



**SF₆ MOLEKÜLÜNÜN ÜÇLÜ DİFERANSİYEL
TESİR KESİTLERİNİN ÖLÇÜLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Murat YAVUZ

**Danışman
Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM**

FİZİK ANABİLİM DALI

Aralık 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

SF₆ MOLEKÜLÜNÜN ÜÇLÜ DİFERANSİYEL
TESİR KESİTLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Murat YAVUZ

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM

FİZİK ANABİLİM DALI

Aralık 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Adı SOYADI tarafından hazırlanan “SF₆ Molekülünün Üçlü Diferansiyel Tesir Kesitlerinin Ölçülmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 08 / 01 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği / oy çokluğu** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM

Başkan	: Ünvanı Adı SOYADI Üniversite adı, Fakültesi	 İmza
Üye	: Ünvanı Adı SOYADI Üniversite adı, Fakültesi	 İmza
Üye	: Ünvanı Adı SOYADI Üniversite adı, Fakültesi	 İmza
Üye	: Ünvanı Adı SOYADI Üniversite adı, Fakültesi	 İmza
Üye	: Ünvanı Adı SOYADI Üniversite adı, Fakültesi	 İmza
.....		

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

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
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.

18 / 12 / 2023

İmza

Murat YAVUZ

ÖZET

Doktora Tezi

SF₆ MOLEKÜLÜNÜN ÜÇLÜ DİFERANSİYEL TESİR KESİTLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Murat YAVUZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM

Kükürt hekzaflorür (SF₆), küresel ısınma potansiyeli olmasına rağmen bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle endüstride sık kullanılan bir gazdır. SF₆'nın elektron etkisi ile iyonlaşma çalışmaları, özellikle çarpışma sonucu açığa çıkan parçacıkların enerji ve açısal dağılımlarının ölçülmesi, iyonlaşma sürecinin temel fiziksel özellikleri ve molekülün yapısı hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Bu çalışmada, SF₆'nın elektron etkisi ile iyonlaşma olayı için ikili ve üçlü diferansiyel tesir kesiti ölçümleri yapılmıştır. Elektron çarpışma spektrometresi kullanılarak SF₆ molekülünün 50-350 eV enerjili elektronlar ile çarpışması sonucu gerçekleşen olaylarının tesir kesitleri enerji ve saçılma açılarının fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, SF₆'nın moleküler yapısı hakkında önemli bilgiler ortaya koymakta olup, molekülün yüklü parçacıklar ile olan etkileşimlerinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

2023, ix + 58 sayfa

Anahtar Kelimeler: Elektron Spektrometrisi, Elektron-Molekül Çarpışmaları, Diferansiyel Tesir Kesitleri, Kükürt Hekzaflorür.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

TRIPLE DIFFERENTIAL CROSS SECTION MEASUREMENTS OF SF₆ MOLECULE

Murat YAVUZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM

Sulfur hexafluoride (SF₆) is a gas commonly used in industry due to some of its physical and chemical properties, despite its global warming potential. Studies on the electron impact ionization of SF₆ provide valuable information about the fundamental physical properties of the ionization process and the structure of the molecule, especially measuring the energy and angular distributions of particles released as a result of collisions. In this study, double and triple differential cross section measurements for electron impact ionization events on SF₆ were conducted. The cross-sections of events resulting from collisions between SF₆ molecules and electrons with initial energies ranging from 50 to 350 eV were measured as functions of energy and scattering angles with electron collision spectrometer. Results obtained in this study provide important insights into the molecular structure of SF₆ and contribute to understanding the interactions of the molecule with charged particles.

2023, ix + 58 pages

Keywords: Electron Spectrometry, Electron-Molecule Collisions, Differential Cross Sections, Sulfur Hexafluoride.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Zehra Nur ÖZER'e, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Murat YAVUZ
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	5
2.1 Elektron Çarpışma Deneyleri.....	5
2.2 Elektron Çarpışmalarının Temelleri	7
2.2.1 Elastik Çarpışmalar	8
2.2.2 İyonlaşma	9
2.3 Tesir Kesiti Kavramı	10
2.4 Elektron – SF ₆ tesir kesiti literatürü	20
3. MATERYAL ve METOT.....	22
3.1 Elektron Spektrometresi	22
3.1.1 Vakum Sistemi	23
3.1.2 Elektron Tabancası	26
3.1.3 Faraday Elektron Toplayıcı.....	28
3.1.4 Elektron Enerji Analizörü	29
3.1.5 Sinyal İşleme Ünitesi	31
3.2 Çakışma İstatistiği	32
3.3 Deney Düzeneği Bileşenlerinin Optimizasyonu	34
3.4 Argon ile Yapılan Test Ölçümleri.....	36
4. BULGULAR.....	39
4.1 SF ₆ Molekülünün İkili Diferansiyel Tesir Kesiti Ölçümleri.....	39
4.2 SF ₆ Molekülünün Üçlü Diferansiyel Tesir Kesiti Ölçümleri.....	44
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	49
6. KAYNAKLAR	52

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

SF ₆	Kükürt Hekzaflorür
eV	Elektron Volt
σ	Tesir kesiti
θ	Saçılma açısı
μ A	Mikroamper
mbar	Milibar
Ω	Katıaçı (steradyan)

Kısaltmalar

FC	Faraday elektron toplayıcı (Faraday Cup)
CEM	Tek kanallı elektron çoğaltıcı (Channel Electron Multiplier)
TAC	Zaman-genlik dönüştürücü (Time to Amplitude Converter)
MCS	Çok kanallı ölçekleyici (Multi-Channel Scaler)
HDA	Yarıküresel deflektör enerji analizörü (Hemi-spherical Deflector Anayzer)
G.K.	Güç Kaynağı
TMP	Turbo Moleküler Pompa (Turbo Molecular Pump)
TCS	Toplam tesir kesiti (Total Cross Sections)
DCS	Diferansiyel tesir kesiti (Differential Cross Sections)
SDCS	Tekli diferansiyel tesir kesiti (Single Differential Cross Sections)
DDCS	İkili diferansiyel tesir kesiti (Double Differential Cross Sections)
TDCS	Üçlü diferansiyel tesir kesiti (Triple Differential Cross Sections)
MO	Moleküler Orbital
EMS	Elektron Momentum Spektroskopisi
PES	Fotoelektron Spektroskopisi (Photoelectron Spectroscopy)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 SF ₆ moleküler yapısı şematik gösterimi.....	3
Şekil 2.1 Bir potansiyelden saçılan yüklü parçacıklar için şematik gösterim.....	10
Şekil 2.2 Tesir kesitleri arasındaki hiyerarşik ilişki.....	11
Şekil 2.3 SDCS şematik gösterimi. E ₀ , E _a ve E _b sırasıyla gelen, saçılan ve koparılan elektronların kinetik enerjilerini; ε _i , hedefin iyonlaşma potansiyelini göstermektedir.....	12
Şekil 2.4 Momentum transferinin vektör diyagramı.....	14
Şekil 2.5 Simetrik çarpışma geometrileri.....	15
Şekil 2.6 Asimetrik çarpışma geometrileri.....	15
Şekil 2.7 SF ₆ molekülünün en dış orbitalinden iyonlaşma olayı için yapılmış örnek bir eş-düzlemsel simetrik geometride TDCS ölçüm sonucu (Nixon vd. 2016).....	16
Şekil 2.8 SF ₆ molekülünün 1t _{1g} yörüngesi için eş-düzlemsel olmayan simetrik geometride yapılan EMS çalışması ile ölçülen bir TDCS örneği (Zhang vd. 2023).....	17
Şekil 2.9 Helyum atomunun s-tipi orbitalinden gerçekleşen bir iyonlaşma olayı için alınmış örnek TDCS spektrumu (Milne-Brownlie vd. 2006).....	19
Şekil 2.10 SF ₆ molekülü için yapılmış EMS çalışmasında a) s-tipi ve b) p-tipi orbitaller için; ölçülen momentum profili, momentum yoğunluğu ve elektron bulunma olasılığı gösterimi (Weigold vd. 1991).....	19
Şekil 3.1 Çarpışma düzleminin geometrisi.....	22
Şekil 3.2 Bu çalışmada kullanılan elektron spektrometre sisteminin fotoğrafı. Vakum odacığı (1), elektron tabancası (2), enerji analizörü (3), gaz hattı (4), hareketli tablalar (5), mekanik feedthrough (6), elektriksel bağlantılar için feedthrough	

(7), giriş valfi (8), turbo-moleküler pompa (9), ara bağlantı (10), rotary pompa (11).	24
Şekil 3.3 Vakum çemberinin şematik çizimi.	25
Şekil 3.4 Elektron kaynağı olarak kullanılan filament ve elektron tabancası içine yerleşimi.	27
Şekil 3.5 Elektron tabancasının teknik çizimi (Ulu vd. 2007).	27
Şekil 3.6 Elektron tabancası içindeki elektrostatik lenslere istenilen voltajın uygulanmasını sağlayan kontrol devresi (Dogan vd. 2013).	28
Şekil 3.7 FET ve açısıl kısıtlama durumlarında kullanılan küçük FET görüntüsü.....	28
Şekil 3.8 Elektron spektrometresi içinin görünümü.	29
Şekil 3.9 Elektron enerji analizörünün şematik kesit görünümü (Özer 2013).....	30
Şekil 3.10 CEM, teflon yuvası ve alüminyum kasa içindeki fotoğrafı.....	31
Şekil 3.11 Şematik bir (e, 2e) çakışma zaman piki.	33
Şekil 3.12 Elektron demetinin akım kaydı.....	34
Şekil 3.13 Elektron çoğaltıcı dedektörlerin PHD grafikleri.....	35
Şekil 3.14 Her iki analizörde alınan elastik pikler.....	36
Şekil 3.15 Argon inelastik saçılma spektrumu ve ayırt edilen elektronik uyarılma seviyeleri.....	37
Şekil 3.16 Argonun bağlanma enerjisi spektrumu.....	37
Şekil 4.1 Deneysel DDCS ölçümlerinin literatürdeki çalışma ile a) $E_0=100\text{eV}$ b) $E_0=200\text{eV}$ gelen elektron enerjileri için karşılaştırması	40
Şekil 4.2 $E_0=50\text{eV}$ iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.	41

Şekil 4.3 $E_0=100$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.	41
Şekil 4.4 $E_0=150$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.	42
Şekil 4.5 $E_0=200$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.	42
Şekil 4.6 $E_0=250$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.	43
Şekil 4.7 $E_0=300$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.	43
Şekil 4.8 $E_0=350$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.	44
Şekil 4.9 SF_6 molekülünün bağlanma enerjisi spektrumu.	45
Şekil 4.10 (e,2e) ölçümleri sırasında alınan çakışma piki.....	46
Şekil 4.11 SF_6 molekülünün $1t_{1g}$ orbitalinden tekli iyonlaşma olayı için eş-düzlemsel asimetrik kinematikte alınmış TDCS ölçümü.....	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 5.1 SF ₆ moleküler orbitalleri için bağlanma enerjilerinin ölçüm sonuçları ve literatür ile karşılaştırılması. PES Bieri vd. 1982, EMS-1 Weigold vd. 1991, EMS-2 Watanabe vd. 2016, OGVF (outer valence Green's function) teorik hesabı Holland vd. 1995.....	50
---	----



1. GİRİŞ

Elektron çarpışma deneyleri ve teorileri, atom ve moleköl fiziğinde önemli bir araştırma alanıdır. Bu çalışmalar, kuantum mekaniği prensiplerinin atom ve moleküllerin yüklü parçacıklar ile etkileşim dinamikleri üzerindeki etkisini anlamamıza ve bu etkilerin kullanıldığı teknolojilerin gelişmesine olanak tanımaktadır. Deneysel olarak çarpışma olayları, tesir kesiti ölçümleri aracılığıyla incelenmekte, çarpışma sonucunda ortaya çıkan parçacıkların analizi, hedefin yapısı ve etkileşme dinamikleri hakkında ayrıntılı bilgi elde edilmesini sağlamaktadır.

Elektron çarpışmalarının temel amaçlarından biri, hedef atom veya molekölün kuantum yapısını incelemektir. Çarpışma sonucu saçılan parçacıkların enerji ve açı dağılımları, hedefin iç yapısında gerçekleşen kuantum durum değişikliklerini yansıtmaktadır. Bu sayede, hedefin enerji seviyeleri, orbitalleri ve diğer kuantum özellikleri hakkında bilgi elde edilebilir.

Diğer bir amaç ise, elektron ile hedef atom veya moleköl arasındaki etkileşme dinamiklerini anlamaktır. Elektron çarpışmaları sınıflandırılırken etkileşme sonrasında hedefin iç yapısındaki değişim temel alınır. Elastik çarpışma durumunda, enerji ve momentum korunumu geçerlidir; bu da gelen elektronun enerjisinin değişmeden saçılacağı anlamına gelir. İnelastik çarpışma durumunda, gelen elektron enerji transferi yaparak hedefin iç yapısında değişikliklere neden olur. Ayrışma olayında, çarpışma sonucunda molekölün ayrışması veya yeniden düzenlenmesi meydana gelir. Süperelastik çarpışmalarda ise, uyarılmış bir hedef gelen elektrona enerji transferi yaparak kendi enerjisinin düşmesine, saçılan elektronun ise enerji kazanmasına sebep olmaktadır.

Elektron çarpışma deneylerinin teorik izahı, Shrödinger dalga denklemi ve kuantum mekaniği prensipleri kullanılarak yapılmaktadır. Ancak, çok parçacıklı sistemlerde dalga fonksiyonlarının ve etkin potansiyellerin tam olarak belirlenememesi, analitik çözümlerin zorluğu gibi problemlerle karşılaşilmektedir. Bu nedenle, saçılma olayları modellenirken çeşitli yaklaşımlar ve hesaplamalar kullanılarak sistemin davranışı izah

edilmeye çalışılmaktadır. Özellikle tekli iyonlaşma olayında, çarpışmadan sonra açığa çıkan üç yüklü parçacık birbiriyle uzun menzilde etkileşmektedir. Bu durum, üç cisim problemine karşılık gelen kuantum mekaniksel bir durumdur ve analitik çözümü bulunmamaktadır. Bazı yaklaşımlarla nümerik olarak çözülmeye çalışılmaktadır.

Elektron çarpışma fiziğindeki hem deneysel hem de teorik zorluklar nedeniyle, en basit atomik hedef olan hidrojen atomunun saçılma tesir kesitlerinin deneysel verilere uygun şekilde modellenmesi, ancak 1990'lı yılların ikinci yarısında mümkün olmuştur (Yalın vd. 1997, Yalın vd. 1999, Rescigno vd. 1999, Bray 2002). Günümüzde ise daha karmaşık yapıli moleküler hedeflerle yapılan deneysel ve teorik çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir (Al-Hagan vd. 2008, Bartschat 2018, Attia vd. 2023). Ayrıca, elektronların moleküler hedeflerle etkileşimini incelemek için kullanılan teorik modellerin geliştirilmesi, sadece basit moleküllerin çalışılmasının ötesinde, teknolojik ve bilimsel açıdan önem taşıyan moleküllerin etkileşim dinamiklerinin anlaşılması için de büyük bir öneme sahiptir.

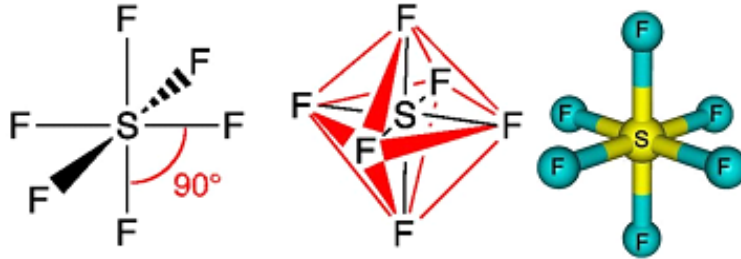
Tesir kesiti ölçümleri, temel ve uygulamalı bilimlerde pek çok araştırma ve uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu ölçümler; plazmaların anlaşılması, uzay çalışmaları, kimyasal süreçlerin izahı, malzemelerin yapılarının belirlenmesi, biyolojik maddelerin etkileşimi ve bazı uydu ile gezegenlerin atmosfer bileşenlerinin radyasyon ve yüklü parçacıklarla etkileşimlerinin modellenmesi gibi konularda önemli bir rol oynamaktadır.

SF₆ molekülü, merkezdeki bir kükürt atomuna bağlanan altı flor atomundan oluşmakta ve son yörüngesinde 6 elektron çifti bulunan bir yapıya sahiptir. Kükürt atomu değerlik elektronlarını özdeş altı flor atomuyla paylaşarak bağ oluşturduğu için F-S-F bağları arasında 90° açı bulunmaktadır. Bu nedenle; düzgün sekiz yüzlü (oktahedral) geometride yüksek bir simetriye sahiptir ve O_h nokta grubuna dahildir (Şekil 1.1). SF₆ molekülünün taban durumundaki elektron dizilimi ağasındaki gibidir.

$$(iç)^{22} (4a_{1g})^2 (3t_{1u})^6 (2e_g)^4 (5a_{1g})^2 (4t_{1u})^6 (1t_{2g})^6 (3e_g)^4 (5t_{1u})^6 (1t_{2u})^6 (1t_{1g})^6$$

Yüksek dielektrik dayanımlı, renksiz, kokusuz, yanmaz özellikte, elektriksel ve

kimyasal kararlılığı yüksek bir gazdır. Yalıtkan kararlılığı, hava ve kuru azottan daha fazladır. Isı emilimi ve ark söndürme performansı nedeniyle günümüzde başta enerji sektörü olmak üzere birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 SF₆ moleküler yapısı şematik gösterimi.

SF₆ iklim değişikliğine sebep olan sera gazlarından biridir. Kyoto Protokolü ve daha geniş bir çerçevede Paris Anlaşması gibi uluslararası sözleşmelerde kullanımı denetlenmesi, azaltılması ve ikame edilmesi gereken altı sera gazından biridir (Hu vd. 2023). Troposferdeki miktarı Ağustos-2023 itibariyle 11.45 ppt (parts per trillion) olarak belirlenmiştir (Lan vd. 2023) ve geniş kullanım alanları olduğu için her geçen yıl artmaktadır (2022’de 0.4 ppt/yıl). Sera gazlarının atmosferik ömrü ve küresel ısınma potansiyeli (GWP; Global Warming Potential) değerlerine bakıldığında, diğer tüm sera gazları içinde en zararlısıdır (Ehhalt ve Prather 2001). Sadece 1 ton SF₆ gazının küresel ısınmaya katkısı, 23500 ton CO₂ ile aynıdır ve atmosferik ömrü 2300 yıldır. Ayrıca, gerilim kesicilerdeki ark söndürme işlevi sırasında yüksek derecede zehirli bileşenlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu nedenlerle SF₆ ile benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, onun yerini alabilecek bileşiklerin araştırılması oldukça güncel ve önemi giderek artan bir araştırma alanıdır (Zhong vd. 2019, Wang vd. 2021, Shi vd. 2023).

Bu tez çalışması, elektron etkisi ile SF₆ molekülünün iyonlaşma dinamiklerini incelemek amacıyla gerçekleştirilen diferansiyel tesir kesiti ölçümlerini sunmaktadır. Giriş bölümünde, elektron çarpışma deneylerinin önemi ve amacı açıklanmıştır. Ayrıca, SF₆ gazının kullanım alanları ve molekül yapısı hakkında bilgi verilmiştir.

Literatür bölümünde; elektron çarpışmalarının tarihi, yapılan deneyler, tesir kesiti

kavramı ve tesir kesiti çeşitleri hakkında bilgilere yer verilmektedir. Ayrıca, SF₆ molekülüyle ilgili literatürdeki tesir kesiti çalışmaları da özetlenmektedir.

Materyal ve metot bölümünde, kullanılan deney düzeneği, ölçüm süreci ve metodolojisi hakkında detaylı bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca, test ve kalibrasyon ölçümleri kapsamında Argon ile yapılmış ölçümler ve sonuçları paylaşılmıştır.

Bulgular bölümü; elektron - SF₆ molekülü çarpışması için ikili diferansiyel tesir kesiti (DDCS; Double Differential Cross Section) ve üçlü diferansiyel tesir kesiti (TDCS; Triple Differential Cross Section) ölçüm sonuçlarını içermektedir. Tartışma ve sonuç bölümünde ise, elde edilen sonuçların yorumu, tezin genel amaçları ile uyumu ve bulgularının özetiyle birlikte sunulmaktadır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Çarpışma deneyleri, belirli momentumdaki kuantum parçacıklarının hedef parçacık ile olan etkileşimlerini incelemektedir. Deneysel olarak, bu etkileşmeler sonucu ortaya çıkan parçacıkların enerji ve açısal dağılımları dedekte edilerek, incelenen fiziksel parametre ile ilgili olan tesir kesitleri ölçülmektedir. Elektron çarpışma deneyleri ise, çarpışma fiziğinin bir alt dalı olarak, elektronlar ile atom, molekül, iyon veya yüzeylerin etkileşimini konu almaktadır. Bu bölümde; elektronların hedef atom/molekül ile çarpışması sonucu oluşan etkileşmeler, tesir kesiti kavramı ve moleküler iyonlaşma süreçleri ele alınacak, SF₆ molekülünün yüklü parçacıklarla olan etkileşimlerinin literatürü sunulacaktır.

2.1 Elektron Çarpışma Deneyleri

Elektron etkisi ile iyonlaşma, atom ve molekül fiziğinde en temel çarpışmalardan biri olarak kabul edilmektedir. Çarpışma deneyleri ile iyonlaşma olayı sonucu ortaya çıkan parçacıkların kinematikleri araştırılmaktadır. İyonlaşma süreci hakkında tam bilgi ancak tüm çarpışma ürünlerinin momentumlarının belirlenmesi ile mümkün olabilmektedir. Elektron çarpışma deneyleri sonucunda elde edilen tesir kesitleri, plazma ve uzay çalışmaları, biyolojik malzemelerde radyasyon hasarının modellenmesi ve hatta kimyasal ve malzeme yapılarının belirlenmesi gibi farklı alanlardaki uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Saçılma deneyleri, bir hedef parçacığının yapısını ve çarpışma sonucu etkileşme dinamiklerini araştırmak için güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. Lenard (1903) tarafından 1903 yılında malzemelerde katot ışınlarının emilimi üzerine yapılan deney, ilk çarpışma deneyi olarak kabul edilmektedir. En ünlü erken dönem çarpışma deneyi ise Rutherford (1911) tarafından α ve β parçacıklarının ince bir altın folyo hedefinden saçılmasının incelenmesidir. Rutherford bu deneyde saçılan parçacıkların açısal dağılımını ölçmüştür ve bu sonuçlardan yola çıkarak atomun çekirdek modeli ortaya çıkmıştır. Ramsauer (1921) H₂, N₂, He, Ne, Ar'dan oluşan bir dizi gaz üzerinde elektron saçılma deneyleri gerçekleştirerek toplam elektron çarpışma kesitlerini ölçmüştür.

Elektron etkisiyle ilk iyonlaşma deneyi, Langmuir ve Jones (1928) tarafından farklı gaz molekülleri için gelen elektronun kaybettiği enerjiyi ölçerek yapılmıştır. Bu deneylerde ayrıca, Ramsauer (1921) tarafından gerçekleştirilen deneylerle uyumlu olan iyonlaşma enerjileri ve rezonans durumları rapor edilmiştir. Rudberg (1930) moleküler azot için enerji kaybı deneyleri yaparak iyonlaşma ve rezonans enerjilerini daha hassas bir şekilde belirlemeyi başarmıştır. Bu iki öncü deney sayesinde, Bethe (1930) tarafından elastik, inelastik ve iyonlaşma çarpışmalarının ayrıntılı bir şekilde analiz edildiği Bethe teorisi geliştirilmiştir.

Bu deneylerin çoğunluğu tesir kesitlerinin enerjiye göre değişimini ölçmeye odaklanmıştır. İyonlaşma süreci hakkında daha fazla bilgi, ikili diferansiyel tesir kesiti (DDCS) ölçülerek elde edilebilmektedir. DDCS, son durum elektronunun enerjisi veya açısal dağılımı hakkında bilgi veren bir parametredir. Hughes ve McMillen (1932) Argon'un DDCS'lerini, 50 ile 550 eV arasında değişen elektron enerjilerinde ölçmüşlerdir. Hughes ve Mann (1938) ise, enerji analizi tekniklerinin kullanıldığı yeni bir yöntem geliştirmiştir.

DDCS ölçümleri ile iyonlaşma süreci hakkında önemli bilgiler elde edilebilmesine rağmen, çarpışma sürecinde yer alan her parçacığın momentumu ölçülmediği için elde edilen bilgi sınırlı kalmaktadır. Elektron-elektron ($e,2e$) çakışma tekniği kullanılarak gerçekleştirilen üçlü diferansiyel kesiti (TDCS) ölçümleri ile, tekli iyonlaşma süreciyle ilişkili gelen ve çarpışma sonucu ortaya çıkan elektronların tüm kinematikleri belirlenebilmekte ve çarpışma ile ilgili detaylı bir değerlendirme yapılabilmektedir. İlk çakışma deneyi sonuçları Amaldi vd. (1969) ile Ehrhardt (1969) tarafından farklı kinematik koşullarda farklı hedefler için yayınlanmıştır. Amaldi vd. (1969)'nin gerçekleştirdiği ($e,2e$) deneylerinde, 14,4 ile 15,2 keV aralığında enerjiye sahip elektron demetleri kullanılarak ince bir karbon film hedef ile çarpışma gerçekleştirilmiş ve açığa çıkan iki elektron eşit enerji ve açılarda ölçülmüştür. Bu tür ölçümler, yaygın olarak bağlama enerjisi spektrumu olarak bilinmektedir. Ehrhardt vd. (1969) sabit açı ve sabit enerjide simetrik olmayan düzlemsel kinematiklerde ($e,2e$) deneylerini gerçekleştirmişlerdir.

Elektron akışma deneylerinin temel amacı, tesir kesiti ölçümleri ile incelenen iyonlaşma sürecinin özelliklerini tanımlamaktır. Aynı zamanda, iyonlaşma sürecinin teorik izahını yapabilmek için modeller geliştirilmekte ve bu teorik modeller kullanılarak yapılan hesaplamaların geçerliliği, deneysel tesir kesiti ölçüm sonuçları ile karşılaştırmalara dayandırılmaktadır. Literatürde hidrojen (Bray vd. 1994) ve helyum (Fursa ve Bray 1995) gibi basit atomik hedefler için teorik ve deneysel çalışmalar arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Çok elektronlu yapıları nedeniyle modellenmesi daha zor olan büyük atomlar için, yüksek elektron enerjilerinde deneysel gözlemlerle kabul edilebilir düzeyde uyum gösteren modeller geliştirilmiştir (Barschat ve Bray 1996, Fursa ve Bray 2005). Karmaşık etkileşimlerin modellere dahil edilmesi zorluğu nedeniyle, özellikle düşük ve orta enerjili elektronlar ile birden fazla atomdan oluşan moleküler sistemlerin etkileşmesi sonucu gerçekleşen iyonlaşma olayının teorik olarak doğru bir şekilde modellenebilmesi çalışmaları günümüzde halen aktifliğini sürdüren bir temel fizik alanıdır. Elektron etkisi ile moleküler hedeflerin iyonlaşmasına ilişkin kinematik parametrelerin hesaplanması, bugün dahi en karmaşık modeller tarafından bile sınırlı bir başarıyla gerçekleştirilmektedir.

2.2 Elektron arpışmalarının Temelleri

Bir elektron çarpışma deneyinde, üretilen elektron demeti hedef atom veya molekl ile arpıştırılmaktadır. Çarpışma sırasında hedefin i yapısındaki değişime göre, süper elastik, elastik ve inelastik süreçler oluşabilir. Süper elastik saçılma terimi, uyarılmış hedefin saçılan elektrona enerji aktararak başlangıçtaki enerjisinden daha yüksek bir enerji ile saçıldığı bir süreç için kullanılmaktadır (Hussey vd. 2008, Kato vd. 2008). Elastik çarpışmalar, hedefin veya gelen elektronunun enerjisinde ve i yapısında bir değişiklik olmadığı çarpışmalar olarak tanımlanmaktadır. Bu tür çarpışmalar, gerçekleşme olasılığı en yüksek olan çarpışma türüdür (Brunger vd. 1991). İnelastik arpışma durumunda ise, gelen elektron hedef parçacığa enerji aktararak saçılmakta ve hedefin iç yapısında değişikliğe neden olmaktadır. Rotasyonel, titreşimsel ve elektronik uyarılmalar, elektron yakalama, iyonlaşma, moleküllerde ayrışma gibi farklı inelastik çarpışma süreçleri bulunmaktadır.

2.2.1 Elastik Çarpışmalar

Elastik saçılma, etkileşim mekanizmalarına göre doğrudan saçılma ve değiş tokuş (exchange) saçılma olmak üzere iki ayrı gruba ayrılabilir. Doğrudan saçılma, gelen elektronun hedef tarafından saçılmasını ifade ederken; değiş tokuş saçılma ise, çarpışma sürecinde gelen elektronun hedefin bağlı elektronu ile değiş tokuş edilmesidir. Değiş tokuş saçılması, gelen ve hedef elektronlarının ayırt edilemez olması nedeniyle deneysel ölçümü zordur. Spin-polarize kaynakların kullanımı ve saçılan elektronun spin analizi ve hedeflerin spin-dönüş kesitlerini ölçerek çarpışmalardaki değiş tokuş etkisinin rolü hakkında bilgi sağlanabilmektedir (Fujimoto vd. 2010).

Saçılma mekanizmaları; dipol saçılma, çarpışma ile saçılma ve rezonans saçılma olarak da sınıflandırılabilir. Farklı mekanizmaların işleyişi, elektronların dalga-parçacık ikiliği kullanılarak açıklanabilmektedir. Dipol saçılmada, gelen elektronun hareket halindeki yükü nedeniyle oluşan elektrik alanının hedef molekülle etkileşime girmektedir, bu nedenle daha uzun mesafeli bir etkileşme menzili mümkün olmaktadır. Bu mekanizma, hedef molekülün dipol momentinin büyüklüğü ile ilişkilidir ve büyük açılara saçılan çarpışma olaylarının çoğuna sebep olmaktadır. Çarpışmayla saçılma durumunda ise, gelen elektron molekül ile doğrudan etkileşir ve bu etkileşim momentum transferi şeklinde daha kısa menzilde gerçekleşmektedir. Bu saçılma mekanizması, elastik çarpışma tesir kesitlerinde küçük açılarda gözlemlenen yüksek değerlerden sorumludur (Woodruff ve Delchar 1999).

Rezonans saçılması, diğer iki doğrudan saçılma mekanizmasından tamamen farklıdır. Gelen elektron, hedef molekülle etkileşime girdiğinde, bağlı veya yarı bağlı (quasi-bound) elektronik orbitale bağlanmaktadır. Bu orbital, genellikle hedefin en düşük dolu olmayan moleküler orbitali (LUMO; lowest unoccupied molecular orbital) olan molekülün uyarılma seviyelerinden biridir ve bu süreç Feshbach rezonansı olarak bilinmektedir. Bunun yanı sıra, saçılma olayı sırasında hedefin dönmesiyle ilişkili açılal momentumdan kaynaklanan bir merkezkaç bariyer, elektronu yakalayabilmektedir. Bu, şekil rezonansı olarak adlandırılır ve Feshbach rezonansına göre oldukça kısa ömüre sahiptir (Woodruff ve Delchar 1999).

2.2.2 İyonlaşma

Elektron etkisi ile iyonlaşma, elektron ile hedef arasındaki çarpışma sonucunda hedef parçacıktan bir veya daha fazla elektronun koparılmasını ifade etmektedir. İyonlaşma sürecini tanımlamak için birçok farklı terim kullanılmaktadır. Doğrudan iyonlaşma, nükleer etkileşme olmadan, elektronun hedeften direkt olarak koparılması anlamına gelmektedir. Bunun aksine, rezonans iyonlaşma ise, ilk çarpışmanın gerçekleşmesinden bir süre sonra rezonans süreci neticesinde meydana gelmektedir. Kendiliğinden iyonlaşma (otoiyonizasyon) bunun bir örneğidir; gelen elektron, önce hedefteki değerlik elektronunu uyarır ve daha sonra hedef elektronunu yayımlamak yoluyla enerji kaybederek iyonlaşır. Tekli veya çoklu iyonlaşma, hedeften iyonlaşan elektronların sayısını ve dolayısıyla son durumda iyonun pozitif yükünün büyüklüğünü belirtmektedir. Açığa çıkan elektronların hangi kabuklardan geldiği de iyonlaşma sürecini tanımlamak için kullanılabilir. Örneğin, büyük miktarda enerji gerektiren iç kabuktan iyonlaşma olayı veya daha serbest halde bulunan dış kabuktan iyonlaşma olayları gibi sınıflandırmalar yapmak mümkün olmaktadır.

Gelen elektronun bir hedef parçacıkla etkileşimi sonucu tekli iyonlaşma olayı şu şekilde ifade edilebilir:



Burada A^+ çarpışma sonucunda oluşan iyonu temsil etmektedir. En olası süreç, iyonun temel durumda kalması ile değerlik kabuğundan bir elektronun koparılması olacaktır. Çarpışma sonrasında iyonun hareketi, elektrona göre çok daha büyük kütleye sahip olması nedeni ile ihmal edilebilir. Denklem (2.1) daha açık bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$e^-(E_0, \vec{k}_0) + A \rightarrow A^+ + e^-(E_a, \vec{k}_a) + e^-(E_b, \vec{k}_b) \quad (2.2)$$

burada E_0 , E_a , E_b ve k_0 , k_a , k_b sırasıyla gelen, saçılan (hızlı) ve kopan (yavaş) elektronların kinetik enerjilerini ve momentumlarını temsil etmektedir. Çarpışma sırasında enerji ve momentum korunmalıdır:

$$E_0 = E_a + E_b + \varepsilon_i \quad (2.3)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_a - \mathbf{k}_b \quad (2.4)$$

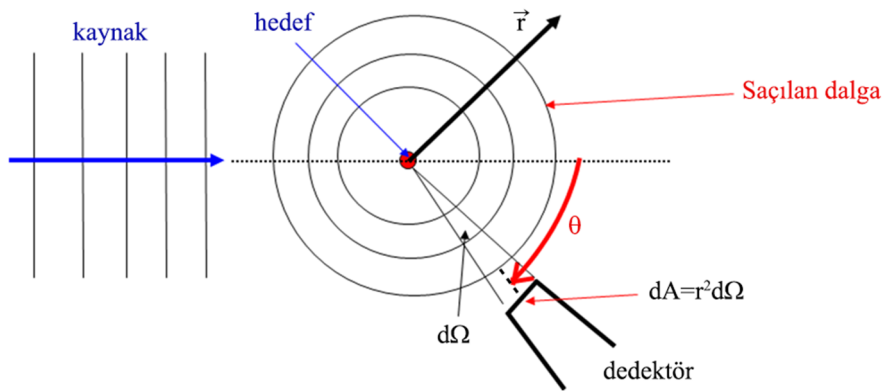
burada ε_i , hedef orbitalin iyonlaşma potansiyelini temsil etmektedir. İyonun geri tepme enerjisi, diğer parçacıkların enerjisine kıyasla çok küçüktür ve ihmal edilebilir. Hedefe aktarılan momentum, κ olarak tanımlanabilir:

$$\kappa = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_a \quad (2.5)$$

Serbestçe hareket eden üç parçacığın varlığı, dört farklı tesir kesitinin tanımlanmasını gerekli hale getirmektedir: toplam tesit kesiti ve tekli, ikili ve üçlü diferansiyel tesir kesitleri.

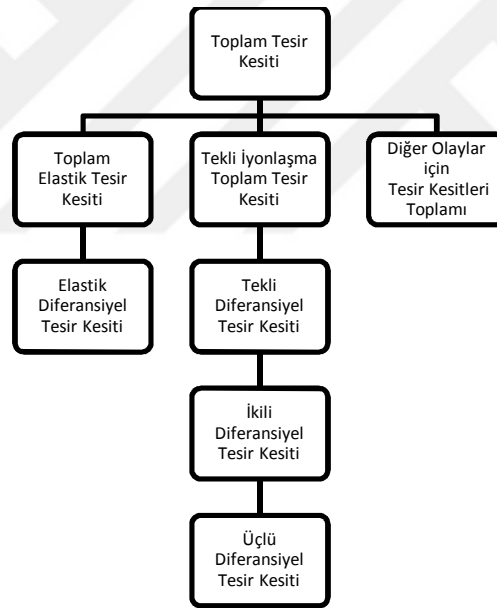
2.3 Tesir Kesiti Kavramı

İki parçacık arasındaki çarpışma olaylarının deneysel olarak ölçümünden elde edilen sonuçlar, tesir kesiti kavramı ile ilişkilendirilmektedir. Belirli bir çarpışma türü için tesir kesiti, birim zamanda saçılan parçacık sayısının ve gelen akı birimi başına saçılan parçacıkların oranı olarak tanımlanabilir. Verilen bir dizi kinematik koşul altında belirli bir çarpışma türünün zamandan bağımsız olasılığının normalize edilmiş ölçüsünü temsil etmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Bir potansiyelden saçılan yüklü parçacıklar için şematik gösterim.

Parçacıkların çarpışmalarıyla ilgili olarak en az bilgiyi sağlayan tesir kesiti, integral tesir kesitidir (Integral Cross Section; ICS) ve genellikle $\sigma(E_0)$ olarak gösterilmektedir (Joachain 1983). ICS, yalnızca gelen elektron enerjisinin (E_0) bir fonksiyonu olup, belirli bir çarpışma süreci için toplam saçılma olaylarının sayısını ifade etmektedir. İyonlaşma durumunda ise toplam iyonlaşma tesir kesiti, oluşan iyonların toplam sayısıdır ve saçılma açlarına veya elektron enerjilerine bağlı değildir. ICS, tüm saçılma açlarına veya tüm enerjilere göre tekli diferansiyel kesitin integralinin alınması ile elde edilebilmektedir (McCarthy ve Weigold 1995). Toplam tesir kesiti, tüm saçılma türleri için integral tesir kesitlerinin toplamıdır ve herhangi bir saçılma olayının toplam olasılığını temsil eder. Şekil 2.2, tesir kesitleri arasındaki hiyerarşik ilişkiyi göstermektedir; üst taraftakiler saçılma olayları hakkında toplam olasılık bilgisi içerirken, aşağı gidildikçe süreçler hakkında daha detaylı sonuçlara ulaşılmaktadır.

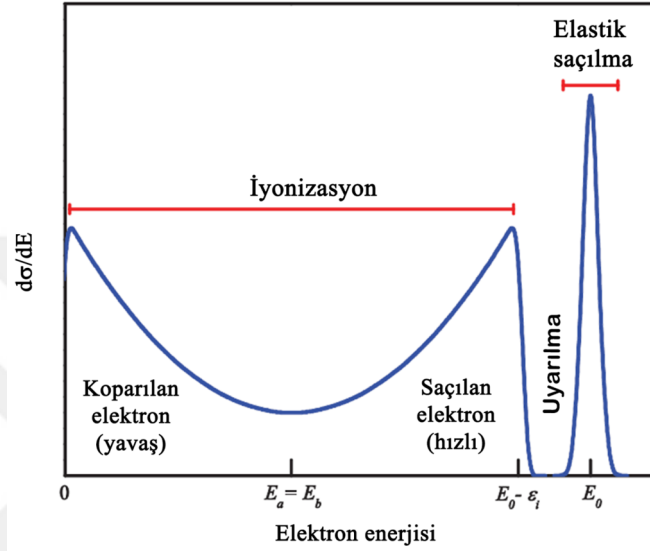


Şekil 2.2 Tesir kesitleri arasındaki hiyerarşik ilişki.

Diferansiyel tesir kesitleri, çarpışma olayı hakkında ICS'den daha fazla bilgi sağlamaktadır, çünkü çarpışan parçacıkların enerjilerine ve/veya parçacıkların algılandığı yöne bağlı olarak ifade edilmektedir. Tekli diferansiyel tesir kesiti (Single Differential Cross Section; SDCS) aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \text{ veya } \frac{d\sigma}{dE} \quad (2.6)$$

SDCS, ortaya çıkan parçacıklardan birinin enerjisine veya katı açısına göre değişim olarak ifade edilebilmektedir. Elastik SDCS'nin deneysel olarak ölçümü, belirli bir enerjideki elektron demetinin hedef parçacık demetiyle 90°'lik bir açıda kesiştiği (çapraz demet yöntemi) deneylerle yapılmaktadır. Saçılan elektron, enerji veya saçılma açısına bağlı olarak algılanmak suretiyle elastik SDCS elde edilmektedir.



Şekil 2.3 SDCS şematik gösterimi. E_0 , E_a ve E_b sırasıyla gelen, saçılan ve koparılan elektronların kinetik enerjilerini; ϵ_i , hedefin iyonlaşma potansiyelini göstermektedir.

İyonlaşma durumunda, enerjiye göre değişen bir SDCS ile oluşan iki elektronun enerji dağılımının bir ölçüsüdür. Kuantum mekaniksel olarak, iki elektron birbirinden ayırt edilemez, ancak asimetric kinematikler altında daha yavaş elektron genellikle koparılan elektron olarak kabul edilmekte ve daha hızlı elektron ise saçılan elektron olarak tanımlanmaktadır. Saçılan elektronun enerjisi iyonlaşmadan sonra kalan toplam enerjiye ($E_0 - \epsilon_i$) yakındır, koparılan elektronun enerjisi ise sıfıra yakın olması daha olasıdır. İkili iyonlaşma olayı için SDCS'sinin elektron enerjisinin fonksiyonu olarak dağılım örneği Şekil 2.3'te verilmiştir. Elektron enerjilerinin birbirine eşit olduğu durumda tesir kesitinde bir minimum olduğu açıktır, bu da saçılan ve koparılan elektronlar arasında eşit enerji paylaşımının olduğu en az olası süreci göstermektedir. İyonlaşma olayında SDCS'nin enerjiye bağımlılığı deneysel olarak doğrudan ölçülemez. Bu tesir kesitini elde etmek için, çıkan elektronların tüm açılara göre integre edilmesi gerekmektedir (Ehrhardt 1986).

İkili diferansiyel tesir kesiti (DDCS), iyonlaşma olayından sonra saçılan veya koparılan elektronlardan birinin enerji ve açı dağılımının ölçülmesi ile elde edilmektedir. DDCS, elastik SDCS elde etme sürecine benzer şekilde çapraz demet yöntemi kullanılarak ölçülebilir. Yüksek ve orta gelen elektron enerjilerinde, elektronlardan daha hızlı olanının ileri yönde ve dar bir açı aralığında saçılması daha olasıdır. Daha yavaş olan elektron ise tüm yönler yayılabilmektedir. Gelen elektron ile doğrudan ikili çarpışma sonucu ortaya çıkan yüksek enerjili elektronlar nedeniyle tesir kesitlerinde bazı karakteristik yapılar oluşmaktadır (Ehrhardt 1986).

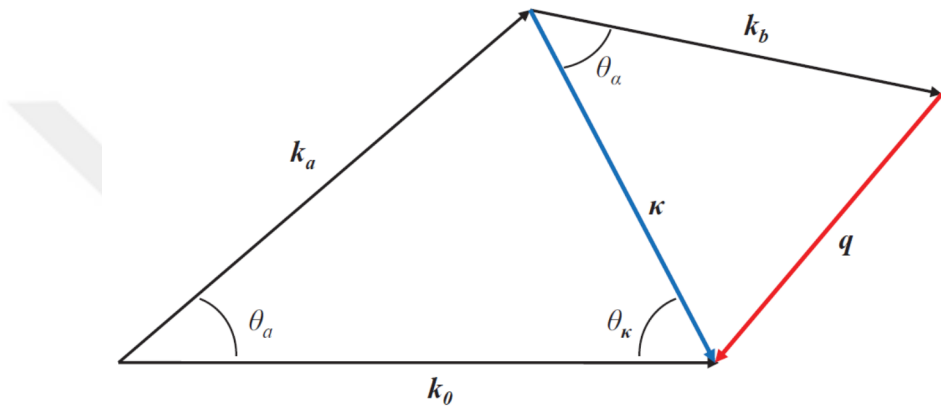
Deneysel DDCS ölçümlerinde tek bir elektron üzerinden ölçüm yapıldığı için, algılanan elektronun hangi süreçten geldiği ve hangi orbitalden koparıldığı belirsizdir. Bu nedenle, DDCS'yi tanımlamak için kullanılan teorik modellerin, tesir kesitine katkıda bulunabilecek tüm olası süreçleri ve durumları içermesi gerekmektedir. Bu durumu aşmak için, saçılan ve koparılan elektronların enerji ve momentumlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, elektron çakışma tekniği kullanılarak gerçekleştirilen TDCS ölçümü yapılmaktadır.

TDCS, bir hedef parçacığın belirli bir enerji (E_0) ve momentum (k_0) ile gelen elektron tarafından iyonlaştırılmasından sonra, iki elektronun belirli enerjiler (E_a ve E_b) ve belirli momentum (k_a ve k_b) ile, Ω_a ve Ω_b katı açılarına saçılma olasılığını ifade etmektedir (Denklem 2.8). İyonlaşma deneylerinde tüm parçacıkların kinematiği belirlendiğinde, iyonlaşma mekanizmasının dinamiği ve hedef elektronun iyonlaştığı orbitale ait momentum dağılımının anlaşılması olanaklı hale gelmektedir.

$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_a dE_a dE_b} \quad (2.8)$$

Elektron-elektron ($e,2e$) çakışma tekniği, TDCS'nin ölçümü aracılığıyla elektronların spinleri hariç tüm kinematiğini belirlemek için kullanılmaktadır. Saçılan ve koparılan elektronlar arasındaki zaman uyumu analiz edildiğinde, elektron çifti aynı iyonlaşma olayı ile bağlantılı hale getirilebilmektedir. İyonlaşma sürecine ait gelen, saçılan ve koparılan elektronların tüm kinematiği belirlendiğinden, teorik modeller açısından belirsiz parametreler ortadan kalkmakta ve sürecin mekanizmasının doğru bir şekilde

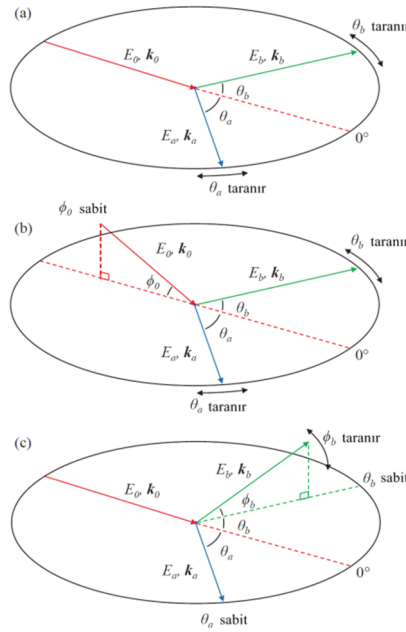
modellenmesi mümkün olabilmektedir. İyonlaşma ile sonuçlanan çarpışma sürecini anlamaya çalışırken, iyonun kazandığı momentum, q ve momentum transfer vektörü, κ olmak üzere iki temel kinetik parametre bulunmaktadır. İyonun kazandığı momentum, momentumun korunumu yoluyla elde edilebilir (Denklem 2.4), momentum transferi ise, gelen elektronunun başlangıç ve son durumu arasındaki momentum değişimi olarak tanımlanmaktadır (Denklem 2.5). Şekil 2.4, bir iyonlaşma olayı sırasında momentum transferini gösteren bir vektör diyagramıdır.



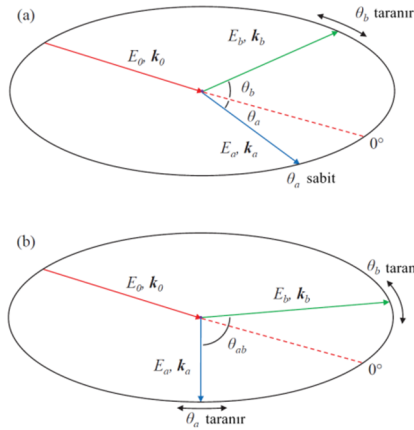
Şekil 2.4 Momentum transferinin vektör diyagramı.

Çarpışma sürecinde hedef iyonla aktarılan momentumun büyüklüğü önemli bir parametredir. Küçük ve orta büyüklükteki (1 atomik birimden küçük) momentum transferi değerleri hedef parçacığın yapısıyla ilgili bilgi sağlarken, büyük (1 atomik birimden büyük) momentum transferi değerleri ise çarpışma olayının dinamiğiyle ilgili bilgi sağlamaktadır. Yapısal çalışmalarda iyonla çok az momentum transferi yapılarak, aslen hedefe bağlı olan elektrona odaklanıp orbital iyonlaşma potansiyelleri ve momentum dağılımlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Yapısal tesir kesiti ölçümleri ayrıca hedefin çekirdeği etrafındaki elektron momentum dağılımının belirlenmesine olanak tanıyan yörüngeye özgü momentum yoğunluklarını da tespit etmektedir (Coplan 1994). Yapısal çalışmalarda iyonlaşma süreci sadece bir araçtır ve çarpışmanın dinamiği hakkında çok az bilgi elde edilmektedir (Erdhardt vd. 1986). Çarpışma dinamiğini önceleyen TDCS ölçümleri ise, distorsiyon etkileri ve parçacıklar arasındaki çarpışma sonrası etkileşimler gibi iyonlaşma süreçleriyle ilgili ayrıntılı bilgiler sağlaması nedeniyle yapısal ölçümlerden farklılık göstermektedir.

TDCS'nin deneysel ölçümü sırasında değiştirilebilecek kinematik parametre seti (E_0 , E_a , E_b , Ω_a ve Ω_b dahil) göz önüne alındığında, elektron etkisi ile iyonlaşma sürecinin farklı fiziksel özelliklerine ilişkin bilgi elde etmek için TDCS'nin farklı kinematik varyasyonları kullanılabilir. TDCS ölçümlerinde genellikle beş kinematik geometri kullanılmaktadır: eş-düzlemsel simetrik (Şekil-2.5a), eş-düzlemsel olmayan simetrik (Şekil-2.5b ve Şekil-2.5c), eş-düzlemsel asimmetrik (Şekil-2.6a) ve eş-düzlemsel sabit karşılıklı açı (Şekil-2.6b). Üç simetrik geometri Şekil 2.5'de gösterilirken, sabit karşılıklı açıyı içeren iki asimmetrik kinematik geometri Şekil 2.6'de gösterilmiştir.



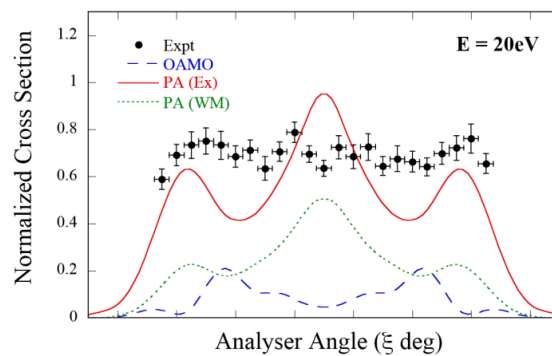
Şekil 2.5 Simetrik çarpışma geometrileri.



Şekil 2.6 Asimetrik çarpışma geometrileri.

Bir kinematik geometrinin simetrik olarak sınıflandırılabilmesi için, çarpışmadan sonra oluşan elektronların enerjilerinin ve açıların eşit olması gerekmektedir ($E_a=E_b$, $\Omega_a=\Omega_b$). Buna karşılık asimetrik geometriler, daha hızlı olan elektronun genellikle 20°'den küçük sabit bir açıda algılandığı düzenlemeyi gösterirken, daha yavaş elektronun açısının saçılma düzlemi içinde serbestçe hareket edebildiği bir düzenlemeyi ifade etmektedir. Eş-düzlemsel kinematik geometrisi ise; gelen, saçılan ve koparılan elektronların aynı düzlemde bulunduğu bir düzenleme anlamına gelmektedir.

Tekli iyonlaşma ile sonuçlanan bir çarpışmanın ürünü olan elektronlar arasında enerji paylaşımının eşit olması simetrik kinematiklerin bir gerekliliğidir ($E_a=E_b$). Şekil 2.3'ten açıkça görüldüğü gibi, eşit enerji paylaşımı olasılığı en az olan süreçtir ve bu nedenle simetrik kinematikler altında tesir kesiti ölçümü zor olmakta ve bu kinematiklerde saçılan ve koparılan elektronların farklı enerjilerde değerlendirilmesi gerekmediğinden, buradan edinilen bilgi asimetrik geometrilere göre daha sınırlı kalmaktadır. Eş-düzlemsel olmayan geometriler, bir elektronun saçılma düzlemine ϕ açısıyla yerleştiği kinematik düzenlemeleri ifade etmektedir. Eş-düzlemsel olmayan TDCS ölçümü ile elde edilen bilgi, momentum transfer vektörünün saçılma düzlemi dışında düşey bileşeni olduğu için eş-düzlemsel ölçümden büyük ölçüde farklıdır. Yaygın olarak kullanılan eş-düzlemsel simetrik geometride ölçülen bir TDCS örneği Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Saçılan ve koparılan elektronların enerjileri eşit olduğundan gelen elektronun momentumunun önemli bir kısmının iyonla aktarıldığı kabul edilebilir. Elektronlara aktarılan momentum miktarı ise sabit değildir, çünkü hem Ω_a hem de Ω_b saçılma düzlemi boyunca değişmektedir.

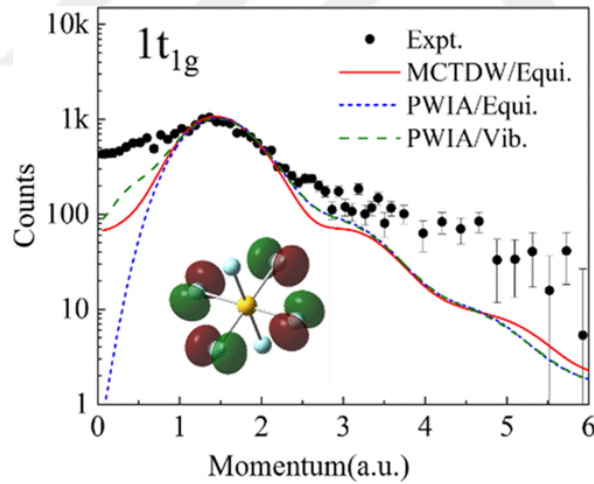


Şekil 2.7 SF6 molekülünün en dış orbitalinden iyonlaşma olayı için yapılmış örnek bir eş-düzlemsel simetrik geometride TDCS ölçüm sonucu (Nixon vd. 2016).

Çarpışma sırasında gelen elektron tarafından sisteme aktarılan momentum transfer vektörü Şekil 2.4 kullanılarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\kappa^2 = \mathbf{k}_0^2 + \mathbf{k}_a^2 - 2|\mathbf{k}_0||\mathbf{k}_a|\cos(\theta_a) \quad (2.9)$$

Eş-düzlemsel olmayan simetrik kinematik geometrideki yüksek enerji (e, 2e) deneyleri, genellikle Elektron Momentum Spektroskopisi (EMS) deneyleri olarak bilinir. Gelen elektronun enerjisi yüksek olduğu için düzlem dalga olarak ele alınmaktadır. Geri tepme iyon momentumu değiştirilerek hedefteki her orbitalin momentum profili elde edilmektedir. Şekil 2.8, koparılan elektronun düzlem dışı açısı değiştirilerek geri tepme iyon momentumunun taranması yoluyla yapılan bir EMS deneyinin sonucunu göstermektedir. Bu çalışmada, gelen elektron enerjisi 1200 eV + BE (bağlanma enerjisi) iken SF₆ molekülünün 1t_{1g} orbitali için alınmış deneysel ölçümler ve bu yapısal çalışmayı modellemeye çalışan farklı teorik hesaplamalar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

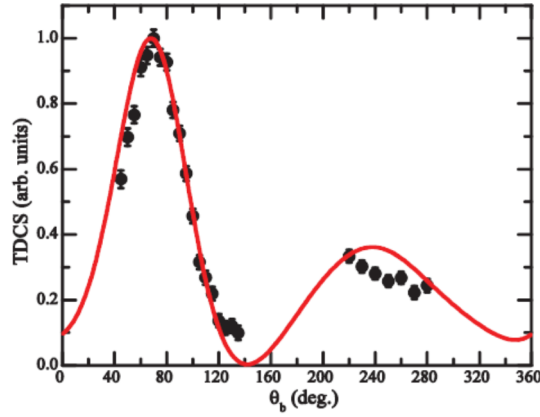


Şekil 2.8 SF₆ molekülünün 1t_{1g} yörüngesi için eş-düzlemsel olmayan simetrik geometride yapılan EMS çalışması ile ölçülen bir TDCS örneği (Zhang vd. 2023).

Asimetrik kinematikler altında ölçülen tesir kesitleri, etkileşen parçacıkların enerjilerine ve momentumlarına bağlı olarak aynı anda hem yapısal hem de dinamik bilgi sağlayabilmektedir. TDCS'deki ileri (binary) ve geri tepme (recoil) bölgelerin özellikleri, çarpışma sürecinin karakteristiklerini tanımlarken, TDCS'nin şekli iyonlaşmanın gerçekleştiği orbital tipini göstermektedir. İleri bölge veya pik olarak

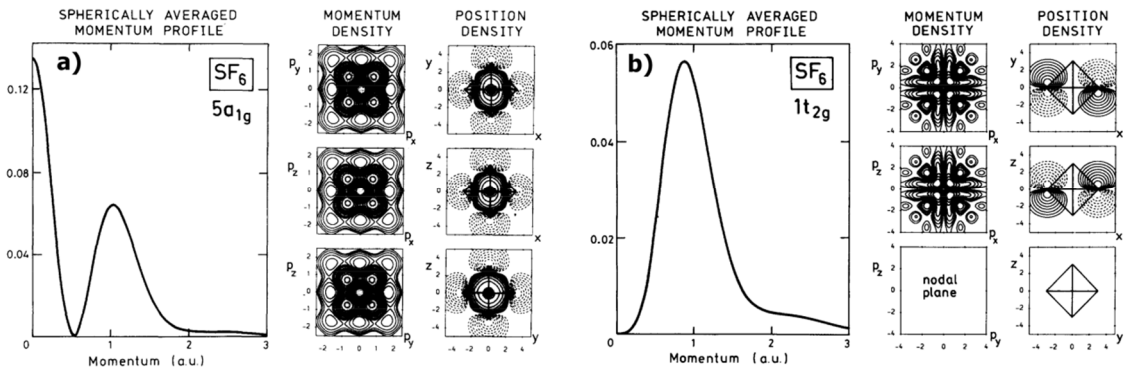
adlandırılan bölge, bağlı elektronun hedefe bağlı elektron ile ikili (binary) çarpışması sonucu koparılmasından kaynaklanırken, geri tepme bölgesi, çarpışma sonucunda oluşan iyon ile ardışık bir geri tepme (recoil) çarpışması gerçekleştiren elektrondan kaynaklanmaktadır.

Düşük ve orta elektron enerjili iyonlaşma enerjilerinde (gelen elektron enerjisinin hedef orbitalin bağlanma enerjisinin 20 katı veya daha küçük olduğu), momentum transferi değeri büyüktür (Stefani vd. 1993). Bu enerji bölgesinde, çarpışma sürecinin dinamiğiyle ilgili bilgiler elde edilmektedir. Yüksek çarpışma enerjilerinde (bağlanma enerjisinin 20 katından büyük), hedef parçacık ile gelen elektron arasındaki etkileşim ihmal edilebilir hale gelir ve aktarılan momentum miktarı küçüktür. Bu durumda; gelen elektron düzlem dalga olarak kabul edilebilir ve bir fotona benzer davranmaktadır, çünkü parçacıkların etkileşme olasılığı düşük olduğu için yük önemsiz hale gelmektedir. Asimetrik kinematiklerdeki TDCS ölçümleri, EMS deneylerinde yapılan ölçümlere benzer şekilde, hedef parçacığının yapısıyla ilgili bilgiler sağladığı gibi, aynı zamanda etkileşmenin dinamiği ile ilgili bilgi içermektedir. Bir asimetrik kinematikte TDCS'nin şekli, çarpışma sürecinin yapısal veya dinamik koşulları tarafından belirlenmektedir. İyonlaşmanın yapısal olarak s-tipi orbitalden gerçekleştiği bir durum için ölçülen TDCS'nin bir örneği Şekil 2.9'da verilmiştir. Bu tip bir s-tipi orbitalden iyonlaşma olayında, ikili bölgede (0° ile 180° arasında) bir tek pik ve geri tepme bölgesinde (180° ile 360° arasında) ikinci bir pik gözlenmektedir. Diğer yandan, p-tipi orbitalden kaynaklanan iyonlaşma olayında, ikili bölgede çift pik ve geri tepme bölgesinde ikinci bir pik beklenmektedir. Geri tepme bölgesindeki pik genellikle yalnızca tek bir pik olarak oluşur, çünkü elektronun iyonlaştığı orbitalin şeklinden bağımsızdır. Geri tepme pikinin büyüklüğü, belirli bir durumdan iyonlaşan elektronlar ile hedefin çekirdeği arasındaki etkileşimin şiddetini göstermektedir ve genellikle ikili pik ile karşılaştırıldığında, iyonlaşma olan orbitale bakılmaksızın büyüklük olarak daha küçüktür. Yüksek enerji durumunda, ikili ve geri tepme piklerinin momentum transfer yönüne göre simetrik olması beklenmektedir. Bununla birlikte, düşük çarpışma enerjilerinde çarpışmadan sonraki etkileşim (Post-collision interaction; PCI) etkileri mevcuttur, bu durum ikili ve geri tepme bölgelerinin konumunda kaymalara neden olarak momentum transfer yönüne göre simetri durumunu bozabilmektedir.



Şekil 2.9 Helyum atomunun s-tipi orbitalinden gerçekleşen bir iyonlaşma olayı için alınmış örnek TDCS spektrumu (Milne-Brownlie vd. 2006).

TDCS'deki ikili bölgenin şekli, koparılmadan önce bağlı elektronun momentum dağılımı tarafından belirlenmektedir. S-tipi karakteristiklere sahip orbitaler, geri tepme iyon momentumu sıfıra yaklaştıkça maksimuma ulaşan bir olasılık dağılımına sahipken; p-tipi orbitaler, geri tepme iyon momentumu sıfıra yaklaştıkça sıfıra yaklaşan bir dağılıma sahiptir. Koparılan elektron momentumunun büyüklüğünün hedefe aktarılan momentumun büyüklüğüne karşılık geldiği kinematik düzenlemelerde, bağlı Bethe çizgisi kinematiği karşılanmış olup (Bethe ridge condition), momentum transfer yönü sıfır geri tepme iyon momentumuna karşılık gelmektedir (McCarthy ve Weigold 1995). Bir dizi elektron geri tepme momentumu için bir s-tipi veya p-tipi elektron bulma olasılığı Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 SF6 molekülü için yapılmış EMS çalışmasında a) s-tipi ve b) p-tipi orbitaller için; ölçülen momentum profili, momentum yoğunluğu ve elektron bulunma olasılığı gösterimi (Weigold vd. 1991).

2.4 Elektron – SF₆ tesir kesiti literatürü

SF₆ molekülünün elektriksel izolasyon ve ark söndürme amaçlı endüstriyel kullanımının yaygınlığı nedeniyle, literatürde SF₆'nın özellikle toplam saçılma tesir kesiti (TCS; Total Cross Section) üzerine yapılan çalışmalar sıkça bulunmaktadır (Goswami ve Antony 2014, Joshipura vd. 2004, Park vd. 2022). Bu deneysel ve teorik çalışmalar sayesinde, SF₆'nın gaz formunda ve basınç altında yüklü parçacıklarla etkileşimi incelenmiştir.

Endüstriyel kullanımının yanı sıra yüksek derecede simetrik ve çok merkezli yapısı nedeniyle, temel düzeyde moleküler yapıların anlaşılması ve elektron-molekül etkileşimlerinin incelenmesi için de ilgi çeken bir hedeftir. SF₆'nın özellikle düşük enerjili (1-10eV) elektronlarla olan titreşim seviyelerinin uyarılması, rezonansı gibi etkileşimiyle ilgili literatür de nispeten zengindir (Fabrikant vd. 2005, Fedus 2022; Winstead ve McKoy 2004).

Son yıllarda, SF₆ molekülünün elektron momentum spektroskopisi (EMS) tekniği kullanılarak elektron momentum profillerini ölçen yapısal çalışmalar dikkat çekicidir (Wang vd. 2018, Wang vd. 2020, Watanabe vd. 2016, Watanabe vd. 2019, Zhao vd. 2015). Bu alandaki araştırmalar, molekülün orbital yapısının elektron momentum profilindeki girişim etkisini incelemeye yöneliktir. Bu çalışmalar, EMS tekniğinin doğası gereği, yüksek enerjili elektronlar (>1 keV) kullanılarak yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının konusu olan orta enerjili elektron etkisiyle iyonlaşma olayının tesir kesitlerinin ölçümüne yönelik literatür ise oldukça kısıtlıdır. Al-Nasir vd. (1996) çalışmalarında 100 ve 200 eV enerjili elektronlarla yaptıkları deneysel çalışmada kısıtlı DDCS ölçümleri gerçekleştirmiş, ancak tekli iyonlaşma olayı için gözlem yapamadıklarını belirtmiştir. Çalışmalarında SF₆ molekülünün elektronla etkileşmesi sonucu SF₅⁺, SF₄⁺, SF₃⁺ gibi fragmentlerine ayrılarak iyonlaşmasına ilişkin DDCS ölçümleri yapmışlardır. Pal vd. (2004) çalışmalarında 100, 150 ve 200 eV enerjili elektronlarla iyonlaşma için yarı-ampirik bir yaklaşımla tekli diferansiyel tesir kesitlerinin teorik hesaplanmasını yapmışlardır. SF₆ molekülünün hem uygulamada hem de temel çarpışma fiziğinde önemine karşılık, iyonlaşma olayının detaylı kinematik

durumlarının incelenmesine yönelik çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Nixon vd. (2016) çalışması ile düşük enerji ve simetrik kinematikte (saçılan ve koparılanın aynı açısı ve enerjide varsayıldığı) TDCS ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Bu tez çalışması ile, SF₆ molekülünün orta enerjilerde DDCS ve TDCS ölçümlerinin yapılarak iyonlaşma olayının asimetric kinematikte detaylı incelenmesi hem literatüre ilk defa yapılacak olan bir katkıdır, hem de kullanıldığı alanlardaki yüklü parçacıklarla etkileşme süreçlerinin daha iyi anlaşılması ve moleküler orbital yapısının modellenenebilmesi için son derece önemlidir.

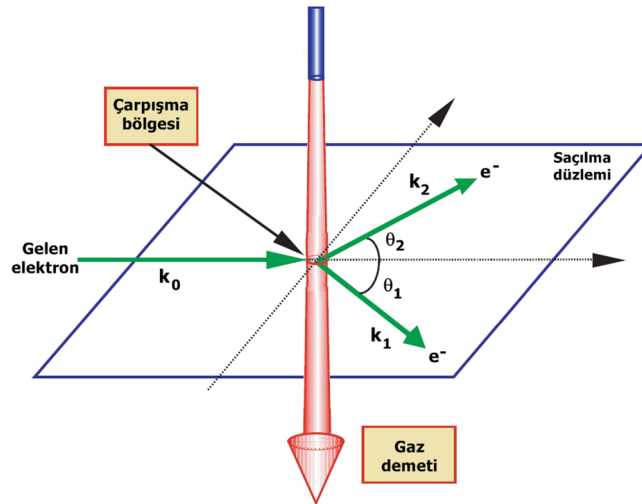


3. MATERYAL ve METOT

Bu tez çalışması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fizik Bölümü'nde bulunan e-COL Laboratuvarında yapılmıştır. Bu bölümde, elektron çarpışma deneylerinde kullanılan elektron spektrometre deney düzeneğinin çalışma prensibi, bileşenleri ve bunların özellikleri, ayrıca (e, 2e) ölçümlerinde kullanılan veri analiz yöntemi olan çakışma istatistiği açıklanmıştır. Deney düzeneğinin kararlı olarak çalıştığını kontrol etmek için bir dizi test ve kalibrasyon ölçümleri yapılmış, bu ölçümler de bu bölümde sunulmuştur.

3.1 Elektron Spektrometresi

Bu çalışmada yapılan deneysel ölçümler, elektron spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu spektrometre, elektron kaynağında oluşturulan monokromatik bir elektron demeti ile kapiler boru ile homojen şekilde püskürtülmüş gaz demetinin dik olarak kesiştiği bir düzleme sahiptir. Elektron ile hedef atom/molekülün çarpışması, etkileşme bölgesi olarak bilinen kesişimde, belirli bir hacimde gerçekleşmektedir. Çarpışmadan sonra ortaya çıkan elektronlar, gaz demetine dik bir düzlemde bulunan iki elektrostatik yarı küresel analizör tarafından algılanmaktadır. Her iki analizör de birbirinden bağımsız olarak dönebilen çarpışma düzlemi üzerinde konumlandırılmış ve çarpışma sonucu ortaya çıkan elektronları dedekte etme görevini yerine getirmektedirler (Şekil 3.1).

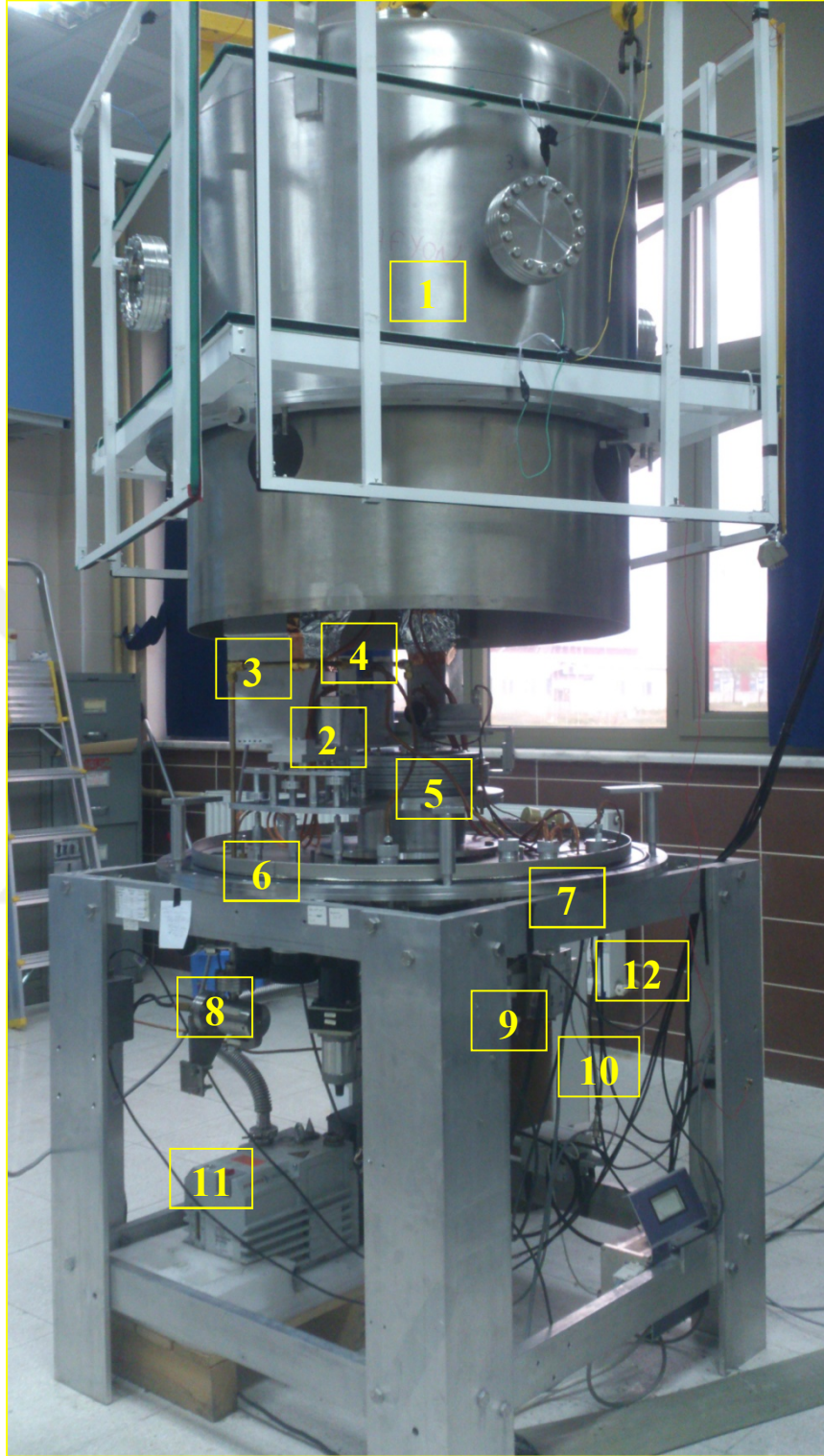


Şekil 3.1 Çarpışma düzleminin geometrisi.

Analizöre gelen elektronlar, tek kanallı elektron çoğaltıcı (Channel Electron Multiplier; CEM) kullanılarak dedekte edilmektedir. Elektronların kaynakta üretimi, enerji analizi ve dedekte edilmelerini sağlayan tüm bileşenler bir vakum odacığı içinde bulunmakta olup, çember dışındaki mekanik kontrolörler aracılığı ile hareketli parçaların pozisyonları ayarlanmaktadır. Dedektörde üretilen sinyal çember dışına taşınarak, sinyal işleme ünitesi bileşenleri ile bilgisayar ortamına aktarılarak gerekli analizler yapılmaktadır. Elektron çarpışma spektrometrisi olarak bilinen bu süreç kullanılarak, gelen elektronlar ile ortaya çıkan elektronların açısı ve enerjisi arasındaki ilişki tespit edilerek elde edilen elektron sayımlarından ve zaman analizlerinden tesir kesitleri hesaplanmaktadır. Elektron spektrometresinin genel görünümü Şekil 3.2’de sunulmuş, ana parçaları fotoğraf üzerinde işaretlenmiştir.

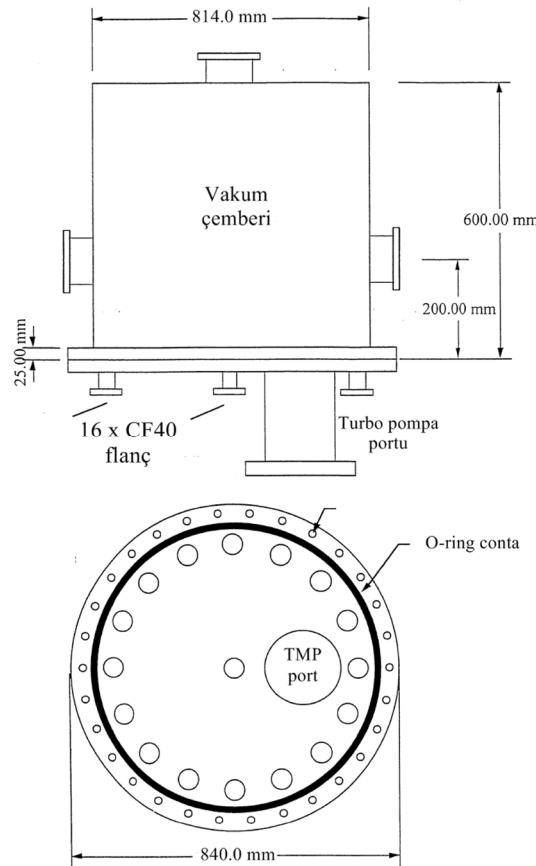
3.1.1 Vakum Sistemi

Çarpışma spektrometresinin oturduğu vakum çemberinin taban plakası, 840 mm çapında ve 35 mm kalınlığındadır (Şekil 3.3). Spektrometrenin iç kısmını koruyan silindirik bir kapak vardır ve bu kapak 814 mm çapında ve 600 mm yüksekliğindedir. Taban plakası ile silindir arasında bulunan tek bir neobren o-ring ile iki parçanın birleşmesi sağlanır. Çember yapımında manyetik olmayan özellikleri nedeniyle seçilen 310 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Vakum çemberinin içinde, harici manyetik alanların etkisini azaltmak için 3 mm kalınlığında bir μ -metal silindirik iç çember vardır. Ayrıca, çarpışma bölgesindeki yeryüzünün manyetik alanının, bu alana zıt yönde uygulanan bir manyetik alan ile azaltılması amaçlanmış ve bunun için üç eksenli, 90° açılı Helmholtz bobinleri kullanılmıştır. Elektron yörüngelerine etki yapmamak için spektrometrenin tüm parçalarında manyetik olmayan malzemeler kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 Bu çalışmada kullanılan elektron spektrometre sisteminin fotoğrafı. Vakum odacığı (1), elektron tabancası (2), enerji analizörü (3), gaz hattı (4), hareketli tablalar (5), mekanik feedthrough (6), elektriksel bağlantılar için feedthrough (7), giriş valfi (8), turbo-moleküler pompa (9), ara bağlantı (10), rotary pompa (11).

Yüksek vakum altında spektrometrenin görsel kontrolü için çemberin yanal yüzeyinde, elektron tabancasının arka tarafında muhtemel X-ışınlarını soğurması için kurşun alaşımlı cam ile kaplı CF60 gözlem deliği bulunmaktadır. On altı adet CF40 flanş vakum odasının taban plakası iç kenarında bir halka şeklinde konumlandırılmıştır. Bu flanşlar, çarpışma spektrometresini kontrol için mekanik, sinyal ve besleme için elektrik geçişlerini (feedthrough) sağlamaktadır. Taban plakanın ortasında, dışarıdan yerleştirilmiş bir Pfeiffer HiPace 80 turbomoleküler pompa ile bağlantı kuran 8 inçlik bir Conflat flanş bulunmakta ve bu pompa bir Pfeiffer DUO20M mekanik rotary pompa tarafından desteklenmektedir. Vakum odası yaklaşık olarak 1×10^{-8} mbar baz basınca kadar boşaltılabilir, ancak deneysel ölçümler sırasında normal işletme basıncı yaklaşık olarak 5×10^{-6} mbar civarında tutulmaktadır. Odanın basıncı, Pfeiffer TPG 262 Dual Gauge vakumölçer ile ölçülmektedir. Bu vakumölçer, atmosfer basıncından 10^{-9} mbar mertebesine kadar aralıksız ölçüm yapabilmektedir ve başka bir vakumölçere ihtiyaç duyulmamaktadır (Özer 2013).



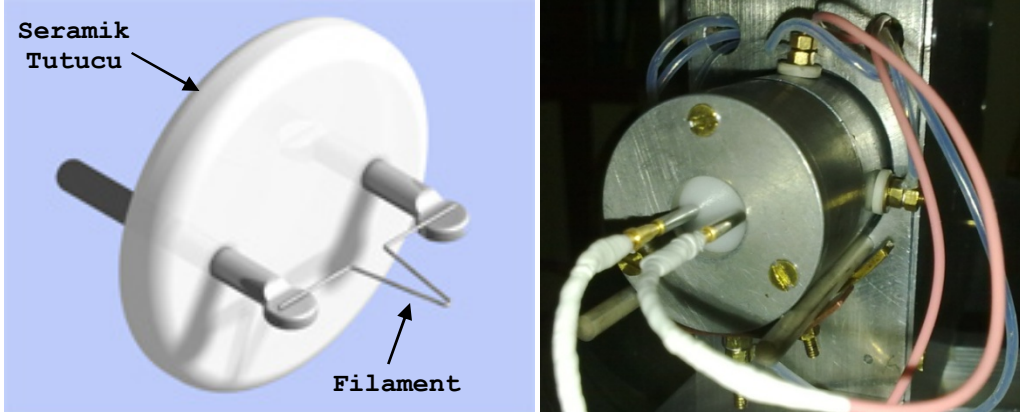
Şekil 3.3 Vakum çemberinin şematik çizimi.

Odanın taban plakasına yaklaşık olarak 10 cm yükseklikte, 440 mm çapında ve 10 mm kalınlığında daha küçük bir plaka monte edilmiştir. Bu plakanın üzerinde, birbiri içine geçmiş ve bağımsız olarak dönebilen iki adet döner tabla bulunmaktadır. Alt tabla, tabak üzerinde pürüzsüz bir şekilde dönmesine olanak sağlayan, bir paslanmaz çelik halka tarafından düzenli aralıklarla yerleştirilmiş 4 mm seramik bilyelerle dolu v-şeklinde bir kanala sahiptir. Üst ve alt tablalar birbirinden bağımsız olarak aynı yöntemle hareket ettirilebilmektedir. Her bir tabla, döner mekanik geçiş vasıtasıyla bir kontrol makaralarına bağlanmıştır. Saçılan ve kopan elektron enerji analizörleri döner tablolara monte edilmiştir.

3.1.2 Elektron Tabancası

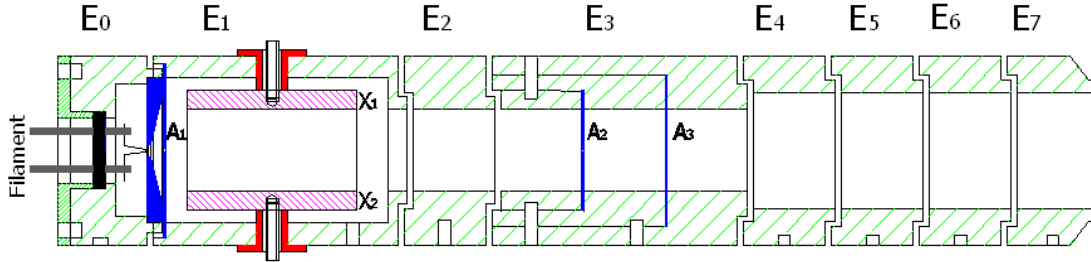
Elektronların katot ile üretilerek istenilen enerjide hızlandırılıp, lensler ile demet olarak etkileşme bölgesine odaklama yapıldığı kısımdır. Elektron kaynağı olarak elektriksel olarak ısıtılan tungsten filament kullanılmaktadır. Elektron spektrometresinin çözünürlüğünü olumsuz yönde en fazla etkileyen bileşendir. Termoiyonik olarak elektron yayımlayan filament sadece tek bir enerjide değil, Maxwell-Boltzman dağılımına göre $\Delta E = 2,54 kT$ aralığında elektron üretmektedir. Tungsten filamentinden $\sim 2,2 A$ akım geçirilerek ısıtıldığında yaklaşık $T=2400\text{ }^{\circ}C$ sıcaklığa ulaşmaktadır. Buna göre, yayınlanan elektronların enerji dağılımı $\Delta E = 2,54 kT = 0,5 eV$ olmaktadır. Başka bir deyişle, elektron çarpışma deneyinde sistemin toplam çözünürlüğünün en küçük değeri $0,5 eV$ 'dir. Enerji analizöründeki ayırma gücü de düşünüldüğünde, toplam çözünürlüğe en büyük etkiye sahip elektron tabancasında üretilen demetin stabilitesi, akımı ve odaklanmasının uygun bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Deneyler boyunca akımın ve çapının uzun süre kararlı kalması istenmektedir (Şekil 3.4).

Deney sisteminde üç bölümden oluşan bir elektron tabancası kullanılmaktadır. Elektronların termoiyonik yolla yayımlanmasını filament gerçekleştirirken, elektrostatik lens sistemi demetin odaklanmasını ve yönlendirilmesini sağlar. Aperture (ortasında dairesel açıklık olan) diskler de elektron demetinin radyal dağılımını belirlemektedir. Son olarak, demetin eksen kontrolünü sağlamak için yatay ve dikey deflektörler kullanılmaktadır (Ulu vd. 2007).



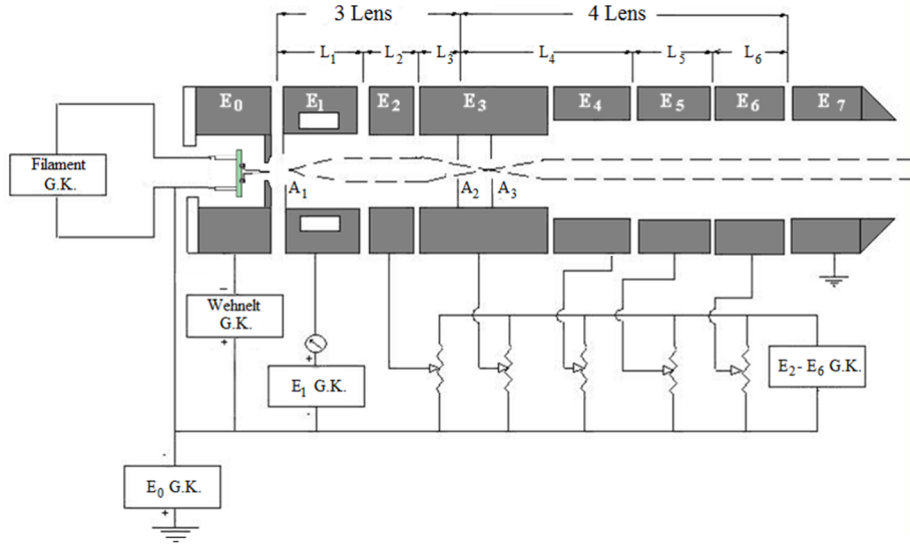
Şekil 3.4 Elektron kaynağı olarak kullanılan filament ve elektron tabancası içine yerleşimi.

Elektron tabancasının katot bölgesini takiben, hedeflenen boyuttaki bir elektron demetini elde etmek amacıyla anot çıkışına, silindirik elektrotlar içeren bir elektrostatik lens sistemi yerleştirilmiştir. Filament, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi E_0 lensinin içine yerleştirilmiştir. Elektronlar, filamentten çıktıktan sonra birinci lens sistemi (E_1, E_2, E_3) tarafından dairesel bir delik içinden geçirilir ve ikinci lens sistemi (E_3, E_4, E_5, E_6) tarafından çarpışma bölgesine yönlendirilir. Şekil 3.5'te elektron tabancasına ait teknik çizim sunulmuştur.



Şekil 3.5 Elektron tabancasının teknik çizimi (Ulu vd. 2007).

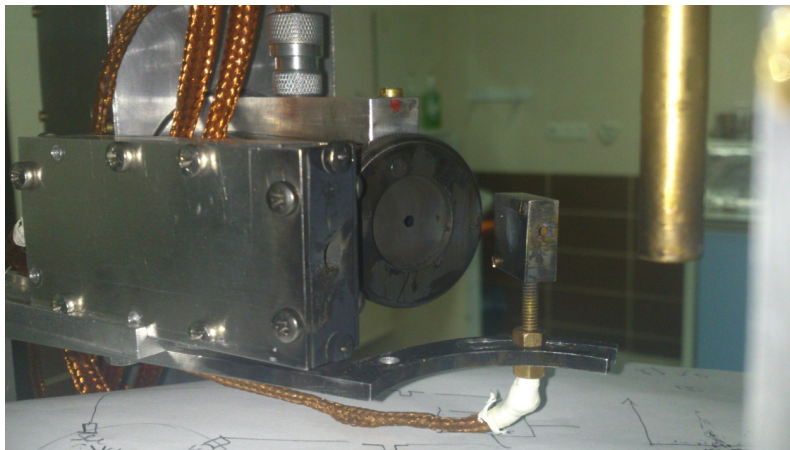
Elektrotlar üzerine uygulanan potansiyeller, Şekil 3.6'da verilen devre ile vakum dışındaki kontrol kutusundan beslenmektedir. Gerekli elektriksel bağlantılar CF40 flanşlar içine yerleştirilen 11 pinli geçişler ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan elektron tabancası, 50-350 eV enerjiye sahip elektronları 1-2 mm çapında paralel elektron demeti haline getirebilen ve filament akımı ile kontrol edilebilen 1-6 μA akım sağlayabilen özel üretim bir tabancadır.



Şekil 3.6 Elektron tabancası içindeki elektrostatik lenslere istenilen voltajın uygulanmasını sağlayan kontrol devresi (Dogan vd. 2013).

3.1.3 Faraday Elektron Toplayıcı

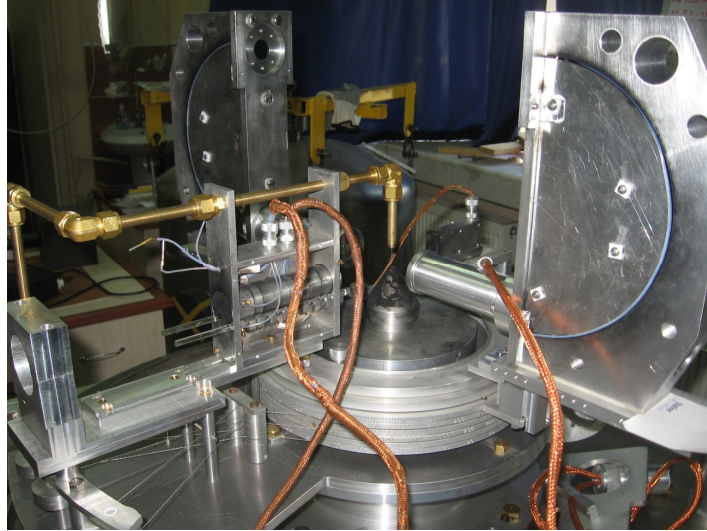
Faraday elektron toplayıcı (FET), üretilen demetin odaklanma kalitesini ve demet akımı ölçme dışında, çarpışma gerçekleştirmeyen elektronları topraklayarak ikincil saçılmaları önleme işlevini yerine getirmektedir. Deney sistemi içindeki FET Şekil 3.7’de gösterilmiştir. FET çıkışı pikoampermetreye bağlanarak demet akımı izlenebilmekte ve gerektiğinde kayıt edilebilmektedir.



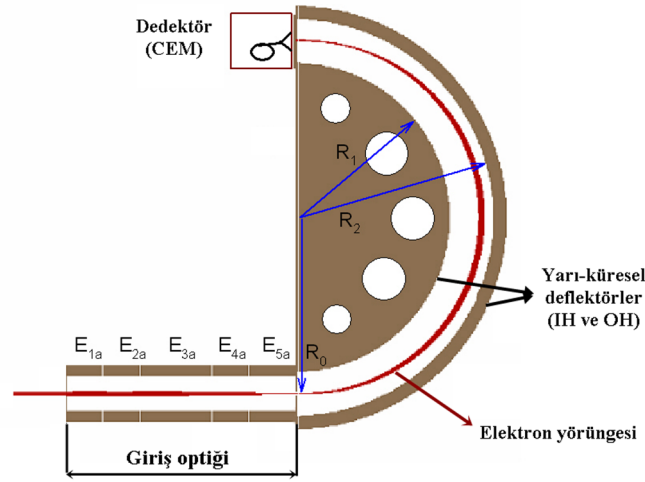
Şekil 3.7 FET ve açılma kısıtlama durumlarında kullanılan küçük FET görüntüsü.

3.1.4 Elektron Enerji Analizörü

Elektron enerji analizörü, çarpışma bölgesinden saçılan ve iyonlaşan elektronları belli bir katı açı içinde toplayarak, istenilen enerjiye sahip olan elektronları CEM'e yönlendirip, sadece bu elektronların dedekte edilmesini sağlayan parçadır. Elektron tabancasının düzlemiyle aynı, döner tablaların üzerine monte edilmiş iki adet yarıküresel elektrostatik enerji analizörü bulunmaktadır. Elektron spektrometresinin iç kısmının bir fotoğrafı Şekil 3.8'de sunulmuştur. Her iki yarıküresel analizör de düzlem üzerinde bağımsız olarak döndürülebilir ve yaklaşık olarak 1°'lik bir açısal belirsizliğe sahiptir. Her analizör üç bölümden oluşmaktadır: Giriş optiği, 180° elektrostatik yarıküresel analizör ve dedektör. Enerji analizörlerinin şematik diyagramı Şekil 3.9'da verilmiştir. Hedef elektronlar, giriş optiği tarafından yarıküresel analizörün geçiş enerjisine (E_{5A}) yavaşlatılarak deflektör girişine odaklanır. Giriş optiği, elektron tabancasında kullanılanlara benzer şekilde, beş elemanlı elektrostatik lens sistemidir. Tüm lensler, analizörün geçiş enerjisinde göre ayarlanır, tek istisna olarak ilk lens, etkileşim bölgesine göre topraklanmaktadır. Yönlendiricilerin her bir yanına 1 mm çapında delikler yerleştirilir ve küçük bir açısal çözünürlük sağlamak için bunların yanında iki adet 1 mm çapında açıklık bulunmaktadır.



Şekil 3.8 Elektron spektrometresi içinin görünümü.



Şekil 3.9 Elektron enerji analizörünün şematik kesit görünümü (Özer 2013).

Yarı küreler ve ön plaka, ultra yüksek vakum (Ultra High Vacuum-UHV) uyumlu alüminyumdan yapılmıştır. Yarı küreler, 4 mm çapında safir bilyeler kullanılarak ön plakadan ayrılır ve yarıküre giriş ve çıkışında 2 mm açıklıklar bulunmaktadır. İç ve dış yarıküreler, elektronların enerjisi ile doğru orantılı olan dairesel bir yörüngede hareket etmelerini sağlayan potansiyel üretmektedir. Sonuç olarak, analizör, iç ve dış yarıkürelerin ortalama yarıçapı olan yörüngeyi izleyen belirli bir enerjideki elektronları seçmektedir. Merkezi yörüngeyi izlemeyen daha yüksek veya daha düşük enerjili elektronlar, daha küçük veya daha büyük açılarla sapıtılmaktadır. Yarı kürelerin iç yarıçapı 50 mm, dış yarıçapı 75 mm'dir. İç yarı küreye (V_1) ve dış yarı küreye (V_2) uygulanan potansiyeller aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$V_1 = V_0 \left[2 \frac{r_0}{r_1} - 1 \right] \quad (3.1)$$

$$V_2 = V_0 \left[2 \frac{r_0}{r_2} - 1 \right] \quad (3.2)$$

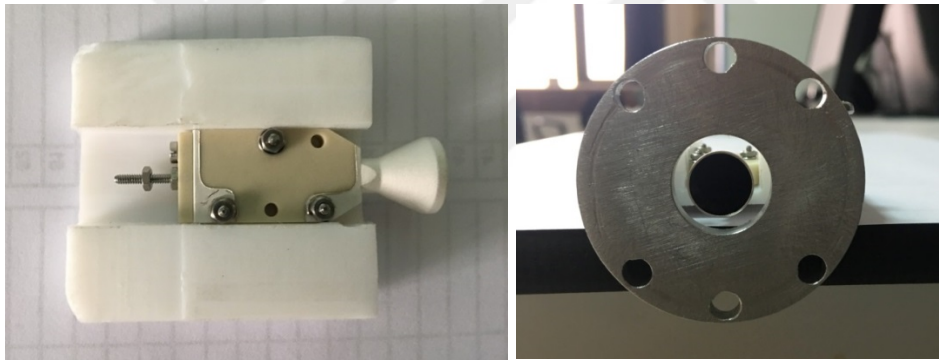
Genel olarak, bir küresel analizörün enerji çözünürlüğü aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (King 2005):

$$\Delta E = \frac{Ew}{2r_0} \quad (3.3)$$

Burada w giriş ve çıkış açıklıklarının genişliğidir ve r_0 ortalama yarıçaptır. Sonuç

olarak, geçiş enerjisini değiştirmek, analizörün enerji çözünürlüğünü etkilemektir.

Yarı küresel analizörün çıkışına ulaşan elektronlar, tek kanallı elektron oğaltıcı (CEM) kullanılarak dedekte edilmektedir. Bu çalışmada, dedektör olarak Sjets KBL10RS model CEM kullanılmıştır ve bu dedektörler yarı küresel analizörün 2 mm çıkış açıklığı arkasına yerleştirilmiştir. CEM’e yüksek voltaj uygulandığı için alüminyum bir yuva içinde yalıtılmış olarak bulunmaktadır ve yüksek gerilim kaynağı için MHV (Mini High Voltage) standardında bağlantı elemanları kullanılmaktadır. CEM, girişine gelen her elektrona negatif sinyal darbesi üreterek tepki vermektedir. Bir elektron CEM yüzeyine çarptığında, ikincil elektronlar (1×10^8 kazanç) üretilmekte ve anoda ulaşınca negatif bir çıkış darbesi üreten bir çığ oluşturulmaktadır. şekil 3.10’da sistem içindeki CEM’ler gösterilmiştir.



şekil 3.10 CEM, teflon yuvası ve alüminyum kasa içindeki fotoğrafı.

3.1.5 Sinyal İşleme Ünitesi

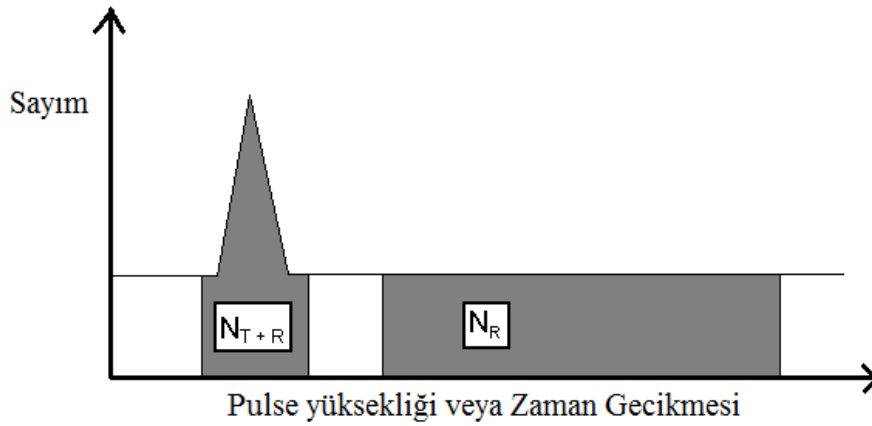
CEM’den gelen sinyal ~ 5 mV genliğinde puls şeklindedir ve gürültü içermektedir. Bu analog sinyalin her bir puls, dedektöre ulaşan bir elektrona temsil etmektedir. Ardışık gelen bu sinyallerin sayılabilmesi, iki dedektörden gelen sinyaller arasındaki zaman farkının ölçülebilmesi, bilgisayar ortamına aktarılarak spektruma elde edilebilmesi için sayısal (dijital) bir sinyale dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, CEM’den gelen sinyal öncelikle bir yükselteç ile yaklaşık 20 kat yükseltilir. Yükseltile sinyal ile birlikte beraberindeki gürültü de yükseltilmektedir. Gerçek sinyali gürültüden ayırmak için ayırteci (diskriminatör) kullanılmaktadır. Ayırteci, belirlenen bir eşik değeri

(threshold) aşan sinyaller için sabit -700 mV genliğinde, 50 ns genişliğinde kare sinyal üretmektedir. Ayırtedici, hem eşik değeri altındaki gürültüyü süzme, hem de analog sinyali sayılabilir standart bir kare sinyale dönüştürerek sayısallaştırma işlevlerini yerine getirmektedir. Her iki analizörün kullanıldığı (e,2e) çakışma deneylerinde, saçılan ve kopan analizörler tarafından üretilen sinyaller ayrı ayrı CEM-Yükseltici-Ayırtedici yolunu izlemektedir. Çakışma tekniği için bu iki sinyal arasındaki zaman farkı ölçülmesi gereken yegâne niceliktir. TAC (Time to Amplitude Converter; Zaman-Genlik Dönüştürücü) ile iki ayırt ediciden gelen sinyaller arasındaki zaman farkı ile uyumlu genlikte bir sinyal üretilmektedir. Gelen iki sinyalden biri başlatma komutu verirken diğeri durdurma komutu vererek aradaki zaman farkı ölçülmektedir. Esasında, saçılan ve koparılan elektronlar arasındaki zaman farkını temsil eden TAC sinyali, çok kanallı analizör (MCA; Multi-Channel Analyser) adı verilen donanım ve yazılım ile analiz edilmektedir. Bilgisayarın PCI (Peripheral Component Interconnect) veriyoluna takılan Ortec Trump-PCI kartı ve Ortec-Maestro yazılımı, TAC'dan gelen sinyali, çakışma-zaman farkı spektrumuna çevirmektedir. İyonlaşma olayı ile ilgili TDCS ölçümlerinde her bir veri noktası alınırken, deneysel koşullara bağlı olarak sekiz saat ile bir gün arasında bir süre boyunca kayıt yapılarak çakışma-zaman farkı spektrumu alınmakta ve her veri noktası için birkaç kez ölçüm yapılarak ortalama alınmaktadır. Tüm sinyal işleme ünitesi NIM (Nuclear Instrumentation Module) standartlarına uygun şekilde çalıştırılmaktadır. Sinyal taşıyan her bileşende 50 Ω koaksiyel kablo ve bağlantılar kullanılarak empedans uyumu sağlanmıştır.

3.2 Çakışma İstatistiği

Elektron demetinin hedef ile etkileşime girmesi sonucu çarpışma bölgesinde birçok olay eşzamanlı olarak gerçekleşmektedir. Gelen elektron, hedefin içyapısında değişikliğe neden olmadan elastik olarak saçılabileceği gibi, hedefte elektronik, titreşim veya dönme seviyelerinde uyarılmalara da neden olabilir. Tekli veya çoklu iyonlaşma olayları, Auger olayı, uyarılmanın ardından kendiliğinden iyonlaşma olayları veya moleküller için ayrışma gerçekleşebilir. Gelen elektronun enerjisine, hedefin yapı ve kuantum durumuna göre, bu olayların her birinin gerçekleşme olasılıkları bulunmaktadır ve tesir kesiti kavramı da bu olasılıklarla ilişkilidir. Deneysel olarak tekli iyonlaşma olayının tesir kesitini ölçmek için, çarpışma bölgesinde gerçekleşip dedektör

girişinin bulunduğu katı açığa ulaşmış elektronların sadece aynı iyonlaşma olayından çıkan elektronlar olduğunun bilinmesi gerekmektedir. Her iki analizör girişine ulaşan elektronlar enerjilerine göre seçilerek, aralarındaki zaman korelasyonu incelenmektedir. Çakışma istatistiği kullanılarak, arka planda gerçekleşen birçok saçılma olayı arasından sadece incelenmesi hedeflenen iyonlaşma olayından çıkmış saçılan ve koparılan elektron çifti seçilebilmektedir. Bu seçim, saçılan ve kopan elektronların dedektörlere varış sürelerinin analizi ile gerçekleştirilmektedir. Gelen iki sinyal arasındaki zaman farkı TAC yardımıyla genliğe dönüştürülmektedir. Aynı çarpışmadan çıkan elektronların dedektörlere ulaşma süreleri arasındaki zaman farkı eşittir. Buna göre iki elektron arasındaki zaman farkı da analizörlerin enerjisi doğru ayarlandığında zaman farkı spektrumunda bir kanalda birikmeye neden olmaktadır ve çakışma piki meydana getirmektedir.



Şekil 3.11 Şematik bir (e, 2e) çakışma zaman piki.

Şematik bir (e, 2e) çakışma zaman spektrumu Şekil 3.11’de verilmiştir. Elektronik olarak farklı iyonlaşma olaylarından gelen elektronlar sinyal olarak geliş güzel çakışma yapabilmektedir (random coincidence) ve bu, spektrumda bir arkaplan (background) düzeyi oluşturmaktadır. Dolayısıyla, gerçek çakışma sinyalini (true coincidence) gelişigüzel çakışma sinyalinden ayırt etmek için çakışma istatistiği kullanılmaktadır. Gerçek çakışma oranı N_T ve standart sapması σ_T aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilmektedir:

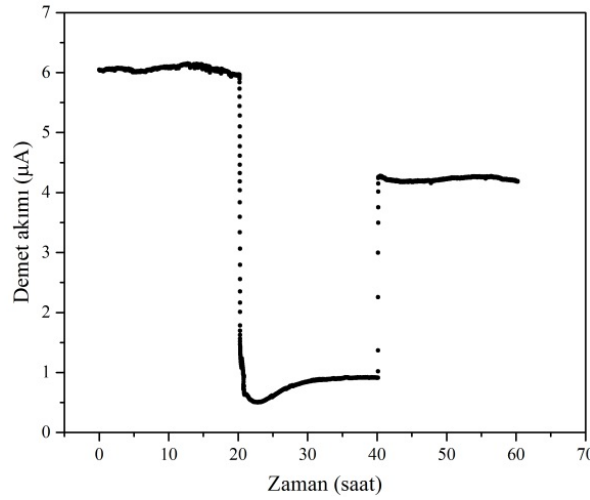
$$N_T = N_{T+R} - N_R \left(\frac{\Delta t}{\Delta t'} \right) \quad (3.4)$$

$$\sigma_T = \left[N_{T+R} - N_R \left(\frac{\Delta t}{\Delta t'} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

Burada; N_{T+R} ; gerçek ve gelişigüzel çakışma sayısının toplamını, N_R ; gelişigüzel çakışma sayısını, Δt ; N_{T+R} 'nin seçilen zaman aralığını ve $\Delta t'$; N_R 'nin zaman aralığını göstermektedir.

3.3 Deney Düzeneği Bileşenlerinin Optimizasyonu

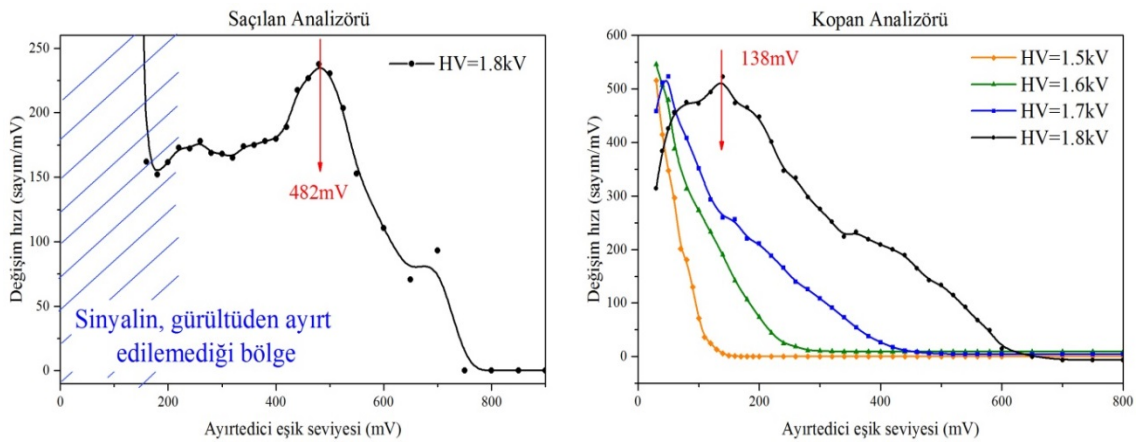
Deney düzeneğinin bazı bileşenlerinin stabil ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için kontroller gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, elektron tabancasının uzun süreli sabit çalıştığını doğrulamak için test yapılmıştır. Faraday Elektron Toplayıcı aracılığıyla ölçülen elektron demet akımı, yaklaşık 60 saat boyunca, 10 saniyede bir kaydedilmiştir (Şekil 3.12). Demet akımını, çalışma seviyesi olan $\sim 4 \mu A$ değerine getirmek için filament akımı ve lens voltajlarına yapılan düzeltmeler sonrası demetin hızla dengeye geldiği, sonrasında istenilen değerde kaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar, elektron tabancasının istikrarlı bir şekilde çalıştığını göstermektedir.



Şekil 3.12 Elektron demetinin akım kaydı.

Verimli bir şekilde çalışması gereken en önemli parçalardan biri elektron çoğaltıcı dedektörlerdir. Hem dedektörlerden temiz ve yeterli genlikte sinyal alınabilmek, hem de kısıtlı ömürlerini verimli kullanabilmek amacıyla, puls-genlik dağılımı (pulse-height

distribution, PHD) ölçümleri yapılarak etkin çalışma bölgesi belirlemektedir. Bu ölçümler, dedektörler belirli bir yüksek voltaj (HV) değerinde çalıştırılarak alınmaktadır. Dedektörden alınan ~5 mV genliğindeki ham sinyal sabit kazançlı yükselteç ile yükseltilir. Sinyal ile birlikte yükseltile gürültüyü süzmek için, belirli bir genlik seviyesinden daha küçük pulsları eleyen ayırtedici (discriminator) kullanılır. Bu ayırt edicinin eşik seviyesi (threshold) değiştirilerek, bu seviyenin üzerindeki pulslar sayılarak, eşik seviyesine göre değişimleri bir grafik üzerinde çizilmektedir. Elde edilen PHD grafiğinde gözlenen pik bölgesi, sinyalin gürültüden en iyi ayrıştırıldığı eşik değerini vermektedir. Aynı CEM, farklı HV değerlerinde çalıştırılarak dedektörün en yüksek verimlilikte çalıştığı yüksek voltaj değerleri belirlenmektedir. Bu değerler, sistemde kullanılan CEM'lerde farklılık gösterebilecekleri için, hem saçılan hem de kopan elektron analizöründeki dedektörler için PHD alınmıştır (Şekil 3.13). Saçılan analizöründe sinyal, 1,8 kV yüksek voltaj değerinde çalışırken ve ayırt edicinin eşik seviyesi 482 mV iken gürültüden ancak ayırt edilebilmiştir. Kopan elektron analizöründe ise, <1,8 kV HV değerlerinde gürültüden ayrışacak genlikte bir sinyal elde edilemezken, 1,8 kV'da 138 mV eşik seviyesi yeterli olmuştur. PHD ölçümleri sırasında, tesir kesiti nispeten büyük bir soygaz olan argon hedef olarak kullanılmış, test sayımları argon atomundan elastik saçılan elektronlar ile yapılmıştır.



Şekil 3.13 Elektron çoğaltıcı dedektörlerin PHD grafikleri.

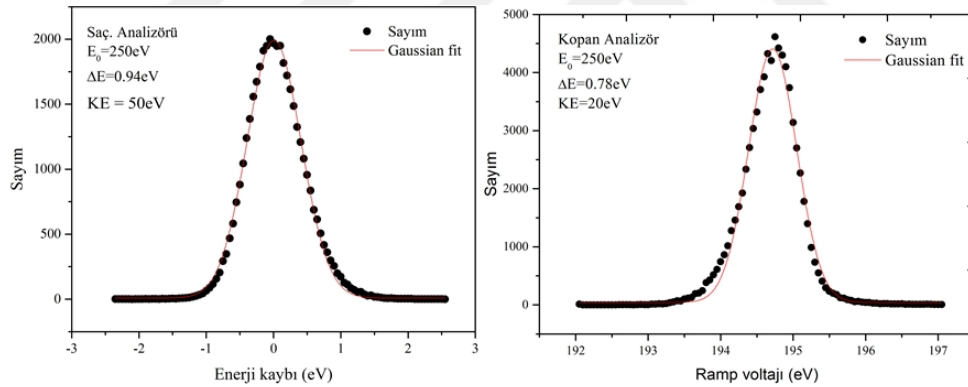
Elde edilen bu sonuçlara göre, aynı HV değerinde kopan elektron analizörünün sinyal/gürültü oranı açısından daha iyi çalıştığı gözlenmiştir. Saçılan analizöründe ise, sinyalin mümkün olduğunca temiz alınarak işlenmesini sağlamak için bu sinyal hattında

gerekli kontroller ve değişimler yapılmış, analizörün deflektör kısmına ulaşan elektron sayısını artırmak için analizörün giriş lensleri en uygun konuma getirilmiştir.

3.4 Argon ile Yapılan Test Ölçümleri

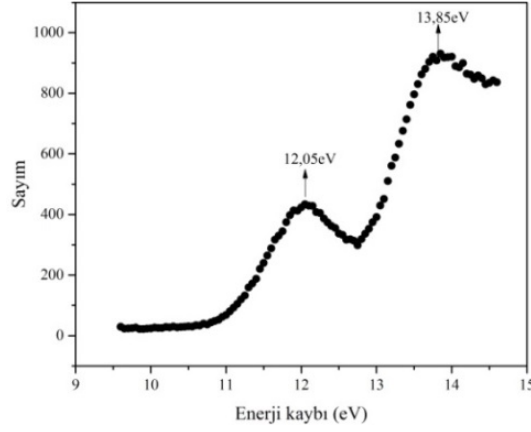
Test ölçümleri, sistemdeki her bir bileşenin doğru şekilde çalıştığından emin olmak için önemlidir. Elektron-argon etkileşmesi sonucu elastik, inelastik saçılma ve TDCS ölçümleri alınarak sistemin güvenilirliği, çözünürlüğü ve genel performansı değerlendirilmiştir.

Elastik saçılma için yapılan ölçümler, elektron ve argon atomunun çarpışması sonucunda meydana gelen enerji kaybı olmaksızın elastik saçılma olayından çıkan elektron dedekte edilmesiyle gerçekte olmakta, elektron tabancası ve enerji analizörü dahil sistemin toplam enerji çözünürlüğünü vermektedir (şekil 3.14).



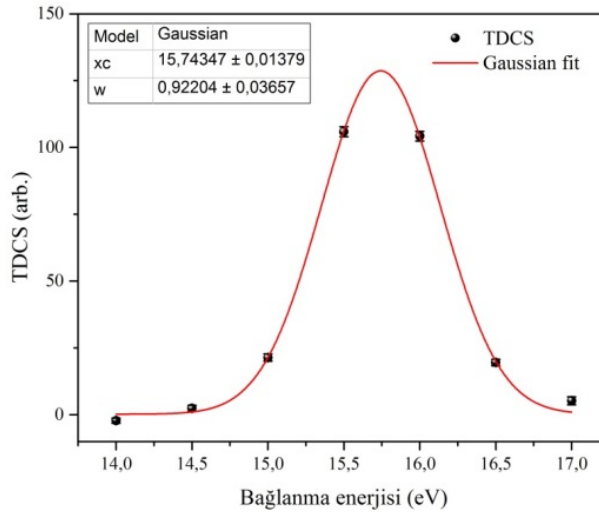
şekil 3.14 Her iki analizörde alınan elastik pikler.

İnelastik uyarılma olayında ise, gelen elektron enerjisinin bir kısmını transfer ederek argon atomunun uyarılmasına, elde edilen inelastik enerji spektrumunda ise, elektronik enerji seviyelerinin ayırt edilebilmesine olanak tanımaktadır (şekil 3.15).



Şekil 3.15 Argon inelastik saçılma spektrumu ve ayırt edilen elektronik uyarılma seviyeleri.

Tekli iyonlaşma olayı için TDCS ölçümleri ise, iki elektronun aynı anda tespit edilmesi ve istatistiksel olarak analiz edilmesi ile yapılmaktadır. TDCS ölçümlerinde elektronlardan birinin enerji taraması yapılarak hedefin bağlanma enerjisi (binding energy) spektrumu alınır. Saçılan elektron analizörünün E_{5A} lens voltajı 0,5 V aralıklarla taranarak enerjide 40.000 saniye süre ile çakışma spektrumu alınmış, elde edilen spektrumun istatistiksel analizi ile üçlü diferansiyel tesir kesiti hesaplanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Argonun bağlanma enerjisi spektrumu.

250 eV gelen elektron enerjisi ile alınan BE spektrumunda argon atomunun en dış orbitali için bağlanma enerjisi 15,745 eV olarak ölçülmüştür. Argon için bu değer 15,76 eV olduğu için sistemdeki enerji kaymasının 0,015 eV gibi küçük bir değer olduğu

görülmüştür. Bağlanma enerjisi spektrumundan okunan sistemin çakışma enerji çözünürlüğü ise 0,92 eV'tur ve moleküllerde görülen birbirine yakın enerji seviyeli orbitallerden kaynaklanan iyonlaşma olaylarını ayırt etmek için yeterlidir. Bu çözünürlük değeri, SF₆ molekülü için alınan TDCS ölçümleri için uygulanan ayrıştırma prosedürü işleminde, sistemin çakışma enerji çözünürlüğü için referans değer olarak kullanılacaktır. Argon ile yapılan bu test ölçümleri, deney düzeneğinin güvenilirliğini, stabilitesini ve ilerleyen aşamalara geçmek için yeterli olduğunu göstermektedir.



4. BULGULAR

Deney düzeneğinin optimize edilmesi ve izlenen metodolojinin geçerliliğinin sınanması için yapılan test ölmümlerinin ardından, bu tez çalışmasının konusu olan kükürt hekzaflorür (SF_6) molekülünün elektron ile çarpışması sonucu iyonlaşma olayı için ikili ve üçlü diferansiyel tesir kesiti ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

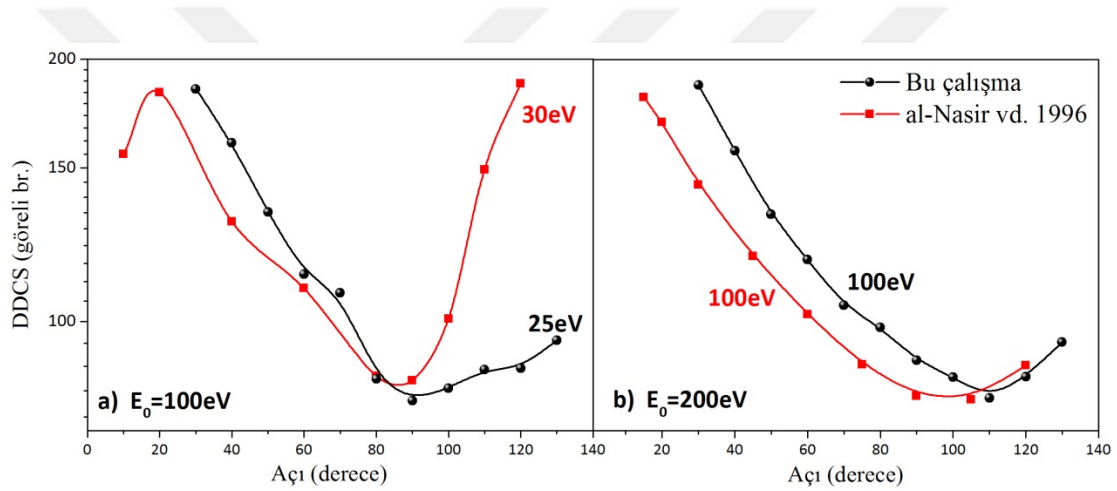
4.1 SF_6 Molekülünün İkili Diferansiyel Tesir Kesiti Ölçümleri

İkili diferansiyel tesir kesiti, çarpışmadan çıkan elektronların küçük bir $d\Omega$ katı açısı ve dE enerji aralığında bulunma olasılığının bir ölçüsüdür. DDCS ölçümleri için çarpışma sonucu açığa çıkan elektronlardan bir tanesi dedekte edilmektedir. Bunun için; enerji analizörü belirli bir açıda tutularak, sadece istenen enerjideki elektronların dedektöre ulaşarak sayılacağı şekilde ayarlanır. Başka bir deyişle, elektron enerji analizörü belirli bir $d\Omega$ katı açıda ve dE enerjisini ölçecek şekilde sabit tutulup elektron sayımı yapılmaktadır.

SF_6 molekülünün iyonlaşma dinamiklerini incelemek için ikili diferansiyel tesir kesiti (DDCS) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, 50-350 eV aralığında gelen elektronlar ile hedef molekülün çarpışması sonucunda ortaya çıkan elektronlardan biri elektron enerji analizörü ile dedekte edilmek suretiyle farklı açılarda ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler deneysel olarak erişilebilir açısal dağılım için tekrarlanmıştır. Dedekte edilen elektronun saçılan mı yoksa kopan mı olduğu ayırt edilemediğinden, elde edilen tesir kestinin enerji ve açısal dağılımı, iyonlaşma olayında hangi etkilerin rol aldığı hakkında bilgi vermektedir.

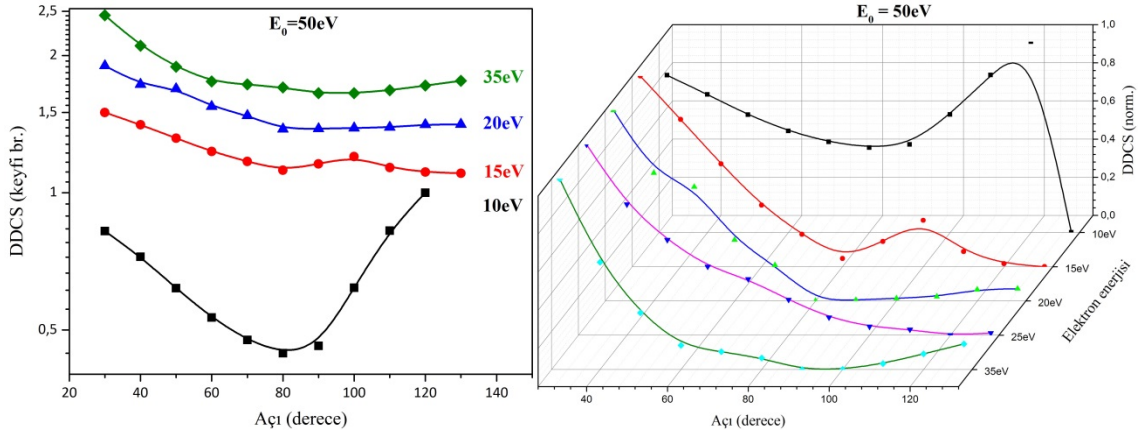
DDCS ölçümlerinde, dedekte edilen elektronların açısal dağılımı ölçülmektedir. Açısal dağılımın, gelen elektron doğrultusuna göre simetrisi, piklerin şekil ve konumları arasındaki ilişkiler analiz edilmektedir. Tesir kesitlerindeki yapısal değişiklikler incelendiğinden, ölçümler her bir set için maksimum değere göre normalize edilmiştir. Değişimin daha düzgün bir şekilde gözlemlenmesi için veri noktaları B-Spline interpolasyonu kullanılarak birleştirilmiştir.

Bu çalışmayla karşılaştırılabilecek tek literatür çalışması; al-Nasir vd. (1996) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın ek bir sonucu olarak sadece 100 ve 200 eV gelen elektron enerjilerinde, yalnızca 30 ve 100 eV enerjili elektronların ölçülmesidir. $E_0=100$ eV gelen elektron enerjisinde dedekte edilen elektron enerjileri 25 eV ve 30 eV değerlerinde veri mevcuttur. $E_0=200$ eV gelen elektron enerjisinde ise, her iki çalışmada da 100 eV enerjili elektronlara ilişkin DDCS spektrumları karşılaştırılmıştır. Açılal kayma dikkate alınmadan, dedekte edilen elektronun enerjisi ile tesir kesitlerinin değişimi karşılaştırıldığında, yapısal olarak iyi bir uyum olduğu görülmektedir (Şekil 4.1). Bu sonuç, deney düzeneğinin ve kullanılan metodolojinin geçerliliğini göstermektedir.



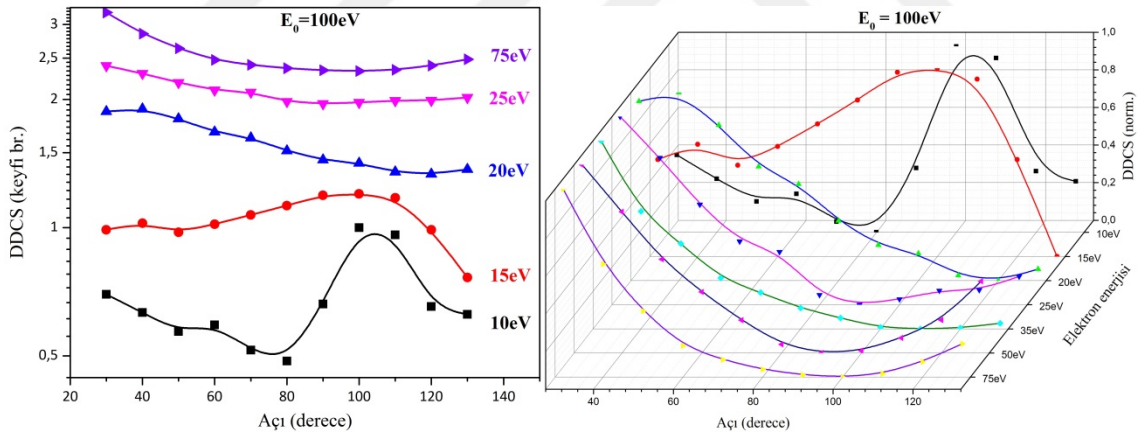
Şekil 4.1 Deneysel DDCS ölçümlerinin literatürdeki çalışma ile a) $E_0=100\text{eV}$ b) $E_0=200$ eV gelen elektron enerjileri için karşılaştırması

Gelen elektron enerjisi $E_0=50$ eV iken, farklı enerjilerdeki elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir. Saçılma açısı arttıkça, DDCS değerlerinde genel bir azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu eğilim, daha büyük açılarda elektron tespit olasılığının azaldığını göstermektedir. Bu davranış, gelen elektronlar ile SF_6 molekülleri arasındaki etkileşimin azalması sonucunda, iyonlaşma olaylarının daha az olası hale gelmesiyle açıklanabilir. İlâveten bu sonuç, saçılma sürecinin bu bölgede baskın olduğunu işaret etmektedir. Bununla birlikte, 10 eV enerjili elektronlar için bir istisna gözlenmiştir, burada 80° saçılma açısında bir minimum görülmüştür. Bu minimum, yavaş elektronlar için daha uzun etkileşim süresiyle oluşan çarpışma sonrası etkileşme (Post-collision Interaction ; PCI) sonucu olarak yorumlanabilir.



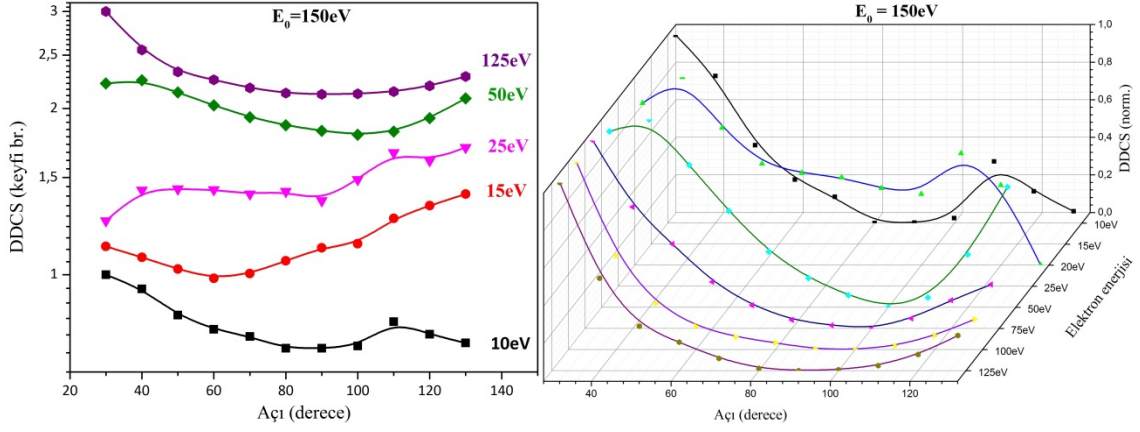
Şekil 4.2 $E_0=50$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.

Gelen elektronun $E_0=100$ eV olması durumunda ise daha yüksek enerjilerde DDCS'nin açısal değişimi yine üssel olarak azalırken, düşük enerjiler (10 ve 15 eV) için 100° saçılma açısı civarında pik oluşumları gözlenmiştir (Şekil 4.3). Gözlenen bu pikler, söz konusu bölgelerde iyonlaşma olayının daha baskın olduğuna işaret etmektedir.



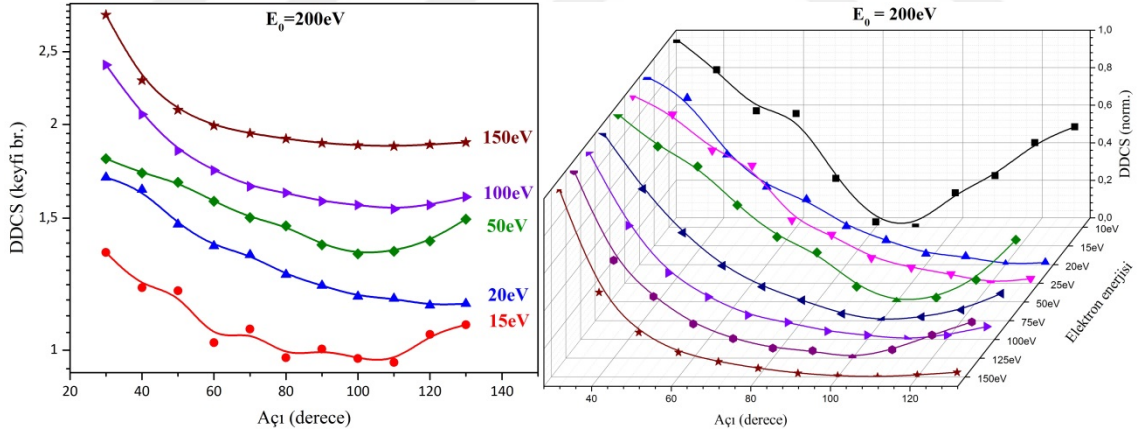
Şekil 4.3 $E_0=100$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.

$E_0=150$ eV'de elde edilen DDCS sonuçları, saçılan ve iyonlaşan elektronların ayırt edilemezliğini örneklemektedir (Şekil 4.4). Burada düşük enerjili elektronlar artan saçılma açılarıyla farklı davranışlar gösterirken, yüksek enerjili elektronlar saçılma davranışı sergiler. Özellikle yüksek açılarda dedekte edilen düşük enerjili elektronların, çarpışma olayından sonra iyonla daha uzun süren etkileşimleri sonucu, daha karmaşık davranışlar sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.4 $E_0=150$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.

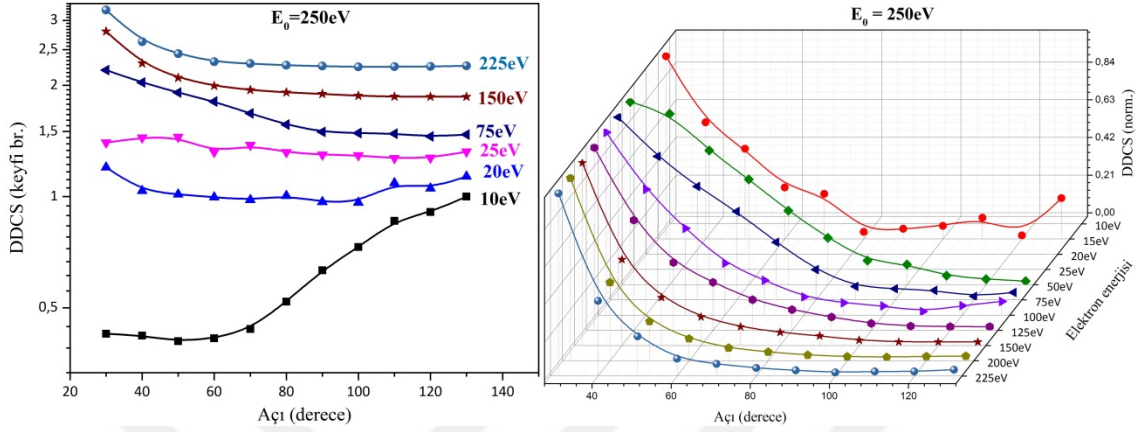
Gelen elektron enerjisinin yüksek olduğu 200 eV durumda ise, DDCS'nin açısal dağılımında düzgün üssel bir azalma eğilimi görülmektedir (Şekil 4.5). Bu gözlem, elektron saçılma olasılığının daha yüksek olduğunu doğrulamaktadır. Sadece düşük enerjilerde algılanan elektronların, iyonlaşma olayı sonucu oluştuğunu gösteren, PCI etkilerinin yoğun olduğu anlaşılan yapısal düzensizlikler mevcuttur.



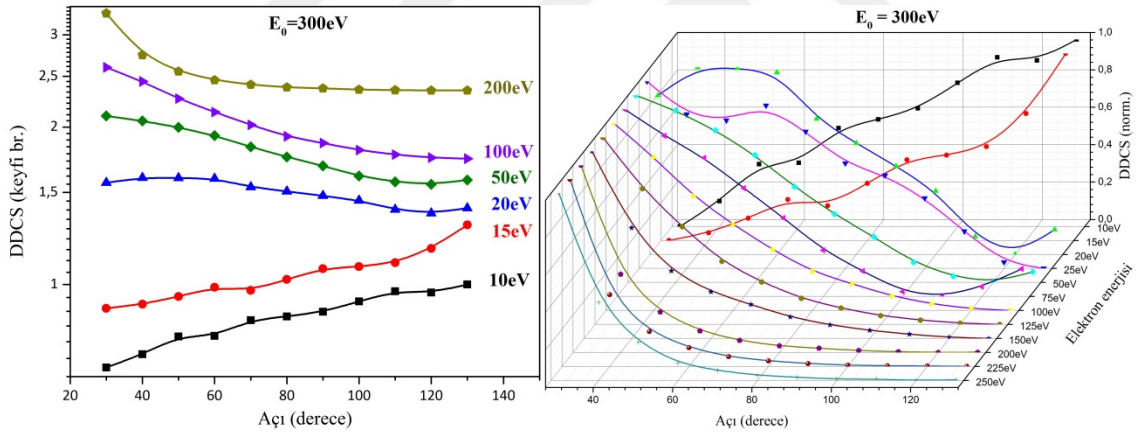
Şekil 4.5 $E_0=200$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.

Daha yüksek enerjili elektronların SF_6 molekülü ile çarpışması sonucu elde edilen DDCS spektrumları 250 eV için Şekil 4.6'da ve 300 eV için Şekil 4.7'de verilmiştir. 250 ve 300 eV gelen elektron enerjileri için DDCS'nin açısal dağılımları benzer yapıdadır. DDCS yapısının dedekte edilen elektronun enerjisine bağımlılığı açıktır. Düşük enerjilerde tespit edilen elektronların dağılımında açı ile orantılı bir artış

gözlenmiştir. Bu sonuç da bu bölgedeki elektronların iyonlaşan elektron olma ihtimalinin baskın olduğuna işaret etmektedir. Yüksek enerjilerde ise saçılma olayı daha olası görünmektedir.



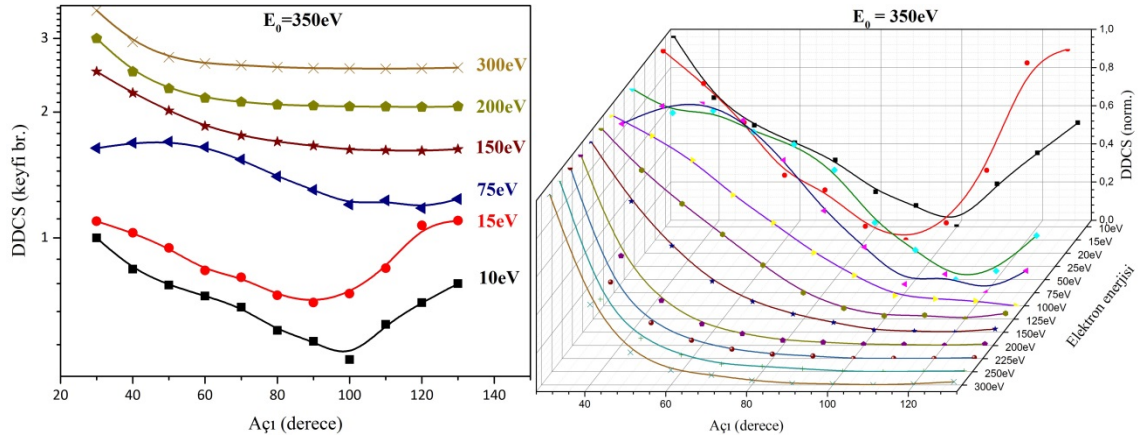
Şekil 4.6 $E_0=250$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.



Şekil 4.7 $E_0=300$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDCS sonuçları.

Bu çalışma kapsamında çalışılan en yüksek E_0 değeri olan 350 eV için elde edilen DDCS'nin grafiği Şekil 4.8'de verilmiştir. Yüksek enerjili çarpışmanın etkileri burada daha net gözlemlenmiştir. DDCS'nin yapısı, dedekte edilen elektron enerjisinin değişimi ile daha net ayrılmıştır. Yüksek enerjilerde düzgün üssel bir dağılım görülürken, daha düşük enerjili elektronların tesir kesitleri maksimum ve minimumlar sergilemektedir. $E=75$ eV enerjisinde 50° saçılma açısında bir maksimum varken, 10 ve 15 eV elektron enerjilerinde ise sırasıyla $90-100^\circ$ saçılma açılarında minimumlar

görülmüştür.



Şekil 4.8 $E_0=350$ eV iken farklı enerjilerde dedekte edilen elektronların ölçümü ile elde edilen DDSCS sonuçları.

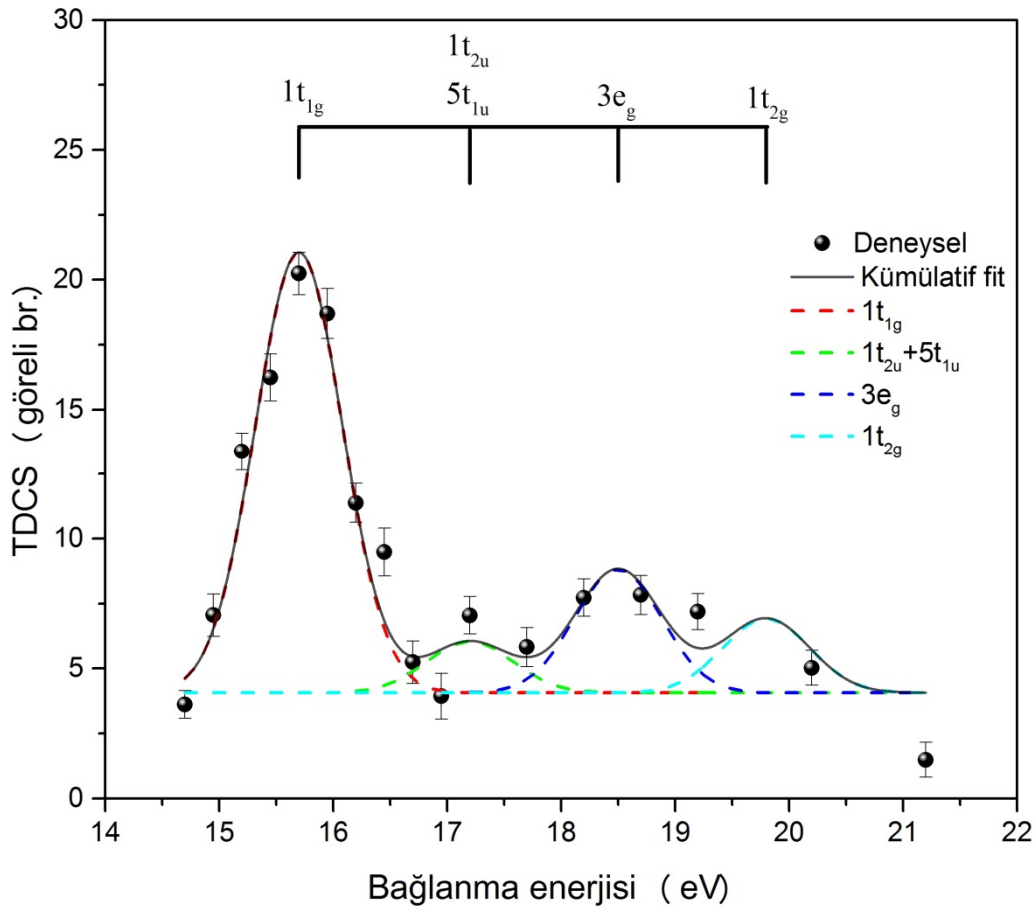
4.2 SF₆ Molekülünün Üçlü Diferansiyel Tesir Kesiti Ölçümleri

Bir önceki bölümde sunulan DDSCS ölçümleri için çarpışma sonucu açığa çıkan elektronlardan yalnızca bir tanesini dedekte etmek yeterli olmaktadır. Ancak; elektron etkisi ile tekli iyonlaşma olayını kinematik olarak tam izah edebilmek için gelen, saçılan ve koparılan elektronların tamamının momentumlarının bilinmesi gerekmektedir. Çarpışma öncesinde gelen elektronun doğrultu (Ω_0) ve enerjisi (E_0), dolayısıyla momentumu bilinmektedir. Çarpışmadan sonra ortaya çıkan saçılan ve koparılan elektronların da enerjileri (E_a , E_b) ve katı açıları (Ω_a , Ω_b) belirlenmelidir. Bu dört parametreden üçü sabit tutularak kalan diğerinin taranması ile üçlü diferansiyel tesir kesiti deneysel olarak elde edilmektedir. Dedekte edilen saçılan ve koparılan elektronların aynı iyonlaşma olayında ortaya çıkan elektron çifti oldukları ise 3. Bölümde açıklanan (e,2e) çakışma istatistiği ile belirlenmektedir. TDCS'nin açısal dağılım spektrumu elde edilirken; saçılan elektron belirlenmiş sabit bir enerji ve katı açıda (dE_a , $d\Omega_a$) dedekte edilirken, koparılan elektronun yalnızca enerjisi sabit belirlenmekte (dE_b) ve katı açısına (Ω_b) göre spektrum taranmaktadır. TDCS'nin enerjiye göre spektrumunu elde etmek için ise; koparılan elektronun enerji ve katı açısı (dE_b , $d\Omega_b$) küçük sabit aralıklarda dedekte edilirken, saçılan elektronun dedekte edildiği katı açı ($d\Omega_a$) sabit tutularak enerjisine (E_a) göre tarama yapılmaktadır (Denklem 4.1). Bu yöntemle elde edilen spektrum, çakışma tesir kesitine farklı enerjilerdeki

orbitallerden gelen katkıların dağılımını gösterdiği için bağlanma enerjisi spektrumu olarak bilinmektedir.

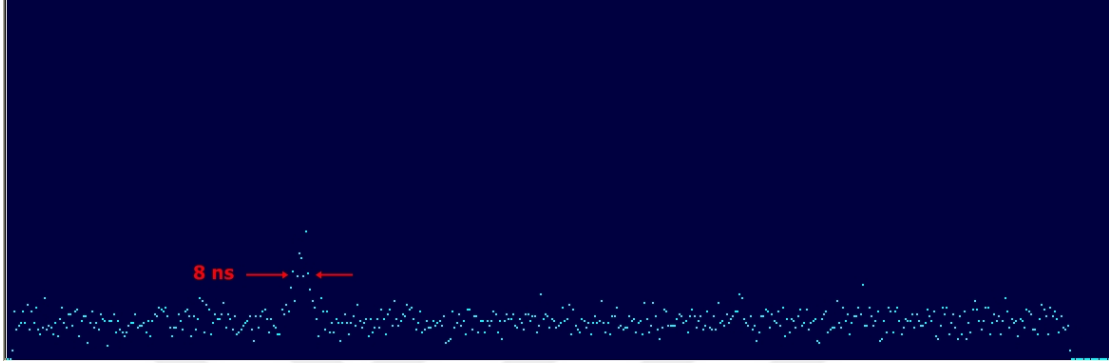
$$\frac{d^3\sigma}{dE_b d\Omega_a d\Omega_b} \quad (4.1)$$

Bu tez çalışmasının konusu olan SF₆ molekülünün bağlanma enerji spektrumu (e,2e) çakışma tekniği kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 4.9). Bu spektrum; gelen ve koparılan elektron enerjileri sırasıyla 250 eV ve 50 eV olarak sabitlenirken, saçılan elektron enerjisi 14,75–21,25 eV enerji aralığında taranarak elde edilmiştir. Saçılan ve koparılan elektronlar için dedekte edilen açılar sırasıyla -10° ve 60° olarak seçilmiştir. Her bir veri noktası için çakışma spektrumu alınarak tesir kesiti değerleri hesaplanmıştır. Bu ölçümler sırasında alınan örnek bir çakışma spektrumu Şekil 4.10’da gösterilmektedir. Buradan çakışma spektrometresinin zaman çözünürlüğü ~8 ns olarak ölçülmektedir.



Şekil 4.9 SF₆ molekülünün bağlanma enerjisi spektrumu.

Elde edilen bağlanma enerjisi spektrumu, SF_6 molekülünün dış valans bölgesindeki beş moleküler orbitalin enerji seviyelerini kapsamaktadır. Bu orbitallerden $5t_{1u}$ ve $1t_{2u}$ orbitalleri çok yakın enerjide, neredeyse dejenere durumdadırlar. Deneysel ölçüm yapılan elektron spektrometresinin bağlanma enerjisi çözünürlüğü (0,92 eV) ile bu iki orbitali birbirinden ayırt etmesi beklenmemiştir.



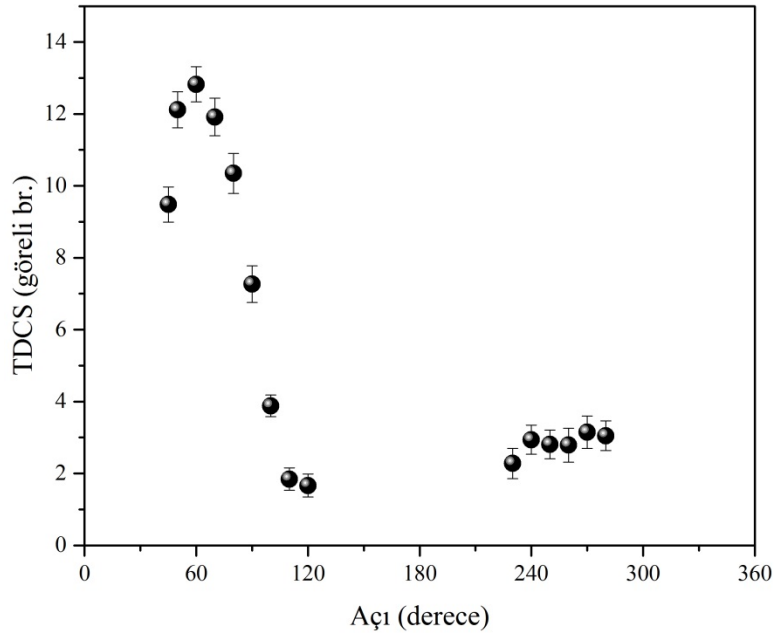
Şekil 4.10 (e,2e) ölçümleri sırasında alınan çakışma piki.

Moleküler orbitallerden kaynaklanan her pikin biçimi Gauss fonksiyonu yapısındadır. Bağlanma enerji spektrumunun tamamı ise, bu Gauss piklerinin birleşimi olarak ele alınabilir. Ayırıştırma (deconvolution) olarak bilinen bu yöntem uyarınca, Gauss piklerinin genişlikleri, fotoelektron spektroskopisi (PES) verilerinden elde edilen doğal pik genişlikleri ve deney düzeneğinin enerji çözünürlüğü değerleri ile belirlenmektedir. Ancak, SF_6 molekülünün PES çalışmalarından ölçülen orbital genişlikleri, deney sisteminin bağlanma enerjisi çözünürlüğünden çok daha küçük olduğu için, moleküler orbitalin doğal genişlikleri ihmal edilmiştir. Bu çalışma bölgesindeki her bir pik için genişlik parametresi, test ölçümlerinden elde edilen spektrometrenin bağlanma enerjisi çözünürlüğü olan 0,92 eV olarak sabitlendiği Gauss fonksiyonlarının toplamı ile fit edilmiştir.

Yapılan ölçüm ve uygulanan ayırıştırma yönteminin sonucunda, deneysel olarak 3 pik bölgesi açık olarak gözlenmiştir. SF_6 molekülünün en yüksek dolu moleküler orbitali (HOMO; Highest Occupied Molecular Orbital) olan $1t_{1g}$ 'nin enerji seviyesi 15,7 eV olarak ölçülmüş ve en yüksek tesir kesiti burada gözlenmiştir. Üstüste kabul edilen $5t_{1u}$ ve $1t_{2u}$ orbitalleri için gözlenen pikin enerjisi 17,2 eV ölçülmüş, tesir kesiti

büyükliğünün ise fit edilen Gauss piklerinin katkısından daha büyük olduğu görülmüştür. Deneysel olarak bir pik gözlenmesi sonucu ayrıştırma işleminde de tek pik kabul edilen bu bölgenin, aslında iki orbitalden gelen katkı sonucu daha büyük tesir kesitine sahip olması ile açıklanabilen bir durumdur. Ancak, bu orbitaller için ölçülen tesir kesitinin, literatürdeki EMS çalışmalarıyla kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmüştür. $3e_g$ orbitali için 18,5 eV enerji değerinde pik gözlenmiştir. Literatürde 19,8 eV'de gözlenen $1t_{2g}$ orbitali piki ise bu çalışmada ayırt edilememiştir. Deneysel olarak elde edilen spektrumun 18 ve 20 eV arasında, $3e_g$ piki ile birleşmiş bir orbital bölgesinden söz edilebilir. Genel olarak, moleküler orbitaller için bağlanma enerjileri için literatür ile uyumlu sonuçlar bulunmuştur (Weigold vd. 1991, Watanabe vd. 2016).

Bu çalışma kapsamında ayrıca, SF_6 molekülünün $1t_{1g}$ orbitalinden tekli iyonlaşma olayı için eş-düzlemsel asimetrik kinematikte TDCS ölçümleri yapılarak açısal dağılımı belirlenmiştir. Gelen elektronun enerjisi $E_0=250$ eV, koparılan elektronun enerjisi ise $E_{kop}=50$ eV olarak alınmıştır. Saçılan elektronun açısı 10° olarak sabit tutulup, koparılan elektronun açısı 45° - 280° aralığında taranarak açığa bağımlı TDCS spektrumu elde edilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 SF_6 molekülünün $1t_{1g}$ orbitalinden tekli iyonlaşma olayı için eş-düzlemsel asimetrik kinematikte alınmış TDCS ölçümü.

Yapılan ölçüm sonucunda, TDCS spektrumunda ikili (binary) ve geri tepme (recoil) bölgeleri ayırt edilmiştir. Binary bölgede tek bir pik gözlenmiş ve buradaki tesir kesiti büyüklüğünün recoil bölgeye kıyasla daha büyük olduğu görülmüştür. Recoil bölgede, deneysel olarak ulaşılabilir açısal konumlarda açı ile artan bir tesir kesiti söz konusudur.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Elektron çarpışma deneyleri, atom ve moleküllerde meydana gelen iyonlaşma süreçleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Atomik ve moleküler yapıları anlamak, enerji seviyelerini belirlemek ve yüklü parçacıklarla etkileşme süreçlerini incelemek için tesir kesiti ölçümleri kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulguların, hedef molekül olan SF_6 'nın temel iyonlaşma süreçlerinin anlaşılmasına, elektron-molekül etkileşimlerinin modellenmesine ve bu modelleri kullanan plazma fiziği, gaz deşarjları ve çevre araştırmaları gibi alanlardaki etkilerini anlama konusunda katkı sağlaması beklenmektedir.

Bu tez çalışmasında, SF_6 molekülünün elektron etkisi ile iyonlaşma olayının anlaşılmasına olanak sağlayan ikili ve üçlü diferansiyel tesir kesiti ölçümleri yapılmıştır. Yapılan DDCS ölçümlerinde, tesir kesitinin açısal dağılımı ve bu dağılımın yapısı incelenmiş, farklı gelen elektron enerjisi (E_0) için alınan spektrumlarda benzer yapılar, farklı enerji ve açısal konumlarda gözlenmiştir. Her spektrumda, dedekte edilen enerjinin yüksek olduğu bölgelerde açığa bağımlı düzgün azalan bir dağılım görülmektedir. Daha düşük enerjilerde ($E_{\text{det}} < E_0/5$) ise, 80° - 120° saçılma açılarında pik oluşumları gözlenmektedir. Literatürde ileri-geri saçılma asimetrisi (forward-backward asymmetry) olarak bilinen bu durum, ileri yönde (gelen elektron doğrultusuna göre küçük açılarda) saçılmaların ikili (binary) çarpışmalar sonucu oluştuğunu, 80° - 120° gibi daha büyük açılarda saçılmaların ise çarpışma etkisiyle koparılan elektronun önce iyon ile etkileştikten sonra daha büyük açılara geri saçıldığını ifade etmektedir (Fainstein vd. 1996, Chowdhury vd. 2020). Deneysel olarak da gözlenen bu durum, pik oluşmayan enerji ve açılarda dedekte edilen elektronun ikili (binary) çarpışma sonucu oluştuğunu, dolayısıyla saçılan elektron olma olasılığının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu dağılımın gözlemlendiği kinematiklerde alınacak TDCS ölçümlerinde, düşük açılarda dedekte edilen elektronların saçılan elektron olarak kabul edilmesini geçerli kılması bakımından da önemli bir sonuçtur. Açısal dağılımlarında pik gözlenen, daha düşük enerjili durumlar ise koparılan elektronun iyonla yaptığı karmaşık etkileşmeler sonucu oluşmaktadır. Bu dağılımların modellenmesinin, elektron-molekül etkileşim teorilerinin sınanması açısından zorlu birer test olacağı ve elektron çarpışma literatüründe ilk olan

bu deneysel verilerin teorik modellerinin gelişimine önemli bir katkı yapacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın diğer bir kısmını oluşturan TDCS ölçümlerinde, SF₆ molekülünün en dış 4 orbitalini kapsayan enerji bölgesinde bağlanma enerji (BE) spektrumu alınmıştır. Elde edilen spektrumdan, ayırıştırma prosedürü yardımıyla pik merkezleri ölçülmüştür. Bağlanma enerjilerinin literatür ile karşılaştırması Çizelge 5.1’de verilmiştir. Çizelgede, her bir orbitalin bu çalışmada ölçülen bağlanma enerjisi ile literatürdeki EMS (Elektron Momentum Spektroskopisi) ve PES (Fotoelektron Spektroskopisi) ölçümlerinden elde edilen bağlanma enerjileri gösterilmektedir. Bu çalışmada ölçülen BE enerji değerleri genel olarak literatür ile uyumludur. Ancak, literatürdeki çalışmalar büyük çoğunlukla gelen elektron enerjisinin 1000 eV’den büyük olduğu EMS çalışmalarıdır. EMS çalışmaları ise, doğası gereği yalnızca ikili (binary) çarpışmalar sonucu oluşan iyonlaşmaları ölçmektedir ve koparılan elektronun moleküler iyonla etkileşimini veya diğer orbitallerden gelen katkıyı gözlemleyememektedir. Orta enerjilerde bu tip etkileşmelerin de katkısının olduğu bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Literatürdeki bu çalışmalara göre ise, orbital piklerinin büyüklüklerinin farklı olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeninin, orta enerjilerde hem orbital yapısının hem de çarpışma dinamiğinin etkin olduğu, çarpışma sonrası oluşan 3 yüklü parçacığın birbiri ile etkileşmesi olarak tanımlanan çarpışma sonrası etkileşmelerin (PCI; Post-Collision Interaction) tesir kesitlerini etkilediği değerlendirilmektedir.

Çizelge 5.1 SF₆ moleküler orbitalleri için bağlanma enerjilerinin ölçüm sonuçları ve literatür ile karşılaştırılması. PES Bieri vd. 1982, EMS-1 Weigold vd. 1991, EMS-2 Watanabe vd. 2016, OGVF (outer valence Green's function) teorik hesabı Holland vd. 1995.

MO	Bu çalışma	PES (eV)	EMS-1 (eV)	EMS-2 (eV)	OVGF (eV)
1t1g	15,7	15,7	15,7	15,7	16,02
5t1u	17,2	17,0	17,0	17,0	17,26
1t2u	17,2	17,0	17,0	17,0	17,34
3eg	18,5	18,6	18,6	18,6	18,40
1t2g	-	19,8	19,8	19,8	20,14

Enerjiye bağımlı bağlanma enerjisi ölçümünün yanında, açıya bağımlı TDCS ölçümleri

de gerçekleştirilmiştir. Alınan TDCS spektrumunda s-tipi bir orbital için beklendiği gibi binary bölgede tek bir pik gözlenmiştir. Recoil bölgede ise, daha düşük büyüklükte ve açıya bağımlı artan bir yapı grlmştir. Elde edilen yapıya bakarak recoil bölgedeki pikin, deneysel olarak gözlem bölgesinin daha ötesindeki büyük açılarda oluştuğu yorumlanabilir. Binary-recoil piklerin oranı ve recoil pikin yapısı göz önüne alındığında, bu kinematikte ölçülen iyonlaşma olayında çarpışma sonrası etkileşimlerin de etkin olduğu değerlendirilmektedir.

Genel olarak, deneysel olarak ölçülen bağlanma enerjisi ve TDCS spektrumlarından elde edilen moleküler orbitallere ilişkin spektrum yapıları ve pik büyüklükleri, orta enerjili elektronlar ile SF₆ molekülünün çarpışması sonucu oluşan etkileşmelerde tesir kesiti büyüklüğünü etkileyen, farklı fiziksel süreçlerden kaynaklanan etkilerin birbirinin genliğini azaltıcı/artırıcı yönde girişim etkisi oluşturması gibi daha karmaşık süreçlerin baskın olarak rol aldığına işaret etmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Al-Hagan O, Kaiser C, Madison D, Murray A J, 2009, Atomic and molecular signatures for charged-particle ionization, *Nature Physics*, 5(1), 59-63.
- Al-Nasir A H, Chaudhry M A, Duncan A J, Hippler R, Campbell D M, Kleinpopp H, 1996, Doubly differential cross sections for the ionization of the molecule by electron impact, *Journal of Physics B: At Mol Opt Phys.*, 29(9), 1849.
- Amaldi U, Egidi A, Marconero R, Pizzella G, 1969, Use of a Two Channeltron Coincidence in a New Line of Research in Atomic Physics, *Review of Scientific Instruments*, 40, 1001-4.
- Attia M, Houamer S, Khatir T, Bechane K, Cappello C D, 2023, Electron impact ionization of atoms and molecules: an improved BBK model, *Journal of Physics B: At Mol Opt Phys.*, 56(7), 075201.
- Bartschat K, Bray I, 1996, Calculation of electron-Cs scattering at intermediate energies, *Physical Review A*, 54(2):1723-5.
- Bartschat K, 2018, Electron collisions—experiment, theory, and applications, *Journal of Physics B: At Mol Opt Phys.*, 51(13), 132001.
- Bethe H, 1930, Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie, *Annalen der Physik*, 397(3), 325-400.
- Bieri G, Åsbrink L, von Niessen W, 1982, 30.4-nm He (II) photoelectron spectra of organic molecules: Part VII. Miscellaneous compounds, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 27(2), 129-78.
- Bray I, 2002, Close-Coupling Approach to Coulomb Three-Body Problems, *Physical Review Letters*, 89(27), 273201.
- Bray I, Konovalov D A, McCarthy I E, Stelbovics A T, 1994, Calculation of triple-differential cross sections in electron scattering on atomic hydrogen, *Physical Review A*, 50(4), 2818-21.
- Brunger M J, Buckman S J, Newman D S, Alle D T, 1991, Elastic scattering and rovibrational excitation of H₂ by low-energy electrons, *Journal of Physics B: At*

- Mol Opt Phys., 24(6), 1435.
- Chowdhury M R, Chauhan D, Limbachiya C G, Tőkési K, Champion C, Weck P F, vd., 2020, Double differential distributions of e-emission in ionization of N₂ by 3, 4 and 5 keV electron impact, Journal of Physics B: At Mol Opt Phys., 53(23), 235201.
- Colyer C J, 2011, Electronic collisions with molecules of biological relevance, University of Adelaide, Doktora Tezi, 140p, Adelaide.
- Dogan M, Ulu M, Ozer Z N, Yavuz M, Bozkurt G, 2013, Double Differential Cross-Sections for Electron Impact Ionization of Atoms and Molecules, Journal of Spectroscopy, 2013, e192917.
- Ehhalt D, Prather M, 2001, Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases, Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ Dai X, vd. (Ed.), Climate Change 2001: The Scientific Basis (240-287), Cambridge University Press, 881p, Cambridge.
- Ehrhardt H, Jung K, Knoth G, Schlemmer P, 1986, Differential cross sections of direct single electron impact ionization, Zeitschrift für Physik D: Atoms, Molecules and Clusters, 1(1), 3-32.
- Ehrhardt H, Schulz M, Tekaat T, Willmann K, 1969, Ionization of Helium: Angular Correlation of the Scattered and Ejected Electrons, Physical Review Letters, 22(3), 89-92.
- Fabrikant I I, Hotop H, Allan M, 2005, Elastic scattering, vibrational excitation, and attachment in low-energy electron-SF₆ scattering: Experiment and effective range theory, Physical Review A, 71(2), 022712.
- Fainstein P D, Gulyás L, Martín F, Salin A, 1996, Angular asymmetry of low-energy electron emission in ion-atom collisions, Physical Review A, 53(5), 3243-6.
- Fedus K, 2022, Low-energy electron elastic scattering by SF₆—modified effective range analysis, European Physical Journal D, 76(3), 55.
- Fujimoto M M, Michelin S E, Arretche F, Mazon K T, Lee M T, Iga I, 2010, Spin-exchange effects in elastic electron scattering from linear triatomic radicals,

- Journal of the Brazilian Chemical Society, 21, 226-33.
- Fursa D V, Bray I, 1995, Calculation of electron-helium scattering, *Physical Review A*, 52(2), 1279-97.
- Fursa D V, Bray I, Panajotović R, Šević D, Pejčev V, Filipović D M, vd., 2005, Excitations of 1P levels of zinc by electron impact on the ground state, *Physical Review A*, 72(1), 012706.
- Goswami B, Antony B, 2014, Electron impact scattering by SF₆ molecule over an extensive energy range, *RSC Advances*, 4(58), 30953-62.
- Holland D M P, MacDonald M A, Baltzer P, Karlsson L, Lundqvist M, Wannberg B, vd., 1995, An experimental and theoretical study of the valence shell photoelectron spectrum of sulphur hexafluoride, *Chemical Physics*, 192(3), 333-53.
- Hu L, Ottinger D, Bogle S, Montzka S A, DeCola P L, Dlugokencky E, vd., 2023, Declining, seasonal-varying emissions of sulfur hexafluoride from the United States, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(2), 1437-48.
- Hughes A L, Mann M M, 1938, A New Method for Investigating Atomic Electron Velocities, *Physical Review*, 53(1), 50-63.
- Hughes AL, McMillen J H, 1932, Inelastic and Elastic Electron Scattering in Argon, *Physical Review*, 39(4), 585-600.
- Hussey M, Murray A, MacGillivray W, King G, 2008, Low energy super-elastic scattering studies of calcium over the complete angular range using a magnetic angle changing device, *Journal of Physics B: At Mol Opt Phys*, 41(5), 055202.
- Joachain C J, 1983, *Quantum Collision Theory*, North-Holland Physics Publishing, Amsterdam.
- Joshiyura K N, Vinodkumar M, Limbachiya C G, Antony B K, 2004, Calculated total cross sections of electron-impact ionization and excitations in tetrahedral (XY₄) and SF₆ molecules, *Physical Review A*, 69(2), 022705.
- Kato H, Kawahara H, Hoshino M, Tanaka H, Campbell L, Brunger M J, 2008, Vibrational excitation functions for inelastic and superelastic electron scattering

- from the ground-electronic state in hot CO₂, Chemical Physics Letters, 465(1), 31-5.
- King G, 2005, Experimental Collision Physics, QuAMP II Summer School Lecture Notes, Milton Keynes.
- Lan X, Thoning K W, Dlugokencky E J, 2023, Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements, Report Version 2023-12, 1p.
- Langmuir I, Jones H A, 1928, Collisions Between Electrons and Gas Molecules, Physical Review, 31(3), 357-404.
- Lenard P, 1903, Über die Absorption von Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit, Annalen der Physik, 317(12), 714-44.
- McCarthy I E, Weigold E, 1995, Electron-Atom Collisions, Cambridge University Press, 328p, Cambridge.
- Milne-Brownlie D S, Foster M, Gao J, Lohmann B, Madison D, 2006, Young-Type Inter type Interference in (e, 2e) Ionization of H₂, Physical Review Letters, 96, 233201-4.
- Nixon K L, Murray A J, Chaluvadi H, Ning C G, Colgan J, Madison D H, 2016, Sulphur hexafluoride: low energy (e,2e) experiments and molecular three-body distorted wave theory, Journal of Physics B: At Mol Opt Phys., 49(19), 195203.
- Özer Z N, 2013, Elektron-Elektron Çakışma Tekniği (e,2e) ile H₂ Molekülünde Young Tipi Girişim Etkilerinin İncelenmesi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 153s, Gebze.
- Park Y, Choi Y R, Kim D C, Kim Y, Song M Y, Kim Y W, vd., 2022, Total electron scattering cross section of C₃F₆O at the intermediate-energy region for developing an alternative insulation gas to SF₆, Current Applied Physics, 41, 111-5.
- Ramsauer C, 1921, Über den Wirkungsquerschnitt der Gasmoleküle gegenüber langsamen Elektronen, Annalen der Physik, 369(6), 513-40.
- Rescigno T N, Baertschy M, Isaacs W A, McCurdy C W, 1999, Collisional Breakup in

- a Quantum System of Three Charged Particles, *Science*, 286(5449), 2474-9.
- Rudberg E, Richardson O W, 1997, Energy losses of electrons in nitrogen, *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 129(811), 628-51.
- Rutherford E, 1911, The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom, *The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21(125), 669-88.
- Shi S, Li Y, Cui Z, Yan Y, Zhang X, Tang J, vd., 2023, Recent advances in degradation of the most potent industrial greenhouse gas sulfur hexafluoride, *Chemical Engineering Journal*, 470, 144166.
- Stefani G, Avaldi L, Camilloni R, 1993, The (e, 2e) spectroscopy, achievements and perspectives, *Le Journal de Physique IV*, 3(C6), 1-19.
- Ulu M, Sise O, Dogan M, 2007, Optimizing the performance of an electron gun design followed by lenses and apertures, *Radiation Physics and Chemistry*, 76(3), 636-41.
- Wang C, Cooper B, Wu Y, Sun H, Tennyson J, 2021, Why SF₆ eats electrons: identifying high electrical strength molecules from their electron collision properties, *Journal of Physics B: At Mol Opt Phys*, 54(2), 025202.
- Wang C, Ma X, Shi T, Wang M, Yang C, 2020, Effects of Adiabatic Approximation on The Electron Momentum Spectroscopy of Partially Spherically Symmetric Molecules, *Journal of the Physical Society of Japan*, 89(7), 074301.
- Wang X, Xu S, Ning C, Al-Hagan O, Hu P, Zhao Y, vd., 2018, Dynamic effects in electron momentum spectroscopy of sulfur hexafluoride, *Physical Review A*, 97(6), 062704.
- Watanabe N, Hirayama T, Takahashi M, 2019, Vibrational effects on electron-impact valence excitations of SF₆, *Physical Review A*, 99(6), 062708.
- Watanabe N, Yamazaki M, Takahashi M, 2016, Relationship between interference pattern and molecular orbital shape in (e, 2e) electron momentum profiles of SF₆, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 209, 78-86.

- Weigold E, Zheng Y, von Niessen W., 1991, Electron momentum spectroscopy of sulphurhexafluoride, *Chemical Physics*, 150(3), 405-27.
- Winstead C, McKoy V, 2004, Low-energy electron collisions with sulfur hexafluoride, SF₆, *The Journal of Chemical Physics*, 121(12), 5828-35.
- Woodruff D P, 2016, *Modern Techniques of Surface Science*. Cambridge University Press, 509p, Cambridge.
- Yalim H A, Cvejanović D, Crowe A, 1997, 1s-2p Excitation of Atomic Hydrogen by Electron Impact Studied Using the Angular Correlation Technique, *Physical Review Letters*, 79(16), 2951-4.
- Yalim H A, Cvejanović D, Crowe A, 1999, Angular correlation study of H(2p) excitation by electron impact, *Journal of Physics B: At Mol Opt Phys.*, 32(14), 3437.
- Zhao M fu, Shan X, Yang J, Wang E liang, Niu S shan, Chen X jun, 2015, Observation of Interference Effects in (e, 2e) Electron Momentum Spectroscopy of SF₆, *Chinese Journal of Chemical Physics*, 28(5), 539-44.
- Zhong L, Xu J, Wang X, Rong M, 2019, Electron-impact ionization cross sections of new SF₆ replacements: A method of combining Binary-Encounter-Bethe (BEB) and Deutsch-Märk (DM) formalism, *Journal of Applied Physics*, 126(19), 193302.