



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Yüksek Lisans Tezi

BİR KERE İYONİZE OLMUŞ LANTAN ATOMUNUN İNCE YAPI
ENERJİ SEVİYELERİNİN İNCELENMESİ

Mehdi TONKA

Fizik Anabilim Dalı

Atom ve Molekül Fiziği Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Feyza GÜZELÇİMEN

Temmuz, 2019

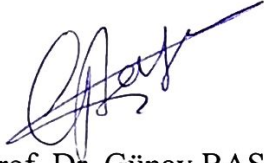
İSTANBUL

Bu çalışma, 1.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Atom ve Molekül Fiziğı Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



Doç. Dr. Feyza GÜZELÇİMEN(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi



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



Doç. Dr. Barış KINACI
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi



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.

ÖNSÖZ

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Atom ve Molekül Fiziği Programında, “Bir Kere İyonize Olmuş Lantan Atomunun İnce Yapı Enerji Seviyelerinin İncelenmesi” konulu yüksek lisans tezi olarak hazırlandı.

Lisansüstü öğrenimim süresince bana gösterdiği her türlü desteği için değerli danışman hocam Doç.Dr. Feyza GÜZELÇİMEN’e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Deneysel ve teorik bilgilerini her zaman bana aktaran, çalıştığım konuda benim en iyi şekilde yetişmemi sağlayan değerli hocalarım Prof.Dr. Gönül BAŞAR, Doç.Dr. İpek KANAT ÖZTÜRK’e çok teşekkür ederim.

Tezimin analiz sürecinde yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Avusturya Graz Teknik Üniversitesi Deneysel Fizik Enstitüsü emekli öğretim üyelerinden Prof.Dr. Laurentius WINDHOLZ’a ile Berlin Bilim ve Teknik Yüksekokulu öğretim üyelerinden Prof.Dr. Sophie KRÖGER’e teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca bana her konuda destek olan, hep yanımda hissettiğim aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz 2019

Mehdi TONKA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	10
3.1. NÖTR VE İYONİZE LANTAN ATOMU	10
3.2. ATOMİK YAPI	12
3.2.1. Konfigürasyon	12
3.2.2. Parite.....	13
3.2.3. İnce Yapı	14
3.2.4. Aşırı İnce Yapı	16
3.2.5. Seçim Kuralları.....	18
3.3. ÇİZGİ GENİŞLEMELERİ.....	19
3.4. LA-AR FOURİER TRANSFORM SPEKTRUMU	21
3.5. DATA ANALİZİ	24
3.5.1. Klasifikasyon Programı	24
3.5.2. Simülasyon Programı	28
3.5.3. Global-Fit Programı.....	29
4. BULGULAR.....	34
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	64
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	74

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 3.1: Lantan elementinin periyodik tablodaki konumu [50].	10
Şekil 3.2: La-Ar FT spektrumunun 6000 cm^{-1} -12000 cm^{-1} aralığında örnek-kesit. y-eksenindeki relatif şiddet 1'e normlanmıştır.	23
Şekil 3.3: La-Ar FT spektrumunun 876.7 nm-882.8 nm aralığında örnek-kesiti.	23
Şekil 3.4: $\lambda=728.23355$ nm dalga-boyu ve $\nu=13728.076$ cm^{-1} dalga-sayıla La II çizgisi.	23
Şekil 3.5: Program için hazırlanan spektral-çizgilere ait giriş verilerinin bir kısmı.	25
Şekil 3.6: Program için hazırlanan La I ince-yapı seviyelerine ait giriş verilerinin bir kısmı.	27
Şekil 3.7: Program için hazırlanan La II ince-yapı seviyelerine ait giriş verilerinin bir kısmı.	27
Şekil 3.8: Klasifikasyon programında $\lambda=1204.42120$ nm dalga-boylu çizgi için teorik mümkün geçişler, sınıflandırılma ve FT-spektrumu.	28
Şekil 3.9: Simülasyon Programının ara yüz penceresi.	29
Şekil 3.10: "Klasifikasyon Programı" menüsünde, spektral-çizgilerin ağırlık faktörünün belirlenme penceresi.	30
Şekil 3.11: "Global-fit Programı"nda hesaplama için kullanılan spektral-çizgilerin geçiş ve ağırlıklandırma listesi.	31
Şekil 3.12: "Global-fit Programı" için hazırlanan enerji seviyelerini içeren dosyalar.	31
Şekil 3.13: Her bir enerji seviyesinin literatürdeki değerleri, hesaba katılan spektral-çizgi sayısı, "Global-fit Programı" sonucunda revize edilen enerji değerleri ve istatistik hataları.	33
Şekil 4.1: "Global-fit Programı"nda spektral-çizgilerin iterasyon sonucu elde edilen ağırlık-merkezi dalga-sayısı sapma değerlerini gösteren pencere.	35
Şekil 4.2: La II enerji seviyelerinin bir kısmı, yalnızca bir veya iki geçişle diğer seviyelere bağlanan seviyeler. *: MIT dalga boyları [3] kullanılarak hesaplanan yüksek enerjiler.	49
Şekil 4.3: $wf=10$ değerindeki $\lambda = 394.91025$ nm dalgaboylu ve $\sigma = 25315.044$ cm^{-1} dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve	

teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).....	53
Şekil 4.4: $wf=10$ değerindeki $\lambda = 480.90046 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 20788.513 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).....	54
Şekil 4.5: $wf=10$ değerindeki $\lambda = 706.62110 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 14147.955 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).....	55
Şekil 4.6: $wf=5$ değerindeki $\lambda = 485.91384 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 20574.033 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).....	56
Şekil 4.7: $wf=5$ değerindeki $\lambda = 588.06395 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 17000.241 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).....	57
Şekil 4.8: $wf=5$ değerindeki $\lambda = 805.93803 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 12404.491 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).....	58
Şekil 4.9: $wf=3$ değerindeki $\lambda = 370.58102 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 33204.388 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).....	59
Şekil 4.10: $wf=3$ değerindeki $\lambda = 463.49538 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 21569.147 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).....	60
Şekil 4.11: $wf=3$ değerindeki $\lambda = 571.24060 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 17500.903 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).....	61

Şekil 4.12: $wf=1$ değerindeki $\lambda = 373.58492 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 26760.066 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).62

Şekil 4.13: $wf=1$ değerindeki $\lambda = 1404.6969 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 7117.028 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. a) Deneysel (FT) spektrumu, b) Aşırı ince-yapı geçişleri, c) Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).63



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Lantan elementinin izotoplarının atom kütlesi, doğal bolluk oranı, yarı ömür, çekirdek spini ve çekirdek manyetik moment ve elektrik kuadropol moment değerleri.	3
Tablo 2.2: La II'nin deneysel olarak bilinen çift pariteli ince-yapı enerji seviyelerinin konfigürasyon, spektral terim, J kuantum sayısı, A & B aiy sabitleri (standart sapma, referans ve elde edildikleri deneysel yöntem ile birlikte). Enerjiler cm^{-1} cinsinden, A & B aiy sabitleri MHz cinsinden verilmiştir.	6
Tablo 2.3: La II'nin deneysel olarak bilinen tek pariteli ince-yapı enerji seviyelerinin konfigürasyon, spektral terim, J kuantum sayısı, A & B aiy sabitleri (standart sapma, referans ve elde edildikleri deneysel yöntem ile birlikte). Enerjiler cm^{-1} cinsinden, A & B aiy sabitleri MHz cinsinden verilmiştir.	7
Tablo 3.1: La I ve La II'nin bazı fiziksel & kimyasal özellikleri [50].	11
Tablo 3.2: Spektral çizgi genişleme türleri ve özellikleri.	20
Tablo 4.1: FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, v_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta v = v_{\text{vakum}} - E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}} $, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).	36
Tablo 4.2: MIT dalga-boyu tablolarından [3] alınan ve FT spektrumun aralığında yer almadığı için ağırlık faktörü (wf) uygulanmayan fakat global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri.	46
Tablo 4.3: La-Ar FT spektrumundaki La II spektral çizgileri için Global-fit programında uygulanan ağırlık faktörleri (wf), uygulanma kriterleri ve spektral çizgilerin sayısı.	51
Tablo 4.4: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.	53
Tablo 4.5: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.	54

Tablo 4.6: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.....	55
Tablo 4.7: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.....	56
Tablo 4.8: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.....	57
Tablo 4.9: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.....	58
Tablo 4.10: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.....	59
Tablo 4.11: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.....	60
Tablo 4.12: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.....	61
Tablo 4.13: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.....	62
Tablo 4.14: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.....	63
Tablo 5.1: Revize edilen çift-pariteli La II enerji seviyeleri listesi. J değeri, revize edilen enerji değeri E (cm^{-1}), programda kullanılan geçiş sayısı ($N_{\text{k.ç.}}$), enerjinin istatistik hatası $\Delta E_{\text{ist.}}$ (cm^{-1}), toplam hata $\Delta E_{\text{top.}}$ (cm^{-1}), sınıflandırılan geçiş sayısı ($N_{\text{s.ç.}}$), seviyelerin A & B (MHz) değerleri, referanslar.....	65
Tablo 5.2: Revize edilen tek-pariteli La II enerji seviyeleri listesi. J değeri, revize edilen enerji değeri E (cm^{-1}), programda kullanılan geçiş sayısı ($N_{\text{k.ç.}}$), enerjinin istatistik hatası $\Delta E_{\text{ist.}}$ (cm^{-1}), toplam hata $\Delta E_{\text{top.}}$ (cm^{-1}), sınıflandırılan geçiş sayısı ($N_{\text{s.ç.}}$), seviyelerin A & B (MHz) değerleri, referanslar.....	67

SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Manyetik Dipol Aşırı İnce Yapı Sabiti
B	: Elektrik Kuadropol Aşırı İnce Yapı Sabiti
F	: Atomun Toplam Açısal Momentumu
H	: Hamiltoniyen
I	: Çekirdek Spini
J	: Elektronun Toplam Açısal Momentumu
L	: Elektronun Toplam Yörüngesel Açısal Momentumu
S	: Elektronun Toplam Spin Açısal Momentumu
Z	: Atom Numarası
h	: Planck Sabiti
ℓ	: Yörüngesel Açısal Momentum Kuantum Sayısı
s	: Spin Açısal Momentum Kuantum Sayısı
μ_I	: Çekirdek Manyetik Dipol Momenti
λ	: Dalga Boyu
ψ	: Dalga Fonksiyonu
ν	: Dalga Sayısı
Q	: Çekirdek Elektrik Kuadropol Momenti
ξ	: Spin-Yörünge Etkileşme Parametresi

Kısaltmalar	Açıklama
CLIBS	: Collinear Laser-İyon-Işını Spektroskopisi
FTS	: Fourier Transform Spektroskopisi
LIFS	: Laserle Uyarılmış Floresans Spektroskopisi
aiy	: Aşırı İnce Yapı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR KERE İYONİZE OLMUŞ LANTAN ATOMUNUN İNCE YAPI ENERJİ SEVİYELERİNİN İNCELENMESİ

Mehdi TONKA

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Feyza GÜZELÇİMEN

Bu çalışmada; bir kere iyonize olmuş lantan (La II) atomuna ait 330 nm–1450 nm (30000 cm^{-1} – 6900 cm^{-1}) spektral aralığında kalibre edilmiş yüksek-çözünürlüklü Fourier-Transform spektrumunda gözlenen aşırı ince yapı çizgilerinin ağırlık-merkezi dalga sayılarının doğrulukla belirlenmesi, bu çizgilere ait deneysel olarak bilinen alt-üst ince yapı enerji seviyelerinin istatistiksel belirsizlik değerleri de hesaplanarak yüksek hassasiyetle düzeltilmesi ve revize edilmesi amaçlandı.

La II spektral çizgilerinin ağırlık-merkezlerinin belirlenebilmesi için, geçişlerin alt-üst enerji seviyelerinin literatürde deneysel olarak belirlenmiş manyetik dipol A ve elektrik kuadrupol B aşırı ince yapı sabitleri kullanıldı. Bilinmeyen A & B değerleri, deneysel spektrum ile teorik spektrumların simülasyonu ile elde edildi. Analiz edilen 344 spektral çizginin ve literatürdeki dalga boyu tablolarından 81 spektral çizginin ağırlık-merkezi dalga sayıları kullanılarak, deneysel olarak bilinen 115 La II ince-yapı enerji seviyesi ilk defa bu çalışmada revize edildi. Bu seviyelerden 94'ü, 0.01 cm^{-1} 'den daha iyi hassasiyetle hesaplandı. 34 La II seviyesi için aşırı ince yapı sabitleri ilk defa bu çalışmada tahmin edildi.

Temmuz 2019, 87. sayfa.

Anahtar kelimeler: Lantan, iyonize olmuş lantan, ince yapı enerji seviyesi, fourier-transform spektrumu, aşırı ince yapı.

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF FINE STRUCTURE ENERGY LEVELS OF SINGLY IONIZED LANTHANUM ATOM

Mehdi TONKA

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Feyza GÜZELÇİMEN

In this study; to determine accurately the center-of-gravity wave numbers of hyperfine structure lines observed in high-resolution Fourier-Transform spectra calibrated in the spectral range of 330 nm–1450 nm (30000 cm^{-1} – 6900 cm^{-1}) of singly ionized lanthanum (La II), to correct with high accuracy and to revise of the experimentally known lower-upper fine structure energy levels of these lines taking into account the statistical uncertainty values are aimed.

The magnetic dipole A and electric quadrupole B hyperfine structure constants, determined experimentally in the literature, of lower-upper levels of the transitions have been used in order to obtain the center-of-gravity of La II spectral lines. The unknown A & B values have been evaluated by simulate of the theoretical spectrum with experimental one. 115 La II fine structure levels experimentally known have been revised using the center-of-gravity wave numbers of analysed 344 spectral lines and of 81 spectral lines in wavelength-tables in the literature for the first time in this study. 94 of them have been calculated with the accuracy of better than 0.01 cm^{-1} . For 34 La II levels, hyperfine structure constants have been firstly estimated in this study.

July 2019, 87. pages.

Keywords: Lanthanum, ionized lanthanum, fine structure energy level, fourier-transform spectrum, hyperfine structure.

1. GİRİŞ

Çalışmanın ana konusunu; atom ve iyonların yapısını, onların çevre, elektromanyetik alan ve birbirleri ile olan etkileşimlerini inceleyen “atom fiziği” oluşturmaktadır. Atomik yapı hakkındaki bilgiler, optik spektrumların gözlenerek analiz edilmeye başlamasıyla gelişmiştir.

Her elementin yayınladığı/absorbladığı çizgi spektrumunun kendine has olduğunu keşfedenler G. Kirchhof ve R. Bunsen'dir. Bu spektrumlar, atomik yapı analizi için temeldir ve yüksek-teknoloji spektroskopik aletlerin geliştirilmesi spektrumların çözünürlüğünün artmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede çizgilerin bileşenlerinin daha iyi ayrılmış olarak gözlenmesi kolaylaşır. Bu spektrumlar, atomik ve iyonik yapılar hakkında bilgi verebilecek spektroskopik yöntemlerin temelini oluşturur. Spektral çizgilerin deneysel aşırı ince yapı (aiy) bileşenleri ilk kez A. Michelson (1891), C. Fabry and A. Perot (1897) tarafından gözlenmiştir [1].

Atomların, bilhassa ağır metaller ve nadir-toprak elementlerinin, spektrumlarının aiy analizleri ve ince-yapı enerji seviyelerinin aiy sabitleri hem atom fiziği hem de astrofizik çalışmalar açısından oldukça önem taşımaktadır. Yıldızlardan alınan soğurma-spektrumlarında metallerin atomik ve iyonik hallerine ait çizgiler bol miktarda gözlenmektedir. Buna rağmen, çoğu atomun iyonik durumlarına ait ince-yapı enerji seviyeleri ve seviyelerin aiy sabitleri bilinmemektedir. Aiy sabitleri hakkında bilgi eksikliği, yıldız atmosferlerinde bu metallerin bolluklarını kesin olarak belirlemeyi zorlaştırır. Spektroskopik analizleri yapabilmek için, literatürdeki eksikliklerin doğru olarak tamamlanması gerekir.

Bu çalışmada lantan elementinin 330 nm–1450 nm spektral aralığında kaydedilen Fourier-Transform (FT) spektrumunda gözlenen bir kere iyonize olmuş lantan (La II) spektral-çizgilerinin ağırlık-merkezlerinin yüksek hassasiyetle belirlendi. Tüm La II ince-yapı enerji seviyelerine ait bilgiler NIST[2] ve MIT [3] atomik veri tablolarından alındı. FT-spektrumunda 344 tane aiy gösteren geçişi La II'ye ait olduğu görüldü. Bu spektral çizgilerin aiy analizi yapılarak, toplam 115 La II enerji seviyesi yüksek doğruluk ve hassasiyetle ilk defa revize edildi. Bu seviyelerden 34 tanesi için manyetik dipol *A* ve 4 tanesi için de elektrik kuadropol *B* aiy sabitleri için yaklaşık değerler ilk defa tahmin edildi.

Lantan elementinin aiy incelenmesini içeren çalışmalar ve literatür taraması genel kısımlarda anlatıldı.

Malzeme ve Yöntem bölümü; atomik yapı, kullanılan deneysel yöntem ve data analiz programları hakkında teorik bilgiler ve La atomu hakkında genel bilgi içermektedir.

Bulgular bölümünde; incelenen spektral aralıktaki her bir La II'nin aiy gösteren spektral çizgisinin ağırlık-merkezi dalga-sayısının, deneysel FT spektrumu ile Klasifikasyon programında [4-5] oluşturulan teorik spektrumun simülasyonu sonucu daha doğrulukla belirlenerek sınıflandırılması, spektrumların aiy analizleri ve ağırlık faktörlerinin belirlenmesi sürecinden oluşmaktadır.

Tartışma ve Sonuçlar bölümü; deneysel olarak bilinen La II ince-yapı enerji seviyelerinin global-fit programı [6] yardımıyla daha yüksek hassasiyet ve daha doğrulukla revize edilen değerlerini ve bazı yüksek ince-yapı seviyelerine ait literatürde bilinmeyen *A&B* aiy sabitlerinin simülasyon yoluyla yaklaşık olarak (tahmini) belirlenen değerlerini kapsamaktadır.

2. GENEL KISIMLAR

Lantanitlerden olan Lantan (La) elementinin bir kere iyonize olmuş (La II) halinin deneysel olarak bilinen 118 ince-yapı enerji seviyesi bulunmaktadır [2-3]. Bu seviyelerden 70'i çift, 48'i tek paritelidir. Deneysel olarak bilinen çift-pariteli seviyeler $0.00 \text{ cm}^{-1} - 69505 \text{ cm}^{-1}$ ve tek-pariteli seviyeler $14148 \text{ cm}^{-1} - 64411 \text{ cm}^{-1}$ enerji aralığında dağılmaktadır.

La, doğada kararlı halde tek izotopa sahip bir geçiş metalidir. La izotoplarının doğada bulunma (bolluk) oranları, atomik kütlesi, yarı ömür değerleri, çekirdek spini ve çekirdek momentleri Tablo 2.1'de gösterildi. La doğal bolluğunda kullanıldığında, Doppler sınırlı spektroskopik yöntemlerle alınan spektrumlarda az bolluğa sahip izotoplarının (^{137}La ve ^{138}La) spektral çizgileri gözlenmemektedir.

Tablo 2.1: Lantan elementinin izotoplarının atom kütlesi, doğal bolluk oranı, yarı ömür, çekirdek spini ve çekirdek manyetik moment ve elektrik kuadropol moment değerleri.

Z	Atom Kütlesi (g/mol)	Doğal Bolluk (%)	Yarı ömür (Yıl)	I	μ (μN)	Q (10^{-28} m^2)
57	136.906494	~0.00	6×10^4	7/2	+2.600(6) [7]	+0.26(8) [7]
57	137.907105 (6)	0.09	1.05×10^{11}	5	+3.713646(7) [8]	+0.45(2) [8]
57	138.90547(7)	99.91	kararlı	7/2	+2.7830455(9) [8]	+0.20(1) [8]

Bu çalışmanın konusu olan La II'nin ince-yapı enerji seviyelerinin revize edilebilmesi ve daha doğrulukla ve daha iyi hassasiyetle belirlenebilmesi için; La II'nin aiy spektral çizgilerinin literatürde bazı çalışma grupları tarafından belirli deneysel yöntemlerle incelenmesi sonucu, bu seviyelere ait aiy sabitleri önem kazanmaktadır.

Yıldızların yaşam ömrünü tahmin etmek için kritik öneme sahip elementlerden biri olan La, yıldız oluşumunun geç evrelerinde meydana gelen nötron yakalama füzyon reaksiyonlarının bir ürünüdür [9]. La ve diğer nadir-elementlerin bolluk bilgileri, astrofiziksel nesnelere nükleosentez sürecini anlamada yardımcı olur ve çeşitli yıldızların yaşının belirlenmesini destekler [10]. Son zamanlarda bazı teleskoplarda yüksek çözünürlüklü spektrografların kullanılmasıyla, yıldızlarda La çizgileri gösteren verilerin miktarı ve kalitesi büyük ölçüde artmıştır [9]. Bu yıldızlardan alınan spektrumlardaki iyonik lantan bolluklarının daha doğrulukla ve hassasiyetle belirlenebilmesi için, La II geçiş olasılıklarının ve aiy sabitlerinin belirleneceği yeni laboratuvar çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Astrofizik çalışmalar için önemi açısından; hassas/yüksek çözünürlüklü atomik ve özellikle iyonik lantan data çalışmaları esas teşkil etmektedir. Bu çalışmada bahsedilen öneminden dolayı bir kere iyonize olmuş lantanın ince yapı enerji değerleri revize edilerek, iyileştirilmiş enerji seviyeleri hesaplandı.

Son yıllarda, La spektrumu birçok araştırmaya konu olmuştur. Atomik La (La I) için ve iyonik La (La II) için ince-yapı enerji seviyelerinin yaşam ömürlerinin bulunması, spektral geçişlerin geçiş olasılıkları hesabı ve aşırı-ince-yapı analizi için öncelikli deneysel datalar sağlanmıştır [3, 7, 9, 11-48]. Bu makalelerden bir kısmında La I'e ait [7, 11-30] ve bir kısmında da La II'ye ait [3, 9, 30-48] çok sayıda spektral çizgi sınıflandırılması, deneysel yeni ince-yapı enerji seviyeleri keşfedilmesi ve bazı enerji seviyelerine ait *A&B* aiy sabitlerinin hem deneysel hem de teorik metotlarla belirlenmesi amaçlanmıştır.

Höhle ve arkadaşları (1982) [31] Collinear Laser-İyon-Işını Spektroskopisi (CLIBS) yöntemi ile 11 çift-pariteli ve 4 tek-pariteli düşük La II yarı-kararlı seviyesine ait aiy sabitleri bulmuşlardır. Bu seviyeleri kullanarak, La II'nin teorik aiy analizine temel oluşturan geniş bir çalışma Bauche ve arkadaşları (1982) [40] tarafından yapılmıştır.

CLIBS yöntemi, 2000'li yıllarda da iyonize olmuş La atomu üzerine çalışan bir çok araştırmacının deneysel metodu olarak göze çarpmaktadır [33-35].

Lawler ve arkadaşları (2001) [9] astrofizik açıdan önemi yüksek olan iyonik lantanın yakın kırmızı-altından mor-üstü spektral bölgeyi kapsayan FT emisyon spektrumunu kaydetmişlerdir. Laser Uyarılmış Floresans Spektroskopisi (LIF) ile 84 spektral çizginin geçiş olasılıklarını ve çizgilerin alt-üst enerji seviyelerinin yaşam ömürlerini belirlemişlerdir. Buna ek olarak, LIF ve FTS ile 31 tek-pariteli seviyenin aiy sabitlerini elde etmişlerdir.

Furmann ve arkadaşları (2008), 22 tek-pariteli La II elektronik seviyesi için [36] ve 12 çift-pariteli La II elektronik seviyesi için [37] LIF ölçümleri yardımıyla buldukları aiy sabitlerini kullanarak, ince-yapı ve aiy radyal parametrelerinin yarı-deneysel hesaplamasını gerçekleştirdiler.

Bu çalışmaların çoğunda, incelenen spektral çizgilere ait alt-üst enerji seviyelerinden hesaplanan enerji ile ağırlık merkezi dalga-sayısı arasındaki farkın yaklaşık 0.1 cm^{-1} 'den daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, La II'nin ince-yapı enerji değerlerinde büyük bir

belirsizlik olduğuna işaret etmektedir. Bu nedenle, La II'nin enerji seviyelerinin revize edilmesi gerektiği açıktır. Bu çalışmanın amacı da budur.

Tek ve çift pariteli La II ince-yapı enerji seviyelerinin konfigürasyon, terim, J kuantum sayısı, farklı deneysel yöntemlerle elde edilen manyetik-dipol A ve elektrik-kuadropol B ay sabitleri referansları ile birlikte Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'te verildi. Çift ince-yapı seviyelerinden 22'sinin terimi ve 8 yüksek iy seviyesinin konfigürasyon ve terimi literatürde mevcut değildir. Çift pariteli 40000 cm^{-1} 'den yüksek 39 seviyenin ve tek paritelilerden 13 seviyenin A & B ay sabitleri deneysel olarak yine literatürde bulunmamaktadır.



Tablo 2.2: La II'nin deneysel olarak bilinen çift pariteli ince-yapı enerji seviyelerinin konfigürasyon, spektral terim, J kuantum sayısı, A & B aiy sabitleri (standart sapma, referans ve elde edildikleri deneysel yöntem ile birlikte). Enerjiler cm^{-1} cinsinden, A & B aiy sabitleri MHz cinsinden verilmiştir.

Enerji (cm^{-1})	Konfig.	Terim	J	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Ref.
0.00	$5d^2$	a^3F	2	397.6(2)	19.8(1.8)	CLIBS	[31]
1016.10	$5d^2$	a^3F	3	101.3(2)	25.2(3.3)	CLIBS	[31]
1394.46	$5d^2$	-	2	949.5(1.6)	49.8(12.6)	CLIBS	[31]
1895.15	$5d6s$	a^3D	1	-1128.1(9)	49.8(6.5)	CLIBS	[31]
1970.70	$5d^2$	a^3F	4	-18.6(1)	37.5(3.0)	CLIBS	[31]
2591.60	$5d6s$	a^3D	2	-8.7(3.0)	56.7(6.9)	CLIBS	[31]
3250.35	$5d6s$	a^3D	3	1066.3(3.3)	60.3(9.3)	CLIBS	[31]
5249.70	$5d^2$	a^3P	0	0	0		
5718.12	$5d^2$	a^3P	1	-225.2(2)	25.8(9)	CLIBS	[31]
6227.42	$5d^2$	a^3P	2	-158.2(4)	-45(11)	CLIBS	[31]
7394.57	$6s^2$	a^1S	0	0	0		
7473.32	$5d^2$	a^1G	4	150.1(2)	151.8(5.4)	CLIBS	[31]
10094.86	$5d6s$	-	2	48.1(1)	39.9(1.8)	CLIBS	[31]
35452.66	$4f(^2F_{5/2})6p_{1/2}$	$(5/2,1/2)$	3	440.9(4.0)	30(10)	LIFS	[37]
35787.53	$4f(^2F_{5/2})6p_{1/2}$	$(5/2,1/2)$	2	242.6(5.7)	0(5)	LIFS	[37]
36954.65	$4f(^2F_{7/2})6p_{1/2}$	$(7/2,1/2)$	3	177.1(4.4)	22(8)	LIFS	[37]
37172.79	$4f(^2F_{7/2})6p_{1/2}$	$(7/2,1/2)$	4	253.8(4.1)	22(11)	LIFS	[37]
37209.71	$4f(^2F_{5/2})6p_{3/2}$	$(5/2,3/2)$	3	202.2(4.0)	25(12)	LIFS	[37]
37790.57	$4f(^2F_{5/2})6p_{3/2}$	$(5/2,3/2)$	4	232.3(3.9)	80(20)	LIFS	[37]
38221.49	$4f(^2F_{5/2})6p_{3/2}$	$(5/2,3/2)$	2	197.2(1.0)	7(5)	LIFS	[37]
38534.11	$4f(^2F_{5/2})6p_{3/2}$	$(5/2,3/2)$	1	419(5)	22(8)	LIFS	[37]
39018.74	$4f(^2F_{7/2})6p_{3/2}$	$(7/2,3/2)$	5	169.1(1.0)	140(20)	LIFS	[37]
39221.65	$4f(^2F_{7/2})6p_{3/2}$	$(7/2,3/2)$	4	208.4(4.2)	85(20)	LIFS	[37]
39402.55	$4f(^2F_{7/2})6p_{3/2}$	$(7/2,3/2)$	3	149.9(2.0)	25(10)	LIFS	[37]
40457.71	$4f(^2F_{7/2})6p_{3/2}$	$(7/2,3/2)$	2	165.1(5.0)	55(10)	LIFS	[37]
49733.13	$5d(^2D_{3/2})7s_{1/2}$	$(3/2,1/2)$	1	-	-		
49884.35	$5d(^2D_{3/2})7s_{1/2}$	$(3/2,1/2)$	2	-	-		
51228.57	$5d(^2D_{5/2})7s_{1/2}$	$(5/2,1/2)$	3	-	-		
51523.86	$5d(^2D_{5/2})7s_{1/2}$	$(5/2,1/2)$	2	-	-		
52137.67	$5d6d$	f^1F	3	-	-		
52169.66	$5d6d$	g^3D	1	-	-		
52734.81	$5d6d$	g^3D	2	-	-		
52857.88	$5d6d$	f^3G	3	-	-		
53302.56	$5d6d$	e^1P	1	-	-		
53333.37	$5d6d$	f^3G	4	-	-		
53689.56	$5d6d$	g^3D	3	-	-		
53885.24	$5d6d$	f^3F	2	-	-		
54365.80	$5d6d$	$e^3S ?$	1	-	-		
54434.65	$5d6d$	f^3G	5	-	-		
54793.82	$5d6d ?$	$e^1S ?$	0	0	0		
54840.04	$5d6d$	f^3F	3	-	-		

Tablo 2.2 (devam): La II'nin deneysel olarak bilinen çift pariteli ince-yapı enerji seviyelerinin konfigürasyon, spektral terim, J kuantum sayısı, A & B aiy sabitleri (standart sapma, referans ve elde edildikleri deneysel yöntem ile birlikte). Enerjiler cm^{-1} cinsinden, A & B aiy sabitleri MHz cinsinden verilmiştir.

Enerji (cm^{-1})	Konfig.	Terim	J	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Ref.
54964.19?	$5d6d$	e^3P	0	0	0		
55107.25	$4f^2$	e^3H	4	-	-		
55184.05	$5d6d$	g^1D	2	-	-		
55230.33	$5d6d$	$e^3P?$	1	-	-		
55321.35	$5d6d$	f^3F	4	-	-		
55982.09	$4f^2$	e^3H	5	-	-		
56035.70	$5d6d$	f^1G	4	-	-		
56036.60	$5d6d$	e^3P	2	-	-		
56837.94	$4f^2$	e^3H	6	-	-		
57399.58	$4f^2$	g^3F	2	-	-		
57918.50	$4f^2$	g^3F	3	-	-		
58259.41	$4f^2$	g^3F	4	-	-		
59527.60	$4f^2$	g^1G	4	-	-		
59900.08	$6p^2$	h^1D	2	-	-		
60094.84	$6p^2$	f^3P	0	0	0		
60660.18	$6s7s?$	f^3S	1	-	-		
61128.83	$6p^2$	f^3P	1	-	-		
62026.27	$4f^2$	i^1D	2	-	-		
62408.40	$4f^2$	e^1I	6	-	-		
62506.36	$6p^2$	f^3P	2	-	-		
63463.95	$4f^2$	g^3P	0	0	0		
63703.18	$4f^2$	g^3P	1	-	-		
64278.92	$4f^2$	g^3P	2	-	-		
64361.28	$6s6d$	h^3D	1	-	-		
64529.90	$6s6d$	h^3D	2	-	-		
64692.59	$6s6d$	h^3D	3	-	-		
66591.91	$6p^2$	f^1S	0	0	0		
69233.90	$6p^2$	$i^3D?$	3	-	-		
69505.06	$6p^2$	g^1S	0	0	0		

Enerji seviyeleri NIST [2] ve MIT [3] atomik data tablolarından alınarak derlenmiştir.

CLIBS : Collinear Laser-iyon-Işım Spektroskopisi

LIFS: Laserle Uyarılmış Floresans Spektroskopisi

Tablo 2.3: La II'nin deneysel olarak bilinen tek pariteli ince-yapı enerji seviyelerinin konfigürasyon, spektral terim, J kuantum sayısı, A & B aiy sabitleri (standart sapma, referans ve elde edildikleri deneysel yöntem ile birlikte). Enerjiler cm^{-1} cinsinden, A & B aiy sabitleri MHz cinsinden verilmiştir.

Enerji (cm^{-1})	Konfig.	Terim	J	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Ref.
14147.98	$4f(^2F_{5/2})6s_{1/2}$	(5/2,1/2)	2	-468.8(5.5)	80(20)	LIFS	[36]
14375.17	$4f(^2F_{5/2})6s_{1/2}$	(5/2,1/2)	3	1110.9(5.1)	130(15)	LIFS	[36]
15698.74	$4f(^2F_{7/2})6s_{1/2}$	(7/2,1/2)	4	792.8(1.8)	155(20)	LIFS	[36]
15773.77	$4f(^2F_{7/2})6s_{1/2}$	(7/2,1/2)	3	-431.0(5.0)	145(15)	LIFS	[36]
16599.17	$4f5d$	z^1G	4	220.4(2.5)	116(15)	LIFS	[36]
17211.93	$4f5d$	y^3F	2	365.9(2)	-3.9(1.8)	CLIBS	[31]
17825.62	$4f5d$	z^3H	3	267.9(2.5)	91(20)	LIFS	[36]
18235.56	$4f5d$	y^3F	3	148.7(4)	5.0(4.2)	CLIBS	[31]
18580.41	$4f5d$	z^3H	5	-	-		
18895.41	$4f5d$	z^1D	2	197.6(2.1)	-16(8)	LIFS	[36]
19214.54	$4f5d$	y^3F	4	64.8(1)	8.4(4.8)	CLIBS	[31]
19749.62	$4f5d$	z^3H	6	-	-		
20402.82	$4f5d$	z^3G	3	332.7(3.5)	60(15)	LIFS	[36]
21331.60	$4f5d$	z^3G	4	170.7(1.9)	180(20)	LIFS	[36]
21441.73	$4f5d$	z^3D	1	412.4(5)	8(4)	LIFS	[36]
22106.02	$4f5d$	z^3D	2	127.8(2.4)	2.6(7.5)	CLIBS	[35]
22282.90	$4f5d$	z^3G	5	136.1(3.0)	60(30)	LIFS	[36]
22537.30	$4f5d$	z^3D	3	100.9(1.2)	-31.2(6.9)	CLIBS	[35]
22683.70	$4f5d$	z^3P	0	0	0		
22705.15	$4f5d$	z^3P	1	72.2(7.0)	-28(10)	LIFS	[36]
23246.93	$4f5d$	z^3P	2	34.5(3)	11.1(2.4)	CLIBS	[31]
24462.66	$5d6p$	y^1D	2	446.5(1.8)	21(8)	LIFS	[36]
24522.70	$4f5d$	y^1F	3	161.9(2)	22.1(4.2)	CLIBS	[32]
25973.37	$5d6p$	y^3D	1	547.3(3.0)	27(7)	LIFS	[36]
26414.01	$5d6p$	x^3F	2	250.5(2)	51.9(1.8)	CLIBS	[31]
26837.66	$5d6p$	x^3F	3	258.9(1.5)	114.3(7.6)	CLIBS	[35]
27388.11	$5d6p$	y^3D	2	68.8(7)	30(15)	LIFS	[36]
27423.91	$5d6p$	-	1	886.9(1.5)	-18.9(4.8)	CLIBS	[35]
27545.85	$6s6p$	y^3P	0	0	0		
28154.55	$6s6p$	-	1	791.8(2.3)	-24(10)	LIFS	[36]
28315.25	$5d6p$	y^3D	3	82.9(5.0)	-28(10)	LIFS	[36]
28525.71	$4f5d$	z^1H	5	-	-		
28565.40	$5d6p$	x^3F	4	126.1(9.5)	150(30)	LIFS	[36]
29498.05	$6s6p$	-	2	610.2(3.3)	88(15)	LIFS	[36]
30353.33	$4f5d$	y^1P	1	-157.7(6)	33(6)	LIFS	[36]
31785.82	$5d6p$	x^3P	0	0	0		
32160.99	$5d6p$	x^3P	1	1383.9(9.0)	-35(10)	LIFS	[36]
32201.05	$5d6p$	x^1F	3	193.7(3.0)	143(20)	LIFS	[36]
33204.41	$6s6p$	-	2	-	-		
45692.17	$6s6p$	x^1P	1	-	-		
57364.12	-	-	3	-	-		
58748.90	-	-	4	-	-		
59612.64	-	-	3	-	-		

Tablo 2.3 (devam): La II'nin deneysel olarak bilinen tek pariteli ince-yapı enerji seviyelerinin konfigürasyon, spektral terim, J kuantum sayısı, A & B aiy sabitleri (standart sapma, referans ve elde edildikleri deneysel yöntem ile birlikte). Enerjiler cm^{-1} cinsinden, A & B aiy sabitleri MHz cinsinden verilmiştir.

Enerji (cm^{-1})	Konfig.	Terim	J	A (MHz)	B (MHz)	Yöntem	Ref.
60744.17	-	-	4	-	-		
61017.66	-	-	3	-	-		
61514.46	-	-	3 ?	-	-		
63598.87	-	-	4	-	-		
64411.17	-	-	3	-	-		

Enerji seviyeleri NIST [2] ve MIT [3] atomik data tablolarından alınarak derlenmiştir.

CLIBS : Collinear Laser-iyon-Işını Spektroskopisi

LIFS: Laserle Uyarılmış Floresans Spektroskopisi

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. NÖTR VE İYONİZE LANTAN ATOMU

Atom numarası 57 olan lantan (La), lantanitlerin aynı adı taşıyan ve nadir-toprak metallerinin ilkidir. Genel Kısımlar bölümünde bahsedildiği üzere, doğal bolluğu %99.91 olan baskın ve kararlı izotopu ^{139}La 'dır.

C.G. Mosander tarafından 1839'da oksit halde keşfedilen bir metaldir. Doğada gümüş-beyaz renkte, yumuşak yapıda ve katı olarak bulunur. Havada hızla kararma ve ateşle kolayca yanabilme özelliğine sahiptir. Lantanın periyodik tabloda 3B gurubu, 6. Periyotta yer almaktadır (Şekil 3.1).

^{139}La kararlı izotopunun nükleer spini $I=7/2$, nükleer manyetik-dipol momentini $\mu_I = +2.7830455(9)\mu_N$ [49] ve nispeten küçük nükleer elektrik-kuadrupol momentini $Q=+0,20(1)b^2$ 'dir [49]. Manyetik-dipol momentin nispeten büyük olması, La spektrumunda geniş aşırı ince yapıya neden olur. ^{139}La 'un doldurulmamış d veya f elektronik kabuğundan dolayı, deneysel FT spektrumunda hem atomik hem de iyonik spektral çizgiler yoğunur.

Periyodik Tablo Tasarım & Arayüz telif hakları © 1997 Michael Döyeh Ptable.com Son güncelleme 16 Haz 2017.

Şekil 3.1: Lantan elementinin periyodik tablodaki konumu [50].

Nötr ve bir kere iyonize olmuş lantan atomunun bazı fiziksel&kimyasal özellikleri Tablo 3.1’de verildi.

Tablo 3.1: La I ve La II’nin bazı fiziksel&kimyasal özellikleri [50].

Atom Numarası	57
Grup	Lantanitler
Periyot	6
Blok	d veya f
Kararlı İzotop Sayısı	1
Kararlı İzotop (¹³⁹ La) Atomik Ağırlığı	138.90547(7) akb
Kararlı İzotop (¹³⁹ La) Bolluğu	% 99.91
Nükleer Spin	7/2
Atom Yarıçapı	187 pm
Çekirdek Manyetik Dipol Momenti (μ_i)	+2.7830455(9) μ_N
Çekirdek Elektrik Kuadropol Momenti (Q)	+0.20(1)b
Temel seviye elektronik dizilimi (La I)	[Xe] 5d ¹ 6s ²
Temel seviye elektronik dizilimi (La II)	[Xe] 5d ²
İyonizasyon Enerjisi (La I)	5.5769 eV
İyonizasyon Enerjisi (La II)	11.0590 eV
Fazı (20 °C’de)	Katı
Erime Noktası	1193 K
Kaynama Noktası	3737 K
Yoğunluk	6.16 g/cm ³

3.2. ATOMİK YAPI

3.2.1. Konfigürasyon

Kuantum mekaniğinin temelini oluşturan Schrödinger denklemi tek-elektron sistemleri için (H, He⁺, Li⁺⁺ vb.) dalga-fonksiyonlarını tam olarak çözülebilmektedir. Çok-elektronlu atomik sistemlere geçildiğinde, elektron-çekirdek etkileşimi ya da elektron-elektron etkileşim kuvvetlerinin büyüklükleri elektronun çekirdeğe olan konumuna göre önem kazanır. Örneğin; elektron çekirdekten uzakta ise, diğer elektronlar tarafından üzerinde oluşan net itici Coulomb kuvveti, çekirdeğin çekici Coulomb kuvvetinden güçlüdür. Dolayısıyla, elektron-çekirdek güçlü çekici Coulomb-etkileşiminin yanında elektronların kendi aralarındaki güçlü itici Coulomb-etkileşimi de göz önünde bulundurulmalıdır ve bu sayısal çözümü zorlaştırır.

Schrödinger denkleminin en gerçekçi dalga-fonksiyonu çözümü elde edilebilmek için; Hartree&Fock, merkezi alan yaklaşıklığı adı altında bir yaklaşım öne sürdü [52]. Yaklaşıklık, sistemde seçilen bir elektronun diğer elektronlarla arasındaki etkileşim ve çekirdek-elektron etkileşiminin toplamı şeklinde ifade edilebilecek küresel-simetrik bir net $V(r)$ potansiyelinde bağımsız hareket ettiğini söyler [53]. Buradaki en önemli parametrelerden biri atomdaki elektronların yük dağılımlarıdır.

Sayısal çözüm için, belirli adımlar izlenmelidir. Başlangıçta, atomik sistemdeki i adet elektron için net potansiyel bir tahmini yapılır. Bu tahmini potansiyel, seçilen elektronun çekirdekten olan uzaklığına (r) bağlıdır. Zamandan-bağımsız Schrödinger denkleminde $V(r)$ yerine konur ve denklemin öz-fonksiyonu (dalga-fonksiyonu (ψ)) bulunur.

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_i^2 + V(r)\right)\psi = E\psi \quad (3.1)$$

Öz-fonksiyonların bulunması, atomdaki yük dağılım yoğunluğunu belirlememizi sağlar ve yük yoğunluğu yardımıyla ortalama net potansiyel hesaplanabilir. Hesaplanan bu potansiyel, ilk tahmin edilenden farklıdır ve Schrödinger denkleminde tekrar kullanılır, yeni dalga-fonksiyonu oluşturulur. İterasyon işlemi, elde edilen dalga-fonksiyonlarındaki fark yeterince az oluncaya kadar tekrarlanır. Hartree-Fock yöntemi ile yapılan hesaplamalar, atomun dalga-fonksiyonlarına karşılık gelen enerji seviyelerini (özdeğerlerini) belirlememizi sağlar [52].

Çok-elektronlu bir atomun enerji seviyeleri iki önemli prensip ile anlaşılır:

1. Pauli-Dışarlama ilkesi
2. En düşük enerji prensibi (Aufbau Kuralı)

Pauli, tüm elektronların en düşük seviyeye (temel seviye) yerleşmesini yasaklar ve birden fazla elektron aynı kuantum sayıları setine (n, l, m_l, m_s) sahip olamaz. En düşük enerji prensibi ise, elektronların öncelikle çekirdeğe en yakın olan düşük enerji düzeyinden başlayarak doldurmasını söyler [54]. Bazı elementlerin elektron dizilişleri bu kurala uymamaktadır.

Elektronların atom ya da molekül orbitallerinde n ve l kuantum sayılarına bağlı olarak yerleşimine “konfigürasyon” adı verilir.

Aynı n ve l 'ye sahip seviyeler bir alt-kabuk ve aynı n 'e sahip alt-kabuklar bir kabuk oluşturur. Atomun elektronları bu seviyelere Pauli ilkesine göre yerleşirler. Bir alt-kabuktaki elektron sayısı maksimum $2(2l + 1)$ olabilir ve bir kabukta ise maksimum $2n^2$ değerini alabilir. Bu durumda kapalı (dolu) kabuk adını alır. Madelung kuralına göre, düşük $(n+l)$ değerine sahip orbitaller daha önce doldurulur [55].

Bu çalışmada incelenen La II atomunun taban-seviyesi için elektron dizilimi, konfigürasyonu:

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 5d^2 - {}^3F_2$$

şeklindedir.

3.2.2. Parite

Klasik fizikte olmayan fakat kuantum mekaniğinde önemli bir yeri olan parite operatörü (π), bir dalga-fonksiyonunun başlangıç noktasına göre yansımaları işlemini gerçekleştirir [54].

Çok-elektronlu bir atomik sistem için Hamiltoniyen, sistemdeki elektronların herhangi uzaysal-spin değiş-tokuşu durumunda değişmez olarak kalmalıdır. Merkezi-alan yaklaşıklığı altında Schrödinger denkleminin çözümü olan dalga-fonksiyonlarının pariteleri belirli (kesin) olmalıdır.

Küresel koordinatlarda bir enerji seviyesini ifade eden dalga-fonksiyonunun uzaysal (r) ve açısal (θ, φ) kısımlarına π -operatörü uygulandığında;

$$r \rightarrow -r$$

$$\theta \rightarrow \pi - \theta$$

$$\varphi \rightarrow \pi + \varphi$$

değişime uğrar [56]. π -operatörünün özdeğer denklemi:

$$\pi \Psi(r, \theta, \varphi) = (-1)^\ell \Psi(r, \theta, \varphi) \quad (3.2)$$

şeklinde verilir π 'nin özdeğeri $(-1)^\ell$ 'dir [57]. Dalga-fonksiyonlarının pariteleri yörüngesel açısal momentum kuantum sayısına (ℓ) bağlıdır. Dolayısıyla, parite iki değer alabilir. Bir enerji seviyesi için, $\sum \ell_i$ değeri hesaplanır (i : enerji seviyesinde bulunan elektron sayısı) [56].

Operatör dalga-fonksiyonunun işaretini değiştiriyorsa, enerji tek-pariteli, işaretini değiştirmiyorsa enerji çift-paritelidir [54]. π operatörü dalga-fonksiyonuna iki kere uygulandığında, başlangıçtaki durumun aynısı oluşur ($\pi^2=1$).

3.2.3. İnce Yapı

Çok-elektronlu bir atom içerisinde meydana gelebilecek güçlü etkileşimler; çekirdek-elektron çekici Coulomb kuvveti, elektron-elektron itici Coulomb kuvvetidir. Bunlara ek olarak, atom içinde spin-spin, spin-yörünge, dipol-dipol gibi küçük etkileşimler de söz konusudur. İnce-yapı yarılımları yaklaşık 10 cm^{-1} (300 GHz) mertebesindedir.

Elektronun yörünge hareketinden kaynaklanan akım ve iç manyetik alan oluşur. Akım, bir yörünge dipol-moment (μ_ℓ) ortaya çıkarır. Elektronların spin hareketinden dolayı sahip olduğu spin manyetik dipol-moment (μ_s) ile yörünge manyetik dipol-momentinin (μ_ℓ) etkileşimi sonucu atomun enerji seviyelerinde yarılımlar gözlenir ve “ince yapı yarılımları” olarak adlandırılır.

$$\vec{\mu}_j = \vec{\mu}_\ell + \vec{\mu}_s \quad (3.3)$$

Schrödinger denkleminde çok-elektronlu (N) bir atomik sistem için ince-yapı yarılımlarını da hesaba katarak Hamiltoniyeni Denklem (3.4)'deki gibi yazılır.

$$H = \sum_{i=1}^N -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 - \sum_{i=1}^N \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_i} + \sum_{i>j=1}^N \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} + \sum_{i=1}^N \xi(r_i) \vec{L}_i \cdot \vec{S}_i \quad (3.4)$$

Hamiltoniyedeki terimler sırasıyla; elektronların kinetik enerjileri, elektron-çekirdek çekici Coulomb etkileşmesi, elektron-elektron itici Coulomb etkileşmesi, spin-yörünge etkileşmesidir. $\xi(r_i)$, radyal-koordinata bağlı spin-yörünge etkileşme sabitidir.

Çok-elektronlu atomik yapılarda, elektronların yörüngesel açısal momentumu (ℓ_i) ve spin açısal momentumu (s_i) kendi aralarında vektörel olarak toplanarak, toplam yörünge açısal momentum (L) ve toplam spin açısal momentum (S) bulunur [58].

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^N \vec{\ell}_i \quad (3.5)$$

$$\vec{S} = \sum_{i=1}^N \vec{s}_i \quad (3.6)$$

Toplam açısal momentumu (J);

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad (3.7)$$

şeklinde verilir.

Toplam açısal momentumun (J) alabileceği değer aralığı, Denklem (3.8)'deki gibidir.

$$(L + S) \geq J \geq |L - S| \quad (3.8)$$

Her J değeri, bir ince-yapı enerji seviyesini ifade eder. Spin-yörünge etkileşmesinde, atomun tüm elektronları değil, açık kabuktaki elektronlarının momentumlarının hesaba katılarak, enerjilerdeki yarıma sayısı belirlenir. Kapalı kabuk elektronları spin-yukarı ve spin-aşağı şekilde yöneldiklerinden, toplam spin açısal momentumu sıfırdır ($S=0$). Dolayısıyla, ince-yapı yarılmaları gözlenmez [52].

Atomik sistemin Hamiltoniyenindeki terimlerden (Denklem (3.4)) Coulomb etkileşimi spin-yörünge etkileşiminden daha büyükse, atom içerisindeki çiftlenim türü, spin-yörünge çiftlenimidir (LS).

LS çiftleniminde, atomdaki her bir elektron için ℓ_i ve s_i 'ler kendi aralarında toplanır ve toplam yörünge açısal-momentum (L) ve toplam spin açısal-momentum (S), Denklem (3.5) ve (3.6)'daki gibidir. Bu çiftlenim, hafif atomlarda gözlenir.

Diğer bir çiftlenim türü de JJ çiftlenimidir. Spin-yörünge etkileşiminin, Coulomb etkileşiminden daha büyük olduğu ağır atomlarda gözlenen bir çiftlenimdir. Atom içindeki her elektronun ℓ_i ve s_i 'leri vektörel olarak toplanır ve elektronun toplam açısal momentumunu (j_i) oluşturur. j_i 'ler toplanarak, toplam açısal momentum bulunur.

$$\vec{j}_i = \vec{\ell}_i + \vec{s}_i \quad (3.9)$$

$$\vec{J} = \sum_{i=1}^N \vec{j}_i \quad (3.10)$$

J kuantum sayısı,

$L < S$ olduğu durumda, $(2L + 1)$ sayıda,

$L > S$ olduğunda ise, $(2S + 1)$ sayıda değer alır. Her bir J terimi ile verilen enerji seviyelerine multipllet adı verilir. JJ çiftlenimi ağır-atomlarda gözlenir [58].

3.2.4. Aşırı İnce Yapı

Atom içerisindeki zayıf etkileşmelerde, ince-yapının yanısıra aşırı ince yapı (aiy) etkileşmesi de mevcuttur.

Elektronların spin&yörünge hareketinden kaynaklanan ve çekirdek üzerinde oluşan manyetik alan ile çekirdeğin manyetik dipol-momentini (μ_I) etkileşir. Buna manyetik dipol aiy etkileşimi denir.

Elektronların çekirdek üzerinde oluşturduğu elektrik alan ile çekirdeğin elektrik kuadropol-momentini (Q) etkileşir. Bu da elektrostatik aiy etkileşimi adını alır.

Diğer çekirdek moment değerleri ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Çekirdeğin kütlesi, elektronun kütlesinin yaklaşık 2000 katı olduğundan, çekirdek manyetik momentini elektronların manyetik momentini yanında çok zayıftır. Dolayısıyla, aiy etkileşiminden enerji seviyelerindeki yarılmalara ve kaymalar ince-yapı yarılmalalarının 10^3 - 10^4 kat daha küçüktür. Aiy yarılmaları yaklaşık 10^{-2} cm^{-1} civarındadır.

Aiy etkileşmeleri sonucunda hamiltoniyene yeni bir ek terim eklenir.

$$H = \sum_{i=1}^N -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 - \sum_{i=1}^N \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_i} + \sum_{i>j=1}^N \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} + \sum_{i=1}^N \xi(r_i) \vec{L}_i \cdot \vec{S}_i + \sum_{i=1}^N a \vec{\mu}_J \cdot \vec{\mu}_I \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'deki son terim, çekirdek-elektron dipol-dipol etkileşmesini ifade eder.

Aiy etkileşmesi sonucu, toplam açısal momentum kuantum sayısına (F) göre enerjilerde yeni yarılmalar oluşur.

$$\vec{F} = \vec{J} + \vec{I} \quad (3.12)$$

olarak verilir. Alabileceği değer aralığı aşağıdaki gibidir.

$$(I + J) \geq F \geq |I - J| \quad (3.13)$$

Atomun toplam açısal momentumunun kuantum mekaniksel büyüklüğü ise;

$$|\vec{F}| = \sqrt{F(F + 1)}\hbar \quad (3.13)$$

şekildedir.

Manyetik dipol etkileşmesinde; enerji seviyelerine ek aiy manyetik-etkileşim terimi,

$$H_{manyetik} = -\mu_I B_J \frac{F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)}{2\sqrt{I(I+1)J(J+1)}} \quad (3.14)$$

şeklinde yazılır. Denklemde,

$$A = \frac{\mu_I B_J}{\sqrt{I(I+1)J(J+1)}} \quad (3.15)$$

manyetik-dipol aiy sabiti olarak bilinir. Enerji seviyelerinin manyetik dipol aiy yarılması, manyetik-alan şiddetinin (B_J), atom numarasına, konfigürasyonuna bağlıdır [60].

Elektrostatik etkileşimde; enerji seviyelerine ek aiy elektrik-kuadropol etkileşim terimi,

$$H_{elektrostatik} = \frac{eQ^t \overline{\varphi_{zz}(0)}}{4} \quad (3.16)$$

$Q^t = Q$ momentinin z bileşeni, eQ^t Elektrik kuadropol moment, $\overline{\varphi_{zz}(0)}$ Yörünge elektronlarının çekirdek üzerinde oluşturduğu elektrik alan vektörünün gradyentidir.

Burada, enerji seviyelerinin elektrik-kuadropol moment değeri;

$$B = eQ \overline{\varphi_{JJ}(0)} \quad (3.17)$$

olarak verilir. Elektrik kuadropol etkileşmesi çekirdek-spininin yönelimine bağlıdır. Çekirdek spini 0 ya da 1/2 değerine sahip ise, B ayı sabiti sıfır olur, enerjide elektrostatik etkileşmeden kaynaklı kayma gözlenmez.

F kuantum sayısına sahip bir ayı enerji seviyesinin toplam enerjisi;

$$W_F = W_J + A \frac{C}{2} + \frac{\frac{3}{4}C(C+1) - I(I+1)J(J+1)}{2I(2I-1)J(2J-1)} \quad (3.18)$$

ile verilir. Bu denklemde, W_J =ince-yapı enerji seviyesidir. C değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır [59].

$$C = (F + 1) - (I + 1) - (J + 1) \quad (3.19)$$

3.2.5. Seçim Kuralları

Eğer atomlar farklı yollarla enerji alarak ile yüksek enerji seviyelerine çıkarlarsa, bu enerjilerini belirli süreler içerisinde arka arkaya diğer alt enerji seviyelerine geçerek salarlar ve temel (taban) seviyeye geri dönerler. Açığa çıkan frekanslar, atomun çizgi spektrumunu verir. Fakat fotonlar sadece seçim kurallarına uygun seviyeler arasındaki geçişlerde gözlenmektedir [60].

Atomlarda optik geçişler, elektrik-dipol momentin ya da manyetik dipol momentin ya da elektrik kuadropol momentin titreşiminin farklı geçiş olasılıkları ile gerçekleşebilir [61]. Elektrik-dipol geçişine oranla, manyetik-dipol geçişi 10^{-4} olasılıkla, elektrik-kuadropol geçişi ise 10^{-6} olasılıkla oluşur. Eğer bir atom uyarılmış bir enerji seviyesinden taban seviyeye dönerken sadece yasak geçişlerle dönebiliyorsa, uyarılmış seviyede saniye mertebesinde uzun süre kalabilir [52].

Atomlarda elektrik-dipol geçişlerinde, seçim kurallarının temelini oluşturan kavramlardan ilki paritedir. Bir izinli elektrik-dipol geçişi için, enerji seviyelerinin pariteleri farklı olmalıdır ve *tek* \leftrightarrow *çift* kuralı geçerlidir [54].

Çok-elektronlu atomik sistemler için ince-yapı seviyeleri arasındaki elektrik-dipol geçişler için seçim kuralları:

- Enerjilerin konfigürasyonlarının pariteleri farklı olmalıdır.
- $\Delta S = 0$ (Spin çokluğunun değişimi yasaktır.)

- $\Delta L = 0, \mp 1$
- $\Delta J = 0, \mp 1$ ($J = 0 \rightarrow J = 0$ yasaktır.)

olarak yazılır.

Çok-elektronlu atomik sistemler için ayı seviyeleri arasındaki elektrik-dipol geçişleri için seçim kuralları:

- İnce-yapı enerji seviyelerinin konfigürasyonlarının pariteleri farklı olmalıdır.
- $\Delta S = 0$ (Spin çokluğunun değişimi yasaktır.)
- $\Delta L = 0, \mp 1$
- $\Delta J = 0, \mp 1$ ($J = 0 \rightarrow J = 0$ yasaktır.)
- $\Delta F = 0, \mp 1$ ($F = 0 \rightarrow F = 0$ yasaktır.)

olarak yazılır [60].

3.3. ÇİZGİ GENİŞLEMELERİ

Atomik sistemlerde, hiçbir optik geçiş monokromatik değildir ve gözlenen spektral-çizgi frekansları belirli bir aralıkta dağılım gösterir. Bu dağılım, çizginin alt-üst enerji seviyeleri arasındaki enerjiye karşılık gelen frekans etrafında oluşur ve soğurulan/yayınlanan ışığın dağılım fonksiyonuna “çizgi profili” veya “çizgi genişlemesi” denir. Bu genişlemeler, atomik sistemin bazı fiziksel özelliklerine istinaden farklı profile sahiptir.

Atomik sistemde bir enerji soğurma/yayınlama durumunda; geçişin soğurulma/yayınlanma olasılığı ortamdaki tüm atomlar için eşit ise, bu çizgi homojen çizgi profiline sahiptir. Eğer bu olasılık ortamdaki atomların hepsi için farklılık gösterirse, çizgi profili homojen olmayan (inhomojen) adını alır.

Çizgi genişleme türleri; doğal genişleme, Doppler genişlemesi, çarpışma&basınç genişlemesi ve saturasyon genişlemesi olarak sınıflandırılır [62]. Tablo 3.2’de, genişlemelerin dağılım çeşitleri, dağılım fonksiyonları ve bazı özelliklerinden bahsedildi.

Tablo 3.2: Spektral çizgi genişleme türleri ve özellikleri.

Çizgi Genişleme Türü	Dağılım Çeşidi	Dağılım Fonksiyonu	Özellikleri
Doğal Çizgi Genişlemesi	Homojen	Lorentz Profili	Enerji seviyelerinin yaşam ömrüne bağlıdır.
Doppler Genişlemesi	İnhomojen	Gauss Profili	Atomların hızına, çizginin frekansına, ortamın sıcaklığına ve efektif kütleyle bağlıdır.
Çarpışma&Basınç Genişlemesi	Homojen	Lorentz Profili	Ortamdaki atomların etkileşiminin kayda değer uzaklığa ulaştığında oluşan çarpışmalarına bağlıdır.
Saturasyon Genişlemesi	Homojen	Lorentz Profili	Atom şiddetli bir laser ışığı ile uyarıldığında, birbirine yakın seviyelerdeki nüfus yoğunluklarının değişmesine (terslenmesine) bağlıdır.
	İnhomojen	Gauss Profili	

Atom uyarıldığında alt enerji seviyesinden üst seviyelere geçer ve bir süre sonra (sonlu bir yaşam ömrü) emisyon yolu ile enerjisinin fazlasını verir. “Doğal genişleme”; sisteme dış bir etki olmadan meydana gelen bu kendiliğinden emisyon sonucu çizginin merkez frekansından olan genişleme olup homojendir. Bir spektral geçişin alt-üst enerji seviyelerinin yaşam ömürleri daima sonludur ve geçiş olasılığına bağlıdır. Bu sebeple, Heisenberg belirsizlik-ilkesi bu enerjilerin kesin olarak belirlenemediğini söyler.

Çizgi genişliğine katkı sağlayan; eğer çizginin alt enerji seviyesi taban seviye değilse, her iki seviyenin de enerjisindeki belirsizliktir ve belirsizliğin değeri seviyelerin yaşam ömrü ile ters orantılıdır. Doğal genişleme frekansı 0.1 MHz-100 MHz aralığında değişir ve şiddet dağılımı Lorentz fonksiyonuna uyar. Doğal genişleme, herhangi bir ileri-teknoloji spektroskopik yöntemle de olsa yok edilemez.

Gaz halinde, atomların termal hareketlerinden dolayı sahip oldukları farklı hızları Maxwell-Boltzmann hız dağılımına uyar. Atomların hızına bağlı olarak, spektral çizgilerde ek genişlemeler oluşur ve bu genişlemelere “Doppler genişlemesi” denir. Atomların her biri için aynı genişleme gerçekleşmeyeceğinden, bu tür inhomojen olarak gözlenir. Doppler genişlemesi, çizgi merkez-frekansı ile doğru orantılı, ortamın sıcaklığının karekökü ile doğru

orantılı ve atomun efektif kütesinin karekökü ile ters orantılı olarak değişir. Doppler genişleme frekansı doğal genişlemeden büyüktür ve şiddet dağılımı Gauss fonksiyonuna uyar.

Atomik sistem içerisinde, bir atom diğer bir atom ile aralarında birbirlerini etkileyecek kadar mesafede bulduklarında meydana gelen çarpışma sonucu, enerji seviyeleri bir miktar değişir. Basınç artışıyla, ortamda atomlar daha net çarpışma yaparlar. Enejilerdeki kayma değerleri, atomun elektronik yapısına, ortamın sıcaklığına ve çarpışmanın gerçekleştiği mesafeye ve ortamın basıncına bağlıdır. Bu şekilde çizgilerde oluşan genişlemelere, “çarpışma&basınç genişlemesi” adı verilir. Bu genişleme türü, Lorentz profiline uyar ve homojen dağılım gösterir.

Bir diğer genişleme türü olan saturasyon genişlemesidir. Atom şiddetli bir laser ışını ile uyarıldığında, spektral çizginin enerji seviyelerinden birbirine çok yakın olanlar arasında nüfus yoğunluğu değişir ve nüfus terslenmesi gerçekleşir. Işığın şiddeti, absorpsiyon katsayısına bağlıdır ve şiddet arttıkça saturasyon gerçekleşir. Bu genişleme, homojen veya inhomojen olarak gözlenebilir [59].

Deneysel olarak gözlenen tüm spektral çizgilerde, bütün genişlemeler farklı katkılarla bir arada gözlenir ve bu profile “birleşik çizgi genişlemesi” denir. Çizginin toplam genişlemesi, Lorentz ve Gauss dağılım fonksiyonlarının birleşimi olan Voigt profili şiddet dağılımına uyar.

3.4. LA-AR FOURIER TRANSFORM SPEKTRUMU

Bu çalışmada kullanılan deneysel veri, daha önceki çalışmalar için [27-29] ölçülmüş olan 330 nm-1450 nm (30000 cm^{-1} - 6900 cm^{-1}) spektral aralığında kalibre edilmiş La-Ar plazmasının Fourier-Transform (FT) spektrumudur. Bu spektrum Letonya Üniversitesi'nde bulunan Lazer Merkezi'nde 0.025 cm^{-1} spektral çözünürlükle elde edilmiştir.

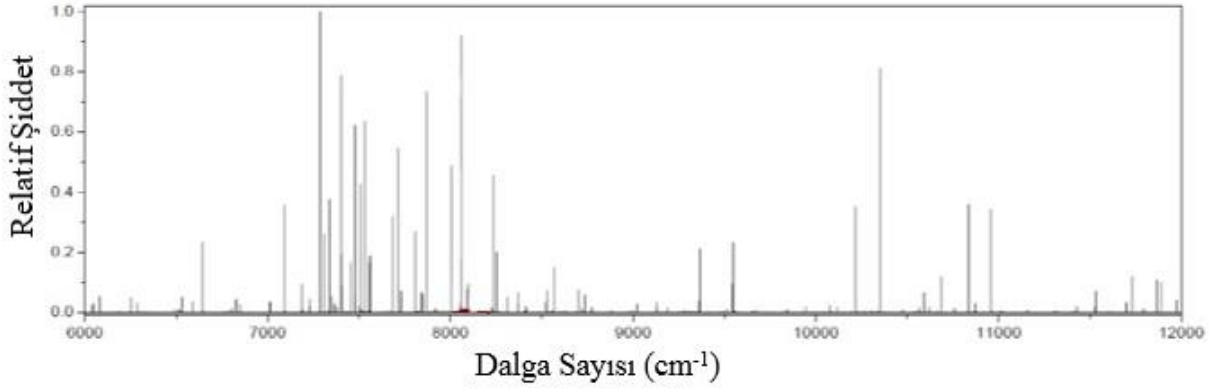
Fourier-Transform (FT) Spektroskopi yönteminde; optik salınımların sinyal-zaman ilişkisini kaybetmeden, ölçülebilir frekansa dönüştürme yani modüle edilmesi için Michelson-Morley interferometresi kullanılır. FT-Spektrometre ışık şiddeti zaman fonksiyonu olarak kaydedilir ve bir Fourier-dönüşümü ile frekans ya da dalga-sayısına bağlı değişimi elde edilir. Ayırma gücü yüksek olan spektrometre ile tüm spektrum bir kerede ve kısa sürede kaydedilir. Detektöre gelen ışık şiddeti ne kadar yüksekse, sinyal/gürültü oranı da büyüktür. Bu durumda önemli bir faktör gürültünün zayıf sinyalli spektral-çizgilere karışmasıdır.

Bunu etkiyi azaltabilmek için, dar-bantlı filtreler kullanılır [59].

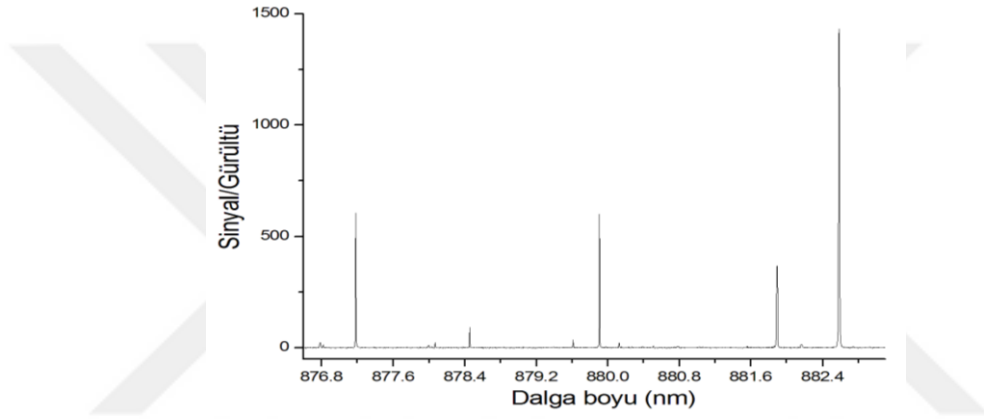
Spektrum, içi boş bir silindir-katod boşalım lambası tarafından üretilir ve yüksek çözünürlüklü Bruker IFS 125 HR FT-spektrometresi ile kaydedilmiştir. Katot içerisine yerleştirilen lantan elementi, %99.9 saflığa sahip doğal bollukla kullanıldı. İçi boş katod boşalımını, yaklaşık 1.0 mbar'lık bir basınçtaki argon taşıyıcı gaz atmosferinde, 50 mA-100 mA arasında bir deşarj akımıyla üretildi. Katot lambasının içinde bulunduğu cam tüp 10^{-7} mbar basınç altında vakumlandı. Deney süresince; katot lambası, Doppler çizgi genişlemesini azaltmak için sıvı azot ile soğutuldu.

Silindir-katod lambası içerisindeki basınçla birlikte asal gaz atomları çarpışmaları sonucu iyonize olurlar. Silindir lambaya uygulanan elektrik-potansiyel ile pozitif argon iyonları, negatif yüklü lantan metalini içeren katottan lantan atomlarını koparır. Böylece ortamda lantan atom&iyonları, argon atom&iyonları ile elektronların olduğu bir plazma oluşur. Enerjileri ile plazma ortamındaki çarpışmalarla lantan atomlarını uyarır ve oluşan La-Ar plazmasında lantan atomları&iyonları yüksek ince-yapı enerji seviyelerine çıkarlar. Kaydedilen FT-spektrumu, uyarılmış atomik veya iyonik ince-yapı enerji seviyelerinden gerçekleşen emisyon spektrumudur.

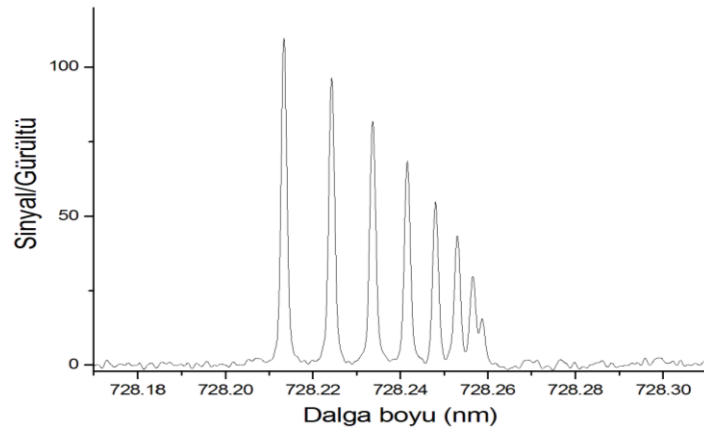
Önceki çalışmalarda [27-29]; FT spektrumunun kalibrasyonu, FT spektrumunda gözlenen yüksek sinyal/gürültü oranına sahip iyonik Ar çizgileri (neredeyse boşalım koşullarından bağımsız olan) ile Learner&Thorne [63] tarafından verilen Ar dalga-boyları karşılaştırılarak yapıldı. Dalga-boyu doğruluğunun, tüm 330 nm-1450 nm dalga-boyu aralığında 0.003 cm^{-1} den daha iyi olduğu tahmin edildi.



Şekil 3.2: La-Ar FT spektrumunun 6000 cm^{-1} -12000 cm^{-1} aralığında örnek-kesit. y-eksenindeki relatif şiddet 1'e normlanmıştır.



Şekil 3.3: La-Ar FT spektrumunun 876.7 nm-882.8 nm aralığında örnek-kesiti.



Şekil 3.4: $\lambda=728.23355$ nm dalga-boyu ve $\nu=13728.076$ cm^{-1} dalga-sayılı La II çizgisi.

FT Spektroskopisinin, diğer laser spektroskopik metodlara oranla çözünürlüğü daha düşüktür, fakat çok geniş bir spektral aralıkta kaydedilen spektrumun analiz edilerek çizgilerin ağırlık-merkezlerinin yüksek doğrulukla belirlenebilmesini sağlamaktadır.

Çizgilerin ağırlık-merkezinin belirlenmesinde kullanılan sınıflandırma programı "Klasifikasyon" [4-5], hava ortamındaki dalga-boyu formunu kullanır. Bu nedenle, veriler için Peck&Reeder [64]'un dağılım formülü kullanarak dönüşüm sağlanır.

La-Ar plazma FT-spektrumunun 6000 cm^{-1} -12000 cm^{-1} aralığında örnek-kesiti, Şekil 3.2'de gösterildi. Bu spektrum kesitinde şiddet 1'e normlanmıştır. FT-spektrumu dalga sayısına bağlı sinyal/gürültü oranı olarak kaydedildi. FT-Spetrumunda gürültüler 1'e normlandığında ise, y eksenini Sinyal/Gürültü oranını vermektedir. Buna bir örnek-kesit Şekil 3.3'te verildi. Şekil 3.4'te ise, $\lambda=728.23355$ nm dalga-boyu ve $\nu=13728.076$ cm^{-1} dalga-sayıla La II çizgisi örnek çizgi olarak gösterildi.

FT spektrumumuzda gözlenmeyen fakat MIT dalga-boyu tablolarında [3] yer alan La II çizgileri bulunmaktadır. Çalışmada analizin ikinci aşamasını oluşturan teorik hesaplama kısmında, MIT tablolarından [3] alınan bu çizgilerden yararlanıldı.

3.5. DATA ANALİZİ

3.5.1. Klasifikasyon Programı

"Klasifikasyon Programı"nın amaçları;

- Literatürde dalga-boyu tanımlanmış fakat spektral-geçişin gerçekleştiği enerji seviyeleri belirlenmemiş çizgilerin sınıflandırılması,
- Literatürde bulunmayan çizgilerin simülasyon yöntemiyle hem tanımlanması hem de program tarafından seçim kurallarına göre önerilen tüm mümkün geçişlerden yararlanılarak doğru olarak alt-üst enerji seviyeleri belirlenerek sınıflandırılması,
- Literatürde sınıflandırılmış/sınıflandırılmamış çizgilerin alt-üst enerji seviyelerine ait A&B aiy sabitlerinin tahmin edilmesi,
- Çizgilerin ağırlık-merkezi dalga-boyu/dalga-sayısının tam olarak belirlenebilmesidir.

Spektral-çizgilerin tanımlanması; literatürde spektroskopik yöntemlerle elde edilen spektrumlarda gözlenmiş ve ağırlık-merkezi dalga-boyu/dalga-sayısı belirlenmiş çizgilerdir. Spektral-çizgilerin sınıflandırılması; daha önce tanımlanmış veya tanımlanmamış geçişlerin alt-üst enerji seviyelerinin belirlenmesidir.

“Klasifikasyon Programı”nda çizgi tanımlamaları/sınıflandırmalarını yapabilmek için, incelenecek elemente ait FT-spektrumuna, atomik/iyonik ince-yapı enerji değerine ait J değeri, paritesi, eğer literatürden biliniyorsa $A&B$ sabitlerine ve literatürde deneysel yöntemlerle tanımlanan ve/veya sınıflandırılan çizgilerin dalga-boyu bilgilerine ihtiyaç vardır.

Bu verilerden La II deneysel ince-yapı seviyeleri NIST [2] ve MIT [3] atomik tablolarından, bu seviyelere ait $A&B$ değerleri literatürdeki çalışmalardan [3, 7, 9, 11-48] ve tanımlanmış La II çizgileri MIT [3] tablosundan alınarak giriş dosyaları hazırlandı.

Şekil 3.5’te, hem literatürden tanımlanan hem de ölçülen deneysel spektrumda gözlenen tüm spektral-çizgilerin ağırlık-merkezi dalga-boyu, Sinyal/Gürültü oranı, alt-üst seviyelerine ait gerekli bilgiler ve dalga-boyu/enerji seviyesi/ $A&B$ değerleri için literatürden alındıkları referansları içeren “wLa.dat” dosyasının bir kısmı verildi.

Wla.dat																				
8628.3547	, nl 4																			
8629.3767	, nl 17			32348.346	, 2.5 ,e, 217(1)					MZH78	, 20763.214	, 3.5 ,o, 194.5(1.6)								MZH78
8629.8467	, nl 8																			
8633.8787	, nl 5			29894.913	, 3.5 ,o, 467.9(2.2)	, 6(10)				MZH78	, 18315.822	, 4.5 ,e, 111.6(2.6)								MZH78
8635.3357	, nl 14			204134.0653	, 2.5 ,o, 0	0				Ar II	, 192556.9179	, 2.5 ,e, 0	0							Ar II
8636.7977	, nl 3			206397.3699	, 4.5 ,e, 0	0				Ar II	, 194822.1833	, 3.5 ,o, 0	0							Ar II
8638.4812		1.4		20018.977	, 1.5 ,o, -38.7(5.2)					MZH78	, 8446.039	, 1.5 ,e, -422.40	-6.01							MZH78
8642.9077	, nl 4			123385.0440	, 0 ,o, 0	0				Ar I N	, 111818.0280	, 1 ,e, 0	0							Ar I N
8644.5457	, nl 5			34369.050	, 1.5 ,e, 731.55	-4.88				MZH78	, 22804.250	, 2.5 ,o, 45.4(6.5)	0(20)							MZH78
8650.8798	, 4		lh	14147.954	, 2 ,o, -489s	80(20)				MZH78	, 2591.609	, 2 ,e, 8.7(3.0)	56.7(6.5)							MZH78
8654.7017	, nl 4			39006.544	, 4.5 ,e, 204.2(25)					Furman	, 27455.312	, 3.5 ,o, 358.0(1.6)	50(13)							MZH78
8657.3797	, nl 4			206347.9267	, 5.5 ,e, 0	0				Ar II	, 194800.2662	, 4.5 ,o, 0	0							Ar II
8660.9767	, nl 4																			
8667.9427	, nl17800			106087.2598	, 1 ,o, 0	0				Ar I N	, 94553.6652	, 0 ,e, 0	0							Ar I N
8672.1272	, 294	B25w	1.8	21447.854	, 3.5 ,o, 121.5(2)	-35.7(13)				MZH78	, 9919.826	, 4.5 ,e, 560.3(2)	200(6)							MZH78
8674.4287	, 4454	B50w	4	15019.496	, 3.5 ,o, 673.9(3)	72(3)				MZH78	, 3494.525	, 3.5 ,e, 462.868(1)	17.925(24)							MZH78
8678.4082	, nl 237			118651.3950	, 1 ,e, 0	0				Ar I N	, 107131.7086	, 1 ,o, 0	0							Ar I N
8681.0104	, nl 4																			
8682.7637	, nl 3			39183.299	, 2.5 ,e, 240(4)					*LwSq1	, 27669.363	, 2.5 ,o, 226.8(2.3)								MZH78
8690.1107	, nl 4			123171.9200	, 1 ,o, 0	0				Ar I N	, 111667.7660	, 0 ,e, 0	0							Ar I N
8692.6167	, nl 3			39679.910	, 5.5 ,e, 124.9(20)					Furman	, 28179.043	, 5.5 ,o, 17.3(0.4)								MZH78
8693.0897	, nl 4			195297.6798	, 1.5 ,o, 0	0				Ar II	, 183797.4473	, 2.5 ,e, 0	0							Ar II
8695.2367	, nl 3			34758.552	, 1.5 ,e, -29.06	69.43				MZH78	, 23260.912	, 0.5 ,o, -408	0.00							MZH78
8703.1391	, 63		5	21447.854	, 3.5 ,o, 121.5(2)	-35.7(13)				MZH78	, 9960.904	, 3.5 ,e, -292.4	66.2							MZH78
8706.0736	, nl 3			28506.411	, 2.5 ,o, 344.3(5.0)	-71(40)				MZH78	, 17023.342	, 3.5 ,e, 162.3(2.5)								MZH78
8713.7566	, nl 5																			
8719.3766	, nl 5			200880.5857	, 3.5 ,e, 0	0				Ar II	, 189415.0280	, 3.5 ,o, 0	0							Ar II
8720.4366	, 122	B12w	1.2	21383.994	, 4.5 ,o, 94.9(1.0)	-20(15)				MZH78	, 9919.826	, 4.5 ,e, 560.3(2)	200(6)							MZH78
8721.2466	, nl 4			25558.770	, 1.5 ,e, 250					*LW120	, 14095.677	, 0.5 ,o, -581.4(1.3)								MZH78
8723.5176	, nl 14			36543.480	, 2.5 ,e, 261(5)	-89.98				*Fy10	, 25083.356	, 3.5 ,o, 70.8(0.5)	25(15)							MZH78
8726.0966	, nl 9																			
8727.0606	, nl 14			32492.762	, 2.5 ,o, -151.3(4.4)	0(20)				MZH78	, 21037.296	, 1.5 ,e, -88.8(3.0)								MZH78
8730.3726	, nl 4			30055.037	, 3.5 ,e, 374.46	56.24				MZH78	, 18603.922	, 3.5 ,o, 223.96	0.00							MZH78
8735.4986	, nl 8																			
8736.2196	, nl 5																			

Şekil 3.5: Program için hazırlanan spektral-çizgilere ait giriş verilerinin bir kısmı.

La I ve La II’nin bilinen deneysel ince-yapı seviyeleri ve bunlara ait J değeri, parite, enerji değeri (cm^{-1}), hata-değerleri ile birlikte A (MHz) ve B (MHz) aiy sabitleri ve referansların bulunduğu dosya örnekleri sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de verildi.

“Klasifikasyon Programı”nın menüsünde yer alan kısımlar “üst pencere” ve “alt pencere” olmak üzere Şekil 3.8’de gösterildi. Alt pencerede, La-Ar FT-Spektrumu gözlenmektedir. Spektrumun x-ekseni dalga-boyu (\AA), y-ekseni Sinyal/Gürültü oranını (gürültü 1’e normlandı) verir. Üst pencerede, menünün sağ kısmında; seçilen bir çizgi için seçim kurallarına göre olası geçişler hesaplanarak listelenir. Menünün sol kısmında ise, listelenen geçişlerden biri deneysel spektrum ile örtüşüyorsa kaydedilir ve bu kaydedilen çizgi dalga-boyu listesine (wLa.dat) eklenir.

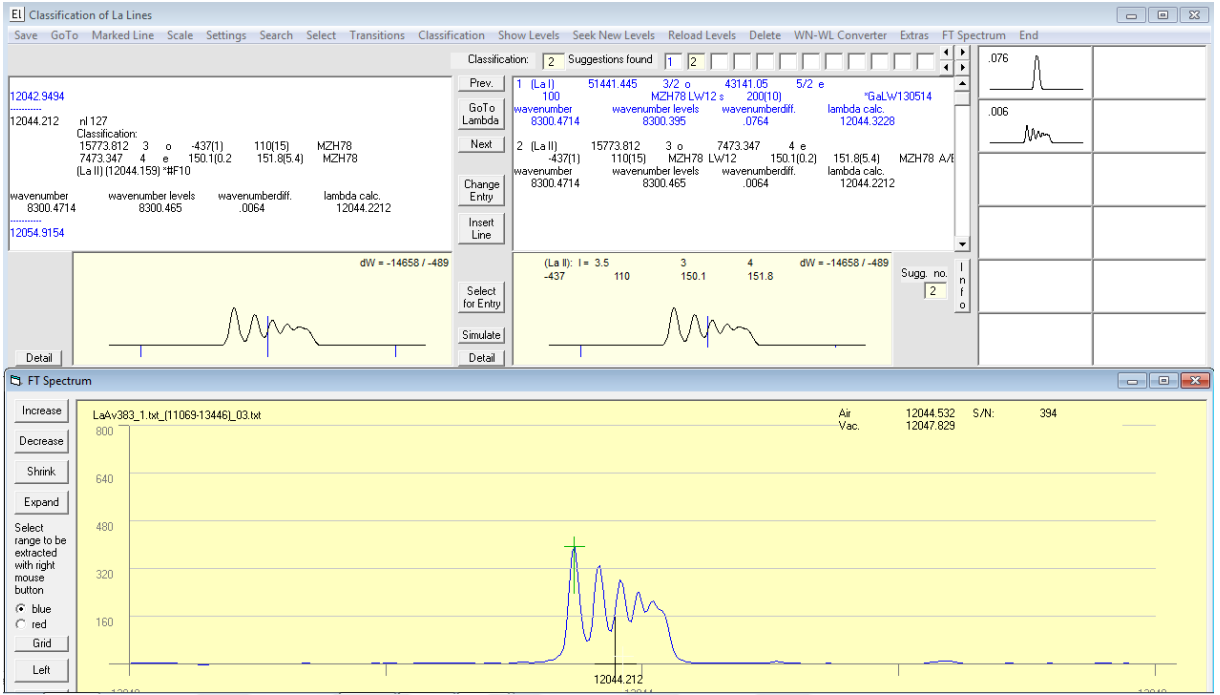


Level_la.dat						
1.5	e	0	141.1959 (16)	44.781 (14)	MZH78 NIS	
2.5	e	1053.161 (3)	182.1706 (6)	54.213 (14)	MZH78 NIS	
1.5	e	2668.176	-480.292	15.188	MZH78 NIST	
2.5	e	3009.993	300.563 (1)	10.873 (25)	MZH78 NIST	
3.5	e	3494.525	462.868 (1)	17.925 (24)	MZH78 NIST	
4.5	e	4121.572	489.534 (1)	32.180 (34)	MZH78 NIST	
2.5	e	7011.904	304.372 (2)	28.091 (30)	MZH78	
3.5	e	8052.163	-197.064	40.754	MZH78 NIST	
0.5	e	7231.416	2460.161	0.00	MZH78	
1.5	e	7490.521	939.618	37.221	MZH78	
2.5	e	7679.945	802.172	-34.186	MZH78	
1.5	e	8446.039	-422.399	-6.753	MZH78	
2.5	e	9183.806	876.319	-2.777	MZH78	
0.5	e	9044.212	226.892	0.00	MZH78	
1.5	e	9719.429	-655.138	-33.249	MZH78	
4.5	e	9919.826	559.812	202.638	MZH78 NIST	
3.5	e	9960.904	-292.267	67.537	MZH78 NIST	
1.5	e	12430.605	445.086	-16.068	MZH78	
2.5	e	12787.399	97.510	-16.521	MZH78	

Şekil 3.6: Program için hazırlanan La I ince-yapı seviyelerine ait giriş verilerinin bir kısmı.

Lev_laII.dat						
2	e	0	397.6(0.2)	19.8(1.8)	MZH78 A/B from HHW82	
3	e	1016.087	101.4(0.2)	25.7(3.3)	MZH78 A/B from HHW82 E	
4	e	1970.705	-18.6(0.1)	37.5(3.0)	MZH78 A/B from HHW82	
2	e	1394.470	949.5(1.6)	49.8(12.6)	MZH78 A/B from HHW82	
1	e	1895.128	-1128.1(0.9)	49.8(6.5)	MZH78 A/B from HHW82	
2	e	2591.609	8.7(3.0)	56.7(6.5)	MZH78 A/B from HHW82	
3	e	3250.380	1067.0(0.4)	60.3(9.3)	MZH78 A/B from HHW82	
0	e	5249.679	0.00	0.00	MZH78 A/B from NYMR09	
1	e	5718.109	-225.2(0.2)	25.8(0.9)	MZH78 A/B from HHW82	
2	e	6227.409	-158.2(0.4)	45.0(11.0)	MZH78 A/B from HHW82	
0	e	7394.537	0.00	0.00	MZH78 A/B from NYMR09	
4	e	7473.347	150.1(0.2)	151.8(5.4)	MZH78 A/B from HHW82	
2	e	10094.887	48.1(0.2)	9.6(1.8)	MZH78 A/B from HHW82	
2	o	14147.954	-4898	80(20)	MZH78 A(-468.8(5.5)) /	
3	o	14375.201	1110.9(5.1)	130.(15)	MZH78 A/B from FRSED(
4	o	15698.781	792.8(1.8)	155(20)	MZH78 A/B from FRSED(

Şekil 3.7: Program için hazırlanan La II ince-yapı seviyelerine ait giriş verilerinin bir kısmı.



Şekil 3.8: Klasifikasyon programında $\lambda=1204.42120$ nm dalga-boylu çizgi için teorik mümkün geçişler, sınıflandırılma ve FT-spektrumu.

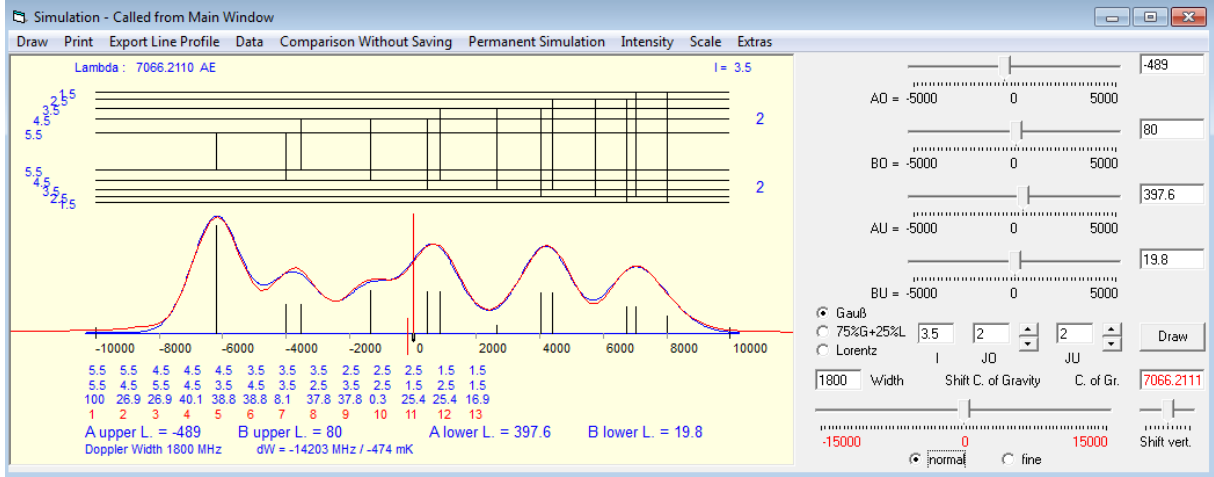
Tez çalışmasında, “Klasifikasyon Programı”na bağlı “Global-fit” programında La II ince-yapı seviyelerinin revize edilmesi amaçlandı. Buna istinaden, literatürden hem tanımlanmış hem de sınıflandırılmış La II spektral-çizgileri ve enerji seviyelerinin programa girişi yapıldı. Enerji seviyelerinin daha yüksek hassasiyetle belirlenebilmesi için, çizgilerin ağırlık-merkezi dalga-boyu/dalga-sayısının tam olarak hesaplanması gerekir. Bu amaçla, program içindeki “Simülasyon Programı” kullanıldı. Çizgilerin Sinyal/Gürültü oranına ve ayrışmışlık durumlarına bakılarak, “Global-fit Programı”nda ağırlıklandırma yapıldı.

3.5.2. Simülasyon Programı

Klasifikasyon programının içerisinde bir alt program olan “Simülasyon Programı”; seçilen bir spektral-çizginin deneysel spektrumu (FT) ile programın hesapladığı mümkün tüm geçişlerin içinden bu aiy gösteren çizginin sınıflandırılması ve alt-üst ince-yapı enerji seviyelerinin aiy sabitlerinin kullanılması sonucunda oluşan teorik spektrumu üst üste çakıştırma yöntemi yardımıyla, ağırlık-merkezinin yüksek doğrulukla belirlenmesini sağlar.

Şekil 3.9’da, “Simülasyon Programı”nın ara yüz penceresinde $\lambda = 706.6211$ nm dalga-boylu La II spektrumu örnek olarak verilmiştir. Kırmızı renk ile gösterilen spektrum, “deneysel spektrum”; mavi renk ile gösterilen ise “teorik spektrum”dur. Spektrumun üzerinde incelenen

spektral-çizginin $F_{üst}$ - F_{alt} geçişleri gösterilmektedir. Pencerenin sağ tarafında, alt-üst ince-yapı seviyelerine ait A & B aiy sabitlerinin değerleri, J değerleri, lantanın çekirdek spini (I), simülasyon sırasında ayarlanan çizgiye ait yarı-genişlik değeri ve kullanılan çizgi profili yer alır. FT-Spektrumunda Doppler genişlemesinin yüksek olmasından dolayı, çizgi profili olarak Gauss seçildi.



Şekil 3.9: Simülasyon Programının ara yüz penceresi.

Eğer alt ve üst ince-yapı seviyelerinin A & B aiy sabiti değerlerinin literatürde yüksek çözünürlüklü spektroskopik yöntemler kullanılarak belirlenmişse, simülasyon programı penceresinde çizginin aiy sabitlerini sabit tutulur ve sadece yarı-genişlik değeri (Doppler genişliği) değiştirilir. Uygun yarı-genişlik belirlendiğinde, deneysel ve teorik spektrum eşleşir.

Eğer alt-üst ince-yapı seviyelerinden birinin A & B aiy sabiti bilinmiyorsa; program penceresinde deneysel spektrum ile teorik spektrumun eşleştirilmesi için, Şekil 3.9'daki pencerede sağ tarafta bulunan aiy sabiti değerleri değiştirilerek en iyi fit değerleri bulunur.

3.5.3. Global-Fit Programı

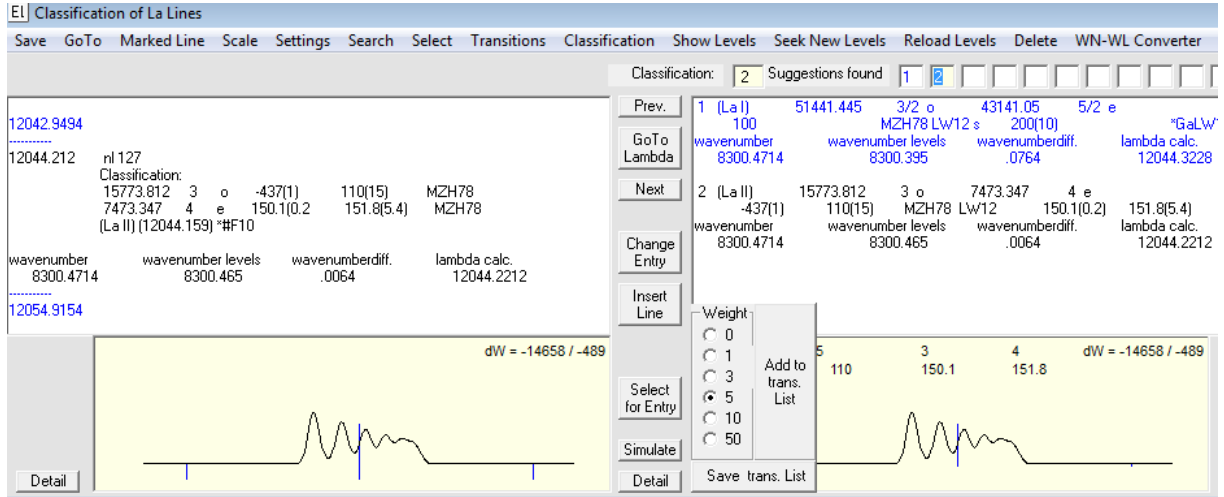
“Global-fit Programı” [6], “Klasifikasyon Programı”nın alt programı olup aiy spektral-çizgilerinin analizi ile ince-yapı enerji seviyelerinin daha doğrulukla belirlenebilmesi ve revize edilmesini sağlayan bir programdır.

Programın çalışması için gerekli dosyalar aşağıdaki gibidir:

- Taban seviye paritesine sahip olan seviyelerin listesi,
- Diğer pariteye sahip seviyelerin listesi,

- Kullanılan geçişlerin sınıflandırma ve ağırlıklandırma listesi.

İlk aşamada, tüm spektral-çizgileri “Simülasyon Programı”nda simüle ederek ağırlık-merkezlerini hassas bir şekilde belirledikten sonra, “Global-fit Programı” yardımıyla her bir çizgi için, Şekil 3.10’da gösterildiği gibi belirli ağırlık-faktör (0, 1, 3, 5, 10 ve 50) değeri tanımlanır.



Şekil 3.10: “Klasifikasyon Programı” menüsünde, spektral-çizgilerin ağırlık faktörünün belirlenme penceresi.

Ağırlıklandırma yapılan çizgiler, “Global-fit Programı”nın [6] çalışması için gerekli olan dosyalardan birine kaydedilir (Şekil 3.11). Sütunlarda sırasıyla geçişlerin ağırlık-merkezi dalga-boyları (\AA), üst-enerji değeri (cm^{-1}), alt-enerji değeri (cm^{-1}), “Global-fit Programı”nda belirlenen ağırlık faktörü değerleri (wf) verilmiştir.

La-transitions.dat				
3337.4918	33204.375	3250.380	3	
3376.3305	32201.068	2591.609	1	
3380.9094	32160.952	2591.609	5	
3452.1806	30353.363	1394.470	3	
3509.9866	29498.078	1016.087	1	
3512.9153	30353.363	1895.128	3	
3533.6256	21441.690	49733.138	1	
3550.8105	28154.536	0	1	
3557.2458	29498.078	1394.470	1	
3570.0580	26837.647	54840.393	1	
3581.6628	25973.360	53885.375	1	
3585.4873	28154.536	56036.783	1	

Şekil 3.11: “Global-fit Programı”nda hesaplama için kullanılan spektral-çizgilerin geçiş ve ağırlıklandırma listesi.

İkinci aşamada; atomun taban-seviyesi ve aynı pariteli tüm seviyelerinin (xx_GLP_levels.dat) ve diğer pariteye ait seviyelerin (xx_CP_levels.dat) birer listesi Şekil 3.12’deki gibi hazırlanır.

La-glp-levels.dat	La-cp-levels.dat
14147.954	0
14375.201	1016.087
15698.781	1394.470
15773.812	1895.128
16599.256	1970.705
17211.918	2591.609
17825.603	3250.380
18235.558	5249.679
18580.480	5718.109
18895.375	6227.409
19214.527	7394.537
19749.642	7473.347
20402.811	10094.887
21331.597	35452.601
21441.690	35787.523
22106.016	36954.643
22282.806	37172.790
22537.291	37209.732
22683.644	37790.608
22705.126	38221.490
23246.900	38534.080
24462.684	39018.740
24522.701	39221.691
25973.360	39402.523
26414.028	40457.728
26837.647	49733.138
27388.127	49884.437
27423.911	51228.640

Şekil 3.12: “Global-fit Programı” için hazırlanan enerji seviyelerini içeren dosyalar.

La II taban seviyesi 0.000 cm^{-1} çift pariteye sahiptir. Literatürden yüksek-çözünürlüklü spektroskopik yöntemlerle yüksek hassasiyetle bulunan enerji seviyeleri genellikle düşük seviyelerdir. Dolayısıyla, program öncelikle en düşük enerji seviyesi (taban seviye) ile o seviyeye olan tüm geçişlerin ağırlıklandırma listesini kullanarak, bir sütuna çift-pariteli ve bir satıra da tek-pariteli enerji değerlerini yazarak bir geçiş-matrisi oluşturulur. Matris elemanları, çizgilerin ağırlık-merkezi dalga-sayıları ve ağırlık-faktörleridir. “Global-fit Programı” [6], en küçük kareler yöntemi ile en az 50 iterasyon yaparak denklemi çözer. Taban seviyesi, tüm seviyelerin enerji değerleri ile birlikte iterasyon sırasında değiştirilir. Sonuçta, taban seviye enerji değeri sıfıra sabitlenir ve oluşan sapma hesaplanan enerjilere eklenir. Program, hem enerji değerleri hem de bu değerlerin sapma aralıklarını daha doğrulukla hesaplar.

Şekil 3.13’te “Global-fit Programı”nın sonuç penceresi görülmektedir. İncelenen atomik/iyonik atomun taban seviyesi ve aynı pariteye sahip olan enerji değerleri (sol kısımda) ve diğer pariteleri enerji değerleri (sağ kısımda) ile ilgili revize işlemi için iterasyon bu ekranda yapılır. Öncelikle hazırlanan enerji seviyelerin ve kullanılan spektral geçişlerin (sağ ve sol kısımda 2. sütunda) listeleri programa okutulur. Sonraki aşamada, program çalıştırılır (Calculate). Yukarıda bahsedilen matris elemanlarından oluşan lineer-denklemler sisteminin çözümü için birden fazla (en az 50) iterasyon yapılır. Enerji seviyelerinin istatistik sapma değerlerine (sağ ve sol kısımda 5. sütunda) bakılır. İterasyon sayısı arttırıldıkça, literatürden alınan ince-yapı enerji değerleri (sağ ve sol kısımda 3. sütunda) ile programın hesapladığı değerler (sağ ve sol kısımda 4. sütunda) arasındaki fark değişir. Değişim gözlenmediği durumda, programda iterasyon durdurulur. Revize edilen enerji değerleri paritelerine göre farklı listelere kaydedilir.

GlobalFit

Fit of Level Energies from Air Wavelengths

Save Calculated Energies

Calculate Repeat Reading Iteration no. 75 Save GLP Levels Save CP Levels Show wt. deviation

Fit of Even and Odd Levels GLP Levels Fixed CP Levels Fixed LP ... Ground Level Parity CP ... Combining Parity

GLP Levels					CPLevels				
No.	No. of lines	old Energy (cm-1)	new Energy (cm-1)	stat.unc. (cm-1)	No.	No. of lines	old Energy (cm-1)	new Energy (cm-1)	stat.unc. (cm-1)
1	16	000	.000	0.0005	1	10	14147.954	14147.954	0.0006
2	17	1016.087	1016.090	0.0005	2	14	14375.201	14375.198	0.0006
3	19	1394.470	1394.471	0.0004	3	9	15698.781	15698.782	0.0006
4	13	1895.128	1895.130	0.0007	4	10	15773.812	15773.814	0.0008
5	11	1970.705	1970.709	0.0006	5	7	16599.256	16599.258	0.001
6	21	2591.609	2591.613	0.0006	6	8	17211.918	17211.915	0.0008
7	14	3250.380	3250.381	0.0005	7	6	17825.603	17825.604	0.001
8	5	5249.679	5249.687	0.0012	8	8	18235.558	18235.558	0.0008
9	11	5718.109	5718.116	0.0004	9	3	18580.480	18580.482	0.0013
10	14	6227.409	6227.414	0.0006	10	9	18895.375	18895.372	0.0007
11	4	7394.537	7394.550	0.0014	11	9	19214.527	19214.527	0.0005
12	8	7473.347	7473.342	0.0004	12	1	19749.642	19749.649	0.
13	9	10094.887	10094.889	0.0007	13	5	20402.811	20402.810	0.0003
14	8	35452.601	35452.600	0.0012	14	3	21331.597	21331.594	0.0018
15	6	35787.523	35787.523	0.001	15	6	21441.690	21441.685	0.001
16	10	36954.643	36954.639	0.0007	16	9	22106.016	22106.016	0.0008
17	10	37172.790	37172.788	0.0006	17	3	22282.806	22282.808	0.0015
18	10	37209.732	37209.727	0.001	18	8	22537.291	22537.291	0.0005
19	8	37790.608	37790.609	0.0006	19	2	22683.644	22683.643	0.0012
20	5	38221.490	38221.488	0.0006	20	6	22705.126	22705.127	0.001
21	4	38534.080	38534.074	0.0013	21	7	23246.900	23246.892	0.0011
22	7	39018.740	39018.744	0.0007	22	11	24462.684	24462.681	0.0008
23	9	39221.691	39221.688	0.001	23	10	24522.701	24522.695	0.0006
24	8	39402.523	39402.522	0.0007	24	12	25973.360	25973.367	0.0008
25	6	40457.728	40457.735	0.0011	25	10	26414.028	26414.022	0.0009
26	6	49733.138	49733.141	0.0011	26	12	26837.647	26837.656	0.0005
27	5	49884.437	49884.446	0.0011	27	16	27388.127	27388.135	0.0007
28	6	51228.640	51228.648	0.0012	28	12	27423.911	27423.919	0.0008
29	4	51524.005	51524.005	0.0013	29	3	27545.814	27545.818	0.0014
30	3	52137.778	52137.777	0.0015	30	9	28154.536	28154.540	0.001
31	4	52169.790	52169.784	0.0018	31	15	28315.285	28315.299	0.0006
32	4	52734.988	52734.988	0.0016	32	2	28525.725	28525.720	0.0007
33	4	52858.057	52858.064	0.0015	33	10	28565.407	28565.423	0.0008
34	5	53302.773	53302.781	0.0018	34	10	29498.078	29498.079	0.0006
35	3	53333.471	53333.486	0.0016	35	12	30353.363	30353.375	0.0008
36	5	53689.769	53689.775	0.0015	36	2	31785.808	31785.814	0.0037
37	4	53885.375	53885.394	0.0013	37	6	32160.952	32160.965	0.0008
38	2	54366.224	54366.231	0.0009	38	7	32201.068	32201.058	0.0009
39	1	54434.900	54434.925	0.	39	7	33204.375	33204.389	0.0006

Şekil 3.13: Her bir enerji seviyesinin literatürdeki değerleri, hesaba katılan spektral-çizgi sayısı, “Global-fit Programı” sonucunda revize edilen enerji değerleri ve istatistik hataları.

4. BULGULAR

Bu çalışmada, FT Spektroskopisi yöntemi ile silindir katotunda Lantan elementi bulunan oluşturulan La-Ar plazmasının 330 nm–1450 nm (30000 cm^{-1} – 6900 cm^{-1}) spektral-bölgede ölçülen FT-Spektrumu incelenerek, ilk kez sistematik olarak tüm La II aiy gösteren çizgiler analiz edildi.

Literatürde sınıflandırılmış toplam 344 La II çizgisinin ağırlık-merkezi dalgaboyları FT spektrumunda gözlenen spektrumların Klasifikasyon programı [4-5] yardımıyla, teorik spektrum ile simüle edilerek doğrulandı. Global-fit programı [6] ile bu çizgiler temel alınarak, her bir çift-pariteli ince-yapı enerji seviyesinin bir sütuna ve her bir tek-pariteli seviyenin de bir satıra tekabül ettiği bir geçiş matrisi oluşturuldu. Matris elemanları, çizgilerin deneysel ağırlık-merkezi dalgasayılarını ve ağırlıklandırma faktörlerini (wf) içerir. Bu geçiş matrisi ile kararlı bir lineer denklem sistemi hazırlandı. Daha sonra elde edilen sistem, en küçük kareler yöntemi kullanılarak çözüldü ve hem enerji değerleri hem de bu değerlerin sapma aralıkları iyileştirildi.

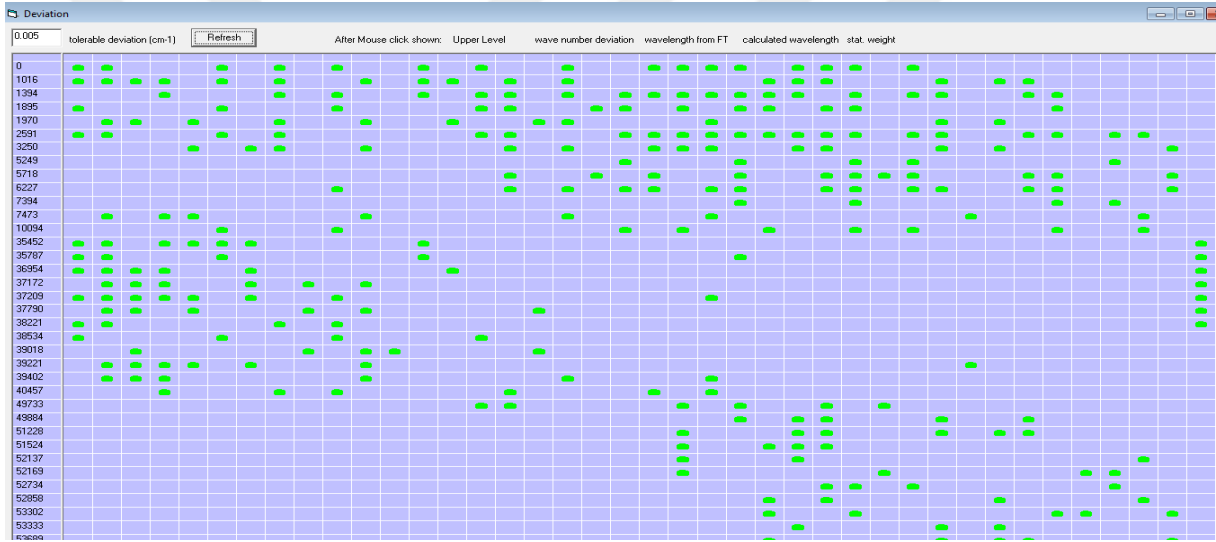
La II'nin taban seviyesinin ağırlık-merkezi, tüm seviyelerin ağırlık-merkezi değerleri ile birlikte fit sırasında değiştirildi. Sonuç kısmında, temel durum enerjisi sıfıra ayarlandı ve bu sapma hesaplanan tüm enerjilere eklendi. Tüm seviye enerjilerinin istatistiksel belirsizliği, seviyeleri birbirine bağlayan çizgilerin sayısına ve ağırlık faktörü ile tanımladığımız kalitesine bağlıdır.

Revize edilen enerji seviyelerinin belirlenmesi için, FT spektrumunda gözlenen ve sınıflandırılan 344 La II spektral geçiş Tablo 4.1'de verildi. Bu geçişlerin ayrıışmışlık durumuna ve Sinyal/Gürültü oranına göre belirlenen ağırlık faktörü (wf) değerleri, "Global-fit Programı"nın [6] oluşturduğu lineer denklem sisteminde kullanıldı.

İlk aşamada; daha önce belirtilen 344 satır değerlendirilmiş ve 92 revize edilmiş enerji değeri belirlenmiştir. FT spektrumundan belirlenen ağırlık-merkezi dalga-sayıları ve revize edilmiş enerji değerlerinden hesaplanan dalga sayıları arasındaki fark Denklem (4.1)'deki şekilde hesaplandı ve tüm bu çizgiler için $\Delta v \leq 0.005\text{ cm}^{-1}$ olarak bulundu. Şekil 4.1'de "Global-fit Programı"nda sonuç çıktılarında biri olan enerji seviyeleri arasındaki geçişleri noktalar halinde görülmektedir. Şekil 4.1'de satırlar çift-pariteli, sütunlar ise tek-pariteli ince-yapı seviyelerini göstermektedir. Kutular içerisindeki noktalar, alt-üst enerji seviyeleri arasındaki

çalışmada kullanılan her bir geçişi ifade eder ve spektral çizgilerin standart sapma değerlerinin ne mertebede olduğunu gösterir. “Global-fit Programı”nda bu noktalar kırmızı, mavi ve yeşil renkte ayarlanmıştır. Enerji seviyelerinin revize edilmesi işlemleri süresince, spektral-çizgilerin ağırlık-merkezlerini ne kadar doğrulukla bulunduğu, bu pencereden görüldü. Sol üst köşede bulunan standart sapma değeri, spektral-çizgiler için elde edilen ağırlık-merkezi dalga-sayısı değerlerinin maksimum standart sapmasını belirleyen kutudur. İncelenen çizgilerin ağırlık-merkezi dalga-sayılarının standart sapma değerleri, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, $\Delta v \leq 0.005 \text{ cm}^{-1}$ (yeşil renkli noktalar) olarak hesaplandı.

$$\Delta v = v_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}| \quad (4.1)$$



Şekil 4.1: “Global-fit Programı”nda spektral-çizgilerin iterasyon sonucu elde edilen ağırlık-merkezi dalga-sayısı sapma değerlerini gösteren pencere.

İkinci aşama olarak; yüksek La II ince-yapı enerji seviyelerinin daha yüksek hassasiyetle tayini için, MIT dalga-boyu tablolarından [3] 81 çizgi kullanıldı. Ancak bu kez ilk aşamada revize edilen 94 alt enerji seviyesi, en küçük kareler fit metodunda sabit alındı. 81 çizginin tümü için ağırlık faktörü uygulanmamıştır. Bu prosedürle, 20 çift-pariteli ve bir tek-pariteli yüksek ince-yapı seviyesinin enerji düzeltmeleri belirlendi.

Tablo 4.2’de ise, MIT dalga-boyu tablolarından [3] alınan ve FT spektrumun aralığında yer almadığı için ağırlık faktörü (wf) uygulanmayan fakat global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri gösterildi. Bu 81 geçişin MIT [3]’de belirtilen ağırlık merkezi dalgasayıları ve sınıflandırmaları yardımıyla, yüksek seviyelerdeki ince-yapı seviyelerinin de revize edilmesi sağlandı.

Tablo 4.1: FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, ν_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta\nu = \nu_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}|$, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).

λ_{hava} (nm)	ν_{vakum} (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$	wf
333.74918	29954.006	-0.001	33204.388	2	3250.381	3	3
337.63305	29609.449	0.004	32201.058	3	2591.613	2	1
338.09094	29569.349	-0.003	32160.965	1	2591.613	2	5
345.21806	28958.901	-0.003	30353.375	1	1394.471	2	3
350.99866	28481.990	0.001	29498.079	2	1016.090	3	1
351.29153	28458.246	0.001	30353.375	1	1895.130	1	3
353.36256	28291.459	0.004	21441.685	1	49733.140	1	1
355.08105	28154.540	0.000	28154.540	1	0.000	2	1
355.72458	28103.608	0.000	29498.079	2	1394.471	2	1
357.00580	28002.753	0.000	26837.656	3	54840.409	3	1
358.16628	27912.025	-0.002	25973.367	1	53885.394	2	1
358.54873	27882.253	0.005	28154.540	1	56036.788	2	1
359.06204	27842.394	0.001	27388.135	2	55230.528	1	1
359.65977	27796.123	0.004	27388.135	2	55184.254	2	1
360.10495	27761.761	-0.001	30353.375	1	2591.613	2	1
360.12343	27760.337	0.002	27423.919	1	55184.254	2	3
360.63956	27720.609	-0.001	28315.299	3	56035.909	4	1
360.81531	27707.106	0.003	24462.681	2	52169.784	1	1
360.91858	27699.179	0.001	32201.058	3	59900.236	2	1
361.23265	27675.097	0.001	24462.681	2	52137.777	3	1
361.85986	27627.129	0.005	22106.016	2	49733.140	1	1
362.88178	27549.330	-0.003	28565.423	4	1016.090	3	3
363.71429	27486.273	0.000	33204.388	2	5718.115	1	3
363.91157	27471.373	0.001	26414.022	2	53885.394	2	1
364.10611	27456.696	0.004	64411.332	3	36954.640	3	1
364.16476	27452.274	0.000	27388.135	2	54840.409	3	1
364.54132	27423.917	-0.002	27423.919	1	0.000	2	3
365.01757	27388.137	0.002	27388.135	2	0.000	2	1
366.20667	27299.208	-0.001	28315.299	3	1016.090	3	1
366.52164	27275.749	-0.004	26414.022	2	53689.775	3	1
367.02232	27238.542	-0.001	64411.332	3	37172.789	4	1
369.42596	27061.321	-0.003	24462.681	2	51524.005	2	3
369.61148	27047.738	0.000	26837.656	3	53885.394	2	1
370.17995	27006.203	0.000	28315.299	3	55321.502	4	1
370.58102	26976.976	0.002	33204.388	2	6227.414	2	3
371.35394	26920.829	0.001	28315.299	3	1394.471	2	3
371.48572	26911.279	0.001	32160.965	1	5249.687	0	3

Tablo 4.1 (devam): FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, ν_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta\nu = \nu_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}|$, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$	wf
371.55216	26906.467	0.001	29498.079	2	2591.613	2	3
371.79690	26888.756	-0.003	26414.022	2	53302.781	1	1
372.07093	26868.953	-0.002	28315.299	3	55184.254	2	1
372.50486	26837.654	-0.002	26837.656	3	0.000	2	1
373.14172	26791.850	-0.003	28315.299	3	55107.152	4	1
373.50249	26765.972	0.005	24462.681	2	51228.648	3	1
373.58492	26760.066	-0.003	28154.540	1	1394.471	2	1
373.64058	26756.080	0.001	28565.423	4	55321.502	4	1
375.90774	26594.714	-0.001	28565.423	4	1970.708	4	3
376.65813	26541.733	0.004	28565.423	4	55107.152	4	1
376.70106	26538.708	-0.001	29498.079	2	56036.788	2	1
376.89413	26525.113	0.003	28315.299	3	54840.409	3	1
377.31064	26495.833	0.004	26837.656	3	53333.485	4	1
378.04964	26444.041	-0.001	26414.022	2	52858.064	3	1
379.08170	26372.048	0.003	27388.135	2	1016.090	3	3
379.47681	26344.590	-0.001	28315.299	3	1970.708	4	3
384.07123	26029.453	0.005	27423.919	1	1394.471	2	1
384.90059	25973.368	0.001	25973.367	1	0.000	2	1
386.30614	25878.867	0.005	27423.919	1	53302.781	1	1
386.44599	25869.502	0.000	28565.423	4	54434.925	5	1
387.16340	25821.568	0.002	26837.656	3	1016.090	3	1
388.50434	25732.445	-0.004	29498.079	2	55230.528	1	1
388.63663	25723.686	0.000	28315.299	3	2591.613	2	3
389.24611	25683.409	-0.004	30353.375	1	56036.788	2	1
391.08066	25562.932	0.005	28154.540	1	2591.613	2	1
391.60366	25528.792	0.003	27423.919	1	1895.130	1	5
392.15333	25493.010	0.005	27388.135	2	1895.130	1	5
392.50876	25469.926	-0.003	27388.135	2	52858.064	3	1
392.92125	25443.188	0.003	26837.656	3	1394.471	2	3
393.62132	25397.937	0.005	26414.022	2	1016.090	3	1
393.98520	25374.481	0.005	28315.299	3	53689.775	3	1
394.41443	25346.867	0.004	27388.135	2	52734.998	2	1
394.91025	25315.044	0.002	28565.423	4	3250.381	3	10
394.97205	25311.083	0.004	27423.919	1	52734.998	2	3
395.14314	25300.124	0.003	26837.656	3	52137.777	3	1
395.60703	25270.458	-0.001	24462.681	2	49733.140	1	3
397.90768	25124.351	-0.001	28565.423	4	53689.775	3	1

Tablo 4.1 (devam): FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, ν_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta\nu = \nu_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}|$, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$	wf
398.13533	25109.985	0.002	26414.022	2	51524.005	2	3
398.85117	25064.920	0.002	28315.299	3	3250.381	3	5
399.45030	25027.326	0.002	14375.198	3	39402.522	3	3
399.57446	25019.549	-0.002	26414.022	2	1394.471	2	3
399.59626	25018.185	-0.001	28315.299	3	53333.485	4	1
401.86161	24877.157	0.004	30353.375	1	55230.528	1	1
402.35768	24846.486	-0.004	14375.198	3	39221.688	4	3
402.58744	24832.306	0.000	27423.919	1	2591.613	2	3
402.61061	24830.877	-0.002	30353.375	1	55184.254	2	3
403.16845	24796.521	-0.001	27388.135	2	2591.613	2	3
403.63169	24768.063	0.001	28565.423	4	53333.485	4	1
403.65854	24766.415	0.000	32160.965	1	7394.550	0	3
404.29026	24727.718	0.002	32201.058	3	7473.342	4	3
404.96774	24686.351	0.002	26837.656	3	51524.005	2	3
405.00761	24683.921	0.002	15773.814	3	40457.733	2	5
405.80759	24635.262	0.002	30353.375	1	5718.115	1	1
405.99370	24623.969	0.003	27545.818	0	52169.784	1	1
406.71241	24580.456	-0.002	28154.540	1	52734.998	2	3
406.73820	24578.898	0.002	25973.367	1	1394.471	2	3
407.67046	24522.692	-0.002	24522.694	3	0.000	2	1
407.73368	24518.890	-0.002	26414.022	2	1895.130	1	5
408.67055	24462.682	0.001	24462.681	2	0.000	2	1
409.87176	24390.991	-0.001	26837.656	3	51228.648	3	1
409.95364	24386.119	-0.001	14147.954	2	38534.074	1	5
411.32733	24304.680	-0.004	61514.413	2, 3, 4	37209.729	3	3
411.53110	24292.645	0.004	28565.423	4	52858.064	3	1
412.32211	24246.043	0.000	26837.656	3	2591.613	2	1
413.18965	24195.136	0.000	33204.388	2	57399.524	2	1
413.24838	24191.698	0.002	29498.079	2	53689.775	3	5
413.79210	24159.911	0.001	59612.512	3	35452.602	3	1
414.17196	24137.753	-0.001	27388.135	2	3250.381	3	5
414.20423	24135.872	0.002	27388.135	2	51524.005	2	1
414.37444	24125.958	-0.003	30353.375	1	6227.414	2	1
415.19578	24078.233	-0.004	25973.367	1	1895.130	1	3
415.27683	24073.534	0.000	14147.954	2	38221.488	2	3
415.45964	24062.941	0.000	36954.640	3	61017.580	4	3
418.09837	23911.077	-0.002	25973.367	1	49884.446	2	3

Tablo 4.1 (devam): FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, ν_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta\nu = \nu_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}|$, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açıl momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açıl momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$	wf
419.23428	23846.291	0.001	14375.198	3	38221.488	2	5
419.33583	23840.517	0.004	27388.135	2	51228.648	3	1
419.43550	23834.852	0.001	32201.058	3	56035.909	4	3
419.60907	23824.992	0.002	59612.512	3	35787.522	2	1
419.65451	23822.413	0.004	26414.022	2	2591.613	2	3
420.23503	23789.505	0.003	60744.142	4	36954.640	3	1
420.40364	23779.964	0.000	29498.079	2	5718.115	1	3
420.76090	23759.773	0.000	25973.367	1	49733.140	1	3
421.75554	23703.741	0.001	15698.782	4	39402.522	3	5
423.09484	23628.708	0.000	15773.814	3	39402.522	3	3
423.83805	23587.276	0.001	26837.656	3	3250.381	3	1
424.12433	23571.355	0.002	60744.142	4	37172.789	4	1
424.83323	23532.023	0.004	30353.375	1	53885.394	2	1
424.99782	23522.910	0.004	15698.782	4	39221.688	4	3
426.35794	23447.871	-0.003	15773.814	3	39221.688	4	3
426.94897	23415.412	0.001	14375.198	3	37790.609	4	3
427.56365	23381.750	-0.004	25973.367	1	2591.613	2	1
428.69650	23319.964	0.002	15698.782	4	39018.744	5	3
429.60471	23270.665	0.000	29498.079	2	6227.414	2	3
430.04396	23246.897	0.005	23246.892	2	0.000	2	1
432.25058	23128.225	0.002	24522.694	3	1394.471	2	3
433.37516	23068.209	-0.001	24462.681	2	1394.471	2	5
433.49611	23061.773	-0.002	14147.954	2	37209.729	3	3
433.77795	23046.790	0.000	26837.656	3	49884.446	2	1
435.43987	22958.830	0.005	30353.375	1	7394.550	0	1
435.54034	22953.534	0.001	60744.142	4	37790.609	4	3
435.61871	22949.404	-0.002	30353.375	1	53302.781	1	1
436.30421	22913.348	-0.001	28315.299	3	51228.648	3	1
436.44237	22906.095	0.001	32201.058	3	55107.152	4	1
436.46606	22904.851	-0.002	28154.540	1	5249.687	0	5
437.81031	22834.526	-0.005	14375.198	3	37209.729	3	3
438.34479	22806.684	-0.002	14147.954	2	36954.640	3	3
438.51969	22797.588	-0.003	14375.198	3	37172.789	4	1
441.11956	22663.226	0.001	28565.423	4	51228.648	3	1
441.22380	22657.871	-0.001	59612.512	3	36954.640	3	1
441.91500	22622.433	0.003	16599.258	4	39221.688	4	1
442.75640	22579.443	0.001	14375.198	3	36954.640	3	3

Tablo 4.1 (devam): FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, ν_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta\nu = \nu_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}|$, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açısasal momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açısasal momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$	wf
442.98972	22567.550	-0.001	24462.681	2	1895.130	1	5
443.29542	22551.988	0.002	24522.694	3	1970.708	4	1
443.58451	22537.291	0.000	22537.291	3	0.000	2	1
444.39249	22496.315	0.004	27388.135	2	49884.446	2	3
445.51324	22439.723	0.000	59612.512	3	37172.789	4	1
445.57874	22436.425	0.000	28154.540	1	5718.115	1	5
447.40168	22345.009	0.004	27388.135	2	49733.140	1	1
449.87463	22222.181	0.006	18235.558	3	40457.733	2	1
450.21731	22205.267	0.001	32160.965	1	54366.231	1	3
450.58138	22187.325	0.003	27545.818	0	49733.140	1	1
450.84735	22174.236	0.004	27423.919	1	5249.687	0	1
452.23563	22106.167	-0.002	32201.058	3	10094.889	2	3
452.52915	22091.829	0.002	15698.782	4	37790.609	4	3
452.60999	22087.883	-0.002	28315.299	3	6227.414	2	3
455.84608	21931.082	0.001	24522.694	3	2591.613	2	1
455.92831	21927.126	0.000	28154.540	1	6227.414	2	5
456.25138	21911.600	0.002	57364.200	3	35452.602	3	3
457.09700	21871.065	-0.003	24462.681	2	2591.613	2	1
457.48696	21852.422	0.001	23246.892	2	1394.471	2	5
458.00503	21827.704	0.001	27545.818	0	5718.115	1	3
458.12680	21821.902	-0.001	59612.512	3	37790.609	4	1
458.70964	21794.176	0.003	58748.813	4	36954.640	3	1
460.05240	21730.566	-0.003	29498.079	2	51228.648	3	1
460.16182	21725.399	0.001	60744.142	4	39018.744	5	3
460.57726	21705.803	-0.001	27423.919	1	5718.115	1	3
461.33780	21670.020	0.000	27388.135	2	5718.115	1	3
461.98700	21639.569	0.001	14147.954	2	35787.522	2	5
463.33363	21576.677	-0.001	57364.200	3	35787.522	2	1
463.34760	21576.027	0.003	58748.813	4	37172.789	4	3
463.49538	21569.147	0.000	28315.299	3	49884.446	2	3
463.64119	21562.364	0.003	18895.372	2	40457.733	2	1
464.14239	21539.081	-0.003	58748.813	4	37209.729	3	1
464.50100	21522.452	-0.002	60744.142	4	39221.688	4	1
464.52798	21521.202	0.001	22537.291	3	1016.090	3	1
464.61948	21516.964	-0.003	31785.814	0	53302.781	1	1
464.74952	21510.943	-0.004	15698.782	4	37209.729	3	3
465.54892	21474.007	0.000	15698.782	4	37172.789	4	3

Tablo 4.1 (devam): FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, ν_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta\nu = \nu_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}|$, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$	wf
466.25068	21441.687	0.002	21441.685	1	0.000	2	1
466.37620	21435.916	0.001	15773.814	3	37209.729	3	3
466.89005	21412.325	0.001	14375.198	3	35787.522	2	5
467.18125	21398.978	0.003	15773.814	3	37172.789	4	3
467.24441	21396.086	0.002	17825.604	3	39221.688	4	1
467.35497	21391.024	0.000	59612.512	3	38221.488	2	1
468.43693	21341.618	-0.002	60744.142	4	39402.522	3	1
468.86443	21322.159	0.000	17211.915	2	38534.074	1	3
469.11751	21310.656	0.001	22705.126	1	1394.471	2	3
469.24975	21304.651	0.003	14147.954	2	35452.602	3	3
469.96307	21272.315	0.002	24522.694	3	3250.381	3	3
470.32697	21255.856	-0.002	15698.782	4	36954.640	3	3
471.29265	21212.304	0.004	24462.681	2	3250.381	3	1
471.64390	21196.506	0.001	27423.919	1	6227.414	2	3
471.75869	21191.349	-0.002	16599.258	4	37790.609	4	1
471.99300	21180.829	0.003	15773.814	3	36954.640	3	3
472.41649	21161.842	-0.001	33204.388	2	54366.231	1	1
472.44156	21160.719	-0.002	27388.135	2	6227.414	2	1
472.84151	21142.821	0.001	22537.291	3	1394.471	2	3
474.02738	21089.929	0.003	22106.016	2	1016.090	3	1
474.30903	21077.405	0.001	14375.198	3	35452.602	3	3
474.87289	21052.379	0.001	28525.720	5	7473.342	4	3
480.40399	20809.997	0.001	22705.126	1	1895.130	1	5
480.90046	20788.513	0.000	22683.643	0	1895.130	1	10
482.40493	20723.682	0.002	25973.367	1	5249.687	0	3
482.68764	20711.544	-0.001	22106.016	2	1394.471	2	1
483.96203	20657.006	0.000	32201.058	3	52858.064	3	1
484.00245	20655.281	0.002	23246.892	2	2591.613	2	1
485.05476	20610.471	0.000	16599.258	4	37209.729	3	1
485.91384	20574.033	0.000	32160.965	1	52734.998	2	5
486.08982	20566.584	0.001	22537.291	3	1970.708	4	1
488.01659	20485.385	-0.002	33204.388	2	53689.775	3	5
489.14171	20438.265	0.003	18580.482	5	39018.744	5	1
489.82972	20409.558	-0.002	57364.200	3	36954.640	3	1
489.99172	20402.811	0.001	20402.810	3	0.000	2	1
490.27974	20390.825	0.001	59612.512	3	39221.688	4	1
490.38701	20386.365	-0.002	29498.079	2	49884.446	2	1

Tablo 4.1 (devam): FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, ν_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta\nu = \nu_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}|$, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$	wf
490.44453	20383.974	0.004	31785.814	0	52169.784	1	1
492.09742	20315.508	0.004	21331.594	4	1016.090	3	1
492.18003	20312.098	-0.002	22282.808	5	1970.708	4	1
493.48249	20258.488	0.002	30353.375	1	10094.889	2	3
493.56127	20255.255	0.003	25973.367	1	5718.115	1	1
494.64476	20210.888	0.002	22106.016	2	1895.130	1	1
494.66663	20209.994	0.004	59612.512	3	39402.522	3	1
495.12187	20191.412	0.001	57364.200	3	37172.789	4	3
495.20570	20187.994	-0.001	19214.527	4	39402.522	3	1
496.02942	20154.470	-0.001	57364.200	3	37209.729	3	1
497.03948	20113.513	0.000	22705.126	1	2591.613	2	1
497.41336	20098.395	0.002	33204.388	2	53302.781	1	3
498.68326	20047.215	0.001	21441.685	1	1394.471	2	1
499.12755	20029.371	0.002	27423.919	1	7394.550	0	5
499.64030	20008.816	-0.003	32160.965	1	52169.784	1	3
499.68159	20007.163	0.002	19214.527	4	39221.688	4	1
499.94782	19996.509	-0.002	23246.892	2	3250.381	3	5
500.21249	19985.929	-0.001	18235.558	3	38221.488	2	1
501.44723	19936.717	-0.002	32201.058	3	52137.777	3	1
504.80227	19804.214	-0.003	19214.527	4	39018.744	5	1
506.29176	19745.952	-0.001	25973.367	1	6227.414	2	1
506.69932	19730.069	0.000	58748.813	4	39018.744	5	3
508.01990	19678.782	-0.006	15773.814	3	35452.602	3	3
509.05671	19638.703	0.001	18895.372	2	38534.074	1	1
510.75008	19573.592	0.001	57364.200	3	37790.609	4	3
511.45654	19546.556	0.001	21441.685	1	1895.130	1	5
511.96558	19527.121	-0.004	58748.813	4	39221.688	4	1
512.29923	19514.404	0.001	22106.016	2	2591.613	2	1
515.67336	19386.720	0.000	20402.810	3	1016.090	3	1
515.74243	19384.124	-0.001	17825.604	3	37209.729	3	1
516.36144	19360.886	0.000	21331.594	4	1970.708	4	1
516.72714	19347.184	-0.001	17825.604	3	37172.789	4	1
516.75099	19346.291	0.000	58748.813	4	39402.522	3	3
517.29049	19326.115	-0.001	18895.372	2	38221.488	2	1
518.34203	19286.909	-0.001	22537.291	3	3250.381	3	5
518.82121	19269.096	0.001	19749.649	6	39018.744	5	1
520.41385	19210.127	0.000	18580.482	5	37790.609	4	1

Tablo 4.1 (devam): FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, ν_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta\nu = \nu_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}|$, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$	wf
522.24662	19142.712	0.000	57364.200	3	38221.488	2	3
522.61998	19129.036	0.000	17825.604	3	36954.640	3	1
525.93851	19008.339	0.000	20402.810	3	1394.471	2	1
529.08281	18895.375	0.003	18895.372	2	0.000	2	1
530.19798	18855.633	-0.002	22106.016	2	3250.381	3	1
530.26246	18853.340	-0.004	16599.258	4	35452.602	3	1
530.35440	18850.071	-0.001	21441.685	1	2591.613	2	3
537.70739	18592.305	-0.002	18580.482	5	37172.789	4	1
538.09783	18578.815	-0.002	25973.367	1	7394.550	0	5
538.17701	18576.082	0.000	19214.527	4	37790.609	4	1
538.19086	18575.603	-0.004	17211.915	2	35787.522	2	1
544.75677	18351.716	-0.001	22106.016	2	40457.733	2	1
545.86795	18314.359	0.002	18895.372	2	37209.729	3	1
546.43721	18295.280	0.000	24522.694	3	6227.414	2	1
548.07276	18240.684	-0.003	17211.915	2	35452.602	3	1
548.22685	18235.557	-0.001	18235.558	3	0.000	2	1
549.34510	18198.437	0.000	19214.527	4	1016.090	3	1
553.56675	18059.652	0.001	28154.540	1	10094.889	2	3
556.69217	17958.262	0.000	19214.527	4	37172.789	4	1
567.15435	17626.993	-0.005	17825.604	3	35452.602	3	1
570.33223	17528.776	-0.001	23246.892	2	5718.115	1	1
571.24060	17500.903	0.002	18895.372	2	1394.471	2	3
572.72850	17455.438	-0.001	22705.126	1	5249.687	0	1
576.90632	17329.031	0.001	27423.919	1	10094.889	2	3
579.75724	17243.817	-0.002	19214.527	4	1970.708	4	1
580.57706	17219.468	0.000	18235.558	3	1016.090	3	1
580.83175	17211.917	0.002	17211.915	2	0.000	2	1
580.86789	17210.846	0.005	23246.892	2	40457.733	2	1
584.89342	17092.394	0.005	21441.685	1	38534.074	1	1
586.37006	17049.351	-0.001	24522.694	3	7473.342	4	1
587.39916	17019.481	0.003	23246.892	2	6227.414	2	1
588.06395	17000.241	-0.001	18895.372	2	1895.130	1	5
589.26727	16965.526	-0.002	22683.643	0	5718.115	1	1
592.77167	16865.229	-0.002	22537.291	3	39402.522	3	1
593.62145	16841.086	-0.001	18235.558	3	1394.471	2	3
597.35108	16735.938	0.002	22282.808	5	39018.744	5	1
606.71223	16477.716	0.004	22705.126	1	6227.414	2	1

Tablo 4.1 (devam): FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, ν_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta\nu = \nu_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}|$, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açısasal momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açısasal momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$	wf
610.03742	16387.900	-0.001	22106.016	2	5718.115	1	3
612.60807	16319.133	0.000	26414.022	2	10094.889	2	1
612.95580	16309.876	-0.001	22537.291	3	6227.414	2	1
614.65271	16264.848	-0.002	18235.558	3	1970.708	4	1
617.27223	16195.826	0.001	17211.915	2	1016.090	3	1
618.80834	16155.622	-0.008	23246.892	2	39402.522	3	1
626.23047	15964.146	0.000	19214.527	4	3250.381	3	5
627.37428	15935.041	0.002	24522.694	3	40457.733	2	1
629.60422	15878.602	0.000	22106.016	2	6227.414	2	1
639.04815	15643.948	0.003	18235.558	3	2591.613	2	1
639.90302	15623.049	0.003	21331.594	4	36954.640	3	1
644.65870	15507.798	-0.003	22282.808	5	37790.609	4	1
649.81632	15384.713	0.001	20402.810	3	35787.522	2	3
652.69827	15316.783	-0.002	17211.915	2	1895.130	1	5
663.65329	15063.949	0.000	22537.291	3	7473.342	4	1
664.27758	15049.792	0.000	20402.810	3	35452.602	3	1
667.14184	14985.178	0.001	18235.558	3	3250.381	3	3
671.86543	14879.825	-0.003	24522.694	3	39402.522	3	1
677.42425	14757.725	0.001	15773.814	3	1016.090	3	3
680.88608	14682.692	0.000	15698.782	4	1016.090	3	3
683.40638	14628.545	-0.005	16599.258	4	1970.708	4	1
683.79160	14620.304	0.002	17211.915	2	2591.613	2	1
685.90675	14575.219	-0.004	17825.604	3	3250.381	3	1
695.25025	14379.344	0.001	15773.814	3	1394.471	2	3
695.45072	14375.199	0.001	14375.198	3	0.000	2	5
695.80927	14367.791	-0.001	24462.681	2	10094.889	2	1
706.62110	14147.955	0.001	14147.954	2	0.000	2	10
728.23355	13728.076	0.002	15698.782	4	1970.708	4	5
748.34680	13359.109	0.001	14375.198	3	1016.090	3	5
748.92045	13348.877	0.000	16599.258	4	3250.381	3	1
761.29691	13131.864	0.000	14147.954	2	1016.090	3	3
787.98936	12687.036	0.001	24522.694	3	37209.729	3	1
789.17592	12667.961	0.003	18895.372	2	6227.414	2	1
792.78857	12610.235	-0.002	22705.126	1	10094.889	2	1
805.93803	12404.491	0.001	14375.198	3	1970.708	4	5
815.91419	12252.822	-0.002	14147.954	2	1895.130	1	1

Tablo 4.1 (devam): FT spektrumunda gözlenen, sınıflandırılan ve ağırlık faktörü (wf) uygulanarak global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri. (λ_{hava} : havadaki dalga-boyu, ν_{vakum} : vakumdaki dalga-sayısı, $\Delta\nu = \nu_{\text{vakum}} - |E_{\text{çift}} - E_{\text{tek}}|$, E_{tek} : tek-pariteli seviye, J_{tek} : tek-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, $E_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviye, $J_{\text{çift}}$: çift-pariteli seviyenin yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı, wf: Global-fit programındaki ağırlık-faktörü değeri).

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$	wf
848.40534	11783.581	-0.004	14375.198	3	2591.613	2	1
851.46880	11741.186	0.001	19214.527	4	7473.342	4	1
865.08798	11556.343	0.002	14147.954	2	2591.613	2	1
934.67520	10695.969	0.001	28525.720	5	39221.688	4	1
1018.65670	9814.160	0.005	25973.367	1	35787.522	2	1
1027.67200	9728.065	-0.001	59612.512	3	49884.446	2	1
1095.48030	9125.916	0.000	16599.258	4	7473.342	4	1
1135.98980	8800.486	0.003	18895.372	2	10094.889	2	1
1192.44070	8383.867	0.003	59612.512	3	51228.648	3	1
1204.42120	8300.472	0.000	15773.814	3	7473.342	4	5
1404.69690	7117.028	0.002	17211.915	2	10094.889	2	1
1448.48980	6901.855	-0.001	14375.198	3	7473.342	4	5

Tablo 4.2: MIT dalga- boyu tablolarından [3] alınan ve FT spektrumun aralığında yer almadığı için ağırlık faktörü (wf) uygulanmayan fakat global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri.

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$
216.136	46252.64	0.21	15773.814	3	62026.24	2
218.787	45692.26	0.07	45692.19	1	0.000	2
223.074	44814.24	-0.08	17211.915	2	62026.24	2
225.676	44297.59	-0.13	45692.19	1	1394.471	2
228.094	43828.04	0.02	18580.482	5	62408.50	6
231.782	43130.73	-0.13	18895.372	2	62026.24	2
231.9441	43100.59	0.02	45692.19	1	2591.613	2
232.8753	42928.26	-0.06	16599.258	4	59527.58	4
236.550	42261.44	-0.06	21441.685	1	63703.19	1
239.7237	41701.99	0.01	17825.604	4	59527.58	4
240.328	41597.14	-0.03	22106.016	2	63703.19	1
241.761	41350.60	0.01	28154.540	1	69505.13	0
243.713	41019.43	-0.12	22683.643	0	63703.19	1
243.839	40998.23	0.17	22705.126	1	63703.19	1
245.815	40668.69	0.00	28565.423	4	69234.11	3
247.106	40456.23	-0.06	23246.892	2	63703.19	1
247.1900	40442.49	-0.02	45692.19	1	5249.687	0
247.243	40433.82	-0.11	17825.604	4	58259.53	4
247.984	40313.01	-0.05	19214.527	4	59527.58	4
250.118	39969.08	0.07	22537.291	3	62506.30	2
251.456	39756.42	0.15	24522.694	3	64278.96	2
251.9215	39682.96	0.03	18235.558	3	57918.49	3
253.160	39488.84	-0.11	22537.291	3	62026.24	2
253.314	39464.83	0.06	45692.19	1	6227.414	2
254.24	39321.10	-0.01	22705.126	1	62026.24	2
254.64	39259.34	-0.07	23246.892	2	62506.30	2
255.3398	39151.75	0.00	30353.375	1	69505.13	0
256.0374	39045.08	0.08	19214.527	4	58259.53	4
256.1848	39022.62	-0.23	22106.016	2	61128.87	1
257.7921	38779.34	-0.01	23246.892	2	62026.24	2
260.0869	38437.20	0.00	28154.540	1	66591.74	0
260.1777	38423.79	0.04	22705.126	1	61128.87	1
261.0335	38297.82	0.18	45692.19	1	7394.55	0
262.003	38156.11	-0.12	17825.604	4	55981.84	5
263.193	37983.61	0.00	24522.694	3	62506.30	2
263.8988	37882.02	0.05	23246.892	2	61128.87	1
266.136	37563.60	0.04	24462.681	2	62026.24	2
266.475	37515.81	0.13	20402.810	3	57918.49	3
266.562	37503.57	0.02	24522.694	3	62026.24	2

Tablo 4.2 (devam): MIT dalga-boyu tablolarından [3] alınan ve FT spektrumun aralığında yer almadığı için ağırlık faktörü (wf) uygulanmayan fakat global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri.

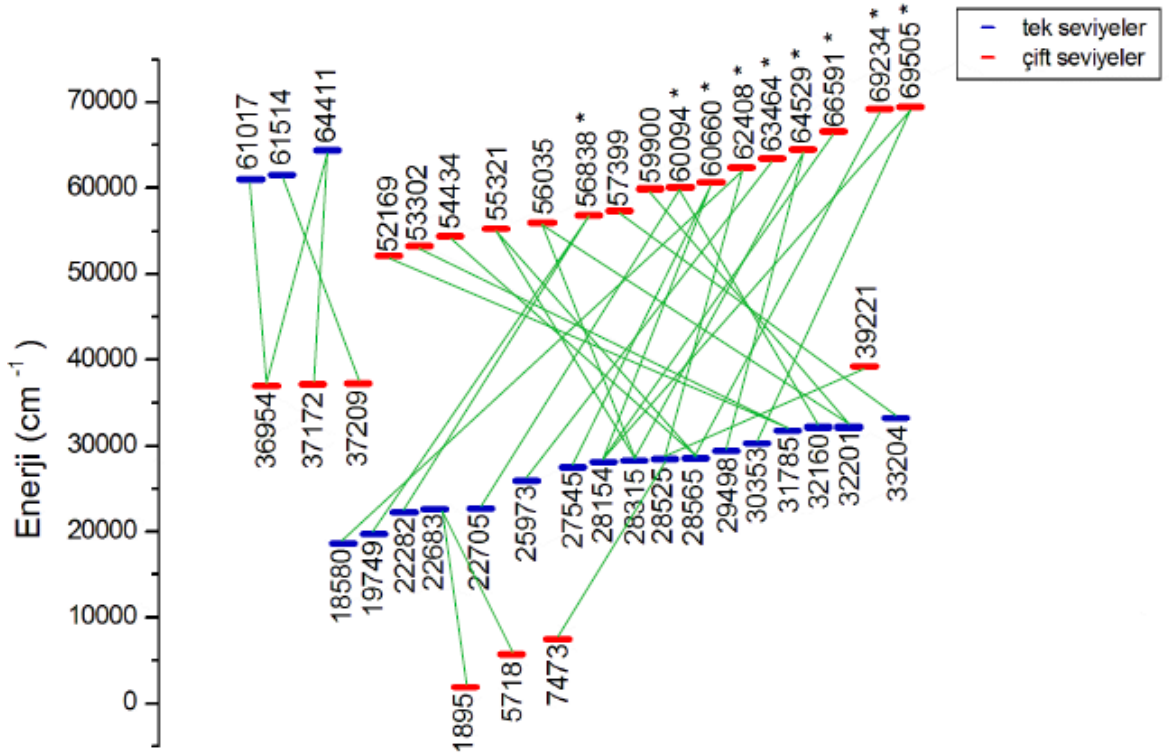
λ (nm)	ν (cm ⁻¹)	$\Delta\nu$ (cm ⁻¹)	E_{tek} (cm ⁻¹)	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm ⁻¹)	$J_{\text{çift}}$
266.654	37490.63	0.00	25973.367	1	63464.00	0
267.2906	37401.35	-0.01	18580.482	5	55981.84	5
267.3743	37389.64	0.00	22705.126	1	60094.76	0
267.986	37304.30	-0.16	27388.135	2	64692.59	3
268.4142	37244.79	0.02	22282.808	5	59527.58	4
269.5458	37088.44	0.03	19749.649	6	56838.06	6
270.649	36937.27	-0.07	27423.919	1	64361.26	1
273.2415	36586.83	-0.07	21331.594	4	57918.49	3
275.2858	36315.15	0.09	27388.135	2	63703.19	1
275.9156	36232.26	0.07	19749.649	6	55981.84	5
276.0504	36214.57	0.05	28315.299	3	64529.82	2
276.1111	36206.61	-0.11	28154.540	1	64361.26	1
277.8757	35976.69	-0.03	22282.808	5	58259.53	4
277.9778	35963.48	-0.18	28315.299	3	64278.96	2
279.1513	35812.31	-0.17	22106.016	2	57918.49	3
279.8546	35722.31	0.07	22537.291	3	58259.53	4
280.839	35597.10	-0.20	45692.19	1	10094.889	2
284.050	35194.72	0.21	29498.079	2	64692.59	3
284.3659	35155.62	0.12	25973.367	1	61128.87	1
284.669	35118.19	0.03	27388.135	2	62506.30	2
285.372	35031.69	-0.05	29498.079	2	64529.82	2
285.5902	35004.92	0.04	24522.694	3	59527.58	4
288.5141	34650.19	-0.06	21331.594	4	55981.84	5
289.3071	34555.21	-0.04	22282.808	5	56838.06	6
292.390	34190.89	-0.11	28315.299	3	62506.30	2
293.9618	34008.08	0.19	30353.375	1	64361.26	1
295.0492	33882.75	-0.03	28525.720	5	62408.50	6
295.145	33871.75	0.05	28154.540	1	62026.24	2
296.2910	33740.75	0.01	27388.135	2	61128.87	1
296.605	33705.03	0.08	27423.919	1	61128.87	1
296.657	33699.12	0.09	22282.808	5	55981.84	5
297.683	33582.98	-0.07	27545.818	0	61128.87	1
301.895	33114.45	0.12	27545.818	0	60660.15	1
307.551	32505.49	-0.12	28154.540	1	60660.15	1
311.263	32117.86	-0.14	32160.965	1	64278.96	2
316.056	31630.81	0.01	29498.079	2	61128.87	1
317.488	31488.14	-0.06	33204.388	2	64692.59	3
321.712	31074.73	0.15	33204.388	2	64278.96	2
329.444	30345.43	0.10	32160.965	1	62506.30	2

Tablo 4.2 (devam): MIT dalga- boyu tablolarından [3] alınan ve FT spektrumun aralığında yer almadığı için ağırlık faktörü (wf) uygulanmayan fakat global-fit programında kullanılan La II spektral çizgileri.

λ (nm)	ν (cm^{-1})	$\Delta\nu$ (cm^{-1})	E_{tek} (cm^{-1})	J_{tek}	$E_{\text{çift}}$ (cm^{-1})	$J_{\text{çift}}$
357.8871*	27933.80	0.00	32160.965	1	60094.76	0
358.00685*	27924.45	-0.03	33204.388	2	61128.87	1
365.83989*	27326.58	0.05	32201.058	3	59527.58	4

* Bu spektral çizgiler (MIT'de sırasıyla 357.889, 358.0099 ve 365.841 nm) FT spektrumunda gözlenmektedir, fakat Sinyal/Gürültü oranı simülasyon için yeterli değildir.

Birçok La II ince-yapı enerji seviyesi, çok sayıda spektral çizginin alt ve üst seviyesidir ve bu da ortalama olarak bu çalışmada her seviyenin diğer seviyeler ile yaklaşık yedi çizgi ile bağlandığı anlamına gelir. Bunun yanında, birkaç yüksek uyarılmış ince-yapı seviyesinin düzeltilmesi, FT-spektrumundan gözlenen sadece bir ya da iki spektral çizginin analizi aracılığıyla gerçekleştirildi. Şekil 4.2'de, sadece bir veya iki çizgi ile diğer seviyelere bağlanan ince-yapı enerjileri için bir seviye şeması gösterilmiştir. Enerji değerinin, sadece MIT dalga-boylarından [3] belirlenebildiği seviyeler yıldızla işaretlenmiştir.



Şekil 4.2: La II enerji seviyelerinin bir kısmı, yalnızca bir veya iki geçişle diğer seviyelere bağlanan seviyeler. *: MIT dalga boyları [3] kullanılarak hesaplanan yüksek enerjiler.

Ritz kombinasyon prensibine göre; bir spektral çizginin vakum içindeki dalga-boyunun (λ_{vakum}) karşılık gelen ağırlık-merkezi dalga-sayısı değeri, geçişin alt-üst ince-yapı seviyelerinin enerji değerleri (cm^{-1}) arasındaki farka eşittir. Bu ν dalga-sayısı:

$$\nu = \frac{1}{\lambda_{vakum}} = E_{üst} - E_{alt} \quad (4.2)$$

şeklinde verilir.

İnce-yapı seviyeleri aiy alt seviyelerine ayrıldığında, bu kural aşırı ince-yapının tek bir $F_{üst-F_{alt}}$ bileşeninin dalga-sayısının hesabı için de geçerlidir. Bu kural, birçok spektral çizgi çok geniş aşırı ince-yapı gösterdiği için, bu spektral çizgilerin ağırlık-merkezi dalga-sayısının belirlenmesinde de dikkate alınmalıdır.

İncelenen spektral çizgilerin ağırlık-merkezini belirleyebilmek için, Klasifikasyon [4-5] programı kullanılmıştır. Program, atomik ve tek başına iyonize edilmiş lantanın bilinen tüm deneysel ince-yapı seviyelerinin listesine [2-3] dayanarak, belirli bir dalga-boyu aralığında optik dipol geçişleri için seçim kurallarına uyan tüm olası geçişleri hesaplar. Program için, ince-yapı seviyeleri ve bu seviyelere ait bilinen aiy sabitlerinden oluşan giriş datası Genel Kısımlar bölümünde belirtilen yayınlardan alındı.

Klasifikasyon programında, aiy çizgileri yarı genişliği ayarlanabilen Gauss profiliyle simüle edildi. Simüle edilen teorik spektrumun, deneysel spektrum ile en iyi şekilde eşleşmesi için simülasyon programında dalga-boyu eksenini boyunca kaydırılarak ayarlandı. Spektral geçişin alt-üst seviyesinin aiy sabitleri biliniyorsa, ağırlık-merkezi değeri yüksek doğrulukla belirlenebildi. FT-spektrumunda gözlenen çizgilerin sinyal-gürültü oranı (S/N) 10'dan yüksek olduğu sürece, ağırlık-merkezinin doğruluğu S/N'den neredeyse bağımsızdır.

Bir geçişte, bir seviye için deneysel aiy sabitleri şimdiye kadar bilinmiyorsa, deneysel spektrum ile simülasyon programında aiy sabitlerine değerler vererek, teorik spektrumu örnek profile göre ayarlayarak, simüle ederek çizginin ağırlık-merkezi dalga-sayısı ve alt/üst seviyelerin aiy sabitleri tahmin edildi. Program, FT Spektroskopisi yöntemi ile kaydedilen spektrumlara ait alt-üst enerji seviyelerinin aiy sabitlerinin tahmini için uygun değerler vermektedir. Bu yöntem kullanılarak 34 seviye için yeni yarı-deneysel aiy sabitleri yaklaşık olarak belirlendi.

Literatürde 21 La II seviye için aiy sabitleri bilinmemektedir. FT spektrumunda bu seviyeleri içeren hiçbir çizgi tespit edilemedi. Buna karşın, MIT dalga-boyu tablolarının [3] listelediği spektral çizgilerden bir kısmı bu seviyeleri içermektedir. Bu seviyeler için tüm sınıflandırılmış çizgiler, FT spektral dalga-boyu aralığının dışındaki mor-üstü (UV) bölgededir. Aiy analizi yapılırken, bu çizgiler ikinci aşamada kullanıldı.

La II için ince-yapı seviyesi enerjileri için revize edilmiş değerlerini belirlemek için, "Global-fit Programı" [6] uygulandı. Bu amaçla, spektral çizginin $F_{üst-F_{alt}}$ geçiş bileşenlerinin ayrıışıklık durumuna ve sinyal-gürültü oranına (S/N) bağlı olarak; her bir çizgiye 1, 3, 5, 10

ve 50 derecelendirme olacak şekilde bir ağırlık faktörü (wf) belirlendi. Spektral çizgilerin wf değerlerini belirleyebilmek için, bazı kriterler kullanıldı (Tablo 4.3).

Tablo 4.3: La-Ar FT spektrumundaki La II spektral çizgileri için Global-fit programında uygulanan ağırlık faktörleri (wf), uygulanma kriterleri ve spektral çizgilerin sayısı.

Ağırlık Faktörü (wf)	Kriterler	FT-Spektrumunda bu faktörün uygulandığı spektral-çizgi sayısı
10	İyi ayrılmış, $S/N \geq 20$ olan güçlü spektral-çizgiler	3
5	Kısmen ayrılmış, $S/N \geq 20$ olan güçlü spektral-çizgiler veya İyi ayrılmış, $20 \geq S/N \geq 10$	36
3	Pek ayrılmamış, $S/N \geq 20$ olan güçlü spektral-çizgiler veya İyi ayrılmış, $S/N < 10$ olan zayıf spektral-çizgiler	100
1	Kısmen ayrılmış, $S/N < 10$ olan zayıf spektral-çizgiler veya Ayrılmamış spektral-çizgiler (S/N oranından bağımsız)	205

İyi-ayrılmış bir spektral çizgi, en az üç güçlü aşırı ince-yapı tepe noktasının iyi ayrıldığı ve en az iki ya da üç F_u-F_a geçişinin diğerlerinden ayrıldığı anlamına gelir. S/N değerinin 100'den büyük olduğu iyi ayrılmış çizgiler için, 50 ağırlık faktörü atanabilir, ancak incelenen La-Ar plazmasının FT-spektrumunda bu özelliklere sahip iyonik bir çizgi yoktur, sadece atomik çizgiler böyle yüksek S/N 'ye sahip olduğu görülmektedir. Farklı ağırlıklandırma faktörlerine sahip çizgi analiz örnekleri Şekil 4.3–4.13 aralığında gösterildi.

Enerji belirlemek için seçilen spektral çizgilerin ihtiyaç duyulan tüm verilerinin kolayca çıkarılması için (FT spektrumundan ağırlık-merkezi dalga-boyu ve sınıflandırma) Klasifikasyon sınıflandırma programında [4-5] ve ayrıca Global-Fit programı uygulandı [6]. Programlar, Avusturya Graz Teknik Üniversitesi emekli öğretim üyelerinden Laurentius Windholz tarafından yazılmıştır.

Analiz sırasında, incelenen La II çizgilerinin simülasyon sonucu yaklaşık yarı genişlik değerleri:

1400 nm civarında: 1700 MHz

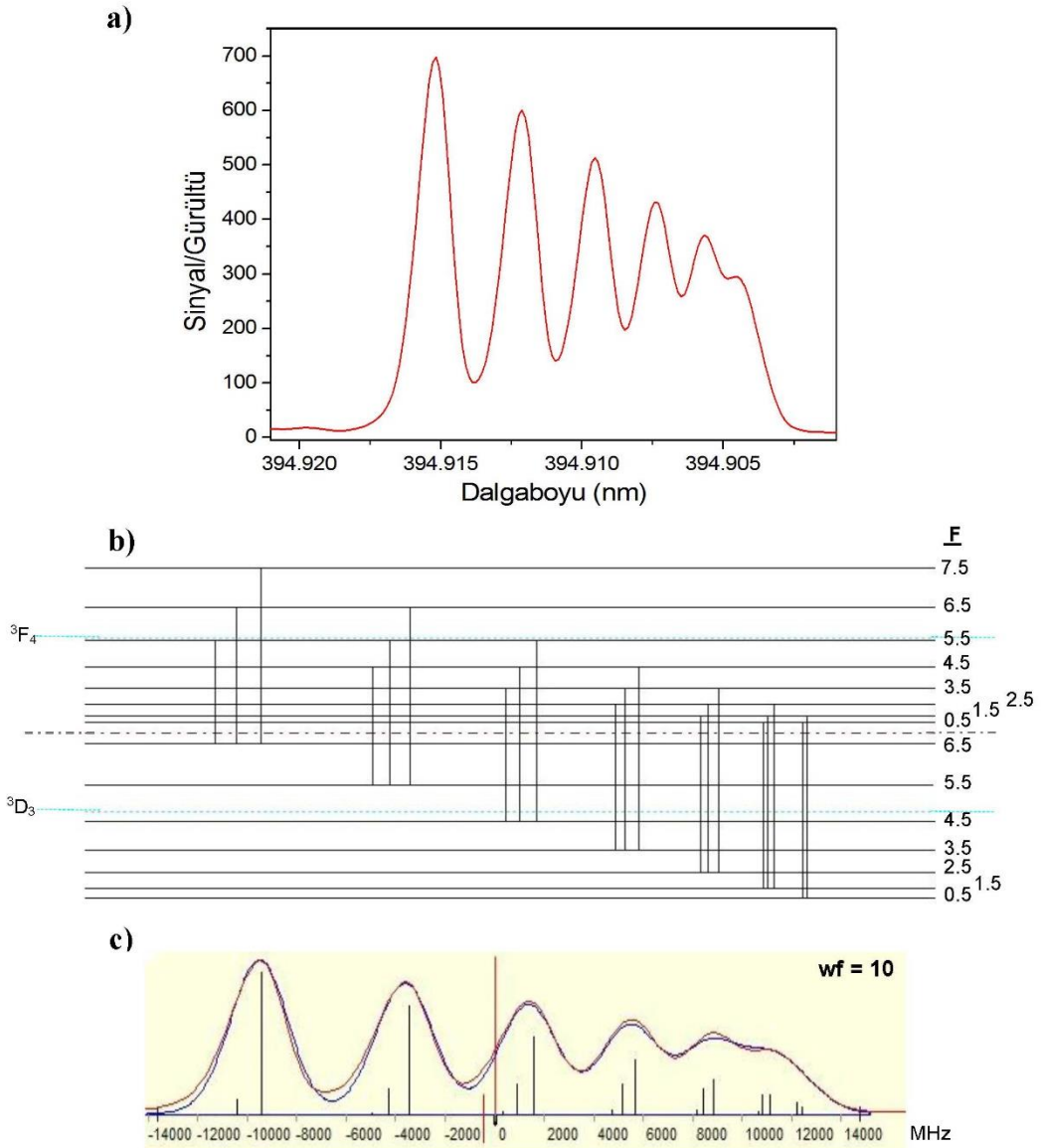
1000 nm civarında: 2000 MHz

800 nm civarında: 2400 MHz

400 nm civarında: 2600 MHz

olarak bulundu. Bu yarı genişlik Doppler genişlemesinden ve FT spektrometresinin genişliğinden kaynaklanmaktadır.

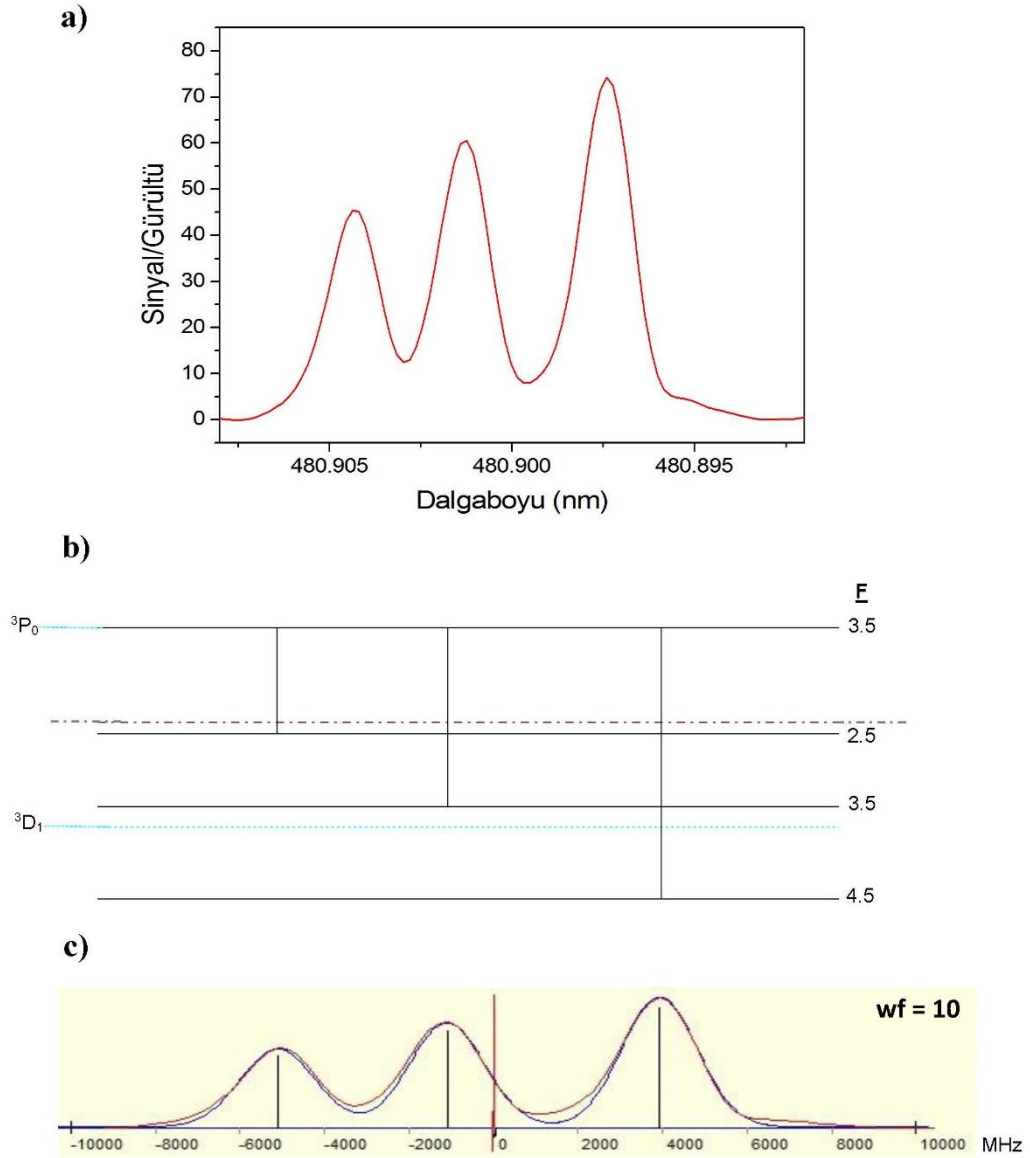




Şekil 4.3: wf=10 değerindeki $\lambda = 394.91025 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 25315.044 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.4: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

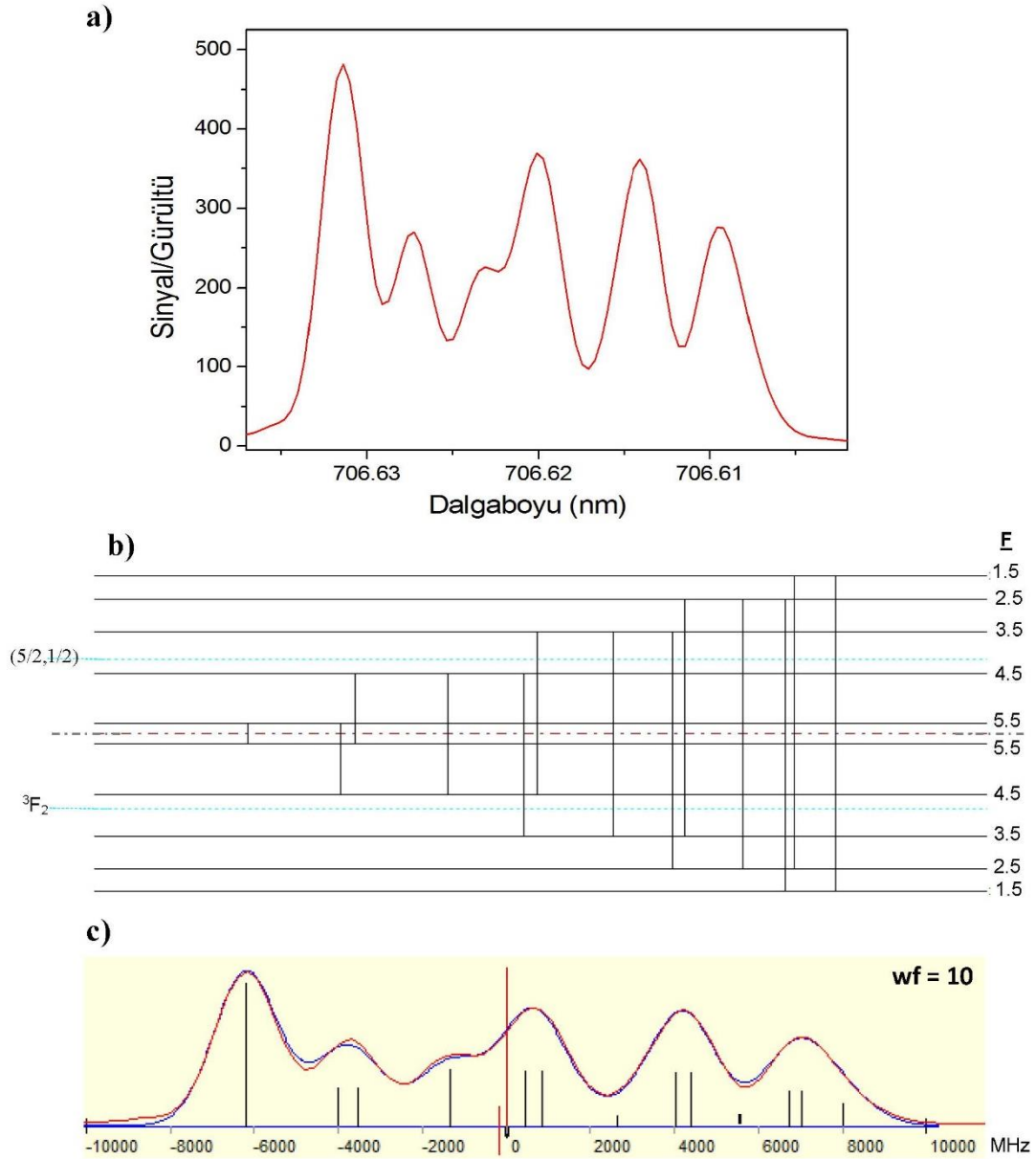
Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
3250.381	$5d6s$	$a \text{ } ^3\text{D}$	3	çift	1066.3(3.3)	60.3(9.3)	[31]
28565.423	$5d6p$	$x \text{ } ^3\text{F}$	4	tek	126.1(9.5)	150(30)	[36]



Şekil 4.4: $wf=10$ değerindeki $\lambda = 480.90046 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 20788.513 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.5: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

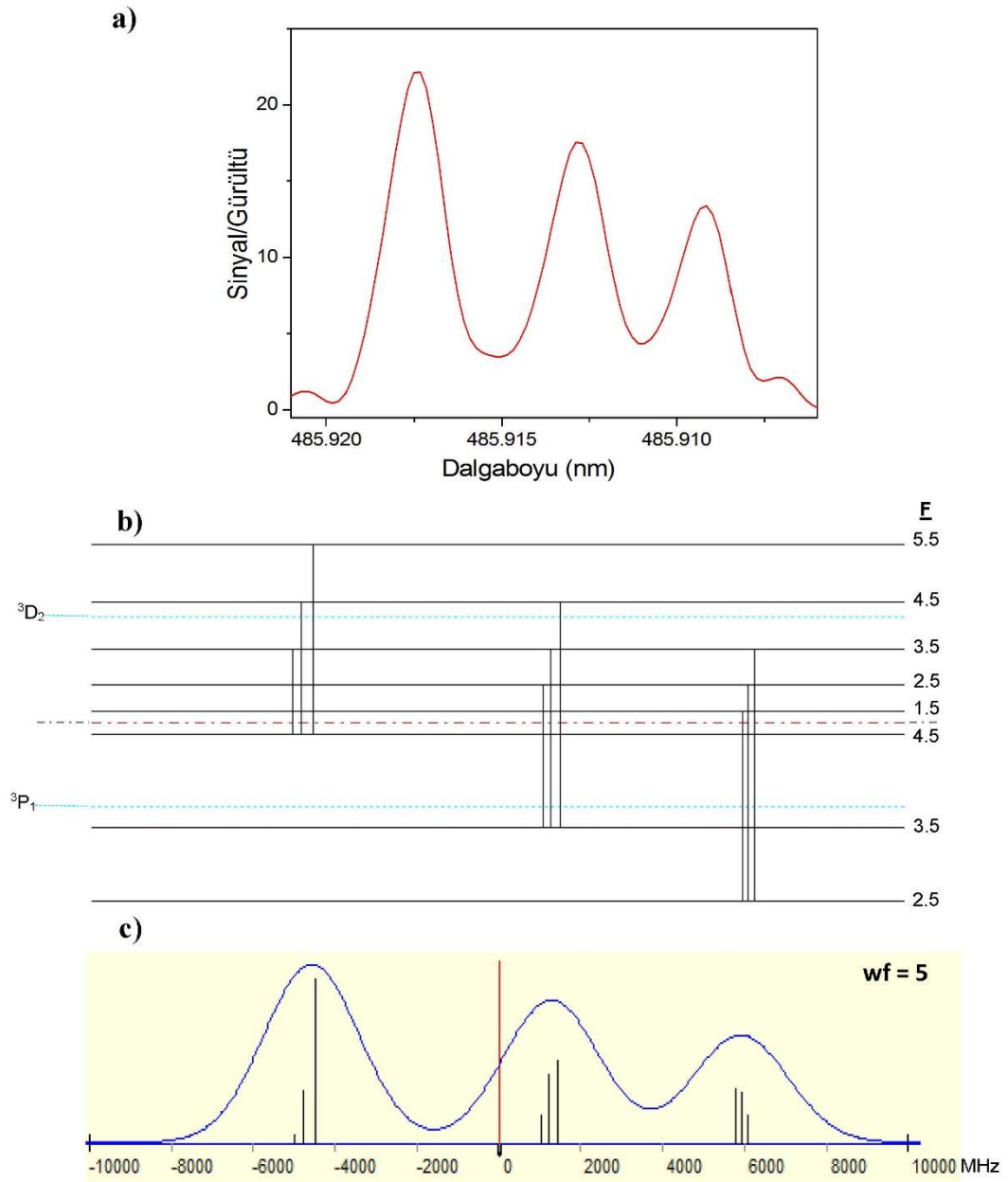
Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
1895.130	$5d6s$	a^3D	1	çift	-1128.1(9)	49.8(6.5)	[31]
22683.643	$4f5d$	z^3P	0	tek	0	0	



Şekil 4.5: wf=10 değerindeki $\lambda = 706.62110 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 14147.955 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.6: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

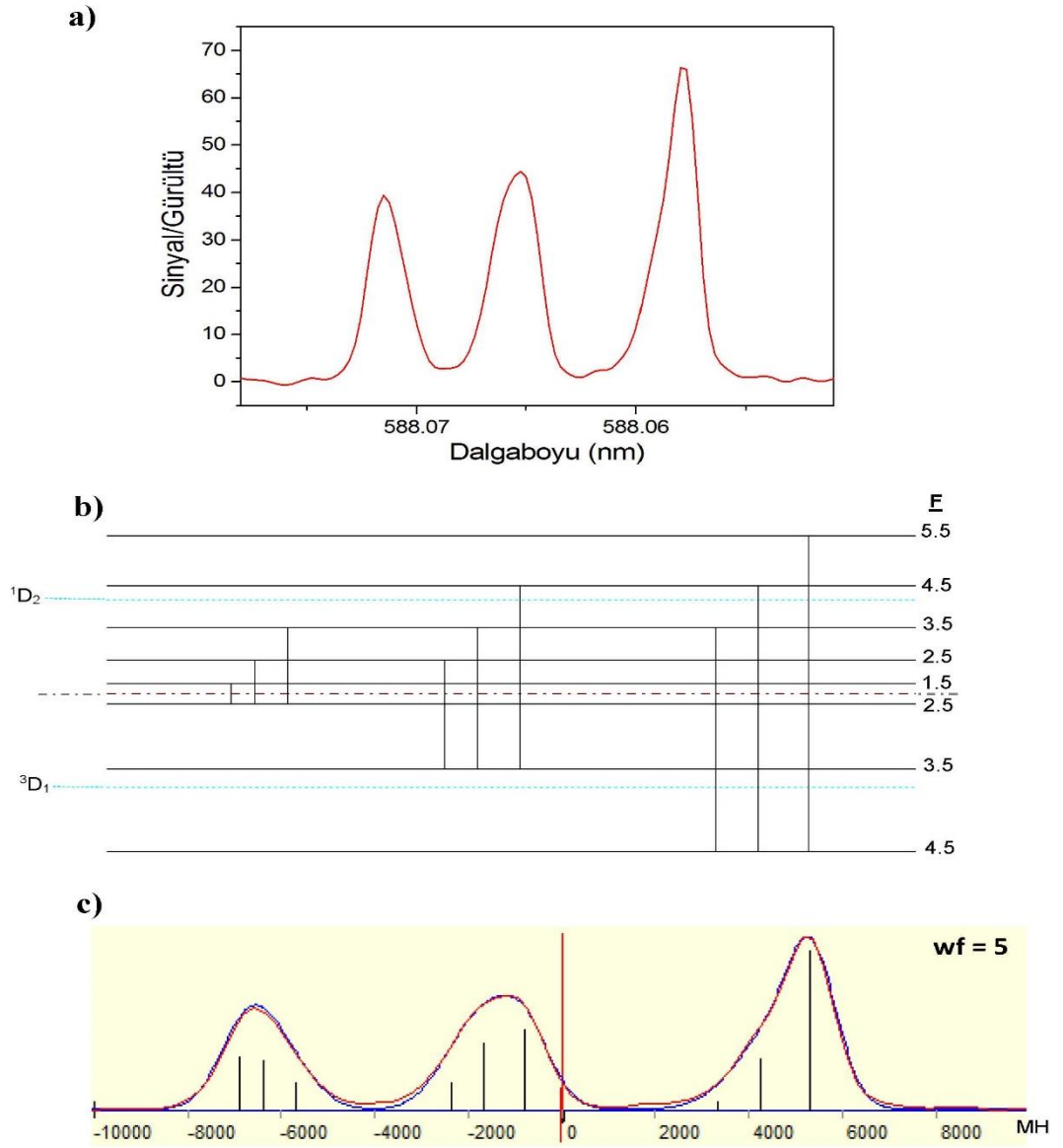
Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
0.000	$5d^2$	a^3F	2	çift	397.6(2)	19.8(1.8)	[31]
14147.954	$4f6s$	$(5/2, 1/2)$	2	tek	-468.8(5.5)	80(20)	[36]



Şekil 4.6: wf=5 değerindeki $\lambda = 485.91384 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 20574.033 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.7: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

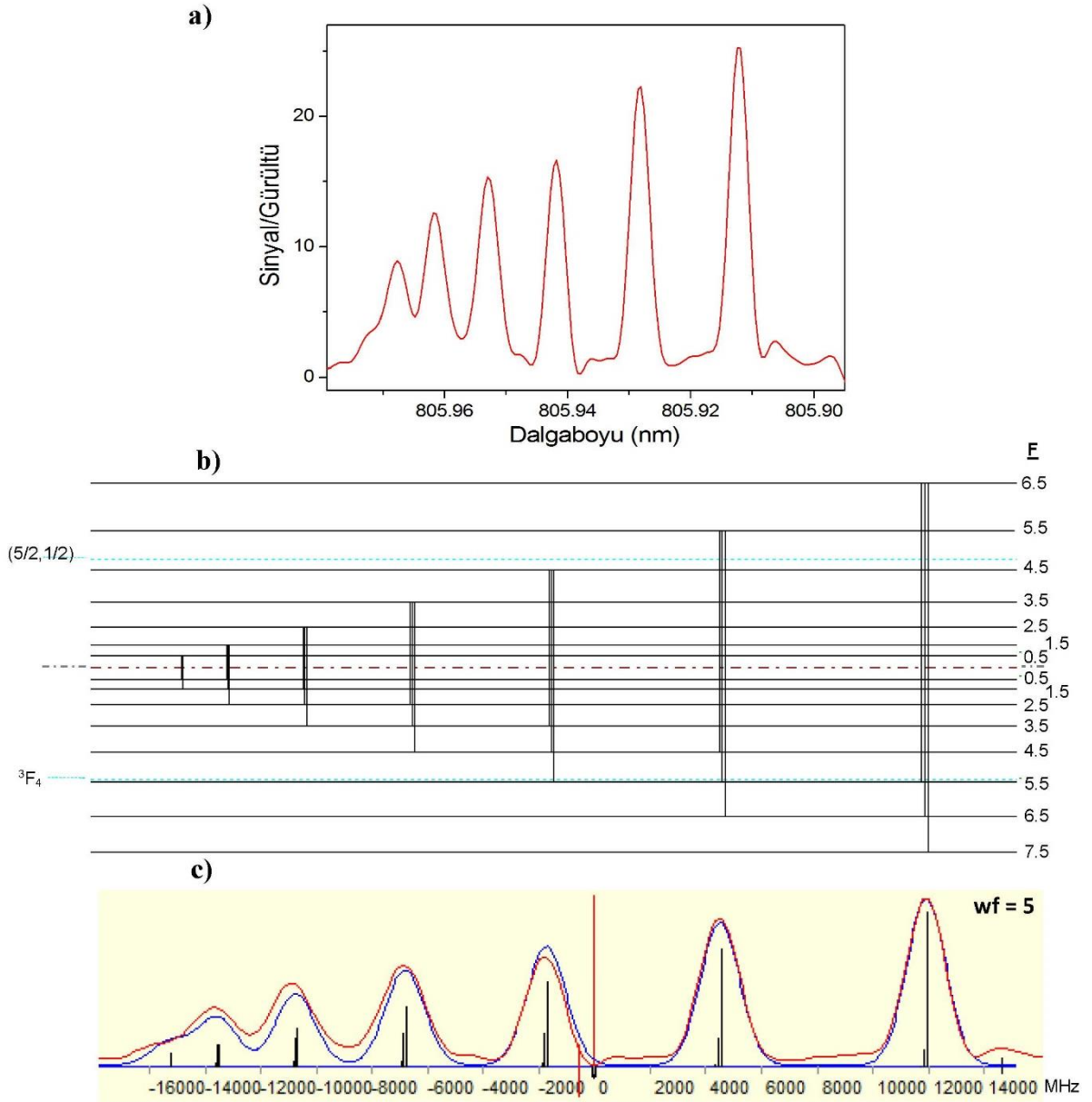
Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
32160.965	$5d6p$	x^3P	1	tek	1383.9(9.0)	-35(10)	[36]
52734.998	$5d6d$	g^3D	2	çift	50(10)	-	Bu çalışma



Şekil 4.7: $wf=5$ değerindeki $\lambda = 588.06395 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 17000.241 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.8: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

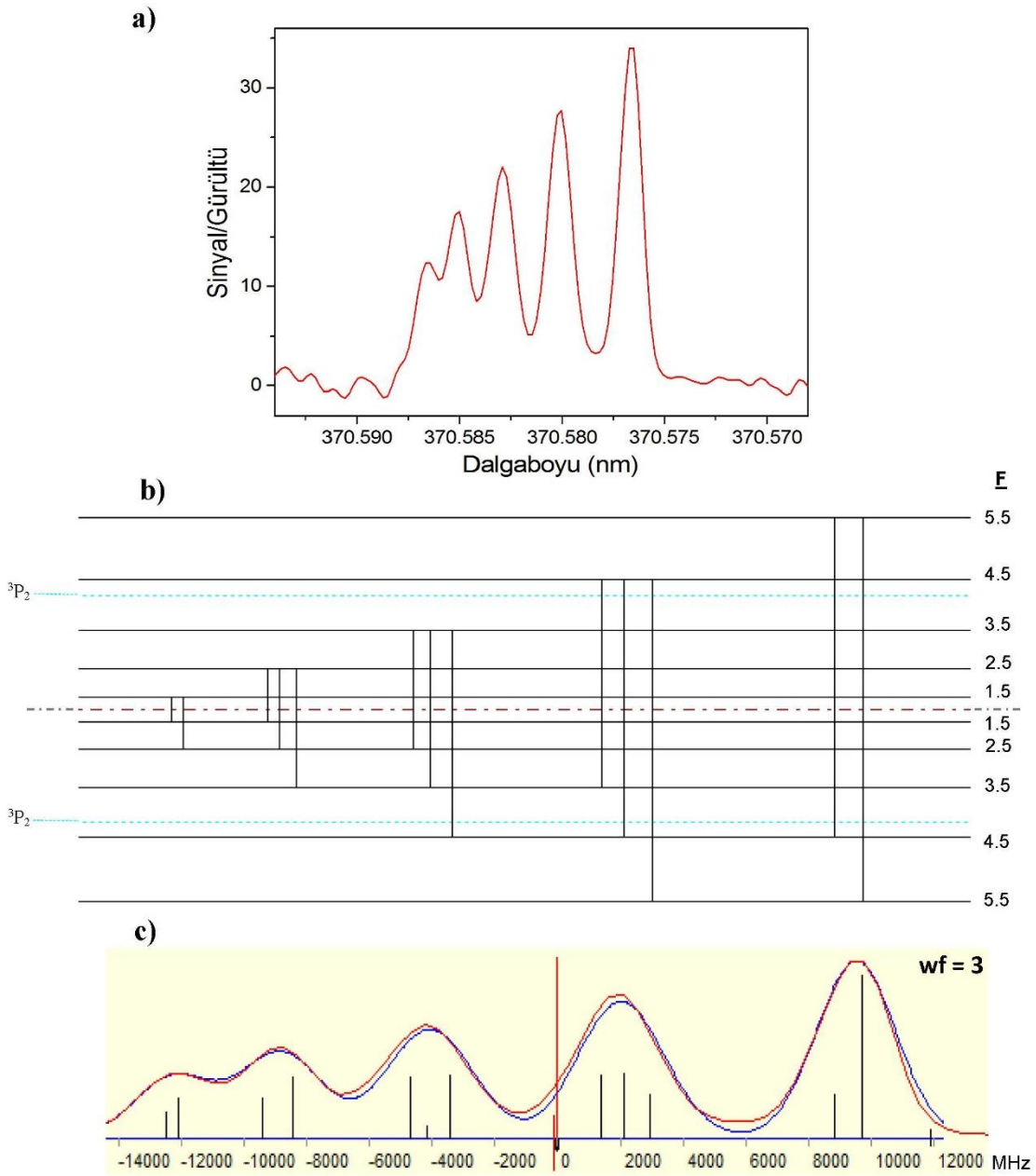
Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
1895.130	$5d6s$	a^3D	1	çift	-1128.1(9)	49.8(6.5)	[31]
18895.372	$4f5d$	z^1D	2	tek	197.6(2.1)	-16(8)	[36]



Şekil 4.8: wf=5 değerindeki $\lambda = 805.93803 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 12404.491 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.9: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

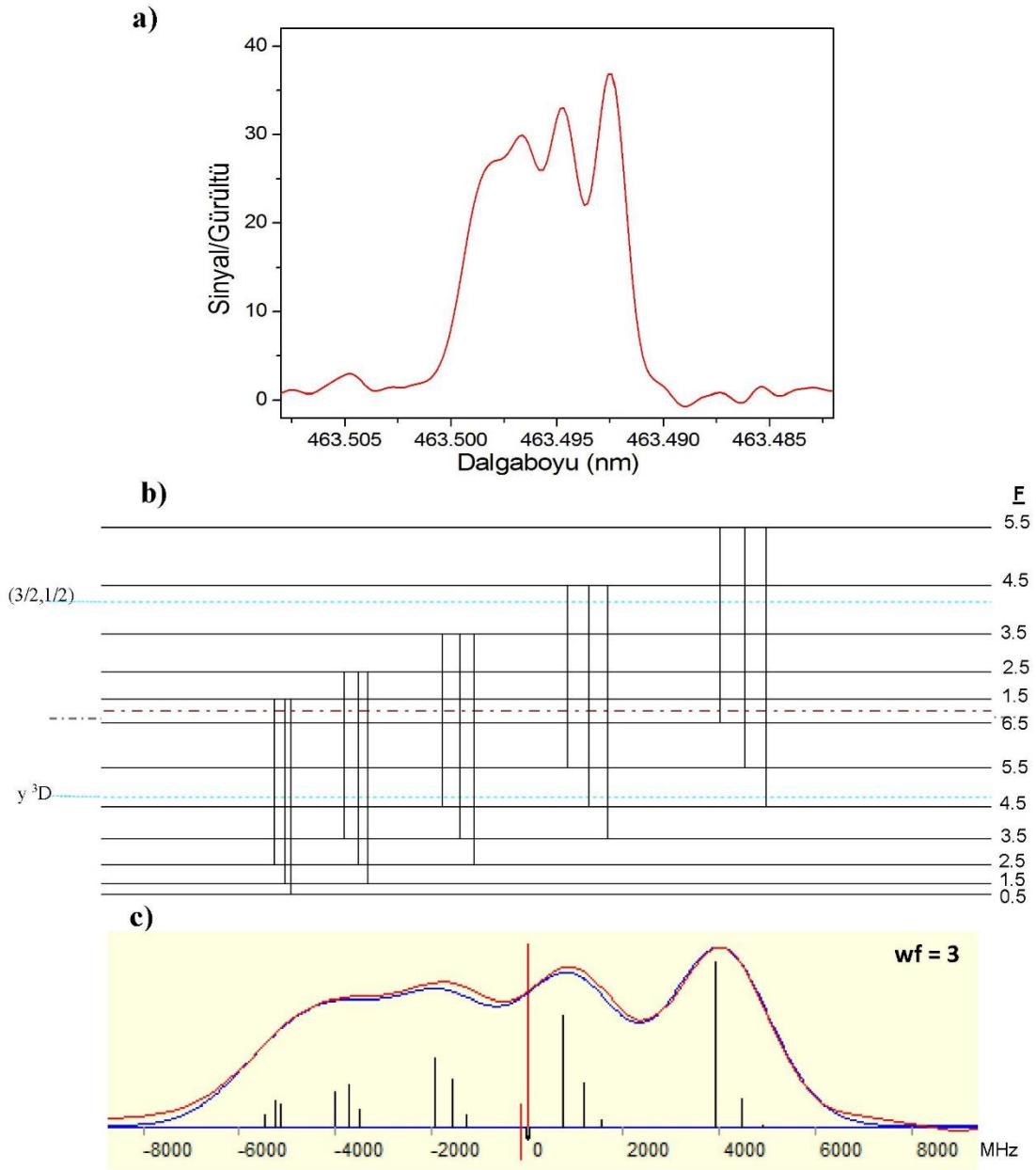
Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
1970.708	$5d^2$	$a \text{ } ^3\text{F}$	4	çift	-18.6(1)	37.5(15)	[31]
14375.198	$4f6s$	$(5/2, 1/2)$	3	tek	1110.9(5.1)	130(15)	[36]



Şekil 4.9: wf=3 değerindeki $\lambda = 370.58102 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 33204.388 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.10: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

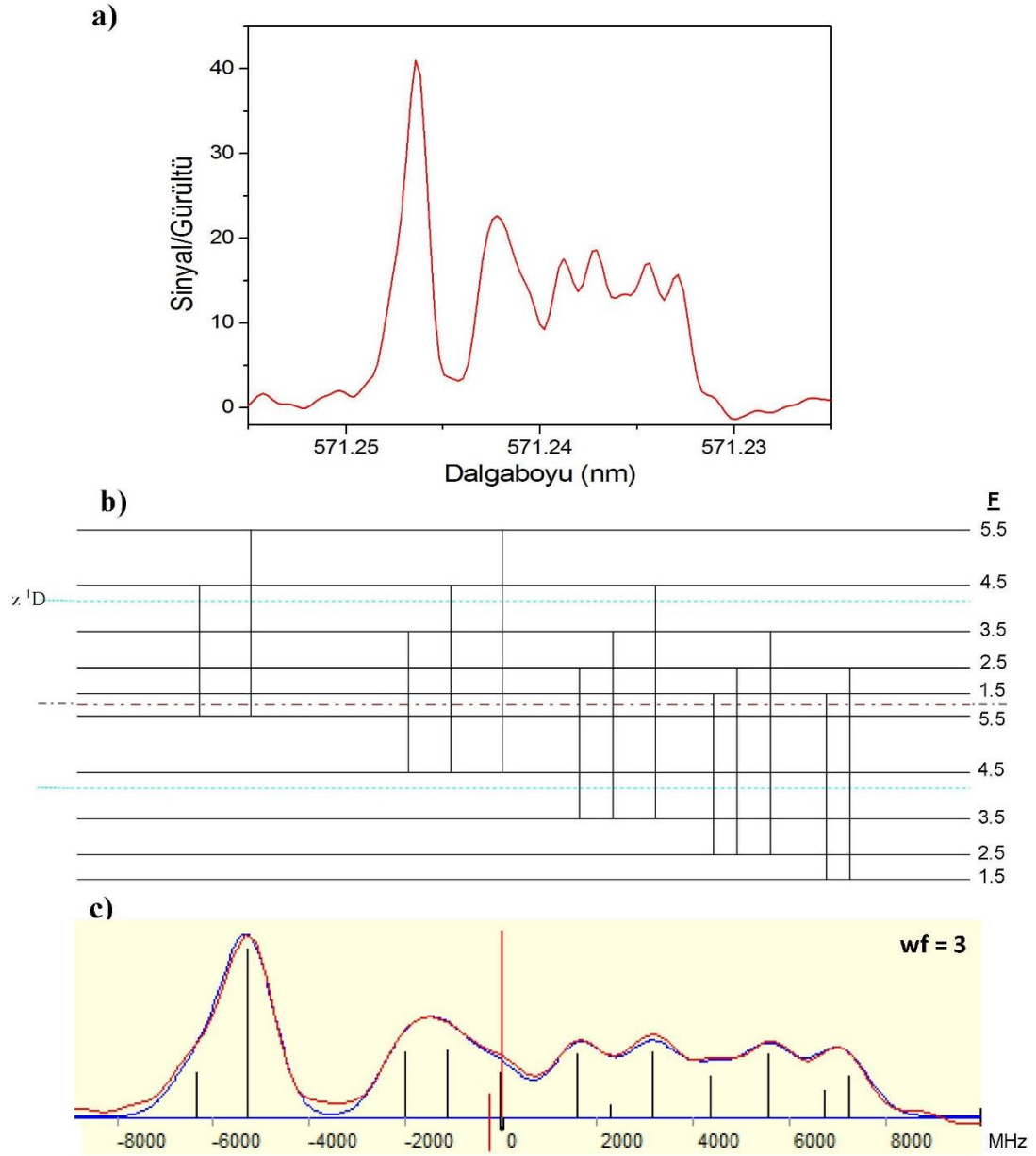
Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
6227.414	$5d^2$	$a \text{ } ^3\text{P}$	2	çift	-158.2(4)	-45(11)	[31]
33204.388	$6s6p$	$x \text{ } ^3\text{P} (?)$	2	tek	1230(100)	-	Bu çalışma



Şekil 4.10: wf=3 değerindeki $\lambda = 463.49538 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 21569.147 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.11: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

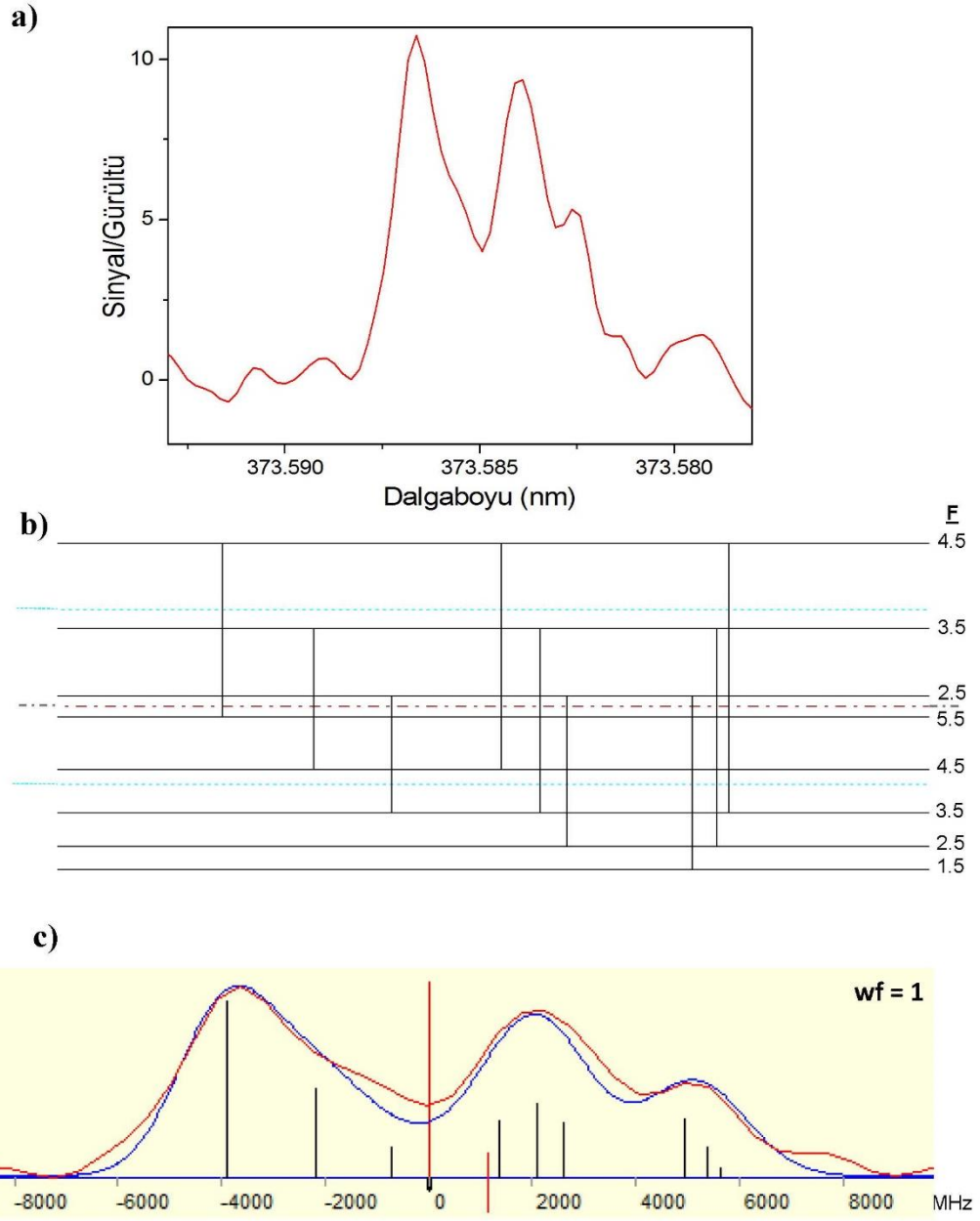
Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
28315.299	5d6p	y ³ D	3	tek	82.9(5.0)	-28(10)	[36]
49884.446	5d7s	(3/2, 1/2)	2	çift	177.1(4.4)	-	Bu çalışma



Şekil 4.11: $wf=3$ değerindeki $\lambda = 571.24060 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 17500.903 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.12: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

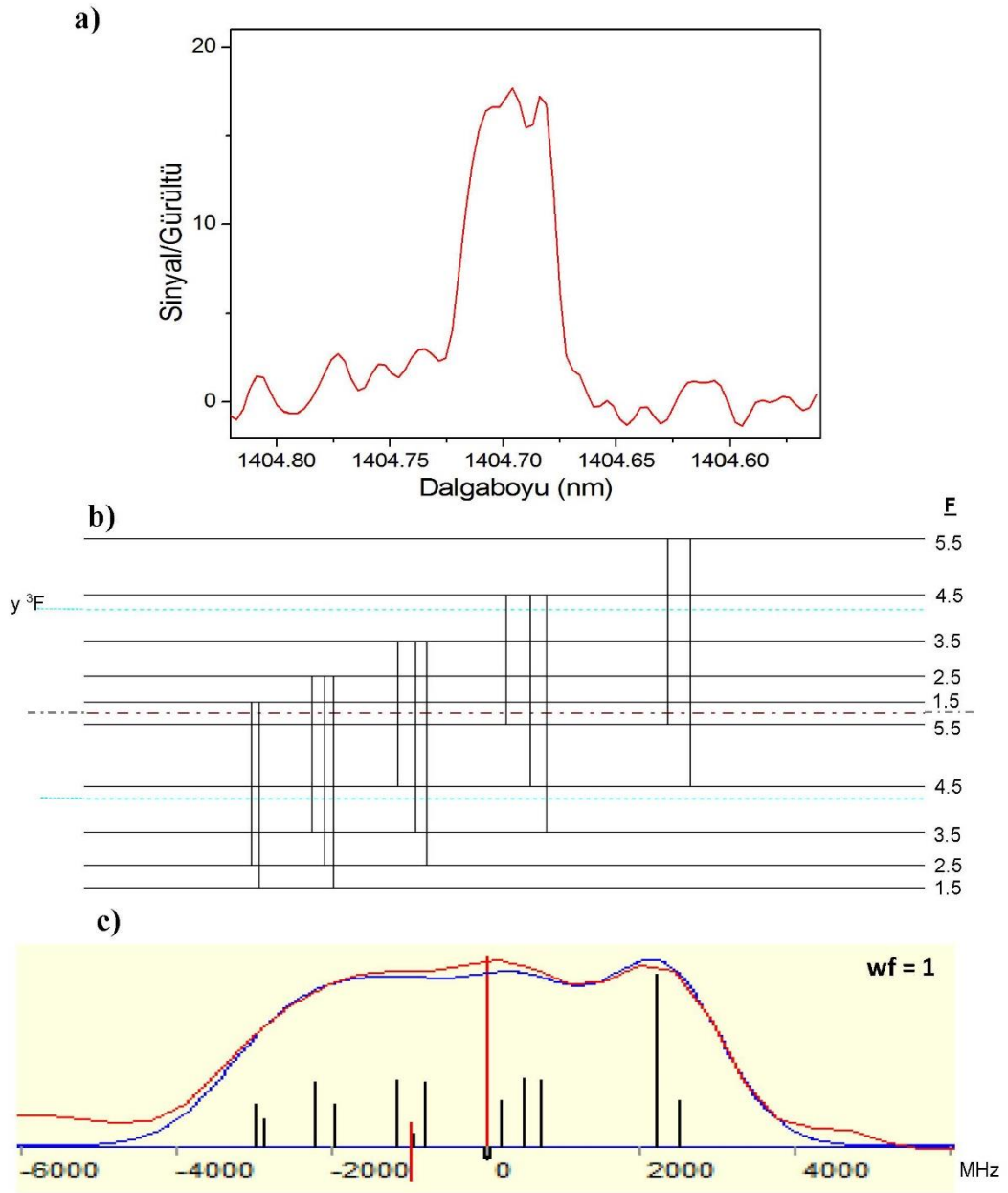
Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
1394.471	$5d^2$	-	2	çift	949.5(1.6)	49.8(12.6)	[31]
18895.372	$4f5d$	z^1D	2	tek	197.6(2.1)	-16(8)	[36]



Şekil 4.12: wf=1 değerindeki $\lambda = 373.58492 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 26760.066 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.13: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
1394.471	$5d^2$	-	2	çift	949.5(1.6)	49.8(12.6)	[31]
18235.558	$6s6p$	-	1	tek	791.8(2.3)	-24(10)	[36]



Şekil 4.13: wf=1 değerindeki $\lambda = 1404.6969 \text{ nm}$ dalgaboylu ve $\sigma = 7117.028 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı örnek La II spektral çizgisi. **a)** Deneysel (FT) spektrumu, **b)** Aşırı ince-yapı geçişleri, **c)** Klasifikasyon-simülasyon programı ile deneysel (kırmızı) ve teorik (mavi) spektrumun simüle edilmiş hali (x-ekseni, çizginin ağırlık merkezinden olan relatif frekansı (MHz)).

Tablo 4.14: Geçişe ait alt-üst ince-yapı enerji seviyeleri (cm^{-1}), bu seviyelere ait konfigürasyonları, spektral terimleri, J değerleri, pariteleri, A (MHz) ve B (MHz) değerleri.

Enerji (cm^{-1})	Konfigürasyon	Terim	J	Parite	A (MHz)	B (MHz)	Ref.
10094.889	$5d6s$	-	2	çift	48.1(1)	39.9(1.8)	[31]
17211.918	$4f5d$	y^3F	2	tek	365.9(2)	-3.9(1.8)	[31]

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Global-fit programı sonucunda, daha hassas ve daha doğrulukla hesaplanarak revize edilen çift-pariteli 68 La II seviyeleri için Tablo 5.1'de ve tek-pariteli 47 La II seviyeler için Tablo 5.2'de verildi. Bu iki tabloda; ilk iki sütunda, elektronlarının J toplam açısal momentumu ve enerji değerleri verildi. Sonraki dört sütunda, enerji hesaplamasına ilişkin aşağıdaki bilgiler sırasıyla listelendi:

- $N_{ok.ç.}$: Enerjiyi belirlemek için kullanılan spektral-çizgilerin sayısı,
- $\Delta E_{ist.}$: Simülasyon sonuçlarından kaynaklanan istatistiksel belirsizlik,
- $\Delta E_{top.}$: FT-spektrumunun kalibrasyon belirsizliğini de dikkate alarak hesaplanan toplam belirsizlik, ve
- $N_{s.ç.}$: Enerji seviyesini içeren sınıflandırılmış (klasifike edilmiş) spektral-çizgilerin sayısı.

$N_{s.ç.}$, FT-Spektrumunda gözlenen ve “Klasifikasyon Programı”nda sınıflandırılan tüm çizgilerin sayısıdır. Fakat, bu çizgilerden bazıları “Global-fit Programı”nda hesaplama sırasında kullanılmamıştır. Bunun nedeni, bu çizgilerin deneysel spektrumda birbirine karışmış (blend) birden fazla atomik/iyonik çizgi bulundurması ve ağırlık-merkezinin tam olarak belirlenememesidir.

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de 6. ve 7. sütunlarda, seviyelere ait A & B aiy sabitleri ve standart sapma değerleri, bilinenler için referansları ile birlikte, bilinmeyenler için bu çalışmada simülasyon sonucu elde edilen değerler verildi. Son sütun ise, sadece MIT tablolarından [3] kullanılan çizgiler yardımıyla revize edilen seviyeleri vurgulamak için yazıldı. Revize edilen seviyelerin A & B değerleri literatürde belirlenmemiş olanlar için hata hesabı; “Simülasyon Programı” yardımıyla deneysel ve teorik spektrum eşleştirilmesi sırasında, A ve B ’ye değerler verilerek ve belirli uygun aralıklarda değiştirilerek standart sapma tahmini olarak verildi.

Tablo 5.1: Revize edilen çift-pariteli La II enerji seviyeleri listesi. J değeri, revize edilen enerji değeri E (cm^{-1}), programda kullanılan geçiş sayısı ($\text{No}_{\text{k.ç.}}$), enerjinin istatistik hatası $\Delta E_{\text{ist.}}$ (cm^{-1}), toplam hata $\Delta E_{\text{top.}}$ (cm^{-1}), sınıflandırılan geçiş sayısı ($\text{No}_{\text{s.ç.}}$), seviyelerin A & B (MHz) değerleri, referanslar.

Enerji Hesaplaması									
J	E (cm^{-1})	$\text{No}_{\text{k.ç.}}$	$\Delta E_{\text{ist.}}$ (cm^{-1})	$\Delta E_{\text{top.}}$ (cm^{-1})	$\text{No}_{\text{s.ç.}}$	A (MHz)	B (MHz)	Referans (A & B)	Not
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0.000	16	0.0005	0.004	22	397.6(2)	19.8(1.8)	[31]	
3	1016.090	17	0.0005	0.004	22	101.3(2)	25.2(3.3)	[31]	
2	1394.471	19	0.0004	0.004	30	949.5(1.6)	49.8(12.6)	[31]	
1	1895.130	13	0.0007	0.004	16	-1128.1(9)	49.8(6.5)	[31]	
4	1970.708	11	0.0006	0.004	17	-18.6(1)	37.5(3.0)	[31]	
2	2591.613	21	0.0006	0.004	25	-8.7(3.0)	56.7(6.9)	[31]	
3	3250.381	14	0.0005	0.004	19	1066.3(3.3)	60.3(9.3)	[31]	
0	5249.687	5	0.0012	0.005	6	0	0		
1	5718.115	11	0.0004	0.004	17	-225.2(2)	25.8(9)	[31]	
2	6227.414	14	0.0005	0.004	18	-158.2(4)	-45(11)	[31]	
0	7394.550	4	0.0014	0.005	7	0	0		
4	7473.342	8	0.0003	0.004	10	150.1(2)	151.8(5.4)	[31]	
2	10094.889	9	0.0007	0.004	13	48.1(1)	39.9(1.8)	[31]	
3	35452.602	9	0.0010	0.005	15	440.9(4.0)	30(10)	[37]	
2	35787.522	7	0.0010	0.005	10	242.6(5.7)	0(5)	[37]	
3	36954.640	12	0.0006	0.004	16	177.1(4.4)	22(8)	[37]	
4	37172.789	11	0.0006	0.004	18	253.8(4.1)	22(11)	[37]	
3	37209.729	11	0.0007	0.004	20	202.2(4.0)	25(12)	[37]	
4	37790.609	9	0.0006	0.004	14	232.3(3.9)	80(20)	[37]	
2	38221.488	6	0.0004	0.004	12	197.2(1.0)	7(5)	[37]	
1	38534.074	4	0.0013	0.005	14	419(5)	22(8)	[37]	
5	39018.744	7	0.0007	0.004	8	169.1(1.0)	140(20)	[37]	
4	39221.688	10	0.0009	0.005	16	208.4(4.2)	85(20)	[37]	
3	39402.522	10	0.0010	0.005	14	149.9(2.0)	25(10)	[37]	
2	40457.733	6	0.0011	0.005	9	165.1(5.0)	55(10)	[37]	
1	49733.140	6	0.0011	0.005	10	100(10)		Bu Çalışma	
2	49884.446	6	0.0010	0.005	11	690(10)		Bu Çalışma	
3	51228.648	7	0.0011	0.005	9	285(5)	30(20)	Bu Çalışma	
2	51524.005	4	0.0013	0.005	8	-220(10)		Bu Çalışma	
3	52137.777	3	0.0015	0.005	8	165(15)		Bu Çalışma	
1	52169.784	4	0.0018	0.005	8	270(15)		Bu Çalışma	
2	52734.998	4	0.0016	0.005	10	50(10)		Bu Çalışma	
3	52858.064	4	0.0015	0.005	10	190(15)		Bu Çalışma	
1	53302.781	5	0.0018	0.005	7	0(20)		Bu Çalışma	
4	53333.485	3	0.0016	0.005	6	110(20)		Bu Çalışma	
3	53689.775	5	0.0015	0.005	6	30(15)		Bu Çalışma	
2	53885.394	4	0.0013	0.005	7	250(20)		Bu Çalışma	
1	54366.231	2	0.0009	0.004	6	-30(10)		Bu Çalışma	
5	54434.925	1	-	0.006*	3	40(15)		Bu Çalışma	
3	54840.409	3	0.0012	0.005	5	80(15)		Bu Çalışma	
4	55107.152	3	0.0018	0.005	9	185(15)		Bu Çalışma	
2	55184.254	4	0.0015	0.005	5	40(10)	-450(100)	Bu Çalışma	
1	55230.528	3	0.0021	0.006	5	160(15)		Bu Çalışma	
4	55321.502	2	0.0003	0.004	6	90(15)		Bu Çalışma	
5	55981.83	5	0.039	0.07	5	-	-		***

Tablo 5.1 (devam): Revize edilen çift-pariteli La II enerji seviyeleri listesi. J değeri, revize edilen değeri E (cm^{-1}), programda kullanılan geçiş sayısı ($\text{No}_{\text{k.ç.}}$), enerjinin istatistik hatası $\Delta E_{\text{ist.}}$ (cm^{-1}), toplam hata $\Delta E_{\text{top.}}$ (cm^{-1}), sınıflandırılan geçiş sayısı ($\text{No}_{\text{s.ç.}}$), seviyelerin A & B (MHz) değerleri, referanslar.

J	E (cm^{-1})	$\text{No}_{\text{k.ç.}}$	$\Delta E_{\text{ist.}}$ (cm^{-1})	$\Delta E_{\text{top.}}$ (cm^{-1})	$\text{No}_{\text{s.ç.}}$	A (MHz)	B (MHz)	Referans (A & B)	Not
4	56035.909	2	0.0012	0.005	6	80(20)		Bu Çalışma	
2	56036.788	3	0.0025	0.006	4	30(15)		Bu Çalışma	
6	56838.06	2	0.0346	0.07	2	-	-		***
2	57399.524	1	-	0.006*	4	350(50)		Bu Çalışma	
3	57918.49	4	0.063	0.10	4	-	-		***
4	58259.53	4	0.045	0.08	4	-	-		***
4	59527.58	5	0.019	0.05	6	-	-		***
2	59900.236	1	-	0.006*	6	250(50)		Bu Çalışma	
0	60094.76	2	0.019	0.05*	2	0	0		***
1	60660.15	2	0.121	0.15**	2	-	-		***
1	61128.87	9	0.035	0.07	9	-	-		***
2	62026.24	9	0.035	0.07	9	-	-		***
6	62408.50	2	0.029	0.06	2	-	-		***
2	62506.30	6	0.033	0.07	6	-	-		***
0	63464.00	1	-	0.07*	1	0	0		***
1	63703.19	6	0.050	0.08	6	-	-		***
2	64278.96	4	0.091	0.13	4	-	-		***
1	64361.26	3	0.097	0.13	3	-	-		***
2	64529.82	2	0.051	0.08	2	-	-		***
3	64692.59	3	0.111	0.15	3	-	-		***
0	66591.74	1	-	0.07*	1	0	0		***
3	69234.11	1	-	0.07*	1	-	-		***
0	69505.13	2	0.029	0.07	2	0	0		***

* Bu seviyeler için sadece birer çizgi tespit edilebildiği için, istatistiksel bir belirsizlik mevcut değildir.

** Sadece MIT tablosundaki [3] çizgiler için, toplam belirsizliğin $0,07 \text{ cm}^{-1}$ olduğu varsayılmıştır.

*** Bu enerji seviyesini içeren geçişler, MIT tablosunda [3] doğru olarak verilmemiş olma ihtimali yüksektir.

Tablo 5.2: Revize edilen tek-pariteli La II enerji seviyeleri listesi. J değeri, revize edilen enerji değeri E (cm^{-1}), programda kullanılan geçiş sayısı ($\text{No}_{\text{k.ç.}}$), enerjinin istatistik hatası $\Delta E_{\text{ist.}}$ (cm^{-1}), toplam hata $\Delta E_{\text{top.}}$ (cm^{-1}), sınıflandırılan geçiş sayısı ($\text{No}_{\text{s.ç.}}$), seviyelerin A & B (MHz) değerleri, referanslar.

Enerji Hesaplaması									
J	E (cm^{-1})	$\text{No}_{\text{k.ç.}}$	$\Delta E_{\text{ist.}}$ (cm^{-1})	$\Delta E_{\text{top.}}$ (cm^{-1})	$\text{No}_{\text{s.ç.}}$	A (MHz)	B (MHz)	Referans (A & B)	Not
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	14147.954	10	0.0007	0.004	34	-468.8(5.5)	80(20)	[36]	
3	14375.198	14	0.0006	0.004	16	1110.9(5.1)	130(15)	[36]	
4	15698.782	9	0.0007	0.004	12	792.8(1.8)	155(20)	[36]	
3	15773.814	10	0.0008	0.004	14	-431.0(5.0)	145(15)	[36]	
4	16599.258	7	0.0010	0.005	12	220.4(2.5)	116(15)	[36]	
2	17211.915	8	0.0008	0.004	14	365.9(2)	-3.9(1.8)	[31]	
3	17825.604	6	0.0011	0.005	13	267.9(2.5)	91(20)	[36]	
3	18235.558	8	0.0008	0.004	14	148.7(4)	5.0(4.2)	[31]	
5	18580.482	3	0.0013	0.005	5	173(5)		Bu Çalışma	
2	18895.372	9	0.0006	0.004	20	197.6(2.1)	-16(8)	[36]	
4	19214.527	9	0.0005	0.004	12	64.8(1)	8.4(4.8)	[31]	
6	19749.649	1	-	0.006*	3	190(10)	450(100)	Bu Çalışma	
3	20402.810	5	0.0002	0.004	14	332.7(3.5)	60(15)	[36]	
4	21331.594	3	0.0018	0.006	9	170.7(1.9)	180(20)	[36]	
1	21441.685	6	0.0010	0.005	15	412.4(5)	8(4)	[36]	
2	22106.016	9	0.0008	0.004	20	127.8(2.4)	2.6(7.5)	[35]	
5	22282.808	3	0.0016	0.005	15	136.1(3.0)	60(30)	[36]	
3	22537.291	8	0.0004	0.004	19	100.9(1.2)	-31.2(6.9)	[35]	
0	22683.643	2	0.0012	0.005	4	0	0		
1	22705.126	6	0.0010	0.005	15	72.2(7.0)	-28(10)	[36]	
2	23246.892	8	0.0013	0.005	12	34.5(3)	11.1(2.4)	[31]	
2	24462.681	11	0.0008	0.004	16	446.5(1.8)	21(8)	[36]	
3	24522.694	10	0.0005	0.004	15	161.9(2)	22.1(4.2)	[32]	
1	25973.367	12	0.0008	0.004	19	547.3(3.0)	27(7)	[36]	
2	26414.022	10	0.0009	0.004	17	250.5(2)	51.9(1.8)	[31]	
3	26837.656	12	0.0005	0.004	14	258.9(1.5)	114.3(7.6)	[35]	
2	27388.135	16	0.0007	0.004	24	68.8(7)	30(15)	[36]	
1	27423.919	12	0.0008	0.004	16	886.9(1.5)	-18.9(4.8)	[35]	
0	27545.818	3	0.0014	0.005	6	0	0		
1	28154.540	9	0.0010	0.005	17	791.8(2.3)	-24(10)	[36]	
3	28315.299	15	0.0006	0.004	21	82.9(5.0)	-28(10)	[36]	
5	28525.720	2	0.0007	0.004	5	175(5)	250(30)	Bu Çalışma	
4	28565.423	10	0.0008	0.004	13	126.1(9.5)	150(30)	[36]	
2	29498.079	10	0.0006	0.004	16	610.2(3.3)	88(15)	[36]	
1	30353.375	12	0.0008	0.004	17	-157.7(6)	33(6)	[36]	
0	31785.814	2	0.0038	0.007	5	0	0		
1	32160.965	6	0.0008	0.004	14	1383.9(9.0)	-35(10)	[36]	
3	32201.058	8	0.0008	0.004	17	193.7(3.0)	143(20)	[36]	
2	33204.388	7	0.0006	0.004	23	1230(10)		Bu Çalışma	
1	45692.19	7	0.048	0.08	7	-	-		**
3	57364.200	7	0.0005	0.004	8	360(20)		Bu Çalışma	
4	58748.813	6	0.0011	0.005	6	170(15)		Bu Çalışma	
3	59612.512	10	0.0005	0.004	10	240(20)		Bu Çalışma	
4	60744.142	6	0.0008	0.004	6	220(20)		Bu Çalışma	
3	61017.580	1	-	0.006*	1	20(20)		Bu Çalışma	

Tablo 5.2 (devam): Revize edilen tek-pariteli La II enerji seviyeleri listesi. J değeri, revize edilen enerji değeri E (cm^{-1}), programda kullanılan geçiş sayısı ($N_{\text{ok.ç.}}$), enerjinin istatistik hatası $\Delta E_{\text{ist.}}$ (cm^{-1}), toplam hata $\Delta E_{\text{top.}}$ (cm^{-1}), sınıflandırılan geçiş sayısı ($N_{\text{os.ç.}}$), seviyelerin A & B (MHz) değerleri, referanslar.

J	E (cm^{-1})	$N_{\text{ok.ç.}}$	$\Delta E_{\text{ist.}}$ (cm^{-1})	$\Delta E_{\text{top.}}$ (cm^{-1})	$N_{\text{os.ç.}}$	A (MHz)	B (MHz)	Referans (A & B)	Not
3 ⁺	61514.413	1	-	0.006*	1	60(10)		Bu Çalışma	
3	64411.332	2	0.0025	0.006	3	180(20)		Bu Çalışma	

* Bu seviyesinin J değeri ref. [3]⁺'te 3 veya 4 olarak verilmiştir. A için verilen değer $J=3$ olduğu varsayılarak belirlenir.

* Bu seviyeler için sadece birer çizgi tespit edilebildiği için, istatistiksel bir belirsizlik mevcut değildir.

** Bu enerji seviyesini içeren geçişler, MIT tablosunda [3] doğru olarak verilmemiş olma ihtimali yüksektir.

59.900.236 cm^{-1} çift seviyesi için FT spektrumumuzun dalga-boyu aralığında sadece bir çizgi vardır, ancak toplamda 6 çizgi bu seviyeyi kapsayan geçişler olarak sınıflandırılır. Bu seviye için verilen enerji değeri bu tek FT çizgisine (360.91858 nm) dayanmaktadır.

Sadece bir çizgi 61514.413 cm^{-1} seviyesine göre sınıflandırılabilir ($J = 2, 3$ veya 4). Bu çizgi FT spektrumunda oldukça güçlüdür ($S/N=165$). Ancak sınıflandırmanın yanlış olması ve daha düşük enerjiye sahip henüz keşfedilmemiş bir seviyenin bu çizginin oluşumunda yer alması mümkündür. Dolayısıyla bu seviyenin varlığı kesin değildir.

NIST tablolarında [2] sıralanan üç seviye, lantan spektrumunun analizi üzerine yıllarca yapılan araştırmalar sırasında henüz doğrulanamamıştır: 54793.82 cm^{-1} ($J = 0$) , 54964.19 cm^{-1} ($J = 0$) , ve 63598.87 cm^{-1} ($J = 4$).

Bu çalışmada, deneysel olarak bilinen 118 La II ince-yapı seviyesinden üç tane (54793.82 cm^{-1} , 54964.19 cm^{-1} ve 63598.87 cm^{-1}) dışındaki tüm seviyeler ilk defa revize edildi. Bu seviyelerin 94'ü, dalga-boyu kalibre edilmiş FT-spektrumunda gözlenen spektral çizgiler aracılığıyla belirlendi. Bu 94 seviye için enerji değerlerinin belirsizliği 0.01 cm^{-1} 'in altında bulundu ve bunun anlamı 94 seviyenin enerji değerlerinin daha doğru belirlenebilmiş demektir. Kalan 21 seviyenin enerji değerlerinin belirlenebilmesi için, MIT dalga-boyu tablolarından [3] yararlanıldı, bu da ortalama 0,07 cm^{-1} bir belirsizlikle daha doğru enerji değerleri elde edilmesine neden oldu. 34 La II seviyesi için ay sabitleri ilk defa bu çalışmada tahmin edildi.

KAYNAKLAR

- [1]. Yang, F., Hamilton, J.H., 2010, *Hyperfine Interactions*, Modern Atomic and Nuc. Phys., World Scientific, Chapter 13, Publish. Co. Pte. Ltd., ISBN: 978-981-283-678-6, 623.
- [2]. NIST Atomic Spectra Database, <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>, [Ziyaret Tarihi: 17.09.2018]
- [3]. Martin, W.C, Zalubas, R., Hagan, L., 1978, *Atomic energy levels-The rare-earth elements*, Circular of the National Bureau of Standards 60, Washington DC.
- [4]. Windholz, L., 2015, Class-LW bilgisayar programı, *private communication*.
- [5]. Windholz, L., 2016, Finding of previously unknown energy levels using Fourier-transform and laser spectroscopy, *Phys Scr.*, 91, 114003.
- [6]. Windholz, L., 2016, Global-Fit bilgisayar programı, *private communication*.
- [7]. Fischer, W., Hühnermann, H., Mandrek, K., Ihle, H., 1972, Optical determination of the quadrupole moment of ^{138}La , *Phys. Lett. B*, 40, 87.
- [8]. Stone, N.J., 2003, Table of nuclear magnetic dipole and electric quadrupole moments, *Atom. Data Nucl. Data*, 90, 75–176.
- [9]. Lawler, J.E., Bonvallet, G., Sneden, C., 2001, Experimental Radiative Lifetimes, Branching Fractions, and Oscillator Strengths for La II and a New Determination of the Solar Lanthanum Abundance, *Astrophys J.*, 556, 452.
- [10]. Giora, S., 2012, *The Synthesis of the Elements: The Astrophysical Quest for Nucleosynthesis and what it can tell us about the Universe*, Springer-Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-642-28384-0.
- [11]. Childs, W.J. and Goodman, L.S., 1971, Hyperfine and Zeeman Studies of Low-Lying Atomic Levels of La^{139} and the Nuclear Electric-Quadrupole Moment, *Phys. Rev. A*, 3, 25.
- [12]. Wilson, M., 1971, LS-Term Dependence of Hyperfine-Interaction Parameters in d2s Configurations, *Phys. Rev. A*, 3, 45.
- [13]. Ben Ahmed., Z., Bauche-Arnoult, C., Wyart, J.F., 1974, Energy levels and hyperfine structures in the $(5d + 6s)^3$ configurations of La I, *Physica*, 77, 148.
- [14]. Childs, W.J. and Goodman, L.S., 1977, Complete resolution of hyperfine structure in the close doublet $\lambda 5930.6$ of ^{139}La by laser-atomic-beam spectroscopy, *J. Optical Soc. Am.*, 67, 1230.
- [15]. Childs, W.J. and Goodman, L.S., 1978, Hyperfine structure of excited, odd-parity levels in ^{139}La by laser-atomic-beam fluorescence, *J. Optical Soc. Am.*, 68, 1348.

- [16]. Childs, W.J. and Nielsen. U., 1988, Hyperfine structure of the $(5d+6s)^3$ configuration of ^{139}La : New measurements and ab initio multiconfigurational Dirac-Fock calculations, *Phys. Rev. A*, 37, 6.
- [17]. Govindarajan, J. and Pramila, T., 1989, Laser optogalvanic spectroscopy for hyperfine structure studies of La I, *J. Opt. Soc. Am. B*, 6, 1275.
- [18]. Caiyan, L., Fucheng, L., Jianan, C., Lizhou, Z., 1990, Studies on the hyperfine structure of La I in a hollow-cathode discharge tube, *Phys. D Appl. Phys.*, 23, 1327.
- [19]. Shaw, R.W., Young, J.P, Smith, D.H., Bonanno, A.S., Dale, J.M., 1990, Hyperfine structure of lanthanum at sub-Doppler resolution by diode-laser-initiated resonance-ionization mass spectroscopy, *Phys. Rev. A*, 41, 2566.
- [20]. Jia, L., Jing, C., Lin, F., 1992, Hyperfine structure of odd-parity levels in ^{139}La by laser optogalvanic spectroscopy, *Opt. Commun.*, 94, 331.
- [21]. Jin, W.G., Endo, T., Uematsu, H., Minowa, T., Katsuragawa, H., 2001, Diode-laser hyperfine-structure spectroscopy of $^{138},^{139}\text{La}$, *Phys. Rev. A*, 63, 064501.
- [22]. Başar, Gö., Başar, Gü., Er, A., Kröger, S., 2007, Experimental hyperfine structure investigation of atomic La, *Phys. Scr.*, 75, 572.
- [23]. Furmann, B., Stefańska, D., Dembczyński, J., 2007, Hyperfine structure analysis odd configurations levels in neutral lanthanum: I. Experimental, *Phys. Scr.*, 76, 264.
- [24]. Başar, Gü., Başar, Gö., Kröger, S., 2009, High resolution measurements of the hyperfine structure of atomic Lanthanum for energetically low lying levels of odd parity, *Opt. Commun.*, 282, 562.
- [25]. Furmann, B., Stefańska, D., Dembczyński, J., 2009, Experimental investigations of the hyperfine structure in neutral La: I. Odd parity levels, *J. Phys. B*, 42, 175005.
- [26]. Nighat, Y., Raith, M., Hussain, M., Windholz, L., 2010, Investigation of the hyperfine structure of lanthanum lines by a laser-induced fluorescence technique, *J. Phys. B*, 43, 125001.
- [27]. Güzelçimen, F., Siddiqui, I., Başar, G., Kröger, S., Windholz, L., 2012, New energy levels and hyperfine structure measurements of neutral lanthanum by laser-induced fluorescence spectroscopy, *J. Phys. B*, 45, 135005.
- [28]. Gamper, B., Głowacki, P., Siddiqui, I., Dembczyński, J., Windholz, L., 2014, New even-parity fine structure levels of the Lanthanum atom discovered by means of optogalvanic spectroscopy, *J. Phys. B*, 47, 16.
- [29]. Güzelçimen, F., Başar, Gö., Tamanis, M., Kruzins, A., Ferber, R., Windholz, L., Kröger, S., 2013, High-resolution Fourier Transform Spectroscopy of lanthanum in Ar discharge in the near-infrared, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 208, 18.

- [30]. Shang, X., Tian, Y., Wang, Q., Fan, S., Bai, W., Dai, Z., 2014, Radiative lifetime measurements of some La i and La ii levels by time-resolved laser spectroscopy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc.*, 442, 138.
- [31]. Höhle, C., Hühnermann, H., Wagner, H., 1982, Measurements of the hyperfine structure constants of all the 5 d2 and 5 d6 s levels in $^{139}\text{La II}$ using the high-resolution spectroscopy on collinear laser-ion-beams, *Z. Phys. A*, 304, 279.
- [32]. Li, G., Ma, H., Li, M., Chen, Z., Chen, M., Lu, F., Peng, X., Yang, F., 2000, Hyperfine structure measurement in La II $5d^2 1G_4 \rightarrow 4f5d 1F_3$, *Acta Physica Sinica*, 49, 1256.
- [33]. Li, M., Ma, H., Chen, M., Chen, Z., Lu, F., Tang, J., Yang, F., 2000, Development of the fully digital dc speed regulation system in 8-mX6-m wind tunnel, *Phys. Scr.*, 61, 449.
- [34]. Li, G., Zhang, X., Lu, F., Peng, X., Yang, F., 2001, Hyperfine Structure Measurement of La II by Collinear Fast Ion-Beam-Laser Spectroscopy, *Jpn. J. of Appl. Phys.*, 40, 2508.
- [35]. Ma, H., 2002, Hyperfine structure of singly ionized lanthanum and praseodymium, *Chinese Phys.*, 11, 905.
- [36]. Furmann, B., Ruczkowski, J., Stefańska, D., Elantkowska, M., Dembczyński, J., 2008, Hyper-fine structure in La II odd configuration levels, *J. Phys. B*, 41, 215004.
- [37]. Furmann, B., Elantkowska, M., Stefańska, D., Ruczkowski, J., Dembczyński, J., 2008, Hyper- fine structure in La II even configuration levels, *J. Phys. B*, 41, 235002.
- [38]. Andersen, T., Poulsen, O., Ramanujam, P.S., Petko, A.P., 1975, Lifetimes of some excited states in the rare earths: La ii, Ce ii, Pr ii, Nd ii, Sm ii, Yb i, Yb ii, and Lu ii, *Solar Phys.*, 44, 257.
- [39]. Arnesen, A., Bengtsson, A., Hallin, R., Lindslog, J., Nordling, C., Noreland, T., 1977, Lifetime Measurements in La II with the Beam-Laser Method, *Phys Scr.*, 16, 31.
- [40]. Bauche, J., Wyart, J.F., Ben Ahmed, Z., Guidara, K., 1982, Interpretation of the hyperfine structures in the low even configurations of lanthanum II, *Z Physik A*, 304, 285.
- [41]. Bord, D.J., Barisciano, L.P., Cowley, C.R., 1996, gf-values for singly ionized lanthanum based on a new calibration of NBS Monograph 145 intensities, *Jr. Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 278, 997.
- [42]. Zhiguo, Z., Zhongshan, L., Zhankui, J., 1999, Experimental investigations of oscillator strengths for ultraviolet transitions in LaII, *European Phys. J. D*, 77, 499.
- [43]. Derkatch, A., Ilyinsky, L., Mannervik, S., Norlin, L.O., Rostohar, D., Royen, P., Schef, P., Biémond, E., 2002, Experimental and theoretical investigation of radiative decay rates of metastable levels in La II, *Phys. Rev. A*, 65, 062508.

- [44]. Schef, P., Björkhage, M., Lundin, P., Mannervik, S., 2006, Precise hyperfine structure measurements of La II utilizing the laser and rf double resonance technique, *Physica Scripta*, 73, 217.
- [45]. Furmann, B., Stefańska, D., Dembczyński, J., 2010, Critical analysis of the methods of interpretation in the hyperfine structure of free atoms and ions: case of the model space $(5d+6s)3$ of the lanthanum atom, *J. Phys. B*, 43, 1.
- [46]. Karaçoban, B., Özdemir, L., 2013, Energy levels and the Lande g-factors for singly ionized lanthanum, *Hindawi Publishing Corporation-Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2013-674242.
- [47]. Werbowy, S., Güney, C., Windholz, L., 2016, Studies of Landé gJ-factors of singly ionized lanthanum by laser-induced fluorescence spectroscopy, *JQS&RT*, 179, 33.
- [48]. Siddiqui, I., Khan, S., Gamper, B., Dembczyński, J., Windholz, L., 2013, Optogalvanic spectroscopy of the hyperfine structure of weak La I lines: discovery of new even parity fine structure levels, *J. Phys. B*, 46, 065002.
- [49]. Raghavan, P., 1989, Table of nuclear moments, *At. Data Nucl. Data Tables*, 42, 189.
- [50]. Ptable, <https://www.ptable.com/?lang=tr>, [Ziyaret Tarihi: 06.06.2019]
- [51]. Rsc, <http://www.rsc.org/periodic-table/element/57/lanthanum>, [Ziyaret Tarihi: 06.06.2019]
- [52]. Eisberg, R., Resnick, R., 1985, *Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei and particles*, John Wiley&Sons; 2nd Edition, ISBN: 0-471-87373-X.
- [53]. Bransden, B. H., Joachain, C., J. 1999, *Atom ve molekül fiziği*, Bilim Yayıncılık, Ankara, ISBN: 975-7636-03-7.
- [54]. Ewart, P., 2014, *Atomic Physics*, CreateSpace Independent Publishing Platform, ISBN: 978-1502517272.
- [55]. Siddiqui, I., 2010, *Hyperfine Structure Studies of Praseodymium Atoms and Ions*, Doktora Tezi (PhD), Avusturya Graz Teknik Üniversitesi-Deneysel Fizik Enstitüsü.
- [56]. Aygün, E., Zengin, D.M., 2000, *Kuantum Fiziği*, Bilim Yayınları, Ankara, ISBN: 975-556-005-x.
- [57]. Aygün, E., Zengin, D.M., 1988, *Atom ve Molekül Fiziği*, Bilim Yayınları, Ankara, ISBN: 975-95625-0-2.
- [58]. Haken, H. and Wolf, H.C., 1993, *The physics of atoms and quanta*, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, ISBN: 978-3540208075.
- [59]. Demtröder, W., 2006, *Atoms, Molecules and Photons, an Introduction to Atomic, Molecular and Quantum Physics*, Springer, Berlin, ISBN: 978-3-540-20631-6.

- [60]. Kopfermann, H., Schneider, E.E., 1958, *Nuclear moments*, Academic Press Inc, Catalog, ISBN: 56-6607.
- [61]. Thorne, A., Litzen, U., Johansson, S., 1999, *Spectrophysics*, Springer-Verlag, Berlin, ISBN: 3-540-65117-9.
- [62]. Demtröder, W., 1998, *Laser Spectroscopy Basic Concepts and Instrumentation*, Springer, Germany, 3-540-57171-X.
- [63]. Learner, R.C.M., Thorne, A.P., 1988, Wavelength calibration of Fourier-transform emission spectra with applications to Fe I, *J. Opt. Soc. Am. B*, 5, 2045.
- [64]. Peck, R., Reader, K., 1972, Dispersion of Air, *JOSA*, 62, 958.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Mehdi TONKA
Doğum Yeri	ULUDERE
Doğum Tarihi	06.11.1986
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0506 687 9880
E-Posta Adresi	mehditonka@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	KİLİS 7 ARALIK ÜNİVERSİTESİ
Fakülte	FEN-EDEBİYAT FAKÜLTESİ
Bölümü	FİZİK BÖLÜMÜ
Mezuniyet Yılı	18.06.2012

Yüksek Lisans	
Üniversite	İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
Enstitü Adı	FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Anabilim Dalı	FİZİK ANABİLİM DALI
Programı	ATOM VE MOLEKÜL FİZİĞİ PROGRAMI

Makale ve Bildiriler	
<p>“Revised energy levels of singly ionized lanthanum”, Feyza Güzelçimen, Mehdi Tonka, Zaheer Uddin, Naveed Anjum Bhatti, Laurentius Windholz, Sophie Kröger, Gönül Başar, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2018, 211, 188–199</p>	