelik Bohr manyetonudur.

Skandiyum atomunun temel seviyesinin elektron konfigürasyonu ve terimi $[\text{Ar}]3d4s^2, ^2D_{3/2}$ dir. Temel seviye konfigürasyonunda kapalı bir alt kabuğun dışında yalnızca bir elektron vardır. Dolayısıyla Sc bir geçiş elementidir.

Tablo 3.1'de Sc atomunun kararlı izotopunun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.1: Sc atomunun kararlı izotopunun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Değer
Atom numarası	21
Kararlı izotop için kütle numarası	45
Atomik ağırlık	44.955908 u
Çekirdek spini	7/2
Çekirdek dipol momenti	4.756 μ_N
Çekirdek kuadropol momenti	-0.22 barn
Oda sıcaklığında faz	Katı
İyonizasyon enerjisi	6.561 eV
Elektronik konfigürasyon	[Ar]3d ¹ 4s ²
Erime noktası	1814 K
Kaynama noktası	3109 K
Yoğunluk	2.99 g/cm ³

3.4. TULYUM

Genellikle nadir toprak elementleri, önemli astrofiziksel öneme sahiptir. Periyodik tablodaki lantanit serisinde bulunan bu elementler, yıldızların evrimini ve evrendeki ağır elementlerin oluşumunu anlamak açısından çok önemlidir. Ölmekte olan yıldızların içindeki yoğun koşulların, nötron yakalama gibi süreçler yoluyla daha ağır elementlerin oluşumunu kolaylaştırdığı yıldız nükleosentezinde çok önemli bir rol oynarlar. Bu çalışmada analiz edilen tulyum elementi, kozmik bir izleyici görevi gören ve bilim insanlarının yıldızlardaki ve süpernovalardaki nükleosentez tarihini çözmelerine yardımcı olan nadir toprak elementlerinden biridir. Tulyum, 69 atom numarasına sahip Tm sembolü ile gösterilen lantanit serisinde sondan üçüncü sırada yer alan kimyasal bir elementtir (Laeter, 2003). Nötr tulyum (Tm I) tek kararlı izotopa (¹⁶⁹Tm) sahip bir kaç elementten biridir. Saf Tm parlak, gümüş parlaklığını yansıtan ve hava ile temas ettiği zaman kararma gözlemlenebilen bir elementtir. Tulyumun Mosh sertliği 2 ile 3 arasında olduğu için metalden üretilmiş bir bıçak ile kesilebilir (Emsley, 2001), dövülebilir ve sünektir (Hammond, 2000). Tm 32 K sıcaklık derecesi altında ferromanyetik, 32 K ve 56 K sıcaklık değerleri arasında anti-ferromanyetik ve 56 K üzerindeki sıcaklıklarda ise paramanyetik özellik sergiler (Jackson, 2000). Tm I temel seviyesinin elektron konfigürasyonu 1s²2s²2p⁶3s²3p⁶4s²3d¹⁰4p⁶5s²4d¹⁰5p⁶4f¹³6s² olup terimi ise ²F_{7/2} dir. Aslında kısmen dolu f-elektron kabukları nedeniyle lantanitler çok karmaşık ince yapı spektrumlarına sahiptir.

Elementin nükleer spin moment $I = 1/2$ dir ve bu nedenle spektrumunda hfs yarılmasına katkı sadece manyetik bileşenden gelir ki bu nedenle de Tm çizgileri çok basit bir aşırı ince yapıya sahiptir, her ince yapı geçişi yalnızca üç veya dört hfs geçişini içerir.

Tablo 3.2’de Tm atomunun kararlı izotopunun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.2: Tm atomunun kararlı izotopunun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Değer
Atom numarası	69
Kararlı izotop için kütle numarası	169
Atomik ağırlık	168.934218(1) u
Çekirdek spini	1/2
Çekirdek dipol moment	-0.2316 μ_N
Oda sıcaklığında faz	Katı
Birinci iyonizasyon enerjisi	597 kJ/mol
Elektronik konfigürasyon	[Xe] 4f ¹³ 6s ²
Erime noktası	1818.15 K
Kaynama noktası	2223.15 K
Yoğunluk	9.32 g/cm ³
Atom yarıçapı	222 pm

3.5. DENEYSEL YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, skandiyum ve tulyum elementlerine ait emisyon spektrumları Letonya Üniversitesi Laser merkezinde bulunan Bruker IFS (125) HR FT cihazı ile kaydedildi. Işık kaynağı olarak merkezine incelenecek elementin yerleştirildiği silindir-katot lamba kullanıldı. Hem Sc hem de Tm elementlerinin FT-spektrumları, ikişer kez kaydedildi: bu ölçümler silindir katot içinde bir kez Ar asal gazı ve bir kez de Ne asal gazı kullanılarak yapıldı.

3.5.1. Fourier Transform (FT) Spektroskopisi

Fourier Transform Spektroskopisi (FTS) bir maddenin spektrumunu ölçmek için ışık ışınlarının girişim özelliğini kullanan bir spektroskopi tekniğidir (Bates, 1979). Tarihte ilk kullanım alanı astrofizikçilerin uzak yıldızların kızılötesi ışık spektrumlarının incelenmesi olarak bilinen FTS günümüzde fizik, kimya ve astronomi ile ilgili araştırmalarda geniş ölçekte kullanılmaktadır.

Bir interferometre olan Fourier Transform spektrometresinin tarihsel olarak bilinen en yaygın türü basitçe bir Michelson interferometresidir. İnterferometre basitçe iki ışık ışını arasındaki girişim desenini ölçen cihazdır (Smith, 2011). Michelson interferometresinin temel prensibi dedektöre ulaşan optik sinyalin, ışığın şiddetinin frekansına veya dalga boyuna bağlı fonksiyon olarak kaydedilmesidir.

Öncelikle interferometre ile interferogram ölçüldükten sonra, spektrum elde edebilmek için interferogramın spektruma dönüşümü bilgisayarlar ile yapılır. Bilgisayar ile Fourier dönüşümünde göz önüne almamız gereken iki önemli nokta vardır.

Spektrum elde edebilmek için, interferogramlar optik yol farkı $(0, \infty)$ aralığı üzerinden ölçülmelidir. Ancak, interferometredeki aynaların yer değiştime hususunda ortaya çıkan fiziksel limit buna tam olarak imkân vermemektedir. Bu sorunun çözümü alınan Fourier integralinin belirli bir sonlu değere budanması olarak gösterilir.

İkinci olarak, bilgisayarların depolama kapasitesi dikkate alınarak sonlu bir ayna yer değişimi için saklanabilen veri noktalarının sayısı da pratikte sınırlandırılmalıdır (Bates, 1976).

FTS'nin başlıca avantajları aşağıda maddeler halinde belirtilmektedir (Siddiqui, 2010).

- Spektrumun aşırı ince yapının uygun bir matematiksel fonksiyona fit edilmesine yol açabilecek elektronik bir yapıya sahiptir.
- Aşırı ince yapı spektrumunu gözlemleyebilmek için yeterince yüksek çözünürlük elde edilir.
- Geniş bir spektral aralığı kapsamaktadır.
- FTspektrumunda gözlemlenen çizgiler kesin dalga sayıları ile ifade edilebilir.

Fourier Transform spektrumunun en önemli dezavantajı ise spektrumdaki zayıf çizgileri ayırtıracak ölçüde yeterince şiddetli ışık ışın kaynağının bulunmasındaki güçlülüdür (Siddiqui, 2010). Ayrıca laser spektroskopik yöntemlere göre çözünürlüğü daha zayıftır ve kurulum maliyetleri daha yüksektir.

3.5.2. Deney Koşulları

Skandiyum elementi için alınan ölçümlerin bir bölümünde filtre kullanılmazken bazı ölçümlerde belirli bir spektral bölgedeki gürültüyü filtrelemek için silindir katot lamba ile FT-spektrometresi arasındaki optik yol üzerinde optik bant filtreleri kullanıldı. Filtre, deneyde

oluşan gürültüyü azaltmak ve ayrıca kaydedilecek bölgenin izole edilmesi amacı ile kullanılır. Böylece gürültü kaynaklı çizgiler elenir ve fotoçoğaltıcı tüpün voltajı arttırılabilir ki bunun sonucunda, spektrumun bir bölgesi için sinyal-gürültü oranı optimize edilmiş olur.

Ölçüm verilerinin alınmasında izlenen yol şu şekildedir: Silindir şeklinde bakırdan yapılan katot içerisine, incelenecek elemente ait folyo rulo halinde kondu ve katot seramik tutucular ile birlikte lambanın merkezine yerleştirildi. İki cam tüpün uçlarında bulunan, içi oyuk silindir şeklindeki alüminyum anotlar seramik tutucular içerisindeki katodun uçlarına bağlandı. Işınımın doğrusallığını sağlamak ve saçılmayı önlemek amacı ile düzenek camdan yapılan silindir bir hazne içerisine yerleştirildi. Cam haznenin kapalı olan uçlarında ışığın geçirgenliğini arttırmak ve yansımayı önlemek için 45° 'lik açı ile kuartz pencereler kullanıldı. Işık kaynağı lamba, deney süresince sıcaklığın artmasını önlemek için içerisine sıvı azot konulan bir hazne içerisine yerleştirildi. Deneyin ilk aşamasında, lambanın içindeki hava bir valf ve pompa yardımı ile vakumlanarak boşatıldı. Lambanın içi tamamen vakumlandıktan sonra ortama asal gaz pompalandı. Bu işlemin amacı lamba içersinde incelenecek elemente ait plazma ortamı oluşturmaktır. Vakum ortamındaki lamba asal gaz ile doldurulduktan sonra, DC güç kaynağına bağlanan anot ile katot arasına gerilim uygulandı.

DC gerilim uygulanması ile lamba içinde bulunan asal gaz atomları katoda doğru elektrik alan altında hızlandırılır. Çarpışma sonucu katodun iç yüzeyinden incelenecek metal atomları kopar ve plazma ortamı oluşur. Yüksek enerjili gaz atomları ile çarpışan metal atomlarına enerji aktarımı olur ve böylece metal atomları daha üst seviyelere uyarılabilir veya iyonizasyona uğrayabilirler.

Uygulanan gerilim ile birlikte ortamdaki serbest elektronların ve iyonların sayısı artar. Bir kez iyonize olan atomlar yeniden çarpışarak daha üst enerji seviyelerine uyarılabilir ya da ikinci kez iyonize olabilirler. Uyarılmış atomlar temel seviyelerine dönerken karakteristik bir ışınım yayınlar ki lambadan yayımlanan bu ışınım, atom ve iyonlara ait emisyon spektrumunu oluşturur. Ayrıca gerilimin artması ile ortamın sıcaklığı da artacaktır. Aşırı ısınma istenmeyen bir durumdur. Çünkü sıcaklık artışı spektral çizginin Doppler genişliğinde artmaya neden olur ki bu da tüm aşırı ince yapı bileşenlerinin ayrışmasını engeller. Bu nedenle bu etkinin azaltılabilmesi için deney süresince lambanın içerisinde bulunduğu hazne sürekli olarak sıvı azot ile dolu tutulmalıdır.

Silindir-katot boşalımı ile oluşan emisyon ışınımı, optik elemanlar ile (aynalar ve lensler) spektrometreye yönlendirildi. Giriş açıklığı 1 mm ve spektral çözünürlüğü 0.03 cm^{-1} olan Bruker IFS 125HR Fourier Transform spektrometresi ve spektrumun kaydedilmesi için yüksek katot ve anot duyarlılığında geniş spektral tepkilere sahip olan Hamamatsu R928 fotoçoğaltıcı tüp (PMT) ve ayrıca 850 nm – 2250 nm dalga boyu bölgesinde InGaAs fotodetektörü kullanıldı.

Her iki metale ait Ar ve Ne asal gazları kullanılarak kaydedilen spektrumlara ait ölçüm parametreleri Tablo 3.3'te verildi.

Tablo 3.3: Her iki metale ait ölçüm parametreleri.

	Sc	Tm	
İncelenen dalga boyu aralığı (nm)	400 - 700	300 - 850	850 - 2250
Silindir katot			
Metal saflığı	% 99.9		
Silindir katot uzunluğu (mm)	15		
Katod-anot arası mesafe (mm)	1.5		
Ar asal gaz basıncı (mbar)	1 - 3.3	1.75 - 3	
Ne asal gaz basıncı (mbar)	2.1 - 3.2	3.2 - 3.4	
Akım (mA)	40 - 90	50 - 70	
FT spektrometresi			
Dedektör	PMT (Hamamatsu R928)		InGaAs
Işın bölücü	Kuartz ışın bölücü		CaF
Filtre	FES400, FES450, FES500, FES550, FES600		
Çözünürlük (cm ⁻¹)	0.03		
Ortalama tarama sayısı	50		

3.6. SPEKTRAL VERİ ANALİZ PROGRAMLARI

Herhangi bir atomun veya iyonun enerji seviyelerinin deneysel olarak belirlenmesi en iyi şekilde onun spektral çizgilerinin incelenmesiyle yapılır. Atomların/iyonların yaydığı ışık incelenerek elektron kabuğu hakkında bilgi elde edilebilir. Atomlar/iyonlar uyarılırlarsa elektromanyetik radyasyon yayarlar. Atomu uyarılmış duruma getirmek için enerjiye ihtiyaç vardır. Bu gerekli enerji atomlara/iyonlara termal olarak (ısıtarak), elektriksel olarak (deşarj olayıyla) veya diğer elektronlarla etkileşerek sağlanabilir. Diğer bir olasılık ise ışığın soğurulması yoluyla uyarılmadır; bunun için rezonans koşulu yani $\Delta E = h\nu$ yerine getirilmelidir. Uyarılmış durumun ömrü genellikle kısadır ve atomlar ayrı frekanslarda elektromanyetik radyasyon yayarak daha alt seviyelere dönerler. Bu elektromanyetik radyasyon

uygun bir aparattan geçtiğinde bileşenlerine ayrılır. Oluşan spektrumlar genellikle şiddetin frekans veya dalga boyu dağılımı şeklinde görülür. Spektral çizgi yeterli şiddete sahipse ve yayılan ışığı analiz eden aparat yüksek çözünürlüğe sahipse, spektral çizginin şiddet maksimumları aşırı ince bir yapı gösterir. Her element, o atomun parmak izi olarak bilinen kendi karakteristik spektrumunu yayar. Elektron kabuğu hakkında yeterli bilgi edinmek için çok sayıda spektral geçişin incelenmesi gerekir. Yayılan ışığın geniş bir dalga boyu aralığını incelemek için, bu dalga boyu aralığında yüksek çözünürlüklü spektrumlara ihtiyaç vardır. Elde edilen spektrumların analizlerinin uygun ve hassas bir şekilde yapılması da bir o kadar önemlidir.

Bu çalışmada, FT spektrumları alınan Sc ve Tm elementlerinin aşırı ince yapısının incelenmesi iki veri analiz programı ile yapıldı. Bu programlardan ilki atomlarının FTS metodu ile gerçekleştirilen deney verilerinin analizinde kullanılan “Elements” (Windholz, 2003) programı olup, bir diğer spektral veri analiz programı ise “Fitter” programıdır (Zeiser, 2022).

3.6.1. Sınıflandırma (Elements) programı

Spektral çizgilerin sınıflandırılması ancak eksiksiz elektronik seviye bilgileri ile yapılabilir. Bu bilgileri elde edebilmek için çok sayıda spektral çizginin deneysel olarak incelenmesi gereklidir. Sınıflandırma programı ile incelenen elementin FT spektrumundaki tüm spektral çizgiler analiz edilebilir. Bu program incelenmek istenen her elementin hem atomik hem de iyonik çizgileri için aynı anda çalıştırılacak şekilde hazırlanmıştır. Ayrıca çizgi sınıflandırmasında kullanılan bu programda deneysel olarak yeni ince yapı enerji seviyelerini bulma çalışmalarını yapmak da mümkündür. Tez çalışması kapsamında bu program sadece spektral çizgi sınıflandırılması için kullanıldı. Sınıflandırma programının çalışabilmesi için üç adet giriş dosyasının hazırlanması gerekir.

- Literatürde deneysel olarak belirlenmiş sınıflandırılmış/sınıflandırılmamış tüm spektral çizgilerin dalga boyu listesinin yer aldığı giriş dosyası oluşturulur. Bu listede eğer çizgilerin sınıflandırılması mevcut ise; çizginin alt ve üst ince yapı seviyesinin enerji değeri, seviyelerin J değerleri, seviyelerin pariteleri, eğer mevcut ise hfs sabitleri, çizginin şiddet değeri verilir. Dalga boyu giriş dosyası tüm sınıflandırma işlemi sırasında kendini yenileyen yapıda oluşturulmuştur. Yani yapılan her ekleme/çıkarma otomatik olarak bu dosyaya kayıt edilmiş olur. Sınıflandırma işlemi yapılırken kullanılan her iki asal gaz ile kaydedilen FT spektrumlarındaki deneysel çizginin sinyal-

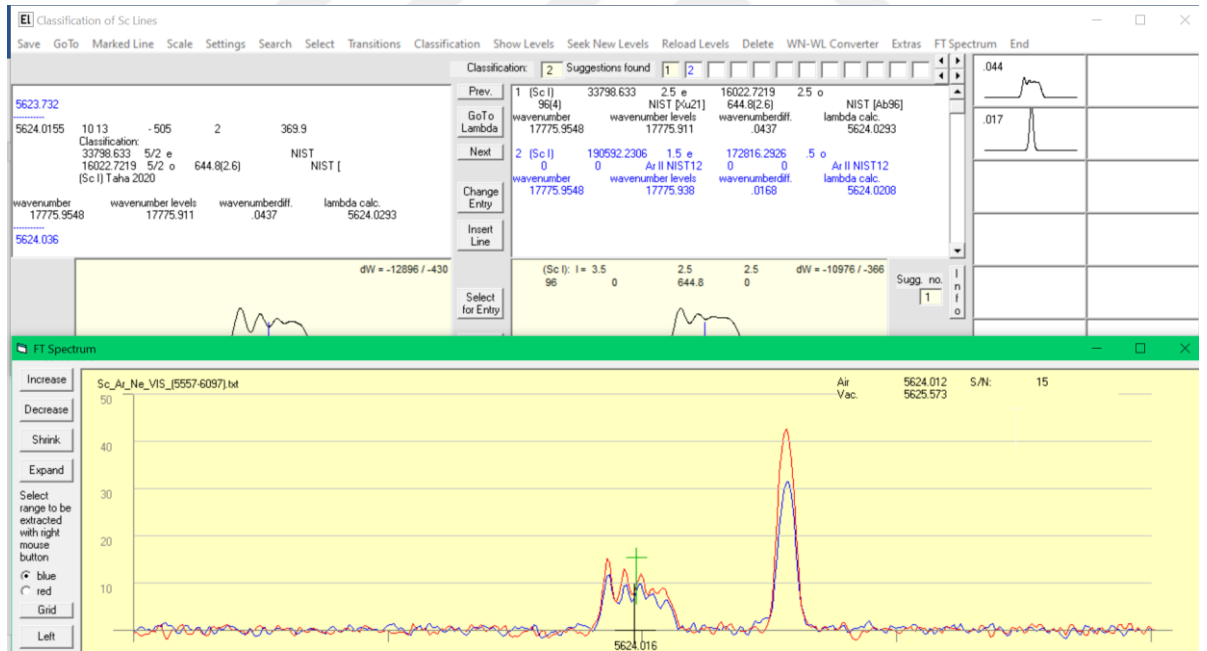
gürültü oranı (S/N), güçlü aşırı ince yapı bileşenlerinin mK (ve MHz) cinsinden arasındaki mesafe ve son olarak mK (ve MHz) biriminde çizgi genişliği kaydedilir.

- İncelenecek elementin nötr hali için oluşturulan enerji seviyeleri dosyası, tüm deneysel ince yapı enerji seviyelerini, bu enerji seviyelerine ait J kuantum sayılarını, paritelerini, eğer biliniyorsa hfs sabitlerini içerir. Deney sırasında bir plazma ortamı elde edilir. Elde edilen spektrumlarda bu ortamı sağlamak için kullanılan asal gaza ait spektral çizgiler de incelenen element ile birlikte gözlenir. Bu nedenle asal gaz geçişlerini, incelenen metale ait geçişlerden ayırabilmek için giriş dosyalarına deneyde kullanılan Ar ve Ne asal gazlarına ait enerji seviyelerinin verileri de eklenir.
- Benzer şekilde; elementin iyonlaşmış halleri için ayrı ayrı seviye giriş dosyası oluşturulur. İyonize tüm enerji seviyeleri ve bu seviyelere ait J kuantum sayıları, pariteleri ve eğer biliniyorsa hfs sabitleri bu dosyalarda yer alır.

Kullanılan programın arayüzü iki bağımsız pencereden oluşur. İlk pencere üç ayrı bölüm içerir. Ortadaki bölümde, seçilen spektral çizgiye ilişkin teorik önerilerin listesi mevcuttur. Program ilk önce, çizginin dalga sayısını seçim kurallarını sağlayan seviye çiftlerinin enerji farkıyla karşılaştırarak tüm olası geçişleri hesaplar. Sınıflandırma önerileri daha sonra ana pencerenin orta bölümünde görüntülenir. Hem atomik hem de iyonik önerilen geçişler görüntülenir; menü çubuğundaki Araştır (Search) butonu ile ister sadece nötral atom, ister atomun iyon halleri, isterse de her durum görüntülenebilir. Bu çalışmada hem atom hem de iyon için eş zamanlı çalışıldı. Bu bölüm, aynı zamanda seçilen önerinin beklenen hfs modelini görüntüleyen bir grafik alanı da içerir. Soldaki bölüm, spektral çizginin sınıflandırmasını görüntüler. Spektral çizgi sınıflandırılmışsa, bu bölümde hem üst hem de alt seviyeler için enerji değerleri, açısal momentum değerleri, parite ve varsa hfs sabitleri görüntülenir. Ayrıca hem üst hem de alt seviyelere ilişkin açıklamalar; seviyeyi keşfeden grup veya kişilerin adları da görüntülenir. Ağırlık merkezi dalga boyu, Peck ve Reeder'in (Peck, 1972) dağılım formülü kullanılarak dalga sayısına dönüştürülür. Hesaplanan dalga sayısı ile ağırlık merkezi dalga sayısı arasındaki fark da burada yer alır; bu veri çok önemlidir çünkü, üst veya alt seviyelerin dalga sayılarının ne kadar doğru bilindiğinin anlaşılmasına yardımcı olur. Sol bölümde aynı zamanda önceki ve sonraki çizgilerin dalga boyları da görüntülenir. Ayrıca, her iki seviyenin A ve B 'sinin bilinmesi durumunda geçişin aşırı ince yapısını görüntüleyen bir grafik alanı da mevcuttur. Yapının genişliği MHz (ve mK) cinsinden gösterilmektedir. Öte yandan eğer çizgi sınıflandırılmamışsa sol bölüm boş kalır. Henüz sınıflandırılmamış çizgi için eğer listedeki önerilerden sınıflandırma

şartlarını sağlayan var ise Giriş için Seç (Select For Entry) butonu ile seçim yapılır ve çizgi sınıflandırılmış olur ve burada sınıflandırma bilgisi aktif hale gelir. Üçüncü bölüm yani sağdaki grafiksel bölüm, hızlı bir genel bakış sağlamak amacıyla orta bölümdeki tüm öneriler için aşırı ince yapıları grafiksel olarak görüntüler. Belirli bir önerinin dalga sayısı ile bir çizginin dalga sayısı ağırlık merkezi arasındaki fark, her grafik alanının en sol üst köşesinde görüntülenir. Bu farkın sıfıra yakın olması sınıflandırmanın doğruluğu için önemli bir parametredir. Satır ekle (Insert Line) ve Girişi değiştir (Change Entry) butonları, dalga boyu dosyasını manuel olarak açmadan, dalga boyu tablosuna spektral çizgi bilgilerini eklemenin ve değiştirmenin kullanışlı yoludur. Önceki (Previous)/Next (Sonraki) butonları sınıflandırılması yapılmış bir önceki/bir sonraki spektral çizginin görüntülenmesini sağlar. “Simülasyon” butonu ile Elements programının bir parçası olan ve sınıflandırılmış veya sınıflandırılmamış çizgiler için seçilen geçişin aşırı ince yapısını görüntülemek ve simüle etmek için kullanılan kısma geçiş yapılır. Üst ve alt seviyeler için açısal momentumu ve varsa hfs sabitlerini otomatik olarak alır ancak yine de tüm bu değerlerin değiştirilmesine olanak sağlayarak aşırı ince yapıyı görüntüler. Simülasyon (teorik spektrum), deneysel olarak kaydedilen aşırı ince yapıyla eşleşiyorsa çizgi sınıflandırılabilir. Analiz için açısal momentum değerleri, aşırı ince yapı etkileşim sabitleri, nükleer spin ve Doppler genişliği simülasyon programında değiştirilebilir. Simülasyon eşleşirse geçişin simüle edilmiş spektroskopik parametreleri, yani J değerleri, A ve B sabitlerinin değerleri, bir sonraki adımda Fitter programı ile (bakınız 3.6.2) yapılacak fit işlemi için başlangıç noktası olarak kullanılır. Doğru sınıflandırılmanın yapılabilmesinde diğer önemli nokta ise sinyal-gürültü oranının yeterince yüksek olmasıdır. O nedenle bu çalışmada sinyal-gürültü oranı üçten küçük olan yapılar inceleme dışı bırakıldı. Menü çubuğundaki Ayarlar(Settings) seçeneği, sınıflandırma programı için dalga boyu/dalga sayısı fark limiti, floresans çizgileri için dalga boyu limiti, Doppler genişliği, nükleer spin kuantum numarası, iyonizasyon limitleri gibi belirli parametreleri ayarlamak için kullanılır. Menü çubuğundaki Geçiş (Transitions) seçeneği, tüm pozitif floresans ve negatif floresans çizgilerini içeren listeleri ayrı ayrı görüntülemeyi sağlar. Menü çubuğundaki Seviyeleri göster (Show Levels) seçeneği, değişik kriterlere göre (seviye enerjisine veya J değerlerine ve pariteye göre) sıralanmış tüm atomik veya iyonik seviyelerin listesini görüntüler. Menü çubuğundaki Seviyeleri Yeniden Yükle (Reload Levels), güncellenmiş seviye dosyalarından atomik ve iyonik seviyeleri yeniden okur ve yükler. Sil (Delete) seçeneği bir sınıflandırmayı veya geçerli çizgiyi siler. Menü çubuğunda yer alan çok kullanışlı diğer bir seçenek ise WN-WL Dönüştürücü (WN-WL Converter) seçeneğidir. Peck ve Reeder dağılım formülünü kullanarak

otomatik olarak dalga boyunu dalga sayısına veya dalga sayısını dalga boyuna dönüştüren, etkinleştirilebilen bir alt program penceresi içerir. Aynı zamanda dalga sayısı olarak iki dalga boyu arasındaki farkı veya dalga boyu açısından iki dalga sayısı arasındaki farkı da gösterir. İkinci pencerede ise FT spektrumu yer alır. Bu pencere, fare imleci havada ve vakumda belirli bir dalga boyunda tıklatıldığında FT spektrumu grafiksel olarak görüntüler. Spektrumun x eksenini Å cinsinden dalga boyu, y eksenini ise sinyal gürültü oranıdır. Bu pencerede yer alan Yükselt (Increase)/Azalt (Decrease) butonu ise spektrumun değer skalasının yukarı yönde artışı/azalışı için kullanılır. Daralt (Shrink)/Genişlet (Expand) butonları ile spektral çizgi görünümünün daraltılması/genişletilmesi sağlanır. Hemen altında yer alan Mavi (Blue)/Kırmızı (Red) butonları ile spektrumdaki Ar (mavi) ve Ne (kırmızı) gazı ile alınan spektrumlardan hangisinin seçilerek simülasyon işleminin yapılacağı belirlenir. Çizgi(Grid) butonu ile S/N seviyesi daha rahat belirlenir. Son olarak Sol (Left)/Sağ (Right) butonları spektrumda sırasıyla sola ve sağa doğru hareket edilmesini sağlar. Şekil 3.1’de bu iki pencereye ait görsel yer almaktadır.



Şekil 3.1: 5624.015 Å dalga boyuna sahip spektral geçiş için Elements programından alınan örnek görüntü.

Çizgi sınıflandırılmasının doğru olarak yapılması için bazı ölçütler gözönüne alındı. Dikkate alınan ölçütler maddeler halinde aşağıda verildi.

- Ar ve Ne asal gazları ile alınan her iki FT spektrumunda var olan ve en az biri için $S/N > 3$ olan çizgilerin analizi yapıldı.
- $3 < S/N < 8$ arasında sinyal gürültü oranına sahip çizgilerde yarı genişlik (FWHM) belirlenirken gürültü seviyesinin üzerindeki çizginin bir sol bir de sağ kısmındaki dalga sayıları arasındaki fark alındı. Eğer $S/N > 8$ ise, spektrum üzerinden okunan S/N oranının $1/e^2$ ile çarpımının sonucu kullanılarak çizgi genişliği bulundu.
- Teorik olarak önerilen geçişlerde eleme yapılırken $\Delta\sigma < 0.1 \text{ cm}^{-1}$ olmasına dikkat edildi.
- Teorik önerilen geçiş tek pikli olup alt ve üst enerji seviyelerinin manyetik dipol hfs sabitlerinin her ikisi de bilinmiyorsa incelenen elemente ait olduğu bilgisi verildi ama sınıflandırma yapılmadı.
- Teorik önerilen geçişin alt ve üst ince yapı enerji seviyelerinden bir tanesi için hfs sabitinin belli olması durumunda ise uygun sabit değeri bulunup çizgi simüle edildi ve sınıflandırılma işlemi yapıldı.
- Teorik önerilen geçişin alt ve üst ince yapı enerji seviyelerinin her ikisi için de hfs sabitinin belli olduğu durumda da çizgi bu değerler ile simüle edildi. Deneysel ve teorik spektrum uyumlu ise çizgi sınıflandırılması yapıldı.

3.6.2. Fitter programı

Deneysel manyetik dipol ve elektrik kuadrupol hfs sabitlerini belirlemek için Fitter programı (Zeiser, 2022) kullanıldı. İşlemin hassas olarak yapılabilmesi için aşağıdaki ölçütler belirlendi.

- Elementin FT spektrumu en az iki pike sahip olmalıdır.
- Alt ve üst ince yapı enerji seviyelerinden bir tanesinin literatürden biliniyor olması gerekmektedir.

Kaydedilen aşırı ince yapı profili, "en küçük kareler yöntemi (EKKY)" olarak da bilinen Gauss-Newton metodu (Gauss, 1965) kullanılarak uygun bir matematiksel fonksiyona en iyi şekilde fit edilebilir. Burada kullanılan yöntem, noktaların eğriden sapmalarının karelerinin toplamını en aza indirecek şekilde veri noktalarına bir eğrinin yerleştirildiği yinelemeli bir işlemdir. Bu yöntemin kullanılmasının temel nedeni deneysel ölçüm veri hatalarının pozitif veya negatif yönde yapılabilir olmasıdır. Eğer veri hatalarının doğrudan toplamı alınırsa pozitif ve negatif yönlü hatalar birbirilerini yok edecek ve gerçekte olan hatadan daha düşük bir hata değeri elde

edilecektir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için hataların karelerinin alınıp toplama işleminin sonradan yapılması ile hatanın en küçük değeri belirlenmeye çalışılır.

İnce yapı seviyelerinin aşırı ince yapı ayrışmaları, nükleer spin kuantum sayısı I , üst ve alt seviyelerin açısal momentum J değerleri ve hfs sabitleri A ve B gibi bir dizi spektroskopik parametre ile karakterize edilir.

Fitter programı ile EKKY'den yararlanılarak matematiksel bir fonksiyon ile deneysel spektrum fit edilerek spektral çizginin ağırlık merkezi, çizgi genişliği ve hfs sabitleri belirlenir.

İncelenecek çizginin deney verisi, tüm FT spektrum verisinden alınmalıdır. Bu işlem bu tez çalışmasının ikinci danışmanı olan Prof. Dr. Sophie Kröger'in yardımı ile Python programlama dili kullanılarak yazılan bir kod ile yapıldı (Ek-1).

Fit işlemi için hazırlanacak olan 4 adet giriş dosyasının içeriği aşağıda maddeler halinde verildi.

- 1. Giriş dosyası (*.ein dosyası): İlgili elemente ait sabit ve değişken fiziksel parametreler bu dosyada yer alır.
 - ✓ Sabit parametreler:
 - İzotop sayısı,
 - İzotopların katkı oranı,
 - I çekirdek spin değeri,
 - J , spektral çizginin alt ve üst enerji seviyelerinin toplam açısal momentum değerleri,
 - Spektrumun fit edileceği matematiksel fonksiyondur.
 - ✓ Değişken parametreler
 - Spektral çizginin yarı genişliği,
 - Çizginin en şiddetli bileşenin frekans olarak konumu,
 - Literatürde bilinen A ve B hfs sabitleri,
 - Gauss/Voigt oranı,
- 2. Giriş dosyası (*.mes dosyası): FT-spektrumunun şiddete bağlı dalga sayılarını içerir.
- 3. Giriş dosyası (*.lin dosyası): Spektrumun sadece dalga sayılarını içerir.
- 4. Giriş dosyası (*.par dosyası): Spektrum dalga boyu, frekansı ile ilgili aşağıdaki hususları içerir:
 - ✓ Spektrumun başlangıçtaki dalga boyu,

- ✓ İncelenecek spektral çizginin spektrumdaki veri sayısı,
- ✓ Ardışık iki veri arasındaki farkın frekans cinsinden değeridir.

Fit işlemi sonrasında program tarafından hfs bileşenleri ile ilgili bilgiler içeren çıkış dosyası (*.aus), fit edilen çizginin en iyi fit edilmiş spektrumu (*.bf) otomatik olarak oluşur.

Çıkış dosyasında yer alan hfs bileşenlerinin frekans olarak yerini ifade eden aşağıdaki eşitliktir:

$$\nu = \nu_0 + \alpha_{\bar{u}} (F_{\bar{u}}, J_{\bar{u}}, I) A_{\bar{u}} + \beta_{\bar{u}} (F_{\bar{u}}, J_{\bar{u}}, I) B_{\bar{u}} - \alpha_a (F_a, J_a, I) A_a - \beta_a (F_a, J_a, I) B_a \quad (3.24)$$

- ν_0 spektral geçişin ağırlık merkezi,
- $A_{\bar{u}}$ ve A_a sırası ile üst ve alt enerji seviyelerinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri,
- $B_{\bar{u}}$ ve B_a sırası ile üst ve alt enerji seviyelerinin elektrik kuadrupol aşırı ince yapı sabitleri (bu tez çalışması kapsamında bu değerler çekirdek spini değerinin $\frac{1}{2}$ olması nedeni ile sıfırdır),
- α ve β her iki seviye için casimir faktörü,

Diğer çıkış bilgisi bir hfs bileşeninin bağıl şiddetidir ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır (Cowan, 1981):

$$I(F_{\bar{u}} \rightarrow F_a) = \frac{(2F_{\bar{u}}+1)(2F_a+1)}{(2I+1)} \left\{ \begin{matrix} J_{\bar{u}} & F_{\bar{u}} & I \\ F_a & J_a & 1 \end{matrix} \right\}^2 \quad (3.25)$$

DeneySEL FT-spektrumu ile belirli bir matematiksel bir fonksiyonun uyumu fiziksel olarak doğru olmayan değerler ile sağlanabilir ve böylelikle çok yüksek fit kalitesi yanıltıcı olarak elde edilebilir. Bunu önlemek için giriş dosyasında verilen fiziksel parametrelerin doğru girilmesi çok önemlidir. Özellikle birbirlerinden ayrıışmamış spektrumlarda, ayrıışmamış bileşenlerin şiddetlerinin kuplaj (değerleri birbirine bağlı olarak değiştirme) yapılması zorunludur. Kuplajın temeli düşük şiddetli hfs bileşenlerinin en yüksek şiddete sahip bileşene bağlı değişmesidir.

4. BULGULAR

4.1. SKANDİYUM ELEMENTİNE AİT BULGULAR

4.1.1. Nötral skandiyuma (Sc I) ait çizgi sınıflandırılması

Sc elementine ait FT spektrum analizi sonucunda toplam 532 spektral çizgi analiz edildi. Bunlardan 32 tanesi ilk defa bu çalışmada olmak üzere 474 tanesi Sc I olarak, 26 tanesi Sc II olarak sınıflandırıldı. Toplamda 32 spektral geçiş ise Sc I veya Sc II olarak tanımlandı. Tablo 4.1’de Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler yer almaktadır.

Tablo 4.1: 400 nm ile 730 nm bölgeleri arasında Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	<i>I</i>	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
400.783	24944.09	4	4	3	225?	-261.2	40825.755	3.5	15881.708	3.5	0.047
402.039	24866.19	7	7322	2810	275?	-5.2	24866.172	1.5	0.00	1.5	0.014
402.322	24848.70	5	77	50	191?	-30.5	40521.261	1.5	15672.56	1.5	0.001
402.368	24845.87	7	9626	3200	260?	-51	25014.19	2.5	168.3371	2.5	0.013
403.062	24803.06	6	100	65	495-	-363.7	40825.755	3.5	16022.722	2.5	0.028
403.137	24798.44	5	106	58	240?	-50.7	40554.96	2.5	15756.53	2.5	0.006
403.421	24780.99	5	74	46	258?	-138.2	40802.738	2.5	16021.779	1.5	0.035
403.437	24780.04	4	6	4	405-	-428.4	40802.738	2.5	16022.722	2.5	0.027
403.686	24764.74	5	9	7	320?	-230.6	40521.261	1.5	15756.53	2.5	0.005
404.380	24722.24	5	127	80	260?	-72.1	40603.933	3.5	15881.708	3.5	0.012
404.648	24705.89	5	110	70	340?	150.3	40802.738	2.5	16096.883	1.5	0.034
404.779	24697.85	7	1331	1110	215?	48.8	24866.172	1.5	168.3371	2.5	0.015
404.994	24684.78	5	99	62	270?	-138.2	40825.755	3.5	16141.001	2.5	0.022
405.183	24673.26	5	14	10	375?	-157.4	40554.96	2.5	15881.708	3.5	0.005
405.455	24656.69	7	3891	1840	330?	12.9	24656.712	0.5	0.00	1.5	-0.017
405.659	24644.30	5	151	99	280-	-75.1	40670.822	4.5	16026.553	4.5	0.033
406.700	24581.22	5	51	34	350?	-194.9	40603.933	3.5	16022.722	2.5	0.014
406.763	24577.40	5	12	11	320?	-192.3	40603.933	3.5	16026.553	4.5	0.017
407.496	24533.19	6	146	97	205?	-32.8	40554.96	2.5	16021.779	1.5	0.007
407.856	24511.52	5	112	76	205?	33.1	40521.261	1.5	16009.743	0.5	0.003
408.239	24488.56	7	7168	2970	235?	-65.4	24656.866	1.5	168.3371	2.5	0.028
408.602	24466.82	5	81	50	220?	1.3	39392.8	3.5	14926.061	2.5	0.077
408.666	24462.94	5	182	118	215?	30.6	40603.933	3.5	16141.001	2.5	0.013
408.715	24460.04	6	349	230	240?	-47	40670.822	4.5	16210.814	3.5	0.031
408.747	24458.08	5	18	12	420-	-255.7	40554.96	2.5	16096.883	1.5	0.007
409.311	24424.38	5	24	16	250?	63.1	40521.261	1.5	16096.883	1.5	0.003
409.486	24413.97	5	45	29	250?	-62.4	40554.96	2.5	16141.001	2.5	0.008
409.836	24393.13	5	26	18	345?	-164.1	40603.933	3.5	16210.814	3.5	0.014
410.031	24381.51	5	79	46	275?	144.9	39423.36	4.5	15041.902	3.5	0.047
412.655	24226.52	5	37	28	240?	-38.5	42937.526	1.5	18711.029	0.5	0.018
413.298	24188.80	6	397	250	280?	-90	39861.348	2.5	15672.56	1.5	0.009
413.680	24166.46	1	15	11	180?	-11.6	42877.58	0.5	18711.029	0.5	-0.09
414.027	24146.22	6	637	390	250?	-116	39902.698	3.5	15756.53	2.5	0.053
414.738	24104.83	5	29	20	505-	-386.7	39861.348	2.5	15756.53	2.5	0.008
415.233	24076.06	6	1180	705	208?	-30.7	39957.75	4.5	15881.708	3.5	0.018
415.473	24062.15	5	78	55	250?	-44.5	42917.84	2.5	18855.734	1.5	0.043
415.836	24041.19	4	14	11	248?	-30.2	40063.875	1.5	16022.722	2.5	0.039

Tablo 4.1 (devam): 400 nm ile 730 nm bölgeleri arasında Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm ⁻¹)	<i>I</i>	S/N	Ar	S/N	Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm ⁻¹)	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm ⁻¹)	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm ⁻¹)
416.049	24028.88	lc	22		13		270-	-92.6	39701.428	0.5	15672.56	1.5	0.015
416.184	24021.04	5	54		34		375?	-249.5	39902.698	3.5	15881.708	3.5	0.054
416.518	24001.82	6	245		910		190?	16.3	40028.31	5.5	16026.553	4.5	0.062
417.153	23965.24	5	8		29		212?	-29.3	39721.755	1.5	15756.53	2.5	0.018
417.747	23931.22	5	13		41		343?	-150.8	39957.75	4.5	16026.553	4.5	0.02
417.757	23930.63	5	13		41		343?	-231.6	45016.415	3.5	21085.829	3.5	0.045
418.642	23880.03	5	5		14		495?	-353.2	39902.698	3.5	16022.722	2.5	0.057
418.760	23873.29	5	18		45		205?	-5.8	39754.983	2.5	15881.708	3.5	0.019
419.063	23856.02	4	9		30		285?	-139.2	44941.779	3.5	21085.829	3.5	0.071
419.947	23805.85	4	14		48		209?	84.8	44838.556	2.5	21032.732	2.5	0.022
420.452	23777.25	5	9		16		260?	-10.7	39799.959	3.5	16022.722	2.5	0.016
420.519	23773.42	5	31		53		237?	14	39799.959	3.5	16026.553	4.5	0.015
420.988	23746.96	4	5		8		186?	-122.7	39957.75	4.5	16210.814	3.5	0.023
421.232	23733.22	5	21		32		281?	80.9	39754.983	2.5	16021.779	1.5	0.017
421.248	23732.29	5	12		20		366?	-136.3	39754.983	2.5	16022.722	2.5	0.029
421.608	23712.04	5	21		31		348?	-117	39721.755	1.5	16009.743	0.5	0.03
421.822	23699.99	5	34		48		252?	-24.1	39721.755	1.5	16021.779	1.5	0.019
421.970	23691.70	5	19		27		525?	-46.7	39701.428	0.5	16009.743	0.5	0.011
422.184	23679.66	5	8		12		375?	-173.8	39701.428	0.5	16021.779	1.5	0.012
422.554	23658.97	5	17		21		403?	214.9	39799.959	3.5	16141.001	2.5	0.013
422.569	23658.11	5	8		13		630?	369.4	39754.983	2.5	16096.883	1.5	0.006
423.163	23624.90	5	14		21		375?	264.4	39721.755	1.5	16096.883	1.5	0.026
423.191	23623.34	5	82		133		323?	-174.5	43860.111	3.5	20236.877	4.5	0.102
423.243	23620.46	1	3		4		240?	237.6	43860.111	3.5	20239.65	3.5	0.004
423.358	23614.00	5	95		105		267?	89.2	39754.983	2.5	16141.001	2.5	0.018
423.528	23604.56	4	20		20		267?	-53.6	39701.428	0.5	16096.883	1.5	0.012
423.779	23590.54	5	112		170		228?	10.2	43830.118	2.5	20239.65	3.5	0.07
423.804	23589.16	6	256		256		322?	42.2	39799.959	3.5	16210.814	3.5	0.013
423.955	23580.78	5	49		49		239?	-38.1	39721.755	1.5	16141.001	2.5	0.026
424.614	23544.19	4	38		37		266?	-88	39754.983	2.5	16210.814	3.5	0.019
425.268	23507.95	1	7		9		165?	-46.8	44189.284	1.5	20681.41	0.5	0.08
425.964	23469.54	4	40		54		231?	82.4	44189.284	1.5	20719.833	1.5	0.085
426.130	23460.40	5	9		8		346?	130.7	40715.416	2.5	17255.076	1.5	0.057
426.791	23424.09	2	13		16		307?	14.9	44105.43	0.5	20681.41	0.5	0.072
426.890	23418.63	2	9		8		350?	10.2	40644.644	1.5	17226.025	0.5	0.006
427.077	23408.40	4	27		22		355?	153.1	40715.416	2.5	17307.069	2.5	0.048
427.493	23385.61	1	6		8		225?	96	44105.43	0.5	20719.833	1.5	0.012
428.323	23340.29	3	14		11		400?	143.9	40595.283	0.5	17255.076	1.5	0.079
428.355	23338.55	5	91		80		354?	-187.3	40351.308	2.5	17012.753	2.5	-0.004
428.372	23337.64	2	12		10		255?	152.9	40644.644	1.5	17307.069	2.5	0.061
428.428	23334.60	1	5		5		450?	-275.5	40347.323	1.5	17012.753	2.5	0.026
428.582	23326.17	1	6		5		365?	249	40351.308	2.5	17025.127	1.5	-0.01
428.655	23322.21	5	89		80		250?	114	40347.323	1.5	17025.127	1.5	0.016
430.864	23202.66	3	27		25		253?	70.7	38959.131	3.5	15756.53	2.5	0.06
430.930	23199.12	2	38		32		180?	1.1	38871.628	2.5	15672.56	1.5	0.055
432.061	23138.39	lc	330		234		180+	2.9	40151.072	3.5	17012.753	2.5	0.07
433.172	23079.04	4	6		6		230?	230	40104.143	2.5	17025.127	1.5	0.021
433.825	23044.30	3	8		7		140?	-110	40351.308	2.5	17307.069	2.5	0.062
434.851	22989.90	4	42		30		275?	-372.1	41505.582	2.5	18515.665	1.5	-0.018
435.213	22970.82	3	31		23		320?	-27.4	41474.854	1.5	18504.058	0.5	0.019
435.433	22959.19	1	9		6		253?	25.2	41474.854	1.5	18515.665	1.5	0
435.864	22936.47	5	245		225		300?	-166.5	38959.131	3.5	16022.722	2.5	0.057
435.908	22934.20	5	115		80		330?	51.3	41505.582	2.5	18571.386	2.5	0.006
435.965	22931.19	3	44		32		352?	102	41446.839	0.5	18515.665	1.5	0.02
436.492	22903.49	4	62		42		315?	22.6	41474.854	1.5	18571.386	2.5	0.024
437.516	22849.90	4	62		58		340?	-193.8	38871.628	2.5	16021.779	1.5	0.049

Tablo 4.1 (devam): 400 nm ile 730 nm bölgeleri arasında Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm ⁻¹)	<i>I</i>	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm ⁻¹)	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm ⁻¹)	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm ⁻¹)
437.534	22848.95	3	7	7	560?	-84.8	38871.628	2.5	16022.722	2.5	0.043
438.124	22818.19	3	62	55	260?	59	38959.131	3.5	16141.001	2.5	0.06
438.959	22774.79	5	155	150	243?	94.7	38871.628	2.5	16096.883	1.5	0.048
442.889	22572.71	4	13	10	484?	-308.2	43658.502	2.5	21085.829	3.5	0.035
443.051	22564.45	4	22	20	264?	145	43597.133	1.5	21032.732	2.5	0.053
449.447	22243.32	lc	12	19	505-	-327.5	49180.251	1.5	26936.971	0.5	0.036
451.137	22159.99	4	13	8	315?	-141.5	37086.02	1.5	14926.061	2.5	0.034
451.583	22138.11	4	10	11	230?	-46.8	42819.458	0.5	20681.41	0.5	0.062
452.085	22113.53	3	5	4	137?	-118.7	37039.559	2.5	14926.061	2.5	0.031
452.192	22108.32	3	5	4	265?	172.8	37780.858	1.5	15672.56	1.5	0.021
452.368	22099.70	lc	4	6	125?	34.3	42819.458	0.5	20719.833	1.5	0.078
452.381	22099.08	3	8	7	195?	77.2	37855.603	2.5	15756.53	2.5	0.006
453.169	22060.62	3	10	8	495?	395.6	42780.397	1.5	20719.833	1.5	0.051
453.421	22048.36	4	16	21	277?	-102.9	46914.547	1.5	24866.172	1.5	-0.015
454.255	22007.89	5	108	86	242?	-80.3	36933.899	1.5	14926.061	2.5	0.05
454.466	21997.67	9	195	155	227?	83.5	37039.559	2.5	15041.902	3.5	0.012
454.929	21975.31	4	13	19	352?	-22	46989.493	2.5	25014.19	2.5	0.01
455.723	21937.00	5	378	360	240?	-99.5	42969.76	3.5	21032.732	2.5	-0.024
456.829	21883.92	4	5	5	515?	-485.3	42969.76	3.5	21085.829	3.5	-0.015
457.168	21867.65	4	7	5	240?	-115.1	36793.645	1.5	14926.061	2.5	0.064
457.397	21856.72	5	618	575	200?	-346.3	42942.49	4.5	21085.829	3.5	0.064
457.896	21832.91	5	46	40	619?	-440.1	37855.603	2.5	16022.722	2.5	0.026
458.202	21818.30	4	13	9	176?	36.8	36860.209	2.5	15041.902	3.5	-0.003
458.502	21804.05	4	6	5	205?	-188.7	36730.11	3.5	14926.061	2.5	0.004
458.777	21790.98	1	5	8	170?	-84	47375.639	1.5	25584.627	2.5	-0.03
459.047	21778.16	4	35	32	370?	-44.1	40282.159	1.5	18504.058	0.5	0.061
459.292	21766.54	5	53	49	360?	-14.8	40282.159	1.5	18515.665	1.5	0.045
459.449	21759.11	4	44	41	222?	-22.1	37780.858	1.5	16021.779	1.5	0.029
459.457	21758.75	lc	7	7	200?	-22.1	37855.603	2.5	16096.883	1.5	0.025
459.469	21758.17	4	7	6	359?	-205.2	37780.858	1.5	16022.722	2.5	0.03
459.567	21753.51	4	39	38	293?	-77.4	40257.516	1.5	18504.058	0.5	0.054
459.813	21741.89	5	68	68	355?	-94.8	40257.516	1.5	18515.665	1.5	0.039
459.844	21740.42	5	129	82	208?	-77.3	36666.416	2.5	14926.061	2.5	0.068
460.390	21714.62	4	18	18	353?	-214.6	37855.603	2.5	16141.001	2.5	0.02
460.470	21710.84	5	126	120	275?	-17.4	40282.159	1.5	18571.386	2.5	0.067
460.685	21700.75	2	10	15	212?	-106.4	47425.462	2.5	25724.658	3.5	-0.056
460.957	21687.94	5	185	95	215?	15.1	36730.11	3.5	15041.902	3.5	-0.263
460.994	21686.19	5	81	81	338?	-97.4	40257.516	1.5	18571.386	2.5	0.063
461.040	21684.00	5	36	33	409?	266.4	37780.858	1.5	16096.883	1.5	0.027
463.695	21559.85	4	14	15	339?	-38	40063.875	1.5	18504.058	0.5	0.038
463.945	21548.23	3	16	16	357?	-0.2	40063.875	1.5	18515.665	1.5	0.016
463.981	21546.58	3	7	7	227?	70.7	40257.516	1.5	18711.029	0.5	0.096
464.713	21512.65	2	13	15	180?	-102.9	46378.813	2.5	24866.172	1.5	0.01
465.148	21492.52	3	8	9	250?	-2.8	40063.875	1.5	18571.386	2.5	0.033
465.241	21488.21	1	6	8	110?	-102.9	46354.372	2.5	24866.172	1.5	0.006
465.449	21478.63	3	18	20	323?	-165.4	40334.288	2.5	18855.734	1.5	0.078
466.170	21445.40	3	22	23	211?	-22	46459.624	3.5	25014.19	2.5	-0.033
466.426	21433.65	3	48	44	170?	16.1	42466.369	1.5	21032.732	2.5	0.01
466.581	21426.49	4	38	35	330+	33.2	40282.159	1.5	18855.734	1.5	0.065
466.870	21413.26	3	13	8	178?	23.2	37085.8	0.5	15672.56	1.5	0.02
466.879	21412.85	lc	11	11	260?	185.3	42445.509	2.5	21032.732	2.5	0.071
467.340	21391.69	4	14	9	288?	-108.5	37148.196	1.5	15756.53	2.5	0.028
468.039	21359.77	4	28	24	310?	-148.5	42445.509	2.5	21085.829	3.5	0.086
468.049	21359.31	lc	74	74	260-	-103.5	40070.288	0.5	18711.029	0.5	0.049
468.189	21352.91	lc	21	21	450+	110.2	40063.875	1.5	18711.029	0.5	0.06
468.694	21329.90	1	16	26	273?	-84	46914.547	1.5	25584.627	2.5	-0.018

Tablo 4.1 (devam): 400 nm ile 730 nm bölgeleri arasında Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneyset} (cm ⁻¹)	<i>I</i>	S/N	Ar	S/N	Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm ⁻¹)	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm ⁻¹)	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm ⁻¹)
470.129	21264.83	3	19		29		255?	-106.4	46989.493	2.5	25724.658	3.5	-0.009
470.693	21239.31	5	156		123		243?	-72.2	39754.983	2.5	18515.665	1.5	-0.005
470.931	21228.59	5	298		221		247?	25.9	39799.959	3.5	18571.386	2.5	0.013
471.172	21217.72	4	45		37		261?	-111.7	39721.755	1.5	18504.058	0.5	0.018
471.242	21214.58	lc	23		23		480-	-192.9	40070.288	0.5	18855.734	1.5	0.023
471.384	21208.17	5	102		109		337+	47.8	40063.875	1.5	18855.734	1.5	0.032
471.431	21206.09	4	41		33		341?	-177.2	39721.755	1.5	18515.665	1.5	-0.004
471.625	21197.38	4	46		36		368-	-275.5	39701.428	0.5	18504.058	0.5	0.007
471.703	21193.83	4	29		18		193?	-66.1	32751.474	3.5	11557.656	2.5	0.015
471.931	21183.62	4	42		33		318-	-99.7	39754.983	2.5	18571.386	2.5	0.021
472.081	21176.87	4	29		20		210?	99.4	32696.808	2.5	11519.961	1.5	0.022
472.321	21166.14	lc	8		8		230?	53.2	42198.825	3.5	21032.732	2.5	0.045
472.877	21141.25	6	256		173		290?	-192.4	32751.474	3.5	11610.236	3.5	0.012
472.920	21139.33	6	406		282		365?	62.9	32659.285	1.5	11519.961	1.5	0.009
472.923	21139.17	6	700		475		330-	-54.1	32696.808	2.5	11557.656	2.5	0.022
473.229	21125.49	5	91		71		552-	-286.4	37148.196	1.5	16022.722	2.5	0.016
473.410	21117.44	6	840		590		263+	86.1	32637.409	0.5	11519.961	1.5	-0.004
473.420	21116.98	lc	210		194		205?	-102.9	45983.203	2.5	24866.172	1.5	-0.055
473.508	21113.05	5	138		127		338?	-314.3	42198.825	3.5	21085.829	3.5	0.057
473.764	21101.64	5	2010		1370		155?	-76.9	32659.285	1.5	11557.656	2.5	0.008
474.102	21086.60	6	1470		1010		315?	-159.7	32696.808	2.5	11610.236	3.5	0.023
474.382	21074.17	6	1360		910		422?	-292.7	32751.474	3.5	11677.312	4.5	0.012
474.610	21064.03	4	40		34		434?	-58.1	37085.8	0.5	16021.779	1.5	0.01
474.897	21051.33	4	27		22		301?	185.2	37148.196	1.5	16096.883	1.5	0.014
475.316	21032.74	6	3940		2920		247?	-126.6	21032.732	2.5	0.00	1.5	0.006
475.894	21007.21	4	49		41		295?	-117.3	37148.196	1.5	16141.001	2.5	0.018
476.308	20988.94	4	67		54		273?	62.2	37085.8	0.5	16096.883	1.5	0.024
477.145	20952.13	4	10		8		439?	-326.7	37964.868	2.5	17012.753	2.5	0.012
477.935	20917.49	6	3140		1830		389?	236.1	21085.829	3.5	168.3371	2.5	0
478.352	20899.25	lc	7		7		115?	-24.2	39754.983	2.5	18855.734	1.5	0.003
479.151	20864.40	5	1203		730		191?	-97.7	21032.732	2.5	168.3371	2.5	0.008
479.295	20858.14	1	8		9		280?	82.3	45514.98	0.5	24656.866	1.5	0.028
480.769	20794.20	lc	8		8		115?	-112	46378.813	2.5	25584.627	2.5	0.011
482.144	20734.92	lc	12		15		110?	-118.6	46459.624	3.5	25724.658	3.5	-0.05
482.728	20709.81	5	190		140		287?	-170.3	37964.868	2.5	17255.076	1.5	0.013
483.366	20682.46	5	242		182		295?	-137.2	37908.484	1.5	17226.025	0.5	0.001
483.944	20657.80	5	288		214		414?	-249.3	37964.868	2.5	17307.069	2.5	-0.002
484.046	20653.44	4	56		44		320?	-183.1	37908.484	1.5	17255.076	1.5	0.027
484.086	20651.74	4	47		38		294?	-151.5	37877.776	0.5	17226.025	0.5	-0.012
484.767	20622.71	5	154		122		331?	-90.6	37877.776	0.5	17255.076	1.5	0.013
485.206	20604.07	3	23		20		203?	72.8	36276.607	1.5	15672.56	1.5	0.022
485.268	20601.42	5	114		91		420?	-199.8	37908.484	1.5	17307.069	2.5	0.009
485.914	20574.03	3	31		24		224?	-78.7	36330.537	2.5	15756.53	2.5	0.02
486.459	20550.99	1	8		6		190?	-151.8	36572.741	2.5	16021.779	1.5	0.023
486.481	20550.04	3	17		12		566?	-446.5	36572.741	2.5	16022.722	2.5	0.023
487.525	20506.03	3	23		17		210?	64.5	36515.732	1.5	16009.743	0.5	0.037
487.812	20493.99	4	77		53		294?	-150.2	36515.732	1.5	16021.779	1.5	0.036
487.834	20493.04	4	30		23		567?	-333.3	36515.732	1.5	16022.722	2.5	0.032
488.074	20482.96	4	85		61		239?	24.3	36492.628	0.5	16009.743	0.5	0.072
488.335	20472.03	3	49		53		264?	-79.5	41153.414	1.5	20681.41	0.5	0.028
488.362	20470.92	4	46		34		314?	-102.7	36492.628	0.5	16021.779	1.5	0.068
489.036	20442.67	4	47		50		535+	321.4	41162.506	2.5	20719.833	2.5	0.002
489.253	20433.62	1	20		22		225?	4	41153.414	1.5	20719.833	2.5	0.037
489.297	20431.77	4	41		30		346?	-221	36572.741	2.5	16141.001	2.5	0.026
489.606	20418.88	3	23		16		254?	138.3	36515.732	1.5	16096.883	1.5	0.032

Tablo 4.1 (devam): 400 nm ile 730 nm bölgeleri arasında Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneyse} (cm^{-1})	I	S/N	Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
490.160	20395.81	3	26		19	245?	17.5	36492.628	0.5	16096.883	1.5	0.066
490.666	20374.77	4	102		71	332?	-164.2	36515.732	1.5	16141.001	2.5	0.036
490.975	20361.95	5	183		133	539?	-398.2	36572.741	2.5	16210.814	3.5	0.023
492.261	20308.76	1	20		15	198?	-53.8	36330.537	2.5	16021.779	1.5	0.004
492.283	20307.83	5	218		170	486?	-315.9	36330.537	2.5	16022.722	2.5	0.019
493.423	20260.94	4	90		71	151?	-167.3	37486.929	1.5	17226.025	0.5	0.04
493.571	20254.85	4	107		83	246?	-122.1	36276.607	1.5	16021.779	1.5	0.02
493.596	20253.85	3	28		25	566?	-305.2	36276.607	1.5	16022.722	2.5	-0.035
494.088	20233.68	2	19		15	389?	234.7	36330.537	2.5	16096.883	1.5	0.023
494.130	20231.92	4	136		106	380?	-255.2	37486.929	1.5	17255.076	1.5	0.071
495.167	20189.56	4	160		124	244?	90.4	36330.537	2.5	16141.001	2.5	0.019
495.405	20179.89	5	362		278	525-	-271.9	37486.929	1.5	17307.069	2.5	0.033
497.366	20100.32	5	314		262	265?	63.6	37125.419	0.5	17025.127	1.5	0.03
498.036	20073.28	5	266		230	407?	-275.5	37086.02	1.5	17012.753	2.5	0.01
498.343	20060.91	5	158		134	330+	114	37086.02	1.5	17025.127	1.5	0.018
498.779	20043.36	1	8		8	96?	-51.1	44909.52	2.5	24866.172	1.5	0.015
499.012	20033.99	1	24		27	395?	-38	44690.637	0.5	24656.712	0.5	0.069
499.017	20033.80	lc	17		22	184?	24	44690.637	0.5	24656.866	1.5	0.029
499.191	20026.84	25	266		230	437?	-297.3	37039.559	2.5	17012.753	2.5	0.031
499.500	20014.46	4	5		46	344?	166.5	37039.559	2.5	17025.127	1.5	0.023
499.805	20002.24	lc	10		14	150?	80.4	45016.415	3.5	25014.19	2.5	0.019
499.898	19998.49	lc	19		19	155?	-10.8	35671.033	1.5	15672.56	1.5	0.019
500.132	19989.13	lc	14		11	45+	211.3	35745.635	2.5	15756.53	2.5	0.027
500.509	19974.08	1	35		32	215?	62.2	40210.868	3.5	20236.877	4.5	0.086
500.551	19972.40	lc	35		46	215?	-57.8	44838.556	2.5	24866.172	1.5	0.018
501.407	19938.30	lc	18		22	195?	-45.7	44594.955	1.5	24656.712	0.5	0.058
501.413	19938.10	lc	83		104	165?	38.9	44594.955	1.5	24656.866	1.5	0.009
501.676	19927.64	2	27		25	300?	162.9	44941.779	3.5	25014.19	2.5	0.051
501.746	19924.84	2	8		7	530?	452.8	40644.644	1.5	20719.833	1.5	0.026
501.838	19921.19	5	86		82	450?	-214.3	36933.899	1.5	17012.753	2.5	0.046
502.012	19914.28	5	458		445	205?	6.4	40151.072	3.5	20236.877	4.5	0.087
502.054	19912.63	3	43		48	155?	-25	40594.018	1.5	20681.41	0.5	0.018
502.083	19911.47	2	6		6	570?	418.5	40151.072	3.5	20239.65	3.5	0.046
502.150	19908.81	5	150		140	310?	175.2	36933.899	1.5	17025.127	1.5	0.037
502.662	19888.55	3	17		15	520?	281.4	40128.136	2.5	20239.65	3.5	0.063
503.024	19874.22	4	110		122	270?	134.8	40594.018	1.5	20719.833	1.5	0.032
503.121	19870.40	lc	5		5	210?	-67.5	37125.419	0.5	17255.076	1.5	0.062
503.270	19864.51	5	202		197	295?	157.2	40104.143	2.5	20239.65	3.5	0.021
503.702	19847.47	5	20		12	470?	-344	36860.209	2.5	17012.753	2.5	0.012
504.016	19835.10	2	7		6	185?	131.5	36860.209	2.5	17025.127	1.5	0.021
504.286	19824.50	lc	5		8	260?	-23.1	44690.637	0.5	24866.172	1.5	0.035
504.444	19818.30	3	76		94	190?	-46.8	40499.698	0.5	20681.41	0.5	0.007
504.607	19811.87	2	23		21	255?	-114.3	40048.736	3.5	20236.877	4.5	0.012
505.305	19784.52	3	17		16	255?	-148.3	37039.559	2.5	17255.076	1.5	0.04
505.396	19780.97	3	14		12	510?	-249.1	36793.645	1.5	17012.753	2.5	0.076
505.423	19779.89	2	35		43	205?	34.3	40499.698	0.5	20719.833	1.5	0.02
505.447	19778.94	2	6		6	305?	-217.5	37086.02	1.5	17307.069	2.5	-0.012
505.675	19770.04	2	15		15	285?	26.2	40802.738	2.5	21032.732	2.5	0.033
505.712	19768.57	3	24		18	310?	140.4	36793.645	1.5	17025.127	1.5	0.056
506.189	19749.97	1	6		6	245?	75.9	39989.575	2.5	20239.65	3.5	0.046
506.431	19740.54	5	333		211	280?	-181.7	31350.789	4.5	11610.236	3.5	-0.011
506.445	19739.96	lc	10		10	320?	-272.2	40825.755	3.5	21085.829	3.5	0.034
506.467	19739.14	lc	5		5	200?	95.3	36764.195	0.5	17025.127	1.5	0.068
506.637	19732.50	4	27		25	385?	-220	37039.559	2.5	17307.069	2.5	0.013
506.859	19723.84	1	11		10	300?	163.7	35745.635	2.5	16021.779	1.5	-0.018

Tablo 4.1 (devam): 400 nm ile 730 nm bölgeleri arasında Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N	Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
506.883	19722.94	5	320		270	330?	-25.9	35745.635	2.5	16022.722	2.5	0.025
507.016	19717.77	5	910		600	185?	-45.7	31275.4	3.5	11557.656	2.5	0.022
507.025	19717.40	5	800		550	430?	-367.3	36730.11	3.5	17012.753	2.5	0.039
507.270	19707.87	3	14		13	275?	-119.1	36933.899	1.5	17226.025	0.5	-0.001
507.580	19695.84	3	387		260	265?	123.4	31215.78	2.5	11519.961	1.5	0.018
508.018	19678.88	4	31		30	285?	-139.6	36933.899	1.5	17255.076	1.5	0.052
508.157	19673.47	7	2200		1380	400?	-282	31350.789	4.5	11677.312	4.5	-0.009
508.352	19665.92	lc	145		145	210?	-46.8	40347.323	1.5	20681.41	0.5	0.01
508.371	19665.19	7	2350		1525	320?	-169.5	31275.4	3.5	11610.236	3.5	0.024
508.553	19658.14	7	3220		2200	175?	-22.1	31215.78	2.5	11557.656	2.5	0.018
508.668	19653.73	4	80		55	400?	-256	36666.416	2.5	17012.753	2.5	0.065
508.694	19652.70	23	1220		850	300?	175	31172.621	1.5	11519.961	1.5	0.04
508.713	19651.98	5	690		500	420?	-295	36959.027	3.5	17307.069	2.5	0.02
508.783	19649.25	4	60		50	330?	-205.7	35671.033	1.5	16021.779	1.5	-0.002
508.988	19641.34	6	660		450	350?	197.5	36666.416	2.5	17025.127	1.5	0.056
509.244	19631.47	5	105		95	405?	217.4	40351.308	2.5	20719.833	1.5	-0.009
509.347	19627.51	2	23		22	190?	82.4	40347.323	1.5	20719.833	1.5	0.019
509.364	19626.85	3	8		8	308?	-156.3	36933.899	1.5	17307.069	2.5	0.023
509.672	19615.01	6	705		515	170?	35.2	31172.621	1.5	11557.656	2.5	0.04
509.917	19605.56	5	510		350	270?	-127.7	31215.78	2.5	11610.236	3.5	0.019
509.928	19605.13	5	475		350	320?	-183.3	36860.209	2.5	17255.076	1.5	-0.001
509.941	19604.66	lc	60		50	450?	199.6	35745.635	2.5	16141.001	2.5	0.028
510.111	19598.11	6	235		150	375?	-269.8	31275.4	3.5	11677.312	4.5	0.022
510.562	19580.79	2	19		15	175?	11.1	44594.955	1.5	25014.19	2.5	0.025
510.735	19574.17	4	180		160	230?	82.8	35671.033	1.5	16096.883	1.5	0.017
510.905	19567.67	5	250		210	170?	-133.6	36793.645	1.5	17226.025	0.5	0.046
511.284	19553.14	5	140		105	420?	-266.7	36860.209	2.5	17307.069	2.5	-0.003
511.664	19538.64	5	220		165	?315?	174.4	36793.645	1.5	17255.076	1.5	0.073
511.674	19538.23	5	224		176	315-	-96.7	36764.195	0.5	17226.025	0.5	0.064
511.888	19530.09	1	4		4	345?	-219.7	35671.033	1.5	16141.001	2.5	0.057
512.436	19509.19	3	45		35	265?	-35.8	36764.195	0.5	17255.076	1.5	0.073
513.029	19486.63	3	11		7	430?	-191.1	36793.645	1.5	17307.069	2.5	0.054
513.303	19476.24	4	5		4	235?	-214.4	40562.044	4.5	21085.829	3.5	0.027
514.708	19423.07	3	14		7	345?	-290	36730.11	3.5	17307.069	2.5	0.025
515.697	19385.84	1	10		8	160?	142.2	40418.538	3.5	21032.732	2.5	0.03
519.229	19253.95	lc	10		8	130?	-51.8	44838.556	2.5	25584.627	2.5	0.019
519.375	19248.55	1	9		6	280-	-203.8	40334.288	2.5	21085.829	3.5	-0.088
520.223	19217.16	1	10		8	135?	88.4	44941.779	3.5	25724.658	3.5	0.04
521.053	19186.57	5	600		315	420?	-279.5	39423.36	4.5	20236.877	4.5	0.089
521.129	19183.76	4	64		34	340?	132.6	39423.36	4.5	20239.65	3.5	0.049
521.884	19156.02	3	23		12	430+	196.5	39392.8	3.5	20236.877	4.5	0.095
521.961	19153.20	5	670		360	320?	215.7	39392.8	3.5	20239.65	3.5	0.053
525.833	19012.15	6	760		420	390?	-255.7	39248.91	5.5	20236.877	4.5	0.12
528.498	18916.28	4	70		40	370?	-246.3	39153.14	4.5	20236.877	4.5	0.017
528.574	18913.58	5	590		330	385?	165.8	39153.14	4.5	20239.65	3.5	0.091
530.195	18855.74	5	395		190	315?	136.4	18855.734	1.5	0.00	1.5	0.01
531.466	18810.64	3	5		3	390?	321.5	34567.18	3.5	15756.53	2.5	-0.009
531.556	18807.48	3	7		5	490+	351.6	34479.99	2.5	15672.56	1.5	0.047
532.304	18781.02	4	17		12	268?	-159.3	33707.034	2.5	14926.061	2.5	0.046
532.369	18778.73	lc	8		7	150?	-67.1	43435.39	1.5	24656.712	0.5	0.055
532.375	18778.52	3	40		31	160?	-12.3	43435.39	1.5	24656.866	1.5	-0.005
532.534	18772.91	lc	14		9	160?	-27.3	43429.62	0.5	24656.712	0.5	0.006
532.540	18772.72	2	10		8	135?	34.6	43429.62	0.5	24656.866	1.5	-0.037
533.176	18750.33	5	78		40	385+	234.8	34422.829	1.5	15672.56	1.5	0.057
533.939	18723.51	5	135		65	350?	-110	34479.99	2.5	15756.53	2.5	0.048

Tablo 4.1 (devam): 400 nm ile 730 nm bölgeleri arasında Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N	Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
534.104	18717.75	5	282		140	227?	-75.3	34390.253	0.5	15672.56	1.5	0.054
534.296	18711.01	6	1741		700	190?	-32.7	18711.029	0.5	0.00	1.5	-0.016
534.930	18688.85	5	960		605	235?	-51.5	33614.869	1.5	14926.061	2.5	0.047
534.971	18687.41	5	1270		490	317?	190.3	18855.734	1.5	168.3371	2.5	0.01
535.026	18685.47	5	101		45	400?	240.5	34567.18	3.5	15881.708	3.5	-0.002
535.574	18666.36	5	530		270	210?	34.7	34422.829	1.5	15756.53	2.5	0.056
535.609	18665.15	5	1894		1160	167?	42.8	33707.034	2.5	15041.902	3.5	0.022
537.533	18598.33	5	720		350	245?	95.3	34479.99	2.5	15881.708	3.5	0.047
539.095	18544.45	2	12		7	280?	84.3	34567.18	3.5	16022.722	2.5	-0.013
539.206	18540.62	5	934		420	257?	120.4	34567.18	3.5	16026.553	4.5	-0.003
539.932	18515.69	2	18		9	380?	184.3	18515.665	1.5	0.00	1.5	0.027
540.272	18504.07	4	107		45	267?	115.4	18504.058	0.5	0.00	1.5	0.01
541.613	18458.25	4	43		20	398?	156.7	34479.99	2.5	16021.779	1.5	0.042
541.640	18457.32	3	29		15	340?	-35.2	34479.99	2.5	16022.722	2.5	0.051
542.231	18437.21	6	37		22	163?	3.4	37148.196	1.5	18711.029	0.5	0.042
542.555	18426.18	4	43		21	490+	309.8	34567.18	3.5	16141.001	2.5	0.002
542.939	18413.14	4	53		28	390?	143.7	34422.829	1.5	16009.743	0.5	0.057
543.294	18401.11	4	75		41	240?	39.9	34422.829	1.5	16021.779	1.5	0.062
543.322	18400.17	4	75		35	360-	-143.2	34422.829	1.5	16022.722	2.5	0.058
543.825	18383.15	4	18		10	715+	445.2	34479.99	2.5	16096.883	1.5	0.048
543.902	18380.56	4	70		35	300?	-29.4	34390.253	0.5	16009.743	0.5	0.054
544.072	18374.82	3	52		32	152?	-11.6	37085.8	0.5	18711.029	0.5	0.044
544.258	18368.53	4	90		48	365-	-156.5	34390.253	0.5	16021.779	1.5	0.051
544.619	18356.36	6	510		260	325+	148.5	34567.18	3.5	16210.814	3.5	-0.004
544.738	18352.36	4	26		18	285?	-257.2	33278.37	3.5	14926.061	2.5	0.055
544.886	18347.36	4	77		34	367+	238.3	18515.665	1.5	168.3371	2.5	0.03
545.133	18339.04	5	175		95	355?	190.3	34479.99	2.5	16141.001	2.5	0.049
545.521	18326	4	38		22	450?	328.4	34422.829	1.5	16096.883	1.5	0.056
546.493	18293.42	2	20		11	227?	-36.2	34390.253	0.5	16096.883	1.5	0.055
546.521	18292.48	3	50		31	350-	-208.4	37148.196	1.5	18855.734	1.5	0.014
546.838	18281.88	4	153		86	183?	25.9	34422.829	1.5	16141.001	2.5	0.057
546.869	18280.84	2	34		27	285?	-84.2	42937.526	1.5	24656.712	0.5	0.023
546.875	18280.62	lc	13		11	185?	-53.4	42937.526	1.5	24656.866	1.5	-0.038
547.217	18269.22	4	214		120	210?	13.1	34479.99	2.5	16210.814	3.5	0.047
547.463	18261	3	37		28	390?	211.2	42917.84	2.5	24656.866	1.5	0.028
548.199	18236.49	6	2140		1560	183?	-61.6	33278.37	3.5	15041.902	3.5	0.027
548.392	18230.08	2	10		6	360-	-101	37085.8	0.5	18855.734	1.5	0.012
548.461	18227.76	6	1434		1050	192?	-15.3	33153.779	2.5	14926.061	2.5	0.044
551.421	18129.93	6	1958		1740	160?	39.7	33055.957	3.5	14926.061	2.5	0.038
551.537	18126.12	3	43		38	213?	103.6	33798.633	2.5	15672.56	1.5	0.046
551.970	18111.9	3	12		6	270?	186.8	33153.779	2.5	15041.902	3.5	0.02
552.049	18109.29	6	1779		1150	200?	97.7	33151.185	4.5	15041.902	3.5	0.007
552.607	18091.03	4	94		42	255?	165.6	33763.534	1.5	15672.56	1.5	0.054
552.636	18090.07	4	47		21	260?	-165.5	33846.568	3.5	15756.53	2.5	0.033
553.647	18057.05	3	2		22	415-	-304.9	36572.741	2.5	18515.665	1.5	-0.028
554.104	18042.14	4	140		20	240?	-128.7	33798.633	2.5	15756.53	2.5	0.039
554.642	18024.65	3	2		24	430-	-326.5	33906.361	4.5	15881.708	3.5	0.002
554.968	18014.07	3	2		20	290?	270.9	33055.957	3.5	15041.902	3.5	0.012
555.040	18011.7	3	2		37	320-	-164.3	36515.732	1.5	18504.058	0.5	0.03
555.184	18007.05	3	2		38	205?	-34.5	33763.534	1.5	15756.53	2.5	0.05
555.359	18001.38	3	2		45	530-	-410	36572.741	2.5	18571.386	2.5	0.025
555.399	18000.09	2	2		9	345-	-303.3	36515.732	1.5	18515.665	1.5	0.02
555.752	17988.65	1	5		5	240?	-204.4	36492.628	0.5	18504.058	0.5	0.078
556.112	17977.01	3	12		16	475?	-166.5	36492.628	0.5	18515.665	1.5	0.048
556.487	17964.89	4	90		120	410?	-304.9	33846.568	3.5	15881.708	3.5	0.035

Tablo 4.1 (devam): 400 nm ile 730 nm bölgeleri arasında Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N	Ar	S/N	Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
557.125	17944.32	3	13		17		502-	-305.9	36515.732	1.5	18571.386	2.5	-0.023
557.975	17916.97	3	17		21		382?	-235.4	33798.633	2.5	15881.708	3.5	0.047
559.134	17879.84	5	106		136		540-	-446.6	33906.361	4.5	16026.553	4.5	0.027
559.336	17873.37	3	70		151		220?	-51.3	38959.131	3.5	21085.829	3.5	0.065
560.416	17838.95	3	67		162		153?	-48	38871.628	2.5	21032.732	2.5	0.05
560.89	17823.87	1	4		4		420?	-402.7	33846.568	3.5	16022.722	2.5	0.028
561.01	17820.05	3	10		13		501?	-425	33846.568	3.5	16026.553	4.5	0.031
561.999	17788.7	1	4		6		145?	131.8	42445.509	2.5	24656.866	1.5	0.053
562.372	17776.9	2	31		43		164?	-91.3	33798.633	2.5	16021.779	1.5	0.042
562.402	17775.96	2	10		13		505-	-369.9	33798.633	2.5	16022.722	2.5	0.044
563.102	17753.84	3	31		43		293+	114.8	33763.534	1.5	16009.743	0.5	0.054
563.484	17741.81	3	31		41		185?	-29.3	33763.534	1.5	16021.779	1.5	0.053
564.636	17705.6	4	54		72		279?	-177.2	33846.568	3.5	16141.001	2.5	0.034
564.758	17701.8	4	22		30		300+	197.2	33798.633	2.5	16096.883	1.5	0.048
564.956	17695.57	5	46		58		523-	-418.5	33906.361	4.5	16210.814	3.5	0.027
566.169	17657.67	3	15		19		230?	-140.4	33798.633	2.5	16141.001	2.5	0.039
566.872	17635.78	3	10		15		497-	-396.9	33846.568	3.5	16210.814	3.5	0.03
567.18	17626.19	7	1280		1530		370?	-256.9	29303.485	5.5	11677.312	4.5	0.015
568.018	17600.2	2	7		11		205?	-105.3	42466.369	1.5	24866.172	1.5	-0.002
568.683	17579.61	7	1870		2270		235?	-133.1	29189.842	4.5	11610.236	3.5	0.007
569.136	17565.62	2	10		17		129?	-4.4	36276.607	1.5	18711.029	0.5	0.041
570.015	17538.54	7	2690		3280		144?	19.7	29096.178	3.5	11557.656	2.5	0.016
570.861	17512.54	6	116		144		352?	-233.4	29189.842	4.5	11677.312	4.5	0.006
571.175	17502.91	7	680		860		355?	202.5	29022.864	2.5	11519.961	1.5	0.011
571.729	17485.96	6	300		387		205?	-96.2	29096.178	3.5	11610.236	3.5	0.015
572.093	17474.82	3	8		12		285?	-158.9	36330.537	2.5	18855.734	1.5	0.013
572.408	17465.22	6	240		320		210?	84.8	29022.864	2.5	11557.656	2.5	0.011
573.519	17431.39	2	9		17		249?	138.7	42445.509	2.5	25014.19	2.5	0.069
573.864	17420.89	1	3		4		305?	-227.2	36276.607	1.5	18855.734	1.5	0.017
573.93	17418.89	4	5		7		230?	-196.5	29096.178	3.5	11677.312	4.5	0.022
574.136	17412.64	4	13		17		169?	-20.8	29022.864	2.5	11610.236	3.5	0.015
580.223	17229.98	1	5		10		300?	10.6	35745.635	2.5	18515.665	1.5	0.012
589.458	16960.04	5	55		110		181?	-39.3	35671.033	1.5	18711.029	0.5	0.038
591.905	16889.92	5	70		165		230?	58.6	35745.635	2.5	18855.734	1.5	0.022
592.191	16881.75	lc	4		9		155?	-86.4	42466.369	1.5	25584.627	2.5	0.011
593.125	16855.19	3	33		78		173?	-187.6	45878.05	3.5	29022.864	2.5	0.004
593.839	16834.92	lc	9		18		130?	-137.2	45931.136	3.5	29096.178	3.5	-0.034
594.048	16829.01	3	45		112		147?	-179.2	45925.12	4.5	29096.178	3.5	0.067
594.266	16822.81	1	9		15		275?	14.5	37855.603	2.5	21032.732	2.5	-0.061
594.531	16815.31	2	5		12		495?	-310.8	35671.033	1.5	18855.734	1.5	0.012
595.213	16796.06	4	57		141		132?	-100.3	45985.87	5.5	29189.842	4.5	0.037
596.145	16769.81	4	34		78		470-	-319.4	37855.603	2.5	21085.829	3.5	0.036
596.819	16750.86	5	60		168		126?	-25.4	46054.3	6.5	29303.485	5.5	0.044
596.85	16750	1	4		9		335?	-76.9	46053.51	5.5	29303.485	5.5	-0.022
596.915	16748.16	4	41		108		255?	135.7	37780.858	1.5	21032.732	2.5	0.031
597.888	16720.9	1	5		15		155?	54.3	42445.509	2.5	25724.658	3.5	0.05
598.35	16707.99	1	5		15		170?	-137.2	45804.138	4.5	29096.178	3.5	0.031
598.84	16694.32	1	11		52		460?	-338	33707.034	2.5	17012.753	2.5	0.042
598.892	16692.88	1	2		10		240?	-187.6	45715.771	2.5	29022.864	2.5	-0.031
599.285	16681.94	3	3		10		250?	136	33707.034	2.5	17025.127	1.5	0.032
601.723	16614.33	1	1		28		135?	-100.3	45804.138	4.5	29189.842	4.5	0.037
602.165	16602.16	3	1		6		345?	-185.5	33614.869	1.5	17012.753	2.5	0.042
602.614	16589.79	5	1		55		300+	204	33614.869	1.5	17025.127	1.5	0.048
603.427	16567.42	2	1		23		195+	46.7	45870.86	5.5	29303.485	5.5	0.044
606.842	16474.19	4	4		4		90?	-86.7	42198.825	3.5	25724.658	3.5	0.024

Tablo 4.1 (devam): 400 nm ile 730 nm bölgeleri arasında Sc I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N	Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
608.591	16426.86	2	5		3	330?	113.9	36666.416	2.5	20239.65	3.5	0.093
610.845	16366.25	3	5		4	215?	82.4	37086.02	1.5	20719.833	1.5	0.06
612.585	16319.76	4	7		7	220?	134.9	37039.559	2.5	20719.833	1.5	0.029
614.622	16265.66	6	25		29	445?	-435.8	33278.37	3.5	17012.753	2.5	0.045
615.119	16252.52	3	10		11	160?	-21.3	36933.899	1.5	20681.41	0.5	0.032
619.369	16141.01	6	147		92	213?	45.2	16141.001	2.5	0.00	1.5	0.005
619.842	16128.68	6	10		10	390?	244	33153.779	2.5	17025.127	1.5	0.03
621.066	16096.89	79	285		180	375?	-257.3	16096.883	1.5	0.00	1.5	0.006
623.978	16021.78	6	21		13	197?	31.2	16021.778	1.5	0.00	1.5	0.005
652.553	15320.18	40	50		63	204?	83.3	40334.288	2.5	25014.19	2.5	0.085
655.783	15244.73	35	9		10	380?	-195.2	36330.537	2.5	21085.829	3.5	0.02
655.819	15243.9	30	21		19	195?	35.7	36276.607	1.5	21032.732	2.5	0.022
655.84	15243.4	1	3		3	245?	181.1	40257.516	1.5	25014.19	2.5	0.077
656.929	15218.13	7	4		4	100?	-110.5	40802.738	2.5	25584.627	2.5	0.022
657.534	15204.14	7	5		5	290-	-134.3	40070.288	0.5	24866.172	1.5	0.025
657.811	15197.75	10	5		7	265+	189.3	40063.875	1.5	24866.172	1.5	0.043
662.021	15101.09	21	7		7	95?	-44.5	40825.755	3.5	25724.658	3.5	-0.006
664.281	15049.73	8	3		3	355?	275.7	40063.875	1.5	25014.19	2.5	0.041
671.46	14888.8	40	23		33	125?	117.3	39754.983	2.5	24866.172	1.5	-0.008
673.076	14853.07	18	10		15	130?	-36.7	47604.55	2.5	32751.474	3.5	-0.002
673.717	14838.92	11	5		6	70?	-36.5	47535.772	1.5	32696.808	2.5	-0.042
673.787	14837.39	465	270		405	135?	13.2	40562.044	4.5	25724.658	3.5	0
673.944	14833.94	360	220		335	135?	5.5	40418.538	3.5	25584.627	2.5	0.028
675.108	14808.36	6	3		3	140?	87.9	45514.98	0.5	30706.696	1.5	0.08
678.628	14731.55	1	3		6	70?	-60.5	45947.341	1.5	31215.78	2.5	-0.009
679.376	14715.32	6	6		9	165?	-80.7	45931.136	3.5	31215.78	2.5	-0.036
679.437	14714.01	1	3		4	195?	-112.1	45886.564	2.5	31172.621	1.5	0.066
679.462	14713.47	5	3		3	280?	-63.9	45988.912	4.5	31275.4	3.5	-0.042
679.727	14707.74	7	5		9	121?	-57.1	45983.203	2.5	31275.4	3.5	-0.067
679.959	14702.72	10	4		4	310?	-51.8	46053.51	5.5	31350.789	4.5	0.001
680.368	14693.88	14	9		13	151?	13	40418.538	3.5	25724.658	3.5	0.003
680.461	14691.86	17	8		10	133?	-17.2	46042.651	3.5	31350.789	4.5	-0.003
681.711	14664.93	345	90		90	167?	-85.1	35346.32	0.5	20681.41	0.5	0.023
681.948	14659.84	485	145		158	227?	94.8	35745.635	2.5	21085.829	3.5	0.032
682.95	14638.32	335	140		162	147?	47.9	35671.033	1.5	21032.732	2.5	0.014
683.501	14626.52	640	175		175	155?	-3.9	35346.32	0.5	20719.833	1.5	0.034
687.422	14543.09	13	8		9	195?	-112.1	45715.771	2.5	31172.621	1.5	-0.058
687.734	14536.49	18	14		20	141?	-80.7	45752.269	3.5	31215.78	2.5	-0.003
688.1	14528.76	26	16		22	160?	-63.9	45804.138	4.5	31275.4	3.5	0.025
688.508	14520.14	27	13		16	223?	-21.6	45870.86	5.5	31350.789	4.5	0.074
691.453	14458.31	1	4		5	125?	-255.7	47514.21	3.5	33055.957	3.5	0.059
692.401	14438.52	6	5		7	95?	-82.6	47589.719	4.5	33151.185	4.5	-0.015
694.734	14390.02	1	4		4	60?	-60.5	45605.779	1.5	31215.78	2.5	0.024
696.165	14360.46	11	8		14	175?	-173.3	47514.21	3.5	33153.779	2.5	0.03
698.555	14311.32	8	8		13	178?	76.7	47589.719	4.5	33278.37	3.5	-0.031
713.81	14005.48	19	14		20	275-	-157.4	38871.628	2.5	24866.172	1.5	0.023
716.903	13945.04	27	13		17	375+	241.3	38959.131	3.5	25014.19	2.5	0.1
725.757	13774.93	14	11		18	125?	43	45125.673	4.5	31350.789	4.5	0.042
727.547	13741.02	7	5		10	130?	50.8	45016.415	3.5	31275.4	3.5	0.009
730.059	13693.76	4	4		9	125?	-11.5	44909.52	2.5	31215.78	2.5	0.015

Tablo 4.1'deki sütunların açıklamaları sırası ile; λ_{hava} nm biriminde çizginin havadaki dalga boyu, σ_{deneysel} cm^{-1} biriminde çizginin vakumdaki dalga sayısı, I literatürdeki şiddetleri

tanımlamaktadır. Şiddet kolonunda yer alan I_c terimi bu çalışmada ilk defa belirlenmiş ve sınıflandırılması da ilk defa bu çalışmada yapılmış çizgiler için kullanıldı. Sırası ile Ar ve Ne ile alınan spektrumda S/N oranı, W spektral çizginin mK biriminde genişlik değeri ($1\text{mK} = 0.001\text{ cm}^{-1}$) burada eğer çizgi simetrik değil ve şiddet, frekans ile azalan yönde dağılıma sahip ise “-” sembolü, artan yönde bir dağılıma sahip ise “+” sembolü, eğer net azalış ve/veya artış olmayan simetrik bir yapı varsa “?” sembolü kullanıldı. ΔW aşırı ince yapı bileşenlerinin mK cinsinden genişlik değeridir. Bu kolondaki “-” işaretinin anlamı W kolonundaki ile aynıdır. Sonraki kolonlarda sırasıyla üst ve alt enerji seviyelerinin cm^{-1} cinsinden NIST veri tabanından alınan değeri, J kuantum sayıları, son kolonda ise $\Delta\sigma = \sigma_{\text{vakum}} - |E_{\text{üst}} - E_{\text{alt}}|$ değeri yer almaktadır.

4.1.2. Bir kez iyonlaşmış skandiyuma (Sc II) ait çizgi sınıflandırılması

Toplam 26 tane çizginin sınıflandırılması bir kez iyonlaşmış skandiyum (Sc II) olarak yapıldı. Tablo 4.2’de sınıflandırılan bu çizgiler verildi.

Tablo 4.2: 400 nm -730 nm spektral bölgeleri arasında Sc II olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
401.448	24902.77	13	8	5	192?	127.3	27443.71	2	2540.95	2	0.011
424.683	23540.37	12	1140	940	210?	46.1	26081.34	2	2540.95	2	-0.024
429.477	23277.60	13	23	17	168?	-9.8	28161.17	3	4883.57	3	-0.004
430.571	23218.45	15	19	14	220?	-88.1	28021.29	2	4802.87	2	0.026
431.408	23173.41	17	426	298	171?	46.1	28161.17	3	4987.79	4	0.028
432.073	23137.71	15	325	230	166?	-8.7	28021.29	2	4883.57	3	-0.01
432.499	23114.94	13	170	128	200?	-15.9	27917.78	1	4802.87	2	0.025
435.460	22957.75	12	15	12	168?	25.2	27841.35	4	4883.57	3	-0.03
437.446	22853.56	16	205	150	193?	67.7	27841.35	4	4987.79	4	-0.002
438.481	22799.62	12	17	12	212?	-18.5	27602.45	3	4802.87	2	0.037
440.039	22718.89	10	155	115	201?	-73.9	27602.45	3	4883.57	3	0.01
441.555	22640.89	10	111	81	255?	40.9	27443.71	2	4802.87	2	0.047
443.135	22560.14	4	6	5	150?	120.3	27443.71	2	4883.57	3	0.002
467.040	21405.45	18	60	62	210?	47.4	32349.98	3	10944.56	2	0.026
503.101	19871.18	17	202	192	205?	-6.7	30815.7	1	10944.56	2	0.038
523.981	19079.34	16	80	55	170?		30815.7	1	11736.36	0	-0.001
552.681	18088.61	16	174	58	176?	29.8	32349.98	3	14261.32	4	-0.054
564.098	17722.51	13	9	15	226?	63.4	29823.93	2	12101.5	1	0.081
565.786	17669.61	15	31	54	162?	71.5	29823.93	2	12154.42	2	0.104
565.833	17668.16	13	6	14	156?		29742.16	1	12074.1	0	0.095
566.714	17640.69	12	5	10	127?	97.2	29742.16	1	12101.5	1	0.031
566.903	17634.81	13	11	19	150?		29736.27	0	12101.5	1	0.042
568.419	17587.79	15	9	16	266?	-317.6	29742.16	1	12154.42	2	0.051
655.022	15262.45	12	9	3	75?	-91	75610.83	5	60348.46	4	0.079
655.868	15242.76	12	29	10	151?	-133.9	75699.88	6	60457.12	5	0.002
660.458	15136.82	14	6	8	85?	35.3	26081.34	2	10944.56	2	0.043

Bu tablonun sütunlarındaki tanımlanan büyüklüklerin bilgisi Tablo 4.1 ile aynıdır.

Tablo 4.3'te Sc I veya Sc II olup olmadığına karar verilemeyen metal çizgileri Sc I veya Sc II olarak tanımlandı. Bu çizgiler, Ar ve Ne asal gazları kullanılarak alınan her iki spektrumda da görüldü. Yani bu geçiş kesinlikle metal çizgisine aittir. Sc'a ait bu çizgiler ilk defa bu çalışmada verildi.

Tablo 4.3: 400 nm -730 nm bölgeleri arasında Sc I veya Sc II olarak tanımlanan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm ⁻¹)	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)
401.966	24870.68	7	7	320?
402.263	24852.36	4	11	160?
403.195	24794.89	9	10	240?
406.264	24607.60	6	21	150?
413.674	24166.80	19	15	200?
427.040	23410.40	12	13	307?
437.335	22859.36	6	8	200?
439.138	22765.50	7	7	160?
450.742	22179.42	5	9	125?
450.749	22179.07	8	11	150?
452.906	22073.47	21	30	275?
454.299	22005.75	39	29	240?
455.267	21958.97	6	11	284?
456.272	21910.61	13	18	148?
457.680	21843.22	7	10	135?
465.112	21494.20	8	20	215?
510.554	19581.10	37	80	360?
513.151	19482.02	6	6	465?
515.323	19399.90	80	155	155?
521.820	19158.37	150	290	145?
529.251	18889.39	5	5	190?
531.193	18820.32	9	7	235?
531.834	18797.64	5	5	160?
532.572	18771.59	7	6	340?
548.677	18220.58	4	4	85?
578.213	17289.86	4	15	510-
603.212	16573.33	11	16	100?
632.815	15798.04	6	3	35?
632.826	15797.76	14	8	60?
632.891	15796.15	14	8	80?
660.015	15146.98	5	6	145?
671.767	14882.01	18	29	128?

4.2. TULYUM ELEMENTİNE AİT BULGULAR

Tez çalışmasının bu bölümünde nötral tulyum (Tm I) ve bir kez iyonlaşmış tulyumun (Tm II) literatürdeki eksik çizgi sınıflandırılmasının tamamlanması ve deneysel olarak mevcut olmayan manyetik dipol aşırı ince yapı sabitlerinin belirlenmesi amaçlandı.

Tulyumun çekirdek spininin $I = 1/2$ olmasından dolayı hfs yarılmalarında yalnızca manyetik dipol etkileşimleri mevcut olup elektrik kuadrupol etkileşmesi yoktur. Ayrıca manyetik dipol moment değeri de oldukça küçüktür. Sonuçta elemente ait Tm-FT spektrumunda gözlenen spektrumlar sadece üç veya dört aşırı ince yapı geçişini içeren ve genellikle tek pikli yapılardır. Bu durum ise hem çizgi sınıflandırılmasının yapılmasında hem de hfs sabitlerinin hassas olarak bulunmasında zorluk yaratmaktadır. Bu nedendir ki kısım 3.6.1. ve 3.6.2’de detayları verilen bazı kritik ölçütler belirlenmiştir ve böylece çizginin sınıflandırılmasında, çizgi ağırlık merkezinin belirlenmesinde ve hfs sabitlerinin bulunmasında gereken doğruluk sağlanmıştır.

4.2.1. Nötral tulyuma (Tm I) ait çizgi sınıflandırılması

Tm elementine ait 330 nm – 400 nm ve 700 nm – 1000 nm dalga boyu aralığında yapılan FT spektrum incelemesi yapıldı. Tm-FT spektrumunda 400 nm – 700 nm dalga boyu arası daha önce inlenmiş olduğundan bu çalışma kapsamına dahil edilmedi. Çizgi analizi sonucunda toplam 953 spektral çizgi analiz edildi. Bu çizgilerden 90 tanesi ilk defa bu çalışmada olmak üzere 571 tanesi Tm I olarak tanımlandı. Tablo 4.4’te Tm I olarak sınıflandırılan çizgilere ait liste yer almaktadır.

Tablo 4.4: 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm ⁻¹)	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm ⁻¹)	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm ⁻¹)	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm ⁻¹)
334.190	29914.53	10	5	9	70?	11.4	43034.166	3.5	13119.610	4.5	-0.025
334.374	29898.05	1c	4	4	95?	29.1	45485.87	5.5	15587.811	5.5	-0.008
334.999	29842.27	230	95	95	125?	-6.4	42961.884	5.5	13119.610	4.5	-0.003
335.460	29801.25	1c	4	4	125-	-78.1	45389.06	6.5	15587.811	5.5	0.001
336.378	29719.88	250	12	13	130?	29.1	42839.493	4.5	13119.610	4.5	0.000
336.591	29701.13	1c	21	28	140?	11.9	45289.01	5.5	15587.811	5.5	-0.067
337.158	29651.17	1c	4	5	85-	-22.3	42770.792	4.5	13119.610	4.5	-0.016
337.485	29622.41	1c	3	4	60?	19.2	42742.008	3.5	13119.610	4.5	0.010
338.054	29572.57	1700	40	40	140?	3.3	47027.45	6.5	17454.818	6.5	-0.061
338.068	29571.32	1200	70	74	165+	54.5	38342.57	3.5	8771.243	2.5	-0.007
338.509	29532.87	1c	92	92	115?	4.5	44803.868	6.5	15271.002	7.5	0.006
339.084	29482.79	1c	4	4	85?	13.1	45070.577	4.5	15587.811	5.5	0.028
339.143	29477.62	1c	8	7	95?	55.3	45934.52	7.5	16456.913	8.5	0.012
339.180	29474.45	1c	3	3	120?	19.8	42594.049	4.5	13119.610	4.5	0.015

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
339.224	29470.59	lc	8	8	105?	12.1	45058.379	5.5	15587.811	5.5	0.020
339.319	29462.37	1700	70	70	120?	6.4	42581.974	5.5	13119.610	4.5	0.005
339.554	29441.92	lc	26	26	145?	15.6	42561.536	4.5	13119.610	4.5	-0.001
339.777	29422.62	lc	11	12	105?	32.7	48115.671	6.5	18693.074	7.5	0.026
339.787	29421.75	650	66	66	110?	7.6	42541.367	5.5	13119.610	4.5	-0.008
340.090	29395.55	lc	5	6	60?	26.6	46850.44	5.5	17454.818	6.5	-0.067
340.596	29351.87	3600	44	52	165?	50.9	38123.02	3.5	8771.243	2.5	0.093
340.965	29320.13	lc	6	6	60?	4.5	44591.133	6.5	15271.002	7.5	0.004
341.005	29316.69	850	528	243	135?	33.2	29316.69	4.5	0.000	3.5	0.004
341.190	29300.82	300	11	11	150?	390	44571.82	5.5	15271.002	7.5	0.001
341.259	29294.85	340	100	100	135?	8	44565.85	7.5	15271.002	7.5	0.004
341.769	29251.10	430	18	24	155?	36.3	42370.718	3.5	13119.61	4.5	-0.006
341.863	29243.10	1000	27	33	130?	0.5	38014.37	2.5	8771.243	2.5	-0.023
341.907	29239.30	lc	4	4	100?	37.1	46694.096	6.5	17454.818	6.5	0.023
342.179	29216.07	lc	31	25	100?	9.4	44803.868	6.5	15587.811	5.5	0.011
342.256	29209.52	lc	11	9	95?	41	37980.69	2.5	8771.243	2.5	0.076
342.450	29193.00	lc	18	23	120?	11.7	47886.05	7.5	18693.074	7.5	0.027
342.526	29186.47	lc	3	3	105?	78.1	44774.242	4.5	15587.811	5.5	0.038
342.846	29159.27	lc	66	70	125?	8.1	44747.009	5.5	15587.811	5.5	0.069
342.933	29151.87	340	107	92	135?	27.3	45608.78	7.5	16456.913	8.5	0.006
342.982	29147.72	lc	19	22	100?	10.6	44418.695	6.5	15271.002	7.5	0.025
343.039	29142.89	lc	24	24	120?	8.4	46597.694	6.5	17454.818	6.5	0.009
343.942	29066.32	lc	7	7	90?	12.8	47759.379	6.5	18693.074	7.5	0.014
344.299	29036.21	lc	49	54	140?	3.4	44307.188	6.5	15271.002	7.5	0.020
344.566	29013.68	990	29	29	140?	30.1	42133.263	3.5	13119.610	4.5	0.023
344.654	29006.27	lc	50	50	115?	25.3	46461.06	7.5	17454.818	6.5	0.026
344.689	29003.32	lc	6	6	65?	8.2	44591.133	6.5	15587.811	5.5	-0.002
344.735	28999.48	1700	82	82	115?	5.6	42119.08	5.5	13119.610	4.5	0.008
345.301	28951.91	lc	19	19	150?	35	47644.931	6.5	18693.074	7.5	0.055
345.450	28939.43	lc	50	47	135?	36	44210.42	7.5	15271.002	7.5	0.014
345.473	28937.54	lc	25	24	135?	22.4	47630.53	7.5	18693.074	7.5	0.083
345.855	28905.57	lc	18	18	115?	10.1	47759.379	6.5	18853.823	5.5	0.010
346.751	28830.91	210	90	90	115?	23.3	44418.695	6.5	15587.811	5.5	0.022
347.103	28801.63	60r	43	36	125?	36	44072.61	6.5	15271.002	7.5	0.021
347.173	28795.84	40	21	21	155?	49.9	44383.637	5.5	15587.811	5.5	0.011
347.229	28791.16	300	3	3	75?	12	47644.931	6.5	18853.823	5.5	0.051
347.497	28768.98	40	9	9	125?	16.7	47759.379	6.5	18990.406	5.5	0.006
347.581	28762.04	30h	13	13	130?	31.9	41881.739	4.5	13119.610	4.5	-0.093
347.669	28754.77	340	171	143	150?	11.6	41874.369	5.5	13119.610	4.5	0.011
347.982	28728.93	7	3	3	90?	1.9	44316.715	4.5	15587.811	5.5	0.028
348.065	28722.03	20	15	15	105?	12.3	41841.602	3.5	13119.610	4.5	0.033
348.097	28719.40	340	90	90	105?	12.9	44307.188	6.5	15587.811	5.5	0.023
348.226	28708.78	10h	11	11	105?	8.6	46163.587	5.5	17454.818	6.5	0.010
348.232	28708.31	20	28	22	140?	13.9	43979.308	6.5	15271.002	7.5	0.001
348.738	28666.65	420	191	150	115?	18.1	41786.249	4.5	13119.610	4.5	0.012
348.952	28649.02	1000a	39	39	125?	15.7	48115.671	6.5	19466.663	6.5	0.011
349.171	28631.06	200	27	25	115?	25.3	47484.84	5.5	18853.823	5.5	0.041
349.634	28593.14	40	24	22	115?	8.1	44180.935	5.5	15587.811	5.5	0.011

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
349.945	28567.78	870	79	65	120?	27.6	41687.404	5.5	13119.610	4.5	-0.014
350.092	28555.77	1000	166	149	245-	-82.4	28555.799	3.5	0.000	3.5	-0.024
350.450	28526.57	20h	25	25	130?	36.7	41646.129	3.5	13119.610	4.5	0.053
350.515	28521.26	40r	21	24	115?	16.4	47214.313	6.5	18693.074	7.5	0.016
350.845	28494.46	100h	15	15	130?	43.3	47484.84	5.5	18990.406	5.5	0.029
351.027	28479.72	40	10	10	170-	-58.6	45934.52	7.5	17454.818	6.5	0.013
351.313	28456.54	400	34	34	125?	32.3	41576.146	4.5	13119.610	4.5	0.003
351.373	28451.68	100a	34	38	120?	29.2	45408.656	3.5	16957.006	3.5	0.029
351.400	28449.51	530	115	95	115?	27.6	41569.114	5.5	13119.610	4.5	0.001
351.411	28448.55	11a	442	358	130?	24.8	28448.585	2.5	0.000	3.5	-0.030
351.772	28419.41	100r	62	62	115?	29.3	47886.05	7.5	19466.663	6.5	0.026
351.845	28413.46	20	21	21	105?	29.8	44001.272	4.5	15587.811	5.5	-0.004
351.943	28405.59	60r	84	84	145?	36.3	41525.2	3.5	13119.610	4.5	-0.005
351.949	28405.11	3	9	9	115?	17.6	45147.3	4.5	16742.237	3.5	0.046
352.176	28386.81	80	39	39	120?	26.1	43974.645	5.5	15587.811	5.5	-0.025
352.562	28355.69	200r	51	54	120?	117.6	45810.508	5.5	17454.818	6.5	0.002
352.717	28343.26	50r	46	46	145?	40	43614.261	7.5	15271.002	7.5	0.002
352.828	28334.32	30h	12	12	105?	7	47027.45	6.5	18693.074	7.5	-0.060
352.902	28328.36	20	14	14	110?	17.4	45070.577	4.5	16742.237	3.5	0.025
354.208	28223.91	60r	22	26	170?	49.8	47214.313	6.5	18990.406	5.5	0.004
354.435	28205.86	40r	22	22	145?	46.5	45660.65	6.5	17454.818	6.5	0.024
354.630	28190.34	10	7	9	80?	28.7	45147.3	4.5	16957.006	3.5	0.041
354.749	28180.89	60	34	34	125?	20.6	45635.737	5.5	17454.818	6.5	-0.033
354.781	28178.32	30	10	10	135?	46	47644.931	6.5	19466.663	6.5	0.051
354.921	28167.24	60r	53	50	140?	25.5	43438.251	6.5	15271.002	7.5	-0.007
354.962	28163.95	60	15	15	140?	32	47630.53	7.5	19466.663	6.5	0.082
355.089	28153.91	40	8	8	85?	18.6	45608.78	7.5	17454.818	6.5	-0.055
355.582	28114.91	60r	190	162	135?	33.3	44571.82	8.5	16456.913	8.5	0.002
355.657	28108.94	80r	43	48	120?	24.7	44565.85	7.5	16456.913	8.5	0.004
355.733	28102.94	80	65	65	120?	16	45557.72	7.5	17454.818	6.5	0.036
355.930	28087.43	6	3	3	150?	43.1	43675.258	4.5	15587.811	5.5	-0.020
356.091	28074.67	340	210	178	110?	18.6	46767.71	8.5	18693.074	7.5	0.031
356.210	28065.30	20	12	9	120?	35.5	45408.656	3.5	17343.374	3.5	0.022
356.387	28051.35	420	1165	670	135?	26.9	28051.37	2.5	0.000	3.5	-0.023
356.633	28032.04	5	5	5	130?	51.8	44774.242	4.5	16742.237	3.5	0.030
356.735	28023.98	420	1165	780	210-	-102.8	28024.01	4.5	0.000	3.5	-0.033
356.760	28022.05	20	7	7	100?	27.9	45635.737	5.5	17613.659	4.5	-0.031
356.809	28018.22	Lc	11	11	100?	10	47484.84	5.5	19466.663	6.5	0.044
356.815	28017.72	20r	56	50	120?	24.6	43288.722	6.5	15271.002	7.5	0.002
356.981	28004.72	100r	194	172	125?	28.6	41124.334	4.5	13119.610	4.5	0.000
357.028	28001.05	lc	5	5	110?	40.8	46694.096	6.5	18693.074	7.5	0.032
357.172	27989.76	8	9	9	140?	7.8	41109.364	4.5	13119.610	4.5	0.011
357.482	27965.43	20	24	20	110?	25.1	41085.039	3.5	13119.610	4.5	0.003
357.529	27961.77	80r	189	159	115?	37.6	41081.384	5.5	13119.610	4.5	-0.008
357.565	27959.00	80r	20	20	165-	-76.4	41078.537	4.5	13119.610	4.5	0.069
357.593	27956.78	4	4	4	110?	29.8	43544.574	4.5	15587.811	5.5	0.020
357.882	27934.21	lc	3	3	155?	34	45389.06	6.5	17454.818	6.5	-0.036
358.177	27911.19	40	22	22	110?	23.8	44868.173	4.5	16957.006	3.5	0.025
358.261	27904.63	20	10	10	110?	23.4	46597.694	6.5	18693.074	7.5	0.012

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
358.343	27898.25	100r	76	76	130?	36.5	44855.24	2.5	16957.006	3.5	0.013
358.414	27892.77	10	20	20	110?	29.6	41012.387	3.5	13119.610	4.5	-0.004
358.607	27877.75	300r	135	135	180-	-70.7	44334.66	9.5	16456.913	8.5	0.005
358.835	27860.02	30	13	13	250-	-127.9	43447.878	5.5	15587.811	5.5	-0.048
358.912	27854.07	7	4	4	85?	32.4	45467.723	4.5	17613.659	4.5	0.006
358.959	27850.43	40	32	32	150?	38.4	43438.251	6.5	15587.811	5.5	-0.012
359.073	27841.55	200r	152	152	125?	25.2	43429.363	4.5	15587.811	5.5	-0.006
359.089	27840.29	8	7	7	110?	37.7	46694.096	6.5	18853.823	5.5	0.021
359.336	27821.15	20	15	15	145?	40.1	43408.96	5.5	15587.811	5.5	0.002
359.386	27817.27	20	21	21	115?	29.5	44774.242	4.5	16957.006	3.5	0.032
359.558	27803.96	4	3	3	145?	67.8	45147.3	4.5	17343.374	3.5	0.038
359.861	27780.55	200r	151	133	170?	44	43051.55	7.5	15271.002	7.5	0.001
360.024	27768.01	30	26	26	125?	31.7	46461.06	7.5	18693.074	7.5	0.026
360.440	27735.96	85	47	35	125?	0.3	40855.58	4.5	13119.610	4.5	-0.008
360.725	27714.03	20	10	13	100?	18.2	44456.23	3.5	16742.237	3.5	0.038
360.896	27700.91	10	17	17	145+	31.4	43288.722	6.5	15587.811	5.5	0.004
361.482	27656.03	20	10	8	120?	16.5	45408.656	3.5	17752.634	2.5	0.010
361.636	27644.27	20	20	25	145?	20.3	40763.892	3.5	13119.610	4.5	-0.017
361.704	27639.02	10	17	15	150?	22	42910.043	6.5	15271.002	7.5	-0.025
362.235	27598.53	10	20	12	245?	26.1	43186.335	5.5	15587.811	5.5	0.002
362.420	27584.40	200r	255	205	120?	1.4	42855.44	7.5	15271.002	7.5	-0.041
362.732	27560.73	5	3	3	105?	5	47027.45	6.5	19466.663	6.5	-0.059
363.089	27533.62	4	3	5	95?	104.9	45147.3	4.5	17613.659	4.5	-0.021
363.376	27511.87	20	13	20	130?	11.2	44855.24	2.5	17343.374	3.5	0.004
363.543	27499.26	lc	7	7	115?	29.5	44456.23	3.5	16957.006	3.5	0.037
363.841	27476.69	380	400	320	135?	2.4	40596.302	3.5	13119.610	4.5	-0.007
364.043	27461.43	3	6	5	85?	1.2	44418.396	3.5	16957.006	3.5	0.035
364.103	27456.95	10	10	10	100?	20.1	45070.577	4.5	17613.659	4.5	0.027
364.295	27442.50	100r	158	146	95?	0.2	43030.299	4.5	15587.811	5.5	0.010
364.670	27414.22	1800	350	280	150?	12.3	40533.825	3.5	13119.610	4.5	0.003
364.858	27400.13	5	6	6	110?	34.2	44142.395	3.5	16742.237	3.5	-0.029
364.886	27398.05	350	200	165	125?	1.9	40517.661	4.5	13119.610	4.5	-0.004
365.073	27383.95	50h	13	13	125?	9.6	46221.416	5.5	18837.385	4.5	-0.080
365.077	27383.70	lc	6	6	80?	12	46850.44	5.5	19466.663	6.5	-0.076
365.205	27374.07	50r	50	58	165?	9.9	42961.884	5.5	15587.811	5.5	0.002
365.397	27359.71	30	46	46	165?	7.1	44316.715	4.5	16957.006	3.5	0.004
365.898	27322.23	20	31	25	205?	38.4	42910.043	6.5	15587.811	5.5	0.001
366.102	27307.00	40	37	37	110?	12.1	44263.974	3.5	16957.006	3.5	0.030
366.300	27292.26	90	54	64	125?	2.6	44747.009	5.5	17454.818	6.5	0.065
366.845	27251.69	30	40	38	120?	38.1	42839.493	4.5	15587.811	5.5	0.013
367.172	27227.46	10	7	7	170?	38	46694.096	6.5	19466.663	6.5	0.026
367.503	27202.93	190	125	100	130?	13.6	40322.536	4.5	13119.610	4.5	0.007
367.772	27182.99	40r	77	75	125?	11.4	42770.792	4.5	15587.811	5.5	0.006
368.120	27157.35	20	18	17	130?	36.7	43614.261	7.5	16456.913	8.5	0.000
368.405	27136.32	5	7	5	80?	1.4	44591.133	6.5	17454.818	6.5	0.002
368.414	27135.67	6	12	10	145?	40.7	42406.656	6.5	15271.002	7.5	0.011
368.444	27133.43	10	6	8	80?	104.9	44747.009	5.5	17613.659	4.5	0.077
368.477	27131.04	20	18	18	110?	1.7	46597.694	6.5	19466.663	6.5	0.009

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
368.724	27112.87	10	5	5	145?	22.2	44456.23	3.5	17343.374	3.5	0.010
368.749	27111.03	20	14	16	145?	16	44565.85	7.5	17454.818	6.5	0.002
368.874	27101.82	10h	5	5	95?	21.8	46850.44	5.5	19748.543	4.5	-0.074
369.050	27088.90	60	33	26	145?	0.3	40208.499	4.5	13119.610	4.5	0.007
369.659	27044.26	5	3	3	95?	38.8	44001.272	4.5	16957.006	3.5	-0.007
370.179	27006.25	40r	52	52	210?	58	42594.049	4.5	15587.811	5.5	0.010
370.342	26994.42	9	7	7	125?	26.1	46461.06	7.5	19466.663	6.5	0.020
370.626	26973.73	20	24	24	150?	9.8	42561.536	4.5	15587.811	5.5	0.005
370.634	26973.11	4	3	3	95?	70.4	45810.508	5.5	18837.385	4.5	-0.016
370.710	26967.62	30	28	28	150?	44.4	45660.65	6.5	18693.074	7.5	0.043
370.903	26953.55	20	19	19	140?	1.9	42541.367	5.5	15587.811	5.5	-0.003
371.066	26941.69	20	44	38	175?	13.6	40061.324	3.5	13119.610	4.5	-0.021
371.244	26928.83	5	4	4	95?	41.4	44383.637	5.5	17454.818	6.5	0.009
371.357	26920.62	10	10	10	125?	7.2	44263.974	3.5	17343.374	3.5	0.023
371.792	26889.12	7700	2330	1800	208+	18.1	26889.125	4.5	0.000	3.5	-0.008
372.300	26852.39	5	3	3	85?	1.4	44307.188	6.5	17454.818	6.5	0.021
372.390	26845.96	20	15	12	115?	2.2	43588.18	3.5	16742.237	3.5	0.020
372.748	26820.16	20	7	7	95?	116.3	45810.508	5.5	18990.406	5.5	0.054
372.996	26802.34	5	7	7	95?	98.2	43544.574	4.5	16742.237	3.5	0.001
373.042	26799.02	10	6	6	135?	81.8	44142.395	3.5	17343.374	3.5	0.000
373.281	26781.88	30	10	10	65?	1.3	45635.737	5.5	18853.823	5.5	-0.036
373.647	26755.62	40	27	27	165?	40	44210.42	7.5	17454.818	6.5	0.016
373.994	26730.78	15	7	9	105?	23.6	44483.351	1.5	17752.634	2.5	0.065
374.059	26726.14	5	4	4	80?	3.4	44180.935	5.5	17454.818	6.5	0.021
374.170	26718.24	200	54	52	170?	12.1	43675.258	4.5	16957.006	3.5	-0.015
374.606	26687.12	20	6	6	105?	28.2	43429.363	4.5	16742.237	3.5	-0.004
375.181	26646.24	1700	1360	700	200?	75.7	41917.235	6.5	15271.002	7.5	0.005
375.381	26632.04	10	6	6	80?	0.7	45485.87	5.5	18853.823	5.5	-0.012
375.393	26631.20	20	6	6	105?	2.8	43588.18	3.5	16957.006	3.5	0.021
375.582	26617.81	4	3	3	65?	36.4	44072.61	6.5	17454.818	6.5	0.019
375.909	26594.63	40	21	21	125?	36.7	43051.55	7.5	16456.913	8.5	-0.005
375.983	26589.42	40	105	70	120?	2.4	39709.038	5.5	13119.610	4.5	-0.003
376.296	26567.28	10	7	6	85?	24.9	44180.935	5.5	17613.659	4.5	0.004
376.574	26547.67	20	8	8	85?	23.6	44300.233	2.5	17752.634	2.5	0.070
376.807	26531.28	200	22	22	115?	2.1	42119.08	5.5	15587.811	5.5	0.011
377.386	26490.53	20	22	20	105?	2.5	35261.762	2.5	8771.243	2.5	0.006
377.654	26471.77	30	10	10	85?	2.8	43428.78	3.5	16957.006	3.5	0.000
377.943	26451.54	60h	10	12	75?	70.4	45289.01	5.5	18837.385	4.5	-0.087
378.059	26443.39	20	10	10	65?	1.6	39563.003	5.5	13119.610	4.5	0.002
378.115	26439.49	850	190	185	240?	70.8	26439.491	3.5	0.000	3.5	0.000
378.255	26429.72	30	5	5	85?	23.6	44182.324	2.5	17752.634	2.5	0.027
378.702	26398.52	120r	27	25	130?	2	42855.44	7.5	16456.913	8.5	-0.008
379.131	26368.62	340	18	17	105?	3.6	39488.236	4.5	13119.610	4.5	-0.001
379.764	26324.68	40	8	8	105?	1.9	39444.295	4.5	13119.610	4.5	-0.001
379.854	26318.43	770	97	65	105?	28.5	35089.67	1.5	8771.243	2.5	-0.001
379.971	26310.32	30	3	3	95?	42.2	43052.541	3.5	16742.237	3.5	0.015
380.208	26293.94	700	17	17	140-	-14	41881.739	4.5	15587.811	5.5	0.007
380.772	26254.98	600	82	70	130?	10.5	35026.22	2.5	8771.243	2.5	0.003

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
382.638	26126.92	2900	40	35	175-	-66.3	26126.907	2.5	0.000	3.5	0.014
384.087	26028.38	290	40	35	125?	2	41299.37	8.5	15271.002	7.5	0.015
384.752	25983.42	100r	6	6	95?	15.4	43438.251	6.5	17454.818	6.5	-0.008
385.846	25909.70	100	8	8	75?	2.4	44747.009	5.5	18837.385	4.5	0.078
386.397	25872.77	70	7	7	75?	6.4	44565.85	7.5	18693.074	7.5	-0.001
386.979	25833.90	50	15	15	140?	3.3	43288.722	6.5	17454.818	6.5	-0.004
387.197	25819.30	60	10	10	105?	46.5	42561.536	4.5	16742.237	3.5	-0.001
387.252	25815.69	200	12	12	105?	26.5	43429.363	4.5	17613.659	4.5	-0.009
387.280	25813.79	60	13	13	105?	3.8	42770.792	4.5	16957.006	3.5	0.002
387.934	25770.27	80	12	14	150?	20.2	43113.646	2.5	17343.374	3.5	-0.004
388.060	25761.92	30	4	4	65?	31.2	47759.379	6.5	21997.473	5.5	0.009
388.125	25757.60	170	32	32	100?	16	38877.211	5.5	13119.610	4.5	-0.004
388.139	25756.66	20	3	3	65?	36.3	44747.009	5.5	18990.406	5.5	0.057
388.313	25745.12	6800	1240	960	230?	9.4	25745.117	2.5	0.000	3.5	0.004
388.607	25725.65	20	4	4	95?	20	44418.695	6.5	18693.074	7.5	0.027
388.735	25717.20	5400	1265	800	225?	20.5	25717.197	3.5	0.000	3.5	0.003
388.856	25709.16	30	11	11	120?	22.2	43052.541	3.5	17343.374	3.5	-0.008
389.190	25687.10	5	6	3	95?	38.5	41274.9	6.5	15587.811	5.5	0.009
389.599	25660.13	40	6	7	95?	62.5	45408.656	3.5	19748.543	4.5	0.021
389.661	25656.04	4400	1600	1100	125?	8.8	25656.019	2.5	0.000	3.5	0.016
389.950	25637.05	20	7	7	100?	35.5	42594.049	4.5	16957.006	3.5	0.009
390.128	25625.37	4	3	3	65?	98.2	42367.61	2.5	16742.237	3.5	-0.007
390.227	25618.88	20	7	7	75?	37.1	44456.23	3.5	18837.385	4.5	0.035
390.564	25596.75	lc	6	3	75?	50.7	43051.55	7.5	17454.818	6.5	0.016
390.932	25572.68	10	7	7	70?	24.9	43186.335	5.5	17613.659	4.5	0.003
391.035	25565.94	10	13	11	85?	3.6	38685.555	4.5	13119.610	4.5	-0.001
391.051	25564.89	40	10	10	100?	2	44418.695	6.5	18853.823	5.5	0.019
391.139	25559.13	10	4	4	75?	2.2	42902.504	2.5	17343.374	3.5	-0.004
391.336	25546.27	30	10	10	105?	55.6	44383.637	5.5	18837.385	4.5	0.015
391.362	25544.56	40	84	74	145?	0.3	38664.184	3.5	13119.610	4.5	-0.016
391.647	25525.96	3500	1485	715	170?	31.8	34297.17	3.5	8771.243	2.5	0.034
391.714	25521.57	130	84	66	115?	3.1	41109.364	4.5	15587.811	5.5	0.020
391.893	25509.92	10	27	18	115?	19.7	40780.904	6.5	15271.002	7.5	0.018
391.937	25507.06	40	12	14	70?	13.4	42961.884	5.5	17454.818	6.5	-0.003
392.145	25493.58	200	54	46	135?	22.1	41081.384	5.5	15587.811	5.5	0.007
392.187	25490.80	5h	3	3	85?	78.1	41078.537	4.5	15587.811	6.5	0.079
392.364	25479.35	8	6	6	75?	3.7	44316.715	4.5	18837.385	4.5	0.017
392.736	25455.22	20	20	16	135?	34	42910.043	6.5	17454.818	6.5	-0.003
392.988	25438.88	lc	12	12	150?	59.5	43052.541	3.5	17613.659	4.5	-0.003
393.007	25437.66	20	6	6	140?	74.2	42179.886	2.5	16742.237	3.5	0.007
393.165	25427.42	20	5	5	140?	66.2	42770.792	4.5	17343.374	3.5	-0.001
393.272	25420.48	20	8	8	115?	30.2	43034.166	3.5	17613.659	4.5	-0.024
393.377	25413.71	20	12	12	110?	25.5	42370.718	3.5	16957.006	3.5	0.001
393.426	25410.58	6	4	4	85?	65.5	42367.61	2.5	16957.006	3.5	-0.026
393.433	25410.08	10	10	7	70?	0.4	38529.686	5.5	13119.610	4.5	0.002
393.580	25400.61	80	35	35	110?	24	42855.44	7.5	17454.818	6.5	-0.007
393.610	25398.65	30	11	10	150?	70.6	42742.008	3.5	17343.374	3.5	0.014
393.728	25391.04	100	34	34	195?	54.7	42133.236	3.5	16742.237	3.5	0.043

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
393.909	25379.41	240	70	62	135?	30.9	38499.016	4.5	13119.610	4.5	0.007
394.164	25362.97	30	62	50	125?	4.3	38482.584	3.5	13119.610	4.5	-0.001
394.171	25362.53	40	16	16	185?	22.2	42705.88	2.5	17343.374	3.5	0.021
394.195	25361.01	15	4	4	70?	23.6	43113.646	2.5	17752.634	2.5	-0.002
394.348	25351.14	80	20	23	130?	-51.8	44483.351	1.5	19132.245	1.5	0.031
394.393	25348.23	80	36	36	135?	24.9	42961.884	5.5	17613.659	4.5	0.006
394.466	25343.56	40	23	21	130?	22.4	44180.935	5.5	18837.385	4.5	0.009
394.722	25327.12	60	47	45	95?	2.7	44180.935	5.5	18853.823	5.5	0.005
394.801	25322.06	4	3	3	75?	2.5	45070.577	4.5	19748.543	4.5	0.026
394.883	25316.77	20	4	4	95?	39.3	44307.188	6.5	18990.406	5.5	-0.012
394.927	25313.97	1500	1550	820	165?	23.5	34085.2	2.5	8771.243	2.5	0.015
394.991	25309.84	5	4	4	85?	11	45058.379	5.5	19748.543	4.5	0.005
395.146	25299.92	4	6	6	70?	23.6	43052.514	3.5	17752.634	2.5	0.035
395.434	25281.51	lc	26	24	155?	45.8	43034.166	3.5	17752.634	2.5	-0.025
395.451	25280.42	7	4	4	75?	4	44747.009	5.5	19466.663	6.5	0.070
395.649	25267.77	62	28	23	120?	28.1	40855.58	4.5	15587.811	5.5	0.003
395.688	25265.31	60	112	88	135?	3.6	38384.926	4.5	13119.610	4.5	-0.001
395.917	25250.67	20	8	8	110?	22.2	42594.049	4.5	17343.374	3.5	-0.002
396.268	25228.28	60	105	85	125?	3	38347.875	5.5	13119.610	4.5	0.016
396.307	25225.83	10	3	3	140?	68.2	42839.493	4.5	17613.659	4.5	-0.003
396.353	25222.89	50	30	31	145?	37.5	42179.886	2.5	16957.006	3.5	0.007
396.417	25218.81	20	10	7	125?	30	44072.61	6.5	18853.823	5.5	0.020
396.428	25218.15	lc	3	3	95?	25.5	42561.536	4.5	17343.374	3.5	-0.016
396.448	25216.85	10	4	4	95?	26	47214.313	6.5	21997.473	5.5	0.012
396.822	25193.11	20	41	41	125?	26.8	40780.904	6.5	15587.811	5.5	0.018
396.862	25190.53	50	32	30	135?	22	44180.935	5.5	18990.406	5.5	0.000
397.087	25176.27	20	8	8	115?	20	42133.263	3.5	16957.006	3.5	0.015
397.123	25173.99	20h	5	5	100?	35.3	49785.26	2.5	24611.303	2.5	0.033
397.542	25147.44	6	3	3	70?	3	44001.272	4.5	18853.823	5.5	-0.007
397.668	25139.50	950	94	94	130?	31	41881.739	4.5	16742.237	3.5	0.002
397.704	25137.23	100h	46	43	115?	0.4	43974.645	5.5	18837.385	4.5	-0.029
397.863	25127.17	10	10	8	100?	3	42581.974	5.5	17454.818	6.5	0.012
397.890	25125.49	10	10	8	125?	2	43979.308	6.5	18853.823	5.5	0.007
397.964	25120.79	20h	10	10	145?	19	43974.645	5.5	18853.823	5.5	-0.033
397.982	25119.65	30	10	10	150?	35.8	44868.173	4.5	19748.543	4.5	0.019
398.066	25114.37	40	22	22	125?	3.2	44868.173	4.5	19753.830	3.5	0.022
398.271	25101.42	15	4	4	95?	34.5	44855.24	2.5	19753.830	3.5	0.013
398.303	25099.40	10	6	6	95?	16.9	41841.602	3.5	16742.237	3.5	0.039
398.420	25092.03	15	12	12	120?	13.6	38211.625	3.5	13119.610	4.5	0.010
398.507	25086.56	10	2	2	85?	39.4	42541.367	5.5	17454.818	6.5	0.007
398.576	25082.22	6	6	5	95?	0.4	44072.61	6.5	18990.406	5.5	0.014
398.686	25075.32	4	7	5	80?	1.9	40663.129	5.5	15587.811	5.5	-0.001
399.087	25050.10	50	16	18	175?	-83.7	44182.324	2.5	19132.245	1.5	0.023
399.184	25044.03	20	5	5	105?	19.9	41786.249	4.5	16742.237	3.5	0.017
399.450	25027.33	20	14	14	60?	22.2	42370.718	3.5	17343.374	3.5	-0.012
399.500	25024.22	7	5	5	105?	22.2	42367.61	2.5	17343.374	3.5	-0.017
700.507	14271.43	lc	3	6	110?	-21.7	43588.18	3.5	29316.690	4.5	-0.057
701.079	14259.80	50	74	64	75?	9.8	45714.11	5.5	31454.298	4.5	-0.010

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm ⁻¹)	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm ⁻¹)	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm ⁻¹)	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm ⁻¹)
701.099	14259.38	4	5	5	110+	65.8	41700.222	5.5	27440.858	4.5	0.018
701.217	14256.98	50	34	32	135-	-66.5	32950.1	6.5	18693.074	7.5	-0.044
701.789	14245.36	10	43	40	85?	0.4	40693.63	1.5	26448.274	2.5	0.008
701.964	14241.82	10h	17	16	65?	7.6	37576.866	4.5	23335.111	3.5	0.070
702.174	14237.57	3	5	5	65?	2.1	48547.98	4.5	34310.330	4.5	-0.082
702.614	14228.65	4	10	9	75?	14	40586.4	6.5	26357.736	6.5	-0.014
702.736	14226.17	1	3	2	40?	3.1	36223.628	6.5	21997.473	5.5	0.010
702.933	14222.19	60h	46	50	65?	3.9	37557.25	3.5	23335.111	3.5	0.047
703.140	14217.99	1	3	3	45?	13.5	40586.4	6.5	26368.412	5.5	0.002
703.411	14212.52	8	20	22	140+	74	33961.044	3.5	19748.543	4.5	0.022
703.973	14201.18	3	3	3	85-	-37.7	40649.441	3.5	26448.274	2.5	0.009
705.040	14179.69	lc	20	24	75?	21.5	38120.71	4.5	23941.071	4.5	0.048
705.057	14179.33	30h	7	7	140+	87.4	30921.58	3.5	16742.237	3.5	-0.010
705.426	14171.92	7	8	8	45?	16	33638.74	5.5	19466.663	6.5	-0.155
705.995	14160.51	15	14	18	90?	17.4	33292.78	2.5	19132.245	1.5	-0.024
706.096	14158.48	100	18	32	65?	13.1	22929.717	2.5	8771.243	2.5	0.006
706.120	14158.00	3h	8	8	45?	13.2	38318.62	1.5	24160.63	0.5	0.012
706.496	14150.45	lc	6	7	50?	15	37724.84	2.5	23574.415	1.5	0.027
706.653	14147.31	2h	4	2	105?	86.8	39847.04	3.5	25699.714	4.5	-0.018
708.340	14113.62	5h	5	4	55?	19.2	41151.1	4.5	27037.468	3.5	-0.008
709.205	14096.42	lc	8	8	50?	11.9	49778.61	4.5	35682.251	3.5	-0.051
709.218	14096.16	lc	6	5	45?	17.4	38342.57	3.5	24246.425	3.5	0.015
709.521	14090.13	50	24	18	105?	45.6	48547.98	4.5	34457.853	4.5	0.002
709.962	14081.38	10h	4	4	75?	9	42595.791	5.5	28514.423	4.5	0.014
710.169	14077.27	lc	11	11	90?	19.2	38237.89	1.5	24160.63	0.5	0.014
710.614	14068.46	150	55	65	110-	40.4	32761.54	8.5	18693.074	7.5	-0.004
710.806	14064.67	30	25	25	80?	15.4	31519.495	5.5	17454.818	6.5	-0.012
712.207	14036.99	20	13	11	80?	6.8	41074.45	4.5	27037.468	3.5	0.004
712.831	14024.71	40h	18	22	170?	104.2	39741.913	4.5	25717.197	3.5	-0.003
712.840	14024.53	lc	10	10	70?	10.2	33778.36	3.5	19753.830	3.5	0.000
712.850	14024.32	100h	24	27	110?	30.8	31367.728	3.5	17343.374	3.5	-0.031
713.073	14019.94	50	16	22	75?	6.1	22791.176	3.5	8771.243	2.5	0.008
713.816	14005.36	lc	6	6	50?	30.8	49687.61	2.5	35682.251	3.5	-0.004
713.860	14004.49	2h	4	4	50?	1.4	36934.126	3.5	22929.717	2.5	0.078
714.592	13990.15	10	12	14	85?	18.8	30947.175	4.5	16957.006	3.5	-0.019
715.207	13978.11	20	19	12	105?	0.9	33726.7	4.5	19748.543	4.5	-0.047
715.901	13964.56	4	3	3	85?	54.7	30921.58	3.5	16957.006	3.5	-0.012
716.928	13944.56	20	11	13	130+	39.3	35682.251	3.5	21737.685	4.5	-0.005
718.518	13913.69	20h	6	7	125+	88	39658.852	2.5	25745.117	2.5	-0.042
718.608	13911.95	2h	3	2	125-	-62.2	41352.806	5.5	27440.858	4.5	0.003
718.668	13910.79	lc	4	4	145+	95	39627.996	3.5	25717.197	3.5	-0.011
719.844	13888.07	30	16	19	65?	5.3	43196.848	5.5	29308.69	4.5	-0.085
719.921	13886.59	4	4	4	90?	39.7	38844.072	5.5	24957.469	5.5	-0.010
720.114	13882.86	20h	5	7	110?	74	39627.996	3.5	25745.117	2.5	-0.021
720.436	13876.65	lc	3	3	50?	7.9	38123.02	3.5	24246.425	3.5	0.058
720.536	13874.73	7	3	3	55?	1.3	40763.892	3.5	26889.125	4.5	-0.039
721.264	13860.73	4h	3	3	55?	6.8	39560.41	3.5	25699.714	4.5	0.030

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
721.417	13857.78	100h	14	16	135-	-61.4	39602.902	1.5	25745.117	2.5	-0.003
723.128	13825.00	50h	17	22	125+	57.3	39542.165	3.5	25717.197	3.5	0.028
724.347	13801.73	2	4	4	65?	-13	44774.242	4.5	30972.46	5.5	-0.048
724.593	13797.05	40h	16	20	115+	36.3	39542.165	3.5	25745.117	2.5	0.004
725.773	13774.62	40	45	47	90?	3.5	31388.303	4.5	17613.659	4.5	-0.026
725.962	13771.03	20	17	17	65?	15.3	39488.236	4.5	25717.197	3.5	-0.006
726.014	13770.04	6	7	7	70+	44	37711.074	4.5	23941.071	4.5	0.041
726.898	13753.30	4h	4	4	115?	87.9	39470.489	2.5	25717.197	3.5	0.009
727.394	13743.92	30	30	30	85?	8.4	33292.78	2.5	19548.834	2.5	-0.028
727.719	13737.78	3	5	5	65?	23	37519.484	3.5	23781.698	4.5	-0.002
727.956	13733.31	4h	4	4	55?	10.5	40101.72	4.5	26368.412	5.5	0.002
728.182	13729.05	20	13	13	60?	16.7	37064.18	2.5	23335.111	3.5	-0.016
728.285	13727.10	10h	9	9	100?	28.7	39444.295	4.5	25717.197	3.5	0.005
728.350	13725.88	lc	5	5	55?	16.6	38433.92	2.5	24708.041	3.5	0.004
728.378	13725.36	60h	22	18	155?	66.9	39470.489	2.5	25745.117	2.5	-0.013
728.432	13724.34	100	46	44	160?	91.1	32856.613	2.5	19132.245	1.5	-0.025
728.616	13720.88	200	66	70	130-	-62.4	29308.69	4.5	15587.811	5.5	0.001
728.787	13717.66	8h	8	6	50?	16	39462.782	3.5	25745.117	2.5	-0.007
729.180	13710.25	4	3	3	75?	35.4	41151.1	4.5	27440.858	4.5	0.010
729.335	13707.34	lc	7	8	50?	7	38318.62	1.5	24611.303	2.5	0.021
729.367	13706.75	6	5	5	55?	-10	45147.3	4.5	31440.54	4.5	-0.014
730.179	13691.50	20	10	15	210+	115.6	33240.362	3.5	19548.834	2.5	-0.031
731.073	13674.76	lc	10	12	140+	63.3	39419.9	1.5	25745.117	2.5	-0.024
731.340	13669.76	8	5	5	115+	63.2	39386.956	2.5	25717.197	3.5	0.002
732.518	13647.78	30	14	12	125-	-71.3	32780.04	1.5	19132.245	1.5	-0.013
732.760	13643.28	5	7	6	55?	-7.3	40091.58	1.5	26448.274	2.5	-0.029
732.821	13642.13	8	14	15	75?	2.2	33395.984	3.5	19753.83	3.5	-0.023
732.838	13641.82	10	10	11	130+	57.3	39386.959	2.5	25745.117	2.5	-0.018
732.855	13641.50	lc	9	10	125+	56.3	38342.57	3.5	24701.058	4.5	-0.009
733.158	13635.87	40h	29	32	85?	4.8	37576.866	4.5	23941.071	4.5	0.075
733.231	13634.51	7h	12	12	85?	4.9	38342.57	3.5	24708.041	3.5	-0.016
733.280	13633.60	7	7	6	55?	19	41074.45	4.5	27440.858	4.5	0.012
733.656	13626.61	lc	4	4	200?	151.7	38237.89	1.5	24611.303	2.5	0.023
733.687	13626.03	70	33	35	130-	-67.2	31080.846	5.5	17454.818	6.5	0.001
733.766	13624.58	20h	13	13	130-	41	42139.01	4.5	28514.423	4.5	-0.011
734.215	13616.23	50h	21	24	70?	0	37557.25	3.5	23941.071	4.5	0.055
736.273	13578.19	50	34	38	75?	11.4	30921.58	3.5	17343.374	3.5	-0.020
736.491	13574.15	3	3	3	70?	20.8	39942.571	5.5	26368.412	5.5	-0.006
737.266	13559.88	8h	3	3	115-	-57.6	39277.087	2.5	25717.197	3.5	-0.008
737.917	13547.93	8	5	5	75?	-33.8	39996.221	3.5	26448.274	2.5	-0.016
738.101	13544.55	10h	8	11	170+	112.7	38502.00	4.5	24957.469	5.5	0.020
738.788	13531.95	100h	16	18	145-	68.7	39277.087	2.5	25745.117	2.5	-0.011
739.037	13527.39	100h	3	3	115+	47	39244.584	4.5	25717.197	3.5	0.003
739.330	13522.03	30	6	6	50?	11.5	32359.372	3.5	18837.385	4.5	0.041
739.599	13517.12	10	5	4	65?	26.5	38128.37	2.5	24611.303	2.5	0.051
740.987	13491.80	70	45	47	55?	5.5	33240.362	3.5	19748.543	4.5	-0.024
741.136	13489.09	5h	4	5	110+	84.6	38696.79	2.5	25207.732	1.5	0.028

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
741.611	13480.44	60	6	8	100+	68.8	40989.73	1.5	27509.4	1.5	0.110
741.720	13478.46	lc	20	23	85?	9	37724.84	2.5	24246.425	3.5	0.045
743.219	13451.28	140	120	127	125+	55.5	32441.714	4.5	18990.406	5.5	-0.025
744.838	13422.05	100h	16	18	115-	-43	38123.02	3.5	24701.058	4.5	0.086
744.931	13420.36	2	3	3	60?	13.6	38128.37	2.5	24708.041	3.5	0.031
744.956	13419.91	4	5	5	95+	49.5	32112.98	7.5	18693.074	7.5	0.003
744.968	13419.70	4h	6	6	115-	61.4	38120.71	4.5	24701.058	4.5	0.043
745.226	13415.06	20h	6	8	135-	-89.7	38123.02	3.5	24708.041	3.5	0.082
748.106	13363.41	10000	605	600	145-	-65.9	32217.195	4.5	18853.823	5.5	0.036
749.019	13347.11	750	870	810	110?	15.6	32479.326	2.5	19132.245	1.5	0.032
749.587	13337.01	8	5	5	80?	18	34457.853	4.5	21120.836	3.5	-0.002
750.714	13316.99	lc	4	4	55?	8.8	35054.681	4.5	21737.685	4.5	-0.007
750.731	13316.68	100h	36	39	145+	84.5	39061.819	1.5	25745.117	2.5	-0.024
751.235	13307.75	60	17	16	150?	64.1	32856.613	2.5	19548.834	2.5	-0.032
752.614	13283.36	10	10	13	80?	-13.7	43408.96	5.5	30125.61	6.5	0.014
752.685	13282.11	20	10	15	85?	-10	36656.724	5.5	23374.681	6.5	0.065
754.315	13253.41	20	10	10	130-	-44.7	32107.268	5.5	18853.823	5.5	-0.036
754.578	13248.79	140	340	280	70?	4.6	26368.412	5.5	13119.61	4.5	-0.008
754.807	13244.77	5	4	4	45?	16	34365.624	3.5	21120.836	3.5	-0.018
755.582	13231.18	15	8	7	85-	-45.6	32780.04	1.5	19548.834	2.5	-0.021
755.832	13226.82	140	1165	1080	135-	-44.9	32217.195	4.5	18990.406	5.5	0.030
755.867	13226.21	lc	20	26	150+	57.6	38433.92	2.5	25207.732	1.5	0.018
758.055	13188.03	400h	82	86	80?	5.1	41211.943	3.5	28024.01	4.5	0.098
758.182	13185.81	6	3	3	45?	21.6	41700.222	5.5	28514.423	4.5	0.013
759.051	13170.72	4	4	4	65?	12	37519.484	3.5	24348.692	4.5	-0.075
759.154	13168.93	10	8	8	65?	12.8	30921.58	3.5	17752.634	2.5	-0.012
759.367	13165.24	400h	80	80	75?	11.1	41189.162	3.5	28024.01	4.5	0.089
759.480	13163.29	lc	26	30	90?	28.6	38120.71	4.5	24957.469	5.5	0.046
760.102	13152.51	9	7	6	65?	14.3	36934.216	3.5	23781.698	4.5	-0.010
762.170	13116.82	80	22	24	105?	20.3	38861.937	2.5	25745.117	2.5	-0.003
762.359	13113.57	10h	8	13	75?	0.7	37724.84	2.5	24611.303	2.5	0.031
762.988	13102.75	150	45	43	85?	1.8	32856.613	2.5	19753.83	3.5	-0.031
763.143	13100.10	3	3	3	70?	-23.3	44072.61	6.5	30972.46	5.5	-0.053
763.398	13095.72	15h	3	3	?50?	41.1	38751.812	2.5	25656.019	2.5	-0.071
766.120	13049.19	50	16	14	115-	-55.8	32181.49	1.5	19132.245	1.5	-0.054
766.628	13040.56	500h	41	34	185+	90.6	39741.913	4.5	26701.325	3.5	-0.033
767.657	13023.07	70h	6	6	50?	13.1	41074.399	2.5	28051.37	2.5	0.044
767.702	13022.31	7	3	3	100-	75.1	37159.51	7.5	24137.196	6.5	-0.006
769.673	12988.96	100h	18	17	105?	42.3	37946.39	4.5	24957.469	5.5	0.039
770.142	12981.04	400h	53	78	120?	52.8	38502.00	4.5	25520.987	5.5	0.028
771.468	12958.73	5	3	3	40?	-12	39996.221	3.5	27037.468	3.5	-0.026
771.744	12954.11	5	4	3	60?	12.9	34691.802	5.5	21737.685	4.5	-0.010
772.172	12946.91	8	3	3	75?	3	38664.184	3.5	25717.197	3.5	-0.073
773.152	12930.52	80	670	640	120+	44	32479.326	2.5	19548.834	2.5	0.026
773.384	12926.64	30h	6	7	120+	81.5	39627.996	3.5	26701.325	3.5	-0.036
776.432	12875.88	40h	7	8	65?	36.1	37576.866	4.5	24701.058	4.5	0.077
777.550	12857.36	40	24	26	90?	16.5	31694.749	3.5	18837.385	4.5	0.001
777.829	12852.76	300h	22	29	170+	101.8	39741.913	4.5	26889.125	4.5	-0.033

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
778.233	12846.09	500	17	19	105+	47.3	40989.73	1.5	28143.67	1.5	0.035
778.551	12840.84	200h	32	38	130?	43.7	39542.165	3.5	26701.325	3.5	-0.001
778.588	12840.24	150h	32	45	95?	11.3	33961.044	3.5	21120.836	3.5	0.030
780.391	12810.56	1000	54	54	140-	-76.2	32359.372	3.5	19548.834	2.5	0.025
781.054	12799.68	5h	3	3	75?	7.2	33961.044	3.5	21161.401	2.5	0.040
781.836	12786.88	70h	9	9	105?	23.5	39488.236	4.5	26701.325	3.5	-0.028
782.922	12769.15	100h	10	11	140+	74.4	39470.489	2.5	26701.325	3.5	-0.016
784.533	12742.93	100h	10	13	105-	-43.2	39444.295	4.5	26701.325	3.5	-0.038
785.606	12725.52	5000	202	202	185+	109.8	32479.326	2.5	19753.83	3.5	0.028
786.169	12716.41	50h	12	14	150+	82.2	39362.651	5.5	26646.214	4.5	-0.026
786.365	12713.25	3h	3	4	70?	-30.7	39161.45	3.5	26448.274	2.5	0.072
787.610	12693.15	100	16	18	125+	55	32441.714	4.5	19748.543	4.5	-0.025
788.079	12685.60	30h	3	3	100+	51.8	39386.959	2.5	26701.325	3.5	-0.036
789.320	12665.65	8	4	4	65?	20.3	31519.495	5.5	18853.823	5.5	-0.019
789.908	12656.22	400h	26	26	80?	15.3	41211.943	3.5	28555.799	3.5	0.077
790.107	12653.04	60h	6	8	115+	54.9	39542.165	3.5	26889.125	4.5	0.001
790.527	12646.31	20	5	7	75+	43.2	32112.98	7.5	19466.663	6.5	-0.004
791.333	12633.44	100h	28	29	70?	9.2	41189.162	3.5	28555.799	3.5	0.075
791.384	12632.61	100	19	18	85?	26.3	32181.49	1.5	19548.834	2.5	-0.045
791.807	12625.87	600	27	27	80?	15.3	41074.399	2.5	28448.585	2.5	0.057
792.208	12619.47	15h	7	8	55?	6.1	37576.866	4.5	24957.469	5.5	0.075
792.750	12610.85	20000	455	455	115?	33.9	32359.372	3.5	19748.543	4.5	0.026
793.082	12605.57	110	850	850	95?	10.3	32359.372	3.5	19753.83	3.5	0.028
793.447	12599.78	lc	5	5	130?	86.4	38120.71	4.5	25520.987	5.5	0.055
793.491	12599.08	100h	12	12	65?	16.3	39488.236	4.5	26889.125	4.5	-0.032
794.012	12590.80	70h	4	5	80?	68	39479.873	5.5	26889.125	4.5	0.057
794.688	12580.09	30	11	11	75?	1.9	25699.714	4.5	13119.61	4.5	-0.010
794.964	12575.73	40h	5	5	115-	-71.2	39277.087	2.5	26701.325	3.5	-0.033
796.268	12555.14	60h	7	8	80?	31.3	39444.295	4.5	26889.125	4.5	-0.035
797.153	12541.20	200h	7	7	140+	90.3	40989.73	1.5	28448.585	2.5	0.056
797.845	12530.32	50	18	18	85?	17.4	31367.728	3.5	18837.385	4.5	-0.022
797.925	12529.07	7	4	4	80+	47.3	31519.495	5.5	18990.406	5.5	-0.024
798.590	12518.63	300h	16	16	120+	42.4	41074.399	2.5	28555.799	3.5	0.033
799.153	12509.81	100h	20	22	90?	10	40533.825	3.5	28024.01	4.5	-0.004
801.479	12473.50	2000	1	158	140+	71.1	39362.651	5.5	26889.125	4.5	-0.028
801.789	12468.68	95	580	580	110-	-45.4	32217.195	4.5	19748.543	4.5	0.030
802.129	12463.40	200h	10	10	155-	-89.7	32217.195	4.5	19753.83	3.5	0.032
803.424	12443.30	40h	6	6	95-	-61	39089.533	5.5	26646.214	4.5	-0.018
806.141	12401.37	100	28	22	95?	27.3	25520.987	5.5	13119.61	4.5	-0.007
806.870	12390.16	150	25	30	70?	21.5	21161.401	2.5	8771.243	2.5	-0.001
808.398	12366.74	100	16	17	160-	-99.3	31499.06	1.5	19132.245	1.5	-0.073
808.926	12358.68	40	8	10	110?	11.8	32107.268	5.5	19748.543	4.5	-0.050
813.303	12292.16	lc	6	5	105-	-50.9	49811.66	3.5	37519.484	3.5	-0.012
814.039	12281.05	50	7	6	100+	53.7	42406.656	6.5	30125.61	6.5	0.008
819.422	12200.37	1000	45	52	155-	-72	39089.533	5.5	26889.125	4.5	-0.035
820.110	12190.14	80	10	10	70?	16.4	37711.074	4.5	25520.987	5.5	0.048
822.565	12153.76	7	4	3	75?	11.5	31007.60	5.5	18853.823	5.5	-0.017
824.580	12124.05	40h	6	12	75?	-14.7	39161.45	3.5	27037.468	3.5	0.072

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	$\sigma_{\text{deneyssel}}$ (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
825.553	12109.77	15	5	6	55?	2.1	30947.175		18837.385	4.5	-0.019
829.453	12052.82	50	35	37	80?	4	31519.495	5.5	19466.663	6.5	-0.013
832.313	12011.41	30h	5	6	45?	14.5	37711.074	4.5	25699.74	4.5	0.078
834.101	11985.67	lc	14	15	95?	-26	38433.92	2.5	26448.274	2.5	0.022
836.578	11950.18	200	17	87	120-	-73.6	31499.06	1.5	19548.834	2.5	-0.045
889.549	11238.57	8	8	9	?90?	28.8	32359.372	3.5	21120.836	3.5	0.029
894.927	11171.03	lc	5	5	105-	-53.5	28514.423	4.5	17343.374	3.5	-0.020
895.018	11169.90	9	20	32	95?	34.8	33961.044	3.5	22791.176	3.5	0.029
895.956	11158.20	4	34	34	75?	1.3	34532.898	5.5	23374.681	6.5	-0.016
901.731	11086.74	30	660	660	60?	3.4	26357.736	6.5	15271.002	7.5	0.006
901.820	11085.65	3000	6	9	130-	-70.3	38123.02	3.5	27037.468	3.5	0.098
903.815	11061.17	lc	12	22	95?	34.5	38502.00	4.5	27440.858	4.5	0.029
906.258	11031.36	10	75	115	80?	15.6	33961.044	3.5	22929.717	2.5	0.031
910.282	10982.60	lc	9	9	55?	1.1	19753.83	3.5	8771.243	2.5	0.009
913.903	10939.07	6	45	55	135-	-59	43113.646	2.5	32174.49	2.5	-0.083
914.910	10927.03	lc	5	6	35?	20.4	44323.00	3.5	33395.984	3.5	0.017
915.941	10914.74	lc	4	6	75?	149.9	39470.489	2.5	28555.799	3.5	0.052
916.331	10910.09	lc	8	9	75?	21.4	34691.802	5.5	23781.698	4.5	-0.014
916.593	10906.98	lc	7	3	90-	-53.7	39462.782	3.5	28555.799	3.5	-0.007
917.035	10901.71	lc	13	18	65?	1.5	38342.57	3.5	27440.858	4.5	0.002
918.724	10881.68	lc	4	6	45?	9.4	49758.97	4.5	38877.211	5.5	-0.081
921.521	10848.65	lc	22	25	80?	20.1	33778.36	3.5	22929.717	2.5	0.003
923.158	10829.41	10	28	25	65?	5.8	41751.03	2.5	30921.58	3.5	-0.035
923.836	10821.46	6	105	110	110-	-38.9	23941.071	4.5	13119.61	4.5	-0.002
927.338	10780.60	200	420	470	70?	0.7	26368.412	5.5	15587.811	5.5	-0.001
927.596	10777.60	lc	5	5	105+	64.8	19548.834	2.5	8771.243	2.5	0.008
928.256	10769.93	800	2700	3000	75?	3.4	26357.736	6.5	15587.811	5.5	0.007
928.802	10763.60	5h	15	19	70-	-13.6	43243.00	2.5	32479.326	2.5	-0.072
929.875	10751.19	3h	5	4	80-	-43.6	34532.898	5.5	23781.698	4.5	-0.013
933.973	10704.01	6h	3	3	30?	1.3	32441.714	4.5	21737.685	4.5	-0.015
934.444	10698.61	10	19	27	125+	70.4	27440.858	4.5	16742.237	3.5	-0.010
935.875	10682.26	5h	5	7	130-	-97.5	38123.02	3.5	27440.858	4.5	0.099
940.978	10624.33	5h	10	14	70?	-20	45070.577	4.5	34446.22	4.5	-0.031
942.712	10604.79	lc	6	8	35?	2.8	33395.984	3.5	22791.176	3.5	-0.020
943.879	10591.67	lc	4	5	80?	-50.6	49811.66	4.5	39220.035	4.5	0.049
945.465	10573.91	lc	8	7	40?	0.8	31694.749	3.5	21120.836	3.5	-0.004
945.941	10568.59	6	21	21	70?	4.7	33943.282	6.5	23374.681	6.5	-0.013
947.195	10554.59	6	17	18	60?	0.6	34691.802	5.5	24137.196	6.5	-0.015
948.748	10537.32	lc	3	5	35?	23.4	49626.86	4.5	39089.533	5.5	-0.005
949.532	10528.62	lc	6	6	75?	27.8	34310.33	4.5	23781.698	4.5	-0.013
950.175	10521.50	lc	9	5	80?	15.4	38012.795	6.5	27491.31	5.5	0.012
952.811	10492.38	lc	3	3	55?	11	34365.625	3.5	23873.207	3.5	-0.038
953.587	10483.84	lc	4	7	85+	37.7	27440.858	4.5	16957.006	3.5	-0.007
953.806	10481.44	2h	3	4	55?	-23.1	39741.913	4.5	29260.59	3.5	0.116
954.373	10475.21	lc	14	12	105?	-26.3	49862.08	3.5	39386.959	2.5	0.085
954.587	10472.86	40	70	80	70?	6.1	31593.70	2.5	21120.836	3.5	-0.004
955.191	10466.24	20	40	45	90?	16.3	33395.984	3.5	22929.717	2.5	-0.022
957.826	10437.45	10	48	56	65?	-14	33812.149	6.5	23374.681	6.5	-0.021

Tablo 4.4 (devam): 330 nm - 400 nm bölgeleri ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm I olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ hava (nm)	σ deneysel (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	E üst (cm^{-1})	J üst	E alt (cm^{-1})	J alt	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
957.857	10437.10	10	18	18	95?	30.7	34310.33	4.5	23873.207	3.5	-0.019
958.298	10432.31	150	295	315	65?	2	31593.70	2.5	21161.401	2.5	0.006
961.674	10395.69	5h	14	15	90?	22.8	34532.898	5.5	24137.196	6.5	-0.016
964.893	10361.01	3	9	9	135+	88.8	19132.245	1.5	8771.243	2.5	0.005
966.564	10343.10	6	19	31	40?	10.5	34691.802	5.5	24348.692	4.5	-0.015
967.074	10337.63	lc	6	6	60?	29	31499.06	1.5	21161.401	2.5	-0.024
967.465	10333.45	30	70	78	65?	16.4	31454.298	4.5	21120.836	3.5	-0.008
968.545	10321.93	lc	60	11	75?	-18	49735.52	2.5	39413.672	3.5	0.082
969.744	10309.17	lc	4	4	40?	13.8	37010.534	4.5	26701.325	3.5	-0.038
970.134	10305.03	lc	37	5	95?	-20	49868.01	4.5	39563.003	5.5	0.025
971.645	10289.00	6	7	10	65?	27.2	42735.208	2.5	32446.26	3.5	0.051
972.341	10281.64	lc	3	3	75-	-51.7	39542.165	3.5	29260.59	3.5	0.062
973.417	10270.27	lc	3	4	80-	-47.2	37711.074	4.5	27440.858	4.5	0.054
973.686	10267.44	3	10	12	110-	-46.6	31388.303	4.5	21120.836	3.5	-0.027
973.906	10265.12	500	1500	1500	65?	2.4	25536.116	7.5	15271.002	7.5	0.003
975.415	10249.23	lc	49	7	105?	13.1	49791.45	4.5	39542.165	3.5	-0.053
975.641	10246.86	lc	5	5	40?	0.1	41687.404	5.5	31440.54	4.5	0.000
977.686	10225.43	lc	156	26	90?	16.4	39542.165	3.5	29316.69	4.5	-0.042
978.636	10215.50	40	60	70	105-	-35	23335.111	3.5	13119.61	4.5	0.001
981.442	10186.30	lc	5	7	145?	-20	42594.049	4.5	32407.78	4.5	0.028
981.645	10184.19	20	48	50	100?	32.7	34532.898	5.5	24348.692	4.5	-0.015
982.110	10179.37	800	540	960	65?	9.2	33961.044	3.5	23781.698	4.5	0.025
988.663	10111.90	30	48	42	70?	1.9	25699.714	4.5	15587.811	5.5	-0.002
990.076	10097.47	80	190	270	75?	270	27440.858	4.5	17343.374	3.5	-0.017
991.019	10087.86	1000	1280	2200	70?	6.3	33961.044	3.5	23873.207	3.5	0.019
991.746	10080.46	10	30	38	80?	14.8	27037.468	3.5	16957.006	3.5	-0.002
992.088	10076.99	lc	5	5	50?	-16	45131.67	3.5	35054.681	4.5	-0.001
994.353	10054.04	1	4	4	55?	15.6	35261.762	2.5	25207.732	1.5	0.005
995.153	10045.95	20	12	18	125?	76.4	39362.651	5.5	29316.69	4.5	-0.012
997.112	10026.22	2h	5	7	65?	20.8	35682.251	3.5	25656.019	2.5	-0.017

Tablodaki sütunların açıklaması Tablo 1’de verilen ile aynı olmakla birlikte burada bazı şiddet değerlerinin yanında kullanılan kısaltmaların anlamları şöyledir:

a (nearly completely absorbed in pulsed arc): Belirli bir bölgedeki emilimin güçlü olduğunu ve bu emilimin dikkate alınması gerektiğini belirtir. h (hazy): Puslu (bulanık) bir şekilde görünen veya belirsiz bir yapıya sahip olma durumudur. Bu belirsizlik, ölçümün veya gözlemlemenin belirli koşullarından veya analizde kullanılan yöntemlerin sınırlılıklarından kaynaklanabilir. r (reversed in pulsed arc): Puslu ark deşarjı sırasında gözlenen belirli bir spektrum özelliğini tanımlar. Pulsed arc, bir elektrik arkının belirli aralıklarla kesintili olarak çalıştığı bir deşarj türüdür. "Reversed" ise, normalde beklendiği gibi değil, beklenenden farklı bir şekilde anlamına

gelir. w (wide): Ölçümün/analizin, geniş bir dalga boylarındaki şiddetleri kapsadığını veya değerlendirdiğini belirtir.

4.2.2. Nötral tulyuma (Tm I) ait aşırı ince yapı analizi

Tm-FT spektrumları Tablo 3.3'te de görüldüğü gibi dört farklı ölçüm ile elde edildi (50 mA boşalım akımı kullanılarak ölçülen Tm-Ar ve Tm-Ne spektrumları ve 70 mA boşalım akımı kullanılarak ölçülen Tm-Ar ve Tm-Ne spektrumları). Bu çalışmada sunulan tüm deneysel spektrumlar 70 mA boşalım akımı ile Tm-Ar silindir katot kullanılarak alınan spektrumlardır. Ayrıca belirlenecek hfs sabiti değerindeki hatayı mümkün olduğunca en aza indirebilmek amacıyla incelenen tüm spektral çizgilerin hfs analizinde üç farklı ölçüt tanımlandı. Bunlar:

- Tek pikli yapıya sahip olan çizgilerde hfs sabitini doğru olarak belirlemek mümkün olmadığından en az iki belirgin pike sahip çizgiler araştırıldı ve bu çizgiler analiz edildi.
- İncelenen geçişe ait iki ince yapı enerji düzeyinden herhangi birisinin manyetik dipol hfs sabitinin literatürden bilinmesine dikkat edildi.
- Belirli bir enerji düzeyi için o düzeye ait henüz literatürde bilinmeyen hfs sabitinin önerilmesi için, mümkünse iki veya daha fazla farklı spektral çizgiden elde edildi.

Tüm Tm-FT spektrum ölçüm verisinden sadece incelenen çizgiye ait deneysel veriler, Ek-1'de verilen kod yardımı ile alındı ve Fitter (Zeiser, 2022) programı kullanılarak analiz edildi. Tüm fit işlemlerinde Voigt profil fonksiyonu kullanıldı ve bilinen hfs sabiti değeri fit işlemi süresince değişmeyecek şekilde ayarlandı.

Her fit işlemi sonucu oluşan çıkış dosyasındaki tüm parametreler dikkatle incelenmelidir. Çünkü fit programı, matematiksel bir fonksiyon ile deneysel spektruma uyumu sağlamak için fiziksel olarak anlamı olmayan sonuçlarla çok güzel fit yapabilir. Bu tabloda yer alan kalite olarak isimlendirilen parametre fit işleminin güvenilirliğinin bir ölçüsüdür. Fit kalitesi aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanır:

$$Kalite = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(I_{ölçüm}(x_i) - \left(U + \frac{dU}{dx} x_i \right) \right)^2}{\sum_{i=1}^N \left(I_{ölçüm}(x_i) - I_{simulasyon}(x_i) \right)^2}} \quad (4.1)$$

$I_{ölçüm}(x_i)$ ve $I_{simulasyon}(x_i)$ şiddetleri ifade ederken, $U(x_i)$ ise x_i verisinin, spektrumun oturduğu alt seviyenin fonksiyonudur.

Bir diğer önemli parametre ise teta değeridir. Gauss ve Voigt yarıgenişlik oranını tanımlayan bu değer değişken parametre olup bu çalışmadaki tüm fit işlemleri boyunca serbest bırakıldı. Teta değeri 0-1 arasında değerler alır ve bir değerine yakın olması fit işleminin yüksek kalitede olduğunu gösterir.

Tm-FT spektrum analizinde Tm I'in çift pariteli, $E = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 2.5$) ince yapı enerji seviyesini içeren geçişlerin fit işlemleri yapılırken literatürde yer alan hfs sabiti değeri kullanıldığında fit işleminin düzgün yapılamadığı tespit edildi ve detaylı bir çizgi analizi yapıldı. Bu ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol hfs sabiti üç farklı spektral çizginin incelenmesi ile revize edildi. Ayrıca, Tm I'e ait $E = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 4.5$) ince yapı enerji seviyesine ait manyetik dipol hfs sabiti iki farklı spektral geçiş analizi sonucu ilk defa bu çalışmada bulundu.

$E = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol hfs sabiti, A , revize edildi. Bu seviyenin hfs sabiti değeri belirlenirken $\sigma_{\text{deneysel}} = 13531.95 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 738.788 \text{ nm}$), $\sigma_{\text{deneysel}} = 13725.36 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 728.378 \text{ nm}$), $\sigma_{\text{deneysel}} = 13857.78 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 721.417 \text{ nm}$) olmak üzere üç farklı spektral çizgi analiz edildi.

➤ Çift pariteli $E = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ ince yapı enerji seviyesinin incelenmesi

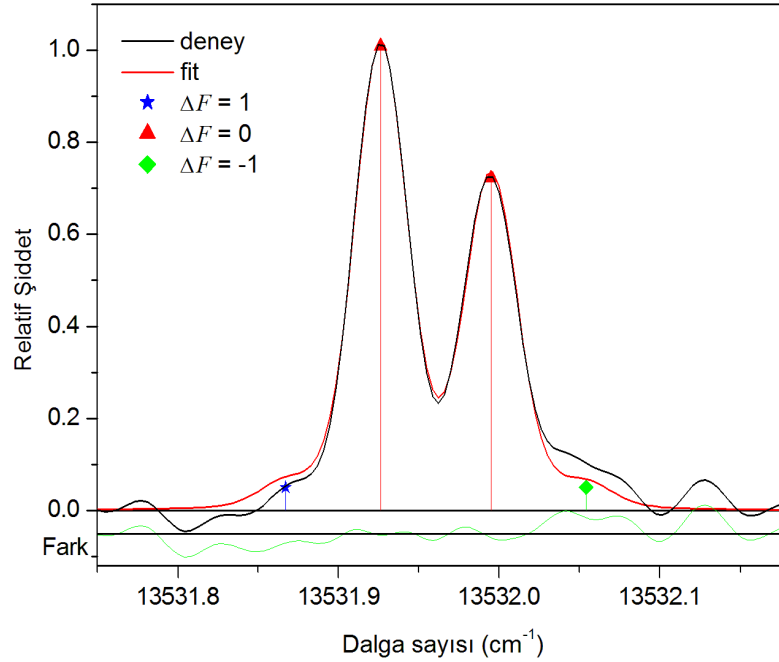
• $\sigma_{\text{deneysel}} = 13531.95 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda = 738.788 \text{ nm}$) spektral çizgisinin analizi

Tek pariteye sahip $E_{\text{üst}} = 39277.087 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 2.5$) ince yapı enerji seviyesinden çift pariteye sahip $E_{\text{alt}} = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 2.5$) seviyesine geçiş sonucu oluşan çizginin analiz adımları şu şekildedir:

- ✓ Çalışmanın ilk aşaması olan çizgi sınıflandırılması bölümünde çizginin hem üst hem de alt seviyesinin hfs sabitlerinin değerlerinin bilindiği tespit edildi. Parlatan ve diğ. (Parlatan, 2022) tarafından verilen $A_{\text{üst}} = -1280.1(2.0) \text{ MHz}$ ile Zhou ve diğ. (Zhou,1993) tarafından verilen $A_{\text{alt}} = -493.38(1.00) \text{ MHz}$ değerleri ile çizgi, sınıflandırma programının simülasyon kısmında simüle edilmeye çalışıldı ancak düzgün sonuç elde edilemedi.
- ✓ Buradan yola çıkılarak her iki değer doğruluğu Fitter programı ile sınandı ve Zhou ve diğ. (Zhou,1993) tarafından verilen alt seviyeye ait değer $A_{\text{alt}} = -593 \text{ MHz}$ olması gerektiği bulundu.

- ✓ Revize edilen yeni değeri onaylamak için $E = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ ince yapı enerji seviyesini içeren tüm çizgiler araştırıldı.

$\sigma_{\text{deneysel}} = 13531.95 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin fit işlemi sırasında incelenen spektral geçişin literatürden alınan üst seviyesine ait manyetik dipol hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = -1280.1 \text{ MHz}$ değerinde sabit tutuldu. Fit işlemi sonucunda alt seviyenin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti $A_{\text{alt}} = -593(7) \text{ MHz}$ olarak bulundu. Analizi yapılan $\sigma_{\text{deneysel}} = 13531.95 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait spektrum Şekil 4.1’de verildi. Burada siyah spektrum deney ile elde edilen, kırmızı spektrum ise fit sonucu oluşan teorik spektrumu göstermektedir. Ayrıca alt kısımda “Fark” olarak isimlendirilen ve koyu yeşil olarak görülen spektrum, deney ve teorik spektrum arasındaki farkı göstermektedir. Her bir spektral çizginin hfs geçişinde $\Delta F = 0, \pm 1$ seçim kuralı geçerlidir. ΔF değerine göre, geçişler kırmızı, mavi ve açık yeşil renkle gösterildi.



Şekil 4.1: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13531.95 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 39277.087 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 2.5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2.5$) çizgisinin için en iyi fit spektrumu.

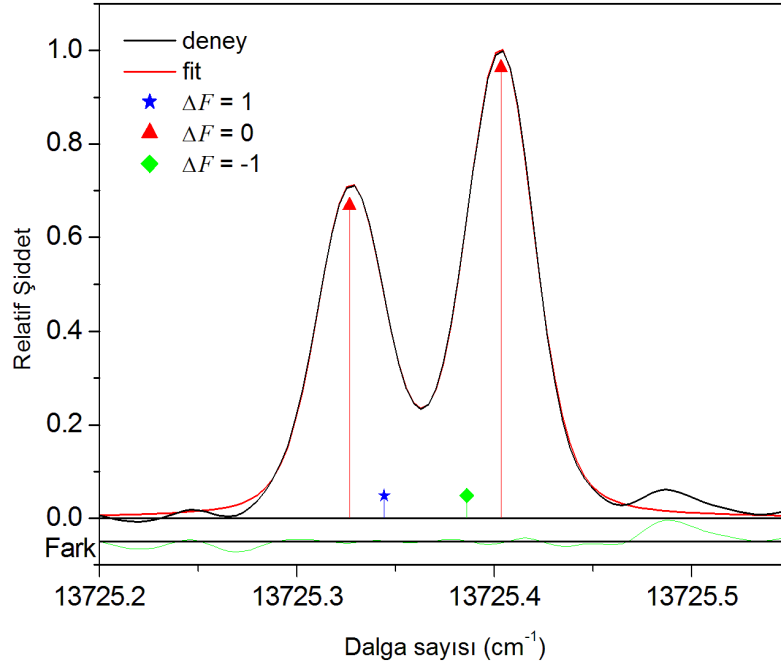
Tablo 4.5’te fit işlemine ait sonuçlar sunuldu.

Tablo 4.5: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13531.95 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$13531.955 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	13.09
FWHM(Voigt)	1179.14 MHz
FWHM(Gauss)	1044.36 MHz
FWHM(Lorentz)	242.00 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.886

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 13725.36 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 728.378 \text{ nm}$) spektral çizgisinin fit analizi

$E = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ seviyesini içeren ikinci geçiş $\sigma_{\text{deneysel}} = 13725.36 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 728.378 \text{ nm}$) olarak belirlendi. Tek pariteli $E_{\text{üst}} = 39470.489 \text{ cm}^{-1}$ ($J_{\text{üst}} = 2.5$) üst enerji seviyesinden, çift pariteli $E_{\text{alt}} = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ ($J_{\text{alt}} = 2.5$) geçişinin fit edilen spektrumu Şekil 4.2’de verildi.

**Şekil 4.2:** $\sigma_{\text{deneysel}} = 13725.36 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 39470.489 \text{ cm}^{-1}$ $J_{\text{üst}} = 2.5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ $J_{\text{alt}} = 2.5$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

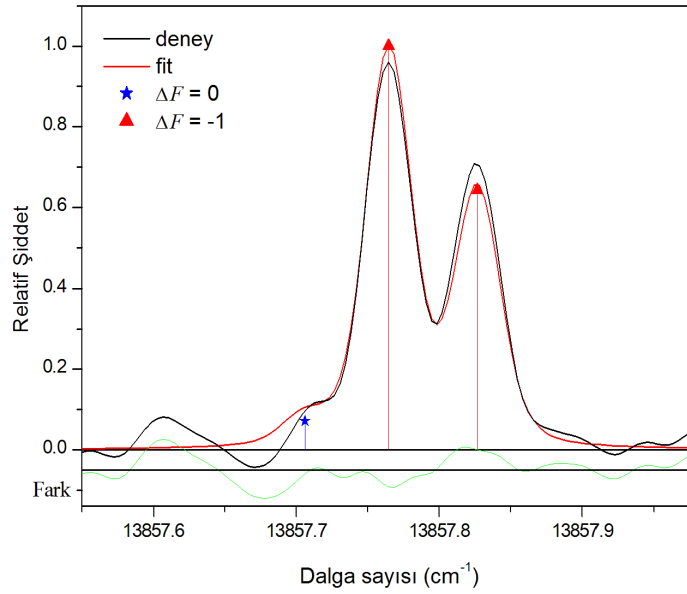
Çizginin fit işlemi süresince üst seviyenin hfs sabiti, literatürde bulunan $A_{\text{üst}} = 175.5 \text{ MHz}$ (Parlatan, 2022) değerinde sabit tutulurken, alt seviyenin hfs sabiti ve teta parametresi serbest bırakıldı. Bulmak istediğimiz $E = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ alt ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol hfs sabiti $A_{\text{alt}} = -594(7) \text{ MHz}$ olarak belirlendi. Fit işlemi sonucu bulunan parametre değerleri Tablo 4.6’da verildi.

Tablo 4.6: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13725.36 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$13725.371 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	15.33
FWHM(Voigt)	1205.59 MHz
FWHM(Gauss)	1003.94 MHz
FWHM(Lorentz)	353.31MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.841

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 13857.78 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 721.417 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Son incelenen çizgi, tek pariteli $E_{\text{üst}} = 39602.902 \text{ cm}^{-1}$ ($J_{\text{üst}} = 1.5$) ince yapı enerji seviyesinden, çift pariteli $E_{\text{alt}} = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ ($J_{\text{alt}} = 2.5$) seviyesine olan geçiştir. Çizginin fit işleminde üst seviyenin hfs sabiti literatürde verilen $A_{\text{üst}} = -1811.6 \text{ MHz}$ (Parlatan, 2022) değerinde sabit bırakıldı. Manyetik dipol hfs sabiti bulmak istenen alt seviyenin A değerinin ve teta değerinin fit işleminde değişmesine izin verildi. Alt enerji seviyesinin hfs sabiti, $A_{\text{alt}} = -586(15) \text{ MHz}$ olarak elde edildi. Bu spektral geçişe ait fit işleminden elde edilen spektrum Şekil 4.3'te sunuldu.

**Şekil 4.3:** $\sigma_{\text{deneysel}} = 13857.78 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 39602.902 \text{ cm}^{-1}$ $J_{\text{üst}} = 1.5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ $J_{\text{alt}} = 2.5$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

Tablo 4.7'de ise en iyi fit işlemine ait parametre değerleri verildi.

Tablo 4.7: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13857.78 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametrelerin sayısal değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$13857.786 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	8.5
FWHM(Voigt)	1156.36 MHz
FWHM(Gauss)	946.16 MHz
FWHM(Lorentz)	365.80 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.818

Bulunan hfs sabiti hatalarında Fitter programından gelen katkı, fit işlemi boyunca sabit tutulan üst seviyeye ait hata katkısı göz önüne alındı. Hata hesabına ait detaylı bilgi Bölüm 5'te verildi.

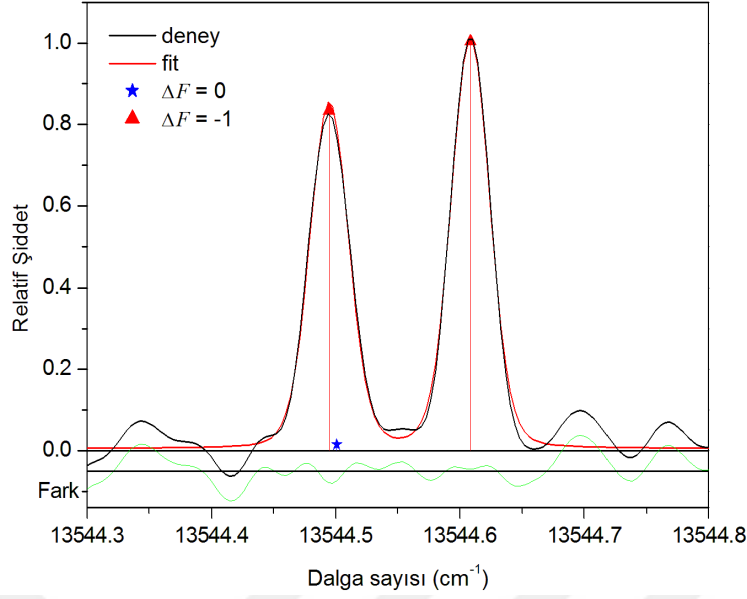
Sonuç olarak, üç farklı geçiş yardımı ile çift pariteli $E = 25745.117 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 2.5$) ince yapı enerji seviyesi için hfs sabiti değeri $A = -593(5)$ MHz olarak **revize** edildi.

Tm-FT spektrumunun incelenmesine devam edildi ve çift pariteli $E = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 4.5$) ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol hfs sabitinin daha önce bulunmadığı tespit edildi. Tm-FT spektrumunda $E = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 4.5$) enerji seviyesini içeren iki spektral çizgi belirlendi ve bu çizgiler analiz edildi.

➤ **Çift pariteli $E = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 4.5$) enerji seviyesinin incelenmesi**

• **$\sigma_{\text{deneysel}} = 13544.55 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 738.101 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi**

Bu enerji seviyesi için analiz edilen ilk geçiş, çift pariteli $E_{\text{üst}} = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$ ($J_{\text{üst}} = 4.5$) seviyesinden tek pariteli $E_{\text{alt}} = 24957.469 \text{ cm}^{-1}$ ($J_{\text{alt}} = 5.5$) seviyesine olan geçiştir. Bu spektral geçiş de kriterlere uygun olarak birbirlerinden net ayırt edilebilen çift pike sahiptir. Fit işlemi yapılırken alt seviyeye ait hfs değeri literatürden alınan $A_{\text{alt}} = -538.7$ MHz (Başar, 2005) değerinde sabit tutulurken, serbest bırakılan üst seviyeye ait hfs sabiti değeri $A_{\text{üst}} = 36(5)$ MHz olarak bulundu. Geçişe ait en iyi fit spektrumu Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13544.55 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4.5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 24957.469 \text{ cm}^{-1}$ $J_{\text{alt}} = 5.5$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

Bu geçişe ait fit işlemi sonucu bulunan parametre değerleri Tablo 4.8’de sunuldu.

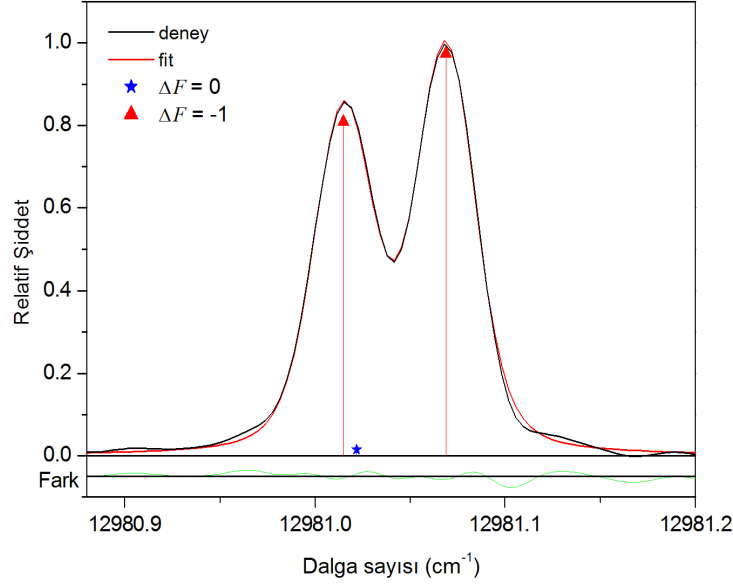
Tablo 4.8: $\sigma_{\text{deneysel}} = 13544.55 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$13544.557 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	7.81
FWHM(Voigt)	1101.7 MHz
FWHM(Gauss)	1016.53 MHz
FWHM(Lorentz)	155.54 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.923

Manyetik dipol hfs sabiti bulunmak istenen $E = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$, $J = 4.5$ seviyesini içeren ikinci çizgi ise $\sigma = 12981.04 \text{ cm}^{-1}$ olarak tespit edildi. Aşağıda bu çizginin fit işlemine ait detaylar verildi.

- **$\sigma_{\text{deneysel}} = 12981.04 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda = 770.142 \text{ nm}$) çizgisinin fit analizi**

Çift pariteli $E_{\text{üst}} = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 4.5$) enerji seviyesinden, tek pariteli $E_{\text{alt}} = 25520.987 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 5.5$) enerji seviyesine geçişe ait yapılan fit işleminde alt seviyenin hfs sabiti daha önce 2005 yılında Başar ve diğeri tarafından verilen $A_{\text{alt}} = -234.8 \text{ MHz}$ (Başar, 2005) değerinde sabit tutuldu ve üst seviyenin hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = 41.5(1.5) \text{ MHz}$ olarak elde edildi. Geçişe ait en iyi fit spektrumu Şekil 4.5’te verildi.



Şekil 4.5: $\sigma_{\text{deneysel}} = 12981.04 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4.5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 25520.987 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 5.5$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

Tablo 4.9’da en iyi fit işleminde belirlenen parametre değerleri verildi.

Tablo 4.9: $\sigma_{\text{deneysel}} = 12981.04 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$12981.043 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	33.47
FWHM(Voigt)	1123.46 MHz
FWHM(Gauss)	916.07 MHz
FWHM(Lorentz)	360.43 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.815

Sonuç olarak, iki farklı spektral geçiş ile çift pariteli çift pariteli $E = 38502.00 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 4.5$) ince yapı enerji seviyesinin hfs sabiti değeri, $A = 41.0(1.6) \text{ MHz}$ olarak **ilk defa** bu çalışmada bulundu.

4.2.3. Bir kez iyonlaşmış tulyuma (Tm II) ait çizgi sınıflandırması

Tm-FT spektrumunda 330 nm - 400 nm ve 700 nm - 1000 nm spektral bölgelerinin taranması sonucu belirlenen 953 tane spektral çizgiden 49 tanesi ilk defa bu çalışmada olmak üzere 151 tanesi Tm II olarak sınıflandırıldı. Tablo 4.10’da Tm II olarak sınıflandırılan çizgiler verildi. Tabloda “lc” ile gösterilen çizgiler hem daha önce belirlenmemiş yeni çizgiler olup hem de ilk defa bu çalışmada sınıflandırılmıştır, “nc” ile gösterilen çizgi ise bilinen bir çizgi olup sınıflandırılması ilk bu çalışmada yapılmıştır.

Tablo 4.10: 330 nm - 400 nm ve 700 nm - 1000 nm bölgeleri arasında Tm II olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
336.261	29730.22	4000	240	190	240-	-121.3	29967.17	2	236.95	3	0.004
337.269	29641.43	lc	196	145	105?	-30.3	63206.57	3	33565.12	3	-0.024
337.450	29625.53	490	39	21	245+	136.9	38582.95	3	8957.47	3	0.048
339.750	29424.98	1700	78	57	220+	14.7	29424.98	3	0.00	4	-0.003
339.802	29420.44	16	7	7	180?	70	45987.89	5	16567.47	5	0.021
339.978	29405.21	lc	22	22	105?	113.9	62796.72	4	33391.55	4	0.035
339.982	29404.90	lc	4	3	145?	46.2	54419.68	4	25014.75	5	-0.030
339.995	29403.78	420	49	22	200+	90.1	38361.24	4	8957.47	3	0.008
341.157	29303.58	lc	7	4	195+	115.8	38261.05	3	8957.47	3	0.002
342.014	29230.18	lc	3	4	95?	-36.7	59607.45	5	30377.16	4	-0.113
342.508	29188.03	6400	317	208	195-	54.6	29424.98	3	236.95	3	0.000
342.562	29183.39	6.53	49	37	190+	83.6	29183.39	4	0.00	4	0.004
342.667	29174.49	lc	4	4	95?	-51.3	62739.54	3	33565.12	3	0.069
342.997	29146.46	850	59	30	160?	60.6	37916.11	1	8769.68	2	0.034
343.119	29136.07	420	37	21	205+	91.8	38093.53	4	8957.47	3	0.007
343.763	29081.45	lc	5	5	230+	136.6	45648.93	4	16567.47	5	-0.013
343.880	29071.56	lc	12	4	230-	109.1	37841.25	2	8769.68	2	-0.014
344.150	29048.77	4900	237	163	160-	57.5	29285.72	2	236.95	3	0.002
344.434	29024.81	lc	5	4	90?	39.4	63605.54	5	34580.75	5	0.022
345.367	28946.45	4900	253	166	200-	106.3	29183.39	4	236.95	3	0.006
346.116	28883.77	13	16	7	200+	89.8	37841.25	2	8957.47	3	-0.009
346.220	28875.12	8500	611	397	155?	37.1	28875.12	5	0.00	4	0.000
347.184	28794.91	lc	7	7	130-	95.4	61295.19	2	32500.26	2	-0.024
347.934	28732.86	lc	4	4	90?	20	54988.96	7	26256.26	7	0.157
348.175	28712.99	340	31	14	155-	59.9	37482.67	2	8769.68	2	0.001
349.073	28639.07	10	6	6	95?	-40.8	62796.72	4	34157.64	5	-0.006
349.257	28624.00	210	32	14	140+	57.9	37581.47	4	8957.47	3	0.003
349.260	28623.79	3.95	4	3	95?	16.5	45191.25	5	16567.47	5	0.010
349.519	28602.59	8	6	5	100?	37.5	52661.66	7	24059.08	8	0.008
350.467	28525.20	lc	3	2	85?	179.4	37482.67	2	8957.47	3	-0.004
350.505	28522.12	lc	5	5	130+	76.3	54710.56	6	26188.47	5	0.030
351.302	28457.37	250	7	5	105?	52.2	50766.21	4	22308.82	4	-0.019
351.485	28442.56	50	5	5	80?	60	62108.6	4	33665.99	4	-0.053
352.008	28400.32	lc	3	3	80?	-21.7	47927.14	6	19526.82	6	-0.004
352.243	28381.41	16	29	13	175-	69.1	37151.09	2	8769.68	2	0.001
352.820	28335.00	lc	13	11	95?	-29.3	54523.58	5	26188.47	5	-0.114
353.484	28281.72	250	12	12	215+	119.5	47808.54	5	19526.82	6	-0.004
353.551	28276.35	7.46	320	220	225?	54	28276.32	5	0.00	4	0.028
353.552	28276.33	1700	314	210	160?	55.8	28276.32	5	0.00	4	0.008
353.622	28270.74	490	41	39	225+	144.6	44838.25	4	16567.47	5	-0.037
353.657	28267.88	850	128	96	185+	78.9	28267.88	3	0.00	4	-0.003
353.695	28264.86	lc	8	8	80?	34.7	64018.59	3	35753.72	3	-0.013
354.118	28231.08	30	13	13	145?	-23.6	54419.68	4	26188.47	5	-0.127
354.179	28226.25	5h / nc	11	11	130?	32.5	66764.29	7	38537.96	6	-0.078
354.848	28173.05	13	5	5	110?	54.3	49195.03	6	21021.98	5	0.004
355.015	28159.76	8	5	2	180-	-82.5	55758.31	7	27598.57	6	0.022
355.779	28099.31	420	83	38	250-	130.5	36868.99	3	8769.68	2	0.001
355.871	28092.02	lc	3	2	95?	-77.1	51116.29	8	23024.29	8	0.022
356.591	28035.36	490	45	29	245-	-128.1	47654.43	8	19619.08	7	0.008
356.647	28030.93	1300	141	103	230-	116.9	28267.88	3	236.95	3	0.004
357.405	27971.45	280	24	16	130?	36.8	47654.43	8	19682.97	8	-0.007

Tablo 4.10 (devam): 330 nm – 400 nm ve 700 – 1000 nm bölgeleri arasında Tm II olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
357.751	27944.41	lc	5	5	85?	28.3	52003.5	8	24059.08	8	-0.011
358.119	27915.69	lc	4	4	100?	-43.8	59815.73	3	31900	4	-0.043
359.916	27776.36	lc	4	4	55?	28.2	52791.11	6	25014.75	5	-0.001
360.212	27753.52	lc	52	50	140?	29.6	53733.5	3	25980.02	3	0.042
360.735	27713.31	lc	8	7	130?	64.3	49765.68	7	22052.39	7	0.024
360.876	27702.44	2100	370	260	185+	73	27702.42	3	0.00	4	0.019
360.953	27696.52	250/nc	25	15	225-	-99.9	45987.89	5	18291.37	4	0.003
360.999	27693.02	lc	10	8	105?	31.3	53673.03	4	25980.02	3	0.014
361.239	27674.63	8	18	10	130?	-28.5	45648.93	4	17974.3	4	0.000
361.303	27669.73	7	10	7	200?	-72	44237.17	4	16567.47	5	0.028
361.688	27640.24	lc	85	65	115?	15.2	53896.44	6	26256.26	7	0.062
361.996	27616.73	26.6	15	10	190?	103.8	47299.68	7	19682.97	8	0.021
362.342	27590.38	2.5	9	5	245?	22.7	36547.84	4	8957.47	3	0.010
363.989	27465.51	3	5	5	165?	-116.9	27702.42	3	236.95	3	0.037
364.365	27437.16	950	150	58	255?	149.6	36394.64	2	8957.47	3	-0.012
364.472	27429.17	lc	10	5	110?	69.3	48048.19	4	20619.05	5	0.030
364.724	27410.21	12	13	10	170?	93	49765.68	7	22355.43	6	-0.042
364.773	27406.53	240	62	50	225?	81	39863.81	5	12457.29	6	0.011
365.341	27363.92	lc	15	11	180?	-67.1	45338.24	3	17974.30	4	-0.022
365.361	27362.36	600	105	50	185?	-56.4	36132.08	3	8769.68	2	-0.036
365.617	27343.26	lc	7	7	125?	14.7	61650.80	5	34307.52	4	-0.017
365.875	27323.92	lc	6	3	65?	22.5	52255.94	4	24932.00	4	-0.015
366.088	27308.07	7	8	5	225?	-83.4	47927.14	6	20619.05	5	-0.018
366.581	27271.34	500	97	97	245?	126.5	36041.02	3	8769.68	2	0.002
366.808	27254.43	3.44	106	73	230+	80.3	27254.42	4	0.00	4	0.007
367.314	27216.91	14	16	12	175?	-93.9	45191.25	5	17974.30	4	-0.038
367.798	27181.08	410	81	52	220?	-106.8	39638.41	7	12457.29	6	-0.039
367.887	27174.52	450	60	30	235+	133.8	36132.08	3	8957.47	3	-0.093
367.895	27173.91	lc	12	9	230?	-111.6	48195.94	6	21021.98	5	-0.051
367.986	27167.24	lc	4	4	110?	12	59067.28	4	31900.00	4	-0.039
368.099	27158.87	lc	16	14	120?	3	53733.50	3	26574.66	4	0.029
368.319	27142.66	12	8	6	190?	109.4	49195.03	6	22052.39	7	0.017
368.921	27098.39	lc	8	8	95?	26.5	53673.03	4	26574.66	4	0.019
368.977	27094.28	lc	4	3	75?	62.1	53673.03	4	26578.77	3	0.021
369.158	27081.00	5	6	5	110?	26	60262.99	6	33182.00	7	0.010
369.473	27057.85	410	48	28	125?	59.2	27294.79	2	236.95	3	0.009
369.482	27057.20	lc	26	16	125?	28.3	51116.29	8	24059.08	8	-0.008
369.987	27020.31	6.19	36	24	175?	55.3	39477.60	6	12457.29	6	0.000
370.026	27017.48	4800	630	450	190?	109.6	27254.42	4	236.95	3	0.008
370.136	27009.40	3800	800	480	145?	33.3	27009.39	4	0.00	4	0.013
370.295	26997.78	lc	3	3	95?	15.9	53576.56	4	26578.77	3	-0.009
370.332	26995.08	lc	11	5	95?	23.8	47614.14	5	20619.05	5	-0.007
370.484	26984.03	330	72	35	205-	-86.8	35753.72	3	8769.68	2	-0.013
371.971	26876.16	6	16	8	290+	141.1	35833.62	2	8957.47	3	0.027
371.994	26874.55	lc	15	10	130?	34.8	61745.85	5	34871.37	4	0.066
372.088	26867.71	lc	5	3	200?	133.7	26867.70	5	0.00	4	0.008
372.506	26837.58	890	272	140	240+	124.2	26837.58	3	0.00	4	-0.001
373.081	26796.22	10	18	8	255+	103.3	35753.72	3	8957.47	3	-0.025
373.412	26772.45	10.4	30	180	245?	156.6	27009.39	4	236.95	3	0.013
374.407	26701.30	420	1680	1200	240-	-79.1	53955.64	4	27254.42	4	0.077
375.824	26600.63	0.067	3	3	105?	34.2	26837.58	3	236.95	3	0.001
376.133	26578.78	6000	500	320	270?	139.8	26578.77	3	0.00	4	0.008
376.191	26574.66	4800	300	210	245?	124.8	26574.66	4	0.00	4	0.003
376.586	26546.84	42	5	4	75?	13.8	44838.25	4	18291.37	4	-0.036
378.356	26422.65	260	13	5	95?	60.5	57050.32	5	30627.58	5	-0.089
379.517	26341.83	380	10	8	155?	50.1	26578.77	3	236.95	3	0.011
379.576	26337.72	7100	190	125	195?	65.1	26574.66	6	236.95	3	0.005
379.876	26316.94	240	11	5	125?	179.4	35274.43	2	8957.47	3	-0.020

Tablo 4.10 (devam): 330 nm – 400 nm ve 700 – 1000 nm bölgeleri arasında Tm II olarak sınıflandırılan çizgiler.

λ (nm)	σ_{deneysel} (cm^{-1})	I	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)	ΔW (mK)	$E_{\text{üst}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{üst}}$	E_{alt} (cm^{-1})	J_{alt}	$\Delta\sigma$ (cm^{-1})
383.819	26046.56	45.7	6	3	175?	142.7	35003.98	2	8957.47	3	0.050
384.802	25980.03	8900	140	85	175?	79.4	25980.02	3	0.00	4	0.012
385.784	25913.89	140	4	4	85?	179.4	34871.37	4	8957.47	3	-0.011
387.966	25768.15	1.14	3	3	75?		38225.46	6	12457.29	6	-0.016
388.344	25743.08	1800	96	66	210?	110.5	25980.02	3	236.95	3	0.015
389.052	25696.21	0.78	70	60	135?	49.2	25696.21	4	0.00	4	-0.005
389.988	25634.57	0.466	9	4	85?	10.8	34404.26	2	8769.68	2	-0.012
390.037	25631.32	50	4	4	90?	37.5	59297.28	4	33665.99	4	0.035
390.078	25628.62	13.7	80	45	190-	-89.6	34398.30	3	8769.68	2	0.002
391.287	25549.45	30	5	4	75?	35.7	43840.82	5	18291.37	4	0.003
392.673	25459.26	0.059	7	6	225?	34.2	25696.21	4	236.95	3	0.000
392.866	25446.78	120	120	18	250?	177.7	34404.26	2	8957.47	3	-0.009
392.958	25440.83	10.9	95	50	195?	100.5	34398.30	3	8957.47	3	-0.003
395.742	25261.84	4	19	13	85?	34.2	25498.77	2	236.95	3	0.017
395.810	25257.53	1500	450	310	165?	76.1	25257.52	3	0.00	4	0.011
395.938	25249.33	lc	14	14	105?	11.7	63787.29	5	38537.96	6	0.004
399.558	25020.61	440	110	110	245-	-113.8	25257.52	3	236.95	3	0.041
399.651	25014.76	1800	820	610	140-	-38.4	25014.75	5	0.00	4	0.006
399.824	25003.96	40	17	17	175-	-76.7	48807.26	5	23803.28	4	-0.025
703.435	14212.03	12	88	70	130?	-31.4	55753.84	6	41541.81	5	-0.001
705.639	14167.65	10/nc	3	3	195+	122.3	39863.81	5	25696.21	4	0.053
731.043	13675.31	1.02	26	28	70?	-14.7	39863.81	5	26188.47	5	-0.026
740.882	13493.72	lc	7	5	115-	-62.7	53336.89	5	39843.24	4	0.068
743.453	13447.04	5	3	3	125?	-45.8	34580.75	5	21133.68	6	-0.028
743.995	13437.25	5/nc	3	5	80?	-30	33665.99	4	20228.75	5	0.013
747.468	13374.82	30	30	25	80?	10.5	49147.65	4	35772.82	5	-0.007
759.508	13162.80	17	8	5	45?	-12.2	33391.55	4	20228.75	5	0.003
765.499	13059.77	lc	5	3	95-	-49.3	30684.43	3	17624.65	2	-0.003
766.035	13050.64	lc	60	47	125-	-62.2	55972.37	6	42921.77	6	0.039
767.605	13023.96	8/nc	3	3	170-	-78.8	34157.64	5	21133.68	6	-0.004
844.206	11842.19	lc	10	8	55?	-29.3	47808.54	5	35966.41	4	0.064
926.261	10793.13	3.09	65	31	150-	-87.4	31926.82	5	21133.68	6	-0.009
939.308	10643.21	lc	7	3	100-	-54.2	28267.88	3	17624.65	2	-0.017
942.070	10612.01	lc	5	3	55?	-24	30840.77	4	20228.75	5	-0.010
943.786	10592.72	0.636	42	16	105-	-57.2	31726.40	5	21133.68	6	-0.004
953.509	10484.70	lc	6	7	?40	16.5	52026.52	5	41541.81	5	-0.010
958.384	10431.37	lc	56	12	?90	-22	50274.65	5	39843.24	4	-0.036
972.496	10280.00	0.171	31	14	?60	-7.5	30508.76	4	20228.75	5	0.012
985.106	10148.41	lc	10	4	95-	-48.3	30377.16	4	20228.75	5	-0.003
985.736	10141.93	l	9	3	?70	-7.5	33665.99	4	23524.09	4	0.026
989.057	10107.87	lc	4	4	?60	-23.8	52026.52	5	41918.58	6	-0.074
992.011	10077.78	0.175	45	21	120-	-54.2	27702.42	3	17624.65	2	0.001

Tablo 4.10'daki sütunların açıklamaları Tablo 1 ile aynıdır. Hem Ar hem de Ne asal gazı ile çekilen spektrumlarda gözlenen fakat bilinen ince yapı enerji seviyeleri ile sınıflandırılmayan 231 adet metal çizgisi Tm I veya Tm II olarak tanımlandı ve Tablo 4.11'de sunuldu.

Tablo 4.11: 330 nm - 400 nm ile 700 nm -1000 nm bölgeleri arasında Tm I veya Tm II olarak tanımlanan çizgiler.

$\lambda_{\text{hava}} \text{ (nm)}$	$\sigma_{\text{deneysel}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)
334.312	29903.54	6	6	100?
335.694	29780.39	215	145	140+
336.353	29722.05	7	8	80?
336.517	29707.60	6	7	160?
336.859	29677.40	34	41	115?
338.497	29533.80	69	69	150?
339.396	29455.60	4	5	75?
342.169	29216.87	3	3	85?
342.489	29189.57	9	7	160-
343.828	29075.94	3	5	100?
344.022	29059.53	3	3	125?
344.061	29056.28	3	3	210?
345.347	28948.03	3	3	65?
345.634	28923.97	39	33	140?
345.658	28922.04	4	5	90?
346.430	28857.56	5	5	65?
346.754	28830.63	21	21	100?
347.342	28781.81	3	3	80?
347.420	28775.35	4	4	90?
347.570	28762.93	19	19	125?
347.986	28728.55	3	3	90?
348.753	28665.34	10	10	85?
349.250	28624.52	8	8	120-
349.495	28604.52	4	4	?115?
349.713	28586.68	8	8	130-
349.750	28583.62	8	8	90?
349.994	28563.69	190	140	130?
350.080	28556.72	160	90	260?
350.335	28535.90	62	62	160?
350.358	28534.01	5	5	185?
350.403	28530.38	7	7	60?
350.535	28519.64	19	19	95?
350.597	28514.56	21	19	185-
350.711	28505.31	13	15	220?
351.162	28468.70	3	3	90?
351.254	28461.27	12	12	110?
351.369	28451.93	5	5	95?
351.759	28420.38	221	167	145?
351.967	28403.60	3	3	65?
352.089	28393.79	4	4	75?
352.313	28375.66	4	4	70?
352.346	28373.08	3	3	65?
352.788	28337.48	16	16	40?

Tablo 4.11 (devam): 330 nm - 400 nm ile 700 nm -1000 nm bölgeleri arasında Tm I veya Tm II olarak tanımlanan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm ⁻¹)	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)
352.917	28327.10	3	3	65?
353.466	28283.10	3	3	110?
353.671	28266.74	3	3	65?
353.688	28265.39	3	3	65?
353.758	28259.83	25	31	135?
353.790	28257.20	240	190	140?
354.061	28235.60	5	5	65?
354.127	28230.37	6	6	135?
354.242	28221.18	5	5	140?
354.543	28197.25	4	4	150?
355.167	28147.67	21	25	120?
356.341	28054.95	17	17	135?
356.530	28040.07	4	5	125?
356.581	28036.08	27	22	125?
356.994	28003.67	20	13	105?
357.044	27999.72	3	3	130?
357.066	27997.97	23	23	60?
357.292	27980.29	3	3	125?
357.490	27964.75	23	15	240+
357.594	27956.63	3	3	65?
359.440	27813.11	18	15	185-
359.482	27809.80	3	3	140?
359.647	27797.04	9	12	95?
359.918	27776.12	8	8	105?
360.190	27755.14	12	12	115?
360.363	27741.87	16	16	125?
360.659	27719.05	3	3	75?
361.318	27668.53	3	3	95?
361.393	27662.77	7	7	115?
361.564	27649.71	3	3	95?
361.952	27620.02	4	4	105?
362.046	27612.92	42	46	115?
362.540	27575.23	16	16	100?
362.598	27570.85	4	4	85?
362.757	27558.80	6	6	115?
362.909	27547.23	12	180	165?
362.986	27541.40	5	7	85?
363.027	27538.24	3	3	75?
363.207	27524.66	28	20	175?
364.131	27454.79	5	5	115?
364.848	27400.80	15	13	105?
365.140	27378.89	3	3	135?
365.155	27377.79	4	4	75?
365.453	27355.46	9	9	110?

Tablo 4.11 (devam): 330 nm - 400 nm ile 700 nm -1000 nm bölgeleri arasında Tm I veya Tm II olarak tanımlanan çizgiler.

$\lambda_{\text{hava}} \text{ (nm)}$	$\sigma_{\text{deneysel}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)
365.619	27343.03	22	15	135?
366.045	27311.24	46	35	305?
366.465	27279.94	8	8	215?
366.801	27254.97	25	18	140-
367.179	27226.91	8	8	125?
367.912	27172.66	3	3	95?
368.399	27136.71	4	4	110?
368.933	27097.41	8	8	110?
369.100	27085.21	6	6	90?
369.641	27045.53	6	6	80?
369.702	27041.10	3	3	105?
369.825	27032.10	4	4	95?
370.105	27011.60	15	15	155?
370.386	26991.17	3	3	90?
370.437	26987.44	30	32	120?
370.843	26957.90	3	3	95?
371.028	26944.44	5	5	95?
371.283	26925.91	4	6	105?
371.895	26881.65	4	4	85?
371.983	26875.26	9	9	110?
372.242	26856.54	27	27	150?
373.128	26792.79	4	4	85?
373.711	26751.00	11	11	295?
374.137	26720.54	7	7	85?
374.556	26690.63	4	4	95?
375.156	26648.00	6	6	85?
375.216	26643.69	4	3	95?
375.278	26639.27	4	4	75?
375.686	26610.34	41	21	270?
376.124	26579.41	6	6	85?
376.236	26571.49	26	24	95?
378.097	26440.66	8	7	105?
378.807	26391.12	13	13	95?
380.507	26273.20	133	82	90?
381.095	26232.67	36	32	95?
383.280	26083.12	13	13	105?
383.682	26055.83	8	8	85?
383.896	26041.30	10	17	100?
384.341	26011.15	17	15	105?
384.356	26010.11	3	3	75?
385.720	25918.17	7	7	85?
386.545	25862.86	5	5	75?
387.158	25821.88	4	3	100?
387.184	25820.14	27	18	175?
392.155	25492.86	15	15	75?

Tablo 4.11 (devam): 330 nm - 400 nm ile 700 nm -1000 nm bölgeleri arasında Tm I veya Tm II olarak tanımlanan çizgiler.

λ_{hava} (nm)	σ_{deneysel} (cm ⁻¹)	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)
393.350	25415.42	3	3	75?
394.400	25347.76	25	9	210?
394.588	25335.66	4	4	95?
395.546	25274.29	3	3	95?
396.479	25214.87	5	5	110?
397.006	25181.38	4	5	105?
397.300	25162.77	4	4	85?
397.389	25157.13	3	3	70?
397.501	25150.05	15	4	125?
398.366	25095.40	3	3	95?
398.528	25085.18	6	5	80?
398.762	25070.46	9	8	115?
398.786	25068.98	3	3	85?
399.178	25044.36	10	11	175+
399.191	25043.57	2	2	105?
399.573	25019.62	6	5	95?
399.640	25015.42	14	14	135?
399.781	25006.59	120	82	150-
399.836	25003.15	3	3	95?
399.914	24998.30	5	5	95?
700.699	14267.51	3	5	85?
702.242	14236.16	10	10	130-
705.527	14169.88	12	10	90?
711.541	14050.12	7	7	165?
712.394	14033.30	5	5	95?
713.995	14001.83	36	32	85?
714.986	13982.42	24	12	165?
718.688	13910.39	29	26	95?
719.844	13888.05	17	19	70?
720.874	13868.22	18	15	75?
720.958	13866.61	10	8	100?
722.166	13843.41	32	22	105?
723.033	13826.80	6	6	40?
724.892	13791.35	6	6	105?
724.907	13791.06	12	10	90?
730.327	13688.71	6	5	50?
733.407	13631.22	3	3	50?
733.663	13626.47	3	3	85?
734.637	13608.40	4	11	90?
735.279	13596.52	3	7	75?
735.289	13596.33	7	4	60?
735.658	13589.52	5	5	45?
735.691	13588.90	2	7	80?
736.838	13567.74	10	9	75?
738.588	13535.61	25	27	95?

Tablo 4.11 (devam): 330 nm - 400 nm ile 700 nm -1000 nm bölgeleri arasında Tm I veya Tm II olarak tanımlanan çizgiler.

$\lambda_{\text{hava}} \text{ (nm)}$	$\sigma_{\text{deneysel}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	S/N Ar	S/N Ne	W (mK)
739.013	13527.82	22	24	105?
740.795	13495.29	4	10	80?
742.598	13462.52	3	3	135?
742.636	13461.83	4	8	75?
755.555	13231.65	6	4	35?
763.044	13101.78	10	5	80?
766.489	13042.90	27	74	105?
767.357	13028.14	4	4	70?
769.896	12985.18	12	36	105?
770.272	12978.84	20	24	95?
772.540	12940.74	19	16	80?
783.566	12758.65	57	31	110?
786.196	12715.96	10	8	95?
807.543	12379.83	25	24	115-
815.879	12253.33	10	6	155?
817.705	12225.97	10	6	165?
822.330	12157.21	6	5	70?
825.806	12106.04	3	3	65?
832.471	12009.11	3	5	55?
834.656	11977.68	4	7	55?
889.891	11234.24	14	16	105?
891.350	11215.85	3	5	35?
905.611	11039.22	2	4	70?
906.739	11025.49	8	10	75?
911.631	10966.33	58	60	165?
927.824	10774.94	5	5	45?
928.937	10762.03	6	8	55?
933.078	10714.27	10	13	80?
934.008	10703.60	10	12	65?
938.117	10656.72	3	4	95?
940.482	10629.92	4	4	50?
943.833	10592.17	7	7	135?
949.390	10530.18	3	3	45?
949.481	10529.17	28	26	60?
949.600	10527.85	24	6	85?
952.849	10491.95	3	3	60?
953.230	10487.76	22	16	70?
958.082	10434.64	5	4	55?
960.110	10412.61	50	57	95?
960.937	10403.64	3	4	50?
963.972	10370.90	21	10	85?
965.060	10359.20	3	3	65?
967.112	10337.22	38	10	80?
969.790	10308.68	4	5	65?
970.506	10301.07	33	9	110?
971.786	10287.50	32	38	65?
979.549	10205.97	41	7	70?
979.659	10204.83	21	4	95?
980.098	10200.25	14	5	85?
985.016	10149.32	10	10	85?
987.918	10119.52	13	14	85?
988.637	10112.15	12	13	75?
990.535	10092.78	15	17	55?
992.864	10069.10	3	3	50?

Tablo 4.11'deki sütunların açıklamaları sırası ile; nm biriminde çizginin havadaki dalga boyu, cm^{-1} biriminde çizginin vakumdaki dalga sayısı, Ar ve Ne asal gazları ile alınan spektrumda sinyal-gürültü oranı, spektral çizginin mK biriminde genişlik değeridir ($1\text{mK} = 0.001 \text{ cm}^{-1}$).

4.2.4. Bir kez iyonlaşmış tulyuma (Tm II) ait aşırı ince yapı analizi

Tezin bu bölümünde 330 nm - 2345 nm dalga boyu aralığında FT spektrometresi ile ölçülen içi boş bir silindir katot deşarj lambasından gelen emisyon spektrumları incelendi ve bir kez iyonize tulyumun (Tm II) 40 adet spektral çizgisinin aşırı ince yapı analizi ilk defa bu çalışmada yapıldı.

Tm II için 1989 yılında Mansour ve diğ. tarafından yapılan deneysel çalışmada boya laser kullanılarak sadece sekiz tane ince yapı enerji seviyesinin hfs sabiti verilmiş olup aşırı ince yapı bilgisi bu kadarla sınırlı kalmıştır. Bu bilgi eksikliğinin giderilmesi gereklidir. Özellikle nadir toprak element bolluklarının doğru bir şekilde belirlenmesini sağlayacak güvenilir atom verileri, yüksek çözünürlüklü ve yüksek sinyal-gürültü oranlı yıldız spektrumlarının elde edilmesi kadar önemlidir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan analizler sonucunda Mansour tarafından yapılan çalışmada verilen tek pariteli $E = 8769.98 \text{ cm}^{-1}$, $J = 2$ ve çift pariteli $E = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J = 3$ ince yapı seviyeleri için manyetik dipol hfs sabitlerinin hatalı olduğu belirlendi ve bu iki değer revize edildi. Ayrıca 27 tane yeni manyetik dipol hfs sabiti ilk defa bu çalışmada bulundu. Tm II hfs analizinde revize edilen ve yeni önerilen A sabitlerinin belirlenmesinde izlenen tüm adımlar aşağıda detaylı olarak açıklandı. Tablo 4.12'de Mansour ve diğerleri (1989) tarafından bulunan manyetik dipol hfs sabitleri, sınıflandırma programının (Elements programı) giriş dosyasına eklendi ve Tm-FT spektrumu tarandı.

Tablo 4.12: Mansour ve diğ. (1989) tarafından belirlenen deneysel manyetik dipol hfs sabitleri.

J	Parite	E / cm^{-1}	A / MHz
2	Tek	8769.68	914.9(1.0)
3	Tek	8957.47	-1537.7(0.8)
2	Tek	17624.65	-341.8(1.3)
3	Tek	21713.74	-313.5(1.9)
3	Çift	25980.02	-89.8(0.7)
3	Çift	26578.77	-136.6(1.0)
3	Çift	34913.84	-493.2(1.6)
4	Çift	39162.07	-614.9(0.9)

Tm II'nin yeni hfs sabitlerini bulmak için yine Tm I için oluşturulan ölçütler kullanıldı. Bu ölçütlere göre belirlenen 40 tane spektral çizgi Tablo 4.13'te verildi.

Tablo 4.13: Yeni manyetik dipol hfs sabitlerini belirlemek için analiz edilen Tm II çizgileri.

λ_{hava} (nm)	Çizgi		$\sigma_{\text{deneysel}}/\text{cm}^{-1}$	Grup	Üst seviye		Alt seviye	
	I	S/N Ar			$E (\text{cm}^{-1})$	$J_{\text{üst}}$	$E (\text{cm}^{-1})$	J_{alt}
336.261	4000*	240	29730.23	D	29967.17	2	236.95	3
339.750	1700*	80	29424.98	B	29424.98	3	0.00	4
339.995	420*	50	29403.78	A	38361.24	4	8957.47	3
342.562	6.53**	50	29183.40	B	29183.39	4	0.00	4
343.119	420*	37	29136.07	A	38093.53	4	8957.47	3
345.367	4900*	245	28946.45	D	29183.39	4	236.95	3
353.657	6.93**	125	28267.88	B	28267.88	3	0.00	4
355.779	420*	83	28099.31	C	36868.99	3	8769.68	2
356.647	6.28**	140	28030.94	D	28267.88	3	236.95	3
360.876	11.1**	385	27702.44	B	27702.42	3	0.00	4
364.365	950*	150	27437.16	A	36394.64	2	8957.47	3
366.581	500*	95	27271.34	C	36041.02	3	8769.68	2
367.886	450*	65	27174.59	A	36132.08	3	8957.47	3
370.026	4800*	680	27017.48	D	27254.42	4	236.95	3
370.136	3800*	785	27009.40	B [#]	27009.39	4	0.00	4
370.484	330*	75	26984.03	C	35753.72	3	8769.68	2
373.412	10.4**	310	26772.46	D	27009.39	4	236.95	3
376.133	6000*	510	26578.78	A	26578.77	3	0.00	4
376.191	4800*	305	26574.67	B	26574.66	4	0.00	4
379.576	7100*	190	26337.72	D	26574.66	4	236.95	3
384.802	8900*	140	25980.03	B	25980.02	3	0.00	4
388.344	6.76**	95	25743.09	C	25980.02	3	236.95	3
390.078	13.7**	80	25628.62	B	34398.30	3	8769.68	2
392.958	10.9**	90	25440.83	A	34398.30	3	8957.47	3
395.809	4.56**	455	25257.53	B	25257.52	3	0.00	4
399.558	0.987**	115	25020.58	D	25257.52	3	236.95	3
409.149	0.355**	8	24434.09	A	33391.55	4	8957.47	3
419.992	0.806**	280	23803.29	B	23803.28	4	0.00	4
420.600	220*	130	23768.85	B	23768.84	5	0.00	4
421.278	0.363**	8	23730.59	C ⁺	32500.26	2	8769.68	2
424.215	2085*	2085	23566.34	D [#]	23803.28	4	236.95	3
424.639	0.707**	14	23542.80	A	32500.26	2	8957.47	3
448.127	540*	860	22308.84	B [#]	22308.82	4	0.00	4
448.970	0.556**	32	22266.94	C	31036.61	3	8769.68	2
452.938	180*	140	22071.89	D	22308.82	4	236.95	3
462.656	95*	85	21608.26	B	21608.26	3	0.00	4
546.554	14*	38	18291.38	B	18291.37	4	0.00	4
992.010	0.175**	45	10077.78	A	27702.42	3	17624.65	2
1196.507		180	8355.37	A	25980.02	3	17624.65	2
2343.319		10	4266.29	A ⁺	25980.02	3	21713.74	3

Tabloda deneysel üst ve alt ince yapı enerji seviyeleri ve “*” sembolüyle gösterilen şiddet değerleri NIST (Kramida, 2024)’ten , “***” ile gösterilen şiddet değerleri ise Wickliffe, 1997’den alındı. “+” işareti ile gösterilen iki geçiş zayıf ve gürültülü çizgileri göstermektedir. Bu

iki çizgi A sabiti hesaplamaları dışında tutuldu. “ $\#$ ” işareti ise güçlü ayrışmamış bileşenli çizgileri ifade etmektedir. σ_{deneysel} için belirsizlik $< 0.015 \text{ cm}^{-1}$ 'dir. Tüm üst seviyeler çift ve tüm alt seviyeler ise tek pariteye sahiptir.

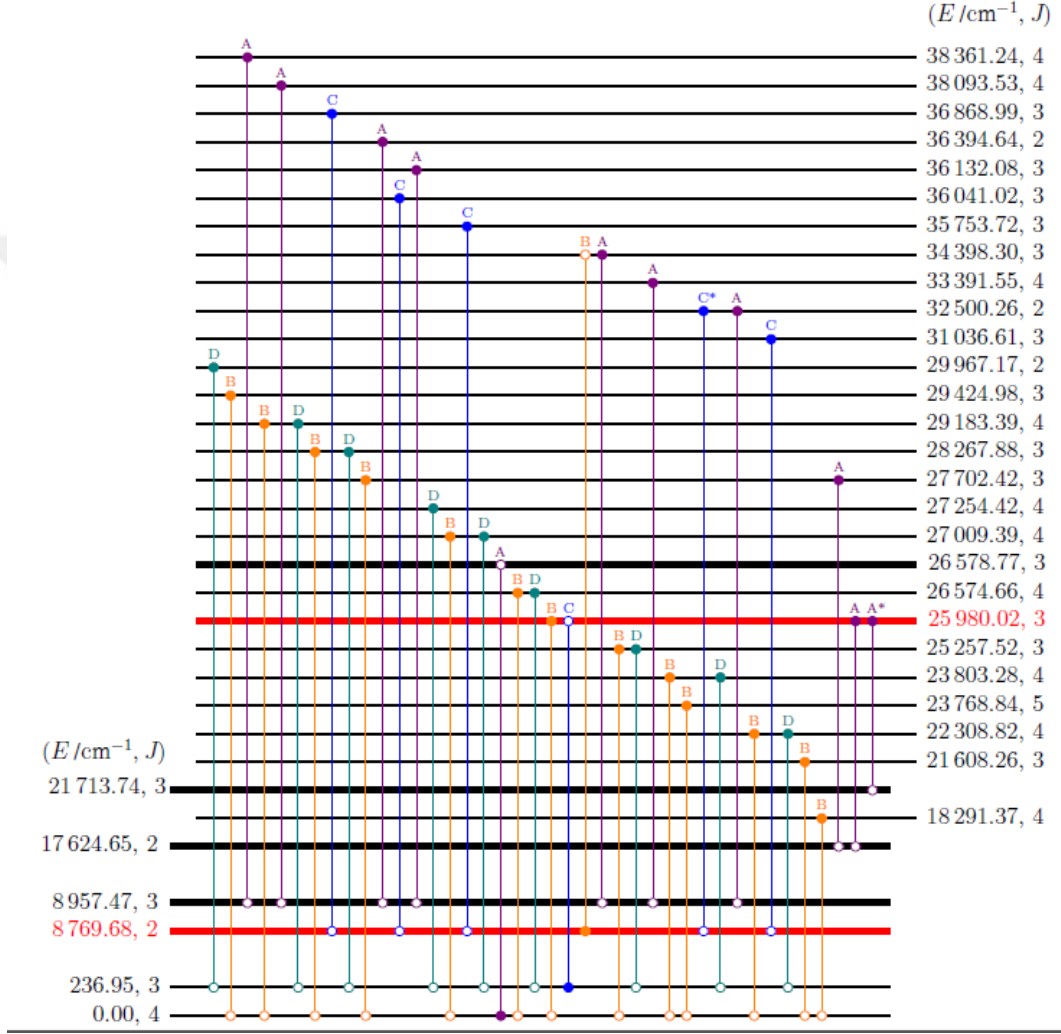
Aşırı ince yapı sabiti belirlenen seviyeler koyu olarak yazıldı. Tablo 4.13'te sütunların anlamları sırasıyla:

1. Sütun: Spektral çizginin nm cinsinden havadaki dalga boyu.
2. Sütun: Çizginin literatürden alınan şiddeti.
3. Sütun: Çizginin 70 mA boşalım akımı ile alınan Tm-Ar FT spektrumundaki sinyal-gürültü oran değeri.
4. Sütun: Deneysel spektral çizginin cm^{-1} biriminde dalga sayısı.
5. Sütun: Çizginin hangi seviyeye geçiş yaptığını belirtmek için bu çalışmada oluşturulan grup isimlendirilmesi.
6. Sütun: Üst ince yapı enerji düzeyinin cm^{-1} biriminde enerji değeri.
7. Sütun: Üst enerji düzeyinin J değeri.
8. Sütun: Alt ince yapı enerji düzeyinin cm^{-1} biriminde enerji değeri.
9. Sütun: Alt enerji düzeyinin J değeri.

Şekil 4.6'da, Tablo 4.13'te listelenen tüm geçişler ilgili enerji seviyeleri ile birlikte şematik olarak gösterildi. Bu şekildeki yatay çizgiler bir ince yapı enerji seviyesine, dikey çizgiler ise spektral bir çizgiye karşılık gelir. Kalın olarak gösterilen enerji seviyeleri, literatürden bilinen hfs sabiti değerlerine sahip olanlardır (Mansour ve diğ. 1989). Sekiz seviye için hfs sabiti bilinmesine karşın bu çalışmadaki incelenen geçişler bunlardan altı tanesini içermektedir. Bilinen hfs sabitlerinden hatalı olduğu kanıtlanan enerji seviyeleri kırmızı renkli olarak gösterildi. Çizgilerin sırası soldan sağa doğru Tablo 4.13'teki sıraya karşılık gelip, artan dalga boyuna göre sıralama yapıldı.

Öncelikle hfs sabitleri Mansour ve diğ. (1989) tarafından önerilen enerji seviyelerine olan tüm spektral geçişler A-çizgileri olarak isimlendirildi. Bu çizgilerin analiz edilmesi ile hfs sabiti belirlenen yeni enerji düzeylerine olan çizgiler ise B-çizgileri olarak adlandırıldı. İkinci adımda olduğu gibi bir önceki süreçte bulunan hfs sabitlerine sahip seviyelere olan çizgilerin seçilerek analiz edilmesi ile C-çizgileri ve D-çizgileri elde edildi. İnce yapı enerji seviyesine olan geçişlere göre tanımlama yapmak gerekirse, 8769.68 cm^{-1} seviyesine olan tüm çizgiler C-çizgileri ve 236.95 cm^{-1} enerji düzeyine olan tüm çizgiler D-çizgileri olarak tanımlandı.

A-, B-, C-, ve D- olarak tanımlanan çizgilerin şekil üzerinde birbirlerinden kolay ayırt edilebilir olmaları için geçiş grupları farklı renkler ile gösterildi. Ayrıca, Şekil 4.6'da bir çizginin başlangıç veya bitiş noktasındaki içi boş daire, bu çizgi için bu seviyedeki hfs sabitinin fit sırasında sabit, içi dolu daire ise hfs sabitinin fit işleminde serbest bir parametre olarak ayarlandığı anlamına gelir.



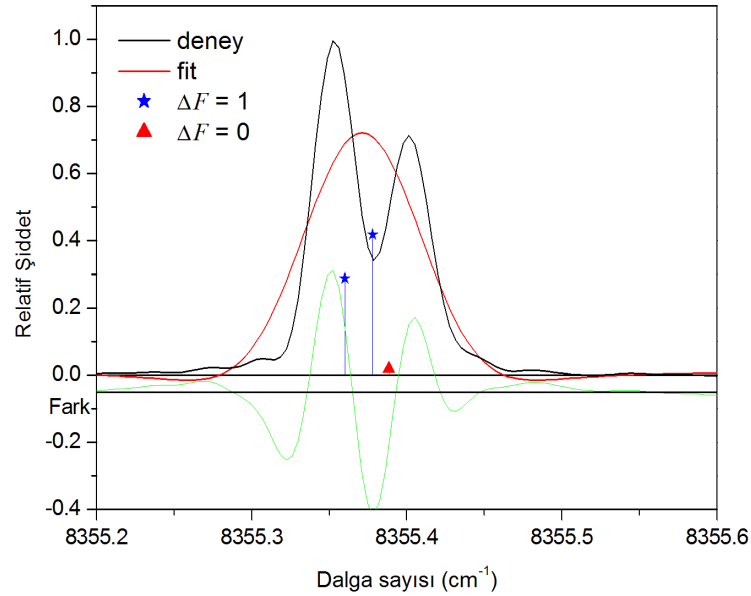
Şekil 4.6: İlgili enerji seviyeleri ile birlikte analiz edilen Tm II çizgilerinin şematik gösterimi.

Analizi yapılan tüm Tm II çizgileri için, Tm-FT spektrumundan yaklaşık 0.5 cm^{-1} genişliğinde uygun kısım (sadece incelenen çizginin verileri) alındı. Bu işlem, ölçülen dört spektrumun her biri için, yani uygun olan her durumda 50 mA veya 70 mA akımla ölçülen Tm-Ar ve Tm-Ne spektrumları için yapıldı. Daha sonra çizgilerin fit işleminin yapılmasında kullanılan Fitter bilgisayar programının (Zeiser ve diğ. 2022) giriş dosyaları her bir incelenen çizgi için oluşturuldu. Fit işleminde Voigt profili fonksiyonu uygulandı. Değişken fit parametreleri, enerji

seviyelerinden her birinin hfs sabitleri A , çizginin ağırlık merkezi, çizginin şiddeti ve Voigt profilinin Gauss ve Lorentz bileşeninin yarı maksimumdaki (FWHM) tam genişliğidir. Tüm fit işlemlerinde her bir aşırı ince yapı geçişinin şiddeti, en şiddetli bileşeninkine bağlandı. Tüm geçişler için fit edilen örnek bir spektrum (Şekil 4.9 – Şekil 4.37) ve en iyi fit parametre sonuçları (Tablo 4.14 – Tablo 4.46) verildi.

Tm-FT spektrumunun incelenmesinde $\sigma_{\text{deneysel}} = 8355.37 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 1196.507 \text{ nm}$), geçişinin hem alt ($E_{\text{alt}} = 17624.65 \text{ cm}^{-1}$, $J = 2$) hem de üst enerji seviyesinin ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J = 3$) manyetik dipol aşırı ince yapı sabitlerinin Mansour ve diğ. (1989) tarafından bulunduğu belirlendi (Tablo 4.12).

Fakat literatürden alınan bu hfs sabitleri kullanılarak Fitter programı ile (Zeiser, 2022) yapılan fit işleminde çizgi fit edilemedi. Yapılan bu başarısız fit işlemine ait spektrum 50 mA akımla ölçülen Tm-Ar spektrumunun IR spektral bölgesinden kesildi ve Şekil 4.7’de verildi.

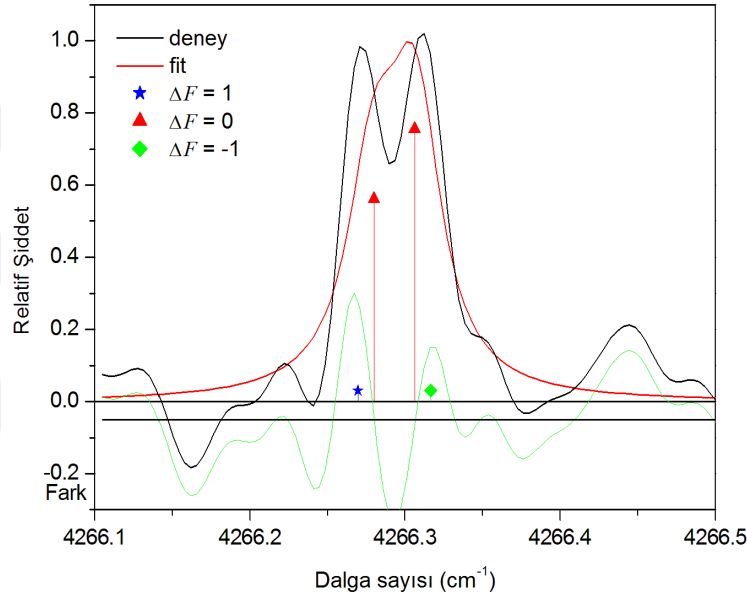


Şekil 4.7: $\sigma_{\text{deneysel}} = 8355.37 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 17624.65 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin bilinen A sabitleri (Mansour ve diğ., 1989) ile yapılan başarısız fit işlemi.

Bu uyumsuz fit işlemi, literatürde önerilen A sabiti değerlerinden herhangi birisinin veya her ikisinin birden hatalı olduğunu göstermektedir. Hangi değer hatalı olduğunu belirleyebilmek için, bu geçişteki alt seviyeyi ($E_{\text{alt}} = 17624.65 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) içeren diğer tüm mümkün spektral çizgileri ve buna ek olarak bu geçişteki üst seviyeyi ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3$) içeren daha önce belirlenen ölçütlere uyan bütün çizgiler Tm-FT spektrumundan belirlendi ve listelendi.

Yukarıda belirlenen ölçütlere uygun olan spektral geçişler seçildi ve her birinin fit işlemleri yapıldı.

Yine $\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 2343.319 \text{ nm}$) geçişindeki her iki ince yapı seviyesi için Mansour ve diğ. (1989) tarafından manyetik dipol hfs sabit değerlerinin var olduğu görüldü (Tablo 4.12). Ancak literatürde sunulan değerler ile fit işlemi düzgün yapılamadı. $\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin başarısız fit işleminin sonucu Şekil 4.8’de gösterildi. Spektrum 50 mA akımla ölçülen Tm-Ar spektrumunun IR spektral bölgesinden kesildi.

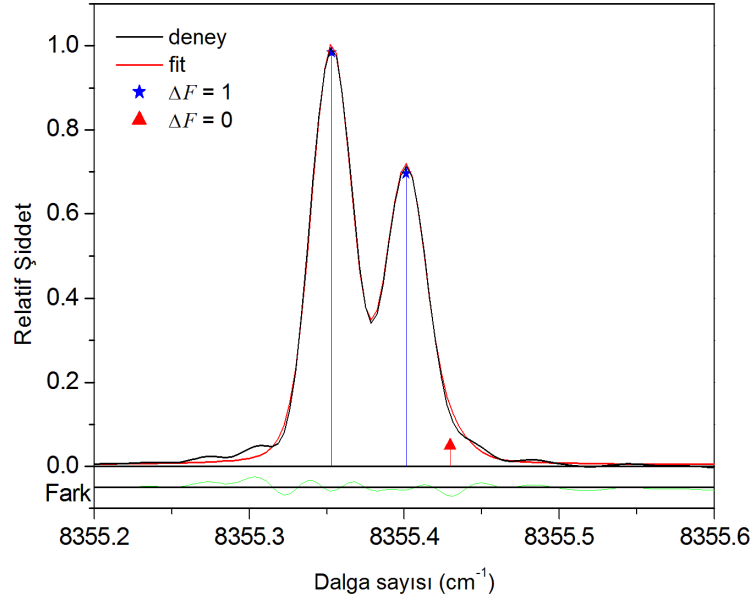


Şekil 4.8: $\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 21713.74 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin bilinen A sabitleri (Mansour ve diğ., 1989) ile yapılan başarısız fit işlemi.

Görüldüğü gibi her iki geçişin üst ince yapı enerji seviyesi aynıdır. Bu nedenle öncelikle her iki geçişteki ortak seviye olan $E = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$ enerji düzeyi için Mansour (1989) tarafından verilen A değerinin ($A = -89.8(0.7) \text{ MHz}$) doğru olup olmadığı incelendi.

Bu amaçla, ilk çizginin ($\sigma_{\text{deneysel}} = 8355.37 \text{ cm}^{-1}$) fit işleminde alt ince yapı enerji düzeyi ($E_{\text{alt}} = 17624.65 \text{ cm}^{-1}$) için Mansour ve diğ. (1989) tarafından verilen A değeri ($A_{\text{alt}} = -341.8(1.3) \text{ MHz}$) doğru kabul edildi ve bu değer fit işlemi süresince sabit tutuldu. Üst seviyenin hfs sabiti ise serbest bırakıldı ve bu seviye için yeni manyetik dipol hfs sabiti, A, bulundu.

Şekil 4.9’da $\sigma_{\text{deneysel}} = 8355.37 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 1196.507 \text{ nm}$) çizgisinin en iyi fit spektrumu verildi. Bu başarılı fit işleminin sonucunda $E = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$ ince yapı enerji düzeyi için manyetik dipol hfs sabiti, $A = -656(4) \text{ MHz}$ olarak belirlendi. En iyi fit spektrumunda da görüldüğü gibi bu spektral geçişteki her iki ince yapı enerji seviyesinin J değeri arasındaki fark 1’dir. Bunun anlamı, bu geçişte sadece üç tane hfs bileşeni mümkündür. Bu bileşenlerden bir tanesi $\Delta F = 0$ bileşenidir ve spektrumda kırmızı olarak gösterilmiş olup diğer iki bileşen ise $\Delta F = 1$ ’e aittir ve mavi ile gösterilmiştir.



Şekil 4.9: $\sigma_{\text{deneysel}} = 8355.37 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 17624.65 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin bu çalışmada yeniden bulunan A değeri ile yapılan fit işleminden elde edilen en iyi fit spektrumu.

Bu çizginin en iyi fit işlemi sonucu elde edilen parametre bilgileri Tablo 4.14’te derlendi.

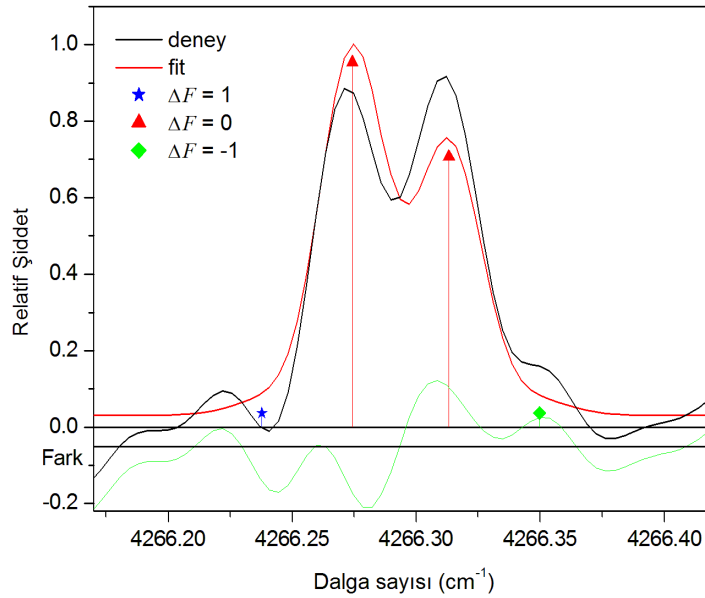
Tablo 4.14: $\sigma_{\text{deneysel}} = 8355.37 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	8355.372 cm^{-1}
Kalite	32.92
FWHM(Voigt)	936.11 MHz
FWHM(Gauss)	844.05 MHz
FWHM(Lorentz)	166.51 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.893

$E = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J = 3$ seviyesi için bulunan hfs sabiti değerinin doğrulunun teyit edilmesi amacıyla belirlenen diğer çizgi de aynı yöntem ile analiz edildi.

$\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 2343.319 \text{ nm}$) çizgisinde alt seviyenin Mansour ve diğ. (1989) tarafından verilen A değeri ($A = -313.5(1.9) \text{ MHz}$) doğru kabul edildi ve fit işlemi süresince sabit tutuldu. Böylece üst seviyenin yeni manyetik dipol hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = -655(20) \text{ MHz}$ olarak belirlendi. Bu geçişe ait FT spektrumları çok zayıf ve gürültülüdür. Teta ve kalite parametrelerinin çok düşük olması beklenen bir durumdur. Bu nedenle hata değeri yüksek olup revize edilen manyetik dipol hfs sabiti değeri belirlenirken bu fit işleminden bulunan sonuç hesaba dahil edilmemiştir.

Şekil 4.10'da zayıf ve gürültülü $\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ çizgisi için gerçekleştirilen fit işleminden elde edilen en iyi fit spektrumu verildi.



Şekil 4.10: $\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 21713.74 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin bu çalışmada revize edilen A değeri ile gerçekleştirilen fit işleminden bulunan en iyi fit spektrumu.

$\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemi sonucu elde edilen parametre değerleri derlenerek Tablo 4.15'te verildi. Kalite ve teta değerlerinin çok düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni çizginin çok zayıf ve gürültülü olmasıdır. Bu geçişte $\Delta J = 0$ olduğundan dört tane hfs bileşeni mümkündür. Bunlardan bir tanesi $\Delta F = -1$ (yeşil), iki tanesi $\Delta F = 0$ (kırmızı), bir tanesi ise $\Delta F = 1$ (mavi) değerine sahiptir.

Tablo 4.15: $\sigma_{\text{deneysel}} = 4266.29 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	4266.28 cm^{-1}
Kalite	3.70
FWHM(Voigt)	980.06MHz
FWHM(Gauss)	525.96 MHz
FWHM(Lorentz)	682.80 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.537

Tm-FT spektrumlarında $E = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$ enerji seviyesini içeren diğer çizgiler araştırıldı ve nispeten yüksek S/N değerli ve literatürde önceden sınıflandırılmış iki farklı çizgi daha olduğu ($\sigma_{\text{deneysel}} = 25980.03 \text{ cm}^{-1}$ ve $\sigma_{\text{deneysel}} = 25743.09 \text{ cm}^{-1}$) belirlendi. $E = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$ enerji düzeyini içeren dört spektral geçiş Tablo 4.16’da sunuldu.

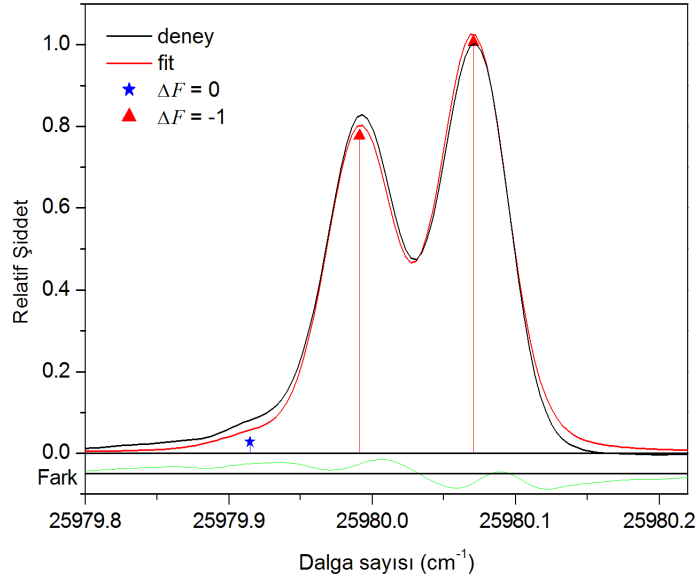
Tablo 4.16: 25980.02 cm^{-1} enerji düzeyini içeren dört spektral geçişin listesi.

$\lambda_{\text{hava}} \text{ (nm)}$	$\sigma_{\text{deneysel}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	$E_{\text{üst}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	$J_{\text{üst}}$	$E_{\text{alt}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	J_{alt}
384.802	25980.03	25980.02	3	0.00	4
388.344	25743.09	25980.02	3	236.95	3
1196.507	8355.37	25980.02	3	17624.65	2
2343.319	4266.29	25980.02	3	21713.74	3

Üst seviye için yeniden bulunan (bu çalışmada revize edilen) hfs sabiti kullanılarak her iki çizginin alt enerji seviyelerinin ($E = 0.00 \text{ cm}^{-1}$ ve $E = 236.95 \text{ cm}^{-1}$) A değerleri bu tez çalışmasında ilk kez bulundu.

- $\sigma_{\text{deneysel}} = 25980.03 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 384.802 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Bu çizginin de Tablo 4.16’da görüldüğü gibi üst ince yapı enerji seviyesi $E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$ ($J_{\text{üst}} = 3$) olarak belirlendi. Temel seviyeye olan bu geçişin burada sunulan spektrumu 70 mA akımla ölçülen Tm-Ar spektrumunun UV spektral bölgesinden kesildi ve en iyi fit spektrumu Şekil 4.11’de verildi.



Şekil 4.11: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25980.03 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

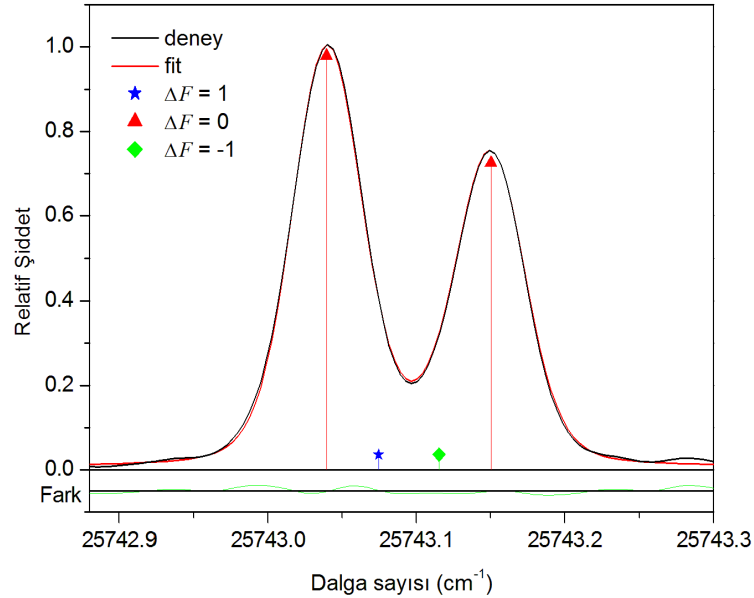
$E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$ geçişine ait belirlediğimiz analiz ölçütüne uygun olan çift pikli çizginin fit işlemi yapılırken üst seviyenin revize edilen hfs sabitinin değeri ($A_{\text{üst}} = -656 \text{ MHz}$) sabit tutuldu. Teta parametresi fit işleminde serbest bırakıldı. Alt seviyenin hfs sabiti, $A_{\text{alt}} = -1039.9 \text{ MHz}$ olarak bulundu. Tablo 4.17’de ise en iyi fit işleminden bulunan parametre değerleri sunuldu. Geçişin gerçekleştiği ince yapı enerji seviyelerine ait J değerleri arasındaki fark -1 olduğundan toplam üç tane hfs bileşeni mümkündür. Bu geçiş için fit işleminde, alt enerji seviyesinin A değerini sabit tutup üst enerji seviyesinin A değerinin bulunması şeklinde tekrar edildi ve istenilen sabit değeri $A_{\text{üst}} = -655 \text{ MHz}$ olarak bulundu. Buradaki amaç bulunan değerlerin doğruluğunu çift yönlü kontrol etmektir.

Tablo 4.17: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25980.03 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$25980.031 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	43.17
FWHM(Voigt)	1814.13 MHz
FWHM(Gauss)	1546.52 MHz
FWHM(Lorentz)	473.21 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.852

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 25743.09 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 388.344 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Son olarak $E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J = 3$ seviyesinden tek pariteye sahip olan 1.uyarılmış seviyeye ($E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J = 3$) geçiş incelendi. Belirlenen ölçütlere uygun, çift pikli çizgi 70 mA akımla ölçülen Tm-Ar spektrumunun UV bölgesinden kesildi. Fit işleminde revize edilen hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = -654 \text{ MHz}$ değerinde sabit tutuldu ve fit işlemi sonucunda alt seviyenin manyetik dipol hfs sabit değeri, $A_{\text{alt}} = 293(6) \text{ MHz}$ olarak tespit edildi. $\Delta J = 0$ olan bu geçiş için dört aşırı ince yapı bileşeni mümkündür. Şekil 4.12’de sunulan en iyi fit spektrumunda da görüldüğü gibi hfs bileşenlerinden iki tanesi için $\Delta F = 0$ iken diğer bileşenler $\Delta F = \pm 1$ değerini almaktadır. İkinci kez yapılan fit işleminde alt seviye için bulunan hfs değeri sabit tutulurken üst seviye hfs değeri serbest bırakıldı ve $A_{\text{üst}} = -655 \text{ MHz}$ değeri bulundu.



Şekil 4.12: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25743.09 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25980.02 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

En iyi fit işlemine ait parametre değerleri derlenerek Tablo 4.18’de verildi. Görüldüğü gibi eğer çizginin FT spektrumu görece şiddetli ve gürültüsüz ise fit işlemi sonucundaki kalite ve fit işleminde serbest bırakılan teta parametre değerleri yükselmektedir.

Tablo 4.18: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25743.09 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	25743.087 cm^{-1}
Kalite	93.10
FWHM(Voigt)	1768.50 MHz
FWHM(Gauss)	1550.84 MHz
FWHM(Lorentz)	389.24 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.877

Şu ana kadar temel ve 1. uyarılmış seviye için yeni bulunan manyetik dipol hfs sabitlerinin doğruluğunun diğer tüm mümkün çizgilerle teyit edilmesi gerekir. Toplam 12 adet spektral geçişte alt ince yapı enerji seviyesinin, temel seviye ($E = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J = 4$) olduğu tespit edildi ve bu geçişler Tablo 4.19’da listelendi.,

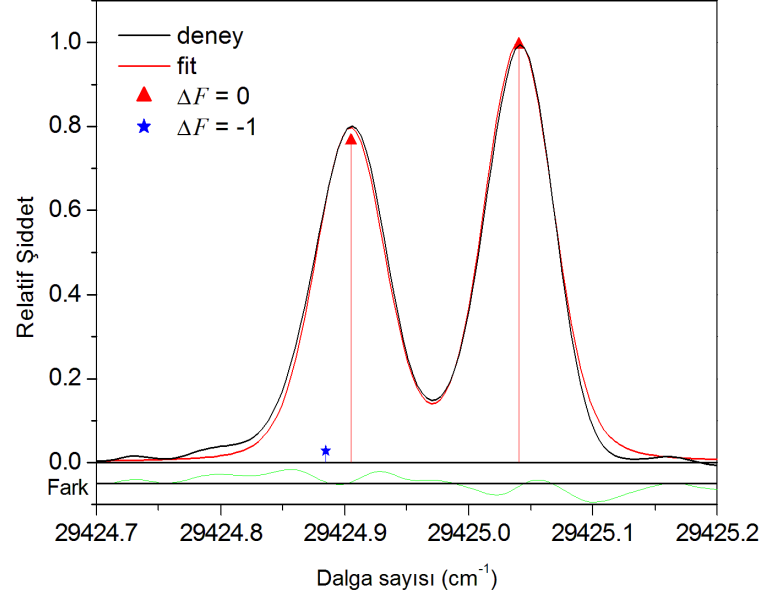
Tablo 4.19: Temel ince yapı enerji seviyesine olan ve incelenen geçişler.

$\lambda_{\text{hava}} \text{ (nm)}$	$\sigma_{\text{deneysel}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	Eüst $\text{(cm}^{-1}\text{)}$	J
339.750	29424.98	29424.98	3
342.562	29183.40	29183.39	4
353.657	28267.88	28267.88	3
360.876	27702.44	27702.42	3
370.136*	27009.40	27009.39	4
376.133	26578.78	26578.77	3
376.191	26574.67	26574.66	4
384.802	25980.03	25980.02	3
395.809	25257.53	25257.52	3
419.992	23803.29	23803.28	4
420.600	23768.85	23768.84	5
448.127*	22308.84	22308.82	4
462.656	21608.26	21608.26	3
546.554	18291.38	18291.37	4

Tek pikli geçişler, * işareti ile gösterildi. Bu çalışmada her ne kadar manyetik dipol aşırı ince yapı A sabitlerini belirlemek için iki pikli çizgiler incelenmiş olsa da A değerlerini teyit etmek için tek pikli hafif eğimli yapıdaki çizgiler de kontrol amaçlı kullanıldı. Her geçiş için mutlaka dört Tm-FT spektrumu (Ar ve Ne asal gazları ile $I_{\text{boşalım}} = 50 \text{ mA}$ ve 70 mA akım değerlerinde alınan spektrumlar) incelendi. Aksi belirtilmedikçe burada örnek olarak verilen tüm spektrumlar 70 mA akımla alınan Tm-Ar spektrumundan kesildi. Alt seviyesi temel seviye olan tüm geçişlerin fit analizi, geçişin dalga sayısına bağlı olarak maddeler halinde aşağıda verildi.

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 29424.98 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 339.750 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Tek pariteli temel seviyeye ($E = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J = 4$), çift pariteli $E_{\text{üst}} = 29424.98 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 3$) üst seviyesinden olan geçiş analiz edildi. Bu geçişte $\Delta J = -1$ olduğundan fit edilen spektrumda da görüldüğü gibi geçiş kurallarına göre toplam üç tane hfs geçişi mümkündür. Bu geçişlerden bir tanesi için $\Delta F = -1$ değerini alırken iki tanesi için ise $\Delta F = 0$ 'dır.



Şekil 4.13: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29424.98 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 29424.98 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

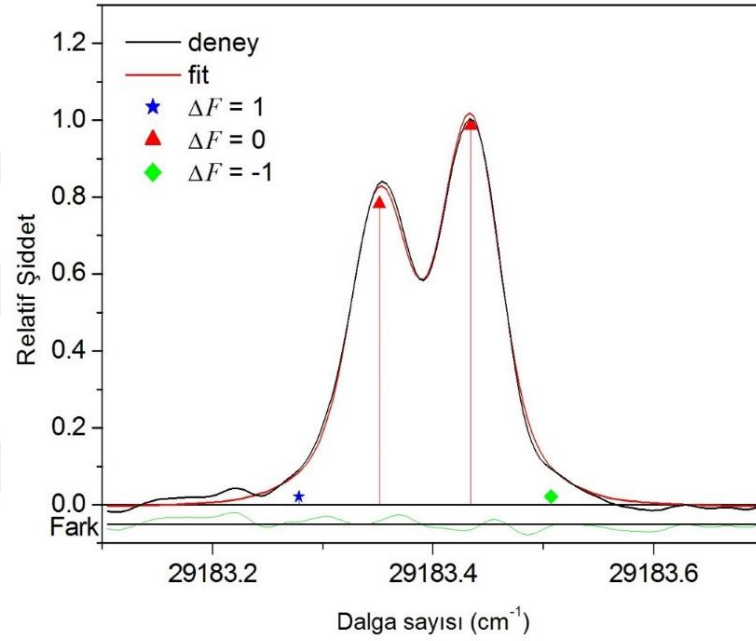
Alt ince yapı enerji seviyesi için manyetik dipol hfs sabiti, A_{alt} , bu çalışmada bulunan değerinde ($A = -1038.3 \text{ MHz}$) sabit tutulurken, teta değeri ve üst seviye için hfs sabiti serbest bırakıldı. Fit işleminden, üst ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = -175(6) \text{ MHz}$ olarak belirlendi. Çizginin en iyi fit spektrumu Şekil 4.13'te ve belirlenen parametre değerleri ise Tablo 4.20'de verildi. Bundan önceki iki çizgide anlatılan ikinci fit kontrolü her yeni bulunan hfs değerini kontrol amaçlı yapıldı.

Tablo 4.20: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29424.98 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$29424.977 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	21.09
FWHM(Voigt)	1977.17 MHz
FWHM(Gauss)	1773.71 MHz
FWHM(Lorentz)	367.24 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.897

- $\sigma_{\text{deneysel}} = 29183.40 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 342.562 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Diğer bir temel seviyeye geçiş ($E = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J = 4$), çift pariteli $E = 29183.39 \text{ cm}^{-1}$, $J = 4$ ince yapı enerji seviyesinden olan spektral geçiştir. Aynı prosedür burada da uygulanmış olup alt düzeyin aşırı ince yapı sabiti bu çalışmada belirlenen değerinde ($A = -1038.3 \text{ MHz}$) sabit tutuldu. Teta parametresi ve üst seviye hfs sabit değeri serbest bırakıldı. Fit işlemi sonucunda ise üst düzeyin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti $A_{\text{üst}} = -479(6) \text{ MHz}$ olarak bulundu.



Şekil 4.14: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29183.40 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 29183.39 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

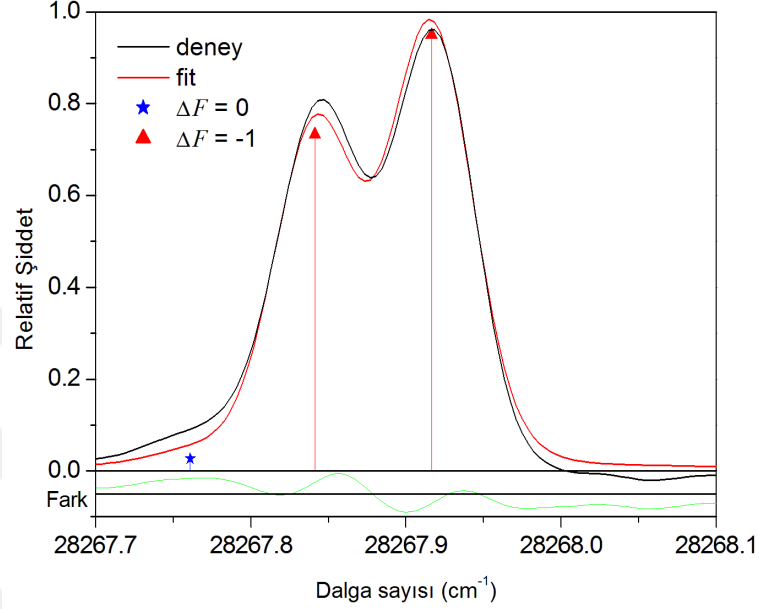
En iyi fit spektrumu Şekil 4.14'te sunulurken en iyi fit parametre değerleri Tablo 4.21'de listelendi.

Tablo 4.21: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29183.40 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$29183.396 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	29.67
FWHM(Voigt)	1945.84 MHz
FWHM(Gauss)	1554.54 MHz
FWHM(Lorentz)	674.76 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.799

- $\sigma_{\text{deneysel}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 353.657 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Çift pariteli $E_{\text{üst}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3$ üst ince yapı enerji seviyesinden, tek pariteli taban seviyeye ($E = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J = 4$) olan spektral geçişe ait en iyi fit işleminden elde edilen spektrum aşağıda verildi (Şekil 4.15). Yapılan fit işlemine ait parametre değerleri Tablo 4.22’de sunuldu.



Şekil 4.15: $\sigma_{\text{deneysel}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

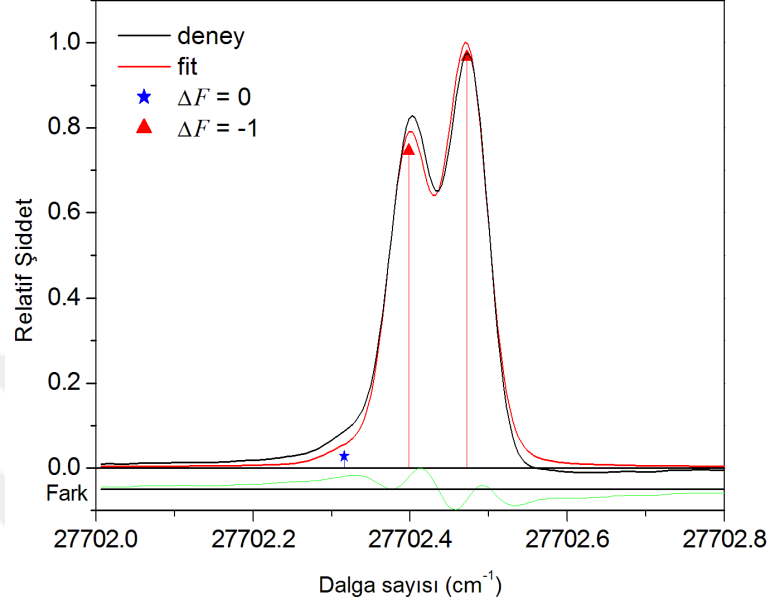
Alt enerji seviyesine ait A , gene bu çalışmada bulunan değerinde ($A_{\text{alt}} = -1038.3 \text{ MHz}$) sabit tutuldu, fit işlemi sonucunda üst ince yapı enerji seviyesinin A değeri, $A_{\text{üst}} = -698(12) \text{ MHz}$ olarak bulundu. Bu geçişin ince yapı enerji seviyelerinin sahip olduğu J değerleri arasındaki fark $\Delta J = -1$ olduğu için fit edilen spektrumda da görüldüğü gibi toplam üç adet hfs geçişi mümkündür.

Tablo 4.22: $\sigma_{\text{deneysel}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$28267.881 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	15.13
FWHM(Voigt)	1893.01 MHz
FWHM(Gauss)	1765.69 MHz
FWHM(Lorentz)	235.38 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.932

- $\sigma_{\text{deneysel}} = 27702.44 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 360.876 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

$E_{\text{üst}} = 27702.42$ ($J = 3$) $\rightarrow$ $E_{\text{alt}} = 0.00$ ($J = 4$) geçişin de $\Delta J = -1$ olduğundan üç tane hfs geçişi mümkündür. $\sigma_{\text{deneysel}} = 27702.44$ cm^{-1} spektral çizgisinin en iyi fit işleminden bulunan spektrum Şekil 4.16’da verildi. En iyi fit işleminde elde edilen parametre değerleri Tablo 4.23’te sunuldu.



Şekil 4.16: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27702.44$ cm^{-1} ($E_{\text{üst}} = 27702.42$ cm^{-1} , $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00$ cm^{-1} , $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

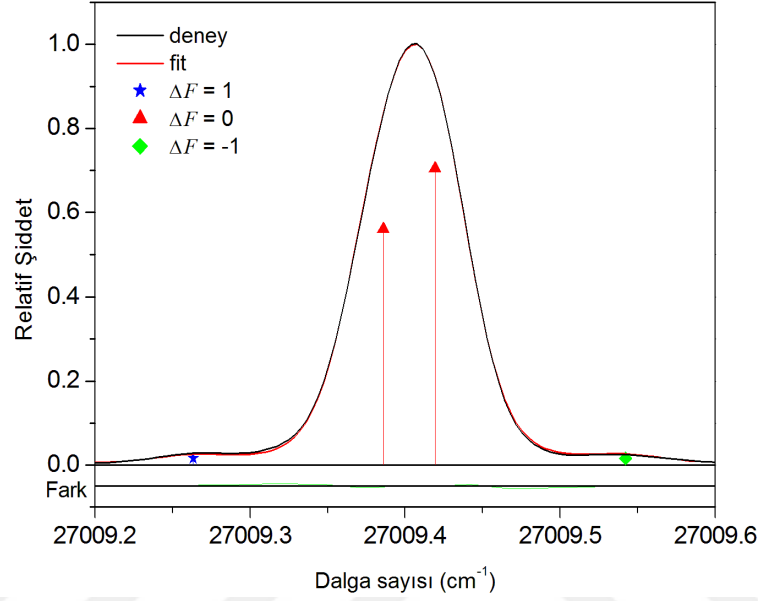
Fit işleminde alt seviyenin A değeri, $A_{\text{alt}} = -1038.3$ MHz olarak sabit tutulurken, üst seviyenin A değeri ve her zaman olduğu gibi teta değeri serbest bırakıldı. Fit işlemi sonucunda ise üst ince yapı enerji seviyesi için hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = -703(9)$ MHz olarak bulundu.

Tablo 4.23: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27702.44$ cm^{-1} çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	27702. 435 cm^{-1}
Kalite	16.00
FWHM(Voigt)	1864.32 MHz
FWHM(Gauss)	1698.60 MHz
FWHM(Lorentz)	301.05 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.911

- $\sigma_{\text{deneysel}} = 27009.40 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 370.136 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Temel seviyeye bir başka geçişin 27009.39 cm^{-1} ($J = 4$) seviyesinden olduğu belirlendi. Yapılan fit işleminden alınan spektrum Şekil 4.17’de verildi. En iyi fit işlemine ait parametre değerleri Tablo 4.24’te sunuldu.



Şekil 4.17: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27009.40 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 27009.39 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit işleminin görüntüsü.

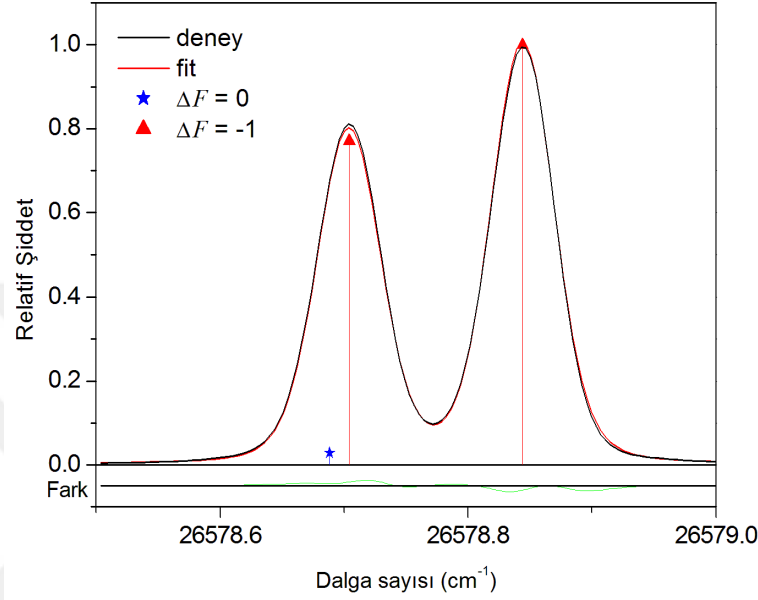
Tek pik gibi bir yapı görülsede aslında spektrumun her iki kanadında küçük birer pikin varlığı mevcuttur. Alt seviyenin hfs sabitinin değeri fit işlemi süresince $A_{\text{alt}} = -1038.3 \text{ MHz}$ değerinde sabit tutuldu ve üst seviyenin hfs sabiti $A_{\text{üst}} = -812(6) \text{ MHz}$ olarak bulundu.

Tablo 4.24: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27009.40 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$27009.402 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	125.02
FWHM(Voigt)	1714.31 MHz
FWHM(Gauss)	1507.82 MHz
FWHM(Lorentz)	369.72 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.880

- $\sigma_{\text{deneysel}} = 26578.78 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 376.133 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

$E_{\text{üst}} = 26578.77 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$ geçişine ait fit işlemi sonucunda bulunan en iyi fit spektrumu Şekil 4.18’de sunuldu. Tablo 4.25’te en iyi fit işlemine ait parametre değerleri verildi.



Şekil 4.18: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26578.78 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 26578.77 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

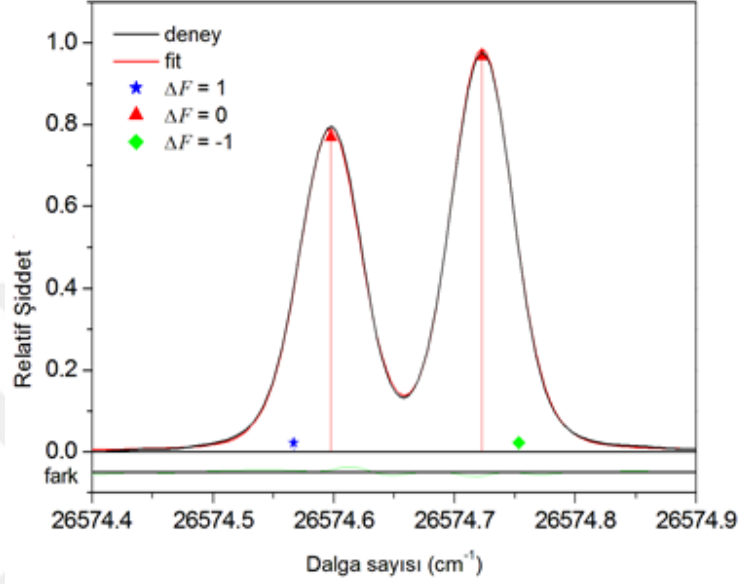
Bu geçiş için yapılan fit işleminde üst seviyenin A değeri Mansour ve diğerleri (1989) tarafından bulunan değerinde ($A_{\text{üst}} = -136.6 \text{ MHz}$) sabit tutulurken, alt ince yapı enerji seviyenin A değeri serbest bırakıldı. Fit işlemi sonucunda $A_{\text{alt}} = -1038.3(1.6) \text{ MHz}$ olarak belirlendi. Buradan da temel seviye için bu çalışmada ilk defa bulunan manyetik dipol hfs sabitinin doğruluğu bir kez daha kanıtlandı.

Tablo 4.25: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26578.78 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$26578.781 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	70.40
FWHM(Voigt)	1821.36 MHz
FWHM(Gauss)	1621.78 MHz
FWHM(Lorentz)	359.13 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.890

- $\sigma_{\text{deneysel}} = 26574.67 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 376.191 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

$E_{\text{üst}} = 26574.66 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$ geçişinin fit işlemi sonucu elde edilen spektrum Şekil 4.19’da verildi. En iyi fit işlemine ait parametre değerleri ve ortalamaları sırasıyla Tablo 4.26’da sunuldu.



Şekil 4.19: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26574.67 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 26574.66 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

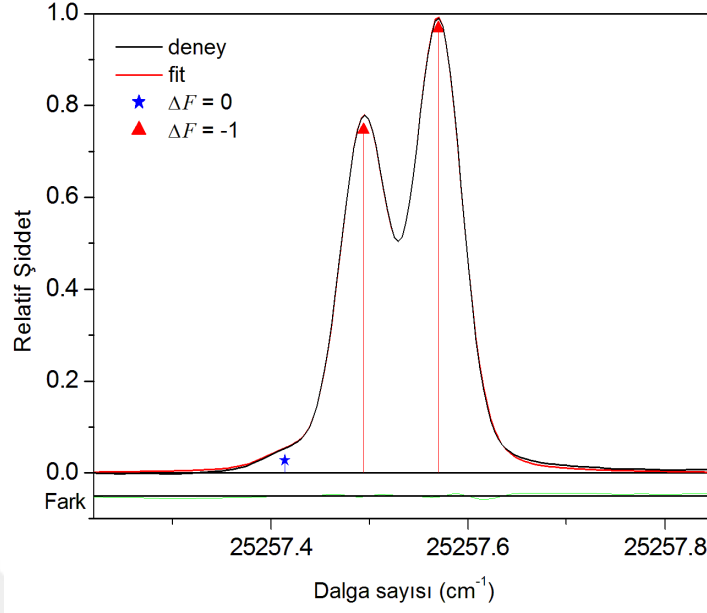
Çift pikli bu geçişin fit işlemi süresince alt seviyenin A değeri ($A_{\text{alt}} = -1038.3 \text{ MHz}$) sabit tutuldu ve üst seviyenin hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = -206.3(2.0) \text{ MHz}$ olarak belirlendi.

Tablo 4.26: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26574.67 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$26574.664 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	81.88
FWHM(Voigt)	1804.24 MHz
FWHM(Gauss)	1602.94 MHz
FWHM(Lorentz)	361.89 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.888

- $\sigma_{\text{deneysel}} = 25257.53 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 395.809 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

$E_{\text{üst}} = 25257.52 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$ spektral geçişine ait en iyi fit sonucu elde edilen spektrum Şekil 4.20’de sunuldu. Ayrıca Tablo 4.27’de en iyi fit işlemine ait parametre değerleri yer almaktadır.



Şekil 4.20: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25257.53 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25257.52 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

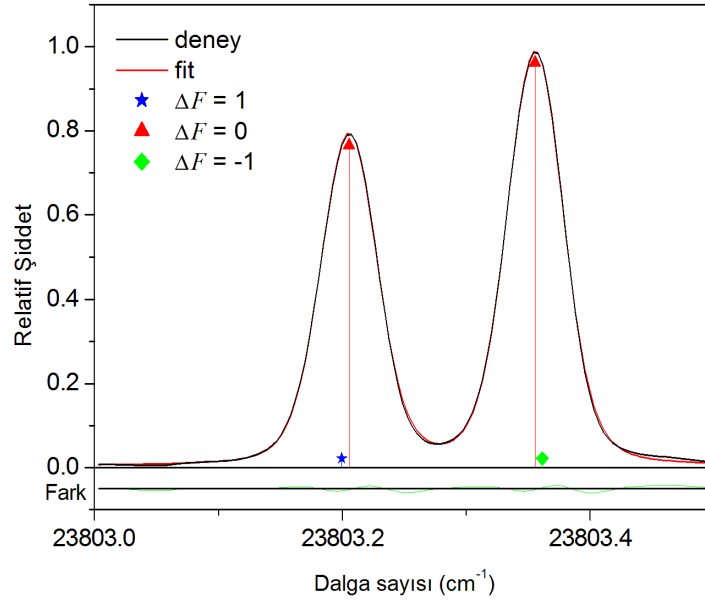
Bu çizginin fit işleminde bilinen alt seviye hfs sabiti, $A_{\text{alt}} = -1038.3 \text{ MHz}$ değerinde sabit tutuldu. Fit işlemi neticesinde üst seviye için hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = -682.9(2.2) \text{ MHz}$ olarak elde edildi.

Tablo 4.27: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25257.53 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$25257.532 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	79.00
FWHM(Voigt)	1699.74 MHz
FWHM(Gauss)	1480.05 MHz
FWHM(Lorentz)	391.77 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.871

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 23803.29 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 419.992 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Çift pariteli üst $E_{\text{üst}} = 23803.28 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4$ ince yapı enerji seviyesinden tek pariteli temel seviyeye ($E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) olan geçişin fit işlemi sonucu bulunan en iyi fit sonucu spektrum Şekil 4.21’de sunuldu. En iyi fit işlemine ait parametre değerleri ise Tablo 4.28’de verildi.



Şekil 4.21: $\sigma_{\text{deneysel}} = 23803.29 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 23803.28 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

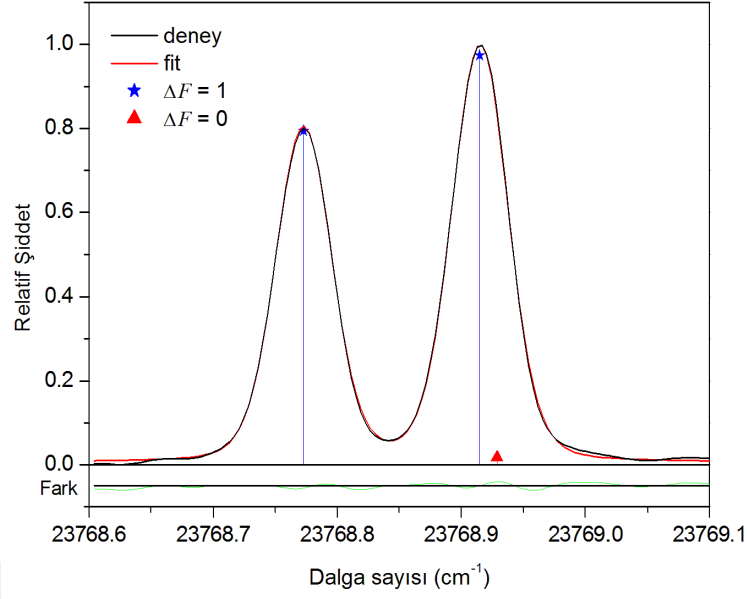
Fit işleminde yine aynı prosedür uygulandı ve alt seviyenin hfs sabiti, $A_{\text{alt}} = -1038.3 \text{ MHz}$ değerinde sabit tutulurken, üst seviyenin A değeri serbest bırakıldı ve $A_{\text{üst}} = -38.6(2.0) \text{ MHz}$ olarak bulundu.

Tablo 4.28: $\sigma_{\text{deneysel}} = 23803.29 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$23803.289 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	76.23
FWHM(Voigt)	1612.92 MHz
FWHM(Gauss)	1406.73 MHz
FWHM(Lorentz)	367.92 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.872

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 23768.85 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 420.600 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

$E_{\text{üst}} = 23768.84 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$ geçişi için en iyi fit spektrumu Şekil 4.22’de fit işlemine ait en iyi fit parametre değerleri ise Tablo 4.29’da verildi.



Şekil 4.22: $\sigma_{\text{deneysel}} = 23768.85 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 23768.84 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 5 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

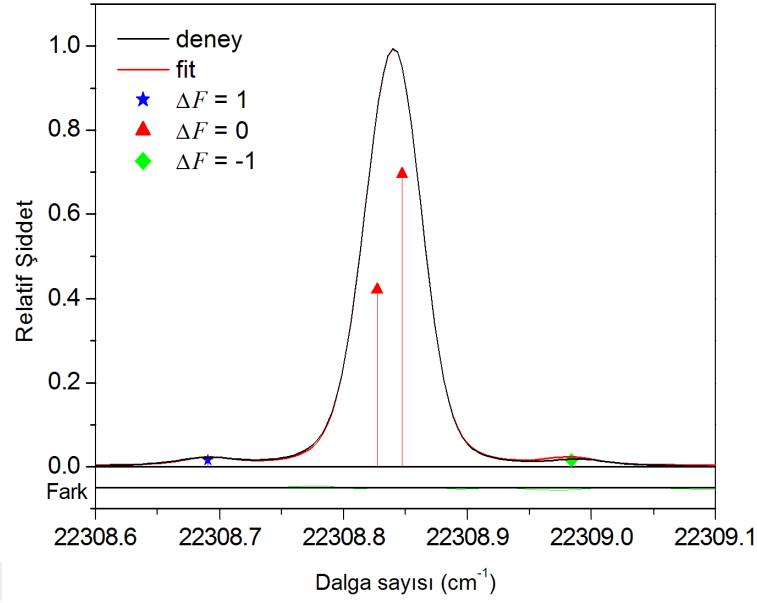
Bu geçiş için de fit işlemi süresince alt seviyenin hfs sabiti, $A_{\text{alt}} = -1038.3 \text{ MHz}$ değerinde sabit tutuldu. Serbest bırakılan üst seviyenin A değeri, $A_{\text{üst}} = -73.8(2.1) \text{ MHz}$ olarak bulundu.

Tablo 4.29: $\sigma_{\text{deneysel}} = 23768.85 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$23768.851 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	69.15
FWHM(Voigt)	1605.07 MHz
FWHM(Gauss)	1452.98 MHz
FWHM(Lorentz)	275.55 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.905

• **$\sigma_{\text{deneysel}} = 22308.84 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda = 448.127 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi**

$E_{\text{üst}} = 22308.82 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$ geçişinin fit işleminden elde edilen spektrum Şekil 4.23'te, en iyi fit parametrele değerleri ise Tablo 4.30'da sunuldu.



Şekil 4.23: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22308.84 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 22308.82 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit işleminin görüntüsü.

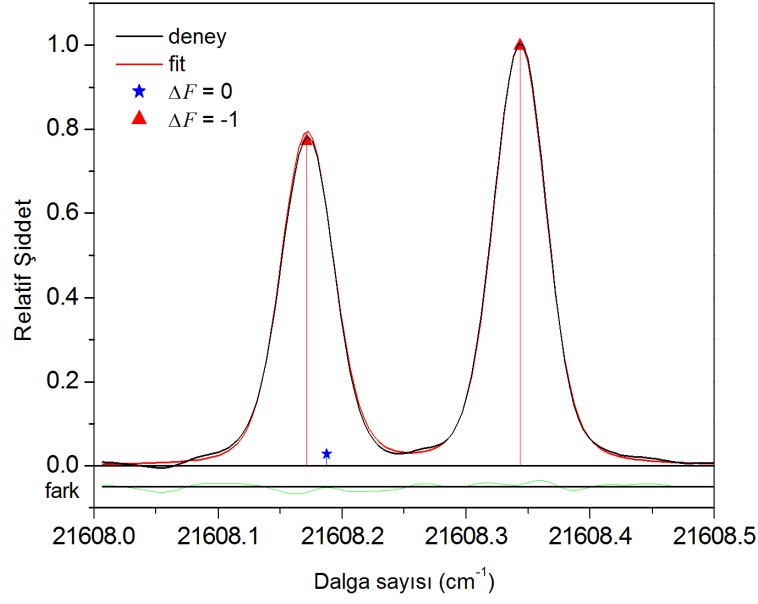
Geçişe ait fit işlemi süresince alt seviyenin bilinen A değeri bu çalışmada bulduğumuz ve doğruluğunu birden fazla çizgiden onayladığımız $A_{\text{alt}} = -1038.3 \text{ MHz}$ değerinde sabit tutularak, üst seviye için hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = -949(10) \text{ MHz}$ olarak bulundu.

Tablo 4.30: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22308.84 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$22308.838 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	87.04
FWHM(Voigt)	1419.42 MHz
FWHM(Gauss)	1236.00 MHz
FWHM(Lorentz)	327.09 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.871

• **$\sigma_{\text{deneysel}} = 21608.26 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 462.656 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi**

Diğer bir temel seviyeye ($E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) geçiş olan $\sigma_{\text{deneysel}} = 21608.26 \text{ cm}^{-1}$ geçişinde de birbirilerinden tamamen ayrılmış çift pikli bir spektrum mevcuttur. Bu geçişin fit işleminden elde edilen en iyi fit spektrumu Şekil 4.24'te ve en iyi fit işlemine ait parametre değerleri ise Tablo 4.31'de verildi.



Şekil 4.24: $\sigma_{\text{deneysel}} = 21608.26 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 21608.26 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

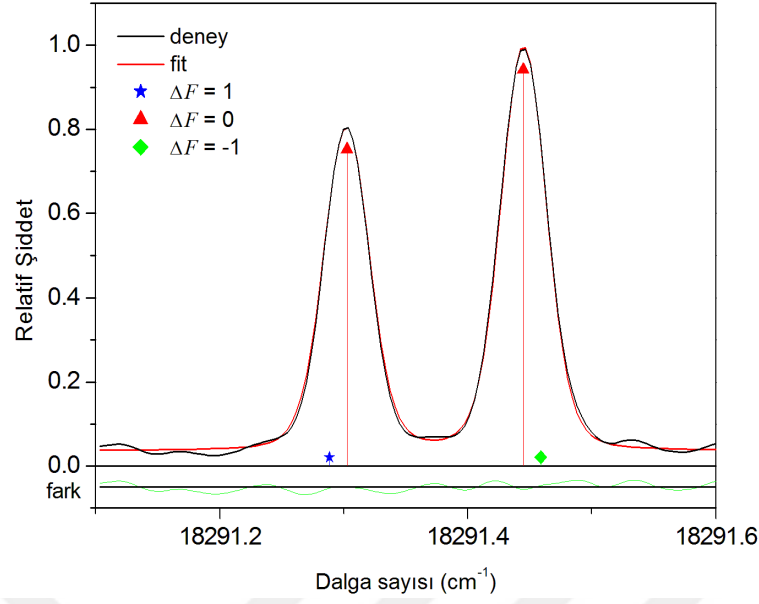
Fit işlemi süresince bilinen alt seviye hfs sabiti, $A_{\text{alt}} = -1038.3 \text{ MHz}$ değerinde sabit tutularak üst seviye için hfs sabiti $A_{\text{üst}} = 140(3) \text{ MHz}$ olarak elde edildi.

Tablo 4.31: $\sigma_{\text{deneysel}} = 21608.26 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$21608.264 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	48.54
FWHM(Voigt)	1505.74 MHz
FWHM(Gauss)	1305.75 MHz
FWHM(Lorentz)	356.06 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.867

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 18291.38 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 546.554 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Son analiz edilen temel seviyeye geçiş, $E_{\text{üst}} = 18291.37 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$ olarak belirlendi. Bu geçişe ait fit işlemi benzer şekilde yapıldı ve elde edilen en iyi fit spektrumu ve parametre değerleri sırasıyla Şekil 4.25'te ve Tablo 4.32'de sunuldu.



Şekil 4.25: $\sigma_{\text{deney}} = 18291.38 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 18291.37 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 0.00 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 4$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

Bu spektral çizgi için fit işlemi süresince alt seviye hfs sabiti $A_{\text{alt}} = -1038.3 \text{ MHz}$ değerinde sabit tutularak üst seviye hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = -92(4) \text{ MHz}$ olarak bulundu.

Tablo 4.32: $\sigma_{\text{deney}} = 18291.38 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$18291.381 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	32.84
FWHM(Voigt)	1302.35 MHz
FWHM(Gauss)	1171.19 MHz
FWHM(Lorentz)	236.97 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.899

Buraya kadar yapılanlar kısaca özetlenirse; Şekil 4.6’da verilen geçişlerden, kalın ile vurgulanan ince yapı enerji seviyelerinin A değerleri Mansour ve diğerlerinin (1989) tarafından belirlendi ve fit işlemi süresince sabit tutuldu. Bu çalışmada bulunan temel seviyenin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti $A = -1038.31 \text{ MHz}$ değeri kullanılarak diğer geçişlerdeki üst enerji düzeyinin manyetik dipol aşırı ince yapı A sabitleri belirlendi. Tablo 4.33’te temel seviyenin A değerini sabit tutarak belirlenen manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri verildi.

Tablo 4.33: Temel seviyenin A değerini sabit tutarak belirlenen manyetik dipol hfs sabitleri.

λ_{hava} (nm)	$\sigma_{deneysel}$ (cm ⁻¹)	$E_{üst}$ (cm ⁻¹)	$J_{üst}$	$A_{üst}$ (MHz)
546.553	18291.40	18291.37	4	-92(4)
462.656	21608.28	21608.26	3	140(3)
448.127	22308.84	22308.82	4	-949(10)
420.600	23768.84	23768.84	5	-73.8(2.1)
419.991	23803.33	23803.28	4	-38.6(2.0)
395.809	25257.52	25257.52	3	-682.9(2.2)
384.802	25980.02	25980.02	3	-653(5)
376.191	26574.63	26574.66	4	-206.3(2.0)
370.136*	27009.41	27009.39	4	-812(6)
360.877	27702.41	27702.42	3	-703(9)
353.657	28267.91	28267.88	3	-698(12)
342.562	29183.43	29183.39	4	-479(6)
339.750	29424.95	29424.98	3	-175(6)

*Tek pikli

Tm-FT spektrumda 1. uyarılmış seviyeye ($E = 236.95$ cm⁻¹, $J = 3$) olan 10 tane geçiş tespit edildi (Tablo 4.34). Bunlardan sekiz tanesinin üst enerji seviyesinin temel seviyeye geçişlerdeki ile ortak olduğu belirlendi ve Tablo 4.34'te “**” işareti ile gösterildi.

Tablo 4.34: Birinci uyarılmış seviyeye (236.95 cm⁻¹) olup incelenen geçişler.

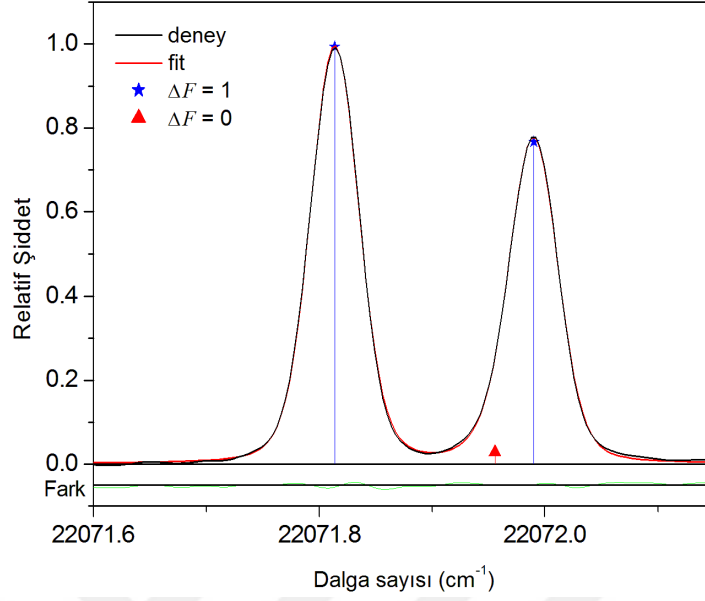
λ_{hava} (nm)	$\sigma_{deneysel}$ (cm ⁻¹)	$E_{üst}$ (cm ⁻¹)	$J_{üst}$
452.938	22071.89	22308.82**	4
424.215*	23566.34	23803.28**	4
399.558	25020.58	25257.52**	3
388.344	25743.09	25980.02**	3
379.576*	26337.72	26574.66**	4
373.412	26772.46	27009.39**	4
370.026	27017.48	27254.42	4
356.647	28030.94	28267.88**	3
345.367	28946.45	29183.39**	4
336.261	29730.23	29967.17	2

*Tek pikli

- $\sigma_{deneysel} = 22071.89$ cm⁻¹ ($\lambda_{hava} = 452.938$ nm) çizgisine ait fit analizi

Birinci uyarılmış ince yapı enerji seviyesinin ($E = 236.95$ cm⁻¹, $J = 3$), manyetik dipol hfs sabiti değeri, $\sigma_{deneysel} = 25743.09$ cm⁻¹ çizgisinin fit işlemi sonucu $A = 293(6)$ MHz olarak bulunmuştu. Bu değer, $E_{üst} = 22308.82$ cm⁻¹, $J_{üst} = 4 \rightarrow E_{alt} = 236.95$ cm⁻¹, $J_{alt} = 3$ geçişi için yapılan fit işleminde sabit tutuldu ve üst seviyenin sabiti, $A_{üst} = -948(6)$ MHz olarak bulundu.

En iyi fit spektrumu Şekil 4.28’de sunuldu.



Şekil 4.26: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22071.89 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 22308.82 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit işleminin görüntüsü.

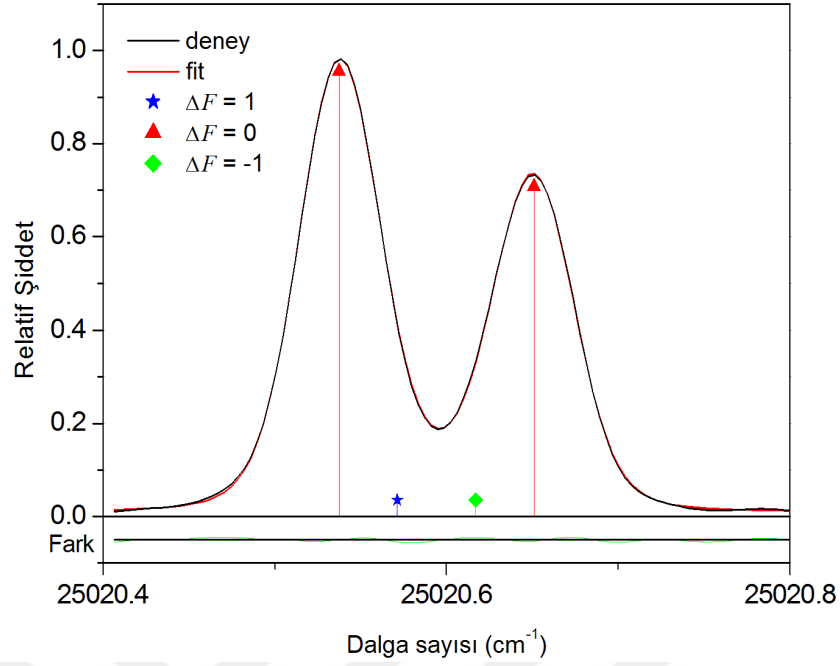
En iyi fit işlemine ait parametre değerleri Tablo 4.35’te verildi.

Tablo 4.35: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22071.89 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$22071.890 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	75.64
FWHM(Voigt)	1521.27 MHz
FWHM(Gauss)	1351.03 MHz
FWHM(Lorentz)	306.01 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.888

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 25020.58 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 399.558 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

$E_{\text{üst}} = 25257.52 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$ geçişinin fit işleminin sonucu elde edilen en iyi fit spektrumu ve en iyi fit sonuçları sırasıyla Şekil 4.27’de ve Tablo 4.36’da verildi.



Şekil 4.27: $\sigma_{\text{deney}} = 25020.58 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 25257.52 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

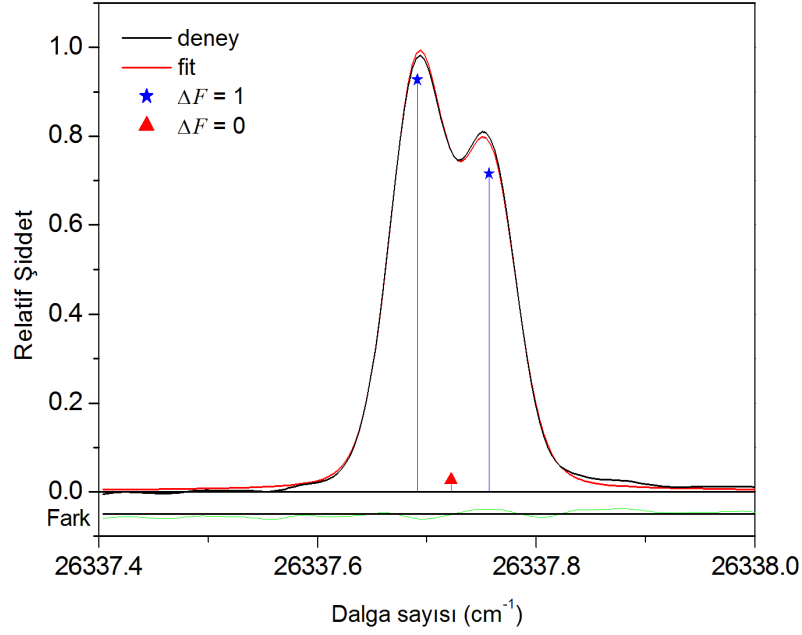
Bu spektral geçişin alt enerji seviyesinin A değeri 293 MHz değerinde sabit tutulurken, üst seviyenin A değeri -681(7) MHz olarak bulundu.

Tablo 4.36: $\sigma_{\text{deney}} = 25020.58 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	25020.583 cm^{-1}
Kalite	127.71
FWHM(Voigt)	1683.94 MHz
FWHM(Gauss)	1518.52 MHz
FWHM(Lorentz)	299.21 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.902

• $\sigma_{\text{deney}} = 26337.72 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 379.576 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

$E_{\text{üst}} = 26574.66 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$ geçişine ait en iyi fit spektrumu ile en iyi fit işlemine ait parametre değerleri sırasıyla Şekil 4.28’de ve Tablo 4.37’de sunuldu.



Şekil 4.28: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26337.72 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 26574.66 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

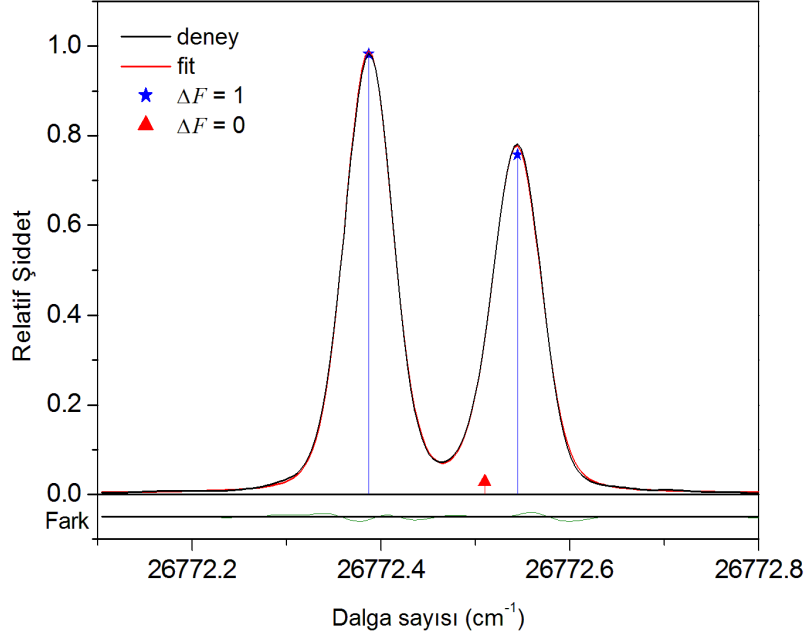
Alt seviyenin A değeri fit işleminde bilinen ($A_{\text{alt}} = 293 \text{ MHz}$) değerinde sabit bırakılırken, üst seviyenin A değeri, $A_{\text{üst}} = -207(6) \text{ MHz}$ olarak bulundu.

Tablo 4.37: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26337.72 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$26337.719 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	49.48
FWHM(Voigt)	1809.16 MHz
FWHM(Gauss)	1619.71 MHz
FWHM(Lorentz)	341.65 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.895

- $\sigma_{\text{deneysel}} = 26772.46 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 373.412 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Diğer bir 1. uyarılmış seviyeye geçiş olan $E_{\text{üst}} = 27009.39 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$ geçişinin fit işlemi sonucu Şekil 4.29’da verildi. En iyi fit işlemine ait parametre değerleri Tablo 4.38’de sunuldu.



Şekil 4.29: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26772.46 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 27009.39 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

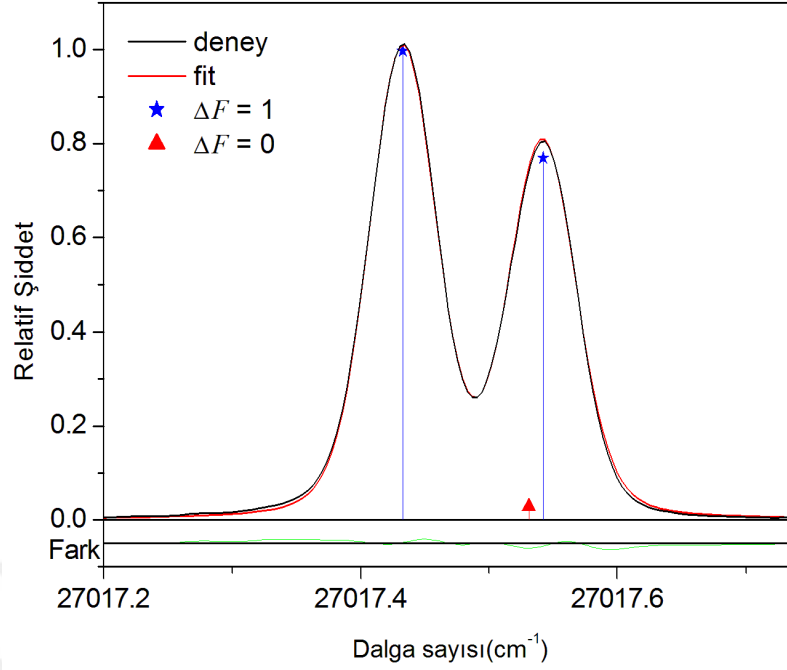
Fit işlemi süresince alt ince yapı enerji seviyesinin hfs sabiti, $A_{\text{alt}} = 293 \text{ MHz}$ değerinde sabit tutulurken, üst ince yapı enerji seviyesinin A değeri, $A_{\text{üst}} = -819(6) \text{ MHz}$ olarak belirlendi.

Tablo 4.38: $\sigma_{\text{deneysel}} = 26772.46 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$26772.456 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	84.29
FWHM(Voigt)	1813.56 MHz
FWHM(Gauss)	1603.72 MHz
FWHM(Lorentz)	376.53 MHz
Theta değeri (Gauss/Voigt)	0.884

• **$\sigma_{\text{deneysel}} = 27017.48 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 370.026 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi**

$E_{\text{üst}} = 27254.42 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$ spektral geçişi de ölçüte uygundur ve çift piklidir. Bu geçişinin fit işleminin sonucu elde edilen spektrum Şekil 4.30’da sunuldu. Tablo 4.39’da ise en iyi fit işlemine ait parametre değerleri verildi.



Şekil 4.30: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27017.48 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 27254.42 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

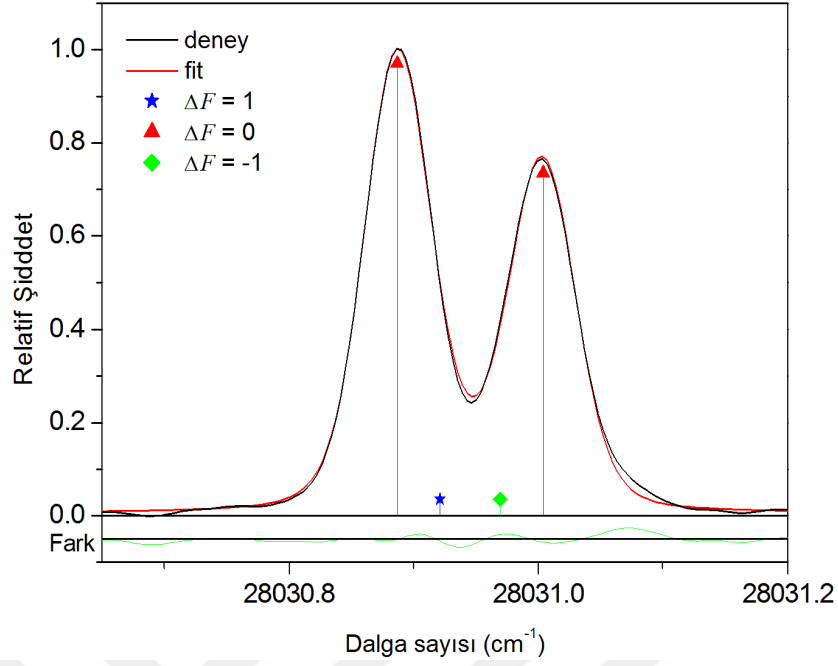
Fit işleminde alt seviye A değeri sabit bırakılırken, üst seviye A değeri, $A_{\text{üst}} = -503(6) \text{ MHz}$ olarak bulundu.

Tablo 4.39: $\sigma_{\text{deneysel}} = 27017.48 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$27017.477 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	61.52
FWHM(Voigt)	1817.23 MHz
FWHM(Gauss)	1599.12 MHz
FWHM(Lorentz)	360.60 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.880

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 28030.94 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 356.647 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Çift pikli diğer bir geçiş $E_{\text{üst}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3$ seviyesinden yine 1. uyarılmış seviyeye ($E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) geçiştir. Bu geçişin de aynı prosedür ile fit işlemi yapıldı. En iyi fit spektrumu Şekil 4.31’de sunuldu. En iyi fit işlemine ait parametre değerleri Tablo 4.40’da verildi.



Şekil 4.31: $\sigma_{\text{deney}} = 28030.94 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 28267.88 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit işleminin görüntüsü.

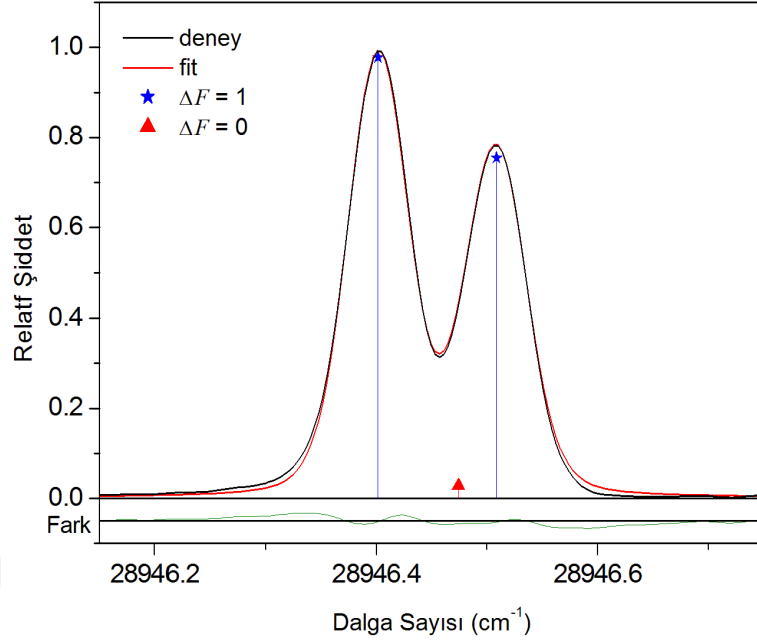
Bu spektral geçişin fit işleminde alt seviyenin A değeri, $A_{\text{alt}} = 293 \text{ MHz}$ olarak sabit tutuldu. Fit işleminin neticesinde üst seviyenin A değeri, $A_{\text{üst}} = -717(10) \text{ MHz}$ olarak bulundu.

Tablo 4.40: $\sigma_{\text{deney}} = 28030.94 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$28030.936 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	42.66
FWHM(Voigt)	1888.49 MHz
FWHM(Gauss)	1652.38 MHz
FWHM(Lorentz)	421.86 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.875

• $\sigma_{\text{deney}} = 28946.45 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 345.367 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

$E_{\text{üst}} = 29183.39 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$ spektral geçişi de çift piklidir. Bu geçişin fit işleminde elde edilen spektrum Şekil 4.32’de verildi. Fit işlemine ait en iyi fit sonuçları Tablo 4.41’de sunuldu.



Şekil 4.32: $\sigma_{\text{deneysel}} = 28946.45 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 29183.39 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 4 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

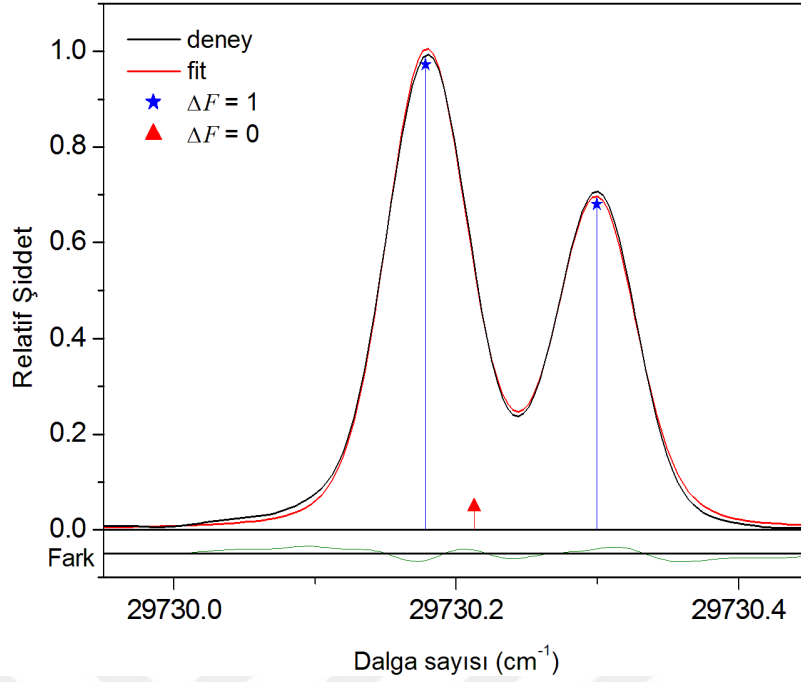
Fit işlemi boyunca yapılan standart işlem burada da tekrarlandı ve alt seviyenin bilinen A değeri sabit tutulup üst seviyenin hfs sabitinin değeri $A_{\text{üst}} = -484((7) \text{ MHz})$ olarak bulundu.

Tablo 4.41: $\sigma_{\text{deneysel}} = 28946.45 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$28946.448 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	43.00
FWHM(Voigt)	1947.90 MHz
FWHM(Gauss)	1733.26 MHz
FWHM(Lorentz)	386.12 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.890

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 29730.23 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 336.261 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

$E_{\text{üst}} = 29967.17 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 2 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$ geçişi analiz edildi. Bu geçişin fit işleminden bulunan spektrum Şekil 4.33'te verildi. Tablo 4.42'de en iyi fit işlemine ait değerler sunuldu.



Şekil 4.33: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29730.23 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 29967.17 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 2 \rightarrow E_{\text{alt}} = 236.95 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

Fit işlemi boyunca alt seviyenin hfs sabitinin değeri $A_{\text{alt}} = 293 \text{ MHz}$ olarak sabit tutuldu ve üst seviyenin hfs sabiti, $A_{\text{üst}} = -1045(8) \text{ MHz}$ olarak bulundu.

Tablo 4.42: $\sigma_{\text{deneysel}} = 29730.23 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$29730.226 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	42.73
FWHM(Voigt)	2022.08 MHz
FWHM(Gauss)	1747.54 MHz
FWHM(Lorentz)	488.11 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.864

Tablo 4.43'ten açıkça görüleceği gibi hem temel düzey hem de 1. uyarılmış düzey için bulunan A değerlerini kullanarak belirlenen ortak üst düzeyler için belirlenen A değerleri kendi içlerinde uyum içindedir.

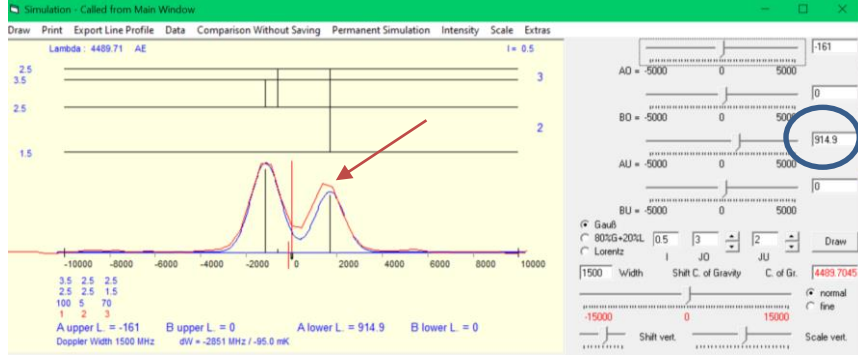
Tablo 4.43: Temel ve birinci uyarılmış düzey için bulunan A değerlerinin sabit tutulması ile belirlenen ortak üst seviyelerin yeni bulunan A değerleri.

$\lambda_{\text{hava}} \text{ (nm)}$	$\sigma_{\text{deneysel}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	$E_{\text{üst}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	$J_{\text{üst}}$	$A_{\text{üst}} \text{ (MHz)}$	$A_{\text{ortalama}} \text{ (MHz)}$
448.127	22308.84	22308.82	4	-949(10)	-948(6)
452.938	22071.89	22308.82	4	-948(6)	
419.992	23803.29	23803.28	4	-38.6(2.0)	-38.6(1.9)
424.215	23566.34	23803.28	4	-38(7)	
395.809	25257.53	25257.52	3	-682.9(2.2)	-682.7(2.1)
399.558	25020.58	25257.52	3	-681(7)	
384.802	25980.03	25980.02	3	-653(5)	-654(10)
388.344	25743.09	25980.02	3	-655(20)	
376.191	26574.67	26574.66	4	-206.3(2.0)	-206.4(1.9)
379.576	26337.72	26574.66	4	-207(6)	
373.412	26772.46	27009.39	4	-819(6)	-816(5)
370.136	27009.40	27009.39	4	-812(6)	
353.657	28267.88	28267.88	3	-698(12)	-709(10)
356.647	28030.94	28267.88	3	-717(10)	
342.562	29183.40	29183.39	4	-479(6)	-481(5)
345.367	28946.45	29183.39	4	-484(7)	

Mansour ve diğ. (1989)'nin hfs sabitlerini belirlediği diğer ince yapı enerji seviyelerini içeren çizgilerin belirlenmesi için Tm-FT spektrumunun taranmasına devam edildi.

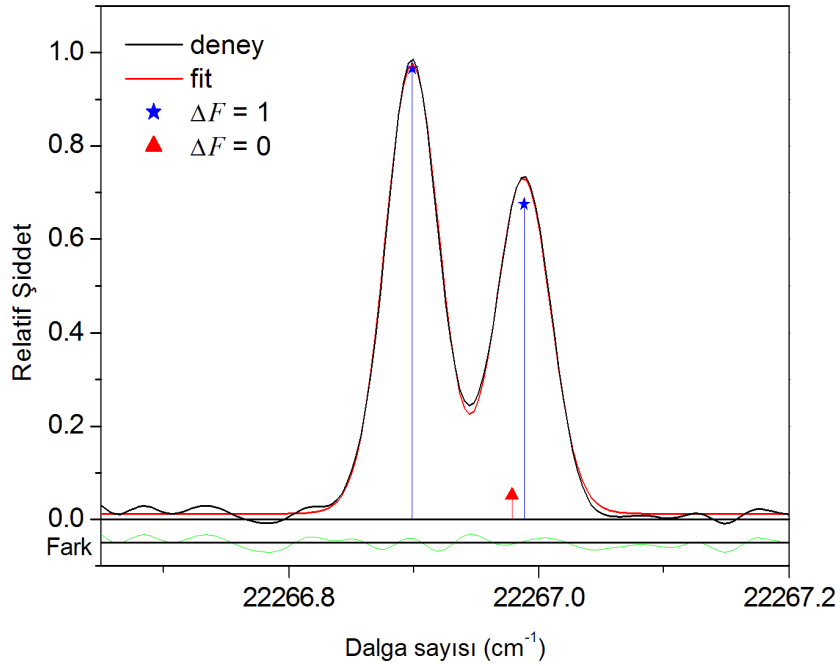
• $\sigma_{\text{deneysel}} = 22266.94 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 448.970 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Çift pikli $\sigma_{\text{deneysel}} = 22266.94 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 31036.61 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 8769.68 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin fit işleminde Mansour ve diğ. (1989) tarafından bulunan A değeri (Şekil 4.34 – mavi yuvarlak) ile yapılan fit işlemi sonucunda ikinci pik şiddetinin deneysel şiddetten daima daha düşük olduğu gözlemlendi (Şekil 4.34 - kırmızı ok). Buradan yola çıkarak Mansour ve diğ. (1989) tarafından verilen değerin hatalı olup olmadığı incelendi.



Şekil 4.34: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22266.94 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 31036.61 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 8769.68 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin simülasyon programındaki görüntüsü.

Çift pariteli $E_{\text{üst}} = 31036.61 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3$ seviyesinden $E_{\text{alt}} = 8769.68 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$ seviyesine olan spektral geçişinin fit işleminin sonucunda Mansour ve diğ. (1989) tarafından alt enerji seviyesi için $A_{\text{alt}} = 914.9 \text{ MHz}$ olarak verilen hfs sabiti değeri, $A_{\text{alt}} = 129(4)$ olarak **revize** edildi ve üst seviye hfs sabiti $A_{\text{üst}} = -681(11) \text{ MHz}$ olarak bulundu. Revize A değeri ile yapılan fit işleminde spektrumdaki ikinci pikin şiddetinin düzeldiği, deneysel ve teorik spektrumların uyumunun çok iyi olduğu görülmektedir. Revize edilen değer ile fit edilen spektrum Şekil 4.35'te sunuldu.



Şekil 4.35: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22266.94 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 31036.61 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 8769.68 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

Revize değer ile yapılan fit işleminden bulunan parametre değerleri Tablo 4.44'te verildi.

Tablo 4.44: $\sigma_{\text{deneysel}} = 22266.94 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

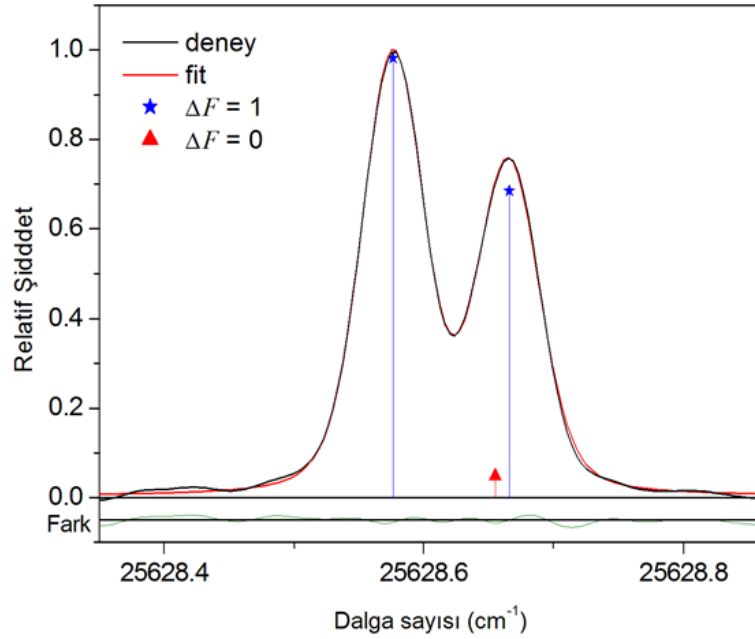
Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$22266.935 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	28.22
FWHM(Voigt)	1539.00 MHz
FWHM(Gauss)	1522.02 MHz
FWHM(Lorentz)	32.31 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.989

Revize edilen A değerinin tasdik edilmesi için $E = 8769.68 \text{ cm}^{-1}$ ($J = 2$) seviyesini içeren diğer geçişler Tm-FT spektrumunda araştırıldı.

$\sigma_{\text{deneysel}} = 25628.62 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 34398.30 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 8769.68 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin de alt ince yapı enerji seviyesinin 8769.68 cm^{-1} ($J = 2$) olduğu tespit edildi.

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 25628.62 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 390.078 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Alt enerji düzeyinin hfs sabiti değeri bu çalışmada revize edilen değer olan $A_{\text{alt}} = 129 \text{ MHz}$ olarak sabit bırakıldı ve üst enerji düzeyinin A değeri, $A_{\text{üst}} = -676(3) \text{ MHz}$ olarak bulundu. En iyi fit spektrumu Şekil 4.36'da ve en iyi fit parametre değerleri Tablo 4.45'te sunuldu.



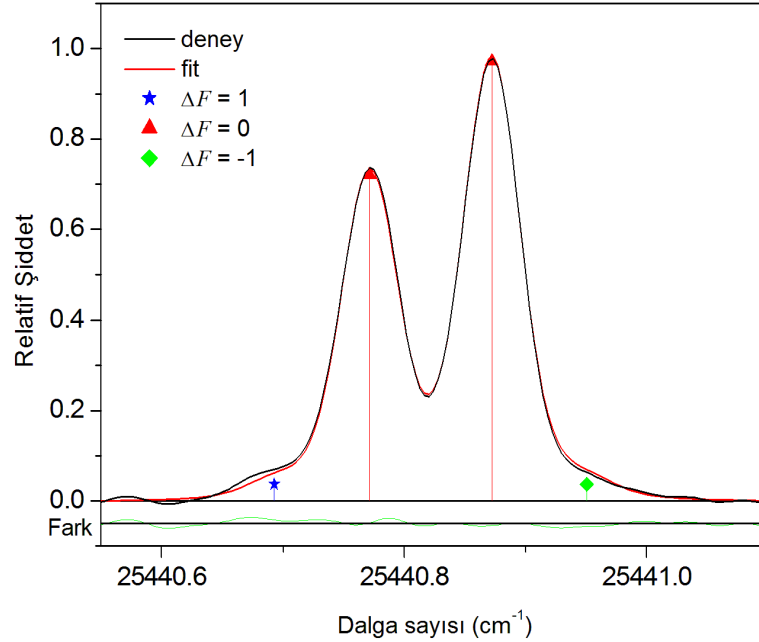
Şekil 4.36: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25628.62 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 34398.30 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 8769.68 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 2$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

Tablo 4.45: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25628.62 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$25628.614 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	56.14
FWHM(Voigt)	1711.03 MHz
FWHM(Gauss)	1436.31 MHz
FWHM(Lorentz)	482.85 MHz
Theta değeri (Gauss/Voigt)	0.839

• $\sigma_{\text{deneysel}} = 25440.83 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_{\text{hava}} = 392.958 \text{ nm}$) çizgisine ait fit analizi

Mansour ve diğ. (1989) tarafından verilen başka bir A değerini içeren diğer bir çizgi $\sigma_{\text{deneysel}} = 25440.83 \text{ cm}^{-1}$ olarak tespit edildi ve aşırı ince yapı analizi yapıldı. Çift pariteli $E_{\text{üst}} = 34398.30 \text{ cm}^{-1}$ ($J_{\text{üst}} = 3$) seviyesinden, tek pariteli $E_{\text{alt}} = 8957.47 \text{ cm}^{-1}$ ($J_{\text{alt}} = 3$) seviyesine olan geçiş için yapılan fit işleminde Mansour ve diğ. (1989) tarafından belirlenen alt ince yapı enerji seviyesi için hfs sabiti, $A_{\text{alt}} = -1537.7 \text{ MHz}$ değeri sabit tutuldu. Üst seviyenin hfs sabiti $A_{\text{üst}} = -676(3)$ olarak belirlendi.



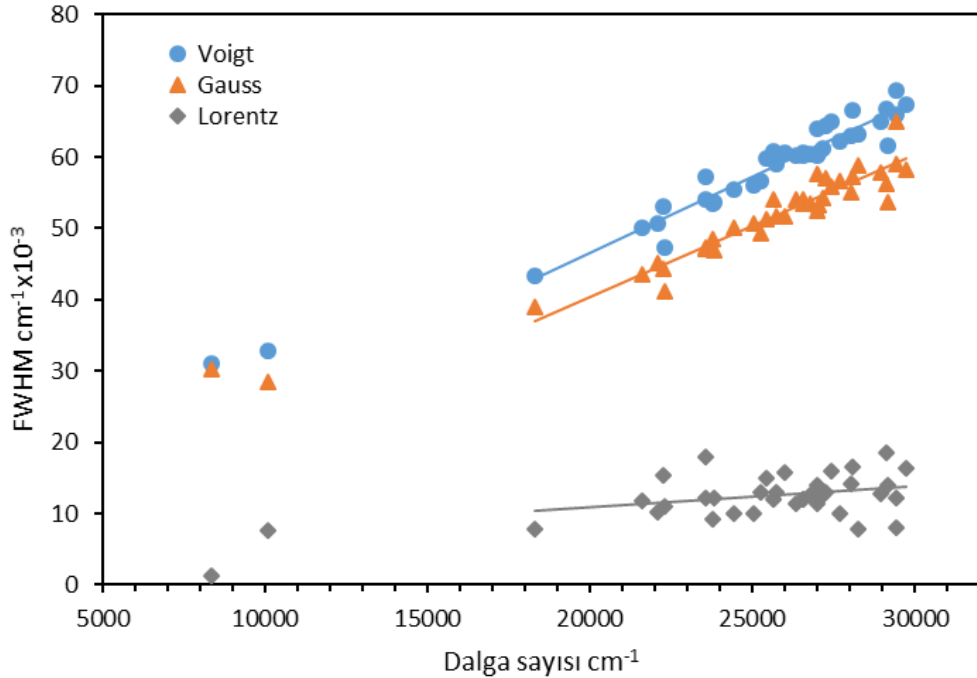
Şekil 4.37: $\sigma_{\text{deneysel}} = 25440.83 \text{ cm}^{-1}$ ($E_{\text{üst}} = 34398.30 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{üst}} = 3 \rightarrow E_{\text{alt}} = 8957.47 \text{ cm}^{-1}$, $J_{\text{alt}} = 3$) çizgisinin en iyi fit spektrumu.

Fit işleminden elde edilen en iyi fit spektrumu Şekil 4.37’de, en iyi fit işlemine ait parametre değerleri Tablo 4.46’da verildi.

Tablo 4.46: $\sigma_{\text{deneyse}} = 25440.83 \text{ cm}^{-1}$ çizgisinin en iyi fit işlemine ait parametre değerleri.

Parametre	Değerler
Ağırlık merkezi	$25440.826 \text{ cm}^{-1}$
Kalite	55.68
FWHM(Voigt)	1693.58 MHz
FWHM(Gauss)	1437.80 MHz
FWHM(Lorentz)	451.56 MHz
Teta (Gauss/Voigt)	0.849

[Şu ana kadar Tm II’nin aşırı ince yapı analizi sonucu bulunan tüm yarı genişlik (FWHM) verileri kullanılarak bir grafik oluşturuldu ve Şekil 4.38’de sunuldu. Bu şekil, Voigt profili fonksiyonunun Lorentz ve Gauss kısımları için dalga sayısının bir fonksiyonu olarak FWHM değerlerini ve ayrıca Voigt profilinin FWHM değerlerini göstermektedir. Grafikte x-ekseni dalga sayısı olup cm^{-1} birimindedir ve y-ekseni ise FWHM değerleridir. y-ekseninde birim MHz’den cm^{-1} birimine çevrilerek verildi.]



Şekil 4.38: Lorentz ve Gauss FWHM ile birlikte çizgi dalga sayısının bir fonksiyonu olarak Voigt profilinin FWHM grafiği.

Şekil 4.38’de, IR spektral bölgesindeki iki spektral çizgi, doğrusal eğim çizdirilirken dikkate alınmamıştır. Voigt FWHM’nin eğimi Gauss kısmının FWHM’sinin eğimiyle hemen hemen aynıdır. Lorentz kısmının FWHM’sinin neredeyse dalga boyundan bağımsız olduğu görülebilir. Lorentz bileşeni öncelikle FT spektrometresinin yaklaşık $10 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ olan enstrümantal fonksiyonunu temsil eder. Analiz edilen çizgilerin doğal çizgi genişliği $10 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ’in çok altındadır ve katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. İçi boş katot lambasındaki Doppler genişlemesi nedeniyle, çizgi genişliğinin Gauss bileşeni küçük dalga sayıları için $30 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ve büyük dalga sayıları için yaklaşık $60 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ arasında değişir. |



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, Sc ve Tm elementlerine ait, Letonya Üniversitesi Laser Merkezi'nde yüksek çözünürlüklü FT spektroskopi yöntemi kullanılarak elde edilen FT emisyon spektrumları analiz edildi. Çalışmada incelenen elementler için dört tane FT-spektrumu iki farklı asal gaz ile değişik deşarj akımlarından elde edildi. Her iki elemente ait spektral çizgilerin sınıflandırılması ve ayrıca eğer mümkün ise spektral çizgilere ait enerji düzeylerinin yeni manyetik dipol aşırı ince yapı sabitlerinin belirlenmesi hedeflendi.

Spektral çizgilerin sınıflandırılmasında, Elements programı kullanıldı. Bu tez kapsamında Python programlama dili ile oluşturulan kaynak kodu yardımıyla aşırı ince yapı analizi için incelenecek spektrum verileri tüm FT spektrum verisi içinden kesildi. Fit işlemleri Fitter programı ile yapıldı ve ince yapı enerji seviyelerinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti, çizgilerin ağırlık merkezleri bulundu.

Literatürde bilinen deneysel ince yapı enerji seviyelerinin kullanılması ile 400 nm -730 nm dalga boyu aralığında Sc elementine ait 532 tane spektral çizginin analizi gerçekleştirildi. Bu çizgilerden 32 tanesi hem daha önce belirlenmemiş yeni çizgi olup hem de ilk defa bu çalışmada sınıflandırılmıştır (Tablo 4.1'de lc ile verilen çizgiler). Ayrıca 26 tane çizgi Sc II olarak sınıflandırıldı. Skandiyum metaline ait olduğu belirlenip sınıflandırılmayan 32 tane çizgi ise Sc I veya Sc II olarak tanımlandı.

Tm-FT spektrumunun 330 nm - 400 nm ve 700 nm - 1000 nm dalga boyu aralığında toplam 953 tane Tm çizgisi analiz edildi. Toplam 571 tane spektral çizgi Tm I olarak sınıflandırıldı. Bu çizgilerden 90 tanesi hem daha önce belirlenmemiş yeni çizgi olup hem de ilk defa bu çalışmada sınıflandırılmıştır (Tablo 4.4'de lc ile verilen çizgiler). Toplam 151 tane çizgi Tm II olarak sınıflandırıldı. Bu çizgilerden 49 tanesi hem daha önce belirlenmemiş yeni çizgi olup hem de ilk defa bu çalışmada sınıflandırılmıştır (Tablo 4.10'da lc ile verilen çizgiler). Ayrıca beş tane bilinen çizginin ilk defa bu çalışmada sınıflandırılması Tm II olarak yapıldı (Tablo 4.10'da nc ile verilen çizgiler). Metal çizgisi olarak tespit edilip sınıflandırılmayan 231 çizgi ise Tm I veya Tm II olarak tanımlandı.

Tm elementinin aşırı ince yapı analizinde ise; Tm I için bir tane ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti, A , revize edilirken bir Tm I ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti, A , ilk defa bu çalışmada bulundu. Ayrıca iki tane Tm II

ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti revize edildi ve 27 tane Tm II ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti ilk defa bu çalışmada bulundu.

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de bu çalışma kapsamında bulunarak verilen deneysel A değerlerinin hata payları aşağıda maddeler halinde açıklanan üç faktörün etkilerinin dikkate alınması ile hesaplandı:

- Dört farklı ölçümlerden kaynaklanan standart sapma S_A . (70 mA deşarj akımı kullanılarak ölçülen Tm-Ar ve Tm-Ne çizgilerinin ölçülmesi ve 50 mA deşarj akımı kullanılarak ölçülen Tm-Ar ve Tm-Ne çizgilerinin ölçülmesi)
- Fitter programı ile hesaplanan en-küçük-kareler yönteminden kaynaklanan ΔA_{fitter} hata payı
- Fit işlemi süresince sabit bırakılan A sabitlerinin hata payları ΔA_{sabit} hata payları

Yukarıda maddeler halinde verilen bu üç faktörün dikkate alınması ile hesaplanan deneysel A değerlerinin hata payları $\Delta A_{deneysel}$ Denklem 5.1 ile verildi:

$$\Delta A_{deneysel} = \sqrt{(S_A)^2 + (\Delta A_{fitter})^2 + (\Delta A_{sabit})^2} \quad (5.1)$$

Eğer deneysel A değeri iki farklı çizgiden elde edildiyse, her bir çizginin deneysel A değerlerinin sonucunun ağırlıklı ortalama değeri olarak tanımlanan ortalama A değeri Denklem 5.2 ile verildi.

$$A_{ortalama} = \frac{\sum_i (A_{deneysel,i} \cdot \omega_i)}{\sum_i \omega_i} \quad (5.2)$$

Denklem 5.2’de yer alan i . A değerinin ağırlığını veren ifade Denklem 5.3 ile verilir.

$$\omega_i = \frac{1}{(\Delta A_{deneysel,i})^2} \quad (5.3)$$

Ağırlıklı ortalama A değerinin hata payları olarak tanımlanan $\Delta A_{ortalama}$ değerinin formülü Denklem 5.4 ile verilmektedir.

$$\Delta A_{ortalama} = \frac{\sqrt{\sum_i (\Delta A_{deneysel,i}^2 + (A_{deneysel,i} - A_{ortalama})^2) \cdot \omega_i^2}}{\sum_i \omega_i} \quad (5.4)$$

Tm-FT spektrumunun analizi sonucu Tm I için yeni bulunan ve revize edilen manyetik dipol hfs değerleri Tablo 5.1’de verildi.

Tablo 5.1: Tm I için revize edilen ve yeni bulunan A manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri.

E (cm ⁻¹)	J	σ_{deneysel} (cm ⁻¹)	A_{deneysel} (MHz)	A_{ortalama} (MHz)	A (MHz)
25745.117	5/2	13531.95	-593(7)	-593(5)	-439.38(1.00) (Zhou ve diğ. 1993)
		13857.78	-586(15)		
38502.00	9/2	13544.55	36(5)	41.0(1.6)	Bu çalışma
		12981.04	41.5(1.6)		

Tm II için tek ve çift pariteli enerji düzeylerine ait revize edilen ve ilk defa bu çalışmada bulunan A manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri Tablo 5.2’de listelendi.

Tablo 5.2: Tm II için tek ve çift pariteli enerji düzeylerine ait revize edilen ve yeni bulunan A manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri.

E (cm ⁻¹)	J	σ_{deneysel} (cm ⁻¹)	A_{deneysel} (MHz)	A_{ortalama} (MHz)	A (MHz)
Tek pariteli enerji seviyeleri					
0.00	4	26578.78	-1038.3(1.6)		Bu çalışma
236.95	3	25743.09	293(6)		Bu çalışma
8769.68	2	25628.62	129(4)		914.9 (1.0) (Mansour ve diğ. 1989)
Çift pariteli enerji seviyeleri					
18291.37	4	18291.38	-92(4)		Bu çalışma
21608.26	3	21608.26	140(3)		Bu çalışma
22308.82	4	22308.84	-949(10)		
		22071.89	-948(6)	-948(6)	Bu çalışma
23768.84	5	23768.85	-73.8(2.1)		Bu çalışma
23803.28	4	23803.29	-38.6(2.0)		
		23566.34	-38(7)	-38.6(1.9)	Bu çalışma
25257.52	3	25257.53	-682.9(2.2)		
		25020.58	-681(7)	-682.7(2.1)	Bu çalışma
25980.02	3	8355.37	-656(4)		-89.8 (0.7)
		25980.03	-653(5)		
		4266.29	-655(20)*	-654(4)	(Mansour ve diğ. 1989)
26574.66	4	26574.67	-206.3(2.0)		
		26337.72	-207(6)	-206.4(1.9)	Bu çalışma
27009.39	4	27009.4	-812(6)		
		26772.46	-819(6)	-816(5)	Bu çalışma

Tablo 5.2 (devam): Tm II için tek ve çift pariteli enerji düzeylerine ait revize edilen ve yeni bulunan A manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri.

$E \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	J	$\sigma_{\text{deneysel}} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	$A_{\text{deneysel}} \text{ (MHz)}$	$A_{\text{ortalama}} \text{ (MHz)}$	$A \text{ (MHz)}$
27254.42	4	27017.48	-503(6)		Bu çalışma
27702.42	3	10077.78 27702.44	-711(6) -703(9)	-709(6)	Bu çalışma
28267.88	3	28267.88 28030.94	-698(12) -717(10)	-709(10)	Bu çalışma
29183.39	4	29183.4 28946.45	-479(6) -484(7)	-481(5)	Bu çalışma
29424.98	3	29424.98	-175(6)		Bu çalışma
29967.17	2	29730.23	-1045(8)		Bu çalışma
31036.61	3	22266.94	-681(11)		Bu çalışma
32500.26	2	23542.8 23730.59	-735(21) -696(54)*		Bu çalışma
33391.55	4	24434.09	-277(18)		Bu çalışma
34398.3	3	25440.83	-676(3)		Bu çalışma
35753.72	3	26984.03	-652(8)		Bu çalışma
36041.02	3	27271.34	-992(7)		Bu çalışma
36132.08	3	27174.59	-391(7)		Bu çalışma
36394.64	2	27437.16	-358(4)		Bu çalışma
36868.99	3	28099.31	-1026(5)		Bu çalışma
38093.53	4	29136.07	-584(11)		Bu çalışma
38361.24	4	29403.78	-595(4)		Bu çalışma

Tabloda * işareti ile gösterilen geçişlerin spektrumları zayıf ve gürütülü olduğu için bu değerler A sabitinin ortalama değer hesabına dahil edilmedi.

Bu tez kapsamında yapılan spektral çizgi sınıflandırmaları ve özellikle bir kez iyonlaşmış tulyum (Tm II) için elde edilen yeni aşırı ince yapı sabitleri hem atom fiziği hem de astrofizik alanlarına önemli bir katkı sağlamıştır. Burada elde edilen veriler bundan sonra yapılacak araştırmalar için iyi bir kaynak olacaktır.

KAYNAKLAR

- [Aboussaïd, A., et al., 1996, Hyperfine Structure of Sc I by Infrared Fourier Transform Spectroscopy”, *Physica Scripta*, 53 (1), 28-32.
- Angelova, E.V., et al., 1984, Laser Spectroscopy Investigation of Highly Excited States of the Tm Atom, *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 17, 953-961.
- Arnesen, A., et al., 1982, Hyperfine Structure Measurement in Sc II, *Astron. Astrophys.*, 106, 327-331.
- Aygün, E., Zengin, D.M., 2000, *Kuantum Fiziği*, Bilim Yayınları, Ankara, ISBN: 9781111115241.
- Başar Gö., et al., 2005, Hyperfine Structure of High Lying Levels of Tm I, *Physica Scripta.*, 71, 159-162.
- Başar, Gö., et al., 2004, Experimental Investigation of the Hyperfine Structure and Theoretical Studies of the Even Configurations of Sc I”, *Physica Scripta.*, 69 (3), 189–195.
- Bates J.B., 1976, Fourier Transform Infrared Spectroscopy, *Science*, 191(4222), 31-37.
- Biémont, E., Quinet, P., 2003, Recent Advances in the Study of Lanthanide Atoms and Ions, *Physica Scripta*, 2003, 38-54.
- Bieroń, J., et al, 2002, Hyperfine-structure calculations of excited levels in neutral scandium, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 35 (15), 3337-3345.
- Brandt, H., W., Camus, P., 1977, Recent Hyperfine Structure Investigations in the Configurations $4f^{13}6s^2$, $4f^{13} 6s 6p$, and $4f^{12}5d 6s^2$ of Tm I, *Zeitschrift Physik A*, 283(4), 309-313.
- Bransden, B.H., Joacham C.J., 1999, *Atom ve Molekül Fiziği*, Bilim Yayıncılık, Ankara, 975-7636-03-7. ISBN: 9789757636038
- Childs, W.J., 1971, “Off-Diagonal Hyperfine Structure in Sc45”, *Phys. Rev. A*, 4 (5), 1767-1774.
- Childs, W.J., et al., 1984, Hyperfine structure of $4f^N 6s^2$ configurations in ^{159}Tb , $^{161,163}\text{Dy}$, and ^{169}Tm , *J. Opt. Soc. Am. B*, 1 (1), 22-29.
- Cowan, R. D., 1981 “*The Theory of Atomic Structure and Spectra*” , Berkeley, Los Angeles, London: University of California Press, ISBN 0-520-03821-5
- Deelen, F. V., 2017, *Hyperfine structure measurements in scandium for IR spectroscopy*, Yüksek Lisans, Lund Observatory, Lund University.

- Dembczynski, J., et al., 2007, Semi-empirical predictions of even atomic energy levels and their hyperfine structure for the scandium atom, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 93 149–165.
- Demtröder, W., 2005, *Atoms, Molecules and Photons*, Springer, Kaiserslautern, Germany, ISBN-10 3-540-20631-0, ISBN-13 978-3-540-20631-6.
- Desclaux, J. P., Bessis, N., 1970, Relativistic Hartree-Fock Hyperfine Structure Calculations for the Scandium, Copper, Gallium and Bromine Atoms, *Phys. Rev.*, 2 (5) 1623-1629.
- Dutta, N. N., et al, 2015, Dynamic polarizabilities and hyperfine-structure constants for Sc^{2+} *Physical Review A*, 92, 1-8.
- Emsley, J., 2001, *Nature's building blocks: an A-Z guide to the elements*, Oxford University Press., US, ISBN 0-19-850341-5.
- Ertmer, W., and Hofer, B., 1976, Zero-Field Hyperfine Structure Measurements of the Metastable States $3d^2 4s \ ^4F_{3/2,9/2}$ of ^{45}Sc Using Laser-Fluorescence Atomic-Beam-Magnetic-Resonance Technique, *Z. Phys. A*, 276, 1-9.
- Fedorov, S.A., et al., 2015, Improved measurement of the hyperfine structure of the laser cooling level $4f^{12}(^3\text{H}_6)5d_{5/2}6s^2$ ($J=9/2$) in ^{169}Tm , *Applied Physics B*, 121, 275-282.
- Fricke, G., et al., 1959, Bestimmung der Hyperfeinstrukturaufspaltungen der Scandium-Grundzustände $2D_{3/2}$ und $2D_{5/2}$ und des Quadrupolmomentes des Sc^{45} -Kernes, K., *Z. Phys.*, 156, 416-424.
- Gauss, C. F., et al., 1965, *Disquisitiones Arithmeticae*, Yale University Press, ISBN 0-300-09473-6.
- Giglberger, D., Penselin, S., 1967, Ground-State Hyperfine Structure and Nuclear Magnetic Moment of Thulium-169, *Zeitschrift für Physik*, 199, 244-255.
- Guo-xin C., 1994, Core-polarization on hyperfine interaction constants in the metastable $3d^2$ state of $^{45}\text{ScII}$, *Physics Letters A*, 193 (5-6), 451-456.
- Gurell, J. et al., 2009., Wavelengths, energy levels and hyperfine structure constants in Ho II, *Physica Scripta*, 79 (3), 1-15.
- Haken, H. and Wolf, H. C., 2000, *The Physics of Atoms and Quanta, Introduction to Experiments and Theory*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, NewYork, ISBN: 3-540-67274-5.
- Hala, and Nave G., 2022, Hyperfine Structure Constants of Sc I and Sc II with Fourier Transform Spectroscopy, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 259 (17), 1-13.
- Hammond, C. R., 2000, *The Elements, Handbook of Chemistry and Physics*, CRC press., Detroit,(81st ed.). ISBN 0-8493-0481-4.
- Handrich, E., Steudel, A., Wallenstein, R., Walther, H., 1969, Level Crossing Experiments in the Tm I and Sm I Spectra, *Journal de Physique Colloques*, 30, C1), C1-18-C1-23.

- Jackson, M., 2000, Magnetism of Rare Earth, *The IRM Quarterly*, 10 (3), 1.
- Kaleem, M., et al., 2023, Hyperfine Structure Constants of Sc I determined from Fourier Transform Spectra, *Physica Scripta*, 98 (11), 1-15.
- Kebapcı T. Y., Sert S., Parlattan Ş., Öztürk İ., Başar Gö., Başar Gü., et al., 2022, Experimental investigation of the hyperfine structure of Tm I with Fourier transform spectroscopy part B: In the NIR wavelength range from 700 nm to 2250 nm, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 287, 108196.
- Kopfermann, H. and Rasmussen, E., 1934, Über das Kernmoment des Scandiums, *Z. Phys.* 92, 82-86.
- Kröger, S., 1992, *Hochauflösende laser spektroskopische Untersuchungen und semiempirische Interpretation mittels Feinstrukturrechnungen an Lanthaniden (z.B. Gd)*, Doktora Tezi, Optisches Institut der Technischen Universität Berlin.
- Kröger, S., 1996, *Hyperfeinstruktur des Thuliums und weiterer Lanthanide (Gd, Ho, Er, Yb)*, Doktora Tezi, Technischen Universität Berlin.
- Kröger, S., et al., 1997, High resolution measurements of the hyperfine structure and determination of a new energy level Tm I, *Zeitschrift für Physik D*, 41, 181-185.
- Krüger, J., 1986, Diplomarbeit, *Institut für angewandte Physik*, Doktora tezi, Universität Bonn.
- Krzykowski, A., and Stefanska, D., 2008, Hyperfine structure measurements of the even electron levels in scandium atom, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 41(5), 1-6.
- Kuhl, J., 1971, Hyperfeinstrukturuntersuchungen mit einem sphärischen Fabry-Perot Interferometer mit einem Absorbtionsstrahl im Tm I und Eu I spektrum, *Zeitschrift Für Physik*, 242, 66-85.
- Kui, J.Z. and Xian, P.W., 1993, Studies on Hyperfine Structure and Isotope Shift of Some Excited States in Yb And Tm Atoms, *Acta Optica Sinica*, 2 (11), 801-806.
- Laeter J, et al., 2003, Atomic Weights of the Element, *Pure and Applied Chemistry*, 75 (6): 683-800.
- Lawler, J.E., 2019, Transition Probabilities of Sc I and Sc II and Scandium Abundances in the Sun, Arcturus, and HD 84937, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 241 (21), 1-19.
- Leeuwen, K.A.H., et al., 1980, High Resolution Measurements of the Hyperfine Structure in 10 Levels of Tm I, *Physics Letters*, 78 (1), 54-56.
- Lindenberger, K.H., 1955, Magnetisches Kern dipol moment und Kerndrehimpulsquantenzahl des $^{69}\text{Tm}169$, *Zeitschrift für Physik, Bd. 141*, 476-485.
- Liu, C., et al., 2019, Radiative lifetime measurements of Sc I levels by time-resolved laser spectroscopy, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 229 (1), 1-19.

- Loginov, A. V., 1996, Estimation of the contribution of the configuration mixing to the Semiempirical Values of the Hyperfine Structure parameters, *Physica Scripta*, 54, 340-345.
- Mansour, N. B. et al., 1989, Laser-rf double-resonance measurements of the hyperfine structure in Sc II, *Phys. Rev. A*, 39 (11), 5762-5767.
- Nakamura, T., et al., 1997, Precise g-factor determination of $4f^{13} 6s 6p$ Excited States in Tm I, *Journal of the Physical Society of Japan*, 66 (12), 3778-3782.
- National Institute of Standards and Technology (NIST), [www.https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database](https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database) [Ziyaret tarihi: 15.11.2023].
- Oreshkina, N. S., et al., 2007, Hyperfine Structure of Lithium-Like Scandium, *Optics and Spectroscopy*, 102 (6), 815–818.
- Öztürk, İ. K., et al., 2007, Hyperfine structure investigation of Sc I, part II: theoretical studies of the odd configurations, *Phys. Scr.* 75 (5), 624–629.
- Parlatan Ş., Öztürk Kanat İ., Başar Gö., Başar Gü., Ferber R., Kröger S., 2022, Experimental investigation of the hyperfine structure of Tm I with Fourier transform spectroscopy part A: In the visible wavelength range (400-700 nm), *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 287, 108195.
- Peck, E. R., Reeder, K., 1972, *Dispersion of Air**, *Journal of the Optical Society of America*, 62 (8), 958-962.
- Pehlivan, A., 2012, *Laboratory Spectroscopy of Neutral Scandium, Sc I for Astrophysical Applications*. Doktora tezi, Lund Observatory, Lund University.
- Pfeufer, V., 1985, Hyperfine Structure Investigations in the Configuration $4f^{12} 5d 6s^2$ of Tm I by Laser-Atomic-Beam Spectroscopy, *Zeitschrift für Physik A, Atoms and Nuclei* 321 (1), 83-84.
- Pfeufer, V., 1986, Hyperfine Structure in the Configurations $4f^{13} 6s 6p$ and $4f^{12} 5d 6s^2$ of Tm I, *Zeitschrift für Physik D, Atoms, Molecules and Clusters*, 2, 141-148.
- Pfeufer, V., 1987, On the Hyperfine Structure in the Configurations $4f^n 6s^2$, $4f^n 5d 6s$, $4f^n 6s 6p$, and $4f^{n-1} 5d 6s^2$ of the Lanthanides, *Z. Phys. D - Atoms, Molecules and Clusters*, 4, 351-366.
- Prialnik, D., 2009, *An Introduction to the theory of stellar structure and evolution*, Cambridge University Press, England, ISBN: 1316284301, 9781316284308.
- Ritter, G.J., 1962, Ground-State Hyperfine Structure and Nuclear Magnetic Moment of Thulium-169, *Physical Review*, 128 (5), 2238-2243.
- Siddiqui, I., 2010, Hyperfine Structure Studies of Praseodymium Atoms and Ions, Doktora Tezi, Avusturya Graz Teknik Üniversitesi Deneysel Fizik Enstitüsü.

- Siefert, E., 1977, Calculation of the Hyperfinestructure and g_j -values of the $3d4s4p$ configuration of Scandium”, *Annalen der Physik*, 489 (4) 286-294.
- Singh R., et al., 1991, Laser Optogalvanic spectroscopy of ScI: hyperfine-structure studies, *J. Opt. Soc. Am. B*, 8 (1) 12-16.
- Smith, B.C., 2011, *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (2nd ed.)*, CRC Press, Boca Raton, ISBN9780429140587.
- Snedden, C., et al., 2009, New Rare Element Abundance Distributions for the Sun and Five R-Process Rich Very Metal-Poors Stars, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 182 (1), 80-96.
- Sugar, J., et al., 1973, Journal of the Research of the National Bureau of Standarts, *A. Physics and Chemistry*, 77 (1), 1-628.
- Taylor, J. R., Zafaritos, C., 1996, *Fizik ve Mühendislikte Modern Fizik*, Güven Yayınları, İstanbul.
- Tian, Y., et al., 2016, Radiative lifetime measurements of some Tm I and Tm II levels by time-resolved laser spectroscopy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 457 (2), 1393-1398.
- Tripplet, B.B., et al., 1992, Electronic Relaxation Observed in Mössbauer Hyperfine Spectra of Tm Metal, *Hyperfine Interactions*, 72 (1-3), 97-102.
- Uddin, Z., 2006, *Hyperfine structure studies of Tantalum and Praseodymium*, Doktora Tezi, Avusturya Graz Teknik Üniversitesi Deneysel Fizik Enstitüsü.
- Villemoes, P., et al., 1992, Experimental and study of the hyperfine structure in the lower configurations in ^{45}Sc II, *Physical Review A*, 45 (9), 6241-6252.
- Whaling, W., et al., 1985, Absolute transition probabilities in vanadium I and the solar abundance of vanadium, *Astron. Astrophys.*, 153 (1), 109-115.
- Wickliffe, M.E., and Lawler, J.E., 1997, Atomic Transition Probabilities of Tm I and Tm II, *J. Opt. Soc. Am. B.*, 14 (4), 737-753.
- Windholz, L. and Guthöhrlein, G. H., 2003, Class-LW bilgisayar programı, *Physica Scripta*, 105 (55).
- Woodgate, G. K., 1970, *Elementary Atomic Structure*, McGraw-Hill Publishing Company Limited, England, ISBN 0-19-851156-6.
- Xu, Y., et al., 2021, Studies on hyperfine structure of Sc I and Sc II using Fourier-transform spectroscopy. *Eur. Phys. J. D*, 75 (11), 1-10.
- Young, L., et al., 1988, Hyperfine structure of Sc II: Experiment and theory, *Physical Review A*, 37 (11), 4213-4219.

- Zeiser, A., et al., 2022, New version of the program Fitter for fitting atomic hyperfine structure in optical spectra including the calculation of confidence intervals, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 290 (108294) 1-10.
- Zeiske, W., et al., 1976, Hyperfine Structure of Cw Dye Laser Populated High Lying Levels of ^{45}Sc by Atomic-Beam Magnetic-Resonance, *Phys. Lett.*, 55(7) 405-406.
- Zhan-kui, J., et al., 1993, Studies on hyperfine structure and isotope shift of some excited states in Yb and Tm atoms, *Acta Physica Sinica*, (Overseas Edition), 2 (11) 1-6.
- Zhou, Z., Zhu, L., Jing, C., Zhang, S., Lin, F., 1993, Measurement of hyperfine structure constant of high excited levels in ^{169}Tm I, *Acta Optica Sinica*, 13 (8), 673-678.



EK-1

FT spektrumundan incelenecek çizginin verisinin alınmasını sağlayan Python programlama dili ile oluşturulan kaynak kodu aşağıda verildi.

```
# pip install numpy

# pip install matplotlib

# pip install pandas

# pip install csv

# enter the lines above only once when the shell is started for the first time

# python

import numpy as np

from numpy.lib.shape_base import expand_dims import pandas as pd

import matplotlib.pyplot as plt

import os                # provides functions for interacting with the operating system

# plot or not plot?

plot_on = 1 # 1: spectra are plotted; 0: spectra are not plotted

folder_output = "C:/fitter_data/FT_fitter_data/"

# reads data

# From which file should data be cropped?

# chose spectra and delete "#" !!

#

spectrum_filenames = []

#-----

#   Tm

#-----

# element = "Tm"

# folder = "C:/Elemente/Tm/Exp_FT_data/"
```

```

# folder = "C:/Elemente/Tm/HK_Tm_2017/2pt-spectra/"

# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ar_70mA_UV_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ar_50mA_UV_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ar_70mA_VIS_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ar_50mA_VIS_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ar_50mA_VIS_low PMT_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ar_50mA_IR_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ar_50mA_IR2_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ne_70mA_UV_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ne_50mA_UV_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ne_70mA_VIS_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ne_50mA_VIS_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ne_15mA_VIS_lowPMT_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ne_50mA_IR_8pt.DPT"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "Tm_Ne_50mA_IR2_8pt.DPT"])

#-----

#   Sc

#-----

# element = "Sc"

# folder = "C:/Elemente/Sc/HK_Sc/"

# folder = "C:/Elemente/Tm/HK_Tm_2017/2pt-spectra/"

# spectrum_filenames. extend([folder + "ScAr 181215.7_Av_VIS_FES550_8.dpt"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "ScAr 181215.8_VIS_FES600_8.dpt"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "ScAr 181215.10_VIS_BP450_8.dpt"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "ScAr 181215.12_VIS_8.dpt"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "ScAr 181215.13_VIS_BP550_8.dpt"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "ScAr 181217.11_VIS_8.dpt"])

```

```

# spectrum_filenames. extend([folder + "ScAr 181217.18_Av_VIS_8.dpt"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "ScAr 181218.9_Av_IR_8.dpt"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "ScNe 181214.12_Av_UV_8.dpt"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "ScNe 181217.9_VIS_8.dpt"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "ScNe 181218.3_Av_IR_8.dpt"])
# spectrum_filenames. extend([folder + "ScNe 181218.9_IR_FB1300_8.dpt"])

print("plot_on = ",plot_on)

if plot_on == 1 :

    for full_spectrum_filename in spectrum_filenames:

        print(full_spectrum_filename)

        full_spectrum_dataframe = pd.read_csv(full_spectrum_filename, header=None) #
pd.read_csv("test_8pt.DPT"))

        full_spectrum = full_spectrum_dataframe.to_numpy() # DataFrame to Numpy Array

        # sigma = full_spectrum[:,0]
        # intensity = full_spectrum[:,1]

        n = len(full_spectrum)

        # checks whether data have increasing or decreasing wavenumber and reverses it if needed

        if (full_spectrum[n-1,0]-full_spectrum[0,0]) < 0 :

            full_spectrum = np.flipud(full_spectrum)

        # calculates the data step size in cm-1 and in MHz

        increment = abs(full_spectrum[n-1,0]-full_spectrum[0,0])/(n-1)

        increment_nu = abs(full_spectrum[n-1,0]-full_spectrum[0,0])/(n-1)*29979.2458 # in
MHz

        # plots the full spectrum

        plt.rcParams["figure.figsize"] = (12,6) # figure size can be changed

        sigma, intensity = full_spectrum.T

        plt.plot(sigma,intensity)

```

```

plt.ion()

plt.show()

plt.pause(0.01)

do_continue = True

while do_continue:

    # reads start and end wavenumber for cropping

    print("From where to where should the data be cropped?")

    sigma_start = float(input("Please enter the start wavenumber: "))

    sigma_end = float(input("Please enter the end wavenumber: "))

    # creates the appropriate folders and sub-folders

    file_name = str(int((sigma_start+sigma_end)/2)) # + first letter of element, see below

    path_name = folder_output+element+file_name

    print(path_name)

    if not os.path.exists(path_name+"\\mes"):

        os.makedirs(path_name+"\\mes")

    if not os.path.exists(path_name+"\\lin"):

        os.makedirs(path_name+"\\lin")

    if not os.path.exists(path_name+"\\ein"):

        os.makedirs(path_name+"\\ein")

    if not os.path.exists(path_name+"\\arb"):

        os.makedirs(path_name+"\\arb")

    i_spectrum = 1

    for full_spectrum_filename in spectrum_filenames:

        full_spectrum_dataframe = pd.read_csv(full_spectrum_filename, header=None) #
pd.read_csv("test_8pt.DPT"))

        full_spectrum = full_spectrum_dataframe.to_numpy() # DataFrame to Numpy Array

        # sigma = full_spectrum[:,0]

```

```

# intensity = full_spectrum[:,1]

n = len(full_spectrum)

# checks whether data have increasing or decreasing wavenumber and reverses it if needed
if (full_spectrum[n-1,0]-full_spectrum[0,0]) < 0 :
    full_spectrum = np.flipud(full_spectrum)

# calculates the data step size in cm-1 and in MHz
increment = abs(full_spectrum[n-1,0]-full_spectrum[0,0])/(n-1)

increment_nu = abs(full_spectrum[n-1,0]-full_spectrum[0,0])/(n-1)*29979.2458 # in
MHz

if (sigma_start < full_spectrum[0,0] or sigma_start > full_spectrum[n-1,0]):
    print("The specified value for the start wavenumber is not in the range of the spectrum
",full_spectrum_filename,"; data from this spectrum will not be cropped")

    test = 0

elif (sigma_end < full_spectrum[0,0] or sigma_end > full_spectrum[n-1,0]):
    print("The specified value for the end wavenumber is not in the range of the
spectrum",full_spectrum_filename,"; data from this spectrum will not be cropped")

    test = 0

else:
    test = 1

if test == 1:
    if (sigma_end-sigma_start) < 0 :
        s = sigma_start
        sigma_start = sigma_end
        sigma_end = s          # exchanging start and endfull_spectrum

# calculates start and end datapoint number for cropping
n_start = round((sigma_start - full_spectrum[0,0])/increment-0.5)
n_end = round((sigma_end - full_spectrum[0,0])/increment+1)

cropped_spectrum_x = full_spectrum[:n_end+1,:]

```

```

cropped_spectrum = cropped_spectrum_x[n_start+1,:;]

# plots the cropped spectrum

# plt.rcParams["figure.figsize"] = (12,6) # figure size can be changed here again

cropped_sigma, cropped_intensity = cropped_spectrum.T

plt.plot(cropped_sigma,cropped_intensity)

datei = open(path_name+"\\lin\\"+element[0]+file_name+"_"+str(i_spectrum)+".par",'w')

datei.write(element[0]+file_name)

start_wavelength_vac = 10000000/sigma_start

# refractive_index = 1+0.05792105/(238.0185-(start_wavelength_vac/1000)**(-
2))+0.00167917/(57.362-(start_wavelength_vac/1000)**(-2))

# following https://refractiveindex.info/?shelf=other&book=air&page=Ciddor

# start_wavelength_air = start_wavelength_vac / refractive_index

# sigma_end

# start_wavelength_vac

# start_wavelength_air

datei.write("\r#"+str(round(start_wavelength_vac*10*10000)/10000))

datei.write("\r#0.0")

number_of_datapoints = n_end - n_start

datei.write("\r      "+str(number_of_datapoints))

datei.write("\r      "+str(round(increment_nu*10000)/10000))

datei.write("\r      "+str(number_of_datapoints))

datei.write("\r      1")

datei.write("\r      "+str(number_of_datapoints))

datei.write("\r      10")

datei.write("\r      150")

datei.write("\r      100")

datei.write("\r nicht invertiert (steigend)")

```

```

datei.close()

max_int = max(cropped_intensity)

if max_int < 1 :

    cropped_intensity_scaled = cropped_intensity/max_int

    cropped_intensity = cropped_intensity_scaled

    pd.DataFrame(cropped_intensity).to_csv(path_name+"\\lin\\"+element[0]+file_name+
    "_" +str(i_spectrum)+".lin", index = False, header = False, float_format="%20.8f")

    pd.DataFrame(cropped_spectrum).to_csv(path_name+"\\mes\\"+element[0]+file_name+
    e+"_" +str(i_spectrum)+".mes", index = False, header = False, float_format="%20.8f",
    sep="\t")

    i_spectrum += 1

plt.ion()

plt.show()

plt.pause(0.01)

do_continue = int(input("Please enter 1 to continue: ")) ==1

print ("End")

input() # after this input program ends

|

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Taha Yusuf KEBAPCI
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Marmara Ünverstesi
Fakülte	Fen-Edebiyat Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	01.06.2012

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Atom ve Molekül Fiziği Programı

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Atom ve Molekül Fiziği Programı

Makale ve Bildiriler
Kebapcı T. Y., Sert S., Parlattan Ş., Öztürk İ., Başar Gö., Başar Gü., et al., 2022, Experimental investigation of the hyperfine structure of Tm I with Fourier transform spectroscopy part B: In the NIR wavelength range from 700 nm to 2250 nm, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 287, 108196. Kebapcı, T. Y., Parlattan, Ş., Sert, S., Öztürk, İ., K., Başar, G., Şahin, T., Bilir, S., Ferber, R., Tamanis, M., Kröger, S., 2024, Hyperfine Structure Investigation of Singly Ionized Thulium in FT Spectra, The Astrophysical Journal, kabul edildi.