



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



Yüksek Lisans Tezi

**ATOMİK VANADYUMUN AŞIRI İNCE YAPISININ ve YENİ
ENERJİ SEVİYELERİNİN LASER SPEKTROSKOPİK OLARAK
İNCELENMESİ**

Hasan ERDOĞAN

Fizik Anabilim Dalı

Atom ve Molekül Fiziği Programı

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

Haziran, 2022

İSTANBUL

Bu çalışma, 10.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Atom ve Molekül Fiziğı Programında Yüksek Lisans 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

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, 121F034 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir.



ÖNSÖZ

Yükseklisans eğitimimde her konuda desteğini bir an olsun esirgemeyen, bilgisiyle bana gerek teorik gerekse deneysel çalışmalarında yol gösteren, motivasyonumu sürekli yüksek tutmamı sağlayan kıymetli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. İpek KANAT ÖZTÜRK'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deneysel çalışmalarında her zaman bilgisini bana aktaran, desteğini esirgemeyen ve deneysel çalışmalarda gelişmemi sağlayan İstanbul Teknik Üniversitesi öğretim üyelerinden Prof. Dr. Günay BAŞAR'a teşekkür ederim.

Deneysel bilgilerini ve çalışmaların analizlerinde yardımlarını esirgemeyen Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin öğretim üyelerinden Prof. Dr. Sophie KRÖGER'e teşekkürlerimi sunarım.

Yükseklisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bilgisini, yardımını ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Gönül BAŞAR'a ve yaptığı yönlendirmeleriyle öğrencilerinin geniş perspektiflere sahip olmasını sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Feyza GÜZELÇİMEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Yükseklisans eğitimime başladığım günden itibaren her çalışmayı beraber yaptığımız, desteğini ve yardımını esirgemeyen , her zaman yanımda olacağını bildiğim çok kıymetli arkadaşım Doğan BİNGÖL'e teşekkür ederim.

Bana göstermiş olduğu destek ile bugünlere gelmemi sağlayan babama, sevgisini ve ilgisini her zaman hissettiğim biricik ablama, doğduğu günden bu yana neşe kaynağım olan minik Zeynep'ime ve emeklerinin karşılığını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim çok kıymetli anneme teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunuyorum.

Haziran 2022

Hasan ERDOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ.....	viii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	4
2.1. GÜNÜMÜZE KADAR VANADYUM ELEMENTİ	4
2.2. ATOMİK YAPI	22
2.3. İNCE YAPI ENERJİ SEVİYELERİNDEKİ YARILMALAR.....	24
2.4. AŞIRI İNCE YAPI HAKKINDA TEMEL BİLGİLER.....	26
2.5. HOMOJEN VE HOMOJEN OLMAYAN SPEKTRAL ÇİZGİ GENİŞLEMELERİ	29
3. MALZEME VE YÖNTEM	34
3.1. VANADYUM ELEMENTİ VE ÖNEMİ.....	34
3.2. DENEYSEL YÖNTEMLER	35
3.2.1. Optogalvanik Spektroskopi (OGS) Yöntemi.....	36
3.2.2. Laser Uyarılmış Floresans (LIF) Spektroskopi Yöntemi	37
3.2.3. Deney Düzenegi ve Deney Şartları	38
3.2.4. Yeni ince yapı enerji seviyesinin bulunması	40
3.3. SPEKTRAL ÇİZGİLERİN ANALİZİNDE KULLANILAN PROGRAMLAR.....	42
3.3.1. Elements Programı	42
3.3.2. Fitter Programı.....	44
4. BULGULAR	47
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	71

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Spektral çizgi profili, yarı genişliği, çizgi merkezi ve kanatları.	29
Şekil 2.2: Bir spektral geçişin doğal çizgi genişleme profili.	30
Şekil 2.3: Aynı yarıgenişliğe sahip Lorentz ve Gauss profillerinin karşılaştırılması.	31
Şekil 3.1: Deneyde kullanılan silindirik katodun şematik gösterimi.	38
Şekil 3.2: Deney düzeneğinin şematik gösterimi.	40
Şekil 4.1: Dalgasayısı $\sigma = 12323.501 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 811.2346 \text{ nm}$ olan $49639.433 \text{ cm}^{-1}$, $J=9/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 37315.932 \text{ cm}^{-1}$, $J=11/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.	51
Şekil 4.2: Literatürden (Güzelçimen ve diğ., 2014) alınan değer kullanılarak yapılan analiz sonucu.	52
Şekil 4.3: Dalgasayısı $\sigma = 12354.270 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 809.2142 \text{ nm}$ olan $49639.327 \text{ cm}^{-1}$, $J=9/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 37285.057 \text{ cm}^{-1}$, $J=9/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.	53
Şekil 4.4: 49639.4 cm^{-1} yeni seviye bulunmasında göz önüne alınan tüm geçişler.	54
Şekil 4.5: Dalgasayısı $\sigma = 12313.231 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 811.9113 \text{ nm}$ olan 49717.56 cm^{-1} , $J=11/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 37404.329 \text{ cm}^{-1}$, $J=13/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.	55
Şekil 4.6: Dalgasayısı $\sigma = 12111.164 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 825.4575 \text{ nm}$ olan $49717.529 \text{ cm}^{-1}$, $J=11/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 37606.365 \text{ cm}^{-1}$, $J=13/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.	56
Şekil 4.7: Dalgasayısı $\sigma = 11952.642 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 836.4052 \text{ nm}$ olan $49717.565 \text{ cm}^{-1}$, $J=11/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 37764.923 \text{ cm}^{-1}$, $J=11/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.	57
Şekil 4.8: Yeni seviye bulunmasında göz önüne alınan tüm geçişler.	58
Şekil 4.9: Dalgasayısı $\sigma = 12408.630 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 805.6688 \text{ nm}$ olan $49938.944 \text{ cm}^{-1}$, $J=9/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 37530.314 \text{ cm}^{-1}$, $J=11/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.	60

Şekil 4.10: Dalgasayısı $\sigma = 11815.153 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 846.1382 \text{ nm}$ olan $49938.948 \text{ cm}^{-1}$, $J=9/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 38123.795 \text{ cm}^{-1}$, $J= 9/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.....	61
Şekil 4.11: Dalgasayısı $\sigma= 12764.251 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 783.2221 \text{ nm}$ olan $49938.942 \text{ cm}^{-1}$, $J=9/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 37174.691 \text{ cm}^{-1}$, $J= 7/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.....	62
Şekil 4.12: 49938.94 cm^{-1} yeni enerji seviyesinin bulunmasında göz önüne alınan tüm geçişler.....	63



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: ^{51}V elementinin çift pariteli ince yapı enerji seviyelerine ait literatürdeki deneysel çalışmalar ve sonuçları.	7
Tablo 2.2: ^{51}V elementinin tek pariteli ince yapı enerji seviyelerine ait literatürdeki deneysel çalışmalar ve sonuçları.	13
Tablo 2.3: Enerji kaymalarının, frekansların ve dalga boylarının bir özeti.	26
Tablo 4.1: V elementinin FT spektrumunda laser dalga boyu aralığında tanımlanamayan çizgileri.	49
Tablo 4.2: Fitter programı ile yapılan çizgi analizlerine ait veriler.	54
Tablo 4.3: Yeni bulunan enerji seviyesi ve bu seviyeye ait manyetik dipol hfs sabiti.	54
Tablo 4.4: Fitter programı ile yapılan çizgi analizlerine ait veriler.	58
Tablo 4.5: Yeni bulunan enerji seviyesi ve bu seviyeye ait manyetik dipol hfs sabiti.	59
Tablo 4.6: Fitter programı ile yapılan çizgi analizlerine ait veriler.	64
Tablo 4.7: Yeni bulunan enerji seviyesi ve bu seviyeye ait manyetik dipol hfs sabiti.	64
Tablo 5.1: Yeni bulunan çift pariteli ince yapı enerji seviyelerine ait tüm bilgiler çizgi sınıflandırılmaları ile birlikte.	65

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler

Açıklama

A	: Manyetik dipol hfs sabiti
B	: Elektrik kuadropol hfs sabiti
Ψ	: Dalga fonksiyonu
$\hbar$	: Planck sabiti
F	: Atomun toplam açısal momentum kuantum sayısı
I	: Çekirdek spini
J	: Elektronun toplam açısal momentum kuantum sayısı
μ_I	: Çekirdeğin spin açısal manyetik dipol momenti
μ_J	: Elektronun toplam açısal manyetik moment
μ_N	: Çekirdek manyetonu
μ_B	: Bohr manyetonu
ξ	: Spin yörünge etkileşme parametresi
σ	: Dalga sayısı
ν	: Çizgisel frekans
λ	: Dalgaboyu

Kısaltmalar

Açıklama

FTS	: Fourier Transform Spektroskopisi
AMBR	: Atom Işını Manyetik Rezonans Spektroskopisi
HRCBLS	: Yüksek Çözünürlüklü Laser Işın Spektroskopisi
IMLIF	: Frekans Modüle Edilmiş Laserle Uyarılmış Floresans Spektroskopisi
LIFS	: Laserle Uyarılmış Floresans Spektroskopisi
LRFDR	: Laser Ve Radyo Frekans Çift Rezonans Spektroskopisi
LSS	: Laser Saturasyon Spektroskopisi
SAS	: Saturasyon Absorbsiyon Spektroskopisi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATOMİK VANADYUMUN AŞIRI İNCE YAPISININ İNCELENMESİ ve YENİ ENERJİ SEVİYELERİNİN LASER SPETROSKOPİK OLARAK İNCELENMESİ

Hasan ERDOĞAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. İpek KANAT ÖZTÜRK

Bu çalışmanın amacı, nötral vanadyum (V I) atomunun ince yapı enerji seviyelerinin bulunması ve bu yeni seviyelerin aşırı ince yapılarının deneysel olarak incelenmesidir.

V elementinin, Fourier Transform (FT) spektroskopi yöntemi ile alınan spektrumundaki tanımlanamayan spektral çizgiler incelendi. Optogalvanik spektroskopi (OGS) ve Laser Uyarılmış Floresans (LIF) spektroskopi yöntemleri kullanılarak 3 tane çift pariteli yeni ince yapı enerji seviyesi ilk defa bu çalışmada bulundu. Bulunan yeni ince yapı enerji seviyelerinin deneysel manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri ilk defa bu çalışmada belirlendi. Ayrıca literatürde verilen bir tane manyetik dipol aşırı ince yapı sabitinin değeri revize edildi.

Deneysel çalışmalar İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik bölümü bünyesinde bulunan Laser Spektroskopi Laboratuvar'ında gerçekleştirildi.

Haziran 2022, 82. sayfa.

Anahtar kelimeler: Laser spektroskopi, nötral vanadyum, enerji seviyesi, aşırı ince yapı

SUMMARY

M.Sc. THESIS

LASER SPECTROSCOPIC INVESTIGATION of HYPERFINE STRUCTURE and NEW ENERGY LEVELS of ATOMIC VANADIUM

Hasan ERDOĞAN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. İpek KANAT ÖZTÜRK

The aim of this study is to discover the fine structure energy levels of the neutral vanadium (VI) atom and to experimentally examine the hyperfine structures of these new levels.

Unidentified spectral lines in the spectrum of V element taken by Fourier Transform (FT) spectroscopy method were examined. Three even parity new fine structure energy levels were found for the first time in this study using optogalvanic spectroscopy (OGS) and Laser-Induced Fluorescence (LIF) spectroscopy methods. The experimental magnetic dipole hyperfine structure constants of the new fine-structure energy levels found were determined for the first time in this study. In addition, the value of one magnetic dipole hyperfine structure constant given in the literature was revised.

Experimental studies were carried out in the Laser Spectroscopy Laboratory within the Physics Department of the Science Faculty of Istanbul University.

June 2022, 82 pages.

Keywords: Laser spectroscopy, neutral vanadium, energy levels, hyperfine structure

1. GİRİŞ

Evrenimizin temel özelliklerini inceleyen bilim dalına fizik diyoruz. Fiziğin konusu, yaklaşık 13,8 milyar yıl önce Büyük Patlama (Bing Bang) ile açığa çıkan enerji, madde, uzay ve zamanla başlayan her şeyi incelerken nedensellik, merak ve amaç besleyerek düşünme, gözlemlleme ve deneyler yaparak doğruluğunu ispatlamaktır. Evrenin farklı yönlerini kendilerine konu olarak seçmiş insanların farklı dallara ayrılıp çalışmalar yaparak sistematik bir şekilde oluşturdukları disiplinler bütününe de bilim denir. Çalışmaları yapan insanlara da “bilim insanı” diyoruz. Tarih boyunca birçok bilim insanı yaptığı çalışmalarla dünyada ve evrende gerçekleşen fiziksel olayları merak etmiş ve açıklama isteği duymuştur.

Sir Isaac Newton, 1687’de yayınladığı “Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica” isimli kitapta yeryüzündeki ve evrendeki hareketleri açıklayan kanunlarıyla Klasik Mekaniğin temelini oluşturmuştur. Kitapta, basit hareket kanunlarından kütle çekim kanununa, evrenin ve gezegen hareketlerinin felsefi yorumlarından bazı hipotezlere kadar farklı konulardaki çalışmalar yer alır. Bu çalışmalar bilim insanlarının 200 yıldan fazla sürede yaptığı çalışmaların temelini oluşturmuştur. Gözle gözlemlenebilen olayları Klasik Mekanik ile açıklayacak birçok varsayım, hipotez ve teori üretilmiştir. Klasik Mekanik her ne kadar başarılı olsa da molekül, atom ve atomu oluşturan parçacıklar keşfedildikçe Klasik Mekanik bu boyutlarda yetersiz kalmıştır. Klasik Mekanik ile açıklanamayan durumlar için yeni bir şeye ihtiyaç duyulmuştur. 1900’lerin başlarında temeli atılan Kuantum Mekaniği, gözle göremediğimiz bu mikroskopik boyutlardaki parçacıkların özelliklerini açıklamaya çalışır.

Atom, çekirdek ve çekirdek etrafındaki katmanlardan oluşur. Çekirdek içerisinde proton ve nötron vardır. Çekirdek etrafındaki katmanlarda ise elektronlar bulunur. Çekirdekte bulunan protonların sayısı atomun ayırt edici özelliklerini belirler. Yani farklı sayıda protona sahip atomlar farklı özelliklere sahiptir.

Atomların içerisindeki elektronların hareket ettiği yörüngeler aslında bir olasılık bulutudur. Bu olasılık bulutu elektronların bulunabileceği yerlerin olasılıklar bütününe ifade eder. Elektronlar çekirdeğe yakın olma yani kararlı bir yapıda olma eğilimindedir. Bir uyarıcı sebebiyle elektronlar bu bulut içerisindeki konumunu değiştirebilir. Bu değişim sonucunda bir ışıma oluşur ve salınan veya soğurulan ışıma incelenerek atomun yapısı hakkında bilgiler elde edilir.

Atomların ve bunların az sayıda elektron kaybetmiş iyonlarının deneysel ince yapı enerji seviyeleri, yaygın olarak kullanılan uluslararası veritabanlarında (NIST, Moore, vb.) mevcut olmasına rağmen, hala birçok eksiklikler vardır. Bu eksik veri nedeni ile, bazı durumlarda, yıldızların vb. spektrumlarının analizi için kullanılan tayf çizgileri doğru şekilde sınıflandırılmaz. Ek olarak, atomların elektronik yapısının yarı deneysel veya ab-initio teorik araştırmaları için tam ve doğru enerji seviyeleri listelerine ihtiyaç vardır. Enerji değerlerine ek olarak parite, açısal momentum, Landé-g faktörleri ve aşırı ince (hf) yapı sabitleri de güvenilir bir şekilde belirlenmelidir.

Yeni enerji seviyelerini bulmak için bir elementin emisyon spektrumunun araştırılması gerekir. Morötesinden kızılötesine kadar geniş bir yelpazede spektrum bilgisi, araştırılan atomik sisteme bağlı olarak analizi kolaylaştırır. Günümüze kadar yüksek çözünürlüklü spektrograflar kimyasal elementlerin çoğu spektral çizgisinin sınıflandırılmasını sağlamıştır. Bu nedenle klasik emisyon spektroskopisi, atomların ve iyonlarının enerji seviyelerinin belirlenmesinde en önemli kaynaktır.

Demir grubu elementler, yıldız atmosferlerindeki element bolluklarını belirlemek için önemlidir. Vanadyum da demir grubu elementlerinden biridir ve bu neden ile detaylı incelenmesi önemlidir. Özetle astrofiziksel araştırmalar için, vanadyum elementine ait ince yapı enerji seviyeleri, geçiş olasılıkları, izotop kaymaları (IS) ve aşırı ince yapı (hfs) sabitleri gibi ayrıntılı atomik verilere ihtiyaç vardır. Hfs ve IS parametreleri, spektral analizde saturasyonu düzeltmek için kullanılır, ayrıca, yıldızlarda fotosferik bollukları önemli ölçüde etkileyebilecek ışınsal difüzyonun modellenmesinde rol oynarlar (Rosner ve Holt, 2016). Astrofiziksel ilgisine ek olarak, yüksek endüstriyel ilgiye sahip alaşımların korozyon korumasında vanadyumun rolü iyi bilinmektedir. Bu nedenle, nötral vanadyum ile ilgili çalışmalar yıldız atmosferlerinin plazmasının teşhisinde önemli olduğu kadar aynı zamanda endüstriyel işlemlerde plazmanın analizinde de gereklidir (C.Colón ve diğ., 2020). Korozyon, katı bir materyal ile materyalin bulunduğu ortam arasındaki elektrokimyasal etkileşim sonucunda materyal yüzeyinde oluşan madde kaybı olarak tanımlanmaktadır. Titanyum alaşımlarında korozyon direncinin sağlanması amacıyla demir, mekanik dayanımın artması için alüminyum, var olan alüminyum iyonlarını ortamdaki uzaklaştırmasıyla vanadyum; korozyon önleyici olarak kullanılmaktadır (Çevik ve Eraslan, 2013).

Bu çalışmanın amacı, vanadyum elementinin yeni ince yapı enerji seviyelerini deneysel olarak belirlemektir. Bu amaçla özellikle çok detaylı bir çalışma olan, Thorne ve arkadaşları tarafından (Thorne, 2011) FT spektrometresi yöntemi ile yapılan ve 630-1100 nm spektral bölge aralığında ölçülen V elementinin spektrumundaki tanımlanamayan spektral çizgilerin varlığı belirlendi. Bu çalışmada yeralan araştırmacılardan biri olan J. C. Pickering (özel iletişim) ile yapılan özel yazışma sonucunda V elementinin Fourier Transform(FT) spektroskopi tekniği ile incelenen tanımsız çizgilerinin listesi elde edildi. Bu tanımlanamayan çizgiler, İstanbul Üniversitesi Laser Spektroskopi Araştırma Laboratuvarı'nda yapılan deneyler ile incelendi.

Bu tez çalışması ile vanadyum elementinin 3 yeni ince yapı enerji seviyesi deneysel olarak bulunarak uluslararası veri tabanlarına önemli bir katkı sağlandı. Ayrıca yeni bulunan enerji seviyelerine ait deneysel manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri (hfs) de belirlendi. Literatürde bilinen bir adet manyetik dipol hfs sabiti revize edildi.

Elde edilen veriler atom fiziğinin yanı sıra astrofizik çalışmalarında da kullanılması açısından önemlidir.

2.GENEL KISIMLAR

2.1. GÜNÜMÜZE KADAR VANADYUM ELEMENTİ

Vanadyum, geçiş metalleri grubuna ait, atom numarası 23 olan, yüksek yıldız bolluğu ve çizgi bakımından zengin spektrumu nedeniyle astrofizik araştırmalarında diğer birinci sıra geçiş metalleri (Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn) ile birlikte etkili bir rolü vardır. Bu yüzden vanadyumun aşırı ince yapı (hyperfine structure-*hfs*) çalışmaları oldukça önemlidir.

1900'lerin başlarında vanadyumun çizgilerine ait çalışmalar başlamıştır. Babcock (1911), 386.5 nm - 665.2 nm aralığında birkaç yüz çizgiyi kapsayan çalışmada Zeeman etkisi altındaki vanadyumu incelemiş ve bu çalışmanın yardımıyla elde edilen Landé-*g* faktörleri Meggers ve Russell (1936) tarafından bulunmuştur. Sugar ve Corliss (1978) ve yakın tarihte Saloman ve Kramida (2017) yapılan bu deneysel çalışmaları toparlayıp analiz etmiştir. Yapılan analizler sonucunda 3895 geçişin dalgaboyu, 549 enerji seviyesi ve 1256 geçişin olasılıkları ile nötr vanadyum elementinin spektral tabloları oluşturulmuş. Bu çalışma ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından kısmen desteklenmiştir.

Geçtiğimiz yüzyılda vanadyum elementinin *hfs*'i birçok çalışmanın konusu olmuştur. İlk çalışma Kopfermann ve Rasmussen (1936) tarafından, vanadyum elementine ait enerji geçişlerinin manyetik dipol *hfs* sabitlerinin bulunmasıyla başlamıştır. Bu çalışmanın ardından Murakawa (1956, 1966), Childs ve Goodman (1966), Edmunds (1973), Childs ve diğ. (1979), Johann ve diğ. (1981), Gough ve diğ. (1985), Unkel ve diğ. (1989) ve El-Kashef ve Ludvig (1992) farklı spektroskopik yöntemler (Atom Işını Manyetik Rezonans-ABMR, Laser ve Radyo Frekans Çift Rezonans Spektroskopisi-LRFDR, Laser Saturasyon Spektroskopisi-LSS, Laser ile Uyarılmış Floresans Spektroskopisi-LIFS, Fourier Transform Spektroskopisi-FTS, Yüksek Çözünürlüklü Laser Işın Spektroskopisi-HRCBLS) kullanarak *hfs* seviyelerini incelemiş ve seviyelere ait aşırı ince yapı sabitlerini belirlemiştir. Fourier transform spektroskopisi ile kırmızı-altı, yakın kırmızı ve görünür bölgede ölçümler yapan Palmeri ve diğ. (1995, 1997) 136 seviyenin yeni manyetik dipol aşırı ince yapı sabitlerini (*A*) belirlemiştir. Lefebvre ve diğ. (2002) aynı teknikle vanadyumun *hfs* ölçümlerini gerçekleştirmiştir ve 22 yeni *A* sabitini belirlemiştir. Vanadyum elementinin terim ve parametrik analizleri Rosen (1973a, 1973b), Bauche-Amoult (1971, 1973), Ollsen ve Rosen (1982) ve yakın zamanda Thorne ve diğ. (2011) tarafından yapılmıştır. Thorne ve diğ. (2011) yaptığı çalışmada toplam 544 enerji

seviyesi (198 çift, 346 tek parite) belirlemişlerdir. Güzelçimen ve çalışma arkadaşları (Güzelçimen ve diğ. 2011; Güzelçimen ve diğ. 2014; Güzelçimen ve diğ. 2015) vanadyum elementinin hfs 'ini Fourier transform spektroskopisi yöntemiyle incelemiş, 187 enerji seviyesi üzerinde çalışma yapan ekip 103 seviyenin A sabitini ilk defa belirlemiştir. Gü. Başar ve diğ. (2017) çalışmalarında Laser uyarılmış floresans (LIF) spektroskopisi yöntemiyle 57 çizgi üzerinde çalışma yapmış ve 14 seviyenin A hfs sabitini, 2 seviyenin B hfs sabitini belirlemişlerdir. Ayrıca önceki çalışmalardaki 56 seviyenin A hfs sabitlerini revize etmişlerdir. Gü. Başar ve diğ. (2018) IMLIF yöntemiyle 8 çizgi incelenmiş ve önceki çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. 5 seviye için A hfs sabiti, 2 seviye için B hfs sabitleri revize edilmiştir. Vanadyum elementinin hfs çalışması yakın zamanda Sobolewski ve diğ. (2019, 2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Laser Uyarılmış Floresans (LIF) Spektroskopisi yöntemiyle 2019'da yaptıkları çalışmada görünür sarı-kırmızı bölgede 574.8 nm - 646.4 nm 15 vanadyum çizgisinde inceleme yapmışlardır. 13 seviyenin Landé- g faktörlerini ve hfs sabitlerini belirleyen ekip daha önce tespit edilmiş 11 seviyenin Landé- g faktörlerini ve hfs sabitlerini revize etmişlerdir. İkinci çalışmalarında görünür yeşil-kırmızı bölgede 568.3 nm - 648.1 nm aralığındaki 17 vanadyum çizgisi üzerinde çalışma yapmıştır. Bu çalışma sonucunda 7 seviye için A hfs sabitini, 10 seviye için Landé- g faktörlerini belirlemişlerdir. Daha önce belirlenmiş 12 seviyenin Landé- g faktörünü, 18 seviyenin de hfs sabitlerini revize etmişlerdir. Huiting ve diğ. (2022) vanadyum elementine ait hfs sabitleriyle ilgili yaptıkları çalışmada bilinen hfs sabitleri sayısını 416'ya yükseltmiştir. Ulusal Güneş Gözlemevinde (NSO) Fourier Transform Spektrometresi (FTS) ile kaydedilen dataların, Jilin Üniversitesinde yazılan bir program ile fit işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada 53 enerji seviyesi incelenmiş ve 46 seviye için ilk defa A sabitleri belirlenmiştir.

Vanadyum elementinin bolluk analizi, yaşam ömrü, geçiş olasılıkları çalışmalarını gerçekleştiren birçok astrofizikçi geçiş elementlerinin hfs bilgilerinden yararlanarak daha hassas ve kesin sonuçlara ulaşmaya çalışmışlardır. Whaling ve diğ. (1985) hfs bilgilerinin önemini "*Güneş bolluğu sonuçlarında günümüzdeki doğruluk, doğru atomik veriler (geçiş olasılıkları, aşırı ince yapı) ve yüksek kaliteli güneş verilerinin kombinasyonu ile mümkün olmuştur*" şeklinde belirtmiştir. Lawler ve diğ. (2014) atomik vanadyuma ait 836 çizgiyi Fourier transform spektroskopisi ve yüksek çözünürlüklü spektroskopik yöntemlerle incelemiş, bu incelemeler sayesinde vanadyumun enerji seviyeleri arasındaki geçiş olasılıkları ve yaşam ömürleri hakkında bilgiler edinilmiştir. Aynı yıl Wood ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada bir

kez iyonize olmuş vanadyum çizgileri üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Vanadyum ve diğer metal grubu elementler yıldız atmosferinde genellikle iyonize halde bulundukları için bolluk analizi yapılan elementin nötr ve iyonize hallerinin spektrumlarının incelenmesi hesaplamaların daha doğru olmasını sağlar. Bu veriler vanadyumun galaksideki metalce fakir yıldızların bolluk araştırmalarına katkıda bulunmuştur. Yıldız bolluk araştırmaları, Galaksideki kimyasal elementlerin tarihçesi ve yıldızın “fosil-kaydı” hakkında bilgiler verdiğinden oldukça önemlidir (Wood ve diğ. 2014). Bu bilgiler ışığında oluşturulan Galaktik kimyasal modellemeler (GCE) sayesinde Galaksinin evrim süreci hakkında bilgiler elde edilir. Sneden ve diğ. (2016) ve Xiaowei Ou ve diğ. (2020), nötr ve iyonik vanadyumun daha önce elde edilen değerlerini iyileştirerek bolluk analizine katkı sağlamıştır. Xiaowei Ou ve çalışma arkadaşları, yaptıkları çalışmada çoğu yıldız için vanadyum bolluğundaki belirsizliği %20 oranında azaltmış ve tespit edilen yıldız sayısını 204’ten 255 çıkartmışlardır. Colon ve diğ. (2020), astrofiziksel ve endüstriyel açıdan öneme sahip çalışmalarında vanadyum elementinin ultraviyole-mavi bölgesinde bulunan 35 enerji seviyesini incelemişlerdir. Deneysel ölçümleri olmayan bu seviyeler için Cowan programının kodlarından yararlanarak elde edilen yaklaşık 190.000 geçiş olasılığını kullanıp, vanadyum çizgilerine ait Stark genişleme parametrelerini ve geçişlerin üst seviyelerinin yaşam ömürlerini elde etmişlerdir.

Vanadyum elementine ait çift ve tek pariteli ince yapı enerji seviyelerinin literatürde bilinen hfs sabitleri, kullanılan deneysel yöntem ve referansları ile birlikte derlenerek Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de verildi.

Tablo 2.1: ^{51}V elementinin çift pariteli ince yapı enerji seviyelerine ait literatürdeki deneysel çalışmalar ve sonuçları.

Enerji(cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	A (MHz)	B (MHz)	Referans
0.000	$3d^34s^2$	a^4F	3/2	560.05(6) 560.06 560.06(2) 560.4(10)	4.26(8) 3.98(25)	Childs ve Goodman (1966) Palmeri ve diğ. (1997) Childs ve diğ. (1979) Huiting ve diğ. (2022)
137.383	$3d^34s^2$	a^4F	5/2	321.22(12) 321.24 321.25(3)	3.38(25) 3.95(45)	Childs ve Goodman (1966) Palmeri ve diğ. (1997) Childs ve diğ. (1979)
323.432	$3d^34s^2$	a^4F	7/2	249.74(7) 249.75(2) 249.75	5.08(20) 5.58(25)	Childs ve Goodman (1966) Childs ve diğ. (1979) Palmeri ve diğ. (1997)
552.955	$3d^34s^2$	a^4F	9/2	227.13(6) 227.13(1) 227.11	7.82(15) 8.24(30)	Childs ve Goodman (1966) Childs ve diğ. (1979) Palmeri ve diğ. (1997)
2112.282	$3d^4(^5D)4s$	a^6D	1/2	751.4(5) 751.47(28) 751.53(7) 751.79		Gough ve diğ. (1985) Childs ve Goodman (1966) Childs ve diğ. (1979) Palmeri ve diğ. (1997)
2153.221	$3d^4(^5D)4s$	a^6D	3/2	405.06 405.60(12) 405.64(4) 405.7(4)	-8.11(12) -6.98(15) -13(4)	Palmeri ve diğ. (1997) Childs ve Goodman (1966) Childs ve diğ. (1979) Gough ve diğ. (1985)
2220.156	$3d^4(^5D)4s$	a^6D	5/2	373.52(10) 373.52(2) 373.6 373.7(4)	-5.46(25) -5(30)	Childs ve Goodman (1966) Childs ve diğ. (1979) Palmeri ve diğ. (1997) Gough ve diğ. (1985)
2311.369	$3d^4(^5D)4s$	a^6D	7/2	382.36(10) 382.36(2) 382.36 382.4(3)	2.27(29) 2.29(30)	Childs ve Goodman (1966) Childs ve diğ. (1979) Palmeri ve diğ. (1997) Gough ve diğ. (1985)
2424.809	$3d^4(^5D)4s$	a^6D	9/2	406.85(16) 406.85(4) 406.85	6(12) 14.32(65) 14.04(65)	Childs ve Goodman (1966) Childs ve diğ. (1979) Palmeri ve diğ. (1997)
8413.009	$3d^4(^5D)4s$	a^4D	1/2	1270.15(9) 1276(5) 1277.2 1278.6(5) 1277.2(4)		Gü.Basar ve diğ. (2018) Childs ve Goodman (1966) Palmeri ve diğ. (1997) Gü.Basar ve diğ. (2017) Childs ve diğ. (1979)
8476.234	$3d^4(^5D)4s$	a^4D	3/2	69.65 7.55 7.46(5)	-108.53 -0.01(6)	Childs ve Goodman (1966) Palmeri ve diğ. (1997) Childs ve diğ. (1979)
8578.542	$3d^4(^5D)4s$	a^4D	5/2	-143.4 -143.43 -143.2(4) -143.25(2)	-1.2 -2(8) 5.14(20)	Palmeri ve diğ. (1997) Childs ve Goodman (1966) Gü.Basar ve diğ. (2018) Childs ve diğ. (1979)
8715.747	$3d^4(^5D)4s$	a^4D	7/2	-160.18(2) -160.22 -160.3(2) -160.72	13.87(25) 102.28 12(12)	Childs ve diğ. (1979) Childs ve Goodman (1966) Gü.Basar ve diğ. (2018) Palmeri ve diğ. (1997)
9544.635	$3d^34s^2$	a^4P	1/2	-353.71(1) -353.73		Johann ve diğ. (1981) Palmeri ve diğ. (1997)
9637.039	$3d^34s^2$	a^4P	3/2	183.94(1) 183.94		Johann ve diğ. (1981) Palmeri ve diğ. (1997)

Tablo 2.1 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
10892.520	3d ³ 4s ²	a ² G	7/2	398(15) 398	-52(50)	Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
11100.596	3d ³ 4s ²	a ² G	9/2	298.6(9)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
13801.551	3d ³ 4s ²	a ² P	3/2	333.37(9)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
13810.910	3d ³ 4s ²	a ² P	1/2	143.9(3)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
14514.756	3d ³ 4s ²	a ² D	3/2	341.5 341.53	0.17	El-Kashef ve Ludvig (1992) Palmeri ve diğ. (1997)
14548.816	3d ³ 4s ²	a ² D	5/2	259.4 259.49	7.73	El-Kashef ve Ludvig (1992) Palmeri ve diğ. (1997)
14909.958	3d ⁴ (³ H)4s	a ⁴ H	7/2	31.48(3) 32.816 32.88		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
14949.359	3d ⁴ (³ H)4s	a ⁴ H	9/2	260.49(9) 262.281 262.45		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
15000.937	3d ⁴ (³ H)4s	a ⁴ H	11/2	373.5(3) 374.651 374.65		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
15062.959	3d ⁴ (³ H)4s	a ⁴ H	13/2	444.92(3) 445.106 445.13		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
15078.387	3d ⁴ (³ P2)4s	b ⁴ P	1/2	1441.4(6) 1445.25 1445.3		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
15103.784	3d ³ 4s ²	a ² H	9/2	348(3)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
15264.832	3d ³ 4s ²	a ² H	11/2	297.7(1.5)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
15270.582	3d ⁴ (³ P2)4s	b ⁴ P	3/2	804.0(6) 806.01(89) 806.03		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
15572.035	3d ⁴ (³ P2)4s	b ⁴ P	5/2	682.3(6) 680.95 680.97		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
15664.801	3d ⁴ (³ F2)4s	b ⁴ F	3/2	-114.8(1.5) -114.96		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)
15688.862	3d ⁴ (³ F2)4s	b ⁴ F	5/2	305.9(1.8) 305.94(16) 305.95		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
15724.229	3d ⁴ (³ F2)4s	b ⁴ F	7/2	445.6(1.8) 446.04(76) 446.04		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
15770.789	3d ⁴ (³ F2)4s	b ⁴ F	9/2	512.6(6) 511.47(56) 511.48		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)

Tablo 2.1 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
17054.924	3d ⁴ (³ G)4s	a ⁴ G	5/2	629.56(12) 0.5 0.8		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
17116.947	3d ⁴ (³ G)4s	a ⁴ G	7/2	276.32(9) 276.0(5) 276.0		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
17182.073	3d ⁴ (³ G)4s	a ⁴ G	9/2	397.8(1.5) 398.79(85) 398.8		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
17242.070	3d ⁴ (³ G)4s	a ⁴ G	11/2	463.03(12) 463.72(57) 463.73		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
18805.048	3d ⁴ (³ P2)4s	b ² P	1/2	689.3(4) 690.1(3) 690.3		Gü.Başar ve diğ. (2017) Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)
19023.531	3d ⁴ (³ H)4s	b ² H	9/2	398.8(73) 398.9	-2.84	El-Kashef ve Ludvig (1992) Palmeri ve diğ. (1997)
19026.326	3d ⁴ (³ F2)4s	a ² F	5/2	471.3(3) 471.50(13) 471.51		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
19078.112	3d ⁴ (³ F2)4s	a ² F	7/2	93.53(6) 93.96(31) 93.96		Palmeri ve diğ. (1995) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997)
19145.148	3d ⁴ (³ H)4s	b ² H	11/2	160.95 160.98	-17.33	El-Kashef ve Ludvig (1992) Palmeri ve diğ. (1997)
19189.283	3d ⁴ (³ P2)4s	b ² P	3/2	-224(2) -224.5(59) -224.56 -225.7(1.5)	6(4)	Gü.Başar ve diğ. (2017) Unkel ve diğ. (1989) Palmeri ve diğ. (1997) Palmeri ve diğ. (1995)
20202.551	3d ⁵	a ⁶ S	5/2	-298.0(6) -298.2		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)
20767.609	3d ⁴ (³ D)4s	b ⁴ D	7/2	590.3(3) 590.7		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)
20789.112	3d ⁴ (³ D)4s	b ⁴ D	5/2	535 536.4(2.4)		Palmeri ve diğ. (1997) Palmeri ve diğ. (1995)
20813.108	3d ⁴ (³ D)4s	b ⁴ D	3/2	404.7(5) 405		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)
20830.344	3d ⁴ (³ D)4s	b ⁴ D	1/2	-416.4 -416.1(6) -413(25)		Palmeri ve diğ. (1997) Palmeri ve diğ. (1995) Gü.Başar ve diğ. (2017)
21101.589	3d ⁴ (³ G)4s	² G	7/2	422.4(6) 422.7		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)

Tablo 2.1 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
21275.652	3d ⁴ (³ G)4s	² G	9/2	119(5) 120.1(1.8) 120.21		Gü.Başar ve diğ. (2017) Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)
21603.259	3d ⁴ (³ G)4s	b ² G	9/2	597.8(9) 598.5(2.2) 598.17		Palmeri ve diğ. (1995) Gü.Başar ve diğ. (2017) Palmeri ve diğ. (1997)
21646.420	3d ⁴ (³ G)4s	b ² G	7/2	-7.25(15) -7.26 -4(8)		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997) Gü.Başar ve diğ. (2017)
22479.403	3d ⁴ (¹ I)4s	² I	13/2	506.0(3)		Sobolewski ve diğ. (2019)
22496.546	3d ⁴ (¹ I)4s	² I	11/2	67.5(2)		Sobolewski ve diğ. (2019)
24630.567	3d ⁴ (³ D)4s	² D	5/2	-8.2		Palmeri ve diğ. (1997)
24643.528	3d ⁴ (³ D)4s	² D	3/2	591.9		Palmeri ve diğ. (1997)
24778.321	3d ³ 4s ²	² F	7/2	283(13) 284.0(20)		Gü.Başar ve diğ. (2017) Sobolewski ve diğ. (2019)
24859.901	3d ³ 4s ²	² F	5/2	338(7)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
31334.104	3d ⁴ (³ F)4s	⁴ F	3/2	-102.8		Palmeri ve diğ. (1997)
31355.710	3d ⁴ (³ F)4s	⁴ F	9/2	516.0		Palmeri ve diğ. (1997)
31357.439	3d ⁴ (³ F)4s	⁴ F	5/2	319.0		Palmeri ve diğ. (1997)
31371.087	3d ⁴ (³ F)4s	⁴ F	7/2	468.6		Palmeri ve diğ. (1997)
31624.805	3d ⁴ (³ P)4s	⁴ P	5/2	362.01		Palmeri ve diğ. (1997)
31717.485	3d ⁴ (³ P)4s	⁴ P	3/2	348		Palmeri ve diğ. (1997)
31764.979	3d ⁴ (³ P)4s	⁴ P	1/2	364.8		Palmeri ve diğ. (1997)
32352.337	3d ⁵	⁴ G	5/2	386.5		Palmeri ve diğ. (1997)
32371.662	3d ⁵	⁴ G	7/2	191.0		Palmeri ve diğ. (1997)
32393.954	3d ⁵	⁴ G	9/2	122.8		Palmeri ve diğ. (1997)
32417.169	3d ⁵	⁴ G	11/2	98.4		Palmeri ve diğ. (1997)
33310.629	3d ⁵	⁴ P	5/2	209.1		Palmeri ve diğ. (1997)
33412.584	3d ⁵	⁴ P	3/2	256.8		Palmeri ve diğ. (1997)
33484.368	3d ⁵	⁴ P	1/2	369.34		Palmeri ve diğ. (1997)
36983.603	3d ⁵	e ⁴ F	3/2	483.0(1.8) 483.3		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)
36989.185	3d ⁵	e ⁴ F	5/2	188.3(1.2) 188.4		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)
37025.579	3d ⁵	e ⁴ F	7/2	92.7(6) 92.7		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)
37075.563	3d ⁵	e ⁴ F	9/2	53.66(6) 53.7		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1997)

Tablo 2.1 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
37116.769	3d ⁴ (⁵ D)5s	e ⁶ D	1/2	-637.1(1.8) -631(19)		Palmeri ve diğ. (1997) Gü.Başar ve diğ. (2017)
37158.582	3d ⁴ (⁵ D)5s	e ⁶ D	3/2	-104.9(1.2)		Palmeri ve diğ. (1997)
37227.489	3d ⁴ (⁵ D)5s	e ⁶ D	5/2	-15.3(3)		Palmeri ve diğ. (1997)
37322.170	3d ⁴ (⁵ D)5s	e ⁶ D	7/2	42.4(1.8)		Palmeri ve diğ. (1997)
37375.172	3d ³ 4s(⁵ F)5s	e ⁶ F	1/2	-696.7(1.5)		Palmeri ve diğ. (1997)
37423.212	3d ³ 4s(⁵ F)5s	e ⁶ F	3/2	383.7(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
37440.777	3d ⁴ (⁵ D)5s	e ⁶ D	9/2	83.6(3)		Palmeri ve diğ. (1997)
37503.240	3d ³ 4s(⁵ F)5s	e ⁶ F	5/2	540.8(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
37615.057	3d ³ 4s(⁵ F)5s	e ⁶ F	7/2	591.2(1.2)		Palmeri ve diğ. (1997)
37758.146	3d ³ 4s(⁵ F)5s	e ⁶ F	9/2	613.7(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
37931.460	3d ³ 4s(⁵ F)5s	e ⁶ F	11/2	629.3(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
37940.211	3d ⁴ (⁵ D)5s	e ⁴ D	1/2	888.3(2.4) 889(3)		Palmeri ve diğ. (1995) Gü.Başar ve diğ. (2017)
38004.041	3d ⁴ (⁵ D)5s	e ⁴ D	3/2	69.55(12)		Palmeri ve diğ. (1995)
38106.385	3d ⁴ (⁵ D)5s	e ⁴ D	5/2	-10.5(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
38242.535	3d ⁴ (⁵ D)5s	e ⁴ D	7/2	-3.6(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
39127.228	3d ³ 4s(⁵ F)5s	f ⁴ F	3/2	-197.0(1.5) -197(23) -187.9(4)		Palmeri ve diğ. (1995) Gü.Başar ve diğ. (2017) Sobolewski ve diğ. (2020)
39241.384	3d ³ 4s(⁵ F)5s	f ⁴ F	5/2	384.0(6) 386.8(19)		Palmeri ve diğ. (1995) Sobolewski ve diğ. (2019)
39398.893	3d ³ 4s(⁵ F)5s	f ⁴ F	7/2	569.6(6) 570.6(7)		Palmeri ve diğ. (1995) Sobolewski ve diğ. (2020)
39596.988	3d ³ 4s(⁵ F)5s	f ⁴ F	9/2	649.3(2.4) 653(3) 650.1(5)		Palmeri ve diğ. (1995) Gü.Başar ve diğ. (2017) Sobolewski ve diğ. (2020)
42034.058	3d ⁴ (⁵ D)4d	e ⁶ G	3/2	68.2(35)		Sobolewski ve diğ. (2020)
42067.285	3d ⁴ (⁵ D)4d	e ⁶ G	5/2	179(12) 168.3(5)		Güzelçimen ve diğ. (2015) Sobolewski ve diğ. (2020)
42109.564	3d ⁴ (⁵ D)4d	e ⁶ P	5/2	-239.7(12)		Sobolewski ve diğ. (2020)
42114.333	3d ⁴ (⁵ D)4d	e ⁶ G	7/2	108(30)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
42164.859	3d ⁴ (⁵ D)4d	e ⁶ P	7/2	-171.5(10)		Sobolewski ve diğ. (2020)
42177.685	3d ⁴ (⁵ D)4d	e ⁶ G	9/2	96(24)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
42257.394	3d ⁴ (⁵ D)4d	e ⁶ G	11/2	64(44)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
42286.714	3d ⁴ (⁵ D)4d	f ⁶ F	3/2	-133.7(20)		Sobolewski ve diğ. (2020)
42353.693	3d ⁴ (⁵ D)4d	e ⁶ G	13/2	90(13)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
42363.790	3d ⁴ (⁵ D)4d	f ⁶ F	7/2	-57(13)		Huiting ve diğ. (2022)
42404.289	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ D	3/2	-512.6(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
42506.503	3d ⁴ (⁵ D)4d	f ⁶ F	9/2	46(4)		Huiting ve diğ. (2022)
43529.134	3d ³ (⁵ F)4d	⁴ D	1/2	-329(69)		Huiting ve diğ. (2022)

Tablo 2.1 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
43649.336	3d ³ 4s(⁵ F)4d	e ⁶ H	5/2	200(5)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
43706.874	3d ³ 4s(⁵ F)4d	e ⁶ H	7/2	42(9)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
43770.210	3d ³ (⁵ F)4d	⁴ D	5/2	380(7)		Huiting ve diğ. (2022)
43787.604	3d ³ 4s(⁵ F)4d	e ⁶ H	9/2	685(6)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
43867.926	3d ³ 4s(⁵ F)4d	⁴ D	7/2	307(4)		Huiting ve diğ. (2022)
43881.610	3d ³ 4s(⁵ F)4d	f ⁶ P	5/2	619(8)		Huiting ve diğ. (2022)
43891.233	3d ³ 4s(⁵ F)4d	⁴ H	7/2	147(30)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
				78(29)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
43894.149	3d ³ 4s(⁵ F)4d	e ⁶ H	11/2	298(6)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
43918.573	3d ³ (⁴ F)4s(³ F)5s	e ² F	7/2	594.4(13)		Sobolewski ve diğ. (2019)
44028.264	3d ³ 4s(⁵ F)4d	e ⁶ H	13/2	366(5)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
44028.51	3d ³ 4s(⁵ F)4d	⁴ H	9/2	263(30)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
44189.954	3d ³ 4s(⁵ F)4d	e ⁶ H	15/2	433(11)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
44193.427	3d ³ 4s(⁵ F)4d	⁴ H	11/2	350(12)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
				356(3)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
44195.390	3d ³ 4s(⁵ F)4d	⁴ F	5/2	312(20)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				271(32)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
44327.214	3d ³ 4s(⁵ F)4d	f ⁶ G	13/2	503(9)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
44392.554	3d ³ 4s(⁵ F)4d	⁴ H	13/2	400(50)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
				399(15)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
44408.268	3d ³ 4s(⁵ F)4d	⁴ G	7/2	245(33)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
44554.214	3d ³ 4s(⁵ F)4d	⁴ G	9/2	420(60)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
				379(19)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
44555.3	3d ³ 4s5s	⁴ F	3/2	63(17)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
44652.682	3d ³ 4s5s	⁴ F	5/2	288(27)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
44746.714	3d ³ 4s(⁵ F)4d	⁴ G	11/2	457(30)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
				453(12)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
44869.444	3d ³ 4s5s	⁴ F	9/2	197(30)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
45747.235	3d ⁴ (⁵ D)6s	⁶ D	1/2	-512.4(2.4)		Palmeri ve diğ. (1997)
45788.691	3d ⁴ (⁵ D)6s	⁶ D	3/2	-48.0(1.5)		Palmeri ve diğ. (1997)
45858.647	3d ⁴ (⁵ D)6s	⁶ D	5/2	34.5(1.8)		Palmeri ve diğ. (1997)
45924.36	3d ⁴ (⁵ D)5d	⁴ D	1/2	783.1(2.1)		Palmeri ve diğ. (1997)
45956.173	3d ⁴ (⁵ D)6s	⁶ D	7/2	80.6(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
45990.235	3d ⁴ (⁵ D)6s	⁴ D	3/2	82.7(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
46078.826	3d ⁴ (⁵ D)6s	⁶ D	9/2	110.9(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
46094.037	3d ⁴ (⁵ D)6s	⁴ D	5/2	26.1(1.2)		Palmeri ve diğ. (1997)
46230.130	3d ⁴ (⁵ D)6s	⁴ D	7/2	41.1(6)		Cochrane ve diğ. (1998)

Tablo 2.2: ^{51}V elementinin tek pariteli ince yapı enerji seviyelerine ait literatürdeki deneysel çalışmalar ve sonuçları.

Enerji(cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	A (MHz)	B (MHz)	Referans
16361.489	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6G^\circ$	3/2	-27(2)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
16449.875	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6G^\circ$	5/2	289(6)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
16572.638	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6G^\circ$	7/2	390(4)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
16728.803	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6G^\circ$	9/2	432(2)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
16917.210	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6G^\circ$	11/2	455(2)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
17136.538	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6G^\circ$	13/2	466(2)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
18085.952	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6D^\circ$	1/2	938.5(4)		Gough ve diğ. (1985)
				939.94(25)		Cochrane ve diğ. (1998)
18120.104	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6F^\circ$	1/2	-351.14(24)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
18126.250	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6D^\circ$	3/2	595.9(5)	-2(5)	Gough ve diğ. (1985)
				594.7(1)	-4.4(1.1)	Cochrane ve diğ. (1998)
18174.074	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6F^\circ$	3/2	286.44(11)	-4.4(9)	Güzelçimen ve diğ. (2011)
18198.091	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6D^\circ$	5/2	537.8(4)	-15(7)	Gough ve diğ. (1985)
				537.44(9)	-4(14)	Cochrane ve diğ. (1998)
18258.855	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6F^\circ$	5/2	390.18(11)	-0.6(1.5)	Johann ve diğ. (1981)
18302.280	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6D^\circ$	7/2	514.5(3)	3(12)	Gough ve diğ. (1985)
				514.35(7)	-1.2(15)	Cochrane ve diğ. (1998)
18372.462	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6F^\circ$	7/2	435.95(7)	4.3(1.6)	El-Kashef ve Ludvig (1992)
18438.044	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6D^\circ$	9/2	503.5(2)	6(15)	Gough ve diğ. (1985)
				503.46(5)	3.3(1.7)	Cochrane ve diğ. (1998)
18513.403	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6F^\circ$	9/2	467.33(8)	10.9(2.0)	Güzelçimen ve diğ. (2014)
18680.070	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^6F^\circ$	11/2	495.53(5)	18.1(1.7)	Güzelçimen ve diğ. (2015)
				495.5(57)		Huiting ve diğ. (2022)
20606.467	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^4D^\circ$	1/2	-185.9(1.5)		Palmeri ve diğ. (1995)
				-179.874		Childs ve Goodman (1966)
				-196(14)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
				-185(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				-187.3(6)		Gü.Başar ve diğ. (2018)
20687.769	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^4D^\circ$	3/2	544.8(2)		Palmeri ve diğ. (1995)
				543.8(1)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
				545.9(8)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				543.95(14)	-2.9(3)	Gü.Başar ve diğ. (2018)
20828.481	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^4D^\circ$	5/2	611.1(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
				613.9(7)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
				599.58		Murakawa (1956)
				609.9(1.2)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				608.8(6)	1(10)	Gü.Başar ve diğ. (2018)
21032.503	$3d^3(^4F)4s4p(^3P^\circ)$	$z\ ^4D^\circ$	7/2	606.2(2)		Palmeri ve diğ. (1995)
				569.6		Murakawa (1956)
				605.3(4)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				607.3(2)	27(3)	Gü.Başar ve diğ. (2017)
				606.0(7)	-1(20)	Gü.Başar ve diğ. (2018)
				604.8(9)		Huiting ve diğ. (2022)

Tablo 2.2 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
21841.421	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ⁴ G°	5/2	133.5(3)		Palmeri ve diğ. (1995)
				135(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
21963.437	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ⁴ G°	7/2	326.8(2)		Palmeri ve diğ. (1995)
				328.2(1.6)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
22121.079	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ⁴ G°	9/2	408.2(3)		Palmeri ve diğ. (1995)
				410.1(1.4)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				409.6(4)		Huiting ve diğ. (2022)
22313.832	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ⁴ G°	11/2	448.7(1.2)		Palmeri ve diğ. (1995)
				419.71		Murakawa (1956)
				446.7(3)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
				449.1(1.0)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
23088.074	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ⁴ F°	3/2	44.1(9)		Palmeri ve diğ. (1995)
				59.96		Murakawa (1956)
				50(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				44(5)		Huiting ve diğ. (2022)
23210.560	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ⁴ F°	5/2	358.7(1.5)		Palmeri ve diğ. (1995)
				358(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
23353.135	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ⁴ F°	7/2	482.4(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
				481(7)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
23519.872	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ⁴ F°	9/2	524.6(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
				527(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
23608.765	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ² D°	3/2	626.2(9)		Palmeri ve diğ. (1995)
23935.112	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ² D°	5/2	-27.2(1.5)		Palmeri ve diğ. (1995)
24630.567	3d ⁴ (³ D)4s	² D	5/2	-8.2(1.2)		Palmeri ve diğ. (1997)
24643.528	3d ⁴ (³ D)4s	² D	3/2	591.5(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
24648.114	3d ⁴ (⁵ D)4p	z ⁶ P°	3/2	-100.1(3)		Palmeri ve diğ. (1995)
				-103(4)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				-109(24)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
24727.841	3d ⁴ (⁵ D)4p	z ⁶ P°	5/2	29.02(12)		Palmeri ve diğ. (1995)
				26.3(10)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
24770.673	3d ⁴ (⁵ D)4p	z ⁴ P°	1/2	-795(5)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
24789.401	3d4(5D)4p	y ⁶ F°	1/2	837(18)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				832(8)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
24838.578	3d4(5D)4p	z ⁶ P°	7/2	106.36(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
				104.2(10)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
24830.221	3d4(5D)4p	y ⁶ F°	3/2	202(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				208(8)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
24898.804	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁶ F°	5/2	104(2)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
24915.151	3d ⁴ (⁵ D)4p	z ⁴ P°	3/2	-287.7(8)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
24992.909	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁶ F°	7/2	75.8(8)		Güzelçimen ve diğ. (2014)

Tablo 2.2 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	J	A (MHz)	B (MHz)	Referans
25111.473	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁶ F°	9/2	64.8(19) 62(11)		Güzelçimen ve diğ. (2014) Gü.Başar ve diğ. (2017)
25131.002	3d ⁴ (⁵ D)4p	z ⁴ P°	5/2	-88.9(4)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
25253.457	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁶ F°	11/2	63(9) 60(12)		Güzelçimen ve diğ. (2014) Gü.Başar ve diğ. (2017)
25930.544	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁴ F°	3/2	634.4(1.2) 631(10) 628(3)		Palmeri ve diğ. (1995) Güzelçimen ve diğ. (2014) Gü.Başar ve diğ. (2017)
26004.234	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁴ F°	5/2	215.9(6)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
26021.907	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ² G°	7/2	431.6(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
26122.094	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁴ F°	7/2	174.8(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
26171.918	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁴ F°	9/2	89.0(12) 85.2(2.1) 84(10)		Palmeri ve diğ. (1995) Murakawa (1956) Güzelçimen ve diğ. (2014)
26182.637	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁴ D°	1/2	1100(3) 1104(3) 1110(25)		Palmeri ve diğ. (1995) Güzelçimen ve diğ. (2014) Gü.Başar ve diğ. (2017)
26249.476	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁴ D°	3/2	141(2) 136.8(7)		Palmeri ve diğ. (1995) Palmeri ve diğ. (1995)
26344.902	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ² G°	9/2	94.6(1.5)		Palmeri ve diğ. (1995)
26352.634	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁴ D°	5/2	15.3(9) 15.0(2)		Palmeri ve diğ. (1995) Güzelçimen ve diğ. (2014)
26397.633	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁶ D°	1/2	-508(5)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
26437.754	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁶ D°	3/2	-57.3(1.7)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
26480.286	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁴ D°	7/2	-17.1(6) -19(3)		Palmeri ve diğ. (1995) Güzelçimen ve diğ. (2014)
26505.953	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁶ D°	5/2	18.8(4)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
26604.807	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁶ D°	7/2	58.0(9)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
26738.323	3d ⁴ (⁵ D)4p	y ⁶ D°	9/2	96.3(5)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
27187.747	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ² F°	5/2	586.7(6) 595.4(2)		Palmeri ve diğ. (1995) Sobolewski ve diğ. (2019)
27470.790	3d ³ (⁴ F)4s4p(³ P°)	z ² F°	7/2	62.8(3)		Palmeri ve diğ. (1995)
28313.626	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	x ⁶ D°	1/2	984(10)		Huiting ve diğ. (2022)
28368.753	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	x ⁶ D°	3/2	675(6)		Holmes ve diğ. (2016)
28462.177	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	x ⁶ Do	5/2	595.5(7)		Huiting ve diğ. (2022)
28595.637	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	x ⁶ Do	7/2	533.8(5)		Huiting ve diğ. (2022)
28768.142	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	x ⁶ D°	9/2	476(6)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
29202.790	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	y ⁶ P°	3/2	539.7(9)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
29296.430	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	y ⁶ P°	5/2	393.0(1.2)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
29418.119	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	y ⁶ P°	7/2	444.8(1.3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)

Tablo 2.2 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
30021.627	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	y ⁴ P°	1/2	1399(16)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
30094.585	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	y ⁴ P°	3/2	686.5(4)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
30120.823	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	y ⁴ P°	5/2	697(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
30635.580	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	y ⁴ G°	5/2	5(1) -2(10)	-5(3)	Murakawa (1956) Güzelçimen ve diğ. (2015)
30694.344	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	y ⁴ G°	7/2	318(2) 323(4)	-34(15)	Murakawa (1956) Güzelçimen ve diğ. (2015)
30771.732	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	y ⁴ G°	9/2	471(3) 472(3)	23(10)	Murakawa (1956) Güzelçimen ve diğ. (2015)
30832.661	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	z ⁶ S°	5/2	727(9)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
30864.279	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	y ⁴ G°	11/2	559(5) 562(4)	-5(8)	Murakawa (1956) Güzelçimen ve diğ. (2015)
31200.152	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	x ⁴ F°	3/2	-54.0(6)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
31229.014	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	x ⁴ F°	5/2	411.3(9) 416.7(3)		Palmeri ve diğ. (1995) Murakawa (1956)
31268.091	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	x ⁴ F°	7/2	562.4(6) 560.61		Palmeri ve diğ. (1995) Murakawa (1956)
31317.440	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	x ⁴ F°	9/2	609.4(1.8)		Palmeri ve diğ. (1995)
31397.822	3d ³ 4s4p	x ⁴ G°	5/2	605(30)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
31541.167	3d ³ 4s4p	x ⁴ G°	7/2	297(25)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
31721.78	3d ³ 4s4p	x ⁴ G°	9/2	163(3)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
31786.207	3d ³ (² P)4s4p(³ P°)	² S°	1/2	1022.3(6) 1018.5(8)		Lefèbvre ve diğ. (2002) Gü.Başar ve diğ. (2017)
31937.131	3d ³ 4s4p	x ⁴ G°	11/2	75(9)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
31962.265	3d ⁴ (a ³ P)4p	y ² S°	1/2	845.4(6) 854(12)		Lefèbvre ve diğ. (2002) Gü.Başar ve diğ. (2017)
32348.987	3d ³ (² P)4s4p(³ P°)	x ⁴ D°	1/2	396(30) 130(16)		Güzelçimen ve diğ. (2015) Gü.Başar ve diğ. (2017)
32456.581	3d ³ (² P)4s4p(³ P°)	x ⁴ D°	3/2	382(13)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
32660.416	3d ³ (² P)4s4p(³ P°)	x ⁴ D°	5/2	512.6(9)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
32692.042	3d ³ (² H)4s4p(³ P°)	z ⁴ H°	7/2	107.9(6)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
32724.801	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	z ² P°	1/2	536.6(9)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
32738.130	3d ³ (⁴ F)4s4p(¹ P°)	w ⁴ F°	3/2	687(7)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
32767.911	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	z ² P°	3/2	-21.0(9)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
32788.181	3d ³ (² H)4s4p(³ P°)	z ⁴ H°	9/2	347.8(3)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
32846.822	3d ³ (⁴ F)4s4p(¹ P°)	w ⁴ F°	5/2	261.5(1.8)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
32891.013	3d3(2P)4s4p(3P°)	x 4D°	7/2	502(8) 487(11)		Güzelçimen ve diğ. (2015) Gü.Başar ve diğ. (2017)
32897.898	3d3(2H)4s4p(3P°)	z 4H°	11/2	398.3(10)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
32963.924	3d3(2H)4s4p(3P°)	z 4H°	13/2	475(2)		Güzelçimen ve diğ. (2015)

Tablo 2.2 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
32988.845	3d ³ (⁴ F)4s4p(¹ P°)	w ⁴ F°	7/2	106(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
33155.331	3d ³ (⁴ F)4s4p(¹ P°)	w ⁴ F°	9/2	10.1(6)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
33306.943	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	y ² G°	9/2	573.8(2.1)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
				571(2)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
33360.280	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	y ² G°	7/2	203.6(1.5)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
33481.426	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	y ² F°	7/2	518.0(1.5)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
				522(3)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
33527.589	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	y ² F°	5/2	-0.2(1)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
				-3(57)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
33640.280	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	z ² H°	9/2	99.5(1.2)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
				98(12)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
33695.327	3d ³ (² G)4s4p(³ P°)	z ² H°	11/2	581.9(9)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
				582(5)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
33966.834	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	w ⁴ D°	1/2	653.8(2.4)		Palmeri ve diğ. (1995)
33976.069	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	w ⁴ D°	3/2	9.3(1.2)		Palmeri ve diğ. (1995)
34030.063	3d ³ (² P)4s4p(³ P°)	² D°	3/2	223(18)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
34065.731	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	w ⁴ D°	5/2	360.4(3)		Palmeri ve diğ. (1995)
34127.931	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	w ⁴ D°	7/2	456.3(3)		Palmeri ve diğ. (1995)
34167.882	3d ³ (² P)4s4p(³ P°)	² D°	5/2	512.6(2.1)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
34374.872	3d ³ (a ² D)4s4p(³ P°)	⁴ F°	7/2	477.6(1.8)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
34428.773	3d ³ (a ² D)4s4p(³ P°)	⁴ F°	3/2	-137.9(1.2)		Güzelçimen ve diğ. (2011)
34477.427	3d ³ (⁴ F)4s4p(¹ P°)	v ⁴ D°	1/2	205(38)		Huiting ve diğ. (2022)
34486.787	3d ³ (a ² D)4s4p(³ P°)	⁴ F°	5/2	638.9(2.1)		Johann ve diğ. (1981)
34529.821	3d ³ (a ² D)4s4p(³ P°)	⁴ F°	9/2	600.5(6)		El-Kashef ve Ludvig (1992)
34537.299	3d ³ (⁴ F)4s4p(¹ P°)	v ⁴ D°	3/2	311.4(1.5)		Palmeri ve diğ. (1995)
34619.598	3d ³ (⁴ F)4s4p(¹ P°)	v ⁴ D°	5/2	309.1(3)		Palmeri ve diğ. (1995)
34747.128	3d ³ (⁴ F)4s4p(¹ P°)	v ⁴ D°	7/2	195.5(3)		Palmeri ve diğ. (1997)
35013.259	3d ³ (² D)4s4p(³ P°)	u ⁴ D°	1/2	-307(13)		Huiting ve diğ. (2022)
35092.518	3d ³ (² D)4s4p(³ P°)	u ⁴ D°	3/2	443(16)		Huiting ve diğ. (2022)
35379.307	3d ³ (² D)4s4p(³ P°)	u ⁴ D°	7/2	639.7(7)		Huiting ve diğ. (2022)
36408.402	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	y ⁴ S°	3/2	699(8)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
36461.282	3d ⁴ (a ³ F)4p	² G°	7/2	417(24)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
36538.569	3d ⁴ (a ³ F)4p	² G°	9/2	231.1(1.9)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
36580.427	3d ⁴ (a ³ P)4p	² P°	3/2	835(18)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
36611.845	3d ³ (a ² D)4s4p(³ P°)	x ⁴ P°	5/2	732(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
36695.612	3d ³ (² D)4s4p(³ P°)	x ⁴ P°	1/2	1308(31)		Huiting ve diğ. (2022)
36700.768	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	x ² D°	5/2	287(50)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
				181(11)		Gü.Başar ve diğ. (2017)

Tablo 2.2 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	J	A (MHz)	B (MHz)	Referans
36780.091	3d ³ (⁴ P)4s4p(³ P°)	x ² D°	3/2	116(30) 557(12) 558.7(6)		Güzelçimen ve diğ. (2015) Gü.Başar ve diğ. (2017) Sobolewski ve diğ. (2020)
36814.827	3d ³ (a ² D)4s4p(³ P°)	x ⁴ P°	3/2	933(16)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
36822.878	3d ³ (² H)4s4p(³ P°)	w ⁴ G°	7/2	352(24)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
36863.773	3d ³ (² H)4s4p(³ P°)	w ⁴ G°	5/2	283(3) 261(12)		Güzelçimen ve diğ. (2014) Gü.Başar ve diğ. (2017)
36897.961	3d ³ (² H)4s4p(³ P°)	w ⁴ G°	9/2	396(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
36925.893	3d ⁴ (a ³ F)4p	x ² F°	5/2	273(16)		Gü.Başar ve diğ. (2017)
36938.443	3d ³ (² H)4s4p(³ P°)	w ⁴ G°	11/2	469(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
37174.691	3d ⁴ (³ H)4p	v ² G°	7/2	449.7(6) 443(16)		Lefèbvre ve diğ. (2002) Gü.Başar ve diğ. (2017)
37180.946	3d ³ (² H)4s4p(³ P°)	y ² H°	9/2	305(30)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
37210.818	3d ³ (² H)4s4p(³ P°)	y ² H°	11/2	436.4(1)		Sobolewski ve diğ. (2019)
37285.057	3d ⁴ (³ H)4p	z ⁴ I°	9/2	229(14) 232.9(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014) Sobolewski ve diğ. (2019)
37315.932	3d ⁴ (³ H)4p	z ⁴ I°	11/2	118(4)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
37342.555	3d ³ (a ² D)4s4p(³ P°)	w ² F°	5/2	62(5) 55(11)		Güzelçimen ve diğ. (2014) Gü.Başar ve diğ. (2017)
37361.951	3d ⁴ (³ H)4p	v ² G°	9/2	73(30) 306(17) 297.1(12)		Güzelçimen ve diğ. (2014) Gü.Başar ve diğ. (2017) Sobolewski ve diğ. (2019)
37404.329	3d ⁴ (³ H)4p	z ⁴ I°	13/2	218(5)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
37457.576	3d ⁴ (a ³ F)4p	w ² D°	3/2	528(10) 531(16)		Güzelçimen ve diğ. (2014) Gü.Başar ve diğ. (2017)
37475.102	3d ³ (a ² D)4s4p(³ P°)	w ² F°	7/2	456(7) 456.9(4)		Güzelçimen ve diğ. (2014) Gü.Başar ve diğ. (2017)
37498.808	3d ⁴ (a ³ F)4p	v ⁴ G°	5/2	326(8)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
37518.445	3d ⁴ (³ H)4p	z ⁴ I°	15/2	184(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
37530.314	3d ⁴ (³ H)4p	z ² I°	11/2	210.2(1.2)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
37556.034	3d ⁴ (a ³ F)4p	v ⁴ G°	7/2	322(20)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
37606.365	3d ⁴ (³ H)4p	z ² I°	13/2	375.9(6)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
37644.487	3d ⁴ (a ³ F)4p	v ⁴ G°	9/2	281(6)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
37757.309	3d ⁴ (³ P)4p	t ⁴ D°	1/2	531(5)		Huiting ve diğ. (2022)
37752.595	3d ⁴ (a ³ F)4p	w ² D°	5/2	120(15) 127(23)		Güzelçimen ve diğ. (2014) Gü.Başar ve diğ. (2017)
37764.923	3d ⁴ (a ³ F)4p	v ⁴ G°	11/2	246(25)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
37766.041	3d ⁴ (a ³ F)4p	x ² F°	5/2	273(16)		Lefèbvre ve diğ. (2002)
37835.065	3d ⁴ (a ³ P)4p	t ⁴ D°	3/2	213(30) 179(24)		Lawler ve diğ. (2014) Güzelçimen ve diğ. (2015)
37959.695	3d ⁴ (³ P)4p	t ⁴ D°	5/2	148(7)		Huiting ve diğ. (2022)

Tablo 2.2 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
38115.684	3d ⁴ (a ³ P)4p	t ⁴ D°	7/2	144(30)		Lawler ve diğ. (2014)
				148(20)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
38123.795	3d ⁴ (³ H)4p	x ² H°	9/2	300(30)		Lawler ve diğ. (2014)
				305(9)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
38220.663	3d ⁴ (³ H)4p	x ² H°	11/2	304(2)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
38245.829	3d ⁴ (³ H)4p	x ⁴ H°	7/2	312(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
38323.924	3d ⁴ (³ H)4p	x ⁴ H°	9/2	257(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
38405.067	3d ⁴ (³ H)4p	x ⁴ H°	11/2	254(14)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
38483.045	3d ⁴ (³ H)4p	x ⁴ H°	13/2	268(14)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
38529.830	3d ⁴ (² H)4s4p(³ P°)	u ² G°	9/2	614.6(3)		Huiting ve diğ. (2022)
38610.899	3d ⁴ (² H)4s4p(³ P°)	u ² G°	7/2	65(4)		Huiting ve diğ. (2022)
39008.669	3d ³ (² H)4s4p(³ P°)	y ² I°	11/2	223.5(6)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
39081.270	3d ³ (² H)4s4p(³ P°)	y ² I°	13/2	372.9(14)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
39248.928	3d ⁴ (³ P)4p	w ⁴ P°	3/2	72(13)		Huiting ve diğ. (2022)
39266.680	3d ⁴ (a ³ F)4p	u ⁴ F°	3/2	271(10)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
39300.537	3d ⁴ (a ³ F)4p	u ⁴ F°	5/2	320(60)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
39341.784	3d ⁴ (a ³ F)4p	u ⁴ F°	7/2	273(12)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
39391.079	3d ⁴ (a ³ F)4p	u ⁴ F°	9/2	351(8)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
39422.745	3d ⁴ (³ P)4p	w ⁴ P°	5/2	105.9(44)		Huiting ve diğ. (2022)
39847.344	3d ⁴ (³ P)4p	x ⁴ S°	3/2	184(9)		Huiting ve diğ. (2022)
39877.786	3d ⁴ (³ F)4p	s ⁴ D°	1/2	681(3)		Huiting ve diğ. (2022)
39884.540	3d ⁴ (³ P)4p	² D	3/2	355(15)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
39935.176	3d ⁴ (a ³ F)4p	s ⁴ D°	3/2	360(30)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
39962.150	3d ⁴ (³ H)4p	u ⁴ G°	5/2	368(24)		Lawler ve diğ. (2014)
39999.966	3d ⁴ (³ F)4p	s ⁴ D°	5/2	243(10)		Huiting ve diğ. (2022)
40001.190	3d ⁴ (³ H)4p	u ⁴ G°	7/2	329(26)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
40038.970	3d ⁴ (³ H)4p	u ⁴ G°	9/2	253(2)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
40063.874	3d ⁴ (³ H)4p	u ⁴ G°	11/2	248(6)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
40119.218	3d ⁴ (a ³ P)4p	v ² D°	5/2	387(8)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
40314.882	3d ⁴ (³ G)4p	w ⁴ H°	7/2	372(10)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
40325.790	3d ⁴ (³ G)4p	² F°	5/2	550.4(8)		Sobolewski ve diğ. (2019)
40378.812	3d ⁴ (³ G)4p	w ⁴ H°	9/2	267(6)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
40388.941	3d ³ (² D)4s4p(³ P°)	² D°	3/2	-145(4)		Huiting ve diğ. (2022)
40452.466	3d ⁴ (³ G)4p	w ⁴ H°	11/2	216(25)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
40535.729	3d ⁴ (³ G)4p	w ⁴ H°	13/2	185(16)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
				184.3(3)		Huiting ve diğ. (2022)
40553.222	3d ³ (² D)4s4p(³ P°)	² D°	5/2	375(6)		Huiting ve diğ. (2022)
40587.356	3d ⁴ (³ G)4p	² F°	7/2	31(6)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
				265.5(46)		Sobolewski ve diğ. (2019)
40693.787	3d ³ (² P)4s4p(³ P°)	w ² P°	3/2	780(4)		Huiting ve diğ. (2022)

Tablo 2.2 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
41389.644	3d ⁴ (³ G)4p	t ⁴ F°	3/2	410(6)		Huiting ve diğ. (2022)
41501.449	3d ³ (² G)4s4p(¹ P°)	v ² H°	9/2	287(3)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
41659.672	3d ³ (² G)4s4p(¹ P°)	v ² H°	11/2	-51.1(8)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
41751.931	3d ³ (⁴ P)4s4p(¹ P°)	v ⁴ P°	1/2	-805.5(1.8)		Palmeri ve diğ. (1995)
41758.357	3d ⁴ (³ G)4p	t ⁴ G°	7/2	269(30)		Güzelçimen ve diğ. (2015)
41848.708	3d ³ (⁴ P)4s4p(¹ P°)	v ⁴ P°	3/2	-203.6(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
41860.647	3d ⁴ (³ G)4p	t ⁴ G°	9/2	266.2(3)		Palmeri ve diğ. (1995)
41918.255	3d ⁴ (³ G)4p	t ⁴ G°	11/2	262.3(3)		Palmeri ve diğ. (1995)
				264(2)		Güzelçimen ve diğ. (2014)
41928.473	3d ³ (⁴ P)4s4p(¹ P°)	r ⁴ D°	1/2	927(48)		Huiting ve diğ. (2022)
41950.393	3d ⁴ (³ D)4p	u ² F°	5/2	399.2(4)		Sobolewski ve diğ. (2019)
42009.912	3d ³ (⁴ P)4s4p(¹ P°)	v ⁴ P°	5/2	-21.5(1.5)		Palmeri ve diğ. (1995)
42020.903	3d ⁴ (³ D)4p	u ² F°	7/2	203.2(2)		Sobolewski ve diğ. (2019)
42090.740	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ F°	1/2	855(18)		Palmeri ve diğ. (1997)
42120.696	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ F°	3/2	126.2(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
42172.123	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ F°	5/2	29.6(2.7)		Palmeri ve diğ. (1997)
42236.621	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ F°	7/2	12.5(1.8)		Palmeri ve diğ. (1997)
42330.730	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ F°	9/2	7.9(2.1)		Palmeri ve diğ. (1997)
42404.289	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ D°	3/2	-512.6(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
42440.633	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ F°	11/2	21.7(1.8)		Palmeri ve diğ. (1997)
42442.521	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ D°	1/2	-849.0(2.4)		Palmeri ve diğ. (1997)
42480.002	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ D°	5/2	-214.1(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
42495.742	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ P°	3/2	-180.5(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
42577.351	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ P°	5/2	-44.7(3)		Palmeri ve diğ. (1997)
42587.041	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ D°	7/2	-91.5(2.1)		Palmeri ve diğ. (1997)
42680.399	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ P°	7/2	22.0(1.5)		Palmeri ve diğ. (1997)
42696.136	3d ³ (⁴ P)4s4p(¹ P°)	w ⁴ S°	3/2	-687(50)		Huiting ve diğ. (2022)
42724.909	3d ⁴ (⁵ D)5p	⁶ D°	9/2	0.14(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
42981.696	3d ⁴ (⁵ D)5p	s ⁴ F°	3/2	423(9)		Palmeri ve diğ. (1995)
43051.577	3d ⁴ (⁵ D)5p	s ⁴ F°	5/2	197.8(2.1)		Palmeri ve diğ. (1995)
43147.306	3d ⁴ (⁵ D)5p	s ⁴ F°	7/2	134.6(2.4)		Palmeri ve diğ. (1995)
43249.527	3d ⁴ (⁵ D)5p	q ⁴ D°	1/2	495.0(2.4)		Palmeri ve diğ. (1995)
43266.336	3d ⁴ (⁵ D)5p	s ⁴ F°	9/2	118(27)		Palmeri ve diğ. (1995)
43309.081	3d ⁴ (⁵ D)5p	q ⁴ D°	3/2	187.4(1.5)		Palmeri ve diğ. (1997)
43331.784	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ G°	3/2	-316.0(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
43393.955	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ G°	5/2	184.4(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
43410.983	3d ⁴ (⁵ D)5p	q ⁴ D°	5/2	159.2(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
43443.562	3d ⁴ (⁵ D)5p	u ⁴ P°	1/2	-947.4(3)		Palmeri ve diğ. (1995)
43483.426	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ G°	7/2	355.3(3)		Palmeri ve diğ. (1997)
43504.252	3d ⁴ (⁵ D)5p	u ⁴ P°	3/2	195.2(1.5)		Palmeri ve diğ. (1995)

Tablo 2.2 (devamı):

Enerji(cm ⁻¹)	Konfigürasyon	Terim	<i>J</i>	<i>A</i> (MHz)	<i>B</i> (MHz)	Referans
43555.331	3d ⁴ (⁵ D)5p	q ⁴ D°	7/2	171.8(9)		Palmeri ve diğ. (1995)
43585.786	3d ⁴ (⁵ D)5p	u ⁴ P°	5/2	45.6(6)		Palmeri ve diğ. (1995)
43598.530	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ G°	9/2	432.1(2.1)		Palmeri ve diğ. (1997)
43637.752	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ F°	1/2	-599.6(1.5)		Palmeri ve diğ. (1997)
43674.287	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ F°	3/2	327.7(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
43708.411	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ D°	1/2	1407.4(2.1)		Palmeri ve diğ. (1997)
43739.743	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ G°	11/2	472.9(1.5)		Palmeri ve diğ. (1997)
43744.445	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ F°	5/2	471.3(1.8)		Palmeri ve diğ. (1997)
43779.227	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ D°	3/2	818.7(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
43849.242	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ F°	7/2	518.4(3)		Palmeri ve diğ. (1997)
43875.329	3d ⁴ (¹ G)4p	t ² F°	5/2	451.3(28)		Huiting ve diğ. (2022)
43886.617	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ D°	5/2	692.5(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
43906.772	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ G°	13/2	500.4(9)		Palmeri ve diğ. (1997)
43988.360	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ F°	9/2	542.3(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
44026.568	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ D°	7/2	682.6(3)		Palmeri ve diğ. (1997)
44164.337	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ F°	11/2	571.8(1.8)		Palmeri ve diğ. (1997)
44202.759	3d ³ (⁴ F)4s5p	⁶ D°	9/2	587.3(6)		Palmeri ve diğ. (1997)
44327.214	3d ³ 4s(⁵ F)4d	f ⁶ G	13/2	503(9)		Güznelçimen ve diğ.(2011)
44452.993	3d ⁴ (¹ I)4p	² I°	13/2	257.0(14)		Huiting ve diğ. (2022)
44453.686	3d ⁴ (¹ I)4p	² I°	11/2	303.0(20)		Huiting ve diğ. (2022)
44463.265	3d ⁴ (¹ G)4p	s ² G°	9/2	255.2(13)		Huiting ve diğ. (2022)
44554.607	3d ⁴ (³ D)4p	p ⁴ D°	3/2	331.6(1.8)		Palmeri ve diğ. (1995)
44616.946	3d ⁴ (³ D)4p	p ⁴ D°	5/2	332.2(9)		Palmeri ve diğ. (1995)
44701.133	3d ⁴ (³ D)4p	p ⁴ D°	7/2	331.7(53)		Huiting ve diğ. (2022)
44973.473	3d ³ 4s(⁵ F)5p	⁴ G°	5/2	346(15)		Huiting ve diğ. (2022)
45237.169	3d ³ (⁴ F)4s5p	q ⁴ F°	9/2	427.8(23)		Huiting ve diğ. (2022)
45575.494	45575o	² D°	3/2	416(18)		Huiting ve diğ. (2022)
45648.952	3d ³ (² F)4s4p(³ P)	p ⁴ F°	3/2	280(35)		Huiting ve diğ. (2022)
45654.368	45654o	² D°	5/2	254(8)		Huiting ve diğ. (2022)
45688.309	3d ³ (² F)4s4p(³ P)	p ⁴ F°	5/2	211(21)		Huiting ve diğ. (2022)
46563.073	3d ³ (² F)4s4p(³ P)	⁴ D°	7/2	602(15)		Huiting ve diğ. (2022)
49978.178	3d ³ (² H)4s4p(¹ P)	x ² I°	11/2	278.4(17)		Huiting ve diğ. (2022)
50120.884	3d ³ (² H)4s4p(¹ P)	x ² I°	13/2	282(8)		Huiting ve diğ. (2022)
52947.956	52947o	p ² G°	9/2	483.9(2)		Huiting ve diğ. (2022)

2.2. ATOMİK YAPI

Atomik yapının doğru anlaşılması için elektromanyetik radyasyonların madde ile etkileşimini incelemek gereklidir. Atomların yapısı hakkındaki bilgilerimizin büyük bir kısmı spektroskopik yöntemlerle elde edilen bilgilere dayanmaktadır. Spektroskopik yöntemlerde genel olarak, atomların mümkün enerji seviyeleri arasında geçiş yaptığında yayınlanan ve/veya soğurulan elektromanyetik ışımaya ölçülür ve yorumlanır. Spektroskopinin modern çağında atomik yapıların doğru anlaşılması için kuantum mekaniği vazgeçilmezdir. Kuantum mekaniği, esas olarak Schrödinger'e atfedilir ancak de Broglie, Heisenberg, Dirac ve diğer birçok bilim insanının çalışmaları da aynı derecede önemlidir. Max Planck'ın "kuanta" olarak adlandırılan enerji paketleri fikri, Rutherford'un yaptığı deneyler sonucu ortaya koyduğu atomun çekirdek modeli ve Bohr'un sabit enerji yörüngeleri varsayımı, atom yapısının doğru anlaşılmasının temelini oluşturur.

Kuantum mekaniğinde bir atomun enerji yapısını açıklamak için Schrödinger denkleminin kullanılır. Tek elektronlu sistemler, kuantum mekaniksel olarak incelenecek en basit atomlardır ve valans yörüngesinde bir elektronun bulunur. Hidrojen, bir elektronun bir protonun küresel simetrik Coulomb potansiyelinin etkisi altında hareket ettiği bu kategorinin ilk elementidir. Diğer tek elektron sistemleri iyonik formdadırlar, He^+ , Li^{++} , vb. örnek olarak verilebilir. Bu sistemlerde de valans yörüngesinde bir tek elektron mevcuttur ancak çekirdekte birden fazla proton vardır. Schrödinger denklemi sadece tek elektronlu sistemler için tam olarak çözülebilir ve diğer çok elektronlu sistemlerin çözümü için bazı yaklaşımların yapılması gerekir. Tek elektronlu sistemlerinin daha iyi anlaşılması için (2.1) ile verilen Schrödinger denklemini uygulayınız.

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right)\Psi = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi \quad (2.1)$$

Bu denklem $\Psi(\mathbf{r}, t)$ potansiyel enerjisine sahip m kütleli bir parçacığı tanımlayan $\Psi(\mathbf{r}, t)$ dalga fonksiyonunun zaman içerisindeki değişimini verir. $\Psi(\mathbf{r}, t)$ parçacığın tüm uzayda bir yerde bulunma olasılığını bulmak için kullanılır. t anında $d^3\mathbf{r}$ sonsuz küçük hacim elemanında parçacığın bulunma olasılığı $|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 d^3\mathbf{r}$ 'dir. Parçacık bir yerde bulunmak zorunda olduğundan tüm uzay üzerinden $|\Psi|^2$ 'nin integrali 1 olmalıdır. Bu dalga fonksiyonun

“normlanmıştır” olduğunu ifade eder. V zamana bağlı değil ise, eşitlik (2.2) de verildiği gibi denklem, değişkenlerine ayırma yöntemiyle çözülebilir.

$$\Psi(r, t) = \psi(r)e^{-iEt/\hbar} \quad (2.2)$$

Burada ψ zamandan bağımsız Schrödinger denklemini sağlar:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right)\psi = E\psi \quad (2.3)$$

Denklemden soldaki işlemci Hamiltonyendir ve sistemin toplam enerjisini ifade eder. ψ ise dalga fonksiyonu veya özdeğer fonksiyonudur ve denkleme özdeğer denklemi denir. Schrödinger denkleminin çözümü ile enerji değerleri bulunur. Denklemi çözerken E 'nin sadece belirli özel değerleri aldığında çözümlerin mümkün olduğu görülmüştür. E 'nin bazı değerlerinde normlanamayan dalga fonksiyonları elde edilir fakat fiziksel olarak böyle bir durum mümkün olamaz. Kuantum mekaniğinde bağlı bir durum her enerji değerine sahip olamaz, yani enerji sadece izinli olan değerleri alabilir. Bizim için önemli olan da bu izinli enerji seviyelerinin spektrumlarıdır. Schrödinger denkleminin çözümü aşağıdaki (2.4) eşitliği ile verilir:

$$E_n = -\frac{m}{2\hbar^2} \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{1}{n^2} \quad (2.4)$$

Atomik sistemlerde elektrona ait bir dalga fonksiyonu kuantum sayılarıyla etiketlenmiştir. Bu sayılar n, l, m, m_s şeklindeki bir sayı seti şeklindedir. Durumun enerjisini belirleyen ve pozitif bir tam sayı değerini alabilen n baş kuantum sayısıdır. l , yörüngesel açısal momentumu belirleyen 0'dan $n-1$ 'e kadar değer alabilen bir tamsayıdır. m_l , açısal momentumun z bileşenini veren ve $-l$ ile $+l$ arasında değer alabilen bir tamsayıdır. m_s , spin manyetik açısal momentum kuantum sayısıdır ve mümkün iki değeri vardır ($\pm 1/2$). Her n için, n tane farklı l değeri vardır. Yani aynı baş kuantum sayısını paylaşan farklı durumlar mevcuttur. Bu durumlara n .enerji seviyesinin dejenereliği denir. Pauli dışarlama ilkesine göre, bir elektronun enerji seviyesinin belirlenmesinde kullanılan kuantum sayılarının tümü bir atomdaki iki elektron için aynı olamaz. Yani bu sayı setleri her elektron için farklı olmalıdır.

Elektron sayısı arttıkça, elektronların kendi aralarındaki etkileşimler nedeniyle sistem giderek daha karmaşık hale gelir. Bu nedenle, tüm sistemin Hamiltoniyeni değiştirilmelidir ve izin

verilen enerjilerin belirlenebilmesi için bazı düzeltme terimleri eklenmelidir. N elektrona sahip bir sistem için Hamiltonyen (2.5) eşitliği ile verilebilir:

$$H = \sum_{i=1}^N \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 - \frac{Ze^2}{(4\pi\epsilon_0)r_i} \right) + \sum_{i>j=1}^N \frac{e^2}{(4\pi\epsilon_0)r_{ij}} + \sum_{i=1}^N \xi_i \vec{S}_i \cdot \vec{L}_i + a \vec{\mu}_i \cdot \vec{\mu}_j + \dots \quad (2.5)$$

Elektronlar-çekirdek elektrostatik etkileşimini veren ilk terime ek olarak, elektronlar arasındaki Coulomb etkileşim terimi ve üçüncü bir terim olarak spin-yörünge etkileşim terimi ve son terim olarak da aşırı ince yapı terimi eklenebilir. Ayrıca daha yüksek mertebeden düzeltme terimleri de eklenebilir.

2.3. İNCE YAPI ENERJİ SEVİYELERİNDEKİ YARILMALAR

Pozitif yüklü çekirdek ile elektronlar arasındaki Coulomb etkileşimi, çekirdek etrafındaki elektronların radyal olasılık yoğunluğunu belirler ve enerji seviyelerini tanımlar. Elektronların kendi aralarında ve ayrıca elektron dönüşü ve elektronun yörünge açısal momentumu ile ilişkili manyetik momentler arasındaki elektrik etkileşimi, ince yapı enerji seviyeleri ortaya çıkar. Spin-yörünge etkileşimi, elektron(lar)ın spin ve yörünge hareketi arasındaki zayıf bir manyetik eşleşmeyi, yani dönen elektronlar tarafından üretilen içsel manyetik alan ile çekirdeğin etrafındaki yörüngedeki elektronlar tarafından oluşturulan manyetik alan arasındaki etkileşimi tanımlar. İnce yapının varlığı, elektronların spin hareketinin ilk kanıtlarından biridir.

Bir elektron, atom içerisindeki yörüngesel hareketinden dolayı dairesel bir elektrik akıma eşdeğer bir akım oluşturur ve bu akım sebebiyle bir manyetik dipol moment oluşturur. Çok elektronlu sistemlerde toplam yörünge açısal momentumu, vektörel olarak yörünge açısal momentumlarının toplamıyla $\vec{L} = \sum_{i=1}^N \vec{L}_i$, ve elektronun toplam spin açısal momentumu da spin açısal momentumlarının vektörel olarak toplanmasıyla bulunur, $\vec{S} = \sum_{i=1}^N \vec{S}_i$.

Elektronun manyetik momentlerinin çiftlenimi sebebiyle, yörünge ve spin açısal momentumlarının vektörel olarak toplanmasıyla ise elektronun toplam açısal momentumu elde edilir, $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$.

Elektronların oluşturduğu iç manyetik alan Paschen-Back bölgesinde ise, spin-yörünge etkileşmesi bozularak elektronlara ait her bir spin ve yörünge açısal momentumları tek tek

birleşerek toplam açısal momentumu oluşturur. Her elektronun toplam açısal momentumları da birleşerek atomun toplam açısal momentumunu oluşturur. Bu etkileşmeye *JJ* çiftlenimi denir.

Hafif atomlarda *LS* çiftlenimi, ağır atomlarda ise *JJ* çiftlenimi gözlenir.

Atomun en dış kabuklarında bulunan valans elektronlar arasındaki etkileşme spin-yörünge etkileşmesine sebep olur. Valans elektronlar yarı dolu kabuklarda bulunan elektronlardır. Bu elektronların özelliği dışarıdan bir uyarma yapıldığında başka enerji düzeyine geçebilmesidir.

Valans elektrona sahip bir atom uyarıldığında, bir üst enerji seviyesinden (E_u) bir alt enerji seviyesine (E_a) geçiş yapabilir. Bu geçiş sırasında dışarıya bir foton yayınlanır. Bu fotonun enerjisi geçişin olduğu seviyelerin enerji farkına eşit, ν frekansına sahiptir.

$$\Delta E = E_u - E_a = h\nu \quad (2.6)$$

Enerji ifadesini cm^{-1} cinsinden ifade etmek istersek, ν frekansıyla σ dalga sayısı arasındaki dönüşüm;

$$\sigma = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda_{vakum}} \quad (2.7)$$

ile verilir.

Çok elektronlu bir sistemin ince yapı seviyeleri arasındaki geçişler seviyelerin kuantum sayılarıyla ilişkili bir dizi kurala bağlıdır. Geçişin olduğu seviyelerin toplam açısal momentum kuantum sayısı J ve J' olmak üzere,

$$\Delta J = J - J' = 0, \pm 1 \quad (2.8)$$

şartını sağlayan seviyeler arasında geçiş izinlidir. $J=0 \leftrightarrow J'=0$ geçişi yasak geçiştir. Bir diğer kural paritenin değişmesidir. Parite işlemi 3-boyutlu uzayda bir noktanın orijine göre simetriğini alma demektir. Yani açıların değiştirilmesi ile ilgilidir. Dalga fonksiyonu, l kuantum sayısının tek değerleri aldığı durumlarda ($l=1,3,5,\dots$) tek pariteli, çift değerleri aldığı durumlarda ($l=2,4,6,\dots$) çift pariteli fonksiyon olur. Tek pariteli dalga fonksiyonları antisimetrik, çift pariteli dalga fonksiyonları simetrik fonksiyonlardır. Enerji seviyesinin paritesi $\sum l_i$ işlemi ile bulunur. İşlem sonucu tek ise enerji seviyesi tek paritelidir, işlem sonucu

çift ise enerji seviyesi çift paritelidir. Enerji seviyeleri arasında geçişler sadece tek pariteli seviyelerden çift pariteli seviyelere ve aynı şekilde çift pariteli seviyelerden tek pariteli seviyelere şeklindedir.

2.4. AŞIRI İNCE YAPI HAKKINDA TEMEL BİLGİLER

Sıfırdan farklı bir nükleer spin kuantum sayısına sahip atomlarda ise ince yapı enerji seviyelerinin ek bölünmeler göstermesi sözkonusudur. Bu ek bölünmeler, nükleer manyetik moment ile elektronik manyetik moment arasındaki elektromanyetik etkileşimden kaynaklanır ve aşırı ince yapı olarak adlandırılır. Ayrıca çekirdeğin elektrik alanının küresel simetriden sapmasından kaynaklanan ek küçük kaymalar da mevcuttur. Manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti A ve elektrik kuadropol aşırı ince yapı sabiti B , her ince yapı seviyesinin karakteristiğidir.

Geçen yüzyılın sonunda yüksek çözünürlüklü spektroskopinin ortaya çıkmasıyla, atom ve iyonlardaki birçok ince yapı geçiş çizgisinde, tipik olarak ince yapıdan bin kat civarında daha küçük olan ek bir yapı görünür hale geldi. Enerji kaymalarının, frekansların ve dalga boylarının bir özeti Tablo 2.3'te verildi.

Tablo 2.3: Enerji kaymalarının, frekansların ve dalga boylarının bir özeti.

	E (eV)	ν (Hz)	λ
Merkezi alan yaklaşımı	0,4	10^{14}	$3 \mu\text{m}$
İnce yapı	$10^{-4} - 0,1$	$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{13}$	$1 \text{ cm} - 10 \mu\text{m}$
Aşırı ince yapı	$10^{-7} - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^{10}$	$10 \text{ m} - 1 \text{ cm}$

Bu çizgilerden bazıları, bir elementin farklı izotoplarının farklı çekirdek kütlesi ve çekirdek hacmi nedeniyle ortaya çıkar. Ancak tek başına izotop kayması gözlemlenen tüm çizgileri açıklayamaz. Yarılmalara sebep olan etkileşmelerden birisi, elektronun atom içerisindeki hareketi sebebiyle çekirdek üzerinde oluşturduğu manyetik alan ile çekirdeğin manyetik dipol momentinin etkileşime girmesidir. Çekirdek, I çekirdek spini olarak tanımlanmış spin açısai momentumuna sahiptir. Yüklü bir parçacık olduğu için de çekirdek spini nükleer manyetik

momente sebep olur. Çekirdeğin I çekirdek spini ile, $\vec{\mu}_I$ manyetik momentinin vektörel ifadesi arasındaki ilişki aşağıdaki (2.9) eşitliği ile verilir,

$$\vec{\mu}_I = I \frac{\mu_N}{\hbar} \quad (2.9)$$

Bu ifadedeki μ_N çekirdeğin nükleer manyetik momentinin büyüklüğüdür. Çekirdek manyetik momenti $\vec{\mu}_I$ ile elektronun çekirdek üzerinde oluşturduğu manyetik alan $\vec{B}_J$ etkileşir. Oluşan manyetik etkileşmenin potansiyel enerjisi,

$$W_{man} = -\vec{\mu}_I \cdot \vec{B}_J \quad (2.10)$$

ile ifade edilir. $\vec{B}_J$ manyetik alan vektörünü, B_J manyetik alanın büyüklüğü cinsinden ifade edersek,

$$\vec{B}_J = J \frac{B_J}{\hbar} \quad (2.11)$$

ve $\vec{\mu}_I$ ifadesiyle $\vec{B}_J$ ifadesini yerine yazarsak manyetik potansiyel ifadesi,

$$W_{man} = -\frac{\mu_N B_J}{IJ\hbar^2} \vec{I} \cdot \vec{J} \quad (2.12)$$

şeklini alır. Çekirdek spini I ile elektronun toplam açısal momentumu J arasındaki etkileşim sonucunda atomun toplam açısal momentumu F elde edilir. Toplam açısal momentum ifadesi,

$$\vec{F} = \vec{J} + \vec{I}, \quad |J - I| \leq F \leq J + I \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Çekirdek spini ile elektronun toplam açısal momentumunun skaler çarpım ifadesi de,

$$\vec{I} \cdot \vec{J} = IJ \cos(I, J) = \frac{F^2 - I^2 - J^2}{2} \quad (2.14)$$

$$F^2 \rightarrow F(F + 1), \quad J^2 \rightarrow J(J + 1), \quad I^2 \rightarrow I(I + 1) \quad (2.15)$$

şeklinde manyetik potansiyel enerji denkleminde yerlerine yazılırsa,

$$W_{man} = -\frac{\mu_N B_J}{IJ\hbar^2} \left[\frac{F^2 - I^2 - J^2}{2} \right] \quad (2.16)$$

$$W_{man} = -\frac{\mu_N B_J}{2IJ} \left[\frac{F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)}{2} \right] \quad (2.17)$$

şeklini alır. İfadeyi daha sade bir şekilde yazmak istersek,

$$C = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1) \text{ ve } A = \frac{\mu_N B_J}{2IJ} \quad (2.18)$$

olmak üzere manyetik potansiyel enerjisi,

$$W_{man} = A \frac{C}{2} \quad (2.19)$$

şeklini alır. Burada C , Casimir sabiti ve A manyetik dipol moment hfs sabitidir. A hfs sabiti, B_J manyetik alanın büyüklüğü ifadesine bağlıdır. Elektronun çekirdek üzerinde oluşturduğu manyetik alan B_J büyüdükçe A hfs sabitinin değeri artar.

Yarılmalara sebep olan bir diğer etkileşme, elektronun çekirdek üzerinde oluşturduğu elektrik alan ile çekirdeğin kuadropol momentinin etkileşmesidir. Manyetik etkileşim ile kıyaslandığında hfs yarılmalarına etkisi daha azdır. Bu etkileşme çekirdekteki yük dağılımının küresel simetrik olmamasıyla ilişkilidir. Çekirde spini I , 0 veya $1/2$ değerlerinde olduğunda küresel simetrik olup farklı değerlerde yük dağılımı simetrik değildir.

Elektronların çekirdek üzerinde oluşturduğu elektrik alan ile çekirdeğin kuadropol momentinin etkileşmesiyle meydana gelen elektrostatik etkileşmenin enerjisi,

$$W_{el} = \frac{eQ'}{4} \overline{\varphi_{JJ}(0)} \quad (2.20)$$

şeklindedir. Burada Q kuadropol moment tensörü, Q tensörünün z bileşeni ve $\overline{\varphi_{JJ}(0)}$ yörüngedeki elektronların J 'nin etrafında silindirik simetrik olarak oluşturdukları elektrik alanın vektör gradyentidir. Yük dağılımının simetrik olması için,

$$Q' = Q \left(\frac{3}{2} \cos^2 \theta - \frac{1}{2} \right) \quad (2.21)$$

ve

$$B = eQ \overline{\varphi_{JJ}(0)} \quad (2.22)$$

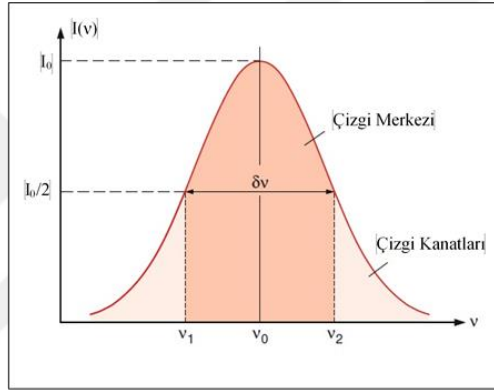
dönüşümü yapılırsa elektrostatik etkileşme enerjisi,

$$W_{el} = \frac{B}{4} \left[\frac{3}{2} \cos^2(I, J) - \frac{1}{2} \right] \quad (2.23)$$

şeklini alır. Burada B elektrik kuadropol hfs sabitidir. Elektrostatik etkileşmenin sıfırdan büyük bir değer olabilmesi için çekirde spini I $1/2$ 'den büyük bir değere sahip olmalıdır.

2.5.HOMOJEN VE HOMOJEN OLMAYAN SPEKTRAL ÇİZGİ GENİŞLEMELERİ

Absorpsiyon ve/veya emisyon spektrumlarındaki spektral çizgiler tam anlamıyla tek renkli değildir. Çok yüksek çözünürlüğe sahip girişimölçerler ile soğurulan veya yayılan yoğunluğun spektral dağılımı, $I(\nu)$, gözlemlenebilir.



Şekil 2.1: Spektral çizgi profili, yarı genişliği, çizgi merkezi ve kanatları.

Energileri belirli olan (örneğin E_i ve E_k gibi) iki enerji seviyesi arasındaki spektral bir geçişin bir $\nu_0 = (E_i - E_k)/h$ frekansı civarında soğurulan veya yayınlanan şiddetin spektral dağılım fonksiyonu $I(\nu)$ çizgi profili olarak adlandırılır. $\delta\nu$, yarı maksimumdaki çizgi genişliğidir (FWHM). $\nu > \nu_1$ ve $\nu_2 < \nu$ frekans aralığı için fonksiyon $I_0/2$ 'ye karşılık gelir. $\nu < \nu_1$ ve $\nu > \nu_2$ olan bölgeler çizgi kanatları olmak üzere Şekil 2.1'de (Demtröder, 2006) spektral çizgi profili gösterilmiştir

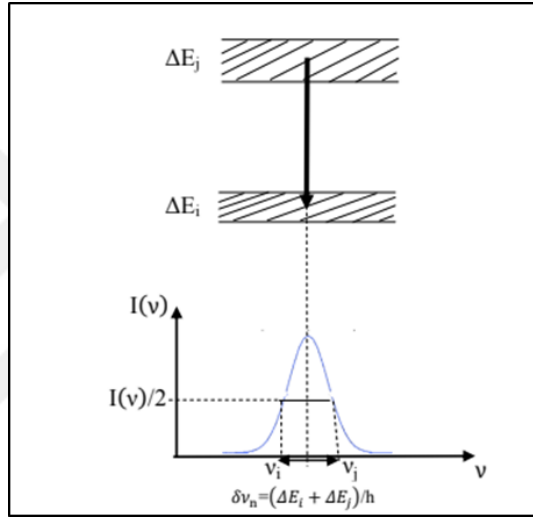
Çizgi profili temel fiziksel özelliklere bağlı olarak genişler. Temel fiziksel özelliklere örnek olarak geçişlerdeki seviyelerin sonlu yaşam ömürleri, çarpışmayı gerçekleştiren atomların hız dağılımları ve kullanılan gazın basıncı verilebilir. Ölçüm aletlerinin spektral çözünürlüğü de çizgi profilinin genişlemesinde etkilidir.

$E_i \rightarrow E_j$ geçişine neden olan ω frekanslı radyasyonun absorpsiyon veya emisyonunun $P_{ij}(\omega)$ olasılığı, aynı E_i seviyesindeki bir numunenin tüm molekülleri için eşitse, bu geçiş homojendir.

Yani kısaca bir geçiş sırasında bütün atomlar için yayılma veya soğurulma olasılığı eşit ise çizgi profili homojen olarak genişler. Eşit değil ise homojen olmayan bir genişleme gerçekleşir.

- **Seviyenin Ömrü ve Doğal Çizgi Genişlemesi Arasındaki İlişki**

Uyarılarak bir üst enerji seviyesine geçen bir atom Heisenberg tarafından ortaya konulan belirsizlik ilkesine göre belirli bir süre üst seviyede kalabilir. Bir seviyenin sonlu yaşam ömrü τ_i olarak verilirse, uyarılan bir atom üst enerji seviyesinde τ_i kadar kalabilir ve çizginin genişliği yaklaşık olarak $\Delta E \sim \hbar / \tau_i$ olacaktır.



Şekil 2.2: Bir spektral geçişin doğal çizgi genişleme profili.

Şekil 2.2’de (Demtröder, 2006) E_j seviyesinden E_i seviyesine geçiş yapan bir atomun çizgi profili verilmiştir. Eğer E_i temel seviye değil τ yaşam ömrüne sahip uyarılmış bir seviye ise ΔE_j ve ΔE_i belirsizliklerinin her ikisi de çizgi genişlemesine katkıda bulunur.

Spektral geçiş karşılık gelen uyarılmış atom kendiliğinden emisyon yaparak enerjisini verir. Atom enerjisi sönümlü bir titreşim olarak verir. Uyarılmış bir atomun enerji verisi için klasik harmonik titreşici modeli tanımlanır. Sönümlü titreşimin zaman bağlı dağılımında zamana göre titreşimin genliğinde azalma olduğundan yayınlanan elektromanyetik dalganın frekansı sabit bir genliğe sahip bir titreşiminki gibi monokromatik değildir. Doğal çizgi genişlemesi homojen bir genişlemedir. Diğer genişleme etkileri tarafından gizlendiği için gözlenmesi zordur ve gözlenmesi için özel tekniklere ihtiyaç vardır.

- **Doppler Çizgi Genişlemesi**

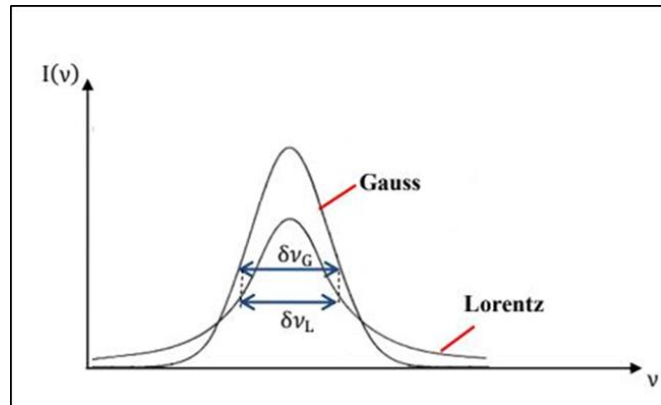
Düşük basınçtaki gazlarda spektral çizgi genişliğine en büyük katkılardan biri, soğuran veya yayan moleküllerin termal hareketinden kaynaklanan Doppler genişliğidir. Deneyde kullanılan silindir-katot lambası içinde uyarılan atomlar sıcaklığa bağlı olarak rastgele hareket ederler. Atomların detektöre göre hareketi, spektral çizgilerin Doppler genişlemesine neden olur. Atomlar rastgele yön ve büyüklükte hareket ettiği için Doppler kayması bütün atomlar için farklıdır. Doppler çizgi genişlemesi inhomojendir.

Doppler genişlemiş bir çizginin şiddet profili, Gauss profiline uyar. Termal dengede olan bir atomun Doppler genişlemesi (2.24) eşitliği kullanılarak,

$$\delta\nu_D = \left(\frac{v_0}{c}\right) \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (2.24)$$

şeklinde verilir. Burada T Kelvin cinsinden sıcaklık, m; atomun kütlesi, k; Boltzmann sabitidir.

Aynı yarıgenişliğe sahip iki çizgide doğal çizgi genişlemesi Doppler genişlemesinin altında kalır. Örneğin görünür ve UV bölgelerinde, Doppler genişliği doğal çizgi genişliğinden yaklaşık yüz kat daha büyüktür. Ancak Şekil 2.3'te (Demtröder,2006) görüldüğü gibi Gauss profili Lorentz profilinden daha çabuk sıfır değerine ulaşır. Böylece Doppler genişliği doğal çizgi genişliğinden çok daha büyük olsa bile, çizgi kanatlarından Lorentz profili hakkında bilgi elde etmek mümkün olur.



Şekil 2.3: Aynı yarıgenişliğe sahip Lorentz ve Gauss profillerinin karşılaştırılması.

Doppler genişlemesi, yüksek frekanslarda yani düşük dalgaboylarında daha fazladır. Kırmızı altı bölgeden mor ötesi bölgesine doğru gidildiğinde Doppler genişlemesi artar. Atomların

hızının artması Doppler genişlemesinin artmasına neden olduğundan Doppler genişlemesinin indirgenebilmesi için incelenen atomların içinde bulunduğu silindir katot deney sırasında sıvı azot ile soğutuldu. Böylece spektral geçişlerin aşırı ince yapı bileşenlerinin iyi ayrışmamasına ve aşırı ince yapı sabitlerinin belirlenmesinde etkili olan genişleme azaltılmış oldu.

- **Çarpışma ve Basınç Çizgi Genişleme Profili**

Bir A atomu başka bir B atomuna (veya molekülüne) yaklaştığında, A ve B arasındaki etkileşim nedeniyle A atomunun enerji seviyeleri değişir. Bu kayma, A ve B'nin elektron konfigürasyonlarına ve aralarındaki mesafeye bağlıdır. Enerji kaymaları, genel olarak, enerji seviyeleri için farklıdır ve hem pozitif hem de negatif değerde olabilir. Enerji kayması, A ve B arasındaki etkileşim itici ise pozitif, çekici ise negatiftir.

Gaz ve plazma sistemlerinde yüklü parçacıklar arasında Coulomb etkileşmesi olduğundan basınç genişlemesi bu sistemlerde daha etkilidir. Basınç artışı çarpışma sayısını artıracağından çarpışma ve basınç genişlemesi beraber çizgi profilini genişletir.

Simetrik olmayan çizgi profili gözlenen düşük frekanslardaki geçişler dışında Lorentz dağılımına uyan bir profil gösterir. Homojen çizgi genişlemesidir.

- **Saturasyon Çizgi Genişleme Profili**

Atomik bir sistemi laserle uyarıdığımızda bir geçişin rezonans frekansı yakınlarında enerji vermesi çok hızlı olur. Bu atomik sistemin nüfus yoğunluğunu değiştirir ve spektral çizgi profilini genişletir.

Saturasyon çizgi genişlemesi bir farklılık gösterir ve Gauss profiline uyan bir şiddet dağılımı profili durumu söz konusu ise homojen olmayan genişlemedir. Eğer Lorentz profiline uyan bir şiddet dağılımı profili durumu söz konusu ise homojen genişlemedir.

- **Birleşik Çizgi Genişlemesi ve Voigt Profili**

Bir spektral geçişin çizgi profili tüm genişleme durumlarının toplamı olan bir $I(\omega)$ ile ifade edilirse hem Lorentz profilini hem de Gauss profilini içeren ifade elde edilir. Böylece spektral çizginin birleşik profili her iki profilin birleşimi olan Voigt profili ile tanımlanır.

Yıldız atmosferlerinin spektroskopik analizlerinde emisyon ve absorbsiyon spektrumlarındaki sıcaklık ve basınç değişimlerinin daha iyi tanımlanması gerekmektedir. Voigt profili bu konuda oldukça avantaj sağlar.



3.MALZEME VE YÖNTEM

3.1.VANADYUM ELEMENTİ VE ÖNEMİ

Vanadyum elementi ilk olarak 1801 yılında Andrés Manuel del Rio tarafından keşfedilmiştir. Keşfettiği bu yeni elementin kabulü için Avrupalı meslektaşlarıyla paylaştığında yeni elementin aslında krom olduğu ortaya çıkmıştır. 1831 yılında Nils Gabriel Sefström, İsveç madenlerinden alınan demir cevherinde bu elementi tekrar keşfetmiştir (N.G.Sefström, 1831) ve kromdan farklı bir element olduğunu ispatlamıştır. Sefström yeni elemente İskandinav güzellik ve bereket tanrıçası Vanidis'ten esinlenerek vanadium ismini vermiştir.

Vanadyum elementi krom, klor ve çelik kadar boldur ve dünya kabuğunda en çok bulunan 22. elementtir. Vanadyum içeren cevherlerden kalsiyum ile indirgeme, elektroliz, çözücü özütlemesi ve termal bozunma gibi yöntemler kullanılarak elde edilebilir. Elde edilen vanadyumun %90'nı çelik alaşımlarda kullanılmaktadır. Vanadyum içeren çelik, vanadyum içermeyen çeliğe göre daha sert, daha güçlü ve paslanmaya daha dayanıklıdır. Bu alaşımların bir kısmı da uzay araçları ve uçaklarda kullanılmaktadır. Vanadyum pendoksit bileşeni ticari açıdan birçok alanda (cam ve seramik için renklendirici, tekstillerin boyanması vb.) katalizör olarak kullanılmaktadır.

Vanadyum orta derecede reaktiftir. Oda sıcaklığında havadaki oksijenle reaksiyona girmez ve suda çözünmez. Ancak sıcak sülfürik asit ve sıcak nitrik asitle daha reaktif hale gelir. Vanadyum bazı durumlarda metalik, bazı durumlarda ametalik özellikler gösterdiği için özel bir elementtir (Encyclopedia Britannica, 2021). Atom numarası 23 olan vanadyum, geçiş metalleri grubuna ait bir elementtir. Doğal vanadyum elementi iki izotoptan oluşur: uzun ömürlü (1.4×10^{17} yıl) radyoaktif izotop ^{50}V (doğal bolluk %0.25) ve tek kütle numarası ve doğal izotop bileşiminde %99.75 bolluk ile kararlı bir izotop olan ^{51}V (Berglund ve Wieser, 2011). ^{51}V izotopunun nükleer spin kuantum sayısı $I = 7/2$ 'dir. Büyük çekirdek manyetik dipol momentini ($\mu_I = 5.1574 \mu_N$) nedeni ile birçok spektral çizginin geniş aşırı ince yapısı vardır ancak küçük bir elektrik kuadrupol momentine sahip olduğundan ($Q = -0.052$ barn) aşırı ince yapıya elektrik kuadrupol etkileşiminin etkisinin saptanması zordur. Nötral vanadyumun (V I) temel durum elektron konfigürasyonu $[\text{Ar}]3d^34s^2$ olup sembol terimi $^4F_{3/2}$ 'dir.

Vanadyum, göreceli olarak yüksek yıldız bolluğu ve çizgi bakımından zengin tayfi nedeniyle astrofiziksel araştırmalarda önemli bir rol oynar (Whalling 1985; Sobolewski 2020).

Süpernova nükleosentezi teorisi, süpernova patlamalarındaki farklı elementlerin üretim prosesini anlamaya çalışır. Nükleosentez, hafif elementlerin ağır elementlere ergimesi, patlayıcı oksijenin veya silikonun yanması esnasında ortaya çıkar. Bu bağlamda, "yanma" kelimesi kimyasal bir reaksiyonu değil, nükleer tepkimeyi ifade eder. Bu birleşme tepkimeleri, silikon, sülfür, klor, argon, sodyum, potasyum, kalsiyum, skandiyum, titanyumun yanı sıra, vanadyum, krom, manganez, demir, kobalt ve nikel gibi elementlerin oluşumuna yol açar (Woosley ve diğ., 1973).

Skandiyum'dan zirkonyum'a ($Z = 21-30$) kadar demir grubuna ait kimyasal elementler, farklı süpernova türlerinde nükleosentezin anlaşılması için kritik öneme sahiptir. Özellikle, vanadyum (skandiyum ve titanyum ile birlikte), çekirdek-çöküş süpernova (SN) aşamasında patlayıcı silikon ve oksijen yanması ile üretilir. Özellikle, Cowan ve ark. (Cowan ve diğ., 2020) metal bakımından fakir yıldızlarda skandiyum, titanyum ve vanadyum arasında bir korelasyon bulduğu için Vanadyum spektrumlarına olan ilgi artmıştır ve bunlarla ilgili bilgiler, bolluk belirleme doğruluğunu geliştirmek için önemlidir (Colón ve diğ., 2020). Son zamanlarda yapılan çalışmalarda vanadyum elementi, özellikle metalden fakir yıldızlarda detaylı olarak analiz edilmiştir (Ou ve diğ., 2020).

3.2. DENEYSEL YÖNTEMLER

Atomların enerji seviyeleri farklı spektroskopik yöntemlerle incelenebilir. Kullanılan yöntemlerde farklı fiziksel olaylar temel alınarak enerji seviyelerine ait spektrumlar elde edilir. Bu spektrumlar incelenerek seviyelerin kimlik bilgileri olan manyetik dipol aşırı ince yapı sabiti A ve elektrik kuadrapol aşırı ince yapı sabiti B belirlenir. Laser spektroskopik yöntemlerde incelenen atomun üzerine laser ışını gönderilerek oluşturulan ışımanın detekte edilmesi ile ince yapı enerji seviyeleri incelenir.

Atomların elektronları bulundukları enerji seviyesinden üst enerji seviyesine geçiş yapabilir. Bunun için geçişi yapmayı sağlayacak kadar enerji alması yeterlidir. Aynı zamanda fazla enerjisini vererek alt enerji seviyesine de geçebilir. Eğer uygun ortam oluşturulup atomun üzerine soğurabileceği dalga boylarında bir laser ışını gönderilirse bu geçişlerin olabileceği seviyeler hakkında bilgi elde etmek mümkündür. Atomların bu geçişleri sırasında seviyelerdeki

akım değişiminin incelendiği Optogalvanik Spektroskopisi (Optogalvanic Spectroscopy-OGS) ve geçişlerden sonra oluşan floresans sinyallerinin incelendiği Laser Uyarılmış Floresans Spektroskopisi (Laser Induced Fluorescence Spectroscopy - LIFS) hfs çalışmalarında kullanılan yöntemlerdendir.

OGS, plazma ortamındaki elektriksel değişimden kaynaklanır. Bu nedenle laserin tarama aralığındaki tüm çizgiler aynı anda algılanır. Çizgileri ayrı ayrı gözlemlemek için başka bir spektroskopik metot olan LIFS yöntemi kullanılır. Değarjda meydana gelen gürültüler nedeniyle, ölçümlerimizde LIFS yönteminden elde edilen spektrumların, OGS yöntemi ile elde edilenden daha iyi sinyal-gürültü oranına (SNR) sahip olduğu belirlendi.

3.2.1. Optogalvanik Spektroskopisi (OGS) Yöntemi

Gaz boşalım ortamlarının incelenmesinde, basit deney düzeneği ile OGS mükemmel bir yöntemdir. Kararlı bir gaz boşalım ortamının gönderilen laser ışını sayesinde aydınlatılmasıyla sistemde bir akım değişimi oluşur. Bu akım değişimi dedekte edilerek boşalım ortamındaki atomların geçişleri hakkında bilgiler elde edilir. Kararlı bir gaz boşalım ortamında bulunan atomlar iyonizasyon olasılığının yüksek olduğu seviyelere uyarılabilirler. Uyarılma işleminin sonucunda seviyelerdeki nüfus yoğunlukları değişir. Böylece akımda bir değişim oluşur.

Uyarma işleminde laser ışını geçişin olacağı seviyeler arasındaki rezonans geçişine ayarlanır. Farklı seviyelerdeki atomların iyonizasyon olasılıkları da farklıdır. Bu değişim sinyali lock-in güçlendirici ile dedekte edilerek optogalvanik sinyal elde edilir.

Bugün OG deteksiyonu, iyi geliştirilmiş bir spektroskopik teknolojidir. Geleneksel absorpsiyon ve floresans spektroskopisi veya optoakustik spektroskopisi gibi diğer optik teknikleri tamamlar (Barbieri ve diğ., 1990). OGS yöntemi hfs çalışmalarında oldukça kullanışlı ve diğer yöntemlere göre daha kolay ve ucuzdur. Uyarılma dalgaboyunu bilmek OG sinyali için yeterlidir. İyi bir OG sinyali kaydetmek için boşalım ortamının kararlı olması gerekir. Kararsız boşalım ortamında kaydedilen sinyalin gücü düşük olacağından sinyal-gürültü oranı iyi olan bir OG sinyali gözlenemez. Ayrıca dalgaboyu kalibrasyonu yapmak, laser frekans kararlılığını ölçmek için OGS yöntemi kullanılabilir. Gaz ortamlarında iyonizasyon ve çarpışma olasılıkları ile ilgili bilgiler elde etmek için de OGS yöntemi kullanışlı bir yöntemdir.

3.2.2. Laser Uyarılmış Floresans (LIF) Spektroskopi Yöntemi

Bir atomun elektron dizilimi ışık soğurma yeteneğini belirler. Eğer en dış kabuklarda bulunan bir elektron dolu bir orbitalde değil ise o elektron daha yüksek enerjili bir orbitale geçebilir. Bunun için ışık (foton) soğurması yeterlidir. Bir elektron foton soğurarak yüksek enerjili bir seviyeye geçer ise burada belirli bir süre kalabilir daha sonra emisyon ile tekrar alt seviyelere inerler. Bu dönüş sırasında dışarıya bir ışık yayınlar ve bu ışığa floresans denir.

LIF yönteminde, tüm bu floresans çizgilerinden sadece laser ile uyarılan spektral çizginin alt ve üst enerji seviyesinden meydana gelen floresans sinyalleri ayırt edilerek bu seviyeler hakkında bilgiler elde edilir. Floresans sinyali şiddeti alt veya üst enerji seviyesinin nüfus yoğunluğuna bağlıdır. Spektral çizginin üst seviyesinden meydana gelen floresans çizgileri faz duyarlı lock-in güçlendirici ile pozitif fazlı, alt seviyeden meydana gelenler ise negatif fazlı olarak detekte edilir.

Pozitif ve negatif faza sahip tüm LIF floresans çizgilerinin herbirinde monokromotör sabit tutularak laser, tanımlanamamış spektral çizginin genişliğine göre 20-35 GHz aralığında taranır. Kaydedilen LIF floresans çizgileri her zaman çizginin sahip olduğu enerji seviyelerinden olmayabilir. Bu durum incelenen spektral geçişin alt ya da üst ince yapı enerji seviyelerinin, diğer enerji seviyelerine çok yakın olması halinde gerçekleşir. Çarpışma etkileşimi durumunda, uyarılmış seviyedeki atom enerjisini, yakın olan diğer bir enerji seviyesindeki bir atoma aktarabilir ve daha alt ince yapı enerji seviyelerine geçebilir ki bu durumdaki floresans da “pozitif floresans” olarak isimlendirilir. Buna “çarpışma etkileşmesi” denir. Bu durumda çizginin olması gereken hfs yapısı gözlenmez. Bu nedenle laser taraması sırasında aynı hfs spektrumunu veren LIF floresans çizgileri bilinmeyen enerji seviyesinin bulunmasını sağlar.

Yüksek enerji seviyeleri yoğun olan elementlerin, laserin tek bir dalgaboyu için birden fazla enerji seviyesi aynı anda kendiliğinden uyarılabilir ve bu seviyelerin tümü floresans yayınlayabilir. Gözlemlenen optogalvanik spektrum tüm bu yapıları içerebilir. Dolayısıyla karışmış bir yapı gösterir. LIF spektroskopisinin bir avantajı bu karışmış çizgileri birbirlerinden ayırt edebilmemizi sağlamasıdır.

3.2.3. Deney Düzeneği ve Deney Şartları

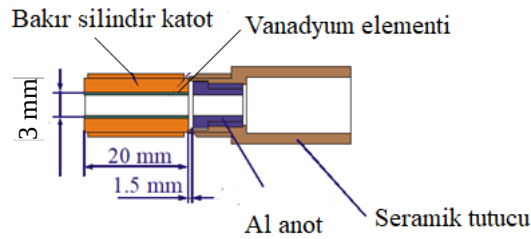
Bu çalışmada Vanadyum elementinin yeni ince yapı enerji seviyelerinin bulunması ve aşırı ince yapı incelemeleri deneysel olarak LIF ve OGS spektroskopisi yöntemleri eş zamanlı olarak kullanıldı.

Deneysel çalışmalar, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Laser Spektroskopisi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirildi.

V atomlarının uyarılması için 532 nm dalga boyunda Katıhal laser (Verdi 18 W) laser ile pompalanan sürekli ışık veren, taranabilir tek boylamasına mod Ti:Sa laser (Coherent, MBR 110, 4 W) kullanıldı. Bu laserin maksimum gücü 4 Wattır ve 650 nm - 1100 nm aralığında taranabilme özelliğine sahiptir. Bu tez çalışması kapsamındaki yapılan deneyler süresince laser gücü, soğurma çizgilerinin saturasyon genişlemesini azaltmak için 1 W civarında tutuldu. Ayrıca Ti:Sa laser sisteminde 750 nm - 850 nm dalga boyu aralığındaki aynalar kullanıldı.

Laserin dalga boyu, 200 MHz mutlak doğrulukla dalga boyunu ölçebilen High Finesse 6-200 dalgametre ile belirlendi.

Kullanılan her iki yöntemde de 0.125 mm kalınlığındaki plaka halindeki vanadyumun içine yerleştirildiği el yapımı silindirik katot lamba ışık kaynağı olarak kullanıldı. Kullanılan silindirik katoda ait tüm verilerin şematik gösterimi Şekil 3.1'de verildi.



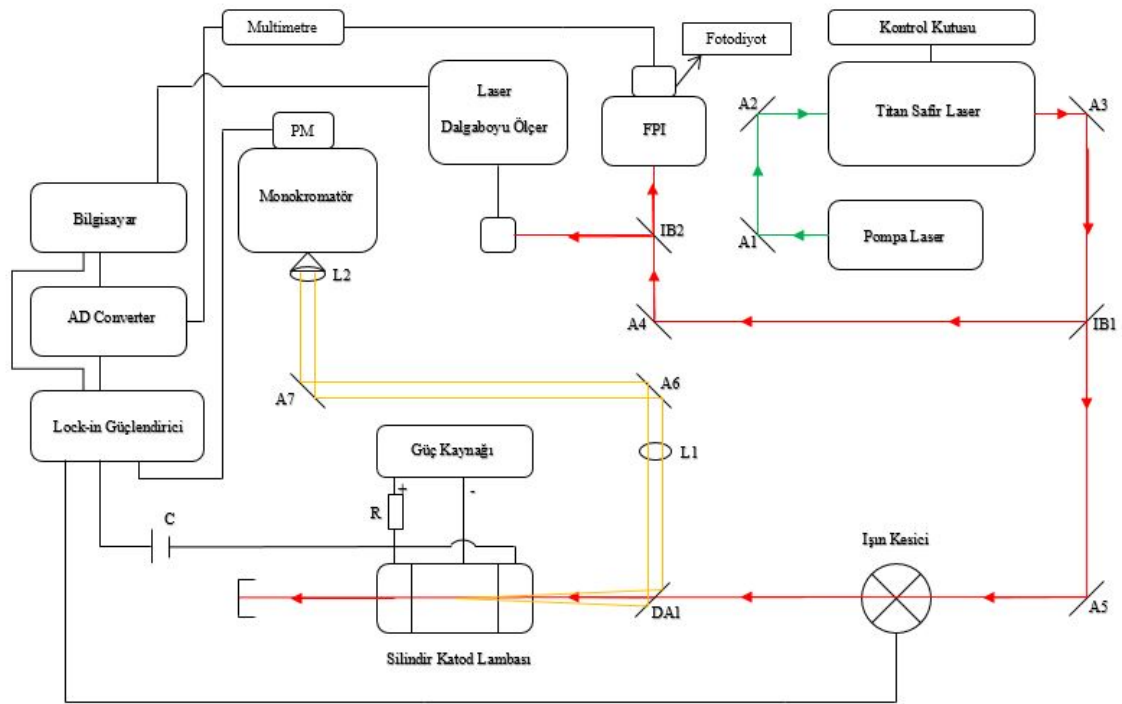
Şekil 3.1: Deneyde kullanılan silindirik katodun şematik gösterimi.

Taranan laserin relatif frekansını ölçmek için sıcaklığı sabit tutulan, serbest spektral bölgesi 299.0010 (8) MHz olan, el yapımı Fabry-Perot İnterferometresi (FPI) kullanıldı.

Deneylerde, silindir katot lamba, 10^{-7} mbar değerine kadar vakumlandıktan sonra 1-2 mbar basınçta Ne soygazı ile dolduruldu. Anot ve katot arasında 300-400 V'luk bir potansiyel farkı uygulandı. Böylece iyonize Ne atomlarının V levhaya çarpması sağlandı. V atomları levhadan püskürtülerek silindir katot lambasında gaz halinde bir plazma oluşturuldu. Bu süreçte V atomları da farklı enerji seviyelerine uyarılır. Tüm deney süresince silindir katot lambası sıvı nitrojen içinde tutularak Doppler çizgi genişlemesi azaltılması ve atomların silindir katod haznesinde yoğunlaşması sağlanır. Laser ışını mekanik bir bölücü ile modüle edildi ve V-Ne atomlarından ve iyonlarından oluşan gaz plazmasından geçirildi ve OGS ve LIF ölçümleri lock-in tekniği ile yapıldı. Bu teknik, sinyal içinde var olan gürültüyü algılar ve ölçülebilir hale getirir. Lock-in güçlendiriciler, μV -nV seviyesindeki küçük sinyalleri bile detekte ederek ölçebilir. Bu güçlendiriciler, faz duyarlı deteksiyon olarak bilinen tekniğe göre çalışır.

Geçişlerin aşırı ince yapılarını ölçmek için hfs spektrumunun genişliğine göre laser dalgaboyu 20 GHz - 35 GHz tarandı. Dalgaboyu taramasının kalibrasyonu için, laser ışınının küçük bir kısmı laboratuvarında yapılmış, sıcaklık kontrollü eş odaklı Fabry-Perot interferometresine (FPI) gönderildi. Frekans ölçeğinin kalibrasyonu için ölçümle eş zamanlı olarak elde edilen girişim maksimumları kullanıldı. Dalgaboyunun tarama hızı genellikle 2,5 GHz/dk'ya ayarlandı ve yaklaşık 2 MHz'lik adımlarla kaydedildi. Silindir katot lambaya 300-400 V aralığında bir potansiyel farkı uygulandığında 60 mA'lık bir deşarj akımı elde edildi. Laserle uyarılan atomların plazmasındaki akım değişiklikleri bir balast direnci tarafından oluşturulan voltaj farkı ölçülerek bir optogalvanik sinyal elde edildi.

LIF ölçümlerinde, silindir katot lambasından yayılan floresans ışık, büyük çaplı lens ve aynalar yardımıyla toplanarak monokromatörün giriş yarığına odaklandı (McPherson 607, $f = 607$ mm, kırınım ağı: 1200 çizgi/mm). Monokromatörün yarık genişliği yaklaşık 200 μm civarında bir değere ayarlandı ve 5-6 Å bant genişliğine sahip bir filtre olarak kullanıldı. Monokromatörün çıkış yarığında bir fotoçoğaltıcı (Hamamatsu, R928) ile floresans ışığı algılandı. OGS ve LIF yöntemlerini birlikte içeren deney düzeneği şematik olarak Şekil 3.2'de verildi. Şekilde, A1, A2, ..., A7 aynaları, IB1 ve IB1 ışın bölücüler, OL1 ve OL2 optik lensleri, DA delikli aynayı ifade etmektedir.



Şekil 3.2: Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

3.2.4. Yeni ince yapı enerji seviyesinin bulunması

Spektroskopik çalışmalarda, elementlerin alt ve üst enerji seviyeleri belirlenemeyen çizgilere tanımlanmamış çizgiler denir. Bu çizgiler incelenerek yeni ince yapı enerji seviyeleri bulunabilir. J. C. Pickering (Pickering, özel iletişim) ile yapılan özel yazışma sonucunda vanadyumun Fourier Transform spektroskopi tekniği ile incelenen tanımsız çizgilerinin listesi elde edildi. Tablo 4.1 de Titan Safir (Ti:Sa) laser bölgesinde bulunan 750 nm - 850 nm dalgaboyu aralığındaki tanımsız çizgilerin listesi verildi.

Ti:Sa laserin uygun ayna seti kullanılarak dalgaboyu aralığı 750 nm – 850 nm olarak ayarlandı. Öncelikle Tablo 4.1 de verilen şu ana kadar tanımlanamayan her çizgi için 30 GHz frekans aralığında optogalvanik yöntem ile tarama yapıldı ve OG sinyal veren çizgilerin spektrumları kaydedildi. Bu şekilde toplam 70 çizgi incelendi. Bu çizgilerin sadece 30 tanesi optogalvanik sinyal gösterdi.

Her çizgi için laser dalgaboyu, OG spektrumunda gözlemlenen en şiddetli hfs pikine ayarlandı ve bu değerde sabit tutuldu. Daha sonra, monokromatör 350-700 nm aralığında taranarak

floresans çizgileri belirlendi. Floresans ve LIF çizgileri aynı anda kaydedildi. Lock-in yükselticisinde tanımlanmamış V çizgisinin üst ince yapı enerji seviyesinden oluşan floresans çizgileri pozitif fazda, alt ince yapı enerji seviyesinden başlayan floresans çizgileri ise negatif fazda gözlemlendi. Böylece floresans çizgilerinin üst ince yapı enerji seviyesinden mi yoksa alt ince yapı enerji seviyesinden mi olduğu ayırt edilebildi. Bilinmeyen çizginin alt ince yapı enerji seviyesinden oluşan floresans çizgileri yeni ince yapı enerji seviyelerinin bulunması için son derece faydalıdır. Çünkü literatürde çoğunlukla düşük enerji seviyeleri tanımlıdır. Bulunan negatif floresans çizgileri tanımlı ise, bilinmeyen çizginin alt ince yapı enerji seviyesi bellidir ve araştırılan çizginin bilinmeyen üst ince yapı enerji seviyesi laser dalgaboyundan belirlenebilir. Ancak kaydedilen her negatif floresans, laser çizgisinin alt enerji seviyesine ait olmayabilir ya da tanımlı olmayabilir. Birden fazla negatif floresans var ve bunlar tanımlı ise üst enerji seviyeleri aynı olmalıdır. Laser çizgisinin enerjisi ile bu floresans çizgilerinin ortak üst enerji değeri toplanarak laser çizgisinin bilinmeyen üst enerji seviyesi bulunmuş olur.

Bu çalışmada keşfedilen tüm ince yapı enerji seviyeleri bu şekilde bulundu. Bu durumun tam tersi de mümkündür; üst ince yapı enerji seviyesinden gelen floresans çizgileri sınıflandırılmış ise, laser çizgisinin alt ince yapı enerji seviyesi bulunabilir.

Monokromatör taraması sonucunda gözlemlenen her bir floresans dalgaboyunda monokromatör sabit tutularak hfs genişliğine bağlı olarak laser 20 GHz ile 35 GHz arasında bir tarama genişliği ile tarandı ve gözlemlenen LIF spektrumu kaydedildi. LIF hfs spektrumlarının belirlenen her floresans çizgisi için aynı yapıyı göstermesi beklenir.

Bu şekilde yeni enerji seviyesi bulunduktan sonra bu seviyenin kanıtlanması gerekir. Bu aşamada yeni bulunan seviye 'Elements' (Windholz ve Guthöhrlein, 2003) programının giriş dosyalarından biri olan Levels dosyasına kaydedilerek bu seviyeden mümkün olan tüm spektral geçişler hesaplandı. Bu hesaplanan çizgilerden laserin dalgaboyu aralığında olan çizgilerin herbiri için yukarıdaki yöntem uygulanarak bilinmeyen enerji seviyesi kanıtlanmış oldu. Her çizgiden bulunan enerji seviyelerinin ortalaması alınarak standart sapması hesaplandı.

3.3. SPEKTRAL ÇİZGİLERİN ANALİZİNDE KULLANILAN PROGRAMLAR

Nötral vanadyumun yeni ince yapı enerji seviyelerinin bulunmasında ve aşırı ince yapı çalışmalarında, LIF ve OGS laser spektroskopik yöntemleri ile elde edilen spektrumların yanı sıra, Letonya Üniversitesi Laser Merkezi'nde ölçülen UV ve görünür bölgede çekilen V elementinin Fourier Transform (FT) spektrumu da kullanıldı.

Bu çalışmada, FT spektrumu yeni ince yapı enerji seviyelerini bulmada önemli bir araç olarak kullanıldı. Bu yöntemde de ışık kaynağı olarak silindir katot lamba kullanıldı. Lamba boşalımından gelen emisyon ışınımı, lensler ve aynalar yardımı ile FT spektrometresine yönlendirildi. Giriş açıklığı 1 mm ve spektral çözünürlüğü $0,025 \text{ cm}^{-1}$ olan Bruker IFS 125HR Fourier Transform spektrometresi ile optik ışınım ölçülebilir frekansa dönüştürüldü. Geniş spektral tepkilere sahip olan Hamamatsu R928 fotoçoğaltıcı tüp spektrumun kaydedilmesi için kullanıldı.

Üç değişik yöntem ile elde edilen spektrumların analizi iki farklı program yardımı ile yapıldı. Spektral çizgilerin bilinmeyen seviyelerinin bulunmasında ve çizgilerin sınıflandırılmasında, "Elements" programı kullanılırken, ölçülen çizgilerin hfs spektrumları ise "Fitter" programı (Zeiser, 2019) yardımı ile analiz edilerek spektral çizginin ağırlık merkezi, yarı genişliği ve manyetik dipol aşırı ince yapı sabitleri belirlendi.

3.3.1.Elements Programı

"Elements" programı yeni ince yapı enerji seviyelerinin bulunması ve keşfedilen yeni seviyelerin kanıtlanması için laser bölgesindeki floresans çizgilerini belirlemek için kullanılır. Bu program ile incelenecek elementin verilerinin bulunduğu giriş dosyalarını kullanarak mümkün spektral çizgiler belirlenir ve çizgilerin sınıflandırılması yapılır.

Bu amaç ile incelenen element için üç tane giriş dosyası hazırlanmalıdır. "wx" incelenen elementin literatürde bilinen ve/veya bilinmeyen bütün spektral çizgilerinin dalga boylarını içeren dosyadır. Dinamik bir yapıda olan bu giriş dosyasında, sınıflandırma işleminde yapılan her giriş dosyaya kaydedilir. Kaydedilen yeni bilgilerin anında görüntülenebilmesini sağlamak için "seviyeleri tekrar yükle" düğmesine basılır. Böylece her yeni eklemeyi içerecek şekilde yeni teorik önerilerin gelmesi sağlanır.

“Level_x” ve “Lev_xn” incelenen atomun nötral ve n. kez iyonize durumlarının bilinen tüm enerji seviyelerinin bulunduğu dosyalardır. Bu iki dosyada aynı zamanda ince yapı enerji seviyelerinin J kuantum sayıları, pariteleri, bilinen manyetik-dipol A ve elektrik-kuadrapol B hfs sabitleri de mevcuttur. FT spektrumunda, plazma ortamı elde ederken kullanılan soygaz çizgileri, spektrumlarda incelenen element çizgileri ile birlikte gözlenir. Soygaz geçişlerini elementin geçişlerinden ayırabilmek amacı ile giriş dosyalarına deneyde kullanılan argon ve neon asal gazlarına ait ince yapı enerji seviye verileri de eklenir.

Dosya isimlerinde kullanılan x incelenen elementin kimyasal sembolüne bağlı olarak değişir. Program tüm giriş bilgilerini kullanarak mümkün olan bütün spektral çizgileri hesaplar.

Programın çalışma mantığı şöyledir.

- Programa çizgi girişi yapılır. Bunun anlamı spektral çizginin dalgaboyunu girmektir.
- Program tarafından önerilen tüm mümkün teorik geçişler incelenir.
- Eğer deneysel spektrum ile uyumlu öneri var ise;
 - Seçim yapılır ve çizgi simule edilir,
 - Çizginin alt ve üst ince yapı enerji seviyelerinin hfs sabitleri kabaca belirlenir. Bu değerler Fitter programında kullanılır ve daha hassas değerler belirlenir.
 - Çizginin ağırlık merkezi daha hassas olarak belirlenir.
 - Seçilen çizgi programa kaydedilir.
- Eğer deneysel spektrum ile uyumlu öneri yok ise;
 - Yeni enerji seviyesi aranır.
 - Alt ve üst seviyelere ait floresanslara bağlı olarak arama yapılır.
 - İki veya daha fazla floresansın bulunduğu seviye, bu geçişteki önerilen alt/üst enerjisi seviyesi olmaya adaydır.
 - Bu seviye Level_x giriş dosyasına kaydedilir. Böylece bu yeni seviyeyi de içeren yeni geçiş önerileri program tarafından verilir.

3.3.2. Fitter Programı

Fitter elde edilen spektrumu, en küçük kareler yöntemini kullanarak, en iyi fit değerlerini verebilen matematiksel bir fonksiyonla fit eden, hfs sabitlerini ve spektrumun ağırlık merkezini hesaplayan programdır.

Deneyler sonunda veri noktalarını içeren bir dosya elde edilir. Spektrum fit edilmeden önce Fitter programına uygun hale getirilmelidir. Fit işleminin yapılabilmesi için spektral verilerin şiddet dağılımının, frekansın bir fonksiyonu olarak dönüştürülmesi şarttır ki bu işleme “spektrumu lineerize etmek” denir. Spektrumun lineerize edilmesinde LIF metodunda yer alan Fabry-Perot interferometresinden alınan girişim maksimumlarının spektrumu kullanılır.

Fitter programının çalışması için her ölçüme ait ayrı ayrı dört tane giriş dosyasının hazırlanması gerekir.

İlk giriş dosyası, iki kolondan oluşur ve ölçüm verilerini içerir. Birinci sütunda dalgasayısı ikinci sütunda ise şiddet değerleri vardır.

İkinci giriş dosyasında ise sadece spektrumun şiddet değerleri yer alır.

Üçüncü giriş dosyası, deneysel olarak elde edilen her bir floresans dalgaboyu, spektrumun başlangıç dalgaboyu, spektrumdaki veri sayısı ve peş peşe veriler arasındaki frekans farkını içerir.

Dördüncü giriş dosyası ise, her spektral geçişe ait sabit ve değişken parametreleri içerir. Sabit parametreler, elementin izotop sayısı, varsa izotopların katkı oranları, çekirdek spini, spektral çizginin alt ve üst ince yapı enerji seviyelerinin J değerleridir.

Değişken parametreler, spektral çizginin ağırlık merkezi, alt ve üst ince yapı enerji seviyelerinin manyetik dipol hfs sabiti, A ve elektrik kuadropol hfs sabiti B , çizginin yarı genişliği, spektrumun gürültü başlangıç ve bitiş yerleridir. Eğer fit profili olarak Voigt kullanılır ise Voigt profilindeki Gauss ve Lorentz katkılarının yarı genişlikleri de değişken parametreler arasındadır.

Fit edilen spektral geçişin alt veya üst ince yapı enerji seviyelerinin A ve B hfs değerlerinden bir tanesi literatürde hassas olarak verilmiş ise, geçişin diğer enerji seviyesinin A ve B hfs sabitini daha doğru olarak belirleyebilmek için bilinen değer fit süresince sabit tutulur.

Bu çalışmada yeni enerji seviyelerinin hfs sabitlerini belirlerken tüm alt enerji seviyelerinin hfs sabiti değerleri literatürden bilinen değerlerinde sabit tutuldu.

Spektral çizgi fit edildikten sonra oluşan çıkış dosyasından sonuçların yorumlanmasına geçilir. Her bir çizgi için ayrı oluşan çıkış dosyasından alınan veriler aşağıda verildi.

Aşırı ince yapı bileşenlerinin herbirinin frekans cinsinden yeri (3.1) eşitliği ile hesaplanır.

$$\nu = \nu_0 + \alpha_{üst}A_{üst} + \beta_{üst}B_{üst} - \alpha_{alt}A_{alt} - \beta_{alt}B_{alt} \quad (3.1)$$

Burada, ν_0 spektral çizginin ağırlık merkezi olup tüm bileşenler için aynı değerdir. α ve β sırası ile üst ve alt seviyeye ait Casimir faktörleridir. A sırası ile üst ve alt enerji seviyelerinin manyetik dipol hfs sabiti ve B ise elektrik kuadrapol hfs sabitidir.

$$C = [F(F + 1) - I(I + 1) - J(J + 1)] \quad (3.2)$$

olmak üzere Casimir faktörleri sırası ile aşağıda verilen (3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile hesaplanır.

$$\alpha = \frac{C}{2} \quad (3.3)$$

$$\beta = \frac{\frac{3}{4}C(C+1) - I(I+1)J(J+1)}{2I(2I-1)J(2J-1)} \quad (3.4)$$

Ayrıca teorik olarak her bir hfs geçişinin şiddeti de (3.5) eşitliği ile belirlenir;

$$I_{(F_{üst} \rightarrow F_{alt})} \cong (2F_{üst} + 1)(2F_{alt} + 1) \left\{ \begin{matrix} I & F_{üst} & J_{üst} \\ 1 & F_{alt} & J_{alt} \end{matrix} \right\}^2 \quad (3.5)$$

Ölçülen spektrumun ayrılmış olup olmamamsına bağlı olarak değişken parametrelerden herhangi biri ve/veya birkaçı sabit tutulabilir. Böylece iterasyona dahil olan parametre sayısı azaltılmış olur.

Fit işlemi yapılırken ayrışmamış spektral çizgiler için hfs geçişlerinin şiddetleri, $\Delta F = 0, \mp 1$ değerlerine bağılı olarak kendi içinde birbiri ile kuplaj yapılabildiğı gibi, her bir hfs geçişinin en şiddetli hfs geçişı ile kuplaj yapıldığı durumlar mevcuttur.

Elde edilen diğér çıkış verileri ise çizginin yarı genişliğı, ayrı ayrı Lorentz ve Gauss katkıları, hfs sabitlerinin değerleri, spektral çizginin ağırlık merkezi, fit kalitesidir.



4. BULGULAR

Bulgular bölümünde, tez kapsamında yapılan deneysel çalışmaların ve spektrum analizlerinin sonuçları verildi. Bu çalışmada, laser uyarılmış floresans spektroskopisi (LIF) ve optogalvanik spektroskopisi (OGS) olmak üzere iki farklı laser spektroskopik yöntem kullanıldı. LIF ve OGS deneyleri, İstanbul Üniversitesi Laser Spektroskopi Araştırma Laboratuvarı'nda yapıldı.

Ayrıca çizgi analizleri sırasında, ayırma gücü yüksek ve geniş bir spektrum aralığının eşzamanlı olarak kaydedilebildiği için avantajlı bir yöntem olan Fourier Transform (FT) spektroskopi tekniği ile daha önce alınan spektrum kullanıldı. Analizlerde kullanılan FT spektrumu, Bruker IFS 125HR FT spektrometresi ile Litvanya Üniversitesi Laser Merkezi'nde UV ve görünür bölgede Atom ve Molekül Fiziği Öğretim Üyesi Prof. Dr. Gönül Başar ve Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin'de görev alan öğretim üyesi Prof. Dr. Sophie Kröger tarafından kaydedildi.

Bu tez çalışmasında, Thorne ve arkadaşları tarafından (Thorne ve diğ., 2011) 630 nm – 1100 nm spektral bölge aralığında elde edilen, V elementinin FT spektrumundaki tanımlanamayan spektral çizgilerden yola çıkarak yeni ince yapı enerji seviyelerinin varlığının belirlenmesi amaçlandı. Thorne ve diğerlerinin yaptığı çalışmada bu çizgiler verilmemiştir fakat bu yayının yazarlarından biri olan J. C. Pickering ile yapılan özel yazışma sonucunda tanımsız çizgileri içeren tablo elde edildi. Tablo 4.1 de 750 nm - 850 nm dalgaboyu aralığındaki Ti:Sa laser bölgesinde tanımsız çizgilerin listesi verildi.

Deney düzeneğinde yer alan Ti:Sa laserin 750 nm - 850 nm dalgaboyu aralığında ölçüm yapmaya olanak sağlayacak aynaları kullanıldı. Laserin dalgaboyu aralığındaki her bir çizgi, 35 GHz frekans aralığında taranarak OG spektrum kaydedildi. Bu şekilde 70 adet çizgi incelendi. Bu çizgilerden sadece 30 adet çizgide aşırı ince yapı spektrumu gözlemlendi. Optogalvanik spektrum plazma ortamındaki elektriksel değişimden kaynaklandığı için laserin tarama bölgesindeki bir ya da birden fazla çizgiye ait spektrumu gözlemlemek mümkündür. Bu nedenle çizgileri birbirinden ayırtırmak için LIF metodu kullanıldı.

LIF ölçümleri sırasında kullanılan floresans çizgilerinin belirlenmesinde ve yeni bulunan ince yapı enerji seviyelerini ispat edilmesi için laser bölgesindeki çizgilerin araştırılmasında 'Elements' programı kullanıldı. Bu programda FT spektroskopi yöntemi ile, şiddet dağılımının

dalgasayısına bağılı değişimi olarak kaydedilen spektrum, şiddetin dalgaboyuna bağılı bir fonksiyonuna dđnüştürölür. Ar ve Ne soygazları ile kaydedilen spektrumların aynı anda okutulup spektrumların üst üste bindirilmesi sağılandı.

Bu program ile analiz yapılabilmesi için incelenen elemente ait bilgileri içeren üç giriş dosyası oluşturuldu.

- V elementinin nötral ve 1. iyon hali için ayrı ayrı oluşturulan iki giriş dosyası; bilinen tüm ince yapı enerji seviyelerini, seviyelerin paritelerini, J değerlerini ve seviyelere ait literatürden bilinen aşırı ince yapı sabitlerini içerir. Elde edilen emisyon spektrumunda, katot lambanın içinde incelenen element ve ayrıca aynı zamanda plazma ortamı oluşturmak için kullanılan Ar ve Ne çizgileri de gözlenir. Bu geçişleri V elementine ait olan geçişlerden ayırmak için giriş dosyalarına Ar ve Ne enerji seviyeleri de eklendi. Analizlerde kullanılan tüm ince yapı enerji seviyeleri NIST (Kramida ve diğ., 2021) veritabanından alındı. 202 tane çift pariteli, 347 tane tek pariteli olmak üzere toplam 549 tane nötral V ince yapı enerji seviyesi giriş verisi olarak kullanıldı.
- Üçüncü giriş dosyası ise V elementinin deneysel olarak bilinen tüm spektral çizgilerinin dalgaboyları, eğer tanımlı bir çizgi ise alt ve üst enerji seviye ve J değerlerinden oluşur. V elementinin tanımlı tüm spektral çizgileri için Thorne (Thorne ve diğ., 2011)'da verilen veriler kullanıldı. Ritz kuralına göre elementin mümkün olan spektral çizgilerini hesaplatıldı. Ayrıca spektral çizginin alt ve üst enerji seviyelerinin aşırı ince yapı sabitleri biliniyorsa, aşırı ince yapı spektrumu simule edildi ve FT spektrumundaki ile karşılaştırıldı.

Ayrıca spektrum analizinde bilinmeyen hfs sabitlerinin belirlenmesinde “Fitter” programı kullanıldı. Bu programda, herbir deneysel spektrum ve spektral geçişe ait bilgiler kullanılarak oluşturulan teorik spektrum arasındaki frekans ve yarı genişlik arasındaki farklar minimuma indirilerek hfs sabitlerinin değerleri hassas olarak belirlendi.

LIF metodu ile elde edilen spektrumlarda Doppler genişlemesi var olduğundan ve V elementinin elektrik kuadropol momentinin çok küçük bir değere sahip olması sebebi ile elektrik kuadrapol hfs sabitleri belirlenmedi.

Tablo 4.1: V elementinin FT spektrumunda laser dalga boyu aralığında tanımlanamayan çizgileri.

SNR	λ (nm)	σ (cm ⁻¹)
48	750.2396	13325.406
36	750.4800	13321.138
59	750.4960	13320.853
92	750.6153	13318.736
223	752.2825	13289.220
88	753.8585	13261.438
29	754.1733	13255.902
158	757.2191	13202.583
45	757.5537	13196.751
140	757.6560	13194.969
35	757.9025	13190.678
63	762.3883	13113.066
73	762.6921	13107.843
38	763.3246	13096.982
66	763.5103	13093.796
375	763.8004	13088.823
43	765.2272	13064.418
45	766.4897	13042.899
69	767.2595	13029.814
37	767.7199	13021.999
155	767.9132	13018.722
198	767.9402	13018.264
39	768.9792	13000.675
47	769.8012	12986.792
56	772.2456	12945.685
113	772.4666	12941.982
49	773.8867	12918.233
71	774.5024	12907.964
60	776.3144	12877.835
38	777.1857	12863.397
49	779.5477	12824.423
44	781.2968	12795.712
82	782.5620	12775.025
56	783.2238	12764.231
50	784.2957	12746.786
24	784.9334	12736.430
42	786.2916	12714.431
43	786.4036	12712.620
37	786.4540	12711.805
104	788.1467	12684.503
68	789.5788	12661.497
87	790.2552	12650.660
178	793.3122	12601.911
72	798.2174	12524.470

Tablo 4.1 (devamı):

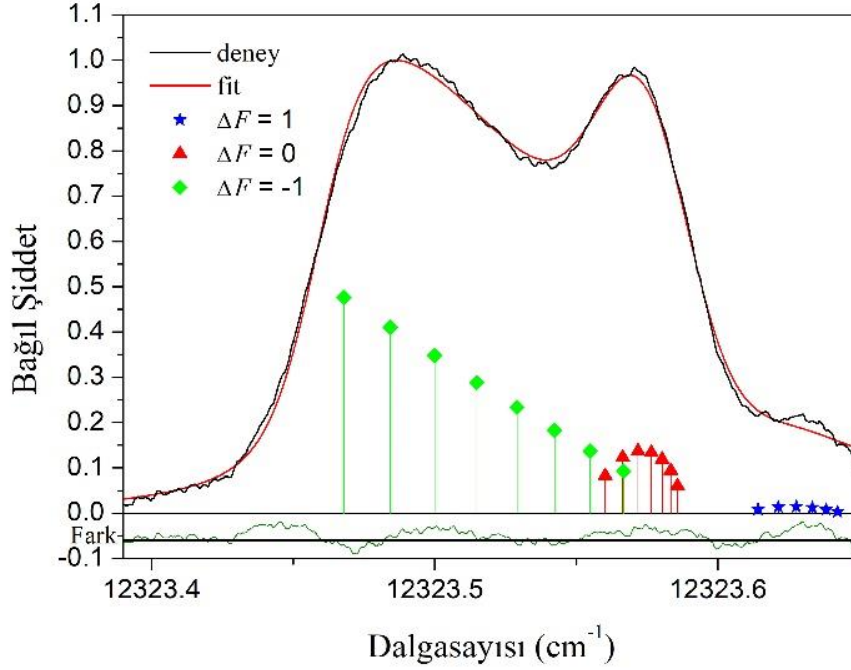
SNR	λ (nm)	σ (cm ⁻¹)
136	799.3499	12506.727
191	800.3170	12491.614
25	803.7878	12437.674
65	805.6688	12408.637
90	806.0773	12402.347
43	806.3026	12398.882
33	807.5474	12379.769
484	809.2634	12353.520
53	809.4437	12350.767
32	809.8747	12344.196
36	810.3693	12336.661
62	811.2351	12323.494
178	811.5311	12319.000
116	811.9105	12313.243
35	812.5894	12302.956
188	813.3581	12291.329
29	814.1554	12279.292
31	820.6011	12182.839
27	823.1913	12144.506
29	823.6596	12137.602
30	824.4325	12126.223
44	824.9087	12119.222
34	827.7305	12077.907
31	827.7559	12077.537
25	829.6161	12050.455
69	831.5022	12023.121
52	833.9519	11987.805
73	842.4641	11866.682
75	846.1436	11815.079
59	846.6624	11807.839
31	850.1185	11759.835

Tablo 4.1'in ilk sütununda şiddet gürültü oranı (SNR), ikinci sütununda nm cinsinden dalgaboyu ve son sütunda ise cm⁻¹ cinsinden dalgasayısı verildi.

İlk defa bulunan enerji seviyelerinin varlığı en az iki çizginin ölçülmesi ile kanıtlanmalıdır. Yeni bulunan seviyeleri parite ve J kuantum sayıları ile birlikte “Elements” programının seviyeleri içeren ‘levels’ giriş dosyasına eklendi. Geçiş kurallarına uygun olarak bu seviyeden mümkün tüm geçişler hesaplandı. Bu spektral geçişlerden laser dalgaboyu aralığında olanlar laser spektroskopik yöntemlerle incelendi ve en az iki çizginin ölçümü ile kanıtlandı.

✓ 49639.4 cm⁻¹, $J=9/2$ ince yapı enerji seviyesinin bulunma aşamaları

Ti:Sa laser bölgesinde $\lambda = 811.2351$ nm dalgaboyuna sahip ve SNR değeri 62 olan tanımsız çizginin OGS yöntemi ile spektrumu alındı.



Şekil 4.1: Dalga sayısı $\sigma = 12323.501$ cm⁻¹, dalgaboyu $\lambda = 811.2346$ nm olan 49639.433 cm⁻¹, $J = 9/2$ (yeni seviye) $\rightarrow$ 37315.932 cm⁻¹, $J = 11/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.

Daha sonra optogalvanik olarak gözlenen spektrumun en şiddetli pikinde laser dalgaboyu sabit tutularak monokromotör 370 nm - 700 nm aralığında 7 ayrı adımda tarandı. Bu taramada dalgaboyu aralıkları şu şekilde belirlendi: 370-400 nm, 400-450 nm, 450-500 nm, 500-550 nm, 550-600 nm, 600-650 nm, 650-700 nm. 400-450 nm aralığında negatif fazda, iki adet floresans çizgisi belirlendi.

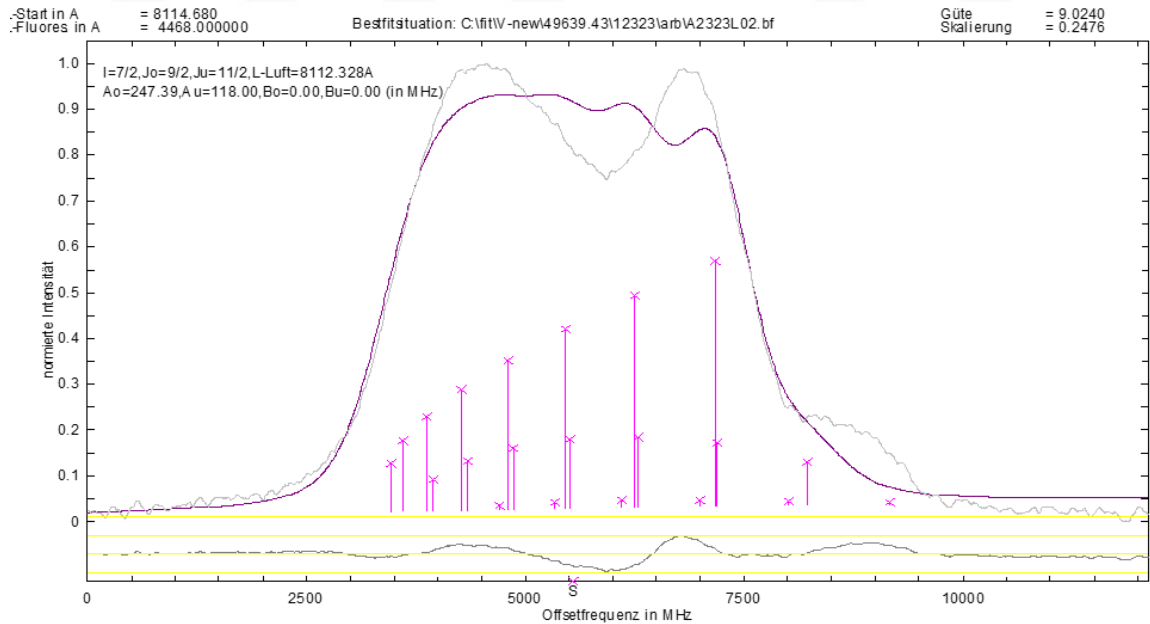
Dalgaboyları 446.97 nm ve 448.003 nm olan floresans çizgileri ile laser çizgisinin LIF spektrumu alındı ve her ikisi için de aynı hfs yapısının varlığı tespit edildi.

Her iki floresans çizgisi de literatürde tanımlıdır ve üst ince yapı enerji seviyeleri aynı olup; $37315.932 \text{ cm}^{-1}$, $J = 11/2$ dir. Bu seviyeden daha üst seviyeye geçişteki kurallardan biri de $\Delta J = 0, \pm 1$ kuralıdır. Bu nedenle yeni bulunan yeni ince yapı enerji seviyesinin J değeri $9/2$, $11/2$, $13/2$ olabilir.

$37315.932 \text{ cm}^{-1}$, $J = 11/2$ seviyenin hfs A sabiti (Güzelçimen ve diğ., 2014) referansında $A = 118(4)$ olarak verilmiştir. Ancak, bu seviyenin A sabitinin belirlendiği FT spektrumunda bulunan $\lambda = 446.970 \text{ nm}$ çizgisinin Fitter programı ile yapılan fit işlemi sonunda literatürde verilen bu A değerinin doğru olmadığı belirlendi. Bu çizgi yeniden analiz edildiğinde, manyetik dipol hfs A sabitinin değerinin $307.4(9) \text{ MHz}$ olduğu bulundu.

Analiz sonucunda spektral çizginin ağırlık merkezinin dalgaboyu ve dalga sayısı $\lambda = 811.2346 \text{ nm}$ ve $\sigma = 12323.501 \text{ cm}^{-1}$ olarak elde edildi.

Şekil 4.2’de dalgasayısı $\sigma = 12323.501 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 811.2346 \text{ nm}$ olan $[49639.4 \text{ cm}^{-1} J= 9/2 \text{ (yeni seviye)} \rightarrow 37315.932 \text{ cm}^{-1}, J = 11/2]$ geçiş için manyetik dipol hfs sabiti literatürden (Güzelçimen ve diğ., 2014) alınan değer kullanılarak yapılan analiz sonucunda fit işleminin yapılamadığı gösterildi.

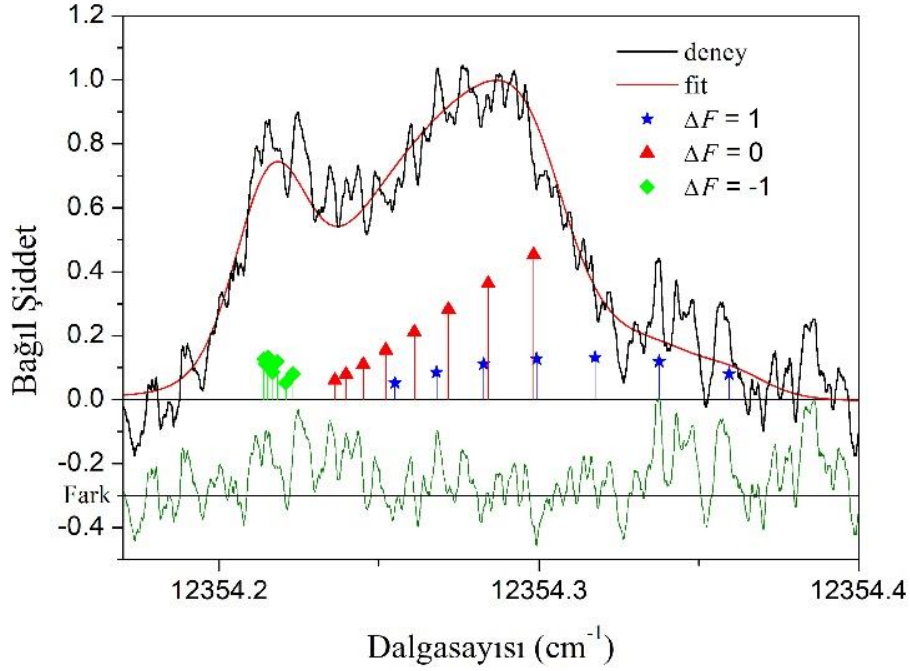


Şekil 4.2: Literatürden (Güzelçimen ve diğ., 2014) alınan değer kullanılarak yapılan analiz sonucu.

Bu yeni A değeri ile $\lambda = 811.2346 \text{ nm}$ ($\sigma = 12323.501 \text{ cm}^{-1}$) laser çizgisinin hfs analizi sonucunda laser çizgisinin bilinmeyen üst seviyesi için $49639.433 \text{ cm}^{-1}$ olarak elde edildi.

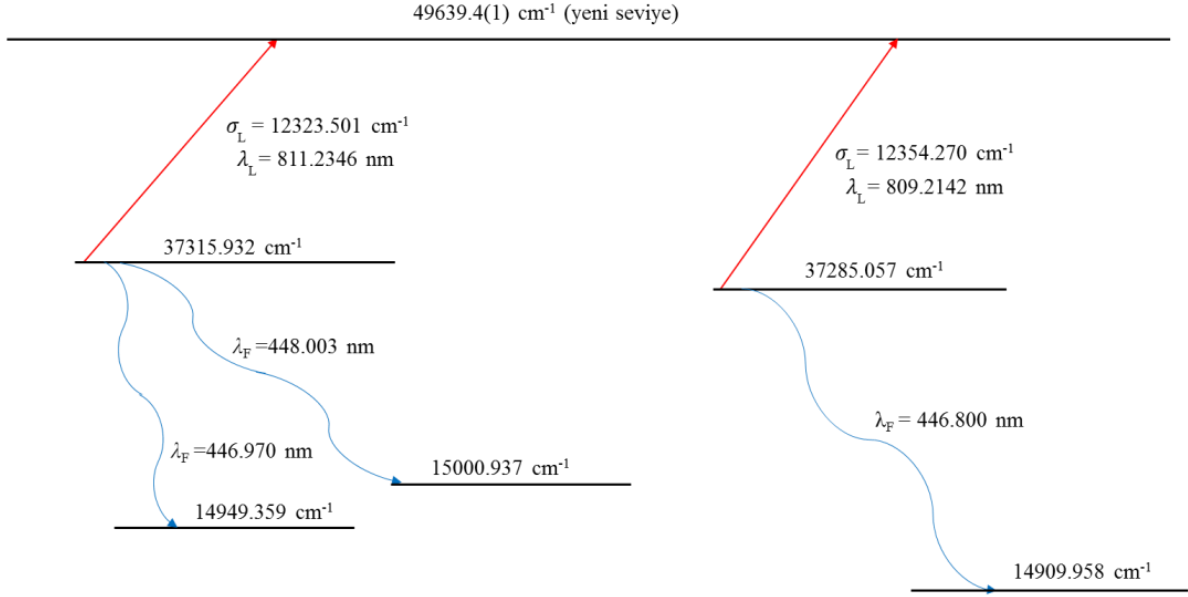
Bu bulunan enerji seviyesinden laser dalgaboyu aralığındaki çizgilerden $\lambda = 809.2142$ nm (12354.270 cm^{-1}) çizgisinin optogalvanik spektrumu ölçülebildi. Floresans taraması sonucunda bulunan negatif fazlı $\lambda = 446.800$ nm deki floresans çizgisi ile LIF spektrumu laserin bu dalgaboyundaki tarama probleminden dolayı sadece bir kez ölçülebildi (Şekil 4.3).

Negatif fazlı $\lambda = 446.800$ nm floresans çizgisinin tanımlı olup, üst ince yapı enerji seviyesi 37285.057 cm^{-1} , $J = 9/2$ 'dir. Buna bağlı olarak laser çizgisinin üst seviyenin J değeri geçiş kuralına bağlı olarak $7/2$, $9/2$, $11/2$ olabilir. Bir önceki laser çizgisinin hfs analizi sonucunda bulunan J değeri ($J = 9/2$) ile yapılan fit sonucunda yeni seviye 49639.327 cm^{-1} olarak bulundu. Ayrıca diğer bir geçiş kuralı gereği enerji seviyelerinin paritelerinin farklı olması gerektirir.



Şekil 4.3: Dalgasayısı $\sigma = 12354.270$ cm^{-1} , dalgaboyu $\lambda = 809.2142$ nm olan 49639.327 cm^{-1} , $J = 9/2$ (yeni seviye) $\rightarrow$ 37285.057 cm^{-1} , $J = 9/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.

Sonuç olarak iki laser çizgisi ile yeni çift pariteli ince yapı enerjisi **$49639.4(1)$ cm^{-1} , $J = 9/2$** olarak keşfedildi. Şekil (4.4)'de yeni seviye bulunmasında göz önüne alınan tüm geçişler özetlendi. Geçişlerin verildiği bu şekilde, σ_L laser dalga sayısını, λ_L ise laser dalgaboyunu ve λ_F ise tarama sonucu bulunan floresans dalgaboyunu göstermektedir. Yapılan fit işlemleri sonucunda yeni bulunan seviyenin manyetik dipol hfs sabiti **$A = 283.3(1.4)$ MHz** olarak bulundu.



Şekil 4.4: 49639.4 cm⁻¹ yeni enerji seviyesinin bulunmasında göz önüne alınan tüm geçişler.

Fitter programı ile yapılan çizgi analizlerine ait veriler Tablo 4.2’de verildi.

Tablo 4.2: Fitter programı ile yapılan çizgi analizlerine ait veriler.

$\lambda = 811.2346 \text{ nm}$	$\sigma (\text{cm}^{-1})$	Yarı genişlik Voigt	G/V	A (MHz)	Fitter hatası	Fit kalitesi
	12323.516	1066.07	0.747	284.46	0.11	38.94
	12323.457	1001.65	0.533	283.52	0.156	22.77
	12323.516	1099.82	0.7	281.52	0.15	21.06
	12323.513	1262.97	0.786	287.62	0.28	14.95
ortalama değer	12323.501			284.28		
standart sapma	0.029			2.54		
$\lambda = 809.2142 \text{ nm}$	12354.270	824.18	0.877	282.26	0.57	5.24

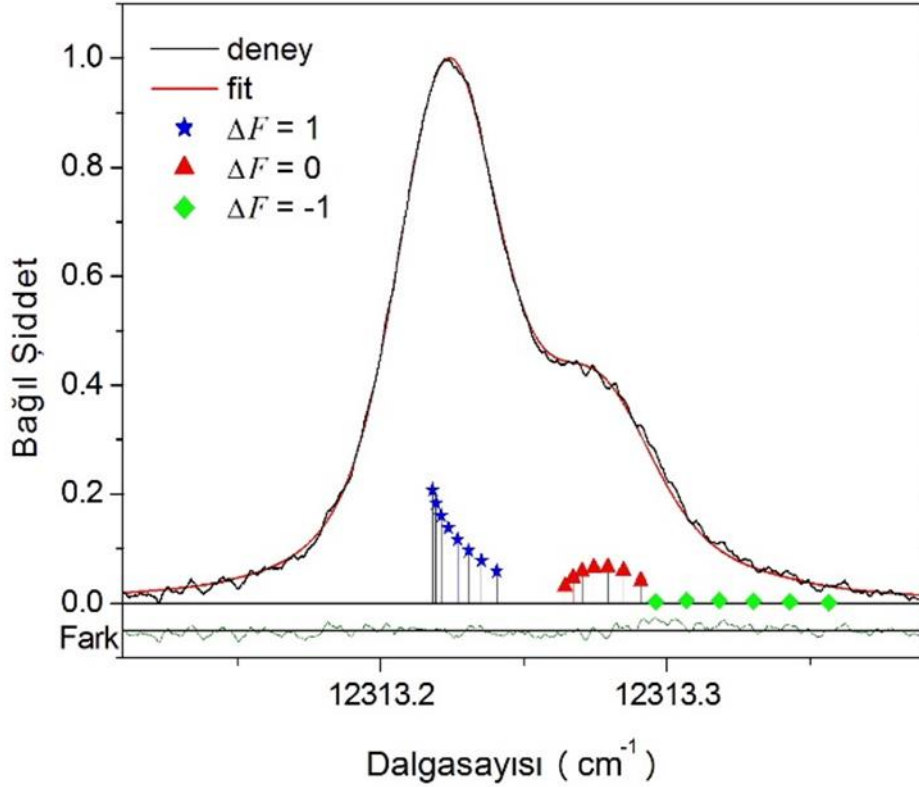
Yeni bulunan enerji seviyesine ait manyetik dipol hfs sabitinin belirlenmesi için yapılan fit işleminde, bilinen alt ince yapı enerji seviyesinin literatürden alınan (Güzelçimen ve diğerleri, 2014) manyetik dipol hfs sabiti değerleri sabit tutuldu (Tablo 4.3).

Tablo 4.3: Yeni bulunan enerji seviyesi ve bu seviyeye ait manyetik dipol hfs sabiti.

$\lambda \text{ (nm)}$	$\sigma (\text{cm}^{-1})$	SNR	$E_{\text{alt}} (\text{cm}^{-1})$	J_{alt}	yeni $E_{\text{üst}} (\text{cm}^{-1})$	$A_{\text{alt}} (\text{MHz})$	$A_{\text{üst}} (\text{MHz})$
$J=9/2$							
811.2346	12323.501	62	37315.93	11/2	49639.433	307.6(8)	284.3
809.2142	12354.270	-	37285.06	9/2	49639.327	229(14)	282.3
ortalama					49639.4		283.3
standart sapma					0.1		1.4

✓ 49717.55(2) cm⁻¹, $J = 11/2$ ince yapı enerji seviyesinin bulunma aşamaları

Bu enerji seviyesi, FT spektrumunda tanımlanamayan SNR değeri 116 olan $\lambda = 811.9105$ nm çizgisi incelenerek bulundu (Şekil 4.5).

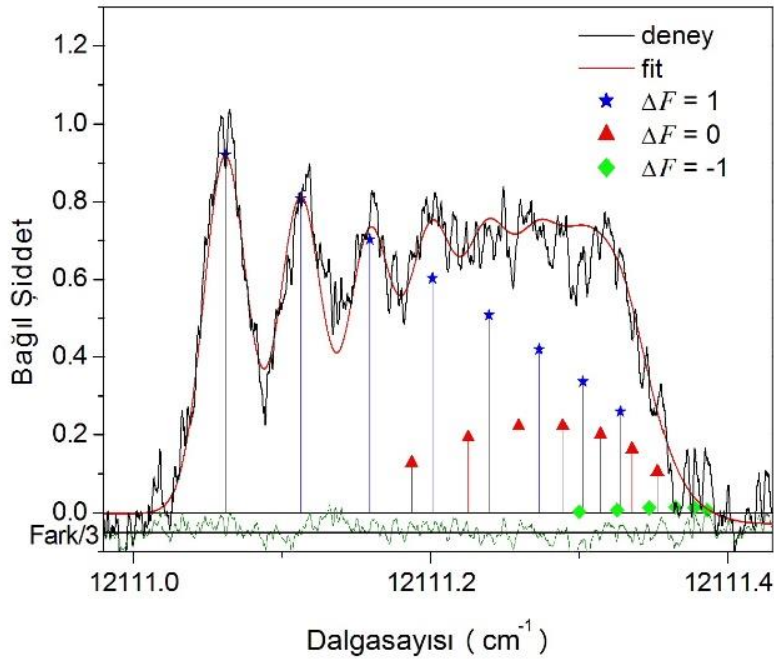


Şekil 4.5: Dalga sayısı $\sigma = 12313.231$ cm⁻¹, dalga boyu $\lambda = 811.9113$ nm olan 49717.56 cm⁻¹, $J = 11/2$ (yeni seviye) $\rightarrow$ 37404.329 cm⁻¹, $J = 13/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.

Bu çizginin alt ince yapı enerji seviyesinin enerjisi, negatif floresans çizgilerinden 37404.329 cm⁻¹, $J = 13/2$ olarak belirlendi. $\lambda = 811.9105$ nm deki spektral çizginin OG spektrumu alındı ve spektrumdaki en yüksek şiddete sahip bileşenen dalga boyunda laserin sabit tutulması ile yapılan floresans taraması sonucu 446.235 nm dalga boyuna sahip negatif fazlı bir floresans çizgisi belirlendi. Tanımlı olan bu floresans çizgisinin üst (laser çizgisinin alt enerji seviyesidir) ince yapı enerji seviyesinin enerjisi, 37404.329 cm⁻¹, $J = 13/2$ dir. Laser çizgisinin üst enerji seviyesinin J değeri 11/2, 13/2 veya 15/2 değerlerinden birini alabilir. Çizginin hfs spektrumu $J = 11/2$ ile fit edilebildi. Bu analiz sonucunda, Pickering'den alınan tabloda (Tablo 4.1)

$\lambda = 811.9105$ nm deki çizgisinin ağırlık merkezi $\lambda = 811.9113$ ($\sigma = 12313.231$ cm^{-1}) olarak bulundu. Ağırlık merkezine negatif floresans çizgisinin üst enerji seviyesi olan 37404.329 cm^{-1} eklenmesi ile yeni ince yapı enerji değeri 49717.56 cm^{-1} , $J = 11/2$, çift parite olarak belirlendi. Bu enerji seviyesi paritesi ve J değeri ile birlikte "Elements" programında seviyeleri içeren giriş dosyasına eklendi ve Ti:Sa laser bölgesindeki bu seviyeden olası dalgalı boyları $\lambda = 825.46$ nm ve $\lambda = 836.4263$ nm olarak bulundu.

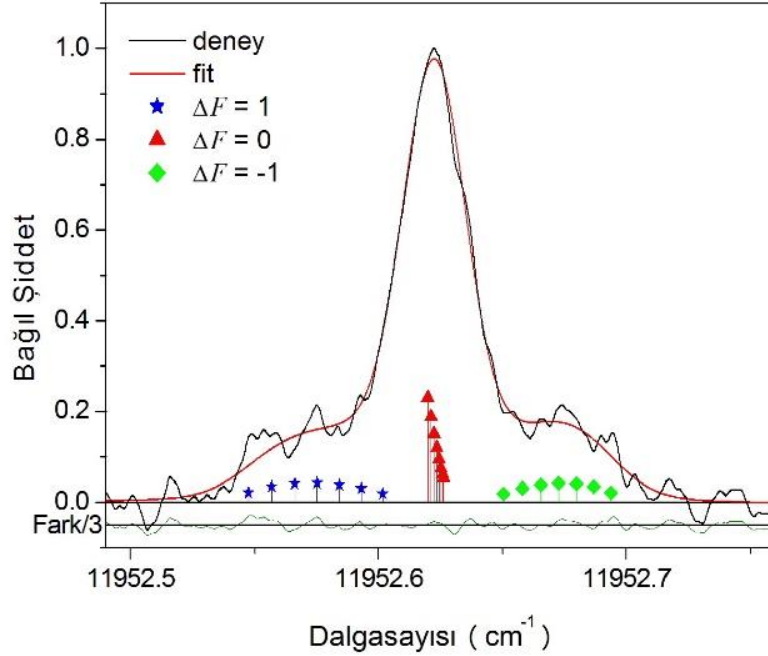
Dalgalı boyu ve dalga sayısı $\lambda = 825.46$ nm, $\sigma = 12111.164$ cm^{-1} olan ikinci laser çizgisinin floresans taraması sonucunda üst enerji seviyeleri 37606.365 cm^{-1} , $J = 13/2$ olan iki tane ($\lambda = 447.471$ nm ve $\lambda = 541.525$ nm) tanımlı negatif faza sahip floresans çizgisi bulundu. Laser çizgisinin üst seviyesinin J değeri bir önceki laser çizgisinde olduğu gibi $J = 11/2$ ile teorik spektrum ile deneysel spektrum örtüştü (Şekil 4.6). Bu laser çizgisinden yeni enerji seviyesi 49717.529 cm^{-1} , $J = 11/2$, çift pariteli olarak bulundu.



Şekil 4.6: Dalga sayısı $\sigma = 12111.164$ cm^{-1} , dalgalı boyu $\lambda = 825.457$ nm olan 49717.529 cm^{-1} , $J = 11/2$ (yeni seviye) $\rightarrow$ 37606.365 cm^{-1} , $J = 13/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.

Bulunan üçüncü $\lambda = 836.4052$ nm ($\sigma = 11952.642$ cm⁻¹) dalgaboyundaki laser çizgisinin incelemesinde sadece negatif fazlı floresans çizgisi bulundu. Bu çizginin tek pariteli üst seviyesinin ince yapı enerjisi 37764.923 cm⁻¹, $J = 11/2$ dir. Buradan hesaplanan yeni enerji seviyesinin değeri 49717.565 cm⁻¹, $J = 11/2$ çift parite olarak bulundu.

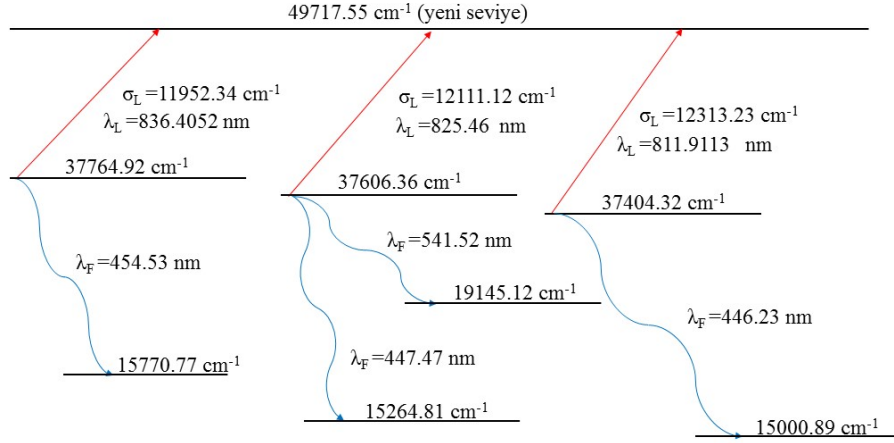
Her üç geçiş için yapılan analizler ve fit işlemleri sonucu yeni ince yapı enerji seviyesinin ağırlıklı ortalamasının **49717.55(2) cm⁻¹** olduğu ve J değerinin 11/2, manyetik dipol hfs sabiti **A = 242(8) MHz** olarak bulundu.



Şekil 4.7: Dalgasayısı $\sigma = 11952.642$ cm⁻¹, dalgaboyu $\lambda = 836.4052$ nm olan 49717.565 cm⁻¹, $J = 11/2$ (yeni seviye) $\rightarrow$ 37764.923 cm⁻¹, $J = 11/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.

Şekil 4.8’de yeni seviye bulunmasında göz önüne alınan tüm geçişler özetlendi.

Şekilde gösterilen tüm geçiş figürlerindeki σ_L laser dalga sayısını ve λ_L ise laser dalgaboyunu, λ_F ise tarama sonucu bulunan floresans dalgaboyunu ifade etmektedir.



Şekil 4.8: Yeni seviye bulunmasında göz önüne alınan tüm geçişler.

İkinci yeni ince yapı enerji seviyesinin bulunmasında incelenen tüm çizgilere ait bilgiler derlenerek Tablo 4.4’de verildi.

Tablo 4.4: Fitter programı ile yapılan çizgi analizlerine ait veriler.

$\lambda = 836.4052 \text{ nm}$	$\sigma \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	Yarı genişlik Voigt	G/V	A (MHz)	Fitter hatası	Fit kalitesi
	11952.641	939.63	0.874	241.41	1.54	12.63
	11952.643	882.89	0.897	244.46	1.88	10.37
	11952.641	933.67	0.915	251.22	1.95	9.78
	11952.641	903.26	0.836	253.53	1.95	9.66
ortalama değer	11952.642			247.66		
standart sapma	0.001			5.67		
$\lambda = 825.4575 \text{ nm}$						
	12111.176	977.56	0.819	245.63	0.38	5.33
	12111.146	1003.87	0.949	246.12	0.24	8.7
	12111.15	1019.44	0.896	243.8	0.27	7.99
	12111.187	1023.78	0.976	248.59	0.29	8.01
	12111.163	1087.4	0.896	240.85	0.33	9.55
ortalama değer	12111.164			245.00		
standart sapma	0.017			2.88		
$\lambda = 811.9112 \text{ nm}$						
	12313.23	1233.83	0.643	238.4	0.29	45.92
	12313.233	1192.15	0.985	226.01	1.46	7.89
	12313.231	1243.93	0.986	234.31	2.04	6.58
ortalama değer	12313.231			232.91		
standart sapma	0.002			6.31		

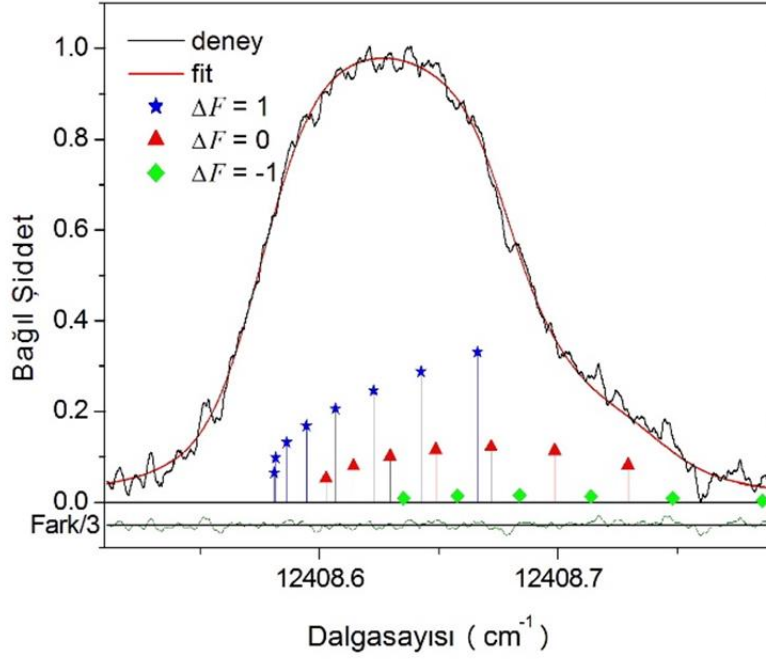
Yeni bulunan enerji seviyesine ait manyetik dipol hfs sabitinin belirlenmesi için yapılan fit işleminde, bilinen alt ince yapı enerji seviyesinin literatürden (Güzelçimen ve diğerleri, 2014) alınan manyetik dipol hfs sabiti değerleri sabit tutuldu (Tablo 4.5).

Tablo 4.5: Yeni bulunan enerji seviyesi ve bu seviyeye ait manyetik dipol hfs sabiti.

λ (nm)	σ (cm ⁻¹)	SNR [ref]	E_{alt} (cm ⁻¹)	J_{alt}	yeni $E_{üst}$ (cm ⁻¹)	A_{alt} (MHz)	$A_{üst}$ (MHz)	
$J = 11/2$								
836.4052	11952.642	116	37764.923	J=11/2	49717.565	246(25)	247.7	
825.4575	12111.164		37606.365	J=13/2	49717.529	375.9(6)	245.0	
811.9112	12313.231		37404.329	J=13/2	49717.560	218(5)	232.9	
			ortalama		49717.55		241.9	
			standart sapma		0.02		7.9	

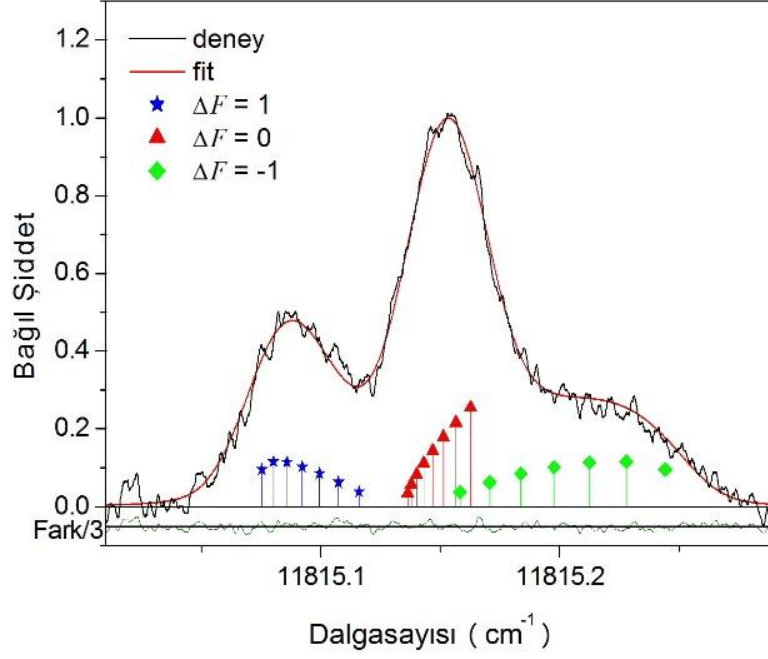
✓ **49938.94 cm⁻¹, J = 9/2 ince yapı enerji seviyesinin bulunma aşamaları**

Tanımlanamayan çizgilerden biri olan SNR değeri 65 ve $\lambda = 805.6688$ nm dalgaboyuna sahip V çizgisinin OGS spektrumu alındı. Floresans taraması sonucunda bir adet negatif ($\lambda = 445.775$ nm) ile bir adet pozitif fazlı ($\lambda = 417.994$ nm) iki floresans çizgisi bulundu. Her iki çizgi ile alınan LIF spektrumlarının hfs yapısının aynı olduğu gözlemlendi. Literatürde negatif fazlı floresans çizgisinin tanımlı olup ve üst enerji seviyesinin tek pariteli 37530.314 cm⁻¹, $J = 11/2$ olduğu belirlendi. Pozitif fazlı floresans çizgisinin tanımlanmadığı tespit edildi. Laser çizgisinin hem her iki floresans çizgisi ile alınan hfs spektrumunun analizi ağırlık merkezi $\sigma = 12408.630$ cm⁻¹ olarak bulundu (Şekil 4.9). Sonuç olarak yeni ince yapı enerji seviyesinin değeri 49938.944 cm⁻¹, $J = 9/2$ ve paritesi çift olarak belirlendi.



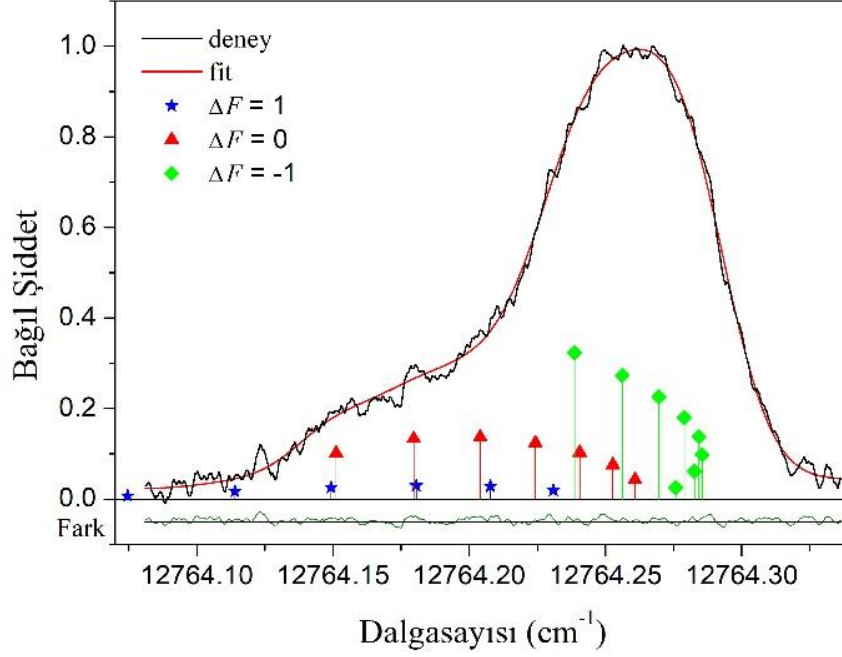
Şekil 4.9: Dalgasayısı $\sigma = 12408.630 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 805.6688 \text{ nm}$ olan $49938.944 \text{ cm}^{-1}$, $J = 9/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 37530.314 \text{ cm}^{-1}$, $J = 11/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.

Bulunan bu yeni seviyenin “Elements” programında seviyelerin yer aldığı giriş dosyasına kaydedilip laser bölgesindeki çizgiler incelendiğinde $\lambda = 846.1382 \text{ nm}$ ve $\lambda = 783.2221 \text{ nm}$ de iki spektral çizgi bulundu. Bunlardan birincisinin Pickering’in tablosunda SNR si 75 olan çizgi olduğu görüldü. Yapılan floresans taraması sırasında negatif fazlı floresansa rastlanmadı. Sadece $\lambda = 417.994 \text{ nm}$ de pozitif floresans tespit edildi. Bu floresans çizgisi bir önceki aşamada bulduğumuz yeni seviye ($49938.944 \text{ cm}^{-1}$, $J = 9/2$) den alt seviyelere geçişlerdeki hesaplanan çizgilerden biri olup alt enerji seviyesi $38123.795 \text{ cm}^{-1}$ bilinen bir seviyedir. Fit işlemi sonucunda yeni enerji seviyesi için $49938.948 \text{ cm}^{-1}$ bulundu.



Şekil 4.10: Dalgasayısı $\sigma = 11815.153 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 846.1382 \text{ nm}$ olan $49938.948 \text{ cm}^{-1}$, $J = 9/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 38123.795 \text{ cm}^{-1}$, $J = 9/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.

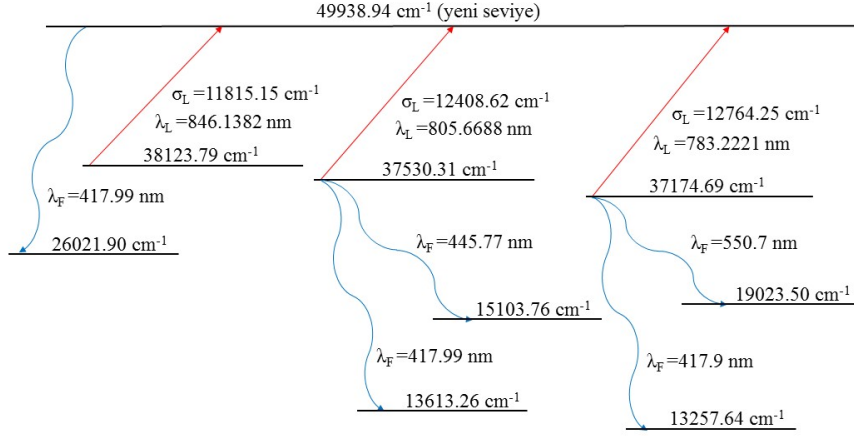
Üçüncü laser çizgisi $\lambda = 783.2221 \text{ nm}$ dalgaboyuna sahip olup, negatif fazlı $\lambda = 550.775 \text{ nm}$ deki floresan çizgisi (üst enerji seviyesi $37174.691 \text{ J} = 7/2$) ile alınan hfs spektrumunun analizi sonucunda (Şekil 4.11) yeni enerji seviyesi $49938.942 \text{ cm}^{-1}$ olarak bulundu.



Şekil 4.11: Dalgasayısı $\sigma = 12764.251 \text{ cm}^{-1}$, dalgaboyu $\lambda = 783.2221 \text{ nm}$ olan $49938.942 \text{ cm}^{-1}$, $J = 9/2$ (yeni seviye) $\rightarrow 37174.691 \text{ cm}^{-1}$, $J = 7/2$ spektral geçişine ait fit edilen spektrum.

Sonuç olarak 3 laser çizgisi ile yeni ince yapı enerji değeri **$49938.940(3) \text{ cm}^{-1}$** , $J = 9/2$ olarak bulundu. Yeni seviyenin manyetik dipol hfs sabiti **$326.5(2.2) \text{ MHz}$** olarak belirlendi.

Şekil 4.12’de yeni seviye bulunmasında incelenen tüm geçişler özetlendi. Tüm geçişlerde yer alan σ_L laser dalga sayısını ve λ_L ise laser dalgaboyunu, λ_F ise tarama sonucu bulunan floresans dalgaboyunu ifade etmektedir.



Şekil 4.12: 49938.94 cm^{-1} yeni enerji seviyesinin bulunmasında göz önüne alınan tüm geçişler.

Üçüncü yeni ince yapı enerji seviyesinin bulunmasında incelenen tüm çizgilere ait bilgiler derlenerek Tablo 4.6'da verildi.

Tablo 4.6'nın ilk kolonunda nm cinsinden dalgaboyu, cm^{-1} cinsinden dalgasayısı, üçüncü kolonda Voigt yarıgenişliği, dördüncü kolonda Gauss ve Voigt oranı, beşinci kolonda fit işlemi sonunda bulunan MHz cinsinden manyetik dipol hfs sabiti, altıncı kolonda program tarafından bulunan hata değeri, son kolonda ise fitin ne kadar düzgün yapıldığını gösteren fit kalitesi verildi.

Tablo 4.6: Fitter programı ile yapılan çizgi analizlerine ait veriler.

$\lambda = 846.1382 \text{ nm}$	$\sigma (\text{cm}^{-1})$	Yarı genişlik Voigt	G/V	A (MHz)	Fitter hatası	Fit kalitesi
	11815.151	1075.31	0.927	327.17	0.66	10.8
	11815.151	1021.78	0.923	327.52	0.66	11.43
	11815.156	1025.69	0.923	326.18	0.66	11.55
	11815.154	1081.00	0.927	324.88	0.67	13.04
	11815.154	1037.92	0.924	327.95	0.67	13.16
ortalama değer	11815.153			326.74		
standart sapma	0.002			1.23		
$\lambda = 805.6692 \text{ nm}$						
	12408.63	1275.92	0.681	324.08	0.15	31.12
	12408.63	1287.37	0.684	323.99	0.13	37.59
	12408.63	1332.88	0.697	325.25	0.20	24.84
	12408.63	1238.58	0.669	323.50	0.17	27.88
ortalama değer	12408.630			324.21		
standart sapma	0.000			0.74		
$\lambda = 7832.2378$						
	12764.249	1153	0.734	333.52	1.09	7.46
	12764.247	1083.92	0.841	326.61	0.99	6.88
	12764.251	992.06	0.715	331.35	0.37	13.15
	12764.252	1150.98	0.842	329.75	0.47	12.33
	12764.251	1190.2	0.837	329.09	0.51	12.57
	12764.251	1102.74	0.774	324.32	0.61	9.25
	12764.251	1133.08	0.945	326.23	0.25	22.51
	12764.250	1125.12	0.995	327.93	0.23	26.19
ortalama değer	12764.251			328.60		
standart sapma	0.002			2.97		

Yeni bulunan üçüncü enerji seviyesine ait manyetik dipol hfs sabitinin belirlenmesinde yapılan fit işlemlerinde, bilinen alt ince yapı enerji seviyesinin literatürden (Güzelçimen ve diğerleri, 2015; Lefèbvre ve diğ., 2002) alınan manyetik dipol hfs sabiti değerleri sabit tutuldu (Tablo 4.7).

Tablo 4.7: Yeni bulunan enerji seviyesi ve bu seviyeye ait manyetik dipol hfs sabiti.

$\lambda \text{ (nm)}$	$\sigma (\text{cm}^{-1})$	SNR	$E_{\text{alt}} (\text{cm}^{-1})$	J_{alt}	yeni $E_{\text{üst}} (\text{cm}^{-1})$	$A_{\text{alt}} (\text{MHz})$	$A_{\text{üst}} (\text{MHz})$
846.1382	11815.153	75	38123.795	9/2	49938.948	305(9)	326.7
805.6692	12408.630	65	37530.314	11/2	49938.944	210.2(1.2)	324.2
783.2221	12764.251		37174.691	7/2	49938.942	449.7(6)	328.6
				ortalama		49938.94	326.5
				standart sapma		0.003	2.2

5.TARTIŞMA VE SONUÇ

Vanadyum elementinin laser spektroskopik yöntemlerden olan LIF ve OGS yöntemleri kullanılarak 3 tane çift pariteli ince yapı enerji seviyesi ilk defa bu çalışmada bulundu. Yeni bulunan seviyeleri içeren çizgilerin sınıflandırılması ilk defa bu çalışmada yapıldı. Yeni keşfedilen ince yapı enerji seviyelerinin manyetik dipol hfs sabitleri elde edildi.

Ayrıca, yapılan spektrum analizi sonucu literatürde mevcut olan bir ince yapı enerji seviyesinin manyetik dipol hfs sabiti değeri revize edildi.

Yeni bulunan bir enerji seviyesinin gerçekten varlığından emin olmak için en az iki çizgi ile kanıtlandı.

Laser ile gidilen spektral çizgilerin hfs spektrumlarının ağırlık merkezlerinin dalgasayısı Fitter programı ile yapılan aşırı ince yapı analizi sonucunda belirlendi. Laser çizgilerinin yeni bulunan seviyelerinin enerji değerleri, literatürden iyi bilinen alt enerjisi seviyesi ile laser geçişinin hfs analizi sonucunda bulunan dalgasayısının toplanması ($E_{üst} = E_{alt} + \sigma$) ile belirlendi.

Yeni bulunan çift pariteli ince yapı enerji seviyelerine ait tüm bilgiler çizgi sınıflandırılmaları ile birlikte Tablo 5.1’de verildi.

Tablo 5.1: Yeni bulunan çift pariteli ince yapı enerji seviyelerine ait tüm bilgiler çizgi sınıflandırılmaları ile birlikte.

Yeni çift pariteli üst seviye			İncelenen çizgiler		Tek pariteli alt seviye			
J	E (cm ⁻¹)	A (MHz)	$\lambda_{\text{hava}}(\text{nm})$	SNR	J	E (cm ⁻¹)	A (MHz)	LIF λ (nm)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
9/2	49639.4(1)	283.3(1.4)	811.2346 809.2142	62 YÇ	11/2 9/2	37315.932 37285.057	307.4(9)* 229(14)	446.970(-), 448.003(-) 446.800(-),
11/2	49717.55(2)	242(8)	836.4052 825.4575 811.9112	YÇ YÇ 116	11/2 13/2 13/2	37764.923 37606.365 37404.329	246(25) 375.9(6) 218(5)	454.539(-) 447.471(-), 541.525(-) 446.235(-)
9/2	49938.940(3)	326.5(2.2)	846.1382 805.6692 783.2221	75 65 YÇ	9/2 11/2 7/2	38123.795 37530.314 37174.691	305(9) 210.2(1.2) 449.7(6)	417.994, 445.775(-), 417.994, 550.775(-), 417.994

Tablo 5.1'deki * işaretinin anlamı; $37315.932 \text{ cm}^{-1}$, $J = 11/2$ ince yapı enerji seviyesinin revize edilmiş manyetik dipol hfs sabitidir.

Tablo 5.1'deki kolonları anlamları aşağıda verildi:

- ✓ 1: Yeni bulunan ince yapı enerji seviyesinin toplam açısal momentum kuantum sayısı.
- ✓ 2: Yeni bulunan ince yapı enerji seviyesinin cm^{-1} cinsinden enerji değeri.
- ✓ 3: Yeni bulunan ince yapı enerji seviyesinin bu çalışmada belirlenen ve MHz cinsinden verilen manyetik dipol hfs sabiti değerleri.
- ✓ 4: Daha önce sınıflandırılmamış çizgilerin nm cinsinden dalga boyları.
- ✓ 5: FT spektrumundaki SNR değeri. Elements programında hesaplanan çizgiler “yeni çizgi” olarak tanımlandı ve burada kısaca YÇ olarak belirtildi.
- ✓ 6: Bilinen ince yapı enerji seviyesinin toplam açısal momentum kuantum sayısı.
- ✓ 7: Bilinen ince yapı enerji seviyesinin cm^{-1} cinsinden enerji değeri.
- ✓ 8: Bilinen ince yapı enerji seviyesinin literatürden alınan ve MHz cinsinden verilen manyetik dipol hfs sabiti değerleri.
- ✓ 9: Çizgi LIF yöntemiyle ölçülmüş ise floresans çizgisi verildi. Burada negatif floresansları belirtmek için (-) işareti kullanılırken pozitif floresanslar için işaret kullanılmadı. Optogalvanik spektroskopi tekniği ile ölçülenler OGS olarak belirtildi.

Bu çalışmada bulunan yeni ince yapı enerji seviyeleri yarı deneysel ince yapı parametrik enerji hesaplamalarında yararlı olacaktır. Ayrıca bu bulunan seviyeler atom fiziğine yeni veriler kazandırmakla birlikte, astrofizik çalışmalarında, yıldızlardan alınan spektrumlarda tanımlanamayan spektral çizgiler bu yeni ince yapı enerji seviyeleri kullanılarak tanımlanabilecektir.

Pickering'den elde edilen tabloda diğer spektral bölgelerde de tanımlanmamış çizgiler mevcuttur. Bu çalışma kapsamında sadece Ti:Sa laserin 750-850 nm bölgesi çalışılmıştır. Ancak laserin aynaları değiştirilerek diğer laser dalga boyu aralığındaki, örneğin 690-750 nm, çizgiler incelenerek yeni enerji seviyeleri bulunabilir.

KAYNAKLAR

- Babcock, H.D., 1911, The Zeeman Effect for Vanadium, *Astrophysical Journal*, 34, 209.
- Barbieri, B., Beverini, N., Sasso, A., 1990, Optogalvanic Spectroscopy, *Rev. Mod. Phys.*, 62, 603.
- Başar, Gü., Güzelçimen, F., Öztürk, İ.K., Er, A., Bingöl, D., Kröger, S., Başar, Gö., 2017, Hyperfine Structure Measurements of Neutral Vanadium by Laser-induced Fluorescence Spectroscopy in the Wavelength Range from 750 nm to 860 nm, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 202, 193-199.
- Başar, Gü., Güzelçimen, F., Öztürk, İ.K., Bingöl, D., Kröger, S., Başar, Gö., 2018, Hyperfine Structure Measurements of Neutral Vanadium by Inter-modulated Laser-induced Fluorescence Spectroscopy in the Wavelength Range from 800 nm to 830 nm, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 219, 1-6.
- Bauche-Amoult, C., 1971, Effects of Configuration Interaction on Atomic Hyperfine Structure, *Proceedings of the Royal Society A*, 322, 361.
- Bauche-Amoult, C., 1973, Effects of Configuration Interaction on Atomic Hyperfine Structure in $4d^1$ Configurations, *Journal de Physique*, 34, 301.
- Berglund, M., Wieser, M.E., 2011, Isotopic Compositions of the Elements 2009 (IUPAC Technical Report), *Pure Appl. Chem.*, 83(2), 397-410.
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia, 2021, *vanadium*, <https://www.britannica.com/science/vanadium>, [Ziyaret Tarihi: 14 Ocak 2022].
- Childs, W. J., Goodman, L.S., 1967, Hyperfinestructure of Nine Levels in Two Configuration of $51V$, I.Experimental, *Physical Review*, 156, 64-70.
- Childs, W. J., Poulsen, O., Goodman, L.S., Crosswhite, H., 1979, Laser-Rf Double-Resonance Studies of the Hyperfinestructure of $51V$, *Physical Review, A*, Vol.19, 168-176.
- Colón, C., de Andrés-García, M.I., Isidoro-García, L., Moya, A., 2020, Theoretical Stark Broadening Parameters for UV–Blue Spectral Lines of Neutral Vanadium in the Solar and Metal-poor Star HD 84937 Spectra, *Atoms*, 8(4), 64.
- Cowan, J.J., Sneden, C., Roederer, I.U., Lawler, J.E., Den Hartog, E.A., Sobeck, J.S., Boesgaard, A.M., 2020, Detailed Iron-peak Element Abundances in Three Very Metal-poor Stars, *The Astrophysical Journal*, 890(2), 119.
- Çevik, P., Eraslan, O., 2013, Diş Hekimliğinde Korozyon, *Klinik Bilimler Dergisi*, 7(1), 1391-1398.
- Demtröder, W., 2006, *Atoms, Molecules and Photons, an Introduction to Atomic, Molecular and Quantum Physics*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 13 978-3-540-20631-6.

- Edmunds, M.G., 1973, Calculation of Hyperfine Structure of Scandium and Vanadium for Stellar Spectral Analysis, *Astron. and Astrophys*, 23, 311-316.
- El-Kashef, H., Ludwig, N., 1992, High Precision Laser-RF Spectroscopic Measurements Hyperfine Structure of Vanadium-51, *Physica. Scripta B*, 179, 103.
- Gough, D.S., Hannaford, P., Lowe, R.M., Willis, A.P., 1985, Hyperfine Structure in ^{51}V Using Laser Saturation Spectroscopy in a Hollow-Cathode Discharge, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 18, 3895-3900.
- Güzelçimen, F., Başar, G., Öztürk, İ.K., Kröger, S., 2011, Hyperfine Structure of the $3d^34s4p$ ^6G Multiplet of Atomic Vanadium, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 44, 215001.
- Güzelçimen, F., Yapıcı, B., Demir, G., Er A., Öztürk, İ.K., Başar, Gö., Kröger, S., Tamanis, M., Ferber, R., Docenko, G., Başar, Gü., 2014, Hyperfine Structure Constants of Energetically High-Lying Levels of Odd Parity of Atomic Vanadium, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 214(1), 9.
- Güzelçimen, F., Er, A., Öztürk, İ.K., Başar, Gö., Kröger, S., Tamanis, M., Ferber, R., 2015, Investigation of the Hyperfine Structure of Weak Atomic Vanadium Lines by Means of Fourier Transform Spectroscopy, *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, 48(11), 115005.
- Johann, U., Dembczynski, J., Ertmer, W., 1981, Experimental Evidence for Far Configuration Mixing Effects on Off-Diagonal Hfs Interaction Between the $(3d+4s)^{N+2}$ Configurations of Free Atoms, *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei*, 303, 7-12.
- Kopfermann, H., Rasmussen, E., 1936, Über die Hyperfein Structur Einiger Vanadiummultiplette, *Zeitschrift für Physik*, 98, 624-637.
- Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2021). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.9), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2022, May 25]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Lawler, J.E., Wood, M.P., Den Hartog, E.A., Feigenson, T., Sneden, N., Cowan, J.J., 2014, Improved V I $\log(gf)$ Values and Abundance Determinations in the Photospheres of the Sun and Metal-poor Star HD 84937, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 215, 20.
- Lefebvre, P.H., Garnir, H. P., Biemont, E., 2002, Hyperfine Structure of Neutral Vanadium Lines and Levels, *Physica. Scripta*, Vol. 66, 363-366.
- Ma, H., Liu, M., Xu, Y., Pan, L., Dai, Z., 2022, Hyperfine Structure Constants for Neutral and Singly Ionized Vanadium by Fourier Transform Spectroscopy Data, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 280, 108085.
- Meggers, W.F., Russell, H.N., 1936, Term Analysis of The First Spectrum of Vanadium (V I), *Jour. Research Natl. Bur. Standarts*, 17, 125.

- Murakawa, K., 1956, The Quadrupole Moment of ^{51}V , *Journal of the Physical Society of Japan*, 11, 422-425.
- Murakawa, K., 1966, Quadrupole Moment of ^{51}V , *Journal of the Physical Society of Japan*, 21, 1466-1466.
- Ollsen, G., Rosen, A., 1982, Relativistic Self-Consistent-Field Calculations of the Hyperfine Structure in the 3d-Shell Atoms, *Physical Review A*, 25, 658.
- Ou, X., Roederer, I.U., Sneden, C., Cowan, J.J., Lawler, J.E., Shectman, S.A., Thompson, I.A., 2020, Vanadium Abundance Derivations in 255 Metal-poor Stars, *The Astrophysical Journal*, 900, 106.
- Palmeri, P., Biemont, B., Aboussaid, A., Godefroid, M., 1995, Hyperfine Structure of Infrared Vanadium Lines, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 28, 3741-3752.
- Palmeri, P., Biemont, E., Quinet, P., Dembczynski, J., Szawiola, G., 1997, Term Analysis and Hyperfine Structure in Neutral Vanadium, *Physica. Scripta*, 55, 586-598.
- Rosen, A., 1973, Relativistic Effects in the Magnetic Hyperfine Structure of the $3d^N 4s^2$ Atoms, *Physica. Scripta*, 8, 154.
- Rosen, A., 1973, On the Evaluation of Electric Quadrupole Moments from Experimental Hyperfine Interaction Constants, *Physica. Scripta*, 8, 159.
- Rosner, S.D., Holt, R.A., 2016, Hyperfine Structure and Isotope Shifts in Mo II, *Canadian Journal of Physics*, 94(11), 1195-1199.
- Saloman, E.B., Kramida, A., 2017, Critically Evaluated Energy Levels, Spectral Lines, Transition Probabilities, and Intensities of Neutral Vanadium (V I), *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, 231(18).
- Sefström, N.G., 1831, Ueber das Vanadin, ein neues Metall, gefunden im Stangeneisen von Eckersholm, einer Eisenhütte, die ihr Erz von Taberg in Småland bezieht, *Ann. Phys. Chem.*, 97, 43-49.
- Sneden, C., Cowan, J.J., Kobayashi, C., Pignatari, M., Lawler, J.E., Den Hartog, E.A., Wood, M.P., 2016, Iron-Group Abundance in the Metal-Poor Main-Sequence Turnoff Star HD-84937, *The Astrophysical Journal*, 817, 53.
- Sobolewski, Ł.M., Windholz, L., Kwela, J., Drozdowski, R., 2019, LIF spectra of Magnetic Splitting of Lines of Atomic Vanadium, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 237, 106639.
- Sobolewski, Ł.M., Windholz, L., Kwela, J., 2020, Laser Spectroscopy Used in the Investigation of the Zeeman - Hyperfine Structure of Vanadium, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 242, 106769.

- Sugar, J., Corliss, C., 1978, Energy Levels of Vanadium, V I through V XXIII, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 7, 1191-262.
- Thorne, A.P., Pickering, J.C., Semeniuk, J., 2011, The Spectrum and Term Analysis of VI, *Astrophysical Journal Supplement*, 192, 11.
- Unkel, P., Buch, P., Dembczynski, J., Ertmer, W., Johann, U., 1989, Sternheimer Free Determination of the ^{51}V Nuclear Quadrupole Moment from Hyperfine Structure Measurements, *Zeitschrift für Physik D.*, 11, 259-271.
- Whaling, W., Hannaford, P., Lowe, R.M., Biémont, E., Grevesse, N., 1985, Absolute Transition Probabilities in Vanadium I and The Solar Abundance of Vanadium, *Astron. Astrophys.*, 153, 109-115.
- Windholz, L., Guthöhrlein, G. H., 2003, Class-LW bilgisayar programı, *Physica Scripta*, 105, 55.
- Wood, M.P., Lawler, J.E., Den Hartog, E.A., Sneden, N., Cowan, J.J., 2015, Improved V II $\log(gf)$ Values, Hyperfine Structure Constants, and Abundance Determinations in The Photospheres of The Sun and Metal-Poor Star HD 84937, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 214, 18.
- Woosley, S.E., Arnett, W.D., Clayton, D.D., 1973, Explosive burning of oxygen and silicon, *The Astrophysical Journal Supplement*, 26, 231-312.
- Zeiser, A. et al., 2019, New version of the program Fitter for fitting atomic hyperfine structure in optical spectra including the calculation of confidence intervals, henüz yayınlanmamış.

ÖZGEÇMİŞ

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

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	09.02.2017

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