

**AZOT MOLEKÜLÜNÜN
İKİLİ DİFERANSİYEL
TESİR KESİTİ ÖLÇÜMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Çınar BAL

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN
FİZİK ANABİLİM DALI
Haziran, 2016

Bu tez çalışması 12.FEN.BİL.11 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AZOT MOLEKÜLÜNÜN İKİLİ DİFERANSİYEL TESİR KESİTİ
ÖLÇÜMLERİ

Çınar BAL

DANIŞMAN
Prof.Dr. Mevlüt DOĞAN

FİZİK ANABİLİM DALI

Haziran, 2016

TEZ ONAY SAYFASI

Çınar BAL tarafından hazırlanan “Azot Molekülünün İkili Diferansiyel Tesir Kesiti Ölçümleri” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 29/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof.Dr. Mevlüt DOĞAN

Başkan : Prof.Dr. Hamdi Şükür KILIÇ
Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, İmza

Üye : Prof.Dr. Mevlüt DOĞAN
..Afyon Kocatepe Üni., Fen Edb.Fakültesi, İmza

Üye :Doç.Dr. Melike ULU
..Afyon Kocatepe Üni., Fen Edb.Fakültesi, İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

10/05/2016

Çınar BAL

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

AZOT MOLEKÜLÜNÜN İKİLİ DİFERANSİYEL TESİR KESİTİ ÖLÇÜMLERİ

Çınar BAL
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN

Bu çalışmada, elektron etkisi ile Azot molekülünün ikili diferansiyel tesir kesiti ölçümleri yapılmıştır. Elektron çarpışma deneylerinde, belirli enerjideki elektron demeti hedef gaz molekülleri ile çarpıştırılmakta ve çarpışma sonucu ortaya çıkan parçacıklar açı ve enerjilerine göre dedekte edilmektedir. Çarpışma sonucu saçılan elektronlar, birbirleriyle etkileşen kuantum parçacıklarıdır. Saçılma olayının anlaşılması, etkileşme potansiyelinin ve parçacıkların dalga fonksiyonlarının doğru ifade edilmesiyle mümkündür.

Bu tez çalışmasında Azot molekülünün 250 eV enerjili elektron demeti ile saçılma ve iyonlaşma tesir kesitleri ölçülmüştür. İkinci aşama olarak Azot molekülünde farklı enerji ve açı değerlerinde DDCS ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Elektron Çarpışma Laboratuvarında (e-COL) bulunan elektron spektrometresi kullanılarak alınmıştır.

2016, ix + 52 sayfa

Anahtar Kelimeler: Elektron-molekül çarpışmaları, tesir kesiti, elektron saçılma, azot molekülü, elektron spektrometresi.

ABSTRACT

M.Sc Thesis

MEASUREMENTS OF DOUBLE DIFFERENTIAL CROSS SECTION FOR NITROGEN MOLECULE

Çınar BAL

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Mevlüt DOGAN

In this study, electron impact ionization cross sections of nitrogen molecule are presented. In electron collision experiments, electron beam with specific energy interacts with target gas and the outgoing particles are detected with respect to their scattering angle and energy. The outgoing particles are quantum particles that are interacted with each other. Scattering phenomena can be understood only if the interaction potential and particle's wave functions are correctly determined.

In the thesis, electron impact scattering and ionization process for N₂ at 250 eV incident electron energy is investigated. Calibration studies are completed before the DDCS measurements are done. In this sense, elastic and inelastic scattering of electron-N₂ collision is searched for different kinematics. Measurements are completed in Electron Collision Laboratory (e-COL) located in Afyon Kocatepe University.

2016, ix + 52 pages

Keywords: Electron-molecule collisions cross section, electron scattering, nitrogen molecule, electron spectrometer.

TEŞEKKÜR

Deneysel alıŐmaların gerekleŐtirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aŐamasında yapmıŐ olduğu büyük katkılarında, gsterdiği ilgi ve anlayıŐtan dolayı tez danıŐmanım Sayın Prof.Dr. Mevlüt DOğAN'a, araŐtırma ve yazım sresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç.Dr. Melike ULU ve Dr. Zehra Nur ÖZER'e, her konuda öneri ve eleŐtirileriyle yardımlarını gördüğüm laboratuvar çalışma arkadaŐım Murat YAVUZ'a ve desteklerinden dolayı e-COL grubu çalışma arkadaŐlarıma, bu araŐtırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Bu tez alıŐması, Afyon Kocatepe Üniversitesi BAPK tarafından 12.FEN.BİL.11 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

ınar BAL

AFYONKARAHİSAR, 2016

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Potansiyelden Saçılma ve Tesir Kesiti Kavramı.....	4
2.2 Azot Molekülünde Diferansiyel Tesir Kesiti (DCS)	5
2.3 Azot Molekülünde İkili Diferansiyel Tesir Kesiti (DDCS).....	7
2.4 Azot Molekülünde Üçlü Diferansiyel Tesir Kesiti (TDCS) Ölçümleri.....	8
3. MATERYAL VE METOT.....	16
3.1 Deney Düzenegi Parçaları	19
3.1.1 Vakum Sistemi	19
3.1.2 Hedef Gaz Kaynağı	20
3.1.3 Elektron Tabancası	20
3.1.4 Faraday Elektron Toplayıcısı (FET).....	25
3.1.6 Elektronik Kontrol Üniteleri.....	29
3.1.7 Sinyal İşleme Ünitesi.....	29
4. BULGULAR	35
4.1 Enerji Kayıp Spektrumları	35
4.2 DDCS Ölçümleri.....	37
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	43
6. KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	52

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

E_s	Saçılan elektron
E_k	Kopan elektron
E_0	Gelen elektronun enerjisi
σ	Toplam tesir kesiti

Kısaltmalar

CC	Close Coupling Equation (Kapalı Çiftlenim Denklemi)
CCC	Convergent Close Coupling Theory (Yakınsak Kapalı Çiftlenim Teorisi)
PWIA	Plane Wave Interaction Approximation (Düzlem Dalga Etkileşim Yaklaşımı)
CEM	Channel Electron Multiplier (Tek Kanallı Elektron Çoğaltıcı)
SDCS	Single Differential Cross Section (Tekli Diferansiyel Tesir Kesiti)
DDCS	Double Differential Cross Section (İkili Diferansiyel Tesir Kesiti)
TDCS	Triple Differential Cross Section (Üçlü Diferansiyel Tesir Kesiti)
DWBA	Distorted Wave Born Approximation (Bozulmuş Dalga Born Yaklaşımı)
FET	Faraday Elektron Toplayıcı
SP	Splash Plate (Splash elektrodu)
FC	Faraday Cup (Faraday elektrodu)
TMP	Turbo Molecular Pump (Turbo Moleküler Pompa)
G.K.	Güç Kaynağı
MCP	Multi Channel Plate (Çok Kanallı Plaka)
TAC	Time-to-Amplitude Converter (Zaman-Genlik Dönüştürücü)
MCS	Multi Channel Scaler (Çok Kanallı Ölçekleyici)
MCA	Multi Channel Analyzer (Çok Kanallı Analizör)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

- Şekil 2.1** Elastik saçılma, uyarılma ve iyonlaşma olaylarının şematik gösterimi.....3
- Şekil 2.2** Azot molekülü için $E_0=20$ eV değerinde DCS grafiği: x Nickel vd. (1988); □ Srivastava vd. (1975, 1976); ◇ Shyn ve Carignan (1980); + Dubois ve Rudd (1976).....6
- Şekil 2.3** Azot molekülü için $E_0=20$ eV’de DCS grafiği: x Nickel vd. (1988);◇, Shyn ve Carignan (1980); □ Srivastava vd. (1975, 1976); +, Dubois ve Rudd (1976).....6
- Şekil 2.4** Azot molekülü için 500 eV gelen elektron enerjisinde ve a,b,c sırasıyla 2,4,10 eV enerjilerde kopan elektronlar için DDCS ölçüm sonuçları. Yuvarlak şekiller Goruganthu vd. (1986) ve üçgenler DuBois ve Rudd (1977) tarafından alınan ölçüm sonuçlarını, x ile verilen ölçüm sonuçları OBP, sürekli çizgi ise ölçümlere uygun olan Legendre polinom fonksiyonudur.8
- Şekil 2.5** Gelen, saçılan ve kopan elektronlara ait momentum vektörlerinin gösterimi. Gelen ve saçılan elektronların enerji ve momentumlarının sabit olması durumunda kopan elektron momentum transfer vektörü doğrultusu ve tersi yönünde bir açisal dağılıma sahip olacaktır. a) momentum transfer doğrultusu boyunca olan ileri saçılma olayı, b) momentum transferinin tersi boyunca gerçekleşen geri saçılma (recoil) olayı c) her iki pikinde 3D olarak şematik gösterimi.....10
- Şekil 2.6** $E_0=150$ eV için $E_s=124,4$ eV ve $E_e=10$ eV için koparılan elektron açısına bağlı olarak girişim faktörünün değişim grafiği.12
- Şekil 2.7** Alınan ölçümler, DWBAxI ve DWBA yaklaşımlarının karşılaştırıldığı TDCS ölçümleri (Hargreaves *et al.* 2009).....13
- Şekil 2.8** Azot molekülünde $E_0=589$ eV gelen elektron enerjisinde $3\sigma_g$, $1\pi_u$ ve $2\sigma_u$ orbitalleri için alınan TDCS grafiği. Saçılan elektron enerjisi $E_a=500$ eV

	açısı $\theta_a=6^0$, koparılan enerjisi ise $E_b=74$ eV'tur. Ok, momentum transfer doğrultusunu göstermektedir ($\theta_k=49$). (Naja <i>et al.</i> 2007).	15
Şekil 2.9	Şekil 2.8'deki grafik gibi fakat bu grafikte alınan ölçümler azot molekülünün iç $2\sigma_g$ orbitali içindir. Farklı olarak $E_0=612$ eV ve $\theta_k=43$ 'tür (Naja <i>et al.</i> 2007).	15
Şekil 3.1	Elektron spektrometresinin yerleştirildiği, yüksek vakum ortamının oluşturulduğu vakum odası, iki aşamalı pompa sistemi ile spektrometre aygıtlarının voltaj ve akım gereksinimlerinin sağlandığı kontrol üniteleri ve deneysel ölçümlerin görüntülendiği ve kaydedildiği bilgisayar sistemi ve vakum çemberinin iç kısmında gerçekleşen çarpışma olayının 3 boyutlu çizimi.	17
Şekil 3.2	Deney düzeneği. Vakum odası (1), elektron tabancası (2), elektron enerji analizörleri (3), gaz demeti hattı (4), döner tablalar (5), hareket flançlar (6), büyük bağlantı flancı (7), gaz valfi (8),TMP (9), ara bağlantı (10), mekanik pompa (11).	18
Şekil 3.3	Elektron çarpışma spektrometresinin yerleştirildiği vakum odasının yandan ve alttan şematik gösterimi.	19
Şekil 3.4	Spektrometreyi oluşturan parçaların ve gaz iletim hattının vakum sistemi içerisindeki görünüşleri.	20
Şekil 3.5	Hairpin tipi filament.	21
Şekil 3.6	Wehnelt elektrotu ve anottan oluşan üçlü sistemde elektron salınımı ve odaklanmasının gösterimi.	22
Şekil 3.7	Elektron tabancasının AutoCAD programında teknik çizim resmi (Ulu <i>et al.</i> 2007).	24
Şekil 3.8	Elektron tabancasında kullanılan lens elemanları için elektrik ve güç kaynağı (G.K.) bağlantıları ve elektron tabancasının kontrol panelleri.	24
Şekil 3.9	Filament voltajına göre telden geçen akımın değişimi.	25

Şekil 3.10 Faraday elektron toplayıcısı.....	25
Şekil 3.11 Elektron enerji analizörünün SIMION programında çizimi.....	26
Şekil 3.12 Farklı enerjili elektronların yarıküresel analizörden geçişi.	27
Şekil 3.13 Tek kanallı elektron çoğaltıcı ve CEM’ de elektronların çoğaltılması.....	28
Şekil 3.14 Elektron analizörlerinin kontrol üniteleri.	29
Şekil 3.15 Detektörden gelen sinyalin bağlandığı NIMBIN sistemi. Soldan itibaren sıra ile Ortec Marka CEM yüksek voltaj güç kaynakları (her iki analizörün CEM voltaj ayarının yapıldığı), LeCroy marka yükselteç, LeCroy marka diskriminatör, sayıcılar, TAC ve MCS bilgisayar bağlantısı.....	30
Şekil 3.16 Bir analizör için Sinyal işleme ünitesinin şematik gösterimi.	30
Şekil 3.17 A ve B analizörlerinde bulunan detektörlerin sinyal yükseklik dağılımları.100 eV enerjide ve 50^0 saçılma açısında elastik pik alımı sırasında elde edilmiştir.	32
Şekil 3.18 Yükseltecin kazancına bağlı olarak sayımda meydana gelen değişiklik.	33
Şekil 3.19 Ayırt edici seviyesine karşılık sayım sayısı. Ayırt edici seviyesi 1-9,5 V aralığında değiştirilmiştir.....	33
Şekil 3.20 Elektron çoğaltıcı dedektörün çıkışında kullanılan sinyal işleme ünitesi ve osiloskoptan elde edilen sinyal görüntüleri.	34
Şekil 4.1 Kopan analizörde $E_0=150$ eV, $KE=10$ eV için; 10^0 - 50^0 arasında alınan elastik pikler.....	36
Şekil 4.2 Kopan analizörde $E_0=150$ eV, $KE=10$ eV ve 10^0 - 50^0 de alınan uyarılma bölgesindeki enerji kayıp spektrumları.....	37
Şekil 4.3 10, 15 ve 20 eV’luk koparılan enerjili (E_k) elektronlar için alınan DDCS sonuçları. Siyah noktalar ölçülen deneysel verileri; kırmızı kareler teorik sonuçları göstermektedir.....	40

- Şekil 4.4** 25, 50 ve 75 eV' lik koparılan enerjili (E_k) elektronlar için alınan DDCS sonuçları. Siyah noktalar ölçülen deneysel verileri; kırmızı kareler teorik sonuçları göstermektedir.....41
- Şekil 4.5** 100, 150, 200 ve 225 eV'lik koparılan enerjili (E_k) elektronlar için alınan DDCS sonuçları. Siyah noktalar ölçülen deneysel verileri; kırmızı kareler teorik sonuçları göstermektedir.42

1. GİRİŞ

Elektron ve foton gibi temel parçacıkların atomlar/moleküllerle çarpıştırılarak içyapıları hakkında bilgiler edinilmesi ve incelenmesi 1900'lü yıllarda başlamıştır. Çarpışma fiziği ile ilgili ilk deneysel çalışma 1903 yılında Lenard tarafından gerçekleştirilmiştir. 1910 yıllarında Rutherford meşhur saçılma deneyini gerçekleştirmiştir ve bu deneyde hedef olarak ince altın bir levha kullanmış ve α -parçacıklarının saçılmasını gözlemleyerek çekirdeğin keşfini gerçekleştirmiştir ve atomun genel yapısını bugünkü şekline en yakın olarak ilk defa tanımlamıştır. Daha sonra, Franck ve Hertz (1914) civa buharından saçılan elektronların atomlarla etkileşmesi sonucu enerji kaybettiğini göstermişlerdir.

Çarpışma fiziği ile ilgili ilk teorik çalışmalar 1933 yılında Mott ve Massey tarafından gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalar atomik çarpışmaların genel olarak formüle edilmesi üzerine olmuştur. Daha sonraki gelişme ise Wheeler (1983) ve Heisenberg (1983) tarafından saçılma teorisinin matematiksel S-Matrix kavramı ile açıklanması üzerine olmuştur. Takip eden yıllarda Jauch vd. (1958), Faddeev (1961) ve Frost vd. (1964) tarafından bir ve daha fazla geçişleri içeren teoriler geliştirilmiştir.

Rudberg (1930), N_2 molekülü için enerji kayıp spektroskopisi ile deneysel çalışmalar ortaya koymuş ve bir takım veriler elde etmiştir. Bu çalışma ile, iyonlaşma enerjisi ve rezonans olayları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yine 1930 yılında elastik, elastik olmayan saçılma ve iyonlaşma olayları Bethe (1930) tarafından Birinci Born Yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır.

Teknolojinin de gelişmesiyle birlikte endüstri ve bilimin diğer alanlarında da çarpışma fiziğinin önemi artmıştır. Elektronlar, plazma-aşındırma teknolojilerinin temel ögesidir ve mikro-elektronik bileşenlerin ve yarıiletken aygıtların üretilmesinde kullanılmaktadır (Gregg *et al.* 2000). Endüstride CO_2 lazerleri; CO_2 ve N_2 moleküllerinin elektron çarpışmasıyla titreşim ve dönme düzeylerine uyarılması sonucu elde edilmektedir (Kuzumoto *et al.* 1989). Astrofizik alanında ise atmosferdeki moleküler yapıları ve güneş ışığı ile etkileşim sonucu açığa çıkan fotokimyasal süreçlerden kaynaklanan değişimlerin incelenmesi de çarpışma fiziği ile ilişkilidir.

Bu alışmalar paralelinde; uzaydaki diğer gezegen ve yıldızlardaki atom ve moleküllerin belirlenmesi, biyomoleküllerin oluşumunda temel yapı taşlarının bulunabilmesi ve yerküre dışında hayatın var olup olmadığı ile ilgili araştırmalar yapılabilmektedir. Sağlık sektöründe de çarpışma fiziği tanı ve tedavi sürecinde etkin olarak kullanılmaktadır.

İyonlaşma olayı, hedef atomdan/molekülden çarpışma sonrası elektron koparılması olayıdır. Farklı şekillerde iyonlaşma olayları gerçekleşebilmektedir. Bunlar; kendiliğinden iyonlaşma (autoionization), tekli ve çoklu i ya da dış kabuktan iyonlaşmalar bunlardan bazılarıdır. İyonlaşma olayının en çok gerçekleştiği durum hedef parçacığın doğrudan tekli iyonlaşması durumudur.

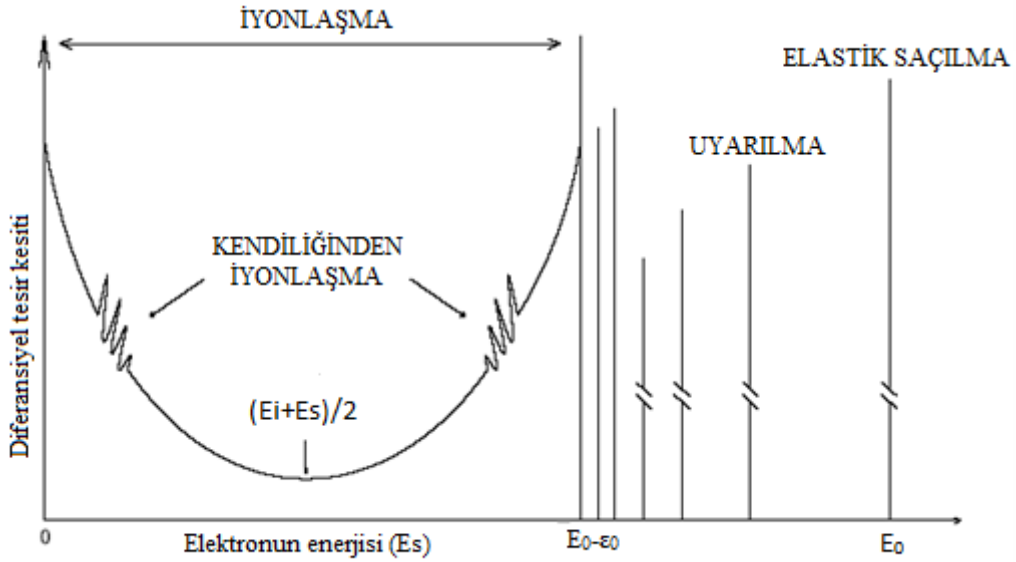
Bu tez çalışmasında N₂ molekülünün 250 eV enerjiye sahip gelen bir elektron ile etkileşerek tekli iyonlaşma olayında farklı aı ve enerjilerde ikili diferansiyel tesir kesiti (DDCS) ölçümleri alınmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Bölüm 2'de literatür bilgisi ve elektron etkisi ile iyonlaşma olayı ve teorik modellemeler açıklanmaktadır. Bölüm 3'te elektron çarpışma spektrometresini oluşturan kısımların (vakum sistemi, elektron tabancası, enerji analizörleri, Faraday elektron toplayıcısı, detektörler, sinyal işleme kısımları ve elektronik kısımlar) kullanımı ve testleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır. Deneysel sonuçlar ise Bölüm 4'te verilmektedir. 5. bölümde ise elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Elektron atom/molekül çarpışmaları sonucunda saçılma, uyarılma, iyonlaşma gibi temel fizik olayları gerçekleşmektedir. Çarpışma sonrasında hedef atomla/molekülle elektron arasında bir enerji alışverişi yoksa saçılma elastik bir çarpışma sonucunda, saçılan parçacığın enerjisi ilk durumdaki enerjisine eşit değil ise bu durumda saçılma elastik olmayan (inelastik) çarpışma meydana gelir. İnelastik çarpışma olayında yalnızca uyarılma, yalnızca iyonlaşma ya da her iki olay birlikte görülebilmektedir.

Tüm bu durumlar için enerji kayıp spektrumu Şekil 2.1'deki gibi verilmektedir. Spektrumun sağ tarafında elastik saçılma ve uyarılma olaylarına ait geçişler bulunurken, iyonlaşma olayında saçılan ve kopan elektronlar ayırt edilemediğinden spektrum şeklin sol taraftaki gibi simetrik olarak verilir.



Şekil 2.1 Elastik saçılma, uyarılma ve iyonlaşma olaylarının şematik gösterimi.

Elastik saçılma sonucunda sadece bir saçılan parçacık bulunur ve enerjisi gelen elektron enerjisine eşittir. Uyarma olayında ise çarpışma sonrası bir saçılan elektron ve atomdan salınan foton bulunurken, tekli iyonlaşma durumunda saçılan elektron, atomdan koparılan bir elektron ve elektronunu kaybetmiş bir iyon bulunmaktadır. Sırasıyla elastik saçılma, uyarılma ve tekli iyonlaşma olaylarının denklemsel ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$e^-(E_0, k_0) + A \rightarrow A + e^-(E_s, k_s) \quad (2.1)$$

$$e_0^-(E_0) + A_i \rightarrow e_s^-(E_s) + A_j^* \\ \downarrow \\ A_i + h\nu \quad (2.2)$$

$$e_0^-(E_0) + A \rightarrow e_s^-(E_s) + e_i^-(E_i) + A^+ \quad (2.3)$$

Atomların iyonlaşması ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunurken moleküllerin DCS ölçümleri üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bunun sebebi DCS sonuçlarını etkileyebilecek birçok etken olmasıdır. DCS sonuçlarını etkileyecek en önemli faktör, moleküllerin basit küresel yapıda olmamasıdır. Diğer bir zorluk ise, elektronik enerji düzeylerinin birbirine çok yakın olması ve titreşim-dönme düzeylerinden gelen katkılar nedeni ile farklı seviyelerin ayırt edilememesidir.

2.1 Potansiyelden Saçılma ve Tesir Kesiti Kavramı

Tesir kesiti, belirli şartlar altında bir çarpışma olayının meydana gelme olasılığının bir ölçüsüdür. Tesir kesiti, çarpışan parçacıklara ve çarpışma sırasında meydana gelen etkileşmelere bağlıdır. Elektron – atom çarpışmalarında meydana gelen olayların tanımlanabilmesi sistemin toplam dalga fonksiyonlarının çarpışmadan önce ve sonra belirlenmesine bağlıdır (Joachain 1983).

Bunun için öncelikle sistemin Schrödinger dalga denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Çarpışma zamana bağlı olmasına rağmen, etkileşmeler sadece konuma bağlı olduğundan zamandan bağımsızdır. Saçılma bilgileri bu sebeple zamandan bağımsız Schrödinger denkleminin çözülmesi ile elde edilir (McCarty ve Weigold 1995). μ indirgenmiş kütle olmak üzere, α/r Coulomb potansiyeli ile hareket ettiği düşünülürse, bu durumda hareketi tanımlayan Schrödinger dalga denklemi,

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + \frac{\alpha}{r} - E \right) \psi(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.4)$$

şeklinde yazılır.

$k^2 = \frac{2\mu}{\hbar^2} E$ ve $\vec{v} = \frac{\mu\alpha}{\hbar^2 k}$ olmak üzere denklem (2.4) için çözüm önerisi olan dalga fonksiyonu; $\psi = \exp(i\vec{k}\cdot\vec{r})f(\vec{r})$ ve $f(\vec{r})$, saçılma genliği olmak üzere; Schrödinger dalga denklemi,

$$\left(\nabla^2 + 2ik\frac{\partial}{\partial z} - \frac{2vk}{r}\right)f(\vec{r}) = 0 \quad (2.5)$$

olarak yazılabilir.

Parabolik koordinatlarda Laplas denklemi ve gerekli teorik yaklaşımlar kullanıldıktan sonra saçılma için diferansiyel tesir kesiti ifadesi Coulomb potansiyelinden ,

$$\frac{d\sigma(\theta,\phi)}{d\Omega} = |f(\theta,\phi)|^2 = \frac{v^2}{4k^2 \sin^4(\theta/2)} \quad (2.6)$$

olarak yazılabilir. Bu denklem Rutherford saçılmasını göstermektedir (Dunseath and Dunseath-Terao 2004, Özer 2013)

2.2 Azot Molekülünde Diferansiyel Tesir Kesiti (DCS)

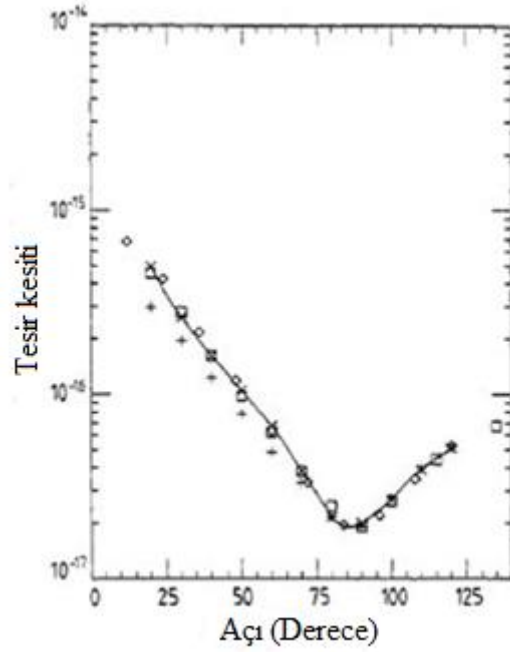
Elektron çarpışma deneylerinde çarpışma sonucunda molekülün enerjisinde bir değişiklik olmaz ise elastik saçılma gerçekleştiği anlamına gelmektedir (Trajmar *et al.* 2006).

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E,\theta) = \frac{dN_S(E,\theta)}{N_i n l d\theta} \quad (2.7)$$

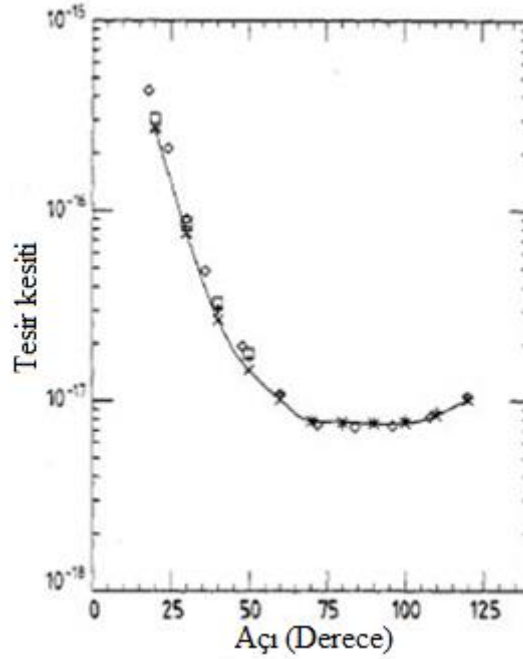
Burada $dN_S(E,\theta)$ gelen elektron demetinin hareket doğrultusuna göre θ açısındaki analizörün $d\Omega$ katı açısı içerisindeki gördüğü E enerjili saçılan elektronların sayısı ve N_i ; l uzunluğunda saçılma hücresi içerisinde n yoğunluklu hedef gaz atomları üzerine birim zamanda gelen elektronların sayısıdır (Şişe 2011).

Azot molekülünde Nickel ve Mott (1988) 20-100 eV enerjilerinde 20^0 - 120^0 açıları arasında mutlak DCS ölçümleri almışlardır. Ölçümler sırasında hedef gaz sisteme gönderilirken görelî akışkan (relative flow) tekniği kullanılmıştır.

Relative-flow tekniğini kontrol etmek için de önce Neon gazı ile denemeler yapılmıştır. Ölçümlerdeki istatistik hatanın hesaplanması He gazı ile yapılmıştır. Azot molekülü için alınan DCS sonuçları Şekil 2.2. ve Şekil 2.3. ile verildiği gibidir.



Şekil 2.2 Azot molekülü için $E_0=20$ eV değerinde DCS grafiği: x Nickel vd. (1988); □ Srivastava vd. (1975, 1976); ◇ Shyn ve Carignan (1980); + Dubois ve Rudd (1976).



Şekil 2.3 Azot molekülü için $E_0=20$ eV'de DCS grafiği: x Nickel vd. (1988); ◇, Shyn ve Carignan (1980); □ Srivastava vd. (1975, 1976); +, Dubois ve Rudd (1976).

Aynı ölçümleri Nickel ve Mott (1988), CO gazı içinde yapmışlar ve CO ile N₂ için tesir kesitlerini birbirlerine oranlamış ve yakın ölçümler elde etmişlerdir. Yapılan oranlama işlemi Neon ve Azot gazı için yapılan oranlama işlemi temel alınarak elde edilmiştir.

Azot molekülü üzerinde gerçekleştirilen diğer bir çalışma Lee ve Iga (1998) tarafından yapılmıştır. 20-800 eV gelen elektron enerjileri arasında Schwinger variational iterative (Schwinger yinelemeli varyasyon) metodunu ve distorted-wave approximation (bozulan dalga yaklaşımı) yaklaşımını birleştirerek integral ve momentum transfer tesir kesitlerini saçılan dalga için hesaplamışlardır.

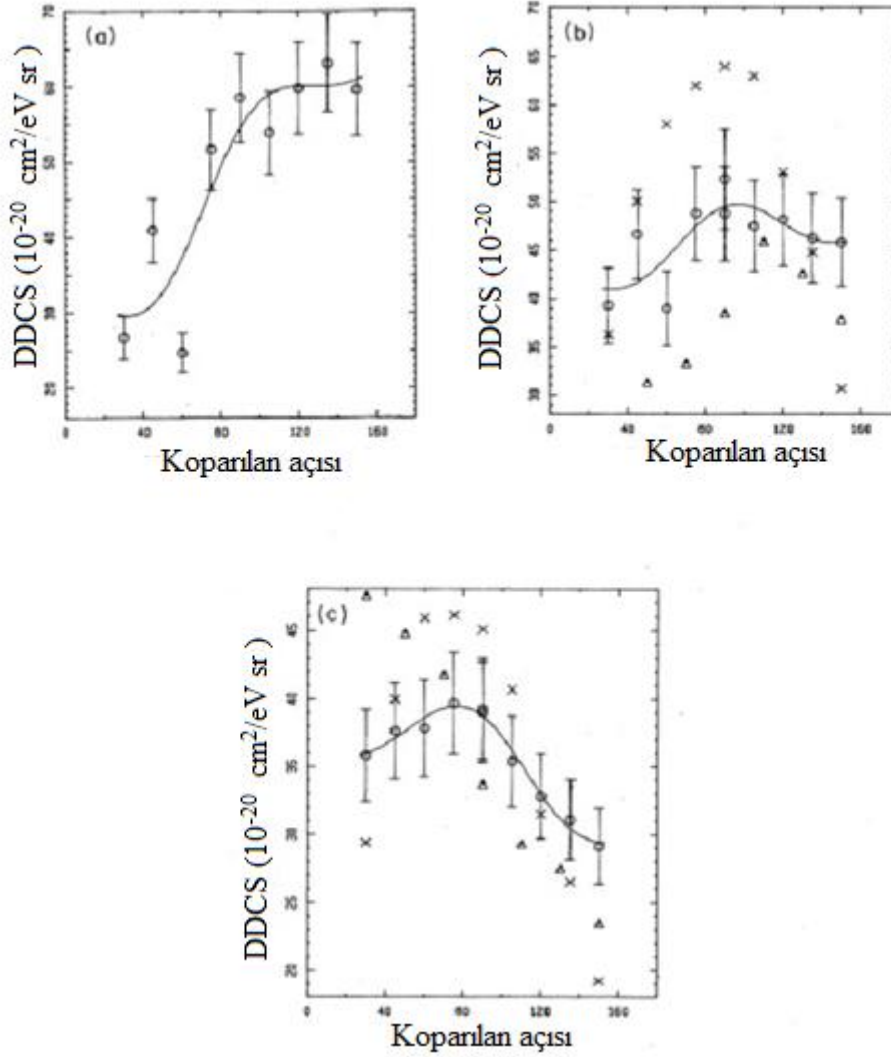
2.3 Azot Molekülünde İkili Diferansiyel Tesir Kesiti (DDCS)

İkili diferansiyel tesir kesiti ölçümü iki şekilde yapılabilmektedir. İlk olarak gelen elektron ve koparılan elektron enerjileri sabit tutulup açı değiştirilerek ölçümler gerçekleştirilmektedir. Eğer küçük açılarda yüksek enerjili elektron dedekte ediliyorsa bu tesir kesiti “saçılan” elektrona atfedilmektedir. Bu konumda da saçılma açısını büyütülürse tesir kesiti küçülmektedir. İkinci bir yöntem ise sabit saçılma açılarında elde edilen elektronların enerjilerinin değiştirilmesiyle DDCS ölçümü yapılabilmektedir.

DuBois ve Rudd (1977), azot molekülünün yanı sıra neon, helyum, argon ve hidrojen atomları içinde mutlak DDCS ölçümleri almışlardır. Gelen elektronun enerjisi 100-500 eV aralığında olup koparılan elektronları analiz etmek için enerji analizörleri kullanmışlardır. Elde edilen veriler Opal ve Peterson dataları ile 90⁰'de uyumlu fakat helyum için alınan ölçümlerde uyumsuzluk görülmüştür. Bir diğer önemli çalışma da Goruganthu vd. (1986) tarafından azot molekülü için gelen elektron için 200, 500, 1000 ve 2000 eV gelen elektron enerjilerinde DDCS ölçümleri almışlardır.

Tüm görelî ölçümler mutlak DCS ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. DDCS verileri anlamlı farklılar ortaya koymuş ve DDCS ölçümlerinde kopan elektronun saçılma açısının fonksiyonu olan Legendre genişleme fonksiyonuna uyumluluğu kontrol

edilmiştir. Şekil 2.4'te 500 eV enerjideki DDCS ölçümleri verilmiştir.



Şekil 2.4 Azot molekülü için 500 eV gelen elektron enerjisinde ve a,b,c sırasıyla 2,4,10 eV enerjilerde kopan elektronlar için DDCS ölçüm sonuçları. Yuvarlak şekiller Goruganthu vd. (1986) ve üçgenler DuBois ve Rudd (1977) tarafından alınan ölçüm sonuçlarını, x ile verilen ölçüm sonuçları OBP, sürekli çizgi ise ölçümlere uygun olan Legendre polinom fonksiyonudur.

2.4 Azot Molekülünde Üçlü Diferansiyel Tesir Kesiti (TDCS) Ölçümleri

Üçlü diferansiyel tesir kesiti (TDCS), atom veya molekülün iyonlaşma süreciyle ilgili çok daha fazla detaylı bilgiler içermektedir. TDCS ölçümünde saçılan ve koparılan elektronlar eş zamanlı olarak dedekte edilmektedir. TDCS ölçümü sonucunda çarpışma öncesi ve sonrasındaki tüm elektronların enerji ve saçılma açıları belirlendiğinden iyonlaşma dinamikleri tam olarak ölçülebilmektedir. Teorik olarak polarize olmamış elektronlar için TDCS;

$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_s d\Omega_i dE} = \frac{\mathbf{k}_s \mathbf{k}_i}{\mathbf{k}_o} \left[\frac{1}{4} |f + g|^2 + \frac{3}{4} |f - g|^2 \right] \quad (2.8)$$

denklemleri ile verilmektedir (Joachain and Piraux, 1986). Burada $d\Omega_s, d\Omega_i$, saçılan ve koparılan elektronların katı açılarını $\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i$ ve \mathbf{k}_o ise sırasıyla saçılan, koparılan ve gelen elektronların momentumlarını göstermektedir. f ve g ise direkt ve değişim -tokuş saçılma genliklerini ifade etmektedir.

Saçılan θ_s , kopan elektron θ_i açısı ile çarpışma bölgesinden ayrılmaktadır. İki elektron da farklı açılardaki enerji analizörleri ile dedekte edilmektedir. Elektronlar arasındaki açısal ilişki analizörlerin farklı konumlarda yerleştirilmesi ile belirlenir. Böylece elektronların enerji ve momentumları belirlenmiş olur.

Elektronların momentumları arasındaki ilişki;

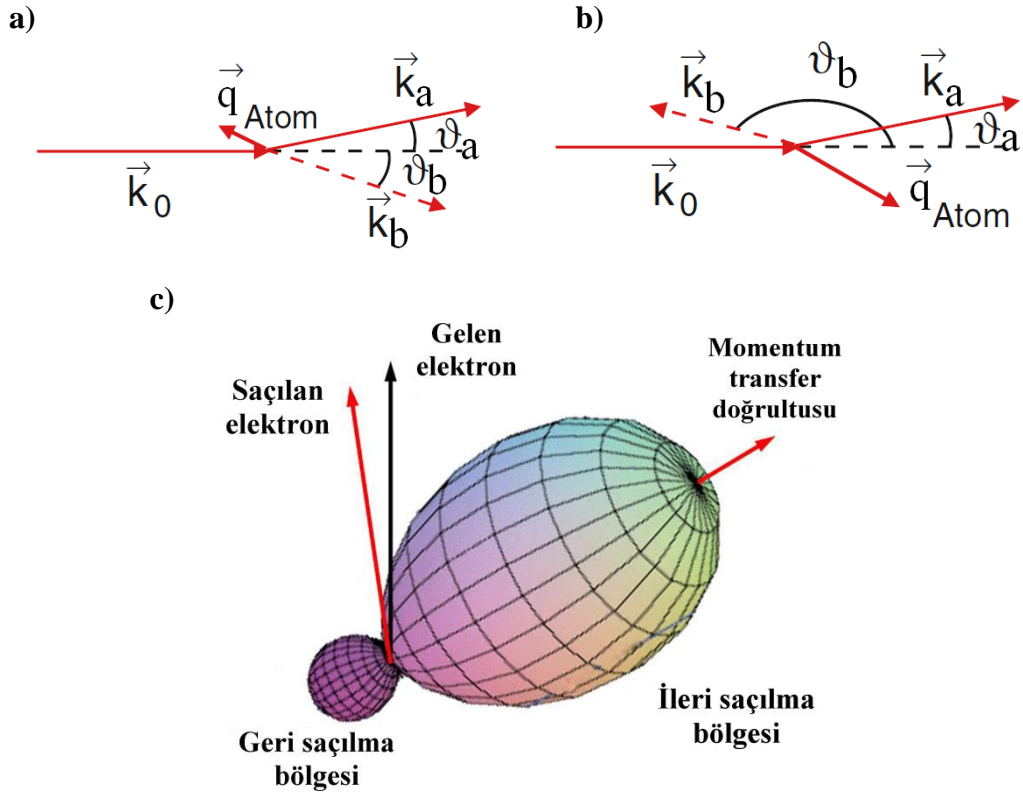
$$\mathbf{k}_o = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i + \mathbf{q} \quad (2.9)$$

ile verilmektedir. Buradaki \mathbf{q} geri tepme momentumudur. Gelen elektronun hedef atom/moleküle aktardığı momentum ise;

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_o - \mathbf{k}_s \quad (2.10)$$

şeklinde verilmektedir.

Eğer gelen elektronla atoma bağlı bulunan elektron arasındaki çarpışma ve sonuçta çekirdekten saçılma göz önüne alınmazsa elektronlar arası ikili çarpışma olarak düşünülmektedir. Bu durumda Şekil 2.5 ile gösterildiği gibi koparılan elektronun momentum transfer doğrultusunda bulunma olasılığı yüksektir. Momentum transfer doğrultusunda ölçülen bu pike “ileri saçılma piki” adı verilir. İkinci bir durum ise atomdan kopan elektronun çekirdekten ikinci bir çarpışma ile geriye saçılmasıdır. Bu durumda momentum transferinin tersi doğrultusunda bir pik gözlemlenir ve bu pik geri saçılma (recoil) piki olarak isimlendirilir. Piklerin momentum transfer doğrultusundan kaymaları, çarpışma sonrası çıkan elektronlar arası Coulomb etkileşmelerinden kaynaklanmaktadır (Lahmam-Bennani 1991).



Şekil 2.5 Gelen, saçılan ve kopan elektronlara ait momentum vektörlerinin gösterimi. Gelen ve saçılan elektronların enerji ve momentumlarının sabit olması durumunda kopan elektron momentum transfer vektörü doğrultusu ve tersi yönünde bir açısal dağılıma sahip olacaktır. a) momentum transfer doğrultusu boyunca olan ileri saçılma olayı, b) momentum transferinin tersi boyunca gerçekleşen geri saçılma (recoil) olayı c) her iki pikinde 3D olarak şematik gösterimi.

Literatürde azot molekülü için; Gao vd. (2005) düşük enerjili elektron etkisi ile azot molekülünün iyonlaşmasında girişim etkilerini teorik olarak incelemişlerdir. Young'ın çift yarıktaki girişim etkisi için düşük enerjili elektron (75,6 eV) etkisi ile N_2 molekülünün iyonlaşması için DWIA yaklaşımı ile simetrik ve antisimetrik düzlemde saçılma olayı için araştırılmıştır.

Son yıllarda birçok teorik ve deneysel (e, 2e) çalışmaları, molekül hedefler üzerinde yapılmıştır. Ancak çoğu çalışma yüksek enerjili elektron çarpışmaları ya da küçük moleküllerin elektron etkisi ile iyonlaşması üzerine yapılmıştır. Yüksek enerjilerde (tüm koparılan elektronlar düzlem dalga olarak ifade edilmektedir) koparılan elektronun momentumu uzay dalga fonksiyonu ile orantılıdır. Bu nedenle tesir kesiti ölçümü

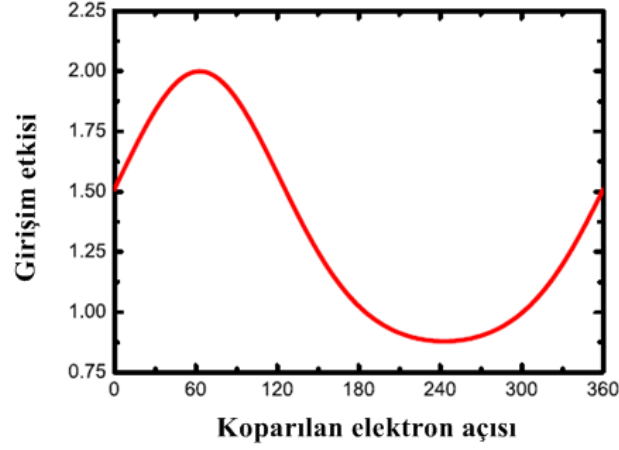
hareketli elektronun dalga fonksiyonunun doğrudan bir ölçüsüdür. Bu yüksek enerjideki verileri yorumlamak için kullanılan başarılı yaklaşım PWIA (plane-wave impulse approximation) yaklaşımıdır (Mc Carthy 2005). Bu tür yaklaşımlar ve varsayımlar kullanılmasının sebebi azot molekülünün örneğin hidrojen molekülüne göre daha kompleks yapıda olması ve daha çok elektrona sahip olmasındandır.

Bir diğer önemli çalışmada Hargreaves vd. (2009) tarafından yapılmıştır. Çalışmanın konusu Azot molekülünün iyonlaşmasında çift merkezli girişim etkisinin (e,2e) çakışma tekniği ile ölçülmesidir. Hedef atom olarak hidrojen ve Azot molekülü kullanılmıştır. Öncelikle N₂ molekülünün TDCS'si ölçülmüş ve aynı kinematiklerde azot atomu için yapılan teorik TDCS sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu ölçümler için belirlenen kinematikler Milne-Brownlie vd. (2006) tarafından yüksek asimetric kinematiklerde almış oldukları ölçümlere benzerdir. İkinci yaklaşımda ise simetrik enerji-paylaşımında Gao vd. (2005) tarafından beklenen salınım etkilerine kanıt göstermek üzere gerçekleştirilen TDCS ölçümleridir.

Ayrıca N₂ için geliştirilen TDCS teorik hesaplamaları da M3DW (Molecular 3-body distorted wave) yaklaşımı her iki kinematik durumu içinde sunulmuştur. Deneysel ve teorik TDCS sonuçları karşılaştırılmış ve birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir (Milne-Brownlie *et al.* 2006). M3DW yaklaşımında TDCS aşağıdaki şekilde verilir.

$$\frac{d^5\sigma}{d\Omega_a d\Omega_b d\Omega_E} = \frac{1}{(2\pi)^5} \frac{k_a k_b}{k_i} (|T_{dir}|^2 + |T_{exc}|^2 + |T_{dir} - T_{exc}|^2) \quad (2.13)$$

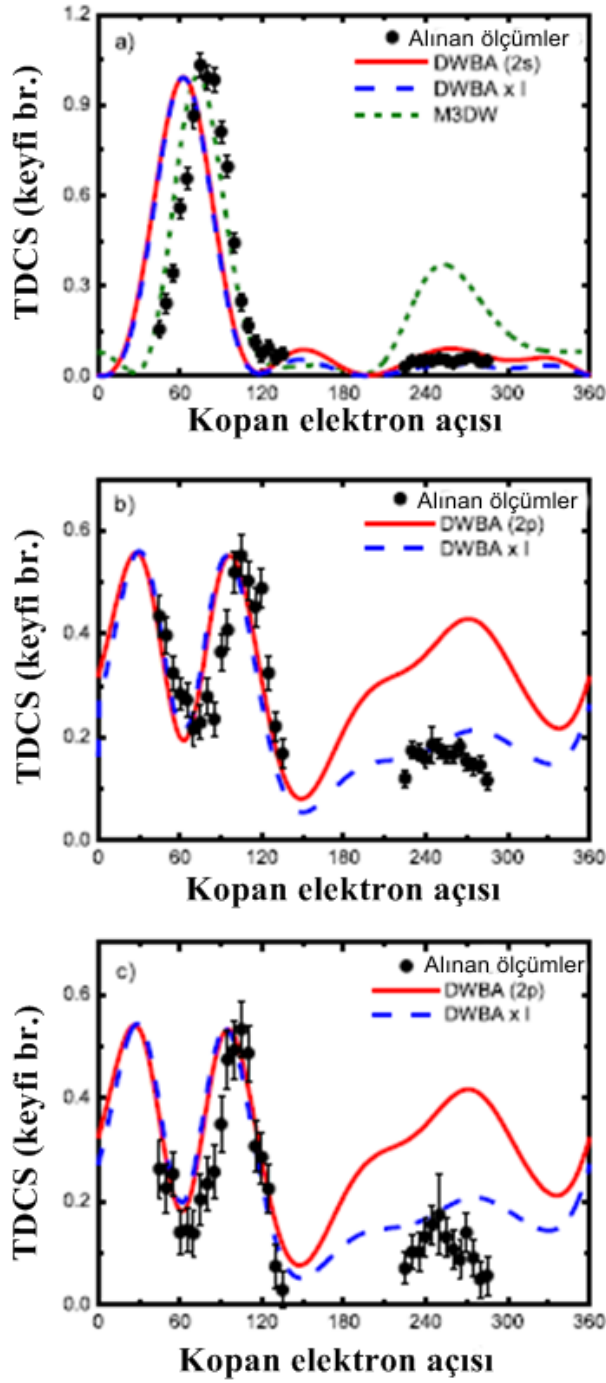
Buradaki k_i ilk durum dalga vektörü, k_a ve k_b ise sırası ile saçılan ve koparılan elektronların dalga vektörünü göstermektedir. İçerisinde T bulunan ifadeler ise doğrudan-direkt ve geçiş genliğini temsil etmektedir. M3DW yaklaşımı kullanılarak elde edilen girişim etkisi grafiği Şekil 2.6'da verilmiştir. Kopan elektronun açısının 60⁰ olduğu bölgelerde girişim etkisi en yüksek olurken, 240⁰ olduğu bölgelerde bu etkinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.6 $E_0=150$ eV için $E_s=124,4$ eV ve $E_e=10$ eV için koparılan elektron açısına bağlı olarak girişim faktörünün değişim grafiği.

Asimetrik geometride alınan ölçümlerde, TDCS sonuçlarında iki keskin bölge gözlenir. 0-180 derece koparılan elektron açısı arasında, gelen elektronun bağlı elektronla ikili etkileşmesini belirleyen binary bölge ve 180-360 derece arasında hedef çekirdekle koparılan elektronun elastik çarpışması sonucu etkileşmelerden oluşan ikinci saçılma, recoil bölgeyi oluşturmaktadır. TDCS sonuçlarında, girişim olayının belirlenmesinde recoil ve binary piklerin oranı oldukça önemlidir. Burada, Milne-Brownlie vd. (2006) ve Casagrande vd. (2008) tarafından ortaya konan yaklaşımları kullanılmıştır.

TDCS ölçümleri N_2 molekülünün dıştaki üç orbitali için gerçekleştirilmiştir (Hargreaves *et al.* 2009). Gelen elektron enerjisi 150 eV ve koparılan elektron enerjisi 10 eV iken her orbital için ayrı ayrı ölçüm alınmıştır. Binary bölgede pikin maksimum değerine normalize edilerek datalar karşılaştırılmıştır. Atomik TDCS DWBA kullanılarak hesaplanmıştır. Deney verileri ve teorik hesaplamaların bulunduğu TDCS sonuçları Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 Alınan ölçümler, DWBAxI ve DWBA yaklaşımlarının karşılaştırıldığı TDCS ölçümleri (Hargreaves *et al.* 2009).

Azot molekülünün elektron etkisi ile iyonlaşması üzerine gerçekleştirilen önemli çalışmalardan birisi de Toth ve Nagy (2011) tarafından yapılmıştır. Azot molekülünün dış orbitalleri olan $3\sigma_g$, $1\pi_u$, $2\sigma_u$ için kendi ürettikleri modelden yararlanarak recoil ve binary pik oranlarını hesaplamışlardır. Bu modelle alınan sonuçlar binary bölgeyi iyi tanımlarken, recoil bölgede yeterince iyi sonuçlar vermemektedir.

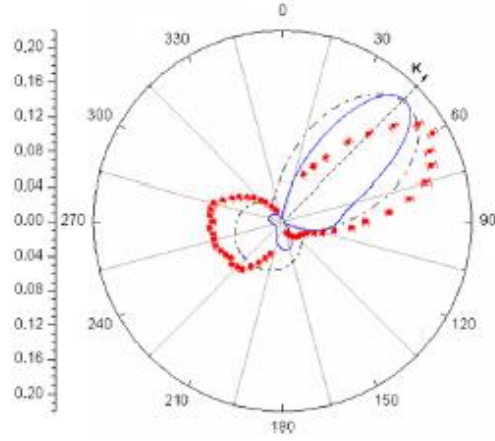
Azot molekülünün yapısının karmaşıklığı sebebiyle diğer basit atom ve moleküller için kullanılan yaklaşımlar yeterli olmamaktadır. DWBA yaklaşımına göre TDCS aşağıdaki gibi verilir:

$$\frac{d^3\sigma}{d\hat{k}_f d\hat{k}_e dE_e} = 2(2\pi)^4 \frac{k_f k_e}{k_i} |t|^2 \quad (2.17)$$

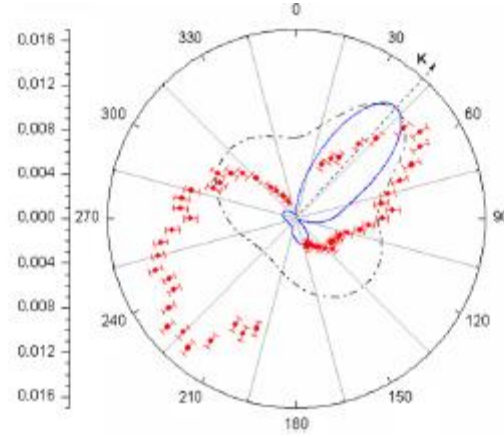
Buradaki k_f , k_e ve $k_i=|k_i|$ sırasıyla saçılan, kopan ve gelen elektronların dalga vektörleridir. E_e kopan elektron enerjisi, t ise geçiş matris elemanıdır. 2 katsayısı ise azot molekülündeki dolu son orbitaldeki iki elektronu temsil eder.

Azot molekülü için yapılan (e, 2e) çakışma deneyleri literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Azot molekülü için yapılan deneysel çalışmalar arasında Naja vd. (2007) yaptığı büyük enerji transferlerinde azot molekülü için çakışma (e, 2e) deneyi de yer almaktadır. Bu grup düzlemsel olmayan asimetric geometrilerde 600 eV gelen elektron enerjilerinde azot molekülü için elektron etkisiyle TDCS ölçümleri almışlardır.

Azot molekülü üzerinde bir diğer deneysel çalışma ise Jung vd. (1975) tarafından yapılmıştır. Azot molekülü için 100 eV gelen elektron enerjisinde ve hidrojen molekülü içinde 250 eV gelen elektron enerjilerinde TDCS hesaplamaları yapılmıştır. Toplamda çeşitli ikincil enerjilerde ve birincil saçılma açılarında 18 durum gözlemlenmiştir. Şekil 2.8 ve 2.9'da azot molekülü için değişik enerji ve açısal dağılımlarda alınan binary-recoil pik oranları gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Azot molekülünde $E_0=589$ eV gelen elektron enerjisinde $3\sigma_g$, $1\pi_u$ ve $2\sigma_u$ orbitalleri için alınan TDCS grafiği. Saçılan elektron enerjisi $E_a=500$ eV açısı $\theta_a=-6^\circ$, koparılan enerjisi ise $E_b=74$ eV'tur. Ok, momentum transfer doğrultusunu göstermektedir ($\theta_K=49$). (Naja *et al.* 2007).



Şekil 2.9 Şekil 2.8'deki grafik gibi fakat bu grafikte alınan ölçümler azot molekülünün iç $2\sigma_g$ orbitali içindir. Farklı olarak $E_0=612$ eV ve $\theta_K=43$ 'tür (Naja *et al.* 2007).

Azot molekülünün iyonlaşması konusunda yapılmış başka bir çalışma ise Lahman-Bennani (2009) tarafından yapılmıştır. Sadece azot molekülü değil çalışmada karbondioksit içinde ölçümler yapılmıştır. TDCS ölçümleri aynı düzlemlili asimetrik geometrilerde 500-700 eV gelen elektron enerjilerinde alınmıştır. Azot molekülü için $2\sigma_g$ ve karbondioksit için $1\pi_g$ iç orbitallerinden elektron koparılması yoluyla gerçekleştirilen iyonlaşma olayı için geniş açılarda ve büyük momentumlarda recoil ve binary bölgede TDCS ölçümler vardır. Alınan veriler FBA-TCC yaklaşımı ile karşılaştırılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

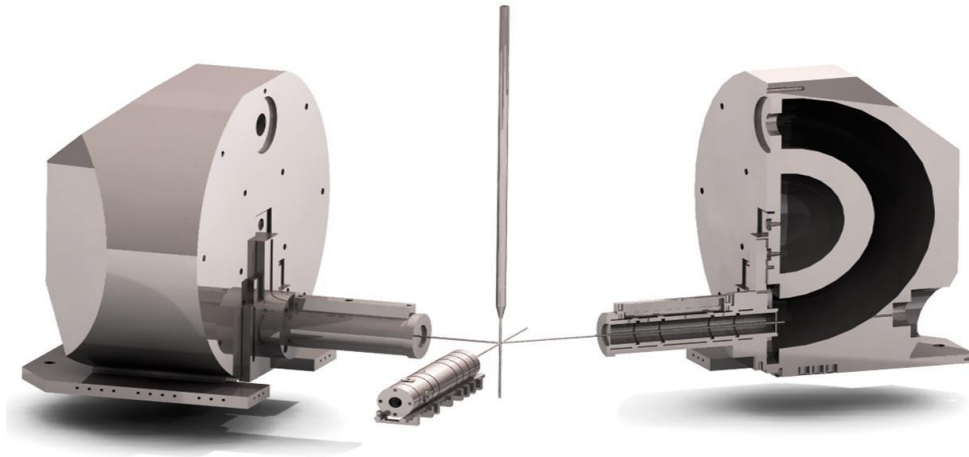
Elektron çarpışmasıyla atom/molekül iyonlaşması deneylerinde kullanılan elektron-elektron ($e, 2e$) çakışma deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 3.1 ile verilmiştir.

Çarpışma deneyleri, iyi odaklanmış bir elektron demetinin hedef gaz ile dik olacak şekilde (cross beam type) çarpıştırılması sonucu açığa çıkan elektronların enerji ve açılarına göre eş zamanlı olarak dedekte edilmesi, elde edilen sinyallerin işlenip bilgisayar ortamında analiz edilmesi ile gerçekleştirilir. Elektron üretimi için tungsten hairpin filament kullanılmıştır. Elektron tabancasından çıkan elektronlar, tabancanın tam karşısına yerleştirilen Faraday elektron toplayıcı (FET) ile toplanırlar. FET üzerindeki elektron demetinin çapı ve odaklanma kalitesi belirlenmekte, ayrıca oluşan ikincil elektronlar topraklama yoluyla vakum odasından uzaklaştırılmaktadır.

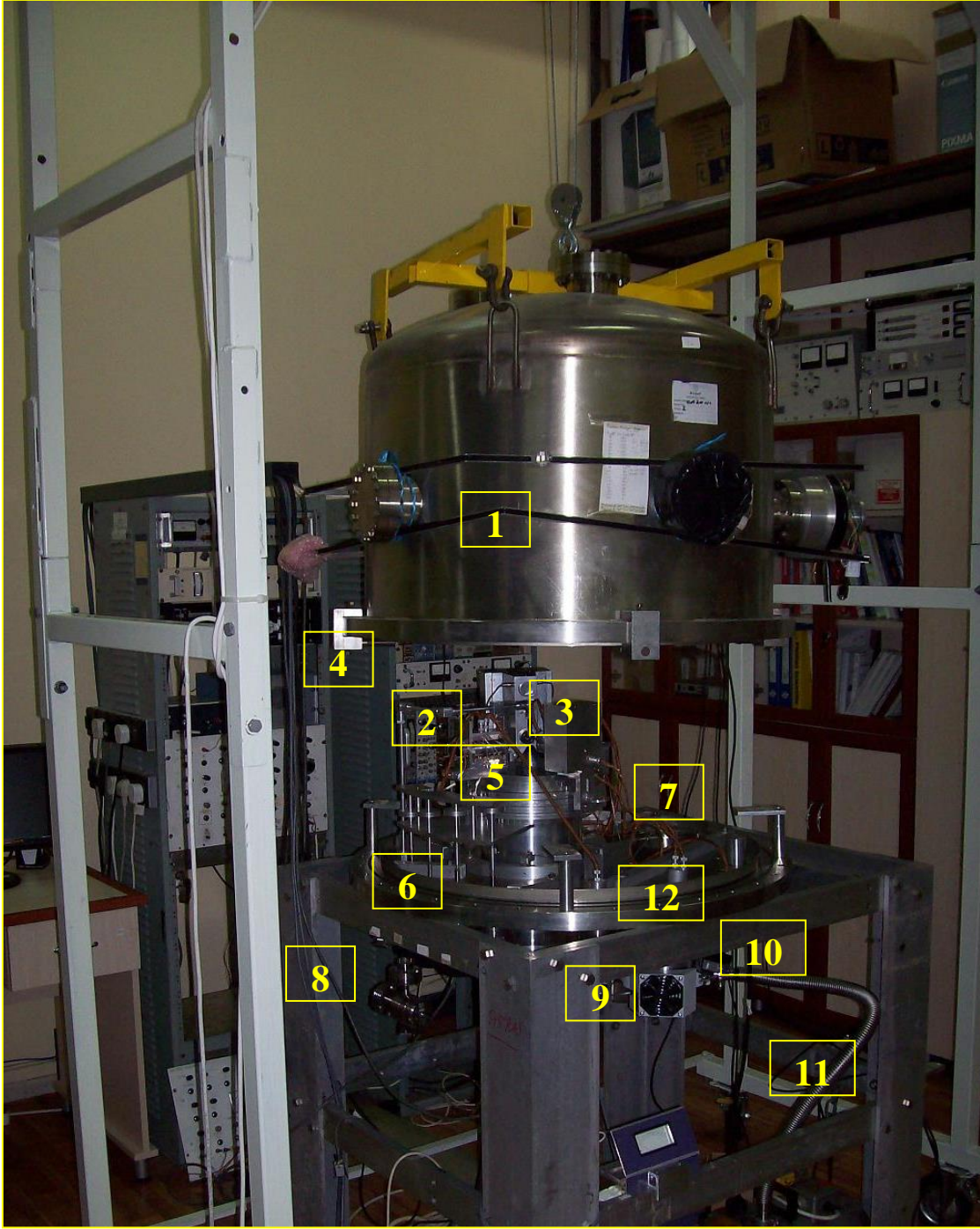
Çarpışma deneylerinin gerçekleşmesi için gerekli olan akım 1-10 μA civarındadır. Hedef gaz elektron tabancasından 50 mm uzaklıkta çarpışma bölgesine elektron demetine dik doğrultuda gönderilmektedir. Elektron enerji analizörleri belirlenen enerjiye sahip elektronları enerjilerine göre ayırt etmektedir. Analizörler; beş elemandan oluşan giriş optiği, elektronların girişine odaklandığı yarıküresel elektrotlar ve elektron çoğaltıcı (CEM- channel electron multiplier) olarak adlandırılan dedektörlerden oluşmaktadır. Çarpışma deneylerinin gerçekleştirilmesi için vakum odasına ihtiyaç duyulmaktadır. Elektron tabancası, iki enerji analizörü, FET, birbirinden bağımsız döner tablalar üzerine seviye ayarları yapılarak yerleştirilmişlerdir. Döner tablalar vakum odası dışından kontrol edilebilmektedir. İki analizörden bir tanesi saçılan diğeri ise koparılan elektronları dedekte etmek için kullanılmaktadır.

Spektrometre parçaları manyetik özelliği olmayan malzemelerden yapılmış vakum çemberi içine yerleştirilmiştir. Vakum odası içindeki çarpışma bölgesi elektrik ve manyetik alandan yalıtılmakta ve ayrıca sistem içerisindeki tüm parçalar topraklanmaktadır. Şekil 3.2'de spektrometrenin vakum odası içerisine yerleştirilmiş hali gösterilmiştir. Manyetik alan etkilerini azaltmak için mü-metal kılıf ve Helmholtz bobinler kullanılmaktadır.

Spektrometre parçalarına voltaj uygulamak ve ayarlarını yapmak için elektronik kontrol üniteleri kullanılmaktadır. Bu kontrol üniteleri, elektron demeti üretiminde, çarpışma sonrası ortaya çıkan elektronların dedektöre yönlendirilmesinde, sinyal işleme ve veri analizinde kullanılan elemanları içermektedir.



Şekil 3.1 Elektron spektrometresinin yerleştirildiği, yüksek vakum ortamının oluşturulduğu vakum odası, iki aşamalı pompa sistemi ile spektrometre aygıtlarının voltaj ve akım gereksinimlerinin sağlandığı kontrol üniteleri ve deneysel ölçümlerin görüntülediği ve kaydedildiği bilgisayar sistemi ve vakum çemberinin iç kısmında gerçekleşen çarpışma olayının 3 boyutlu çizimi.



Şekil 3.2 Deney düzeneği. Vakum odası (1), elektron tabancası (2), elektron enerji analizörleri (3), gaz demeti hattı (4), döner tablalar (5), hareket flançlar (6), büyük bağlantı flancı (7), gaz valfi (8),TMP (9), ara bağlantı (10), mekanik pompa (11).

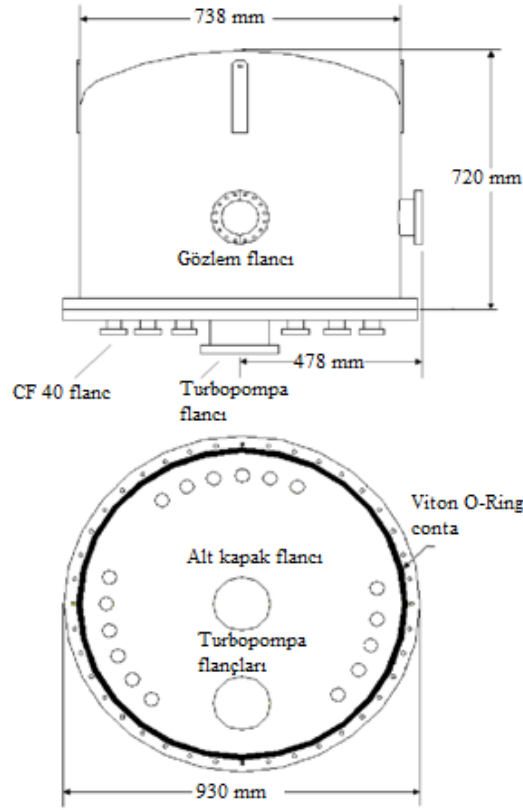
3.1 Deney Düzeneği Parçaları

Bu çalışmada kullanılan deney düzeneğinin parçaları alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

3.1.1 Vakum Sistemi

Vakum odasının çizimi şekil 3.3 ile gösterilmektedir. Vakum odası 670 mm yüksekliğe ve 840 mm çapa sahip silindirik bir geometride üretilmiştir. Paslanmaz çelikten yapılmış çemberin üzerinde dışarıdan aygıtların açılal konumlarını görmemizi sağlayan iki adet gözlem penceresi vardır.

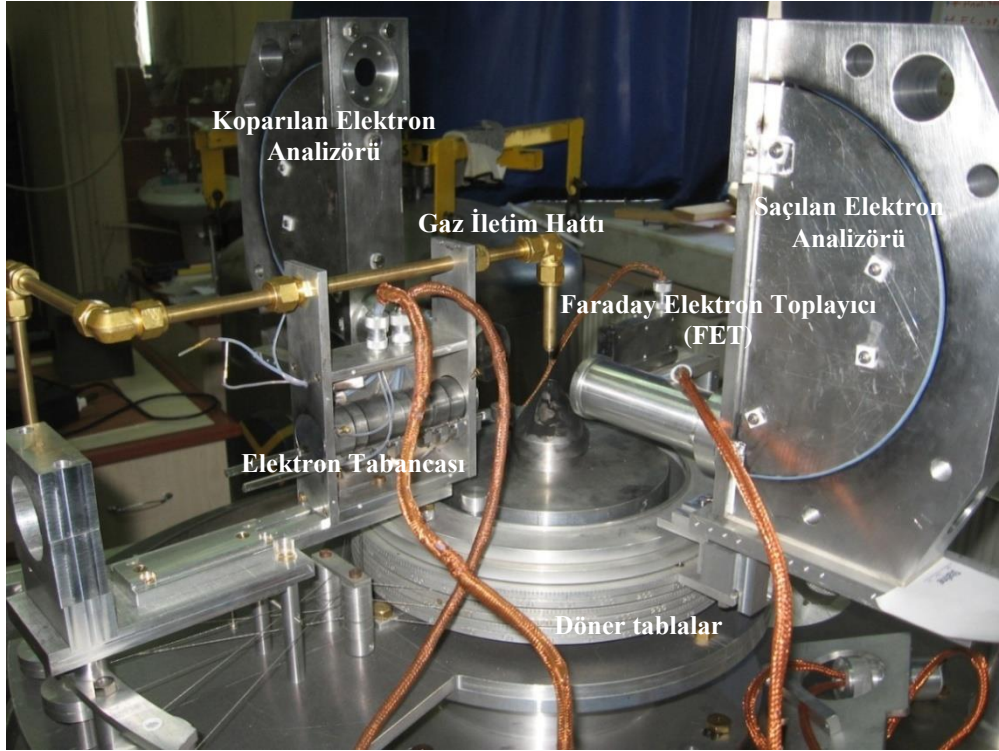
Turbomoleküler pompa (Pfeiffer TMU521) mekanik pompayla (Pfeiffer DUO20) birlikte alt tablada bulunan CF-160 flanşının birine monte edilmiştir. Turbo moleküler pompanın boşaltma hızı, hava için saniyede 520 litre ve mekanik pompanın hızı 6 litredir. Vakum odasına çalışılacak gaz verilmeden önceki arka plan basıncı yaklaşık $\sim 8 \times 10^{-8}$ mbar olarak ölçülmüştür. İçeriye hedef gazın verilmesiyle birlikte çalışma basıncı $\sim 4 \times 10^{-6}$ mbar değerine kadar yükselmektedir.



Şekil 3.3 Elektron çarpışma spektrometresinin yerleştirildiği vakum odacığının yandan ve alttan şematik gösterimi.

3.1.2 Hedef Gaz Kaynağı

Hedef gaz, etkileşme bölgesine 90 derecelik bir açıyla bakır bir boru vasıtasıyla taşınmaktadır. Hedef gazın çıkışı ile etkileşme bölgesi arasındaki mesafe ~2 mm olarak ayarlanmıştır. % 99,99 saflıkla alınan azot gaz tüpü 5 barın altında bir çıkışla bu gaz valfinin giriş ucuna yine bakır borularla bağlanmıştır. Şekil 3.4 ile hedef gaz girişinin sistemdeki ve diğer parçalarla olan konumu gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Spektrometreyi oluşturan parçaların ve gaz iletim hattının vakum sistemi içerisindeki görünümü

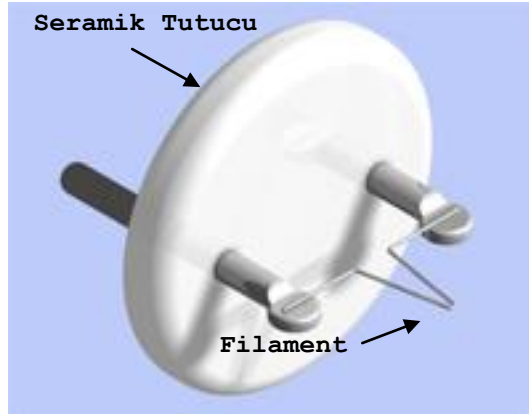
3.1.3 Elektron Tabancası

Çarpışma deneylerinde ideal elektron demeti elde etmek ve elde edilen demeti hızlandırarak hedef gaz atomu ile etkileşime girmesini sağlamak için elektron tabancası kullanılmaktadır.

Deneysel olarak kullanılmak üzere, katot bölgesinden başlayarak yedi elemanlı bir elektron tabancasının deflektör sistemiyle birlikte simülasyonu ve tasarımı yapılmıştır. Kullanılan elektron tabancası üç kısımdan oluşmaktadır.

Bunlar, elektron üretimini gerçekleştiren filament (katot) bölgesi, demetin odaklanma ve yönlendirilmesini sağlayan elektrostatik lens sistemi ve demetin açısal dağılımını belirleyen aperture disklerdir. Ayrıca demetin eksensel olarak kaymasını engellemek için x ve y yönlerinde deflektörler kullanılmaktadır.

Elektron üretimi, Şekil 3.5'te gösterilen Tungsten hairpin filament ile sağlanmaktadır. Filamentin tel kalınlığı 100 µm'dir ve rezistif olarak ısıtılarak termiyonik emisyon gerçekleştirmektedir.



Şekil 3.5 Hairpin tipi filament.

Yerleşim olarak filament Şekil 3.6'da gösterildiği gibi bir Wehnelt silindirin içine ve bir anot elektrotu ile arasında belirli bir mesafe kalacak şekilde yerleştirilir. Kullanılan filament yaklaşık olarak 2.2 A akımda 2400 K sıcaklığına ulaşır.

Yayımlanan elektronların enerji dağılımı ise Maxwell-Boltzman dağılımı ile verilir:

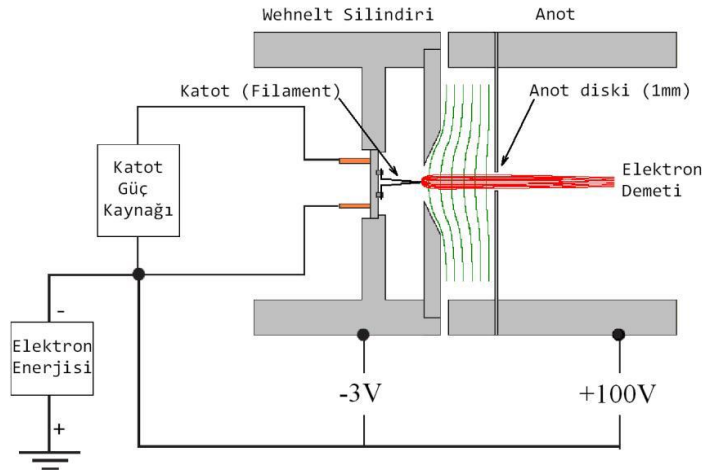
$$g(E) \propto \exp\left[\frac{-(E - \phi)}{kT}\right] \quad (3.1)$$

Burada $g(E)$, saniyede üretilen E enerjisine sahip elektronların sayısı, k Boltzmann sabiti, T sıcaklık ve ϕ malzemenin iş fonksiyonudur. Elektron kaynağının enerji çözünürlüğü sıcaklığa bağlıdır ve

$$\Delta E_{1/2}(FWHM) \approx 2.54kT \quad (eV) \quad (3.2)$$

ifadesi ile verilir.

Buradan, örneğin, 2400 K sıcaklığında yayımlanan elektronların enerji dağılımındaki yarı yükseklikteki tam genişlikteki (FWHM) çözünürlük $\Delta E_{1/2}=0.6$ eV olarak hesaplanmıştır. Farklı katot yüzeyleri kullanılarak $\Delta E_{1/2}$ enerji dağılımının azaltılması mümkündür. Katotta üretilen elektronlar anoda doğru hızlandırılırken Wehnelt elektrotu yardımıyla anot diskine doğru odaklanırlar. Farklı şekillerde katot bölgesinin tasarımı ve optimizasyonu Klemperer ve Barnett (1971) ve Boesten ve Okada (2000) tarafından incelenmiştir. Bu konuda ilk makale Pierce (1954) tarafından sunulmuştur. Pierce (1954) katodun önünde bulunan bu Wehnelt elektrotunun konkav bir yapıda ve $67,5^\circ$ açıyla kullanılması halinde elektron demetinin daha iyi odaklandığını göstermiştir. Şekil 3.6'da elektron demetinin Wehnelt elektrotu yardımıyla anot diskine odaklanması gösterilmiştir. Ayrıca filamentin uç kısmı, Wehnelt elektrotuna göre geride ya da ileride bulunabilir. Benzer şekilde Wehnelt elektrodunun potansiyeli pozitif veya negatif değerlerde tutulabilmektedir.



Şekil 3.6 Wehnelt elektrotu ve anottan oluşan üçlü sistemde elektron salınımı ve odaklanmasının gösterimi.

Boesten ve Okada (2000) aynı zamanda katot bölgesi civarında uzay yük etkisini de incelemişlerdir. Bu etki, üretilen elektron demetinin akımını sınırlamaktadır. Uzay yükü, yüklü parçacıkların birbirlerini karşılıklı olarak itmesinden kaynaklanır ve akım yoğunluğunun artmasıyla artar. Demete dik bir doğrultu boyunca etkili olan itme kuvvetleri, elektron demetinin eksensel olarak genişlemesine neden olur. Bu da akımı düşürür ve demet çapını artırır. Uzay yükü de göz önüne alındığında akım yoğunluğu Langmuir-Child yasası ile verilir (Langmuir 1915):

$$J = 2,33 \times 10^{-6} \left(\frac{V_a^{3/2}}{d^2} \right) \quad (3.3)$$

Burada V_a anot voltajı ve d anot ve katot arasındaki mesafedir. Anot diskinden (r_a) geçen maksimum akım,

$$I_{\max} = 7,32 \times 10^{-6} \left(\frac{r_a}{d} \right)^2 V_a^{3/2} \quad (3.4)$$

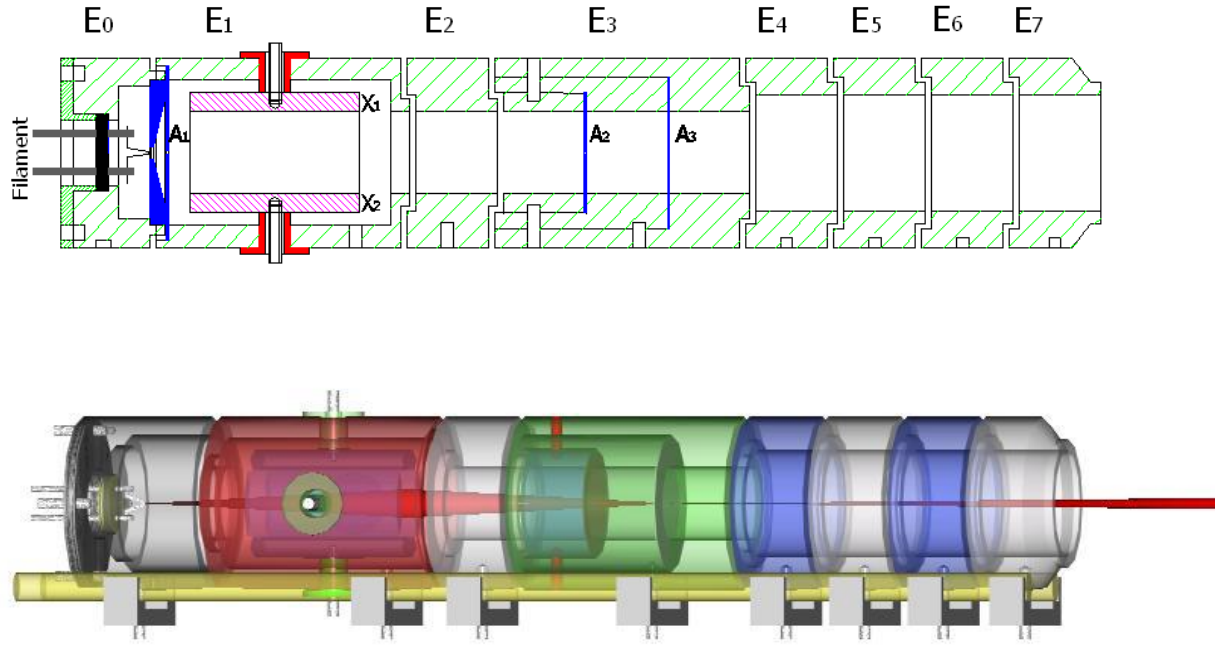
ifadesiyle verilir.

Anot bölgesinden sonraki kısım, elektrostatik lens kısmıdır. Farklı voltajlarda iki veya daha fazla elektrot belli bir uzaklıkta birbirlerine yaklaştırıldığında elektriksel potansiyel konuma göre değişim gösterir ve ışık optiğinde bilinen ince kenarlı mercek şeklinde eşpotansiyel yüzeyler oluşur. İki elektrot arası bu bölgeye elektrostatik lens denir. Parçacık optiğinde değişik geometrilere sahip lens sistemlerini oluşturmak mümkündür.

Yüklü parçacıklar eş potansiyel yüzeylere dik olarak hareket ettiklerinden dolayı, merceklerde ışığın odaklanmasında olduğu gibi elektrostatik lenslerde de yüklü parçacıkların odaklanması sağlanmaktadır.

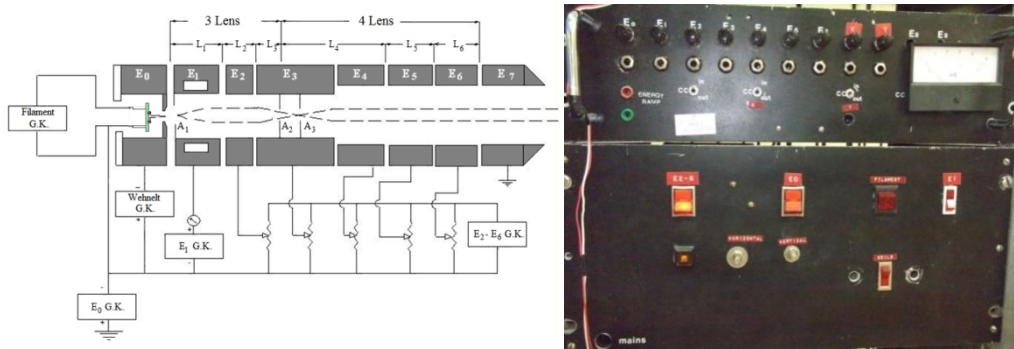
Filamentten çıkan elektronlar önce birinci lens sistemi ile bir delikten (aperture) geçirilir ve ikinci lens sistemi elektron demetini çarpışmanın gerçekleştiği etkileşme bölgesine taşır. Burada kullanılan küçük delikli elektrotlar demetin açısal dağılımını ve demet çapını kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Eleman sayılarının artması yüklü parçacıkların serbestlik derecelerinin artmasına sebep olurken, geniş voltaj aralığında parçacık demetinin odaksız olması sağlanmaktadır.

Deneylede kullanılan elektron tabancasının AutoCAD çizimi Şekil 3.7'de verilmiştir.



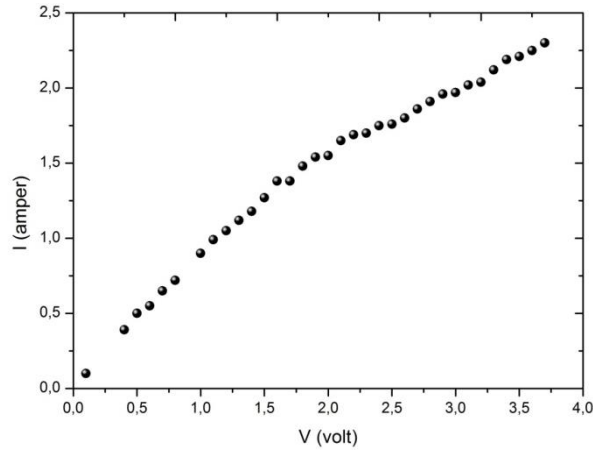
Şekil 3.7 Elektron tabancasının AutoCAD programında teknik çizim resmi (Ulu *et al.* 2007).

Kullanılan elektron tabancası; 40-350 eV enerji aralığında ve 1-3 mm çapında paralel elektron demeti ve deneysel olarak çarpışma bölgesinde 2-6 μ A değerinde aylarca sabit kalabilen akım üretebilmektedir. Elektron tabancasındaki lens elemanlarını elektrik bağlantısı ve voltajların kontrol edildiği kontrol üniteleri Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Elektron tabancasında kullanılan lens elemanları için elektrik ve güç kaynağı (G.K.) bağlantıları ve elektron tabancasının kontrol panelleri.

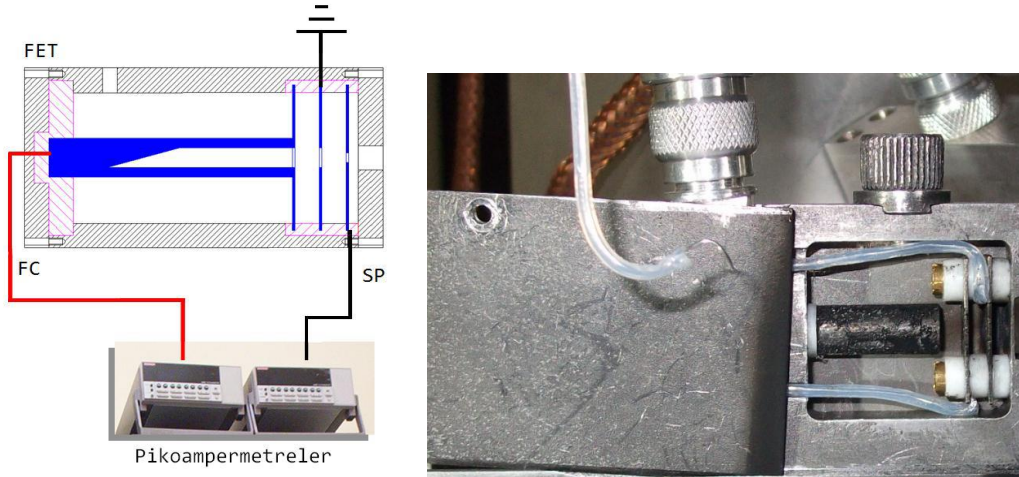
Filamentten emisyon ile oluşan elektronlar, elektron tabancası yardımı ile çarpışma bölgesine taşınır. Bu nedenle elektron tabancasının ve diğer tüm parçaların aynı seviyede olması gerekir. Şekil 3.9’da filamentin akım voltaj grafiği görülmektedir.



Şekil 3.9 Filament voltajına göre telden geçen akımın değişimi.

3.1.4 Faraday Elektron Toplayıcısı (FET)

FET üretilen elektron demetinin çarpışmaya uygun olup olmadığını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Demetin çapı ve akımı FET ile ölçülmektedir. Ayrıca hedef gaz ile çarpışmadan FET içerisinde toplanan elektronlar, elektrotlar vasıtasıyla spektrometreden dışarıya taşınmaktadır (Şekil 3.10).



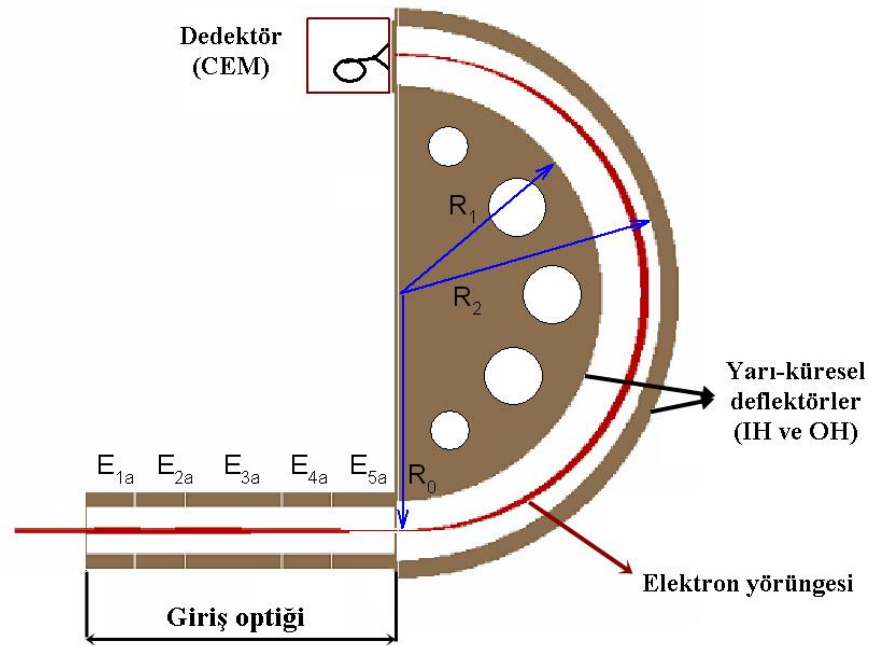
Şekil 3.10 Faraday elektron toplayıcısı.

3.1.5 Yarıküresel Elektron Enerji Analizörleri

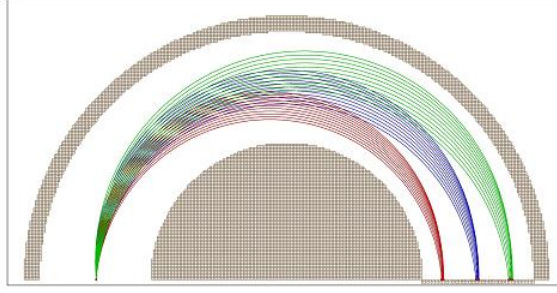
Elektron saçılma deneylerinde etkileşme sonrası elektronların enerji ve açısal dağılımlarının belirlenebilmesi için enerji analizörleri kullanılmaktadır. Bir yarı küresel enerji analizörü üç kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.11).

İlk kısım giriş elektrostatik lens kısmıdır ve etkileşme bölgesinden saçılan elektronların lensin çıkışına odaklanması ve çıkış enerjisinin ayarlanması için kullanılmaktadır. İkinci kısım giriş lensinin çıkışına yerleştirilen iki yarıküresel elektrottan oluşan deflektör kısmıdır. Yarıküresel elektrotlar arasında oluşturulan elektrik alan ile elektronlar deflektörün çıkışına doğru 180^0 döndürülerek odaklanırlar. İç ve dış yarıkürelere uygulanan voltajlar sayesinde sadece istenilen enerjideki elektronların taşınması sağlanır.

Enerjisi istenen enerjiden az veya fazla olan elektronlar yarıkürelere çarparak çıkışa varamazlar. SIMION benzetim programında tasarlanan yarı küresel deflektörde elektronların enerjilerine göre hareketi Şekil 3.12’de görülmektedir. Son kısım ise yarıküresel deflektörün çıkışına yerleştirilen detektör kısmıdır. Burada kullanılan elektron çoğaltıcı detektörler sayesinde dedekte edilen elektronlar çoğaltılarak bir sinyale dönüştürülür. Düzenekte kullanılan her iki analizör de özdeş özelliklere sahiptir.



Şekil 3.11 Elektron enerji analizörünün SIMION programında çizimi.



Şekil 3.12 Farklı enerjili elektronların yarıküresel analizörden geçişi.

Bu çalışmada kullanılan analizör sistemi olarak Doğan (1999) tarafından elektron-elektron çakışma düzeneği için geliştirilen yarı-küresel enerji analizörü kullanılmıştır. Bu sistemde iç ve dış yarı - kürelerin çapları $R_1= 87.5$ mm ve $R_2=112.5$ mm ve elektronların geçeceği orta çap ise $R_0=100$ mm olarak tasarlanmıştır. Analizörün geometrisi, giriş diskinin delik çapı, elektronların analizöre giriş açısı ve E_0 (geçiş) enerjisi analizörün çözünürlüğünü belirleyen faktörlerdir. Analizörün dizaynı, çözünürlüğü maksimum yapacak değerlerin SIMION simülasyon programı kullanılarak elde edilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca giriş lens optiği hem etkileşme bölgesinden gelen elektron demetini odaklamak hem de E elektronların enerjisini E_0 analizör giriş enerjisine düşürmek için kullanılmaktadır. Burada yavaşlatma faktörü devreye girer ve bu da $F=E/E_0$ olarak tanımlanırsa analizör için dispersiyon $D=(1+\xi)R_0/\gamma$ ifadesi kullanılarak yarıküresel analizör sisteminin enerji çözünürlüğü ifadesi,

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta E}{E_0} \frac{E_0}{E} = \left(\frac{\Delta r_{\pi}}{D} + \alpha_0^2 \right) \frac{1}{F} \quad (3.6)$$

şeklindedir. Merkezi giriş durumu için ($\xi = \gamma = 1$) $D=2R_0$ olur. Δr_{π} , giriş ve çıkış disk delik çaplarına (w) eşit alındığında ve analizöre giriş açısının çok küçük olduğu durumda ($\alpha_0^2 \ll 1$ mrad) enerji çözünürlüğü (ΔE),

$$\frac{\Delta E}{E_0} \cong \frac{w}{2R_0} \quad (3.7)$$

haline dönüşür (Imhof *et al.* 1976). Buradan analizörün enerji çözünürlüğünün E_0 ile doğru ve R_0 ile ters orantılı olduğu görülmektedir.

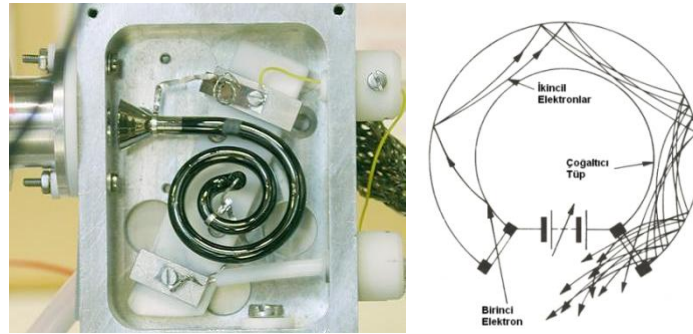
Fakat her iki durum için de deneysel kısıtlamalar vardır. Örneğin analizörün merkez yarıçapının büyütülmesi daha büyük vakum odacığının kullanılmasını gerektirmektedir. E_0 enerjisinin küçültülmesiyle düşük enerjili elektronların dedekte edilmesi zorlaşmaktadır. Bu hem manyetik alan etkilerinden, hem de enerjinin azalmasıyla akım değerinin düşmesinden kaynaklanmaktadır (Dogan *et al.* 2007).

Yarıküresel analizör içerisine farklı açılarda giren elektronlar farklı yörüngeleri izlerler. Yol farkından dolayı analizöre ulaşan elektronlar arasında bir zaman farkı oluşur ve analizörün boyutuna bağlı olarak fark nanosaniye mertebesindedir. Meydana gelen zaman çözünürlüğü ifadesi aşağıdaki şekilde verilir (Imhof *et al.* 1976).

$$\frac{\Delta T_{1/2}}{T_0} = 0.6 \frac{w}{R_0} + 2.23 \left(1 - 2.79 \frac{w}{R_0} \right) \alpha_0 \quad (3.8)$$

Burada $T_0 = \pi R_0 (m/2E_0)^{1/2}$, R_0 merkezi yörüngeyi izleyen E_0 enerjili elektronun analizör içerisindeki uçuş zamanıdır.

Elektron çoğaltıcı olarak CEM (Channel Electron Multiplier) kullanılır. Bu tek kanallı elektron çoğaltıcılarda gelen bir elektron çoğaltıcının yüzeyine çarparak oradan ikincil emisyon yoluyla ikincil elektronları kopararak saçılır. Bu olay çoğaltıcının çıkışına kadar tekrarlanır ve detektörün çıkışında $\sim 10^7$ elektrona ulaştığında sinyal olarak gözlenir. Elektronların hızlandırılması giriş ve çıkış uçları arasında yüksek voltaj (~ 2.5 kV) uygulanarak gerçekleştirilir. Deney düzeneğinde her iki analizörde de Şekil 3.13'de gösterilen CEM tipi dedektör kullanılmıştır.



Şekil 3.13 Tek kanallı elektron çoğaltıcı ve CEM'de elektronların çoğaltılması.

3.1.6 Elektronik Kontrol Üniteleri

Sistem için istenilen elektron demetinin elde edilmesi, demetin istenilen enerjilerde olmasını sağlamak ve sistemin dışarıdan kontrolü için şekil 3.14’de görülen elektronik kontrol ünitesi kullanılmıştır. Potansiyometreler yardımıyla lens elemanlarına uygulanan potansiyeller değiştirilerek elektronların odaklanması sağlanmaktadır.

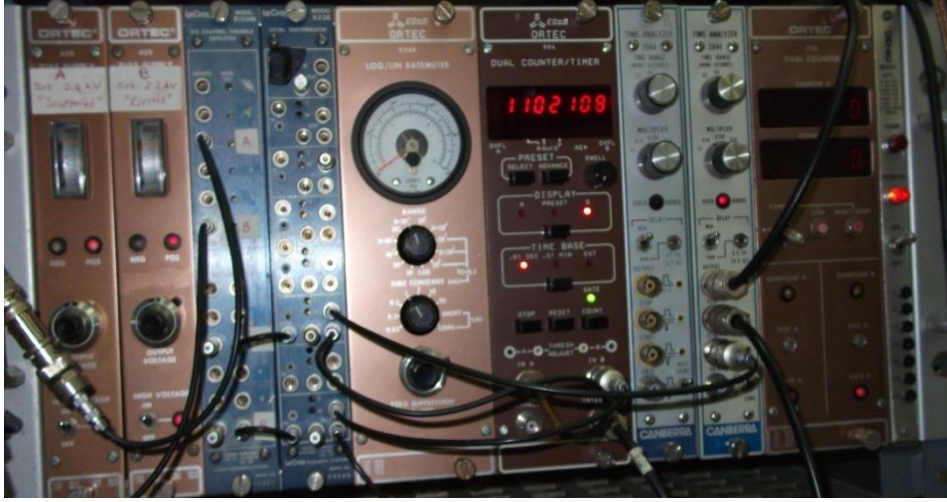
Şekil 3.14’de saçılan ve koparılan elektron analizörlerine ait giriş optik lens voltajlarının ve kinematiklerinin ayarlandığı kontrol ünitesi görülmektedir. Saçılan ve koparılan elektronların, etkileşme bölgesinden lensin çıkışına kadar odaklanması ve çıkış enerjisinin ayarlanması bu kontrol üniteleri ile yapılmaktadır.



Şekil 3.14 Elektron analizörlerinin kontrol üniteleri.

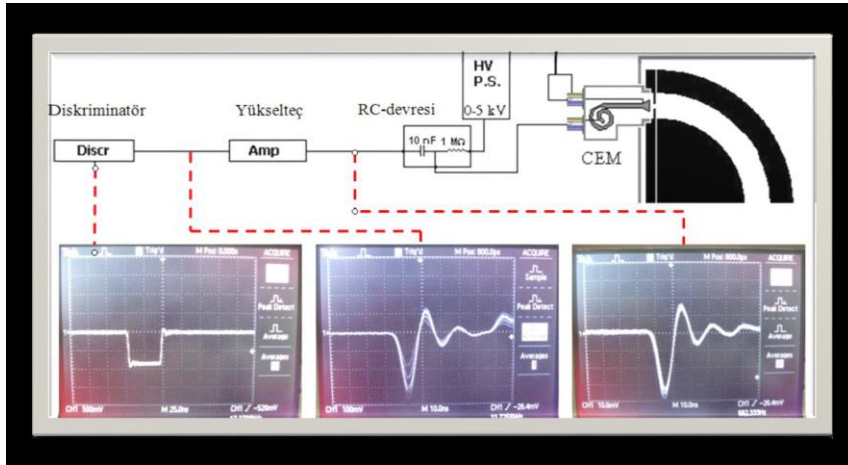
3.1.7 Sinyal İşleme Ünitesi

Deneyde kullanılan Sinyal işleme ünitesi Şekil 3.15’de görülmektedir. Enerji analizörlerinden biri saçılan elektronları, diğeri ise koparılan elektronları detekte etmek için kullanılmaktadır. Çarpışmadan sonra; yavaş olan koparılan elektron detektöre saçılan elektrona göre yaklaşık 10-30 ns sonra varmaktadır (Şekil 3.16).



Şekil 3.15 Detektörden gelen sinyalin bağlandığı NIMBIN sistemi. Soldan itibaren sıra ile Ortec Marka CEM yüksek voltaj güç kaynakları (her iki analizörün CEM voltaj ayarının yapıldığı), LeCroy marka yükselteç, LeCroy marka diskriminatör, sayıcılar, TAC ve MCS bilgisayar bağlantısı.

Çakışma deneylerinde gelen iki sinyal arasındaki zaman farkını daha da artırmak için bu sinyal bir geciktiriciye (delay line) bağlanır. Gelen iki sinyal arasında uygun bir gecikme elde edildiğinde (~100 ns) bu iki sinyal bir zaman-genlik dönüştürücünün (TAC: Time-to-Amplitude Converter) başla ve bitir girişlerine bağlanır. Aynı iyonlaşma olayından açığa çıkan elektronlar hep aynı zaman farkında girişlere geleceği için genlik olarak bir kanalda birikme görülür.



Şekil 3.16 Bir analizör için Sinyal işleme ünitesinin şematik gösterimi.

Yükselteç sinyal işleme aygıtları sistemdeki en önemli bileşenlerden biridir. Yükselteçler, elektron çoğaltıcıdan gelen sinyallerin şiddetini yükseltmek için

tasarlanmış/üretmiş ve kullanılmakta olan aygıtlardır. Yükselteç tasarımlarında önemli parametrelerden birisi de bant (band width) genişliğidir. Bu çalışmada kullanılan yükselteç bant genişliği, 10-350 MHz aralığındadır.

Ayırt etme düzeyi, eşik değeri (threshold control) ayar vidası yardımıyla yapılmaktadır. Belirlenen düzeyden daha küçük olan bütün sinyaller ve gürültü de çıkışa iletilmez. Diskriminatör seviyesinin üstünde kalan sinyaller gürültü olarak algılanmakta, dolayısıyla da sinyal olarak sayılmamaktadır.

Zaman-genlik dönüştürücü (Time-To-Amplitude Converter: TAC), başlatıcı ve durdurucu sinyaller arasındaki zaman aralığını ölçen ve ölçülen zaman ile analog sinyal üreten aygıttır. TAC ile pikosaniye mertebesinde çözünürlük elde etmek mümkündür. Fakat çoğu zaman çözünürlüğünün gerekli olduğu uygulamalarda nanosaniye seviyesi yeterli olmaktadır. TAC, iki giriş arasındaki zaman farkı ile orantılı genlik ile tekbir çıkış sinyali üretmektedir. Sonuç olarak MCA ile zaman spektrumu elde edilmektedir. Spektrumun biçimi başlatıcı ve durdurucu sinyaller arasındaki zaman korelasyonlarına bağlı olmaktadır. Sistemimizde kullanılan ORTEC Dual Counter-Timer iki 8-ondalıklı sayıcıdan ve önceden ayarlanan zaman ölçerden oluşmaktadır. Sürekli zaman okunması gerekli olduğunda B sayıcısı harici olayları kaydederken A sayıcısı zamanı saymak için kullanılmaktadır.

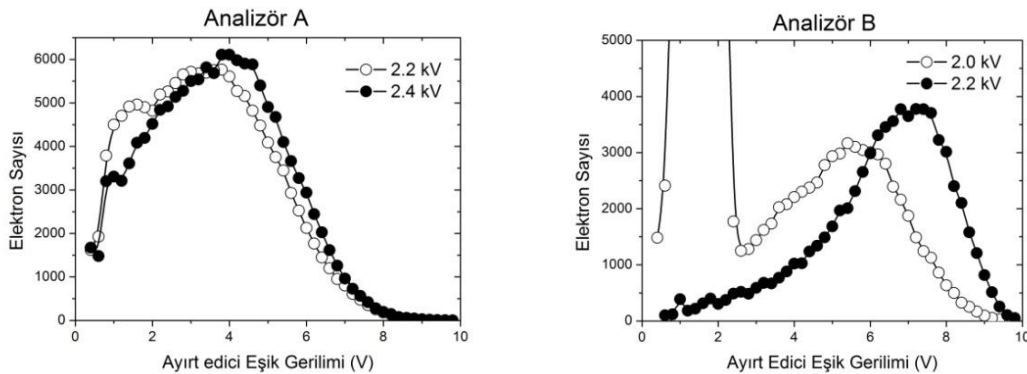
Detektörlerin çalışma voltaj aralığının belirlenmesi için iki analizör içinde bulunan detektörlerin puls yükseklik dağılımı (pulse height distribution- PHD) incelenmiştir. PHD, CEM yüksek voltajının en uygun değerini bulmak için yapılır. CEM'den gelen tüm gerçek sinyallerin ayırdedici seviyesinin üzerinde olduğundan emin olunmasını sağlar. Detektörün yüksek voltaj değeri ve yükselteç kazancı sabit iken ayırt edicinin seviyesi maksimum değerden minimum değere kadar taranır ve her defasında sayıcıdan okunan değer kaydedilir. Ayırt edici seviyesine bağlı olarak sayımdaki değişimin grafiği çizilir. Bu değişim, son beş sayım değerinin hareketli ortalaması alınarak hesaplanır. T_i ve T_j ayırt edicinin ardışık iki eşik seviyesi için sayım sayılarının hareketli ortalaması olmak üzere, sayımın türevi denklem (3.9)'da verilmiştir.

$$\Delta = T_i - T_j = \left(\frac{C_{i-2} + C_{i-1} + C_i + C_{i+1} + C_{i+2}}{5} \right) - \left(\frac{C_{j-2} + C_{j-1} + C_j + C_{j+1} + C_{j+2}}{5} \right) \quad (3.9)$$

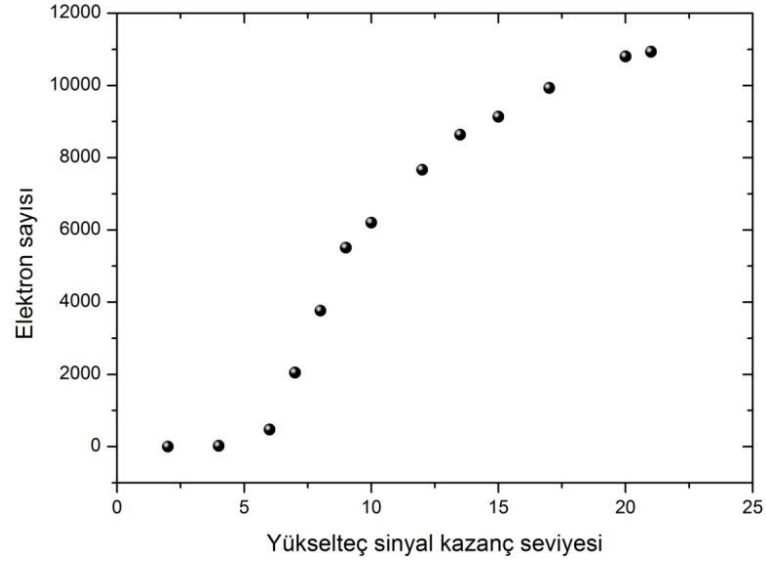
Detektörün çıkışına bir RC devresi konulmuştur. Bu devre gelen elektron akımını bir negatif pulsa çevirmek için kullanılmaktadır. Sinyalin maksimum yüksekliği 40 mV civarındadır. Bu sinyal kazancı ayarlanabilen bir yükseltecin girişine bağlanarak çıkışta 10 kat yükseltilebilmektedir. Gerçek sinyalle birlikte ortamdan gelen elektronik gürültü (background) de aynı oranda yükseltilebilmektedir. Yükseltecin çıkış sinyali bir diskriminatöre (ayırt edici) bağlanarak gerçek sinyalin gürültü sinyalinden ayırt edilmesi sağlanmaktadır. Ayırt edicinin çıkışı bir negatif kare dalga pulsudur. Elektrotlara uygulanan voltajlarla sayıcıdan okunan sayım değeri yükseltilir. Şekil 3.17’de yükseltecin kazancına göre sayımın değişimi görülmektedir.

Şekil 3.18’de görüldüğü gibi kullanılan yükseltecin kazancı, yükselteç çıkışındaki sinyalin girişteki sinyale oranı alınarak hesaplanmıştır. Şekil 3.19’da ise ayırt edici seviyesine karşılık sayım sayısı grafiği verilmiştir.

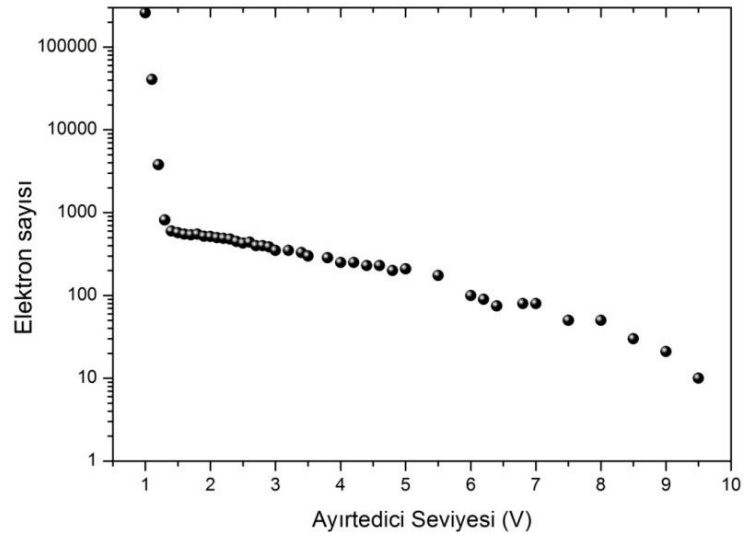
Sayımın yükseltilmesi aşaması bittikten sonra çıkış sinyali pozitif bir kare dalga pulsuna çevrilerek bilgisayarda bulunan MCS-Plus kartının girişine bağlanmıştır (Şekil 3.20). Bu kart gelen sinyali bilgisayarda bulunan yazılım ile ekranda çizdirebilmektedir. Aynı zamanda voltaj taraması bilgisayar kontrollü olarak yapılabilmektedir (Özer 2013).



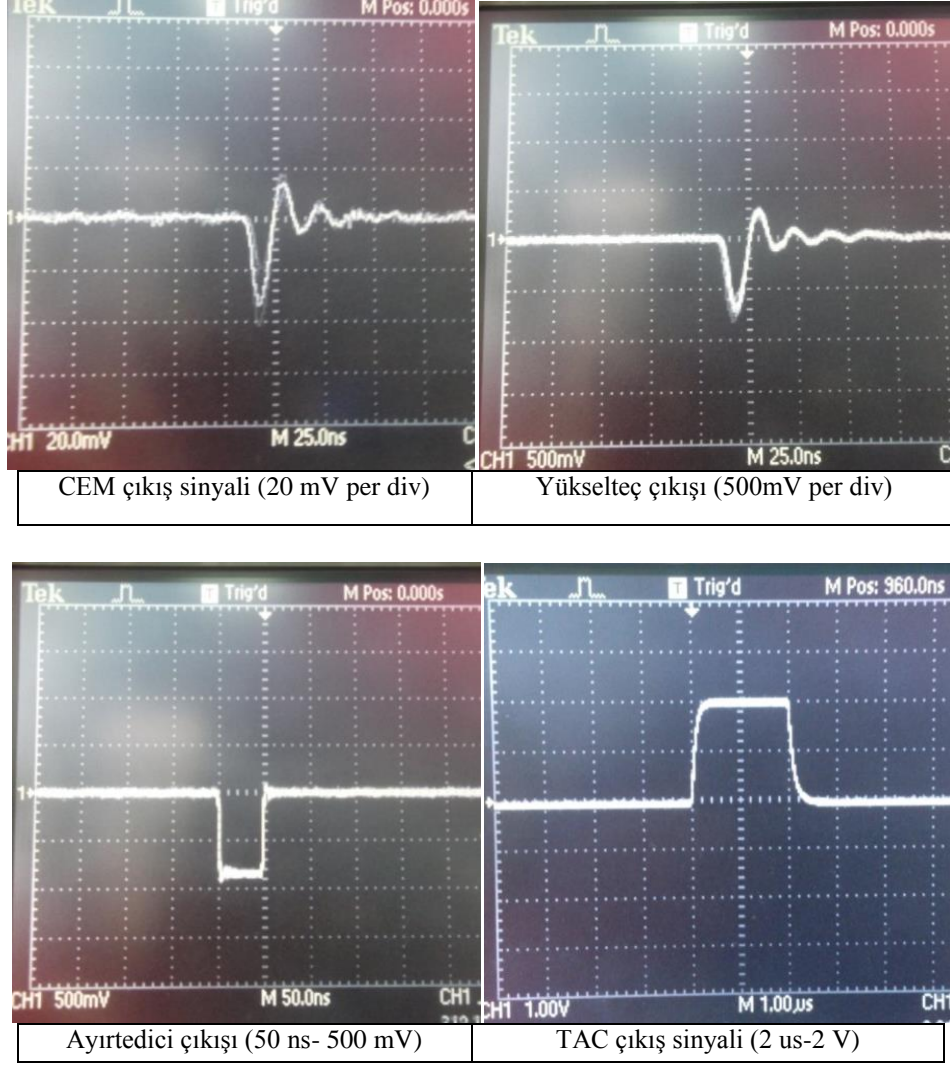
Şekil 3.17 A ve B analizörlerinde bulunan detektörlerin sinyal yükseklik dağılımları.100 eV enerjide ve 50° saçılma açısında elastik pik alımı sırasında elde edilmiştir.



Şekil 3.18 Yükseltecin kazancına bağlı olarak sayımda meydana gelen değişiklik.



Şekil 3.19 Ayırt edici seviyesine karşılık sayım sayısı. Ayırt edici seviyesi 1-9,5 V aralığında değiştirilmiştir.



Şekil 3.20 Elektron çoğaltıcı dedektörün çıkışında kullanılan sinyal işleme ünitesi ve osiloskoptan elde edilen sinyal görüntüleri.

4. BULGULAR

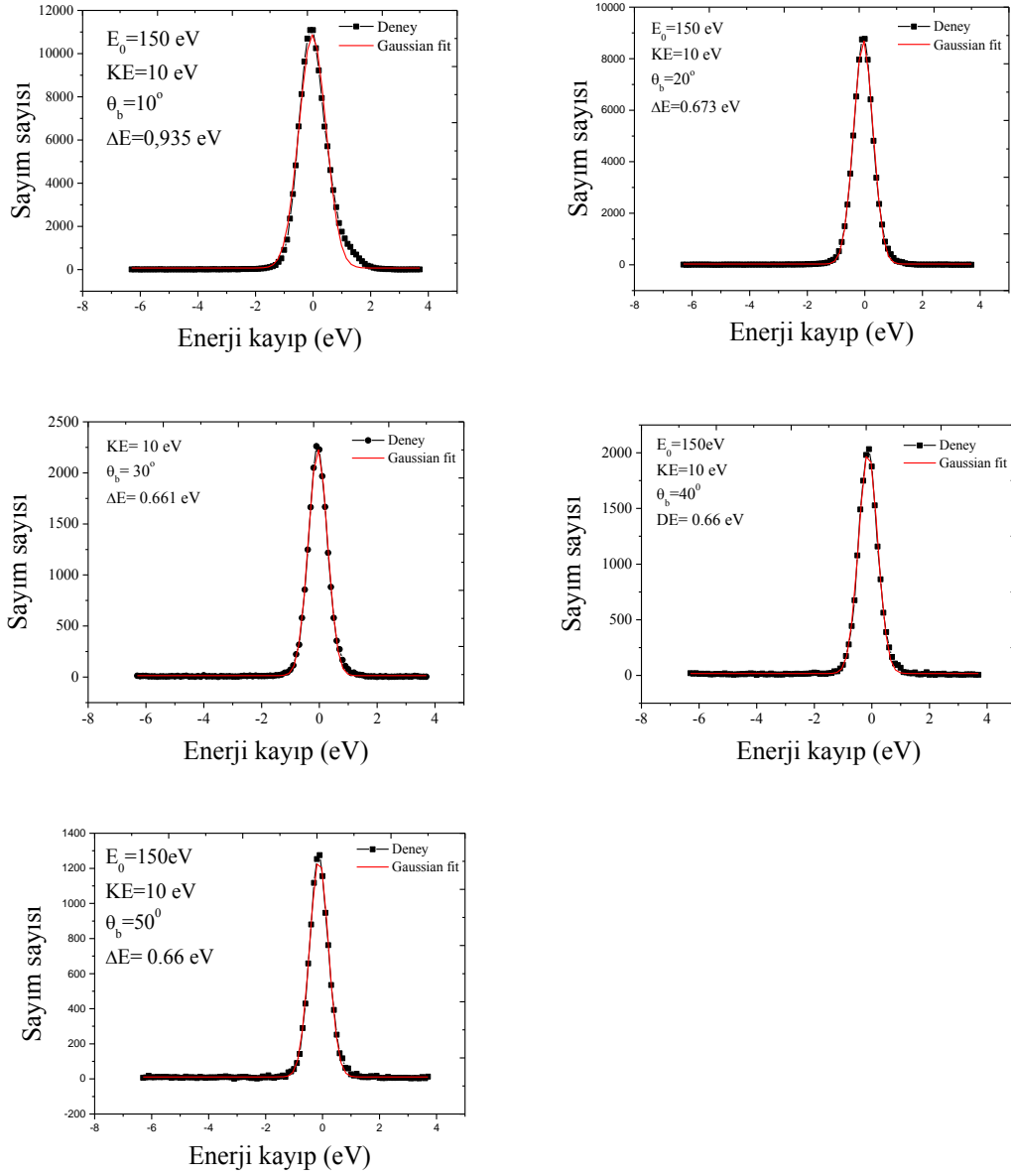
Bu çalışmada, elektron çarpışma spektrometresi kullanılarak azot molekülünün uyarılma tesir kesiti (enerji kayıp spektrumu), elastik saçılma diferansiyel tesir kesiti (DCS) ve iyonlaşma olayı hakkında temel bilgiler veren ikili diferansiyel tesir kesiti (DDCS) ölçümleri yapılmıştır.

Kullanılan analizörün taranılabilir açı değerleri $\theta = 30^0-140^0$ aralığındadır. Elastik DCS ve DDCS spektrumları, analizörün belirli enerjideki elektronları dedekte edecek şekilde ayarlanması ve döner tablalar üzerinde hareket ettirilmesi ile açısal dağılımın belirlenmesi sonucu elde edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında alınan DDCS spektrumları, dedekte edilen elektron için 10-225eV enerji aralığında ve açısal dağılıma bağlı olarak alınmıştır.

Elektron tabancası ve enerji analizörlerinin kontrollerini yapmak için iki analizör için de elektron-azot saçılma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Özdeş sonuçlar olduğu için burada bir analizörle alınan sonuçlar verilmiştir. Önce elastik saçılma incelenmiş, analizör açısına göre tesir kesiti ölçümleri yapılmış ve önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. İkinci olarak e-N₂ çarpışmasında inelastik saçılma olaylarından uyarılma olayı incelenmiştir. Uyarılma tesir kesiti için enerji kayıp spektrumları farklı açılarda alınmıştır. Bunun için yine analizörün detekte ettiği enerji değiştirilmiş ve her bir adımda sayım, eşit zaman aralıklarında kaydedilmiştir. Bu sayede spektrometrenin enerji çözünürlüğü belirlenebilmektedir.

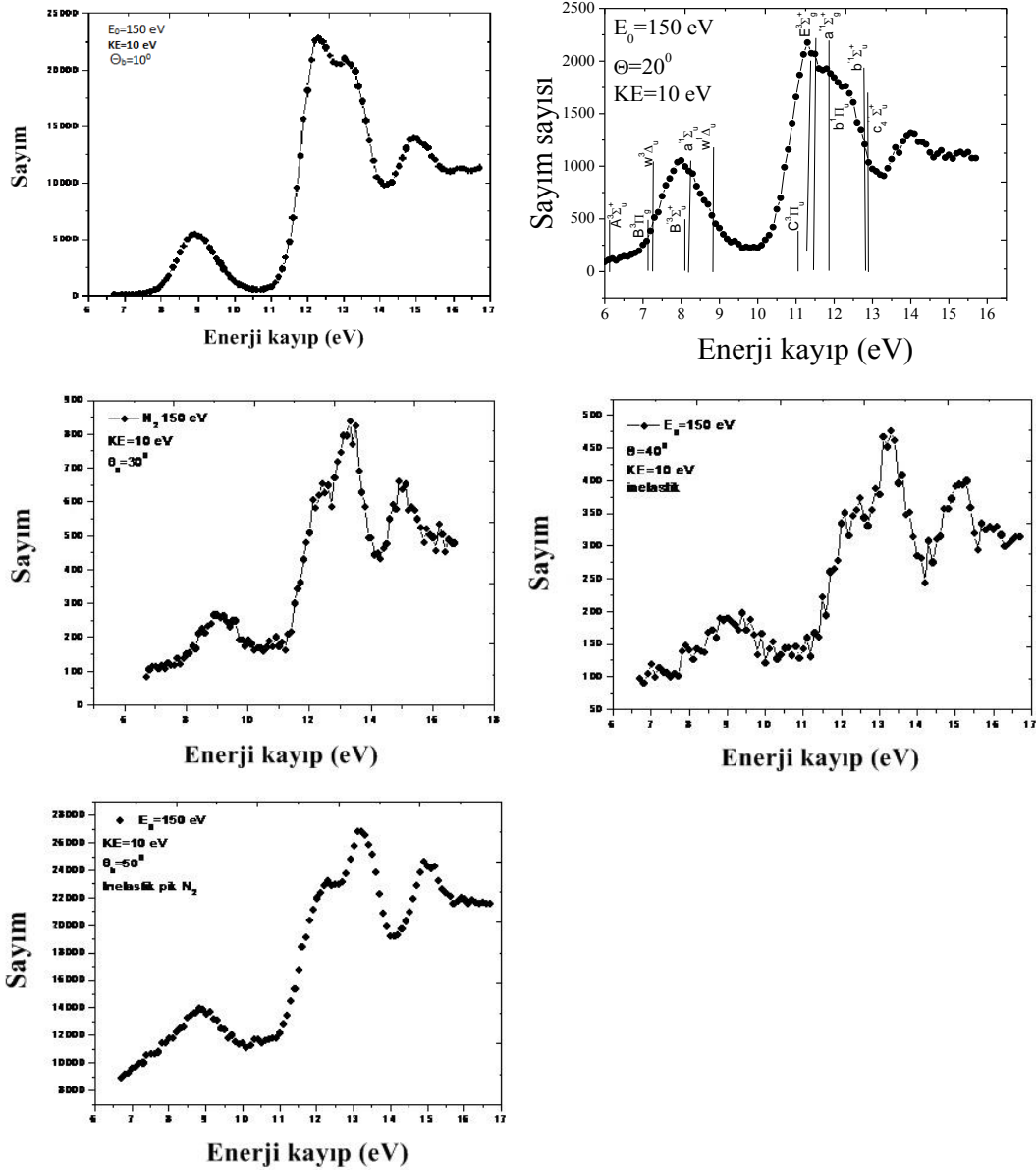
4.1 Enerji Kayıp Spektrumları

Analizörlerin çözünürlüğü, elektron-azot çarpışması sonucu elastik saçılmaya ait enerji kayıp spektrumu ile belirlenmektedir. İlk olarak Şekil 4.1'de koparılan enerji analizöründe sırası ile 10, 20, 30, 40 ve 50 derecelerde ve 10 eV' luk kinetik enerjili elektronlar için $E_0=150$ eV gelen elektron enerjisinde elastik saçılma ölçümleri alınmıştır.



Şekil 4.1 Kopan analizörde $E_0=150$ eV, $KE=10$ eV için; 10^0 - 50^0 arasında alınan elastik pikler.

Görüldüğü gibi küçük açılarda enerji analizörünün çözünürlüğü düşük iken, yüksek açılara (50^0) gidildikçe çözünürlük artmaktadır. Yine aynı kinematiklerde alınan inelastik uyarılma enerji kayıp spektrumu Şekil 4.2’de verilmiş ve enerji analizörünün çözünürlüğüne bağlı olarak azot molekülünün farklı enerji düzeyleri belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.2’de literatürden alınan azot molekülünün uyarılma enerji değerleri grafik üzerinde verilmiştir. Bu sayede molekül için belirlenen enerji seviyeleri farklı açılarda tespit edilebilmiştir



Şekil 4.2 Kopan analizörde $E_0=150$ eV, $KE=10$ eV ve 10^0 - 50^0 de alınan uyarılma bölgesindeki enerji kayıp spektrumları.

4.2 DDCS Ölçümleri

İyonlaşma olayı, gelen elektronun, çarpışma sonucu hedef molekülün elektronlarını koparacak kadar enerji aktardığı durumlarda meydana gelmektedir. Bir elektronun koparıldığı tekli iyonlaşma olayında, çarpışma sonrasında saçılan ve koparılan olmak üzere iki elektron açığa çıkmaktadır. Bu elektronlar özdeş olduklarından ayırt edilemezler. İkili iyonlaşma tesir kesiti (DDCS) ölçümlerinde, çarpışma sonucu çıkan elektronlardan bir tanesinin enerji ve açılal dağılımı ölçülmektedir. Bu nedenle ölçülen

elektronlardan hangisinin koparılan hangisinin saçılan olduğu tam olarak ayırt edilemez. Ancak DDCS verileri incelenerek saçılma ya da iyonlaşma olayının baskın olduğu bölgeler belirlenebilmektedir.

DDCS çalışmalarında, çıkan elektronlardan birinin ölçülmemesine rağmen bu tip diferansiyel tesir kesitlerinin ölçümünden iyonlaşma mekanizması hakkında temel bilgiler elde edilmektedir. Böylece DDCS, detekte edilen elektronun enerji ve saçılma açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Bu çalışmada, elektron spektrometresindeki FET ve elektron tabancasının açı kısıtlamasından dolayı açisal dağılım aralığı 30° - 130° arasında alınabilmektedir.

Elektron saçılma deneylerinde gelen elektronun enerjisinin iyonlaşma potansiyeline yakın olduğu durumlar düşük enerjili çarpışmalar olarak kabul edilmektedir (Chaudry and Kleinpoppen 2011). Gelen elektron enerjisinin iyonlaşma potansiyelinden 10 katı kadar olduğu durumlar orta enerjili, 10 katından daha fazla olduğu durumlar ise yüksek enerjili çarpışmalar olarak ele alınmaktadır. Bu bağlamda, 50 ve 100 eV orta enerjilerde açı ile azalan bir DDCS spektrumu gözlenmektedir.

$E_0=250$ eV'luk gelen elektron enerjisi kullanılmış, dedekte edilen (koparılan) elektronun enerjisi 10 eV'dan başlanılarak 225 eV'a kadar değiştirilmiş ve DDCS ölçümleri alınmıştır. Deneysel olarak alınan DDCS verileri, ortak çalışmalar yaptığımız Christophe Champion tarafından Birinci Born Coulomb Dalga yaklaşımı (First Born Approximation- Coulomb wave, FBA-CW) kullanılarak elde edilen teorik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. Bu modelde, molekülün ilk durumu tek merkez dalga fonksiyonu ve saçılan elektron düzlem dalga olarak tanımlanmaktadır. Coulomb dalga fonksiyonları ise dedekte edilen (koparılan) elektronları tanımlamaktadır (Yavuz *et al.* 2016).

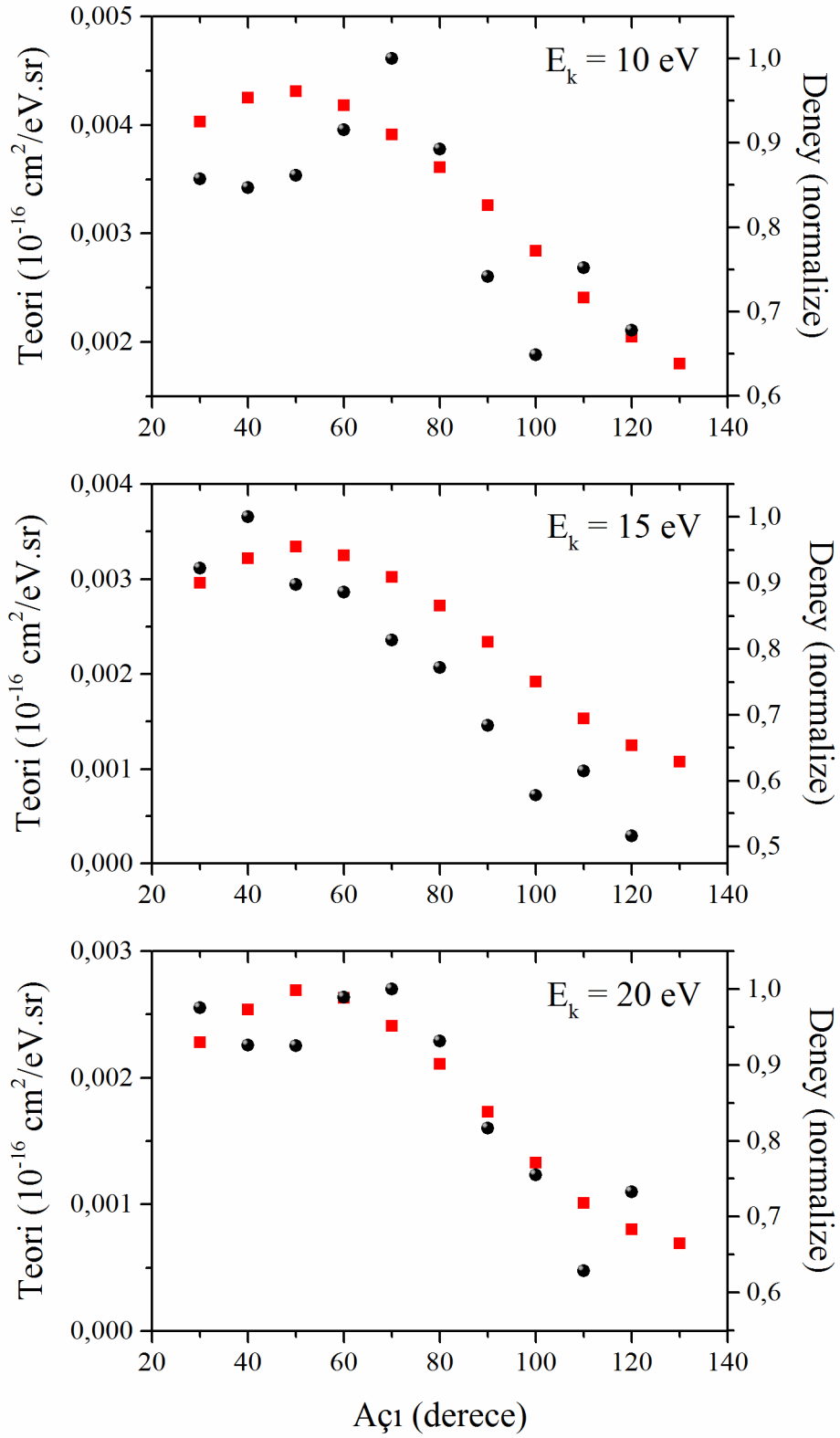
Şekil 4.3-5'de $E_0=250$ eV'luk gelen elektron enerjisi için azot molekülünde, koparılan elektron enerjisi 10 eV'dan başlanılarak 225eV'a kadar belirli bir düzene göre artışla 25° - 130° açıları arasında alınan deneysel ve teorik sonuçlar görülmektedir. Deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırmak için iki skala kullanılmıştır. Tüm grafiklerde soldaki

skala teorik olarak hesaplanan DDCS sonuçlarını, sağdaki skala ise alınan DDCS ölçümlerine ait sonuçları ifade etmektedir. Teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiklerde teorik sonuçlar içi dolu kırmızı kutucuklarla, deneysel sonuçlar ise siyah dairelerle gösterilmiştir.

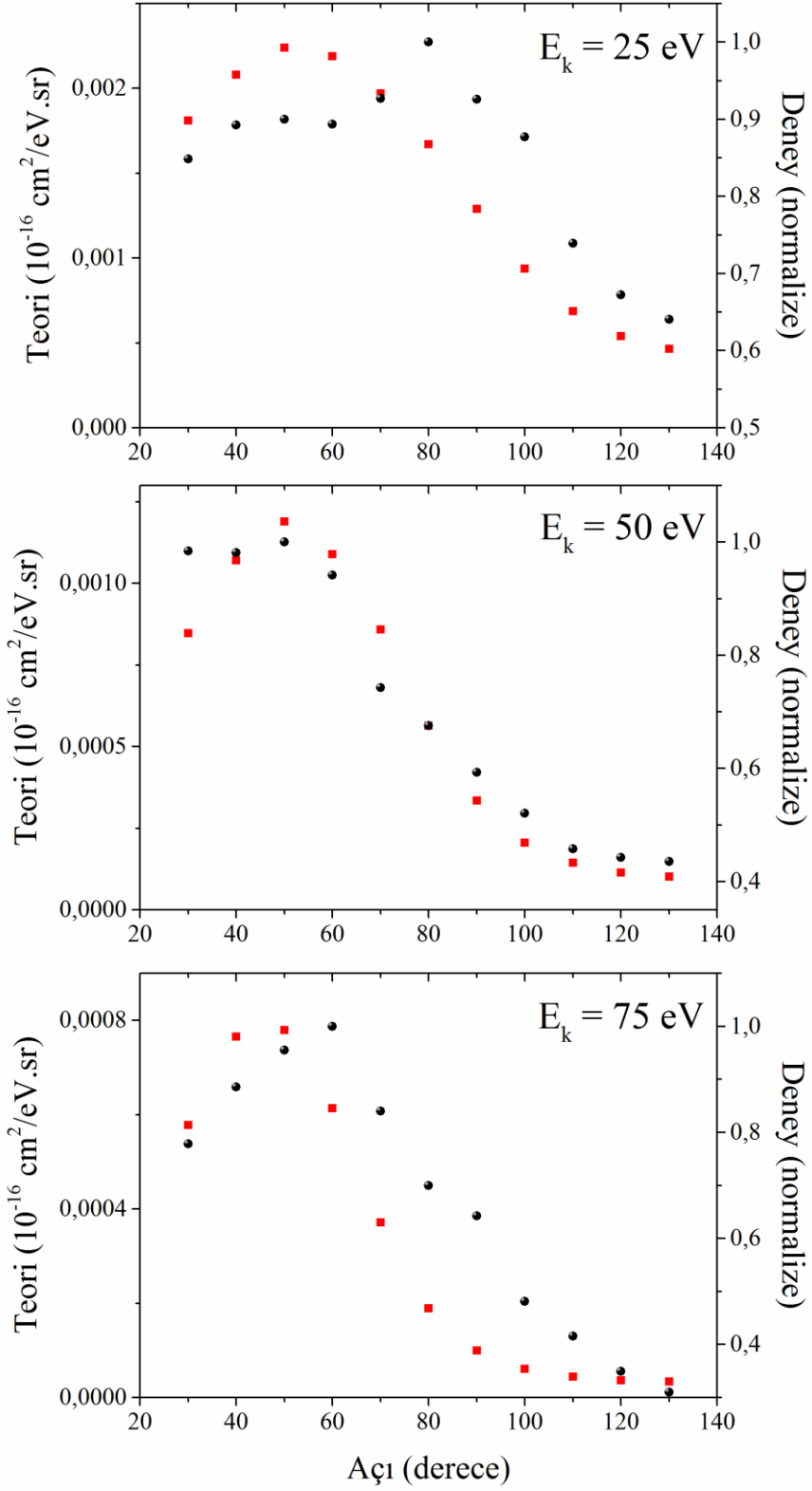
Şekillerde de görüldüğü üzere yüksek enerjilere doğru gidildikçe deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki uyum daha da artmaktadır. Düşük enerjilerin küçük açılarında görülen düzensizlik ve uyumsuzluk azalmaktadır. Genel olarak ise 60° 'den büyük açılarda ve 50 eV'dan düşük koparılan enerjilerde tüm sonuçlar için deneysel ve teorik olarak bir uyum mevcuttur.

Şekil 4.3'de, $E_0=250$ eV iken, 10, 15 ve 20 eV dedekte enerjilerinde, açı ile üstel olarak azalan bir spektrum oluşumu devam etmektedir. Yaklaşık 60° lik açıdan sonra üstel bir azalma daha önceki açılarda ise bir pik yapısı gözlenmiştir. Daha yüksek enerjide dedekte elden elektronlar için alınan spektrumlarında ise, üstel azalan yapı baskındır, pik veya dip gibi özel yapıların oluşmadığı görülmektedir.

Koparılan enerji arttıkça 10 eV'da görülen 50° 'den küçük açılardaki düzensizlik yerini teorik ve deneysel verilerde bir uyuma bırakmıştır ve benzer yapılar gözlemlenmiştir.

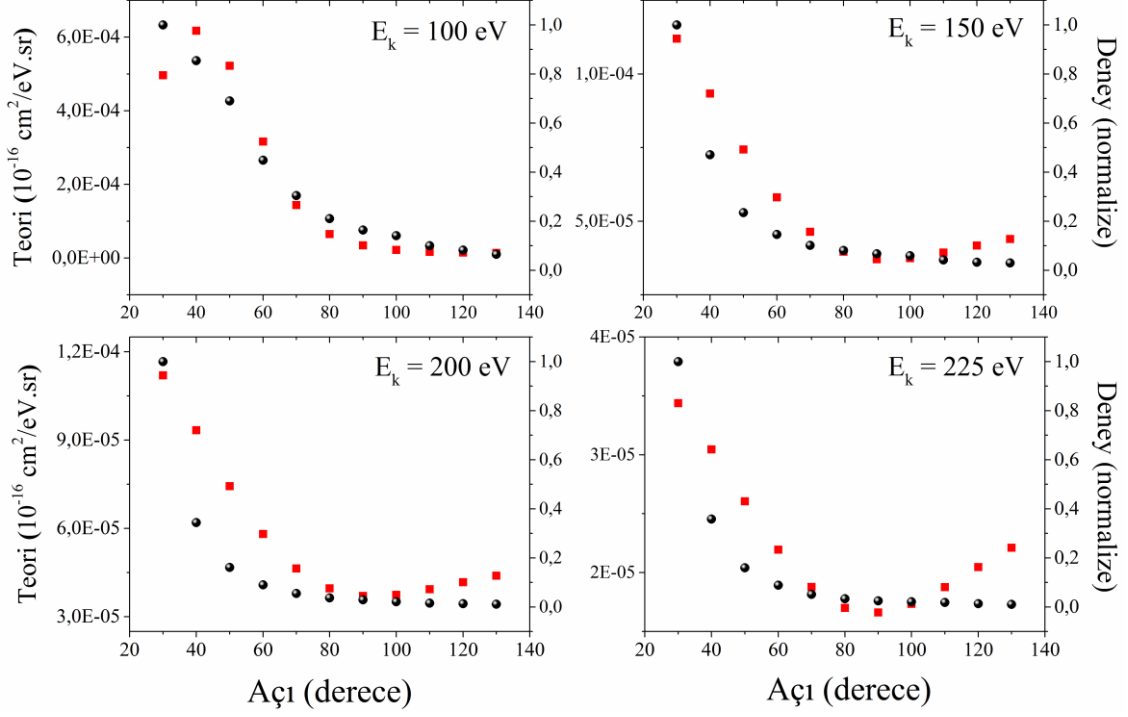


Şekil 4.3 10, 15 ve 20 eV'luk koparılan enerjili (E_k) elektronlar için alınan DDCS sonuçları. Siyah noktalar ölçülen deneysel verileri; kırmızı kareler teorik sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.4 25, 50 ve 75 eV' lik koparılan enerjili (E_k) elektronlar için alınan DDCS sonuçları. Siyah noktalar ölçülen deneysel verileri; kırmızı kareler teorik sonuçları göstermektedir.

Şekil 4.4’de koparılan elektronun enerjisi arttıkça daha düzenli bir yapı gözlemlenmektedir. Özellikle 50 ve 75 eV’deki sonuçlar genellikle uyum içerisindedir. Sonuçlarda yaklaşık 50° civarında pik görülmektedir.



Şekil 4.5 100, 150, 200 ve 225 eV’lik koparılan enerjili (E_k) elektronlar için alınan DDCS sonuçları. Siyah noktalar ölçülen deneysel verileri; kırmızı kareler teorik sonuçları göstermektedir.

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi daha düşük enerjilerde görülen pik düşük açılara doğru kaymaya başlamıştır. 150 eV’den sonraki açılarda ise önceki grafiklerde görülen pik yerine üstel azalan bir yapı gözlenmiştir. Sonuçlar genel olarak birbiri ile uyumludur.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada N_2 molekülünün elektron etkisi ise iyonlaşması sonucu elde edilen DDCS sonuçları ortaya konmuştur. Ölçümler 250 eV gelen elektron enerjisinde, 10-225 eV koparılan elektron enerjilerinde ve $30-130^\circ$ saçılma açısı aralığında alınmıştır. Bu çalışmada alınan deneysel sonuçlar, ortak çalışmalar yaptığımız Metz Üniversitesi, Fransa, Teorik Fizik Bölümü'nden Christophe Champion tarafından Birinci Born Coulomb Dalga yaklaşımı (First Born Approximation- Coulomb wave, FBA-CW) kullanılarak elde edilen teorik hesaplamalarla biçimsel olarak karşılaştırılmıştır.

Enerji kayıp spektrumu ve elastik saçılma tesir kesiti ölçümleri, DDCS ölçümleri alınmadan önce enerji ve açı kalibrasyonu için referans olarak kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre, DDCS ölçümlerini alırken deneysel olarak herhangi bir açısal düzeltmeye gerek görülmemiştir. Enerji kayıp spektrumundan belirlenen enerji kayması DDCS ölçüm sonuçlarında hesaba katılmış, gerekli düzeltmeler yapılmıştır.

DDCS ölçümlerinde dedekte edilen elektronun saçılan veya koparılan olduğu belirsizdir. Saçılan elektron etkisinin baskın olduğu durumlarda, DDCS spektrumlarında açığa bağlı olarak tesir kesitinde üstel azalma beklenmektedir. İyonlaşma olayı sonucu ortaya çıkan koparılan elektronun etkisi baskın olduğu durumlarda ise, tesir kesitinde pik gözlenmesi beklenmektedir. Alınan DDCS spektrumlarında beklentilere uygun olarak, saçılma ve iyonlaşma etkileri gözlenmiştir.

Deneysel ve teorik sonuçlar genellikle uyum içerisindedir. Fakat özellikle 50 eV enerjisinden daha büyük enerjili olarak koparılan elektron durumunda uyumun arttığı görülmüştür. 100 eV'a kadar alınan sonuçlarda iyonlaşma olayının baskın olduğu görülmüştür. Bu enerjiye kadar yaklaşık 50° civarında gözlenen pik büyük enerjilerde daha düşük açılara kaymaktadır. Genel olarak sonuçları incelediğimizde, teorik modelin bu enerjilerde elektron- N_2 molekülü çarpışmalarını yeterince modelleyebildiği söylenebilir.

Bunun yanında bazı durumlarda, spektrumlarda düzensiz bir dağılım gözlenmiştir. Gözlenen bu düzensizliklerin, ikincil emisyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

D deney dzeneginde olçülebilir aç aralığını artırmak için büyük FET üzerine küçük FET yerleştirilmiştir. İkincil emisyonların kaynağı bu küçük FET'teki yansımalarından olabileceği sonucuna varılmıştır.

Çarpışma olayını anlamak için deneyin doğası gereği mutlak olarak ölçülemeyen çeşitli türden tesir kesiti ölçümlerinin yapılması deney dzeneginin test edilmesi için önemlidir. Elektron etkisiyle iyonlaşma olayı, teorik problemlerin de tartışılmasına zemin sağlamaktadır. Elektron etkisiyle iyonlaşma olayında çarpışmadan sonra birbirleriyle uzun menzilli Coulomb etkileşmesi içinde olan en az üç parçacık bulunmaktadır. İyonlaşma mekanizmasının tanımlanması, çok parçacık probleminin çözülmesini gerektirmektedir. Parçacıkların hepsinin enerji ve momentumlarının belirlenmesi iyonlaşma olayının tam olarak tanımlanmasını sağlar. Çarpışma sürecinin deneysel ve teorik olarak aydınlatılmasının, plazma fiziği, astrofizik, atmosfer fiziği radyasyon kimyası ve biyoloji gibi birçok alanda yeri vardır. Atom-molekül fiziğinde bu çalışmalar, özellikle kuantum teorisinin ve deteksiyon tekniklerinin gelişmesi ile saçılma olaylarının anlaşılmasında önemli katkılar sağlamıştır. Bu çalışmalar sayesinde temel seviyedeki çok parçacıklı sistemlerin dinamikleri hakkında bilgi edinmek mümkündür.

Bu çalışmada elde edilen tesir kesitleri, elektron-azot etkileşmeleri sonucu iyonlaşma olayı için halen geliştirilmekte olan teorilerin test edilmesi açısından önemlidir. Ayrıca farklı enerjilerde bu molekül üzerine alınan DDCS ölçümleri ile teorik modellerin karşılaştırılması üzerine yayın üretecek çalışmaların yapılması planlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Amaldi, U., Egidi, A., Marconero, R. and Pizzella, G. (1969). Use of a two channeltron coincidence in a new line of research in atomic physics. *Review of Scientific Instruments*, **40(8)**: 1001-1004.
- Avaldi, L., Camilloni, R., Fainelli, E. and Stefani, G. (1992). Ionization of the N₂ 3σ_g orbital by electron impact studied by asymmetric (e, 2e) experiments. *Journal of Physics B.*, **25**: 3551-3563.
- Bederson, B. and Fite, W. L. (1968). *Methods of Experimental Physics: Atomic and Electron Physics Atomic Interactions. Part A.* Academic Press, Berlin, Germany.
- Bederson, B. and Kieffer, L. J. (1971). Total Electron - Atom Collision Cross Sections at Low Energies. *Reviews of Modern Physics*, **43**: 601-640.
- Bethe, H. (1930). Zur theorie des durchgangs schneller korpuskularstrahlen durch materie. *Annalen der Physik*, **397(3)**: 325-400.
- Boesten, L., and Okada, K. (2000). Hairpin-filament electron guns for low-energy use. *Measurement Science and Technology*, **11(5)**: 576-583.
- Casagrande, E. S., Naja, A., Mezdari, F., Lahmam-Bennani, A., Bolognesi, P., Joulakian, B., Chuluunbaatar, O., Al-Hagan, O., Madison, D.H., Fursa, D.V. and Bray, I. (2008). (e, 2e) ionization of helium and the hydrogen molecule: signature of two-centre interference effects. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **41(2)**: 025204.
- Chaudhry, A. and Kleinpoppen, H. (2011). *Analysis of excitation and ionization of atoms and molecules by electron impact.* Springer-Verlag, New York, USA.
- Doering, J. P. and Yang, J. (1996). Asymmetric (e, 2e) study of the 100 eV ionization of the 3σ_g and 1π_u molecular orbitals of N₂. *Physical Review A*, **54(5)**: 3977-3983.
- Dogan, M. (1999). Correlation studies of simultaneous excitation-ionization in helium. Doktora tezi, University of Newcastle upon Tyne, Newcatle.
- Dogan, M. and Crowe, A., (2002). Coincidence studies of the influence of resonances

- on simultaneous ionization-excitation of helium by electron impact. *Journal Physics B: Atomic, Molecular Optical Physics*, **35(12)**: 2773–2783.
- Dogan, M., Ulu, M. and Sise, O. (2007). Design, simulation and construction of an electron–electron coincidence spectrometer. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, **161(1)**: 58-62.
- Dogan, M., Ulu, M., Ozer, Z. N., Yavuz, M. and Bozkurt, G. (2013). Double Differential Cross-Sections for Electron Impact Ionization of Atoms and Molecules. *Journal of Spectroscopy*, **2013**: 192917.
- DuBois, R. D. and Rudd, M. E. (1976). Differential cross sections for elastic scattering of electrons from argon, neon, nitrogen and carbon monoxide. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **9(15)**: 2657-2666.
- DuBois R. D. and Rudd M. E. (1977) Absolute doubly differential cross sections for ejection of secondary electrons from gases by electron impact. I. 100- and 200-eV electrons on helium. *Physical Review A*, **16(1)**: 26-35.
- Dunseath K. M., Terao-Dunseath M. and Bourhi G. (2004). Selection rules for laser-assisted electron-atom collisions with the laser field normal to the scattering plane. *Physical Review A*, **72(3)**: 033410.
- Faddeev, L. D. (1961). Scattering theory for a three-particle system. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, **39(5)**: 1459-1465.
- Frank, J. and Hertz, G. (1914). Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und den Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin*, **16**: 457-467.
- Frost, A. A., Harriss, D. K., and Scargle, J. D. (1964). Approximate Series Solutions of Nonseparable Schrödinger Equations. III. B Matrix Method. *The Journal of Chemical Physics*, **41(2)**: 489-494.
- Gao, J., Madison, D. H. and Peacher, J. L. (2005). Fully differential cross section for low-energy electron-impact ionization of nitrogen molecules. *Physical Review A*, **72(2)**: 020701.
- Gao, Junfang., Madison, D. H. and Peacher, J. L. (2005). Interference effects for low-

- energy electron-impact ionization of nitrogen molecules. *Physical Review A*, **72(3)**: 032721.
- Goruganthu R. R. and Bonham R. A. (1986). Secondary-electron-production cross sections for electron-impact ionization of helium. *Physical Review A*, **34(1)**: 103.
- Gregg, M. D., Becker, R. H., Brotherton, M. S., Laurent-Muehleisen, S. A., Lacy, M., and White, R. L. (2000). Discovery of a Classic FR II Broad Absorption Line Quasar from the FIRST Survey. *The Astrophysical Journal*, **544(1)**, 142-162.
- Hargreaves, L. R., Colyer, C., Stevenson, M. A., Lohmann, B., Al-Hagan, O., Madison, D. H. and Ning, C. G. (2009). (e, 2e) study of two-center interference effects in the ionization of N₂. *Physical Review A*, **80(6)**: 062704.
- Heisenberg W. (1983). The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics. In: Wheeler, J. A. and Zurek, W. H., (Eds.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton, 62-84.
- Imhof, R. E., Adams, A., and King, G. C. (1976). Energy and time resolution of the 180 degrees hemispherical electrostatic analyser. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **9(2)**: 138-142.
- Jauch, J.M. (1958). Theory of the Scattering Operator. II. Multichannel Scattering, *Helvetica Physica Acta*, **31**: 27-35.
- Joachain, C.J. and B. Piraux (1983) Triple differential cross sections for the ionization of atomic hydrogen by fast electrons. *Physics Letters A*, **99(9)**: 427-431.
- Jung, K., Schubert, E., Paul, D. A. L. and Ehrhardt, H. (1975). Angular correlation of outgoing electrons following ionization of H₂ and N₂ by electron impact. *Journal of Physics B*, **8(8)**: 1330-1336.
- Yasui, K., Kuzumoto, M., Yagi, S., Ogawa, S. and Tanaka, M. (1989). Silent-discharge excited TEM₀₀ / 2.5 kW CO₂ laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **25(4)**: 836-840.
- Klemperer, O., and Barnett, M. E. (1971). *Electron optics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lahmam-Bennani, A. (1991). Recent developments and new trends in (e, 2e) and (e, 3e)

studies. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **24(10)**: 2401.

Lahmam-Bennani, A., Casagrande, E. S. and Naja, A. (2009). Experimental investigation of the triple differential cross section for electron impact ionization of N₂ and CO₂ molecules at intermediate impact energy and large ion recoil momentum. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **42(23)**: 235205.

Langmuir, I. (1915) Chemical Reactions at Low Pressures. *Journal of the American Chemical Society*, **37(5)**: 1139–1167.

Lee, M-T. and Iga, I. (1998) Elastic and total cross sections for electron scattering by nitrogen molecule in the intermediate energy range. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **32(2)**: 453-462.

Lenard, P. (1903). Über die Absorption von Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit. *Annalen der Physik*, **317(12)**: 714-744.

McCarthy, I. E. and Weigold, E. (1991). Electron momentum spectroscopy of atoms and molecules. *Reports on Progress in Physics*, **54(6)**: 789-801.

Mahapatra, S. K., Dhole, S. D. and Bhoraskar, V. N. (2005). 20 keV electron gun system for the electron irradiation experiments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **536(1)**: 222-225.

Milne-Brownlie, D. S., Foster, M., Gao, J., Lohmann, B. and Madison, D. H. (2006). Young-Type Interference in (e, 2e) Ionization of H₂. *Physical Review Letters*, **96(23)**: 233201.

Nickel, J. C., Mott, C., Kanik, I. and McCollum, D. C. (1988). Absolute elastic differential electron scattering cross sections for carbon monoxide and molecular nitrogen in the intermediate energy region. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **21(10)**: 1867-1877.

Naja, A., Staicu-Casagrande, E. M., Lahmam-Bennani, A., Nekkab, M., Mezdari, F., Joulakian, B., Chuluunbaatar, O. and Madison, D. H. (2007). Triply differential (e, 2e) cross sections for ionization of the nitrogen molecule at large energy transfer. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **40(18)**:

- Offi, F., Fondacaro, A., Paolicelli, G., De Luisa, A. and Stefani, G. (2005). Design and test of a lens system for a high energy and high resolution electron spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **550(1)**: 454-466.
- Özer, Z. N. (2013). H₂ Molekülünün elektron çarpışması ile iyonlaşmasının elektron-elektron çakışma tekniği (e, 2e) ile incelenmesi. Doktora tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- Pierce, J. R. (1954). Coupling of modes of propagation. *Journal of Applied Physics*, **25(2)**: 179-183.
- Rudberg, E. (1930). Characteristic energy losses of electrons scattered from incandescent solids. *Proceedings of the Royal Society of London: Series A*, **127(804)**: 111-140.
- Shyn, T. W. and Carignan, G. R. (1980). Angular distribution of electrons elastically scattered from gases: 1.5-400 eV on N₂. *Physical Review A*, **22(3)**: 923-930.
- Srivastava, S. K., Chutjian, A. and Trajmar, S. (1975). Absolute elastic differential electron scattering cross sections in the intermediate energy region. I. H₂. *The Journal of Chemical Physics*, **63(6)**: 2659-2665.
- Sise, O., Manura, D. J. and Dogan, M. (2008). Exploring focal and aberration properties of electrostatic lenses through computer simulation. *European Journal of Physics*, **29(6)**: 1165-1176.
- Sise, O., Ulu, M., Dogan, M., Martinez, G., and Zouros, T. J. (2010). Fringing field optimization of hemispherical deflector analyzers using BEM and FDM. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, **177(1)**: 42-51.
- Sise, O., Okumus, N., Ulu, M. and Dogan, M. (2009). Computer simulation of electrostatic aperture lens systems for electron spectroscopy. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, **175(1)**: 76-86.
- Sise, O., Ulu, M. and Dogan, M. (2005). Multi-element cylindrical electrostatic lens systems for focusing and controlling charged particles. *Nuclear Instruments and*

Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **554(1)**: 114-131.

Sise, O., Ulu, M., & Dogan, M. (2007a). Characterization and modeling of multi-element electrostatic lens systems. *Radiation Physics and Chemistry*, **76(3)**: 593-598.

Sise, O., Ulu, M. and Dogan, M. (2007b). Aberration coefficients of multi-element cylindrical electrostatic lens systems for charged particle beam applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **573(3)**: 329-339.

Şiße, Ö. (2011). Helyum atomunun kendiliğinden iyonlaşma tesir kesitlerinin (e,2e) çakışma tekniği ile ölçülmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Tóth, I. and Nagy, L. (2011). Ionization of molecular nitrogen by electron impact in (e, 2e) processes. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **44(19)**: 195205.

Trajmar, S., Mcconkey, W. J. and Kanik, I., (2006). Electron–Atom and Electron–Molecule Collisions. In: Drake G. W. F. (Eds), *Handbooks of Atomic, Molecular, and Optical Physics*, Springer, New York, 929-940.

Ulu, M. (2007). Elektron- elektron çakışma deney düzeneğinin kurulması ve düzeneğin simülasyonu. Doktora Tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Ulu, M., Sise, O. and Dogan, M. (2007). Optimizing the performance of an electron gun design followed by lenses and apertures. *Radiation Physics and Chemistry*, **76(3)**: 636-641.

Vos, M., Cornish, G.P. and Weigold, E. (2000). High-energy (e,2e) spectrometer for the study of the spectral momentum density of materials. *Review of Scientific Instruments*, **71(10)**: 3831-3840.

Wheeler J.A. (1983). Polyelectrons. In Wheeler, J. A., Zurek, W. H., (Eds.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton, 353-356.

Yavuz, M. (2013). Elektron etkisi ile metan molekölünün ikili diferansiyel tesir

kesitlerinin ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

Yavuz, M., Ozer, Z. N., Ulu, M., Champion, C. and Dogan, M. (2016). Experimental and theoretical double differential cross sections for electron impact ionization of methane. *The Journal of Chemical Physics*, **144(16)**: 164305.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Çınar BAL
Doğum Yeri ve Tarihi : AFŞİN 02.01.1987
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) :0538 875 7359 / cinarbal888@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Şehit Nuri Pamir Lisesi, 2003
Lisans : Selçuk Üniversitesi, 2007
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2016