ELEKTRON ETKİSİ İLE METAN MOLEKÜLÜNÜN İKİLİ DİFERANSİYEL TESİR KESİTLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat YAVUZ

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Melike ULU

FİZİK ANABİLİM DALI

Aralık, 2013

Bu tez çalışması 11FEN.BİL.07 numaralı proje ile BAPK tarafından ve
109T738 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRON ETKİSİ İLE METAN MOLEKÜLÜNÜN İKİLİ DİFERANSİYEL TESİR KESİTLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Murat YAVUZ

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Melike ULU

FİZİK ANABİLİM DALI

Aralık, 2013

TEZ ONAY SAYFASI

Murat YAVUZ tarafından hazırlanan "Elektron Etkisi İle Metan Molekülünün İkili Diferansiyel Tesir Kesitlerinin Ölçülmesi" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca ...../...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Melike ULU

Başkan : Prof.Dr. İsmail BOZTOSUN
Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi,.....

Üye : Prof.Dr. Mevlüt DOĞAN
Afyon Kocatepe Ü., Fen-Edebiyat Fakültesi,.....

Üye : Yrd.Doç.Dr. Melike ULU
Afyon Kocatepe Ü., Fen-Edebiyat Fakültesi,.....

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

.....
Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

- 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.

30/12/2013



Murat Yavuz

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRON ETKİSİ İLE METAN MOLEKÜLÜNÜN
İKİLİ DİFERANSİYEL TESİR KESİTLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Murat YAVUZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Melike ULU

Bu çalışmada, elektron etkisi ile metan molekülünün ikili diferansiyel tesir kesiti ölçümleri yapılmıştır. Elektron çarpışma deneylerinde, belirli enerjideki elektron demeti hedef gaz atom/molekülleri ile çarpıştırılmakta ve çarpışma sonucu ortaya çıkan parçacıklar açı ve enerjilerine göre dedekte edilmektedir. Çarpışma sonucu ortaya çıkan yüklü parçacıklar, birbirleriyle etkileşen kuantum parçacıklarıdır. Saçılma olayının anlaşılması, etkileşme potansiyelinin ve parçacıkların dalga fonksiyonlarının doğru ifade edilmesiyle mümkündür. Çarpışma olayında oluşan çok parçacıklı sistemin çözümü, iyonlaşma dinamikleri ve hedefin yapısı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Elektron saçılma deneyleriyle temel düzeyde elde edilen veriler doğada gözlemlenen olaylara ışık tutmaktadır.

İkili diferansiyel tesir kesiti, çarpışma sonucu oluşan iyonlaşma olayında, açığa çıkan elektronlardan birinin açısına ve enerjisine bağlı olarak yapılmaktadır. Bu çalışmada ikili diferansiyel tesir kesiti ölçümleri, gelen elektron enerjisi 50-350 eV iken açığa çıkan elektronlardan birinin açısal dağılımı belirlenerek elde edilmiştir. Spektrometrenin açı ve enerji kalibrasyonunu yapmak, enerji çözünürlüğünü belirlemek için elastik ve inelastik enerji kayıp spektrumları alınmıştır. Sistemin güvenilirliğini test etmek için, alınan elastik diferansiyel tesir kesiti ölçümleri, literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılarak uyumlu oldukları görülmüştür. Ölçümler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Elektron Çarpışma Laboratuvarında (eCOL) bulunan elektron spektrometresi kullanılarak alınmıştır.

Bu çalışma ile metan molekülünün elektron saçılma tekniği ile ikili diferansiyel tesir kesiti ölçümleri 50-350 eV elektron enerjisi aralığında ve açısal dağılıma bağlı olarak ilk kez tarafımızca ölçülmüştür. Elde edilen tesir kesitlerinin, teorik olarak analiz edilmeleri bu alanda kullanılan teorik modellerin geçerliliğini göstermesi açısından önemlidir.

2013, xiii + 74 sayfa

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

ABSTRACT
MSc Thesis

MEASUREMENT OF ELECTRON IMPACT DOUBLE DIFFERENTIAL CROSS SECTIONS OF METHANE MOLECULE

Murat YAVUZ
Afyon Kocatepe University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Melike ULU

In this research, electron impact ionization cross sections of methane molecule are presented. In electron collision experiments, electron beam with specific energy interacts with atom/molecules of target gas and the outgoing particles are detected with respect to their scattering angle and energy. The outgoing particles are quantum particles that are interacted with each other. Scattering phenomena can be understood only if the interaction potential and particle's wavefunctions are correctly determined. Solution of the many-body problem gives important informatin about the target structure and ionization dynamics.

Double differential cross sections are obtained by measuring angular and energy distributions of one of the outging particles after electron impact ionization. In this work, angle dependent double differential cross sections are measured by 50-350eV incident energy electron impact. Elastic and inelastic energy loss spectrums are obtained to determine the energy resolution and angular and energy calibration of the spectrometer. Measured elastic differential cross sections compared to existing data in literature to test the reliability of the spectrometer. Measurements are completed in Electron Collision Laboratory (eCOL) located in Afyon Kocatepe University.

Angular distributions of double differential cross sections of methane molecule have been measured at first time in the literature within the frame of this work at 50-350 eVenergy range by electron scattering technique. Theoretical analysis of obtained cross sections is important to verify the models that used in this processes.

2013, xiii + 74 pages

Key Words: Electron-molecule collisions, cross section, electron scattering, methane molecule, electron spectrometer.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından, gösterdiği ilgi ve anlayıştan dolayı tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Melike ULU'ya, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm Sayın Öğr. Grv. Dr. Zehra Nur ÖZER'e ve desteklerinden dolayı e-COL grubu çalışma arkadaşlarıma, bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Afyon Kocatepe Üniversitesi BAPK tarafından 11FEN.BİL.07 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

Murat YAVUZ

AFYONKARAHİSAR, 2013

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
ÇİZELGELER DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ 5
2.1 Elektron Çarpışmalarında Saçılma Olayı 5
2.2 Tesir Kesiti Kavramı 7
2.3 Elektron – Metan Çarpışmaları 11
2.3.1 Metan Molekülünden Elastik Saçılma 12
2.3.2 Metan Molekülünden İnelastik Saçılma 15
2.4 Diğer Moleküllerde Elektron Etkisi ile İyonlaşma Tesir Kesitleri 20
3. MATERYAL ve METOT 22
3.1 Elektron Spektrometresi 22
3.2 Vakum Sistemi 25
3.3 Elektron Tabancası 26
3.4 Faraday Elektron Toplayıcı 30
3.5 Elektron Enerji Analizörü 31
3.6 Elektron Çoğaltıcı (CEM) 36
3.7 Sinyal İşleme Ünitesi 37
3.7.1 Elektronik Kablolama 38
3.7.2 Yükseltici (Apmlifier) 39
3.7.3 Ayırtedici (Diskriminatör) 41
3.7.4 Zaman-Genlik Dönüştürücü (Time to Amplitude Converter; TAC) 43
3.7.5 Çok Kanallı Sayıcı (Multi Channel Scaler; MCS) 45
4. BULGULAR 46
4.1 Enerji Kayıp Spektrumu 46
4.2 Elastik Diferansiyel Tesir Kesitleri (DCS) 47
4.3 İkili Diferansiyel Tesir Kesitleri (DDCS) 50

5. TARTIŞMA ve SONUÇ 58
6. KAYNAKLAR 60
ÖZGEÇMİŞ 74

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CH_4	Metan
eV	Elektron Volt
σ	Tesir kesiti
θ	Saçılma açısı
μA	Mikroamper
mbar	Milibar
Ω	Katıaçı (steradyan)
GHz	Gigahertz

Kısaltmalar

FET	Faraday elektron toplayıcı
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
TCS	Toplam tesir kesiti
DCS	Diferansiyel tesir kesiti
SDCS	Tekli diferansiyel tesir kesiti
DDCS	İkili diferansiyel tesir kesiti
TDCS	Üçlü diferansiyel tesir kesiti

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Metan molekülünün orbital modeli. 2

Şekil 1.2 Metan molekülünde sp^3 hibritleşmesi sonucu orbitallerin oluşumu. 3

Şekil 2.1 Gelen elektron demetinin hedefle etkileşmesi ile oluşan saçılma geometrisi (Bhowmik 2012)..... 5

Şekil 2.2 Yüklü bir parçacığın potansiyelden saçılması durumunda gelen düzlem dalga ve saçılan küresel dalga ile katı açının şematik gösterimi..... 7

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 (Colyer 2011). 9

Şekil 2.4 Düşük enerjili elektronlarla CH_4 molekülünün çarpışması sonucu toplam tesir kesitinde gözlenen Ramsauer-Townsend minimumu (~0,4 eV) ve karakteristik maksimum (~8 eV) yapıları. Şekildeki veriler; A, Ferch et al. 1985; B, Brode 1925; C, Brüche 1930, D, Ramsauer and Kollath 1930; E, Barbarito et al. 1979; F, Sohn et al. 1983; □, ○, Tanaka et al. 1982; Δ, Floeder et al. 1985..... 12

Şekil 2.5 E_0=20eV için e-CH_4 elastik DCS deneysel ve teorik çalışmaları. Düz çizgi, Iga et al. (2000) hesaplama; kısa kesikli, çizgi Jain (1986) hesaplama; uzun kesikli çizgi, Nishimura and Itikawa (1994); içi dolu üçgenler, Curry et al. (1985) deneysel ölçümleri; içi boş üçgenler Vuskovic and Trajmar (1983) ölçümleri, içi dolu kareler Boasten and Tanaka (1991) ölçümleri; yıldızlar, Shyn and Cravens (1990) ölçümleri; içi dolu daireler Iga et al. (2000) ölçümleri..... 13

Şekil 2.6 E_0= 400 eV için e^--CH4 elastik DCS deneysel ve teorik çalışmalar. Düz çizgi, Iga et al. (2000) hesaplama; kısa kesikli, çizgi Jain (1986) hesaplama; uzun kesikli çizgi, 410 eV için Dhal et al. (1979); içi dolu daireler Iga et al. (2000) ölçümleri..... 14

Şekil 2.7 E_0=20 ve 200 eV için e-CH_4 inelastik çarpışması sonucu oluşan enerji kayıp spektrumu (Vuskovic and Trajmar 1983). 16

Şekil 2.8 Metan molekülünün elektron etkisi ile toplam iyonlaşma tesir kesiti ölçüm ve hesaplamaları. Şekildeki siyah düz çizgi Kim et al. 1997, kesikli çizgi Hwang et al. 1996 teorik hesaplamalarını; kırmızı noktalar Rapp and Englander-Golden 1965; yeşil kareler Orient and Srivastava 1965; mavi noktalar Duric et al. 1991; kahve üçgenler Schram et al. 1966 deneysel ölçümlerini göstermektedir. 17

Şekil 2.9 E_0=500 eV elektron etkisiyle iyonlaşma olayında DDCS ölçümü (Oda 1975). 18

Şekil 2.10 CH_4 molekülünün e,2e tekniği ile alınan bağlanma enerjisi spektrumu (Hood et al. 1973). 19

Şekil 2.11 CH_4 molekülü için EMS yöntemiyle alınmış momentum dağılımları ve yoğunlukları. a) $1t_2$ ve b) $2a_1$ orbitalleri için (Clark et al. 1990). 20

Şekil 3.1 Deney düzeneğinin genel görünümü 24

Şekil 3.2 Elektron spektrometresini oluşturan parçaların vakum sistemi içerisindeki görünümleri. İki elektron enerji analizörü ve Faraday elektron toplayıcı döner tablalar üzerine yerleştirilmiştir. 24

Şekil 3.3 Turbo moleküler ve mekanik pompalar, basınç ölçüm-görüntüleme cihazları ve bağlantılarının birlikte bulunduğu istasyonun yakından görünümü. 26

Şekil 3.4 Hairpin tipi filament ve filamentin elektron tabancasına yerleştirilmiş halinin görüntüsü (Özer 2013). 27

Şekil 3.5 Elektron tabancasının AutoCAD programında teknik çizimi (Ulu ve ark. 2007). 28

Şekil 3.6 Elektron tabancasında kullanılan lens elemanları için gerilim bölücü ve güç kaynağı (G.K.) bağlantıları (Dogan ve ark. 2013). 29

Şekil 3.7 Elektron tabancası kontrol paneli ve güç kaynakları. 30

Şekil 3.8 FET ve saçılan analizörün açı kısıtlamasını ortadan kaldırmak için FET üzerine yerleştirilen daha küçük boyutlardaki ikinci küçük FET'in görüntüsü. 31

Şekil 3.9 Elektron enerji analizörünün SIMION programında çizilen kesit görünümü. 32

Şekil 3.10 Metan molekülünde alınan örnek bir elastik saçılma piki. Gelen elektron demetinin enerjisi, E_0=250eV ve uçuş enerjisi, KE=20eV için enerji dağılımı ΔE=0.72eV olarak ölçülmüştür. 34

Şekil 3.11 Yarıküresel deflektör içinde, farklı α giriş açılarına sahip elektronların izledikleri yörüngeler. (1) ile gösterilen yörüngeyi izleyen elektronlar, (2) ile gösterilen yörüngeyi izleyen elektronlardan daha uzun uçuş süresine sahiptir (King 2005). 35

Şekil 3.12 Tek kanallı elektron çoğaltıcı içinde çoğalma işleminin gösterimi..... 36

Şekil 3.13 CEM besleme bağlantıları ve çıkış sinyalinin elde edilmesi (Murray 2005). 37

Şekil 3.14 Sinyal işleme ünitesi ve NIM cihazlarının görünümü..... 38

Şekil 3.15 Farkı yoğunluklardaki ortamda ilerleyen mekanik atma. a) Ortamların arakesitine yaklaşırken, b) yoğunluk farkından dolayı arakesitten geçen ve yansıyan atmalar..... 39

Şekil 3.16 Sinyal yükseltici olarak çalışan bipolar npn transistör gösterimi..... 40

Şekil 3.17 Elektron sayımının yükseltici kazancına bağlı olarak değişimi (Özer 2013). 40

Şekil 3.18 Seviye ayırtedici işleyişi gösterimi. Sol tarafta ayırtedici giriş sinyali, sağ tarafta çıkış sinyali tetiklenme seviyesi ve zamanlarıyla gösterilmektedir (Murray 2005). 41

Şekil 3.19 (a) Yükseltici çıkış sinyali temsili gösterimi, b) Eşik seviyesine bağlı olarak ayırtedici çıkışından okunan sayım sayıları gösterilmektedir. 42

Şekil 3.20 Sinyal işleme ünitesinde; dedektör, yükseltici ve ayırtedici çıkışındaki sinyallerin osiloskop ekran görüntüleri (Okumuş 2009). 43

Şekil 3.21 TAC'ın, başla ve dur (start-stop) girişlerine uygulanan sinyaller arasındaki zaman farkıyla orantılı genlikte çıkış sinyali üretmesi. 44

Şekil 3.22 İki analizörün kullanıldığı durumlarda, dedekte edilen elektronlar arasındaki zaman farkının TAC ile ölçümünde, sinyallerin izlediği yolun şematik gösterimi. 44

Şekil 4.1 Metan molekülünde E_0=250eV için alınan enerji kayıp spektrumu. 47

Şekil 4.2 E_0=200eV için alınan elastik DCS spektrumu. Alınan ölçümler literatürdeki diğer ölçümler ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilde; siyah noktalar bu çalışmada alınan ölçümleri, daireler Iga et al. (2000) ölçümlerini, mavi kareler Vuskovic and Trajmar (1983) ölçümlerini, üçgenler Sakae et al. (1989) ölçümlerini, düz çizgi Iga et al. (2000) teorik hesaplamalarını, kesikli çizgi Dhal et al. (1979) teorik hesaplamalarını göstermektedir (Dogan *et al.* 2013). 48

Şekil 4.3 Metan molekülünde E_0=50-350eV arası gelen elektron enerjileri için alınan elastik diferansiyel tesir kesiti ölçümleri. 49

Şekil 4.4 E_0=50 eV için alınan DDCS sonuçları. 51

Şekil 4.5 E_0=100 eV için alınan DDCS sonuçları. 51

Şekil 4.6 E_0=150 eV için alınan DDCS sonuçları. 52

Şekil 4.7 E_0=200 eV için alınan DDCS sonuçları. 53

Şekil 4.8 E_0=250 eV için alınan DDCS sonuçları. 54

Şekil 4.9 E_0=300 eV için alınan DDCS sonuçları. 56

Şekil 4.10 E_0=350 eV için alınan DDCS sonuçları. 57

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1 Metan molekülünde orbitallerin bağlanma enerjileri. 2

Tablo 2.1 Elektron-atom/molekül çarpışması sonucu meydana gelebilecek etkileşme olayları 6

Tablo 2.2 Elektron-metan çarpışma deneylerinden elastik saçılma için literatür özeti.. 15

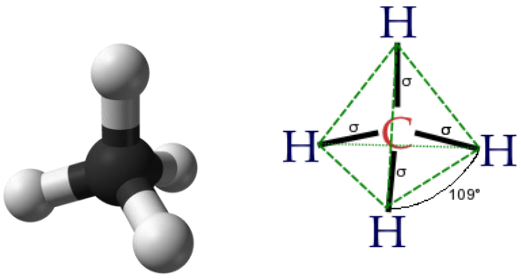
1. GİRİŞ

Yüklü ve yüksüz parçacıkların atom ve moleküllerle çarpışması sonucu oluşan etkileşmeler modern fiziğin en önemli süreçlerinden birisidir. Çarpışma fiziğinin konusu olan bu süreçlerden özellikle atom ve moleküllerin hedef olarak alındığı elektron saçılma deneyleri ilgi çeken alanlardan birisidir. Deneysel olarak saçılma olayı, tesir kesiti ölçümleriyle incelenmekte, çarpışma sonucu ortaya çıkan parçacıkların analiz edilmesiyle hedefin yapısı ve etkileşme dinamikleri hakkında detaylı şekilde bilgi alınabilmektedir.

İlk çarpışma deneyi olarak katot ışınlarının çeşitli malzemelerde soğrulmasını inceleyen Lenard'ın çalışması kabul edilmektedir (Lennard 1903). İlk çarpışma deneylerinden en ünlüsü ise Rutherford'un ince altın hedeften α ve β parçacıklarının saçılma deneyidir (Rutherford 1911). Bu deney sonucunda atom çekirdeğinin keşfi yapılmıştır. Daha sonra, Franck ve Hertz (1914) civa buharından saçılan elektronların civa atomları ile etkileşmesi sonucu enerji kaybettiğini göstermişlerdir. 1920'li yıllardan günümüze kadar elektron-atom/molekül çarpışma deneyleri ve teorileri farklı hedef ve tekniklerle gelişimini sürdürmektedir.

Elektron çarpışma deneyleri hem deneysel hem de teorik olarak zorluklar içermektedir. Örneğin, teorik anlamda etkileşme potansiyelinin ve dalga fonksiyonunun ifade edilmesi önemli bir problemdir. Elektron etkisiyle tekli iyonlaşma olayında; çarpışmadan sonra açığa çıkan üç yüklü parçacık, birbiriyle uzun menzilde etkileşmektedir. Bu durum, üç cisim probleminin kuantum mekaniksel karşılığıdır ve analitik çözümü halen bulunmamakla birlikte bazı yaklaşımlarla nümerik olarak çözülmeye çalışılmaktadır. Doğada en basit atomik sistem olan hidrojen atomunun deneysel saçılma tesir kesitlerinin anlaşılması dahi ancak 2000'li yılların başlarında gerçekleşebilmiştir (Rescigno *et al*. 1999, Bray 2002). Daha karmaşık çok elektronlu atomik ve moleküler hedefler kullanılarak yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, son yıllarda yoğun çalışılan konulardan olmuştur (Al-Hagan *et al.* 2008). Moleküler hedeflerin elektronlarla etkileşmesi için kullanılan teorik modellerin geliştirilmesi için basit yapılı moleküllerin çalışılması, ayrıca teknolojik ve bilimsel değeri olan moleküllerin etkileşim dinamiklerinin anlaşılması önem kazanmıştır.

Tesir kesiti ölçümlerinin temel ve uygulamalı bilimlerde birçok araştırma ve uygulama alanı bulunmaktadır. Ölçülen tesir kesitleri plazmaların anlaşılmasında, uzay çalışmalarında, kimyasalların ve malzemelerin yapılarının belirlenmesinde, biyolojik maddelerin, bazı uydu ve gezegenlerin atmosfer bileşenlerinin radyasyon ve yüklü parçacıklar ile etkileşiminin modellenmesinde önemli bir rol almaktadır. Özellikle organik moleküllerin elektronlarla etkileşmeleri, bazı biyolojik ve kimyasal süreçlerin anlaşılmasında önemlidir.



Şekil 1.1 Metan molekülünün orbital modeli.

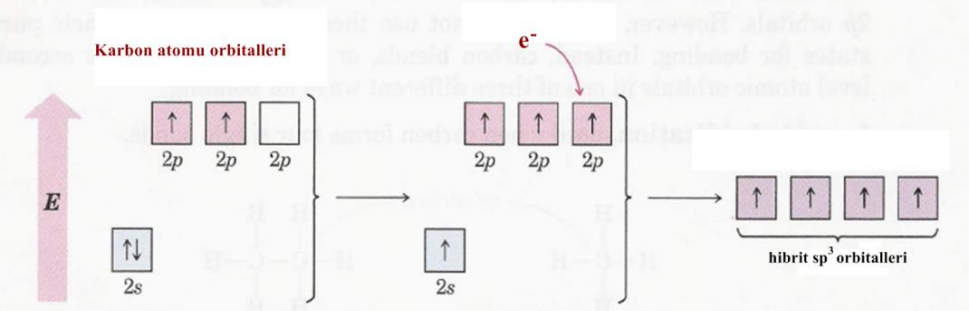
Bu tez çalışmasının konusu olan metan, son yıllarda bilimsel ve teknolojik değeri artan bir molekül olarak özellikle önem kazanmıştır. Metan, kimyasal formülü CH_4 olan basit simetrili oldukça kararlı organik bir bileşiktir. Doymuş alifatik hidrokarbonların ilk üyesidir. Normal sıcaklık ve basınçlarda gaz halinde bulunur, kaynama noktası -161,7°C'dir, renksiz ve kokusuzdur. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, CH_4 molekülü, yüksek tetrahedral yapıda dört eşit C-H bağına sahiptir.

Tablo 1.1 Metan molekülünde orbitallerin bağlanma enerjileri.

Moleküler Orbital	Bağlanma Enerjisi (eV)
$1a_1$	290.70
$2a_1$	25.73
$1t_2$	14.25

Metan molekülü, atomik 1 adet s ve 3 adet p orbitalinin hibritleşmesi sonucu oluşan 4 eşdeğer sp^3 orbitalinden oluşmaktadır. Şekil 1.2'de sp^3 hibritleşme olayı gösterilmektedir. Toplamda 3 farklı enerji seviyesinde $1a_1$, $2a_2$ ve $1t_2$ orbitallerine sahip

metan molekülünün enerji seviyeleri Tablo 1.1'de verilmektedir. Metan molekülünün tesir kesiti ölçümleri 1920'lerde başlamıştır (Hughes and Klein 1924) ve o yıllardan beri üzerinde çalışılan bir molekül olagelmiştir.



Şekil 1.2 Metan molekülünde sp^3 hibritleşmesi sonucu orbitallerin oluşumu.

Metan molekülü, atom ve molekül fiziğinde, çok atomlu moleküllerin basit bir örneği olarak geliştirilen teorik modellerin test edilmesinde kullanılmaktadır. Teknolojik değeri olan plazmaların üretiminde önemi artan bir molekül olarak dikkat çekmiştir (Möller 1993). Plazma üretim teknikleriyle elmas (Mitsuda *et al.* 1987) ve amorf karbon ince film (Kline *et al*. 1989) kristallerinin büyütülmesinde elektron-metan etkileşmelerinden faydalanılmıştır. Metan, bulunduğumuz yüzyılın ve geleceğin çözüm bekleyen sorunlarından biri olan küresel ısınmayı oluşturan sera gazlarından birisidir (Zellner and Weibring 1989). Ayrıca, atmosferde iyonların oluşumu ve elektron/iyon-molekül etkileşimlerinin anlaşılmasında önemli bir rolü olduğu için atmosfer fiziğinde ayrı bir öneme sahiptir. Metan, gezegenlerin en dış atmosferinde ve kuyruklu yıldızlarda bulunan önemli bir bileşendir. Elektronların CH_4 ve diğer gazlarla etkileşimi, hava akış emisyonu ve elektron yoğunlukları gibi atmosfer dinamiklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu atmosferik süreçlerin anlaşılması için elektron etkisiyle CH_4 molekülü tesir kesitlerinin bilgisi gerekmektedir. Ayrıca metan molekülü; Jüpiter, Satürn, Uranüs, Neptün gibi gezegenlerin (Broadfoot *et al*. 1979, Kim 1988, Romani and Atreya 1988, Mahaffy 2005, Swain *et al.* 2008) ve Titan gibi uyduların (Cravens *et al.* 1998) atmosferlerinde önemli miktarda bulunur. Bu bakımdan, astrofizik açısından da önemli bir moleküldür. Basit simetrik yapılı hidrokarbonların tipik bir örneği olduğu için, radyobiyolojide organik bileşiklerin simülasyonlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Kimyasal reaksiyonların incelenmesinde ve biyolojide de elektron-metan etkileşimleri

ve özellikle iyonlaşması önemli bir süreçtir (Nixon *et al.* 2011). Metan, doğal gaz içinde en yüksek orana sahip bileşendir (tipik olarak %85), bu yüzden önemli bir yakıttır. Tüm bu araştırma ve uygulama alanları dikkate alındığında elektron etkisiyle metan molekülünün iyonlaşma olayının iyi anlaşılması gerektiği açıktır. Literatürde bu konuda çok sayıda çalışma olmasına rağmen, elektron çarpışma tekniği ile yapılan ve direkt olarak kuantum parçacıklarının etkileşmelerinin gözlenebildiği iyonlaşma tesir kesiti ölçümleri ile teorik modellemelerinde eksiklikler ve anlaşılmamış süreçler vardır. Diğer kuantum parçacıklarıyla karşılaştırıldığında, elektron çarpışma deneylerinde elektronların kullanılmasının birçok avantajı bulunmaktadır. Temel bir parçacık olduğu için, evrende doğal olarak gerçekleşen süreçler incelenebilmektedir. Hızlandırılmış elektron demetinin üretimi kolay ve maliyeti azdır, elde edilen demet hedef atom veya molekülden bağımsız olarak tüm atomik ve moleküler sistemlere uygulanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, elektron ile metan molekülünün etkileşme mekanizmalarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, metan molekülünün elastik diferansiyel ve ikili diferansiyel tesir kesiti ölçümleri alınmıştır. Kullanılan deney düzeneği, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fizik Bölümü'ndeki Elektron Çarpışma (eCOL) Laboratuvarında bulunmaktadır. Bu deney düzeneğiyle yapılan çalışmalarda temel amaç; atomik ve moleküler sistemlerin yapısını incelemek, iyonlaşma olayında elektron korelasyonlarının nasıl gerçekleştiğini görmek, çok parçacık probleminin çözümüne yönelik deneysel veriler üretmek ve teorik modellerin doğruluklarını sınamaktır (Doğan 1999, Ulu 2007, Ulu ve ark. 2007, Şişe 2011, Özer 2013).

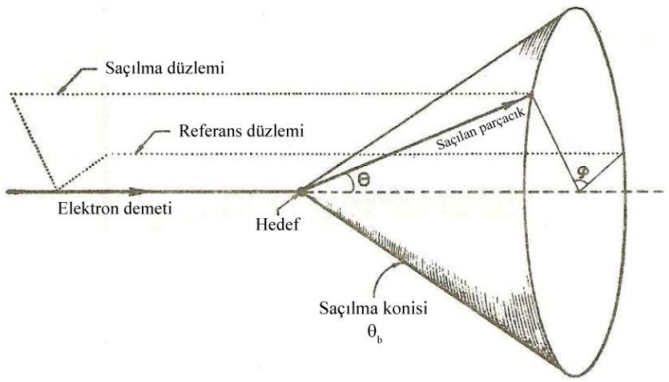
Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2'de literatür bilgisiyle birlikte elektron-atom/molekül çarpışmalarının deneysel altyapısı anlatılmış ve çarpışma kinematiklerinden elastik saçılma, uyarma ve iyonlaşma olayları incelenmiştir. Ayrıca elektron-atom/molekül çarpışmalarında tesir kesiti kavramı kısaca açıklanmıştır. Bölüm 3'te deney düzeneği ve ölçüm süreçleri tanımlanmıştır. Elektron çarpışma spektrometresini oluşturan kısımların (vakum sistemi, elektron tabancası, enerji analizörleri, Faraday elektron toplayıcısı, detektörler, sinyal işleme birimleri) özellikleri ve test süreçleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Bölüm 4'te alınan deneysel veriler sunulmuş ve son olarak, Bölüm 5'te sonuçlar yorumlanmış ve tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Elektron – atom/molekül çarpışma deneyleri temelde iki amaçla yapılmaktadır. Bunlardan birincisi hedef atom/molekülün kuantum yapısının incelenmesi, diğeri ise elektron ile hedef arasındaki etkileşme dinamiklerinin anlaşılmasıdır. Deneysel olarak çarpışma sonucu ortaya çıkan elektron sayımları, tesir kesiti kavramı ile ilişkilendirilerek, olasılık dağılımları kuantum mekaniksel olarak tanımlanır. Bu bölümde elektron-atom/molekül çarpışmaları, tesir kesiti kavramı ve metan molekülünün hedef alındığı elektron çarpışma deneyleri ve teorilerinin literatür özeti sunulmaktadır.

2.1 Elektron Çarpışmalarında Saçılma Olayı

Elektron çarpışma deneylerinde, laboratuar sisteminde, belirli bir kinetik enerjiye sahip elektron demeti, hedef atom/molekül üzerine gönderilerek etkileşme sonucu oluşan parçacıklar açı ve enerjilerine göre analiz edilirler. Gelen parçacıkların eşenerjili ve odaklanmış olduğu, hedefin ise durağan halde bulunduğu kabul edilirse; saçılma geometrisi şekil 2.1'deki gibi gösterilebilir. Saçılan parçacıkların çarpışma merkezine göre bir koni yüzeyinde saçıldıkları düşünülürse, etkileşmeden çıkıp saçılan parçacıkların sayısı açısal olarak bir değişim gösterecektir. Referans düzlemi ile saçılma düzlemi arasındaki ϕ düzlemdışı (azimuthal) açısı çarpışma düzlemini belirler ve çoğu zaman sıfır olarak alınır. Bu durumda, saçılma olayını tanımlayan açı, θ saçılma açısıdır.



Şekil 2.1 Gelen elektron demetinin hedefle etkileşmesi ile oluşan saçılma geometrisi (Bhowmik 2012).

Elektron-atom/molekül çarpışmalarında, önceden belirlenmiş bir kinetik enerjiye sahip elektron, durgun hedefle çarpışarak birkaç farklı türde saçılmaktadır. Saçılmanın türünü gelen elektron ve hedefin kuantum durumundaki değişiklikler belirler. Gelen elektronun enerjisinin değişmeden saçılması durumunda elastik çarpışma gerçekleşmiş olur. Bu durumda, hedefe enerji aktarılmamıştır ve hedefin iç kuantum yapısında bir değişim yoktur, enerji ve momentum korunmuştur. İnelastik çarpışma sonucu gelen elektron, hedefe enerji aktarır ve hedefin içyapısında bir değişim meydana gelir. Momentum korunur fakat etkileşmeye giren parçacıklar sisteminin toplam kinetik enerjisi korunumsuzdur. Çarpışma sonucunda molekül gibi bileşik bir sistem ayrışmaya uğrayabilir, reaksiyon adı da verilen bu etkileşime genel olarak ayrışma adı verilmektedir. Süperelastik çarpışmada ise, uyarılmış haldeki hedef, gelen elektrona enerji aktarır. Elastik, inelastik, ayrışma ve süperelastik etkileşme olaylarının gösterimleri Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1 Elektron-molekül çarpışması sonucu meydana gelebilecek etkileşme olayları

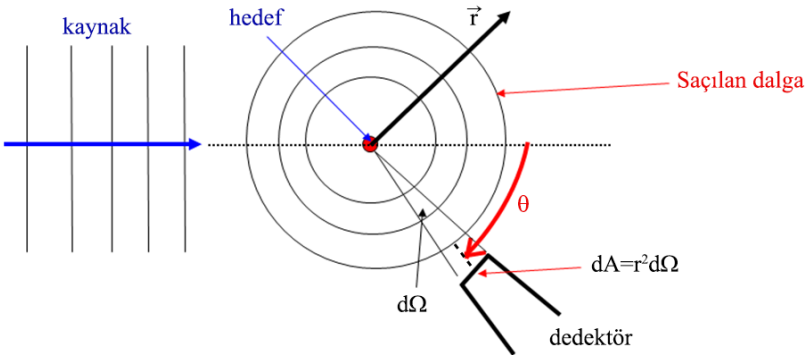
Etkileşme olayları		**Gösterim**
Elastik	Elastik saçılma	$e^- + A \rightarrow A + e^-$
İnelastik	Dönüsel uyarılma	$A(j) + e^- \rightarrow A(j') + e^-$
	Titreşimsel uyarılma	$A(v) + e^- \rightarrow A(v') + e^-$
	Elektronik uyarılma	$A + e^- \rightarrow A^* + e^-$
	Tekli iyonlaşma	$A + e^- \rightarrow A^+ + 2e^-$
	İkili iyonlaşma	$A + e^- \rightarrow A^{++} + 3e^-$
Ayrışma	Elektron yakalama ile ayrışma	$AB + e^- \rightarrow A^- + B$
	Rekombinasyon ayrışma	$AB^+ + e^- \rightarrow A + B$
	Nötral ayrışma	$AB + e^- \rightarrow A + B + e^-$
Süperelastik	Süperelastik saçılma	$e^- + A^* \rightarrow A + e^-$

Elektron çarpışma deneylerinde saçılma olaylarının anlaşılması, elektron-atom/molekül ve elektron-elektron etkileşmelerinin kütle merkezinde, Shrödinger dalga denklemi ile doğru ifade edilmesine bağlıdır. Tek elektronlu atomlarda bile etkin potansiyelin tam olarak belirlenememesinden kaynaklanan problemden dolayı sistemin dalga fonksiyonu,

tam olarak elde edilememektedir. Bu problem atom ve molekül fiziğinde çok parçacık (many–body) problemi olarak isimlendirilmektedir (Csanak *et al.* 1971).

2.2 Tesir Kesiti Kavramı

Gelen parçacıkların kaynağının uzaklığı, hedefin de-Broglie dalgaboyundan çok büyük olduğu için elektron demeti kuantum mekaniksel açıdan düzlem dalga olarak kabul edilebilir. Saçılma olayı sonucu ortaya çıkan parçacıklar uygun bir dedektör ile algılanarak saçılma açılarına göre analiz edilirler. Gerçekte, hiçbir dedektörün sonsuz küçük bir algılama yüzeyi olamaz, deneysel olarak da dedektörün saçılan parçacıkları algılama yüzeyi düşünüldüğünde çarpışma merkezinden saçılmış parçacıklar belirli bir dΩ katı açısında algılanabilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Yüklü bir parçacığın potansiyelden saçılması durumunda gelen düzlem dalga ve saçılan küresel dalga ile katı açının şematik gösterimi.

Şekil 2.2'de gelen ve saçılan dalgalar şematik olarak gösterilmiştir. Elastik saçılma veya uyarma deneylerinde meydana gelen olayların tanımlanabilmesi, sistemin toplam dalga fonksiyonunun çarpışmadan önce ve sonra belirlenmesine bağlıdır. Çarpışma olaylarını karakterize eden parametre ise tesir kesitidir. Tesir kesiti, bir çarpışma olayında birim zamanda birim hacimde bu olayın oluşma sıklığının, gelen parçacığın akısına oranı olarak tanımlanmaktadır (Burke and Joachain 1995). Bu genel tanım Şekil 2.2'de gösterilen potansiyelden saçılmanın çok küçük bir katı açı için uygulanırsa diferansiyel tesir kesiti dσ/dΩ tanımlanmış olur. Burada dΩ katı açısı küresel koordinatlarda $d\Omega = \sin\theta\, d\theta\, d\phi$ olarak ifade edilir. Bir çarpışma olayında, $|i\rangle = |k_i, \Phi_i, \chi_i\rangle$ ilk

durumundan $|j\rangle = |k_j, \Phi_j, \chi_j\rangle$ son durumuna geçişte dΩ katı açısında saçılan parçacık akısının gelen parçacık akısına oranından diferansiyel tesir kesiti,

$$\frac{d\sigma_{ji}}{d\Omega} = \frac{|\vec{k}_j|}{|\vec{k}_i|} |f(\theta,\phi)|^2 \tag{2.1}$$

eşitliği ile bulunur (Byron and Joachain 1989). Görüldüğü gibi tesir kesiti, saçılan dalga fonksiyonunun genliği $f(\theta,\phi)$ ile orantılıdır. Denklem 2.1'de, eşitliğin sol tarafı teorik diferansiyel tesir kesitini, sağ taraf ise deneysel olarak ölçülen olasılık genliği ifadesini göstermektedir. Teori ile deneysel arasındaki ilişkiyi ise deney kinematiği belirlemektedir. Burada, $|\vec{k}_j|/|\vec{k}_i|$ terimi deneysel kinematiği temsil etmektedir. Diferansiyel tesir kesiti, saçılma açısına bağlı bir nicelik olup belirli bir etkileşme kanalında saçılan elektronların açısal olasılık dağılımlarının bir ölçüsüdür.

İnelastik saçılma olaylarından tekli iyonlaşma olayı incelenirken diferansiyel tesir kesiti ifadesi yetersiz kalmaktadır. Çünkü iyonlaşma olayı sonrasında iki elektron ve bir iyon olmak üzere üç parçacık oluşmaktadır. Bu nedenle, daha üst mertebeden diferansiyel tesir kesiti tanımlarına ihtiyaç duyulur. İyon hareketinin ihmal edilmesi halinde, tekli iyonlaşma olayı;

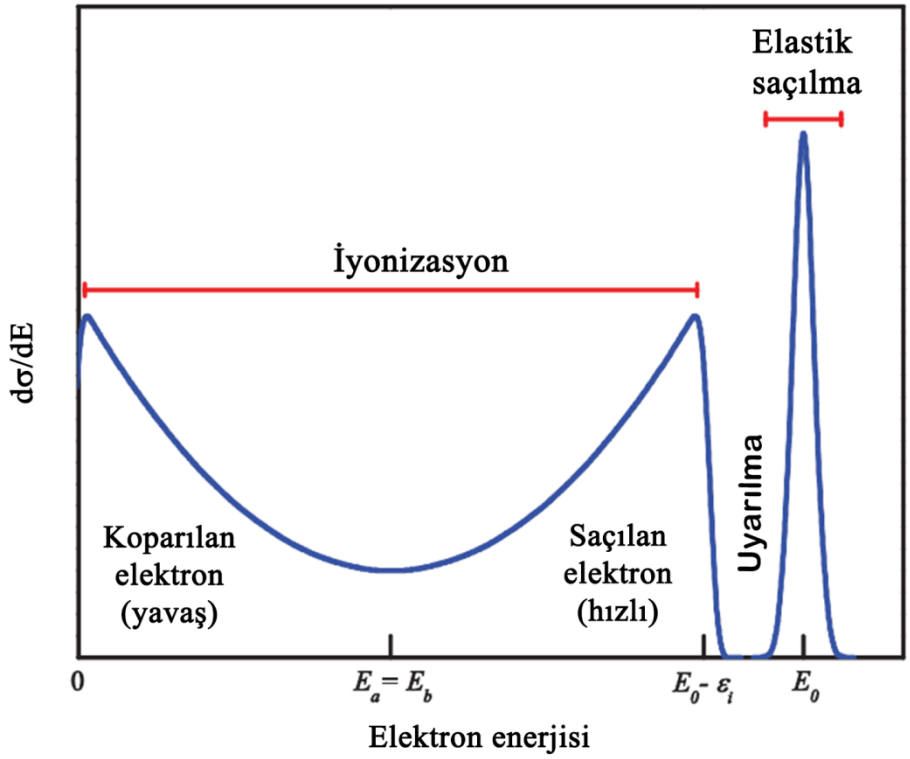
$$e^-(E_0, \vec{k}_0) + A \rightarrow A^+ + e^-(E_a, \vec{k}_a) + e^-(E_b, \vec{k}_b) \tag{2.2}$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada E_0, E_a, E_b ve k_0, k_a, k_b sırasıyla gelen, saçılan ve koparılan elektronların enerji ve momentumlarıdır. Elektron etkisiyle iyonlaşma olayında, çarpışmadan sonra üç serbest parçacığın bulunması dört farklı tür tesir kesiti ile tanımlanabilir. Bunlar; i) toplam iyonlaşma tesir kesiti (TCS), ii) tekli diferansiyel tesir kesiti (SDCS), iii) ikili diferansiyel tesir kesiti (DDCS), iv) üçlü diferansiyel tesir kesiti (TDCS) 'dir.

Toplam tesir kesiti (Total cross Section; TCS), gelen elektronun enerjisinin bir fonksiyonudur ve çarpışma sonrası açığa çıkan elektronların (saçılan ve koparılan)

enerji ve momentumundan bağımsız olarak meydana gelen iyonların sayısının bir ölçüsüdür. Dedektör, r mesafesinde sabit tutularak bütün açısal konumlarda hareket ettirilirse $4\pi r^2$'lik küresel yüzey alanından geçen saçılmış tüm parçacıklar dedekte edilebilir. Toplam iyonlaşma tesir kesiti ölçümleri, çoğu uygulamada oldukça önemli olmasına karşın, iyonlaşma dinamikleri ve hedefin yapısı hakkında göreceli olarak daha az bilgi vermektedir.

Tekli diferansiyel tesir kesiti (Single Differential Cross Section; SDCS), belirli bir E_0 enerjili elektronla çarpışma sonucu çıkan iki elektronun enerji veya açısal dağılımlarını tanımlar $(d\sigma/dE, d\sigma/d\Omega)$. SDCS, tekli iyonlaşma olayı sonucunda ortaya çıkan iki elektronun enerji dağılımlarını vermektedir.



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 (Colyer 2011).

Tekli iyonlaşmayla sonuçlanan inelastik çarpışma sonucunda, çarpışmadan önceki toplam kinetik enerji, gelen elektronun enerjisi olan E_0'dır. Bu enerjinin bir kısmı iyonlaşma potansiyeli olarak harcanırken arta kalan enerji (E_0-ε_i) iki elektron arasında

paylaşılır. Kuantum mekaniksel olarak çarpışma sonucu oluşan iki elektron ayırt edilemez, fakat asimetrik kinematiklerde hızlı elektronun saçılan, yavaş elektronun ise koparılan olması daha olasıdır. Enerjinin büyük kısmını saçılan elektron alacağı için enerjisi E_0-ε_i'ye daha yakınken, koparılan elektronun enerjisi sıfıra yakın olacaktır (Şekil 2.3). Şekil 2.3'te görüldüğü gibi E_a=E_b durumunda bir minimum gözlenmektedir. Bu, iki elektronun kalan enerjiyi eşit paylaştıkları simetrik ve en az olası durumdur. Tekli diferansiyel tesir kesitini doğrudan ölçebilmek oldukça zordur. Bu nedenle ikili diferansiyel tesir kesitinin tüm açılar üzerinden integre edilmesi ile elde edilir (Ehrhardt *et al.* 1986).

İkili diferansiyel tesir kesiti (Double Differential Cros Section; DDCS), çarpışma sonucu ortaya çıkan parçacıklardan birinin enerjisine ve açısına göre tanımlanır $(d^2\sigma / dEd\Omega)$. Bir iyonlaşma olayı sonrası oluşan iki elektron birbirinden ayırt edilememektedir. Dolayısıyla deneysel olarak elektronlardan herhangi birinin enerji ve açısına göre alınan DDCS ölçümü, saçılan ve koparılan elektronlardan her ikisinin katkısıyla oluşmaktadır. DDCS ölçümleri iki değişkene bağlı olduğu için, elektronlardan birinin açı veya enerji dağılımlarına göre iki farklı şekilde yapılabilmektedir.

İkili diferansiyel tesir kesitleri hesaplanırken, önce üçlü diferansiyel tesir kesitleri (Triple Differential Cross Section; TDCS) hesaplanarak çarpışma sonucu ortaya çıkan elektronlardan birinin tüm açılar üzerinden integrali alınmaktadır. Dedekte edilen elektronlar ayırtedilemez olduğu için teorik modellemelerde her iki elektronun da katkısı hesaba dahil edilmektedir. Ayrıca, DDCS hesaplamalarında direkt, değiş-tokuş ve girişim etkileri de dahil edilmektedir. Bu nedenle, deneysel DDCS ölçümleri, teorik modellemeleri hassas olarak sınanması için önemlidir.

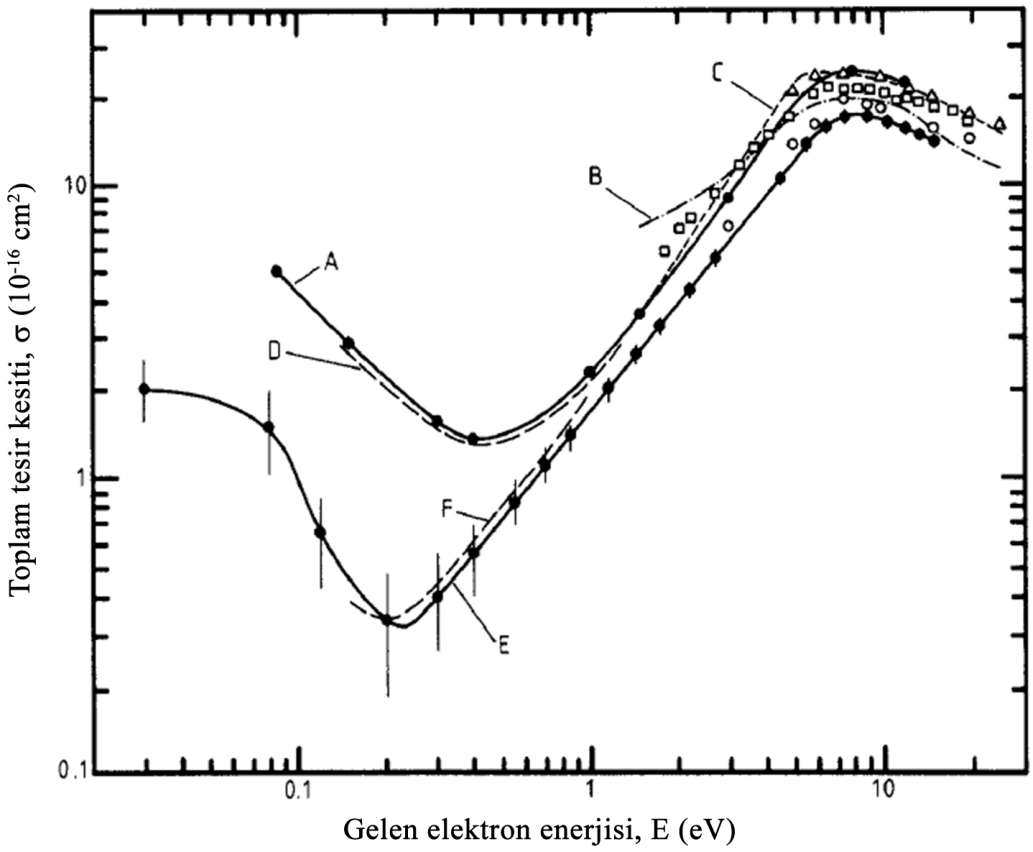
Üçlü diferansiyel tesir kesiti (TDCS), iyonlaşma olayı sonrası oluşan saçılan ve kopan elektronların her ikisinin de eş zamanlı olarak dedekte edilmesiyle, (e, 2e) çakışma deney tekniği ile, ölçülmektedir. Saçılan ve kopan elektronların momentumları belirlendiği için iyonlaşma olayının dinamiği ile ilgili en detaylı bilgiyi TDCS vermektedir $(d^3\sigma / dE_e d\Omega_s d\Omega_e)$. Deneysel TDCS ölçümleri ilk olarak Ehrhardt vd.

(1969) ve Amaldi vd. (1969) tarafından birbirlerinden bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Ehrhardt vd. (1969) düşük ve orta gelen elektron enerjilerinde iyonlaşma dinamikleri hakkında bilgi almak amaçlı çalışmalar yapmışlardır. Amaldi vd. (1969) ise gelen elektron enerjisini yüksek (iyonlaşma potansiyelinin 20 katından daha fazla) alarak gelen ve hedefe bağlı elektron arasında ikili çarpışma sonucu ürünleri dedekte ederek, hedefe bağlı elektronun momentum dağılımlarını ölçmüşlerdir. Bu tip çalışmalar elektron momentum spektroskopisi (EMS) adı verilmekte ve hedefin yapısı hakkında bilgi edinmeyi amaçlamaktadır. Deneysel kinematiğe bağlı olarak TDCS ölçümlerinde, i) yapısal ii) dinamik, olmak üzere iki farklı amaçla ölçüm alınabilmektedir.

2.3 Elektron – Metan Çarpışmaları

Metan molekülünün hedef olarak kullanıldığı elektron saçılma deneyleri ve teorileri uzun yıllardan beri ilgi odağı olmuştur. Bu bölümde, metan molekülünün hedef olarak kullanıldığı elektron saçılma deneyleri ve teorik modellemeleri elastik ve inelastik saçılma başlıklarıyla ele alınacaktır.

Elektron-metan etkileşimiyle ilgili literatürün önemli bir kısmı çok küçük enerjide gelen elektronların CH_4 molekülünden saçılması sonucu tesir kesitlerinde gözlenen bazı özel yapılarla ilgilidir. Bu yapılar; 0,4 eV enerjide gözlenen minimum (Ramsauer-Townsend minimumu) ve yaklaşık 8 eV enerjide gözlenen karakteristik bir maksimumdur. Her iki yapı da deneysel olarak diferansiyel, toplam, kısmi ve integral tesir kesiti ölçümleriyle yoğun olarak incelenmiştir (Brode 1925, Brüche 1927, Brüche 1930, Ramsauer and Kollath 1930, Barbarito *et al.* 1979, Tanaka *et al.* 1982, Ferch *et al.* 1985, Jones 1985, Lohmann and Buckmann 1986, Sohn *et al.* 1986, Boasten and Tanaka 1991). Şekil 2.5'te bu çalışmaların bir kısmı karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

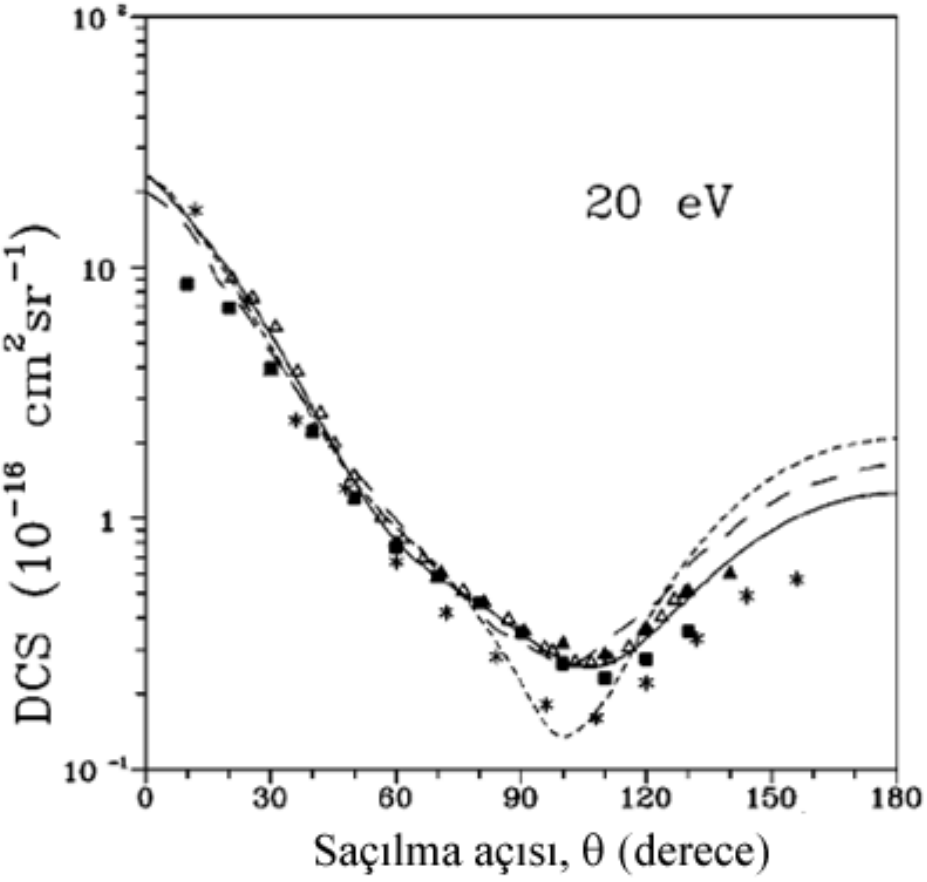


Şekil 2.4 Düşük enerjili elektronlarla CH_4 molekülünün çarpışması sonucu toplam tesir kesitinde gözlenen Ramsauer-Townsend minimumu (~0,4 eV) ve karakteristik maksimum (~8 eV) yapıları. Şekildeki veriler; A, Ferch et al. 1985; B, Brode 1925; C, Brüche 1930, D, Ramsauer and Kollath 1930; E, Barbarito et al. 1979; F, Sohn et al. 1983; □, ○, Tanaka et al. 1982; Δ, Floeder et al. 1985.

2.3.1 Metan Molekülünden Elastik Saçılma

Elektron-metan saçılma deneylerinde en çok incelenen olay elastik saçılma olmuştur. Deneysel ve teorik olarak özellikle düşük enerjilerde elastik diferansiyel tesir kesiti çalışmaları oldukça fazladır. Gelen elektron enerjisi $E_0 < 50$ eV için deneysel elastik DCS ölçümlerine örnek olarak şu çalışmalar verilebilir: Tanaka *et al.* 1982, Vuskovic and Trajmar 1983, Curry *et al.* 1985, Sohn *et al.* 1986, Shyn and Cravens 1990, Boesten and Tanaka 1991, Mapstone and Newell 1992, Kanik *et al.* 1993, Bundschu *et al.* 1997, and Cho *et al.* 2008. Teorik olarak, düşük enerjilerde elastik saçılma için çalışmalar da aynı ölçüde zengindir. Elastik saçılma olayı için farklı yaklaşımlar kullanılarak diferansiyel tesir kesiti (DCS) ve integral tesir kesiti (ICS) hesaplamaları yapılmıştır.

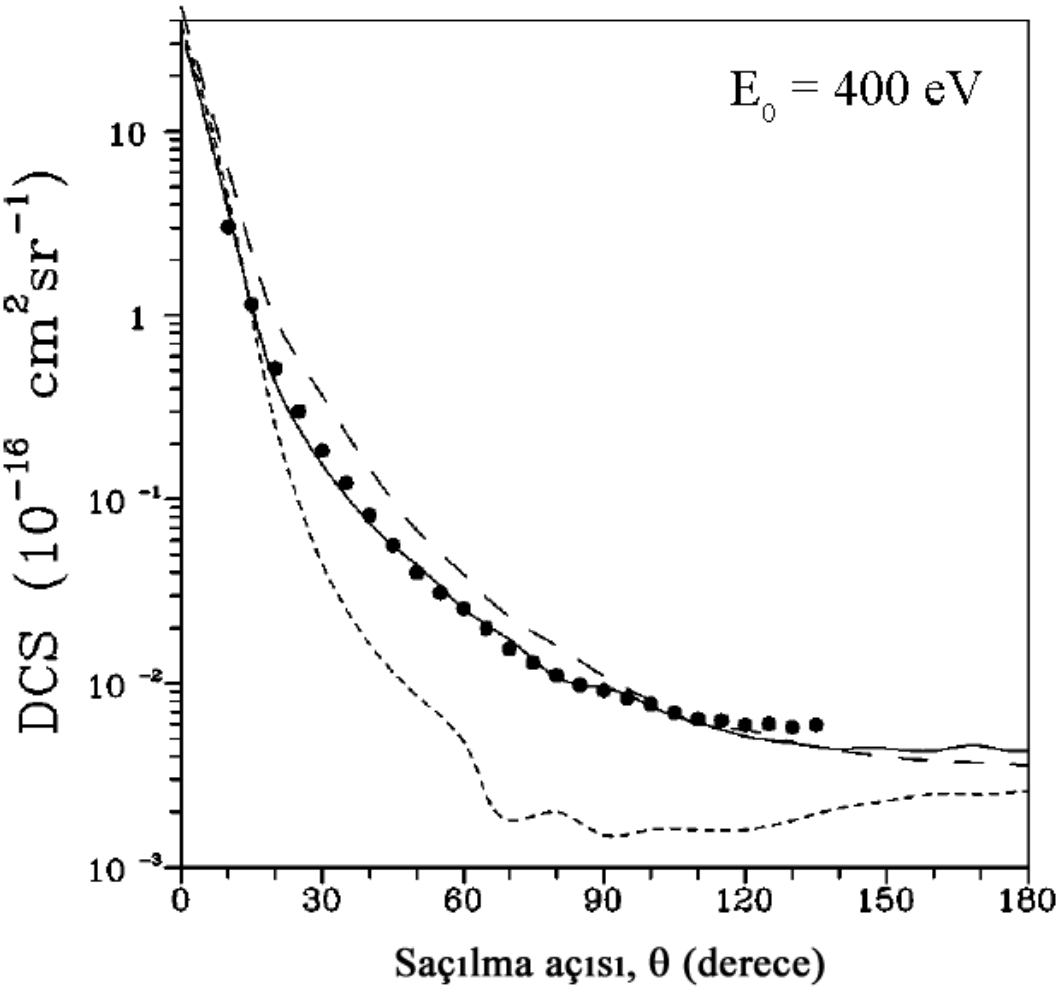
Lima *et al.* 1985, Jain 1986, Gianturco and Sciella 1987, Gianturco *et al.* 1987, McNaughten *et al.* 1990, Lengsfield *et al.* 1991, Nishimura and Ittaca 1994, Nestman *et al.* 1994, Gianturco *et al.* 1995, Bettega *et al.* 1995, Machado *et al.* 1998, Iga *et al.* 2000, Lee *et al.* 2000, Bettega *et al.* 2003, Er-Jun *et al.* 2007 ve Lino 2009 düşük enerjili elektronların CH_4 molekülünden elastik saçılmaları için teorik modelleme çalışmalarıdır. Şekil 2.4'te E_0=200eV enerjili gelen elektronlar için elastik DCS deneysel ve teorik sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 2.5 E_0=20eV için e-CH_4 elastik DCS deneysel ve teorik çalışmaları. Düz çizgi, Iga et al. (2000) hesaplama; kısa kesikli, çizgi Jain (1986) hesaplama; uzun kesikli çizgi, Nishimura and Itikawa (1994); içi dolu üçgenler, Curry et al. (1985) deneysel ölçümleri; içi boş üçgenler Vuskovic and Trajmar (1983) ölçümleri, içi dolu kareler Boasten and Tanaka (1991) ölçümleri; yıldızlar, Shyn and Cravens (1990) ölçümleri; içi dolu daireler Iga et al. (2000) ölçümleri.

Orta ve yüksek enerjilerde (E_0 > 50 eV) hem deneysel, hem de teorik olarak daha az çalışma bulunmaktadır. Deneysel çalışmaların çoğu integral tesir kesiti (ICS; elastik ve inelastik tesir kesitleri toplamı) üzerine yoğunlaşmıştır (Zecca *et al.* 1991, Zecca *et al.* 1992, March *et al.* 1994, Garcia and Manero 1998). Orta-yüksek enerjili saçılmalar için

elastik DCS ve ICS ölçümlerinin yapıldığı üç çalışma bulunmaktadır. Vuskovic ve Trajmar (1983) 20, 30 ve 200 eV enerjili elektronlarla, Sakae vd. (1989) 75-750 eV ve Iga vd. (2000) 100-500 eV enerji aralığında ölçüm yapmışlardır. Teorik olarak da, 100-800 eV arası gelen elektron enerjileri için farklı yaklaşımlarla yapılan modellemelere dayanan hesaplamalar yapılmıştır (Dhal *et al.* 1979, Jain 1986 ve Iga *et al.* 2000). Şekil 2.6'da E_0=400eV enerjili gelen elektronlar için elastik DCS deneysel ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Elektron-metan elastik saçılma deneylerinin literatür özeti enerji ve açısal aralıklarıyla beraber Tablo 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.6 E_0= 400 eV için e^--CH4 elastik DCS deneysel ve teorik çalışmalar. Düz çizgi, Iga et al. (2000) hesaplama; kısa kesikli, çizgi Jain (1986) hesaplama; uzun kesikli çizgi, 410 eV için Dhal et al. (1979); içi dolu daireler Iga et al. (2000) ölçümleri.

Tablo 2.2 Elektron-metan çarpışma deneylerinden elastik saçılma için literatür özeti

Yazar	Enerji aralığı (eV)	Açısal aralık (derece)	Normalizasyon metodu
Arnot (1931)	30-820	10-120	Göreli
Mohr and Nicoll (1932)	30-84	20-160	Göreli
Hughes and McMillen (1933)	10-800	10-150	Göreli
Rohr (1980)	0.1-10	20-120	Mutlak
Sohn *et al.* (1983)	0.1-1.8	30-120	Göreli
Tanaka *et al.* (1982)	3-20	30-140	Göreli
Vuskovic and Trajmar (1983)	20-200	8-130	Mutlak
Curry *et al.* (1985)	7.5-20	30-140	Mutlak
Sohn *et al.* (1986)	0.2-5	15-138	Mutlak
Sakae *et al.* (1989)	75-750		
Shyn and Cravens (1990)			
Boesten and Tanaka (1991)	1.5-100	10-130	Mutlak
Mapstone and Newell (1992)	3-15	30-140	Mutlak
Kanik *et al.* (1993)			
Bundschu *et al.* (1997)	0.6-5.4	12-132.5	Göreli
Iga *et al.* (2000)	100-500	5-135	Mutlak
Cho *et al.* (2008)	5-100	10-180	Mutlak

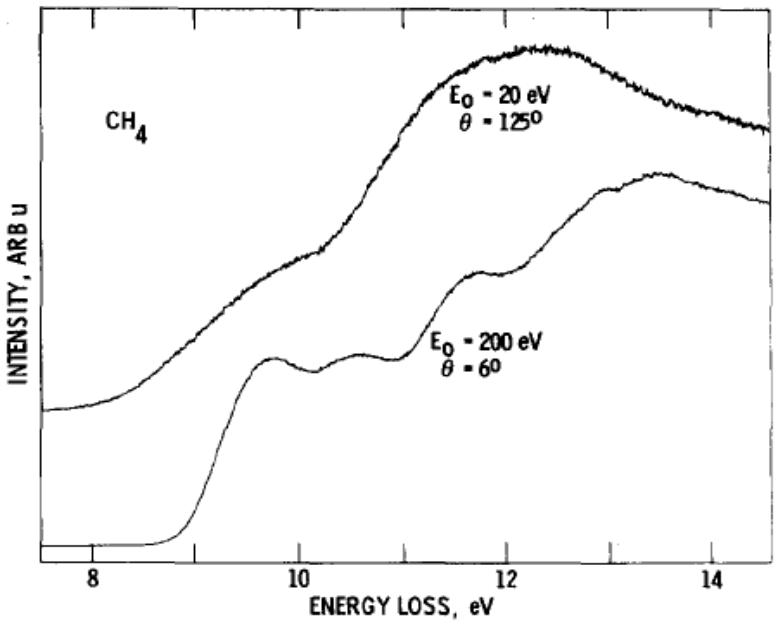
2.3.2 Metan Molekülünden İnelastik Saçılma

Elektron saçılma deneylerinde, gelen elektronun kinetik enerjisinin bir kısmının hedefin içyapısında değişikliğe neden olduğu durumlarda inelastik saçılma olayları gerçekleşmektedir. Hedefe aktarılan enerjinin, hedefin iyonlaşma potansiyelinden düşük olduğu durumlarda hedefin uyarılma enerji seviyeleri arasında geçiş olabilmektedir. Aktarılan enerjinin, hedefin iyonlaşma potansiyelinden daha yüksek olduğu durumlarda ise, iyonlaşma olayları gerçekleşebilmektedir. Metan molekülünün hedef olarak kullanıldığı inelastik saçılma deneyleri ve teorilerinin literatürü uyarılma ve iyonlaşma olayları olarak ayrı ayrı ele alınmıştır.

- **Uyarılma olayları**

Metan için, elektron etkisiyle elektronik uyarılma durumlarını ilk inceleyen Vuskovic ve Trajmar (1983) olmuştur (Şekil 2.7). 20-200 eV enerjili elektronlar ile CH_4

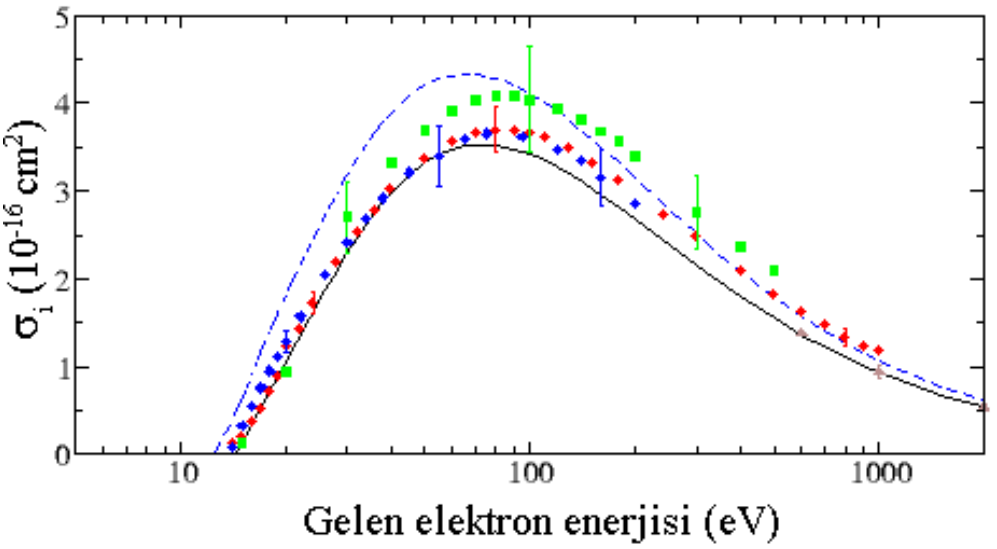
molekülünün uyarılma tesir kesitlerini ölçmüşlerdir. Pang vd. (1987) 200 eV enerjili elektronlar ile elektronik uyarılma, Fukuzawa vd. (2005) Lyman-α fotonu ile çakışma tekniğini kullanarak 18-51 eV enerjili elektron etkisi ile uyarılma, Tanaka vd. (1983) 3-20 eV enerjili elektronlar ile titreşimsel uyarılma tesir kesiti ölçümleri yapmışlardır.



Şekil 2.7 E_0=20 ve 200 eV için e-CH_4 inelastik çarpışması sonucu oluşan enerji kayıp spektrumu (Vuskovic and Trajmar 1983).

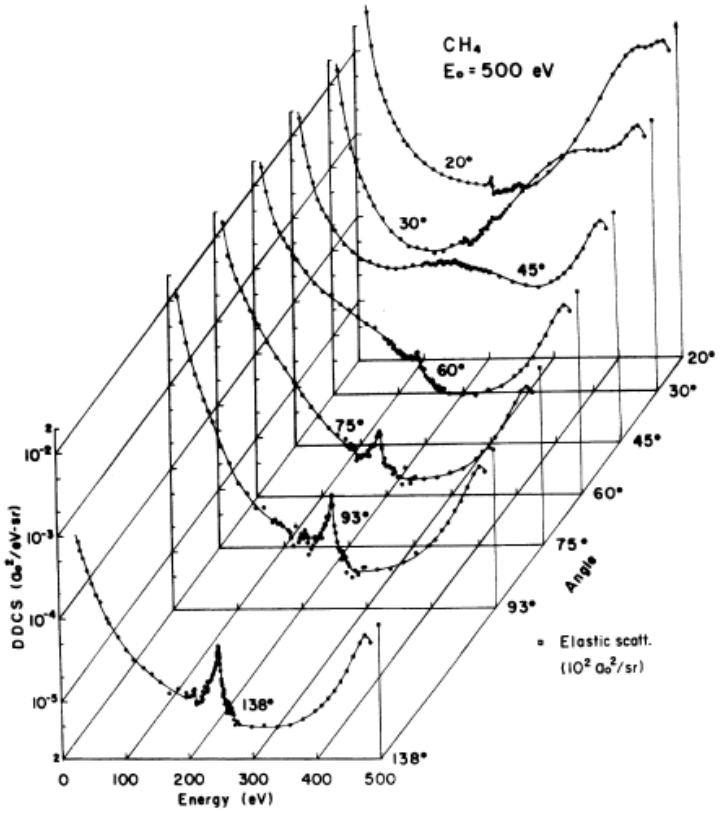
- **İyonlaşma olayları**

Bölüm 2.2'de anlatıldığı gibi, iyonlaşma olayı dört farklı tesir kesiti ile tanımlanabilmektedir. Toplam iyonlaşma tesir kesiti, σ_i, bu dört farklı diferansiyel tesir kesitinin toplamına eşittir. Deneysel olarak, iyonlaşma olayında ortaya çıkan iyonların sayılmasıyla elde edilir. Şekil 2.8'de gelen elektron enerjisi 10-2000eV arasında iken literatürde bulunan bazı toplam iyonlaşma tesir kesiti ölçümleri ve teorik hesaplamaları gösterilmiştir.



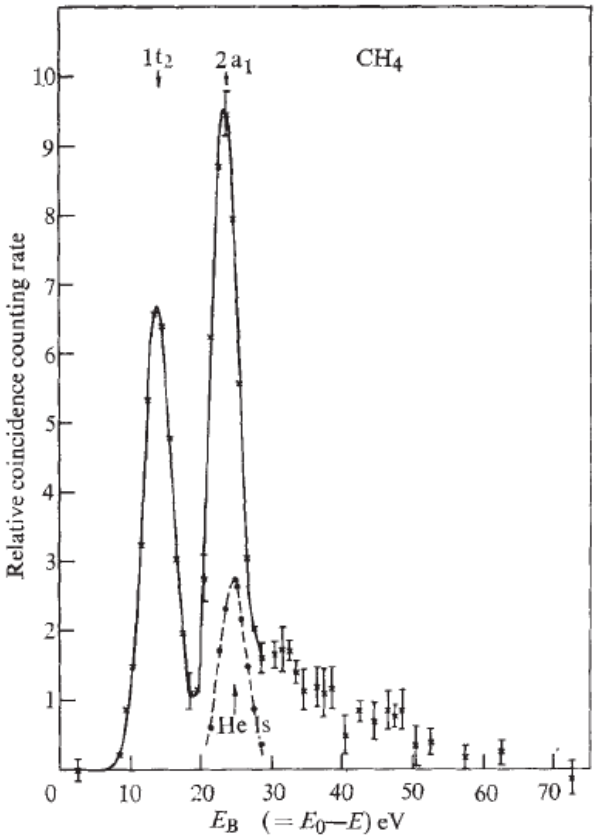
Şekil 2.8 Metan molekülünün elektron etkisi ile toplam iyonlaşma tesir kesiti ölçüm ve hesaplamaları. Şekildeki siyah düz çizgi Kim et al. 1997, kesikli çizgi Hwang et al. 1996 teorik hesaplamalarını; kırmızı noktalar Rapp and Englander-Golden 1965; yeşil kareler Orient and Srivastava 1965; mavi noktalar Duric et al. 1991; kahve üçgenler Schram et al. 1966 deneysel ölçümlerini göstermektedir.

İyonlaşma olaylarının en temeli olan tekli iyonlaşma olayında, hedef molekülden sadece bir elektron koparılarak serbest hale gelmektedir. Elektron etkisi ile iyonlaşma olayı hakkında temel bilgileri veren ikili diferansiyel tesir kesiti (DDCS) ölçümleri literatürde çok daha enderdir. Opal vd. 1972 yılında farklı gazlar için DDCS ölçümü yapmışlardır. Metan ölçümleri 500 eV gelen elektron enerjisinde 30-150° açılarda yapılmıştır. Oda (1975) ise 500 ve 1000 eV gelen elektron enerjilerinde, 20-138° açısal dağılımda DDCS ölçümleri yapmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 E_0=500 eV elektron etkisiyle iyonlaşma olayında DDCS ölçümü (Oda 1975).

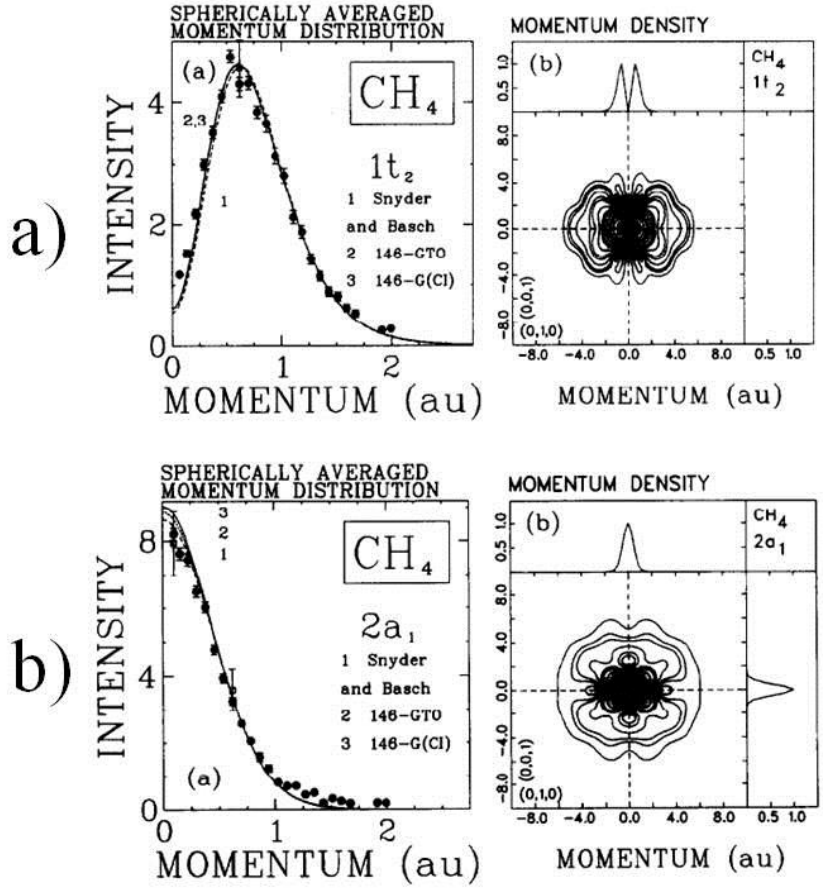
Metan molekülünün hedef alındığı TDCS ölçümleri de son yıllara kadar literatürde oldukça ender bulunmasına rağmen, yakın zamanda özellikle biyolojik moleküllere olan ilginin artmasıyla bu molekül üzerindeki çalışmalar da hız kazanmıştır. İlk olarak, Hood vd. (1973) 400 eV çarpışma enerjisinde saçılan ve koparılan elektronların enerji ve açılarının eşit alındığı simetrik kinematikte CH_4 molekülünün bağlanma enerjisi spektrumunu almışlardır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 CH_4 molekülünün e,2e tekniği ile alınan bağlanma enerjisi spektrumu (Hood et al. 1973).

Clark vd. ise, yine simetrik kinematiklerde, E_0=1200 eV'de $1t_2$ ve $2a_1$ orbitalleri için bağlanma enerjisi ve momentum dağılımlarını EMS yöntemiyle ölçmüşlerdir (Clark et al. 1990). Momentum dağılımları beklendiği gibi $1t_2$ orbitali için atomik p-tipi orbital yapısında, $2a_1$ orbitali de atomik s-tipi orbital yapısındadır (Şekil 2.11).

İyonlaşma dinamiklerini inceleyen e,2e çalışmalarında ilk kez Lahmam-Bennani vd. (2009a) saçılan elektron enerjisini 500eV'de sabit tutarak, iki farklı orbital için TDCS spektrumu almışlardır. Bununla birlikte, metan molekülünün hedef olarak kullanıldığı TDCS çalışmaları güncelliğini korumaktadır (Nixon *et al.* 2011, Nixon *et al.* 2012, Zhang *et al.* 2012, Xu *et al.* 2012).



Şekil 2.11 CH_4 molekülü için EMS yöntemiyle alınmış momentum dağılımları ve yoğunlukları. a) $1t_2$ ve b) $2a_1$ orbitalleri için (Clark et al. 1990).

2.4 Diğer Moleküllerde Elektron Etkisi ile İyonlaşma Tesir Kesitleri

Elektron etkisi ile iyonlaşma literatürde, moleküler hedefler için ikili diferansiyel tesir kesiti ölçümleri atomik hedeflere göre oldukça azdır. Metan molekülü haricinde diğer moleküler hedefler için alınan DDCS ölçümleri H_2 ve N_2 molekülleri için yapılan çalışmalarda yoğunlaşmıştır (DuBois and Rudd 1978, Shyn and Sharp 1981, Shyn et al. 1981, Shyn 1983, Ehrhardt et al. 1986, Goruganthu et al. 1987, Al-Nasir et al. 1993, Chatterjee et al. 2009).

Üçlü diferansiyel tesir kesiti (TDCS) ölçümleri elektron çarpışma literatüründe moleküler hedefler için daha yaygındır. Amaldi, Ehrhardt ve diğerleri tarafından TDCS ölçümlerinin yapıldığı (e,2e) tekniğinin temellerinin atılmasından beri atomik hedeflerde (e,2e) dinamik (Lahmam-Bennani 1991, Coplan *et al.* 1994) ve moleküllerde

EMS (McCarthy and Weigold 1988, McCarthy 1998, Takahashi 2009) olmak üzere birçok çalışma yapılmıştır. Ancak moleküler dinamikleri inceleyen (e,2e) literatürü oldukça sınırlıdır. Moleküler hedefler için yapılan dinamik çalışmalar amaçlı TDCS ölçümleri, tesir kesitlerindeki düzensizliklerden yola çıkarak moleküllere özgü etkileşimlerin anlaşılmasında oldukça önemlidir. Moleküller için TDCS'deki düzensizliklerin kaynağı, moleküllerin küresel olmayan yapısı, tekli iyonlaşma olayı sırasında görülebilen dönme ve titreşim seviyelerindeki geçişlerden gelen katkılardır (Jung *et al.* 1975).

Molekülde ilk (e,2e) çalışması 1975'te Jung vd. tarafından moleküler hidrojen ve nitrojen için yapılmıştır. Gelen elektron enerjisi 100 eV ve 250 eV, kopan elektron enerjisi 4,5 eV ve 9 eV alınarak saçılan elektron açısı 4º ve 25º 'de ölçümler yapılmıştır. Moleküler hedeflerde şimdiye kadar yapılan diğer deneysel dinamik (e,2e) çalışmaları şunlardır; H_2 (Jung *et al.* 1975, Cherid *et al.* 1989, Milne-Brownlie *et al.* 2006, Casagrande *et al.* 2008, Ozer *et al.* 2013), N_2 (Jung *et al.* 1975, Avaldi *et al.* 1992, Doering and Yang 1996, Rioual *et al.* 1996, Hussey and Murray 2002, Murray *et al.* 2006, Naja *et al.* 2007, Hargraves *et al.* 2009), O_2 (Yang and Doering 2001), CO (Rioual *et al.* 1996), CO_2 (Hussey and Murray 2005, Lahmam-Bennani *et al.* 2009b), N_2O (Cavanagh and Lohmann 1999), C_2H_2, H_2O (Nixon et al. 2010, Milne-Brownlie et al. 2004, Kaiser *et al.* 2007), formik asit (Colyer *et al.* 2009), tetrahydrofuran (Colyer *et al.* 2010), tetrahydrofurfuryl alkol (Bellm *et al.* 2012), primidin (Builth-Williams *et al.* 2012) ve timin (Bellm et al. 2012).

3. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde elektron etkisi ile iyonlaşma deneylerinde kullanılan elektron spektrometresinin çalışma prensipleri, düzeneğin parçaları ve özellikleri anlatılmıştır. Bu çalışmanın yapıldığı deney düzeneği, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fizik Bölümü'nde bulunan e-COL Laboratuarında bulunmaktadır. 2007 ve 2010 yıllarında TÜBİTAK tarafından desteklenen projelerle yenilenerek aktif olarak elektron-molekül çarpışma deneylerinde kullanılabilir hale gelmiştir. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 3.1'de verilmiştir.

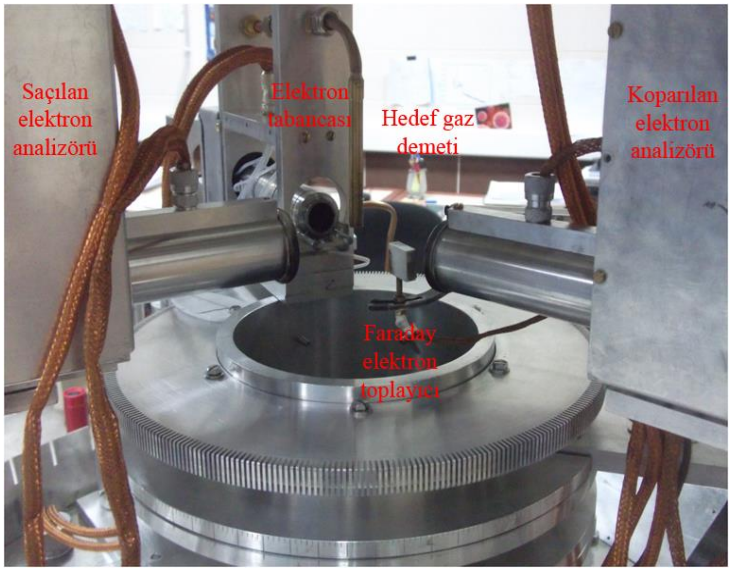
3.1 Elektron Spektrometresi

Elektron çarpışma deneyleri, iyi odaklanmış bir elektron demetinin dik doğrultuda gönderilen bir gaz demeti ile çarpıştırılması sonucu açığa çıkan parçacıkların enerji ve açılarına göre dedekte edilmesi, elde edilen sinyallerin işlenerek bilgisayar ortamında analiz edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Belirli bir enerjiye sahip odaklanmış elektron demeti elektron tabancasında üretilmektedir. Elektron kaynağı olarak hairpin tipi tungsten filament kullanılmıştır. Elektron tabancası, yedi lensten oluşmakta ve çarpışma bölgesinde paralel (odaksız) 2 mm çapında demet üretecek şekilde dizayn edilmiştir. Elektron tabancasından çıkan elektronlar, tabancanın tam karşısına yerleştirilen Faraday elektron toplayıcı (FET) ile toplanırlar. Çarpışma deneylerinin gerçekleşmesi için akım, ~4 μA civarındadır. Hedef gaz, elektron tabancasından 50 mm uzaklıkta ve tabancaya dik doğrultuda olacak şekilde gönderilmektedir. Elektrostatik enerji analizörleri, belirli enerjiye sahip elektronları, enerjilerine göre ayırt etmek için kullanılırlar. Analizörler, beş elemandan oluşan giriş optiği, elektronların girişine odaklandığı yarıküresel deflektörler ve elektron çoğaltıcı dedektörlerden oluşmaktadır. Spektrometre parçaları elektrik ve manyetik alanlardan yalıtılmış genellikle paslanmaz çelikten yapılmış bir vakum odası içine yerleştirilirler (Şekil 3.2). Manyetik alan etkilerini azaltmak için mü-metal kılıf ve Helmholtz bobin çiftleri kullanılmıştır. Dedektörden gelen sinyalin işlenmesi ve spektrometre parçalarına istenilen gerilimin uygulanması için elektronik kontrol üniteleri kullanılmaktadır. Bu kontrol üniteleri, elektron demetinin üretiminde, çarpışma sonrası ortaya çıkan elektronların dedektöre yönlendirilmesinde, sinyal işleme ve veri analizinde kullanılan elemanları içermektedir.

Elektron tabancası, iki enerji analizörü, Faraday elektron toplayıcı (FET), birbirinden bağımsız döner tablalar üzerine seviye ayarları yapılarak yerleştirilmişlerdir. Elektron tabancası, enerji analizörleri ve FET'in aynı düzleme yerleştirilebilmeleri için lazer kullanılmıştır. Vakum ortamı dışından bu döner tablalar hareket ettirilebilmektedirler. Düzeneğe ait parçalar birbirlerinin hareketlerini belirli açı aralıklarında sınırlamaktadırlar. Spektrometrede bulunan iki analizörden biri 5º-30º açılar arasında, diğeri ise 25º-130º açılar arasında hareket edebilmektedir. İki analizörün de kullanıldığı (e,2e) deneylerinde saçılma simetrisi kontrol edilebilmektedir. Analizörlerden bir tanesi saçılan diğeri ise koparılan elektronları dedekte etmek için kullanılmaktadır. Düşük açılarda analizörlerin kullanılabilmesi için ikinci küçük FET kullanılmıştır. Bu sayede saçılan elektron analizörü olarak da adlandırılan A analizörünün tarayabildiği açı aralığı 15° daha artırılabilmiştir.



Şekil 3.1 Deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 3.2 Elektron spektrometresini oluşturan parçaların vakum sistemi içerisindeki görünümleri. İki elektron enerji analizörü ve Faraday elektron toplayıcı döner tablalar üzerine yerleştirilmiştir.

3.2 Vakum Sistemi

Elektron çarpışma deneylerinde belirli bir hedef gazın elektron ile etkileşme tesir kesitleri ölçülmektedir. Dolayısıyla, ölçülen niceliğin sadece hedefe ait olduğundan emin olabilmek için deneyler vakum ortamında yapılarak ortamda sadece hedef gazın bulunması sağlanmaktadır. Spektrometre parçaları döner tablalara sabitlenmiş bir şekilde vakum odası içerisine yerleştirilmektedir. Deney süresince vakum odası pompa sistemi yardımıyla boşaltılırken, aynı zamanda ölçüm alınmak istenen hedef gaz sabit bir oranda vakum odası içine gönderilmekte ve sabit bir basınç sağlanmaktadır. Vakum odasının alt kısmı, spektrometrenin yerleştirildiği kısımdır ve ayrıca üzerinde elektrik bağlantılarının yapılacağı birçok bağlantı portları (flanç) mevcuttur. Vakum odasının üst kısmı, gözlem penceresinin bulunduğu ve sistemi kapatan kısımdır. Sistemde bulunan vakum odasının yüksekliği 720 mm ve çapı 840 mm'dir. Vakum odası manyetik özelliği olmayan 304 paslanmaz çelikten yapılmıştır. Manyetik alanlar düşük enerjili elektronların yörüngesinde değişikliğe sebep olduğu için çarpışma bölgesinde, dışarıdan gelen manyetik alan etkileri en aza indirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, vakum odasının iç çeperinde mu-metal kılıf bulunmaktadır. Bu kılıf, dış manyetik alanların çarpışma bölgesine etkisini daha da azaltmak için kullanılmaktadır. Ayrıca x, y ve z yönlerine yerleştirilen Helmholtz bobinleri ile dış manyetik alanın etkisi en aza indirilmeye çalışılmıştır.

Pompa sistemi düşük basınçlara inebilmek için kullanılan iki aşamalı bir sistemdir. Destek pompa (Backing pump) olarak mekanik (Rotary) pompa, yüksek vakum pompası olarak da turbo moleküler pompa (TMP) kullanılmaktadır. TMP, mekanik pompayla birlikte alt tablada bulunan bir flanca monte edilmiştir. Bu iki aşamalı sistemde önce mekanik pompa boşaltma işlemini başlatmakta ve ardından turbo pompanın devrini almasıyla (833 Hz) vakum işlemi sürekli olarak gerçekleşmektedir. Kullanılan vakum odasında ~$9x10^{-8}$ mbar'a kadar düşülmüştür. İçeriye hedef gazın verilmesiyle birlikte çalışma basıncı ~$6x10^{-6}$ mbar'a kadar yükselmekte ve kararlı bir şekilde bu değerde kalmaktadır. Basınç ölçümü bir basınç ölçer (ion gauge; Pfeiffer PKR262) ile yapılmaktadır. Çalışma basıncının görüntülenmesi, basınçölçere bağlanan dijital gösterge (Pfeiffer TPG252A) yardımıyla yapılmaktadır. Şekil 3.3'te turbo moleküler ve mekanik pompa, basınç ölçüm cihazları ile birlikte görülmektedir.



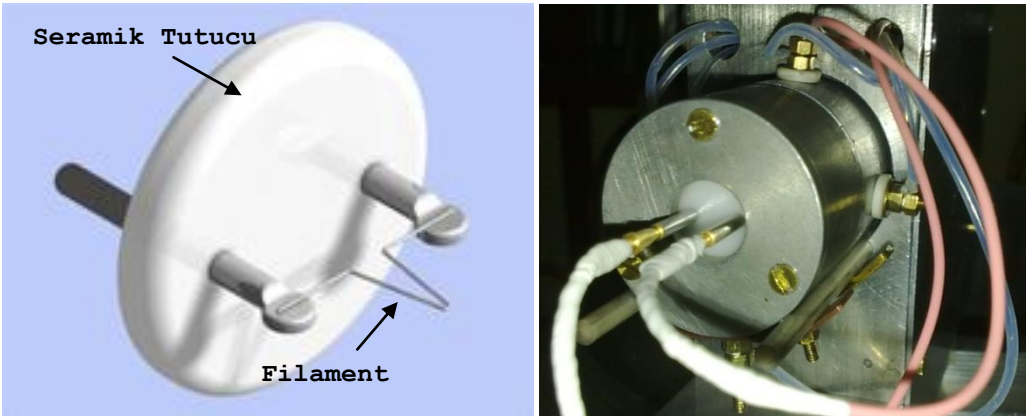
Şekil 3.3 Turbo moleküler ve mekanik pompalar, basınç ölçüm-görüntüleme cihazları ve bağlantılarının birlikte bulunduğu istasyonun yakından görünümü.

3.3 Elektron Tabancası

Elektronların üretildiği, belli bir enerjiye kadar hızlandırıldığı ve elektrostatik lensler yardımıyla çarpışma bölgesine bir demet halinde odaklandığı bölümdür. Deney düzeneğinin performansının artırılması için elektron demetinin akımının, enerjisinin ve çapının uygun bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Deneyler sırasında demet akımının ve çapının uzun süreler (6-12 ay) boyunca sabit kalması istenmektedir.

Kullanılan elektron tabancası genel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, elektron üretimini gerçekleştiren filament (katot) bölgesi, demetin odaklanma ve yönlendirilmesini sağlayan elektrostatik lens sistemi ve demetin açısal dağılımını belirleyen delikli disklerdir. Ayrıca demetin eksensel olarak kaymasını engellemek için x ve y yönlerinde deflektörler kullanılmaktadır (Ulu ve ark. 2007).

Elektron tabancasında elektron kaynağı olarak, rezistif olarak ısıtılarak termiyonik emisyon gerçekleştiren tungsten hair-pin tipi filament kullanılmıştır (Şekil 3.4). Özellikle elektron mikroskoplarında kullanılan bu filamentin termal ve emisyon özellikleri iyi bilinmektedir. Ayrıca, maliyet olarak ucuz ve kullanımının kolay olması bu kaynağın avantajlarındandır. 2400°K sıcaklıkta kararlı bir şekilde birkaç ay çalışabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda çalışma durumunda daha uzun ömürlü olmaktadır. Tungsten hairpin filamentin düşük vakum ortamında (10^{-5} mbar) kararlı olarak çalışması, ani basınç değişimlerine ve soğutulmuş halde atmosfer ortamına maruz kaldıktan sonra tekrar kullanılabilmesi tercih nedenlerindendir.

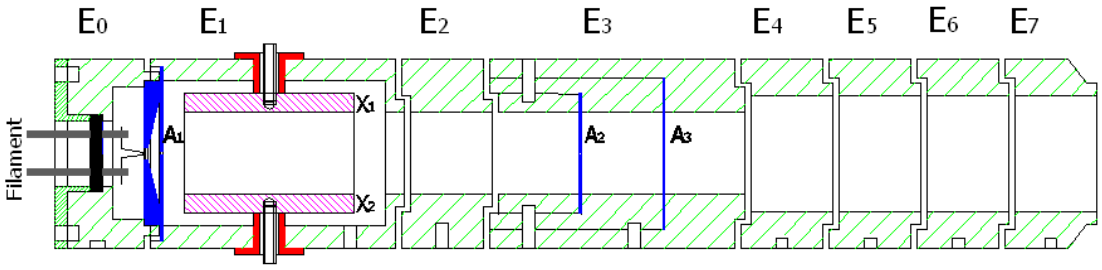


Şekil 3.4 Hairpin tipi filament ve filamentin elektron tabancasına yerleştirilmiş halinin görüntüsü (Özer 2013).

Filament bölgesinde, üretilen elektronlar Wehnelt elektrotu yardımıyla hızlandırılarak anot diskine doğru odaklanırlar. Wehnelt elektrodu, katot ve anot arasına yerleştirilmektedir. Ayrıca anot voltajına göre pozitif veya negatif potansiyelde tutulabilmektedir. Elektron tabancasında kullanılan filamentin, Wehnelt elektrotu içindeki pozisyonu önemlidir. Filamentin doğru yerleştirilmesi akımı artırmakta, dolayısıyla daha az sıcaklıkta filamentin uzun süre kullanılması anlamına gelmektedir. Bunun yanında, yüksek vakum ortamının sağlanması, elektron tabancası ve diğer vakum elemanlarının temiz tutulması ve filament akımının uygun değere ayarlanması filamentin ömrünü artıran diğer etkenlerdir (Şişe 2011).

Elektron tabancasında katot bölgesinden sonra istenilen çapta elektron demeti elde etmek için anot çıkışına silindirik elektrotlardan oluşmuş elektrostatik lens sistemi

yerleştirilmiştir. Filament, E_0 lensinin içine yerleştirilmiştir (Şekil 3.4). Filamentten çıkan elektronlar önce birinci lens sistemi (E_1, E_2, E_3) ile bir delikten (aperture) geçirilir ve ikinci lens sistemi (E_3, E_4, E_5, E_6) elektron demetini çarpışmanın gerçekleştiği etkileşme bölgesine taşır. Burada kullanılan küçük delikli elektrotlar demetin açısal dağılımını ve demet çapını kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Farklı elemanlı lens sistemleri tasarlanabilmektedir. Eleman sayılarının artması yüklü parçacıkların serbestlik derecelerinin artmasına sebep olurken, geniş voltaj aralığında parçacık demetinin paralel (odaksız) olması sağlanmaktadır. Elektron tabancasının toplam uzunluğu 157 mm'dir. Şekil 3.5'te elektron tabancasının AutoCAD çizimi verilmiştir.



Şekil 3.5 Elektron tabancasının AutoCAD programında teknik çizimi (Ulu ve ark. 2007).

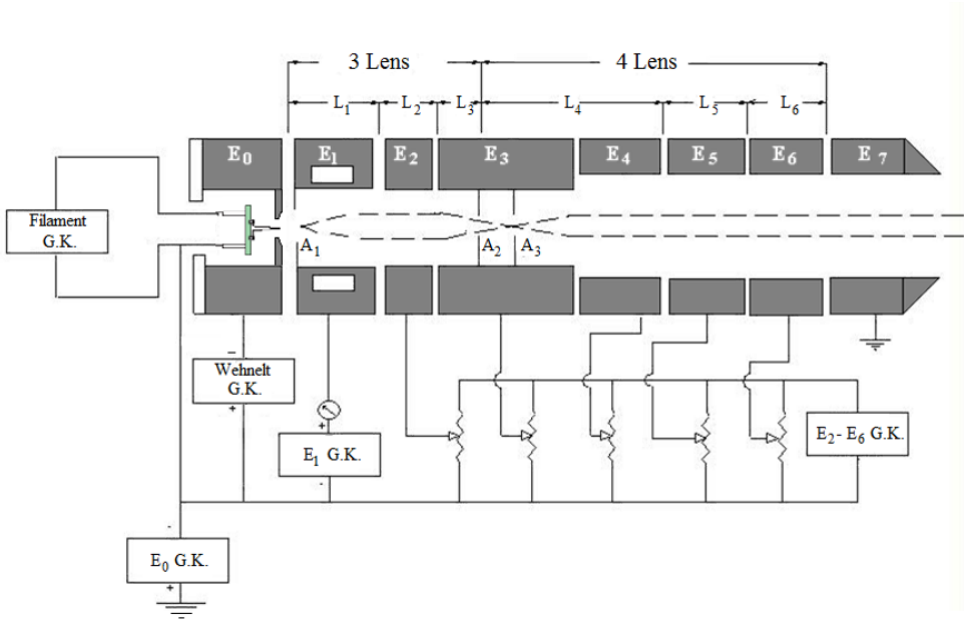
E_0 elektrodu, anoda göre negatif gerilimde tutulmaktadır. E_7 elektrodu ise toprak geriliminde tutulmuş ve bu sayede E_0 elektroduna uygulanan negatif gerilim ile elektron demetinin enerjisi belirlenmiştir. E_1 elektrodu üzerinde yer alan X-Y deflektörleri, elektronların yatay ve dikey yönde hizalanmasını ve manyetik alan etkilerinin azaltılmasını sağlamaktadır. E_3 içerisine yerleştirilen 0,6 mm çaplı deliklere sahip diskler elektron demetinin radyal genişliğini ve açısal dağılımını kontrol etmektedir.

Elektrotlara uygulanan voltajlar, Şekil 3.6'da gösterilen elektrik devresi kullanılarak yapılmıştır. Elektrotların voltaj gereksinimleri vakum çemberi dışından elektronik kontrol kutuları vasıtasıyla sağlanmaktadır. Elektron tabancası spektrometrenin ana gövdesine sabitlenmiştir.

Elektrik bağlantıları 11 pinli elektrik bağlantı portları ile uygun flanşlar kullanılarak vakum içerisine aktarılmıştır. Elektrik bağlantıları için paslanmaz çelik tel kullanılmıştır. Manyetik alan etkilerinden kaçınmak için bu teller yalıtkan teflon boru

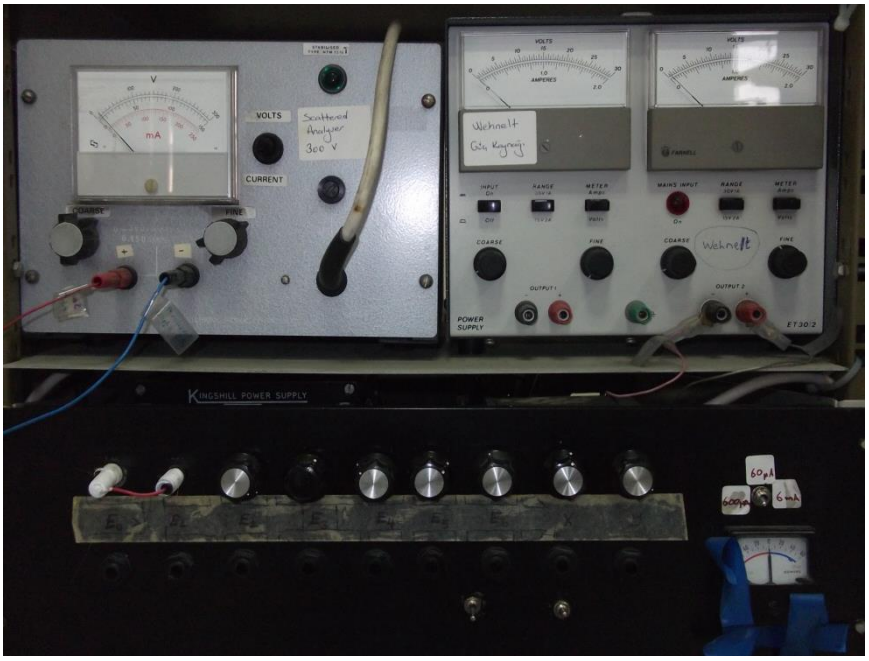
(PTFE) ve bakır kılıf içerisine yerleştirilmiştir. E_2-E_6 elektrotlarını besleyen güç kaynağı 300 V, E_0 ve E_1 elektrotları için ayrı 350 V'luk güç kaynakları kullanılmaktadır. X-Y deflektörler için E_1 lensine topraklı ±12 V çıkışı olan ayrı bir güç kaynağı kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan elektron tabancası; 40-350 eV enerji aralığında ve 1-3 mm çapında paralel elektron demeti ve deneysel olarak çarpışma bölgesinde 2-6 μA değerinde aylarca sabit kalabilen akım üretebilmektedir.



Şekil 3.6 Elektron tabancasında kullanılan lens elemanları için gerilim bölücü ve güç kaynağı (G.K.) bağlantıları (Dogan ve ark. 2013).

Şekil 3.7'de elektron tabancasının kontrol ünitesi verilmiştir. Tabancanın lens voltajları kutuların dışındaki potansiyometreler yardımı ile ayarlanmakta ve okunmaktadır.

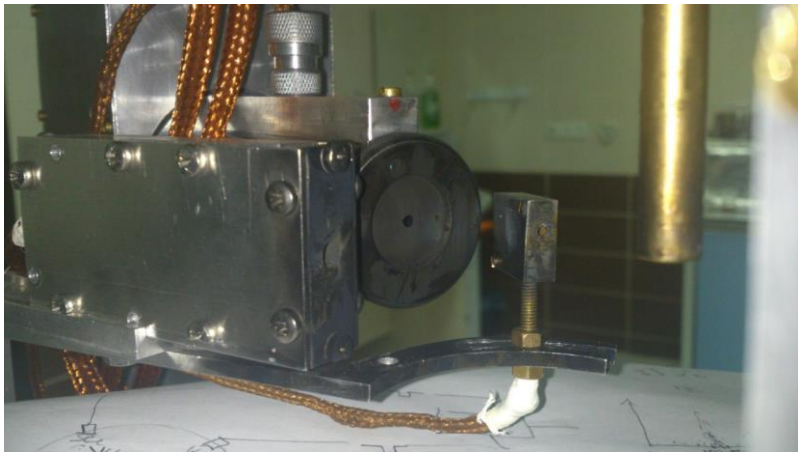


Şekil 3.7 Elektron tabancası kontrol paneli ve güç kaynakları.

3.4 Faraday Elektron Toplayıcı

Faraday elektron toplayıcı (FET), elektron tabancasında üretilen elektron demetinin odaklama kalitesini ve akımını ölçmenin yanında hedef gaz ile çarpışmasından sonra çarpışmaya girmeyen elektronların topraklanarak ikincil saçılmaların önlenmesi için kullanılmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan FET Şekil 3.8'de görülmektedir. FET'in giriş ve çıkışındaki elektrodlar Keithley marka pikoampermetrelere bağlanmış ve bu sayede demetin akımı vakum sistemi dışarısından ölçülmektedir.

FET, üç elektrota sahiptir: İlk elektrot, Splash plakası (Splash Plate-SP) olarak adlandırılır ve 2 mm çapında bir deliği bulunmaktadır. İkinci elektrot, Faraday elektrodu (Faraday Cup-FC) olarak adlandırılır ve daha geniş (3 mm) bir deliğe sahip olup silindir şeklindedir. FC ve SP arasına topraklanmış levha vardır. Bu iki elektrottan ölçülen akımlar, demetin odaklama kalitesi ve akımı hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 3.8 FET ve saçılan analizörün açı kısıtlamasını ortadan kaldırmak için FET üzerine yerleştirilen daha küçük boyutlardaki ikinci küçük FET'in görüntüsü.

Saçılan analizörün açı sınırlılığını ortadan kaldırmak için Şekil 3.8'de görüldüğü gibi FET'e sabitlenen daha küçük boyutlarda ikinci küçük FET yerleştirilmiştir. Bu sayede saçılan elektron analizörü ile 7-30° aralığında ölçüm alınabilmektedir.

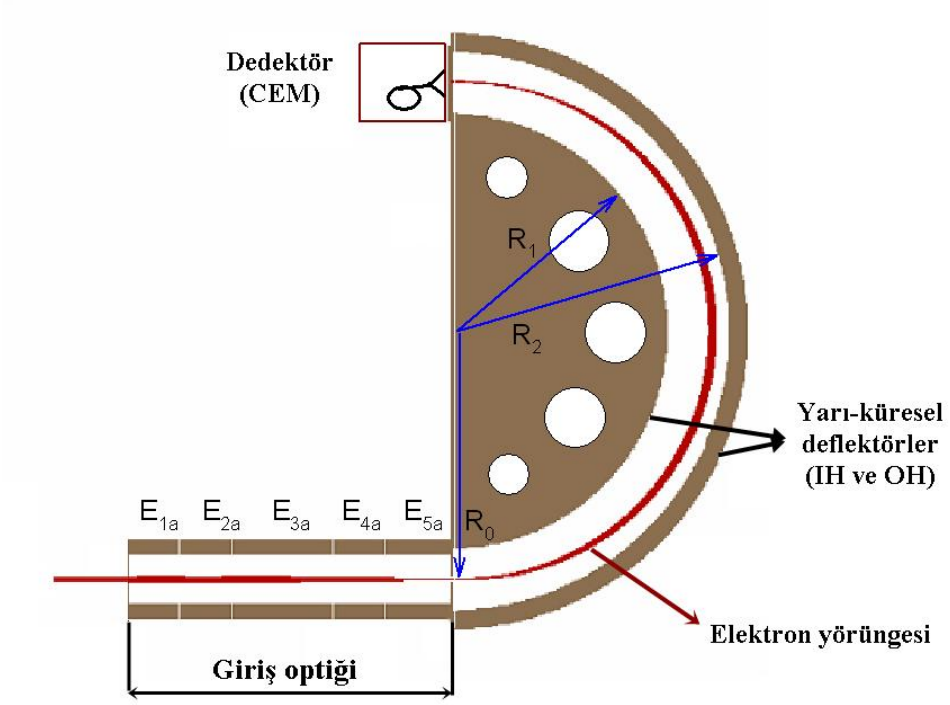
3.5 Elektron Enerji Analizörü

Elektron enerji analizörü, çarpışma sonucunda saçılan ve iyonlaşan elektronların belli bir katı açıda toplandığı, istenilen enerjide olanların CEM'e yönlendirilerek dedekte edildiği, diğer enerjilerdekilerin topraklandığı kısımdır. Çarpışma olayının düzlemsel geometride incelendiği durumda, enerji analizörleri elektron tabancası ve Faraday elektron toplayıcı ile aynı düzlemde, döner tablalar üzerinde hareket edebilecek şekilde yerleştirilmektedir.

Elektron enerji analizörleri, yapılarına göre çeşitli geometrilere ve çalışma prensiplerine sahiptir. Kullanılan deney düzeneğinde 180º yarıküresel enerji analizörleri (HDA) bulunmaktadır. Yapılan birçok deneysel ve teorik çalışmalarda 180º yarıküresel analizörlerin diğer analizör tiplerine göre daha yüksek çözünürlük değeri verdiği gösterilmiştir. Bu özellik analizörün dispersiyon özelliğinden, başka bir deyişle, enerji olarak birbirine yakın iki elektronu konumsal olarak ayırt etme kabiliyetinden ileri gelmektedir (Şişe 2011). Yarıküresel enerji analizörü üç temel kısımdan oluşmaktadır.

Bu kısımlar; giriş optiği, yarıküresel deflektörler ve dedektördür (Şekil 3.9). Giriş optiğinin iki işlevi bulunmaktadır; i) analizör girişine gelen elektronları yarı-küresel deflektör girişine odaklamak, ii) E_{5a} lensine uygulanan toprağa göre negatif gerilim (retarding potential) sayesinde gelen elektronları yavaşlatarak yarıküresel deflektörlerin etkin çalışabildiği enerji seviyelerine getirmektir.

Yarıküresel deflektörler, optikte prizmanın farklı dalgaboylarındaki ışığı ayrıştırmasına benzer şekilde, farklı enerjilerdeki elektronları ayrıştırma görevi yapmaktadır. Dış yarıküreye (OH) negatif, iç yarıküreye (IH) ise pozitif gerilim uygulanarak belirlenen enerjiye sahip elektronların merkez yörüngede kalması sağlanmakta, dolayısıyla sadece istenilen enerjideki elektronlar dedektör girişine yönlendirilmektedir (Şekil 3.9). Yarıküresel deflektörün merkez yörüngesini izleyen ve dedektöre ulaşabilen elektronların enerjisine uçuş enerjisi adı verilmektedir. Tipik bir yarıküresel deflektörün etkin olarak çalışabilmesi için uçuş enerjisinin 10-50 eV arasında olması gerekmekte, gerekli yavaşlatma ise analizör giriş optiğinde E_{5a} lensine negatif gerilim uygulanarak sağlanmaktadır.



Şekil 3.9 Elektron enerji analizörünün SIMION programında çizilen kesit görünümü.

Analizörün etkin çalışabilmesi çözünürlüğü ile ilişkilidir. Uçuş enerjisi arttıkça çözünürlük de doğru orantılı olarak azalacaktır. Merkezi girişli bir yarıküresel analizör için enerji çözünürlüğü ifadesi;

$$\Delta E = E\left(\frac{w}{2R_0} + \frac{\alpha^2}{4}\right) \qquad \textbf{(3.1)}$$

olarak verilmektedir (Imhof *et al.* 1976). Bu denklemde; ΔE enerji çözünürlüğü ile ters orantılı olan enerji dağılımı, E uçuş enerjisi, w deflektör giriş ve çıkış çapı, R_0 merkez yörünge yarıçapı, α deflektöre giriş açısıdır. Görüldüğü gibi, uçuş enerjisi arttıkça enerji çözünürlüğü azalmaktadır. Enerji çözünürlüğü deflektör merkez yarıçapı (R_0) artırılarak iyileştirilebilir fakat pratik bir yöntem değildir, daha büyük bir analizör için büyük vakum odası gerekmektedir.

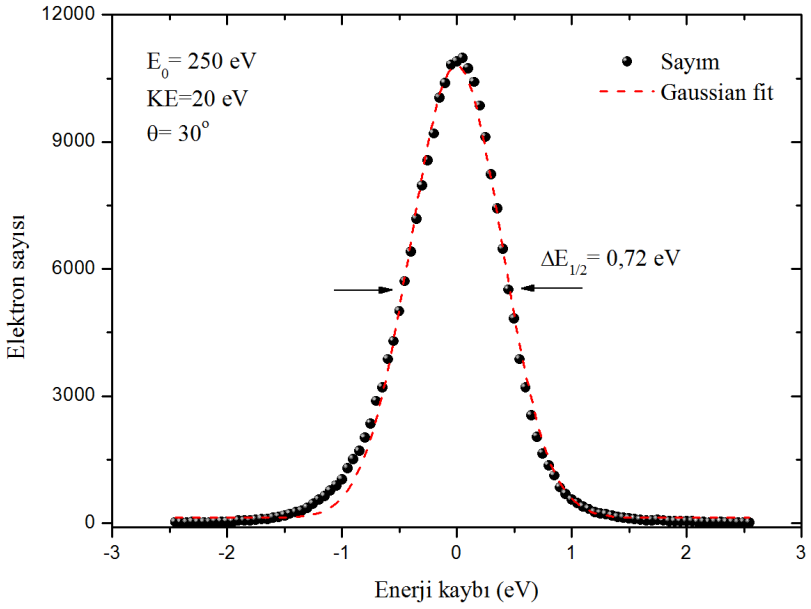
Elektron çarpışma deney sisteminin toplam enerji çözünürlüğü, elastik saçılma olayı sonucu elde edilen elastik saçılma pikinin yarı yükseklikteki tam genişliği (FWHM) ölçülerek belirlenmektedir (Şekil 3.10). Elastik saçılma piki elde edilirken enerjisi değişmeden saçılan elektron, belirli bir açıya yerleştirilen analizör yardımıyla dedekte edilmektedir. Saçılan elektronları dedekte etmek için analizör giriş optiği ve yarıküresel deflektör gerilimleri bu enerjiye sahip elektronları dedekte edecek şekilde ayarlanmaktadır. Örneğin, E_0=200eV enerjili gelen elektron, elastik saçılma olayı sonrası yine 200eV enerjiye sahip olarak saçılacaktır. Bu enerjideki elektronların yarıküresel deflektörler içinde geçirdiği süre kısa olacaktır ve enerjisine göre ayrıştırma etkin bir şekilde yapılamamaktadır. Bu nedenle, öncelikle giriş optiği kullanılarak elektronlar yavaşlatılmakta ve ardından daha düşük uçuş enerjisine sahip olarak deflektörlerde analiz edilmektedir. Sonuç olarak, sadece belirlenen enerjideki elektronlar deflektör çıkışının merkezindeki deliğe ulaşmakta ve dedektör ile sayılmaktadır, diğer enerjilerdeki elektronlar deflektör yüzeylerine çarparak topraklanmaktadır.

Deneysel kusurlardan dolayı hem elektron üretiminde, hem de analiz ve dedekte edilmesinde belirli bir hata payı bulunmaktadır. İdeal durumda, dedekte edilen elektronların tek bir enerjide olması gerekmektedir. Pratikte ise, dedekte edilen

elektronlar belirli bir enerji dağılımı göstermektedir (ΔE). Gözlenen bu dağılım sistemin toplam enerji çözünürlüğünü vermektedir, çünkü elastik saçılma olayı gözlenirken elektron tabancası ve enerji analizörü sürecin içinde yer almaktadır. Sistemin toplam çözünürlüğü elektron tabancası ve enerji analizörünün enerji dağılımları ile ilişkilidir ve şu şekilde ifade edilir:

$$(\Delta E_{top})^2 = (\Delta E_{tab})^2 + (\Delta E_{an})^2 \qquad \textbf{(3.2)}$$

Tipik bir elektron saçılma deneyinde 20 eV uçuş enerjisi için sistemin toplam enerji dağılımı, ΔE, ~0.7 eV değerindedir. Örnekteki E_0=250eV gelen elektron demeti enerjisi için bu değerin anlamı; dedektörde sayılan elektronların ±0.35eV enerji hata payı içermesidir, yani elastik saçılma olayı gözlenirken 199.65 ile 200.35 eV arası enerjiye sahip elektronlar dedekte edilmektedir.



Şekil 3.10 Metan molekülünde alınan örnek bir elastik saçılma piki. Gelen elektron demetinin enerjisi, E_0=250eV ve uçuş enerjisi, KE=20eV için enerji dağılımı ΔE=0.72eV olarak ölçülmüştür.

Analizör içindeki yarıküresel deflektörlerin aynı zamanda birinci dereceden odaklama özelliği vardır. Şekil 3.11'de gösterildiği gibi, farklı açılarla deflektöre giren aynı enerjili elektronlar farklı yörüngeleri izlemekte, dolayısıyla farklı zamanlarda çıkışa ulaşmaktadır. Bu dağılım, zaman çözünürlüğü kavramı ile karakterize edilmektedir.

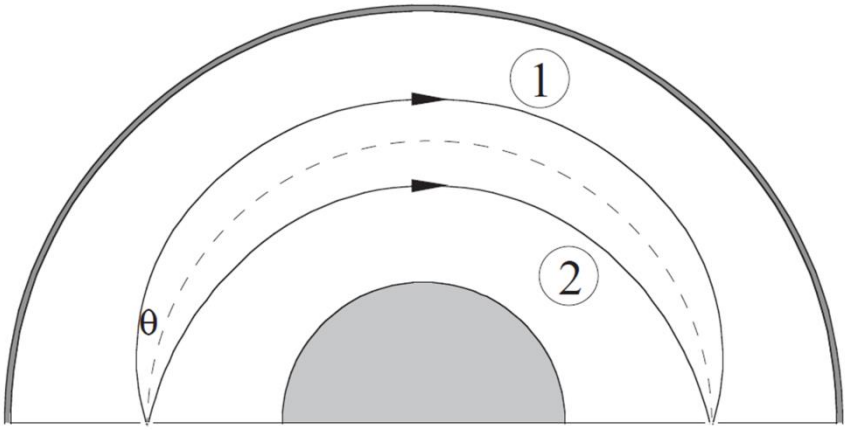
Merkez yörüngeyi (R_0) izleyen elektronların uçuş zamanı, T_0;

$$T_0 = \pi R_0 (m/2E)^{1/2} \quad \textbf{(3.3)}$$

olmak üzere, uçuş zamanı dağılımı;

$$\Delta T \cong 2T_0\alpha \quad \textbf{(3.4)}$$

formülü ile verilmektedir (Imhof *et al.* 1976). Burada, m elektron kütlesi, ΔT uçuş zamanı dağılımını, α ise deflektöre giriş açısını ifade etmektedir.

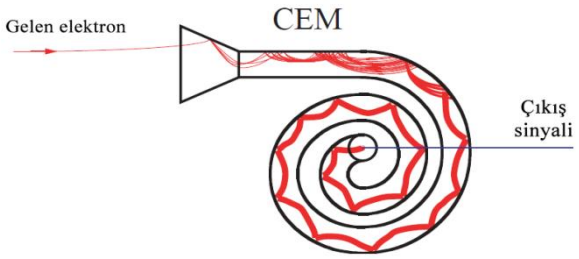


Şekil 3.11 Yarıküresel deflektör içinde, farklı α giriş açılarına sahip elektronların izledikleri yörüngeler. (1) ile gösterilen yörüngeyi izleyen elektronlar, (2) ile gösterilen yörüngeyi izleyen elektronlardan daha uzun uçuş süresine sahiptir (King 2005).

Denklem 3.2 ve 3.3'ten görülmekte olduğu gibi deflektöre giriş açısı, α, enerji çözünürlüğüne kısmen, zaman çözünürlüğüne büyük oranda etki etmektedir. Enerji analizörlerinde giriş optiği kullanılmasının nedenlerinden biri de elektronları deflektör girişine odaklamak, başka bir deyişle deflektöre giriş açısını minimuma indirmektir. Zaman çözünürlüğü, çakışma tekniği gibi zaman analizinin yapıldığı uygulamalarda önemli bir parametredir.

3.6 Elektron Çoğaltıcı (CEM)

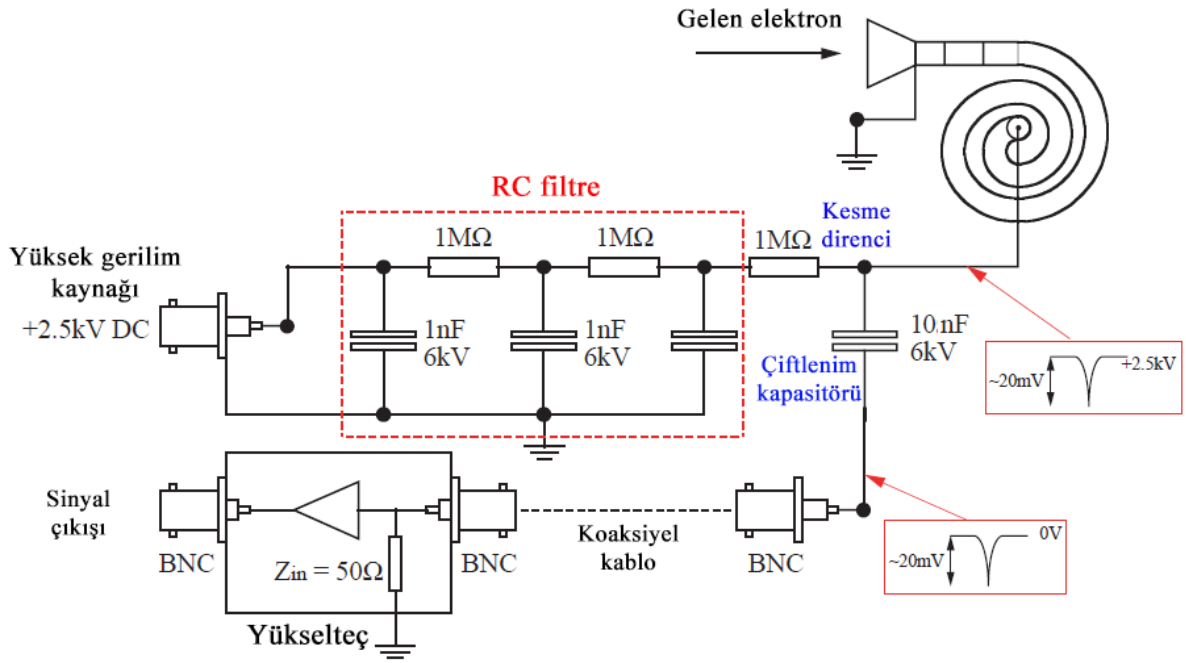
Analizör giriş optiğinde yavaşlatılan ve odaklanan, deflektörlerde ayrıştırılan elektronlardan sadece belirli bir enerjide olanlar deflektör çıkışına ulaşmaktadır. Deflektör çıkışına yerleştirilen dedektör ile bu elektronlar sayılmaktadır. Tek bir elektron çıkışta okunabilir büyüklükle bir sinyal üretemez. Bu nedenle çıkışa gelen bir elektron çoğaltılarak anlamlı ve ölçülebilir bir sinyal elde edilmektedir. Dedektör olarak tek kanallı elektron çoğaltıcı (Channel Electron Multiplier; CEM) kullanılmaktadır. CEM girişine gelen her elektron ardışık çarpışmalar sonucu yüzeyden elektron koparmakta, çıkışta ~10^8 elektron üretilmektedir. Böylece dedeksiyon sinyali işlenebilecek büyüklüğe gelmiş olur. Artçıl çarpışmaları önlemek için helezon şeklinde üretilmektedir (Şekil 3.12). Çıkıştaki her sinyal ~10ns genişliğinde olmaktadır.



Şekil 3.12 Tek kanallı elektron çoğaltıcı içinde çoğalma işleminin gösterimi.

CEM girişine gelen elektronları çıkışa yönlendirmek ve çarpışmalar arası elektronları hızlandırmak için uçları arasına yüksek gerilim (~2.5 kV) uygulanmaktadır. Yüksek gerilim kaynaklarının ve taşıma hatlarının gürültü ürettiği bilinmektedir. Bu nedenle, yüksek gerilim kaynağı CEM'e alçak frekans geçiren RC filtre devresi üzerinden bağlanmaktadır (Şekil 3.13). CEM çıkışındaki sinyal yüksek gerilim uygulanan ucu üzerinden alınmaktadır. Bu nedenle, çıkış sinyali yüksek gerilim üzerinde negatif atma şeklindedir. Sinyali toprağa göre ölçmek için CEM çıkışına çiftlenim (dekuplaj) kapasitörü bağlanmaktadır. Bu kapasitör DC gerilimi süzerek yalnızca atma şeklindeki sinyali geçirmektedir. Ayrıca, yüksek gerilim kaynağı çıkışındaki akımı sınırlamak ve devre kapandığında kapasitörlerin üzerinden boşalabileceği bir kesme direnci yerleştirilmektedir. Devre üzerindeki elemanlar arası bağlantılar standart 50Ω dirençli koaksiyel kablolar ve BNC konnektörler yardımıyla yapılmaktadır. CEM çıkışında,

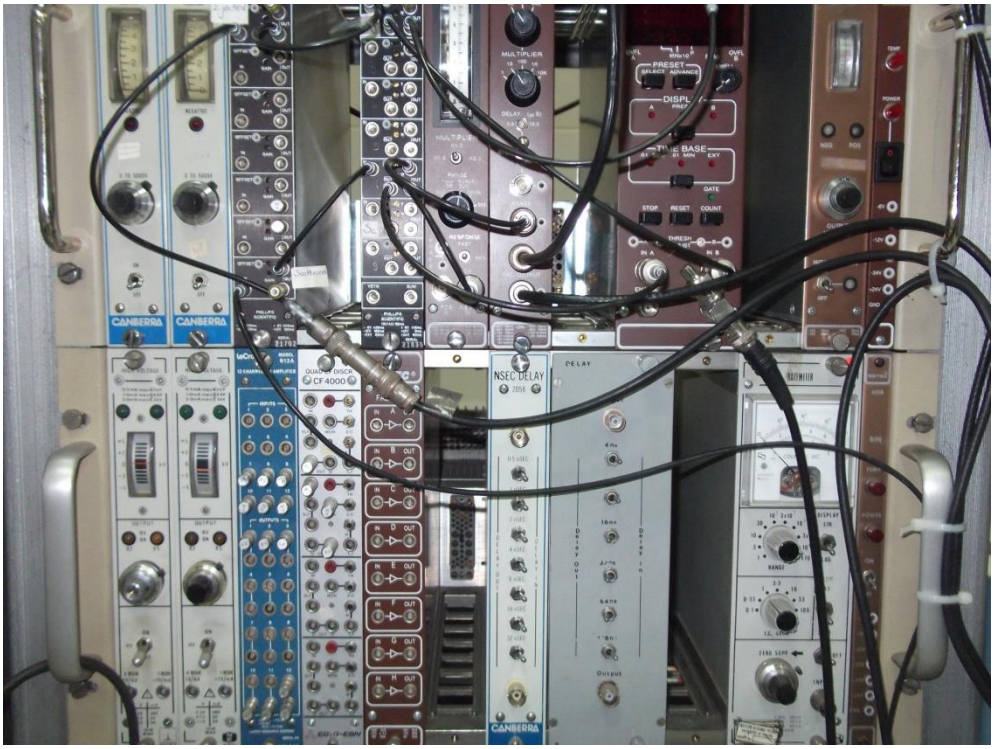
toprağa göre negatif, işlenebilir büyüklükle bir atma elde edilmiş olur. Bu atma yükseltece aktarılarak sinyal işleme ünitesine aktarılmaktadır.



Şekil 3.13 CEM besleme bağlantıları ve çıkış sinyalinin elde edilmesi (Murray 2005).

3.7 Sinyal İşleme Ünitesi

Elektron çarpışma deneylerinde tesir kesiti ölçümleri yapılmaktadır. Tesir kesitleri ise açıya ve enerjiye bağlı olarak elektron sayımları ile ilişkilendirilir. Dolayısı ile deneysel olarak, elektron sayımları ile ilgilenilmektedir. Dedektörden alınan her bir sinyal, belirli bir enerjiyle belirli bir açıda saçılmış bir elektronu temsil etmektedir ve sayılmaktadır. Zaman analizinin yapıldığı uygulamalarda ise aynı zamanda birden fazla sinyal arasındaki zaman korelasyonu analiz edilmektedir. Dedektör çıkışındaki sinyal ~20mV genliğe ve ~10ns genişliğe sahiptir. Bu sinyal yükseltilmekte, sayısallaştırılmakta, zaman veya enerjisine göre analiz edilmektedir. Bu işlemler NIM (Nuclear Instrumentation Module) cihazları ve veri toplama ünitesi olarak kullanılan bilgisayarlar yardımı ile yapılmaktadır. Şekil 3.14'te deney düzeneğinde kullanılan sinyal işleme ünütesinin görünümü verilmiştir.



Şekil 3.14 Sinyal işleme ünitesi ve NIM cihazlarının görünümü.

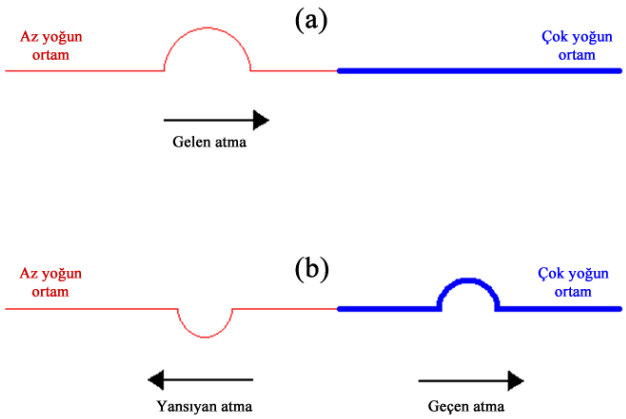
NIM; 1968-1990 yılları arasında gelişerek deneysel fizik alanında standartlaşan, cihazların mekanik, elektrik ve elektronik özelliklerini belirli ölçütlere bağlayan bir standarttır. NIM cihazları farklı işlevleri olan, fakat aynı mekanik/elektrik/elektronik özelliklere sahip olan cihazlardır. Modül boyutları, beslenmeleri için gerekli soket yapıları, giriş ve çıkış empedansları aynı olmaktadır. Aynı zamanda, içerdiği ECL (Emitter Collector Logic) elektronik standardı ile yaygın olarak kullanılan TTL/CMOS elektronik devrelerden çok daha hızlı çalışabilmektedir. NIM cihazlar, hızlı ve modüler (değiştirilebilir) yapılarıyla deneysel fizik çalışmalarında tercih nedeni olmuşlardır (U.S. NIM Committee 1990).

3.7.1 Elektronik Kablolama

Elektron çoğaltıcı dedektör (CEM) ile elde edilen ve belirli bir açıda ve enerjide elektron tespit edildiği anlamına gelen atma şeklindeki sinyalin analiz edilebilmesi için yükseltilmesi, gürültüden süzülmesi ve veri toplama kartlarının girişine uygun hale getirilebilmesi için işlenmesi gerekmektedir. Dedektör yüksek gerilim besleme ve sinyal çıkışı dâhil olmak üzere tüm sinyal işleme ünitesinde kablo ve konektörlerin, sinyalin

kayıpsız ve gürültüsüz taşınabilmesi için belirli standartlara uygun olması gerekmektedir.

Üzerinde elektriksel sinyal taşınan her ortamın karakteristik bir empedansı bulunmaktadır. Empedans; basitçe, zamanla değişen akıma karşı ortamın direnci şeklinde tanımlanabilir (Pozar 2011). İçinde zamanla değişen değerlere sahip kapasitif ve endüktif elemanlar olan devrelerde direnç yerine empedans kullanılmaktadır. Mekanik ortamda yayılan bir atma, farklı yoğunlukta bir ortamla karşılaştığında, atmanın bir kısmı geçmekte bir kısmı ise yansımaktadır (Şekil 3.15). Benzer bir şekilde, elektriksel bir atma yayılırken farklı empedansa sahip ortamlar arası geçişte geçme ve yansıma gerçekleşmektedir. Geçen atma kayba uğrayarak iletilmekte, yansıyan atma ise sinyal hattında elektriksel gürültüye sebep olmaktadır. Sinyalin kayıpsız ve gürültüsüz bir şekilde aktarılması için empedans uyumu olan kablolar ve konektörler yardımıyla taşınması gerekmektedir. Deney sisteminde, NIM standartlarına uygun şekilde, 50Ω empedanslı koaksiyel kablolar ve BNC/Lemo konektörler kullanılmıştır. Dedektör besleme hattında ise yüksek gerilime dayanıklı MHV konektörler bulunmaktadır.

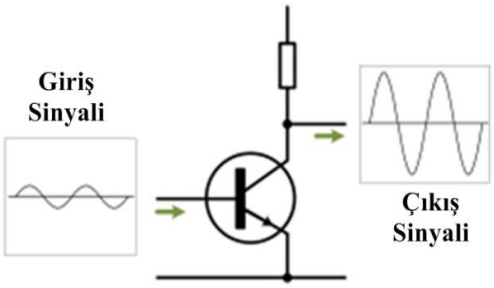


Şekil 3.15 Farkı yoğunluklardaki ortamda ilerleyen mekanik atma. a) Ortamların arakesitine yaklaşırken, b) yoğunluk farkından dolayı arakesitten geçen ve yansıyan atmalar.

3.7.2 Yükseltici (Apmlifier)

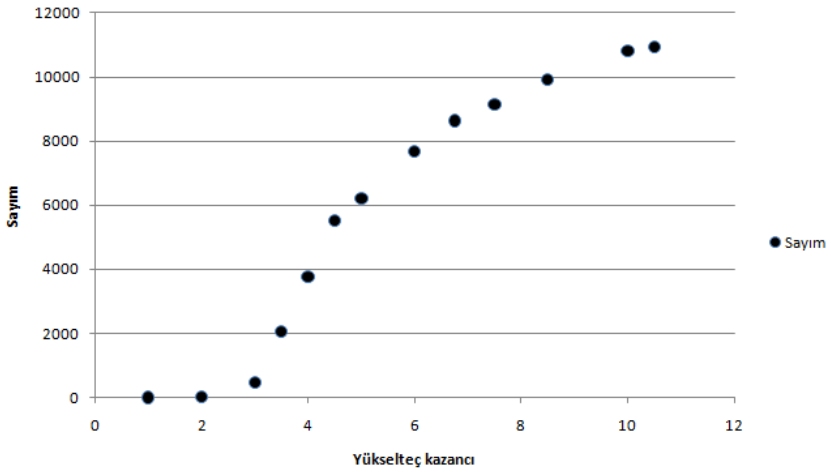
Yükselticiler, girişteki elektriksel sinyalin şiddetini artıran elektronik cihazlardır. En basit yükseltici olarak bir transistör örnek verilebilir (Şekil 3.16). Girişindeki sinyalin şeklini (frekans, dip, tepe vb. özelliklerini) değiştirmeden, sadece genliğini belirli bir

oranda artırarak çıkışından vermektedir. Çıkış genliğinin, giriş genliğine oranı ($V_Ç/V_G$) yükselticinin kazancıdır. Hiçbir yükselticinin sonsuz kazançlı olamayacağı gibi, transistörler de giriş sinyalini ancak belirli bir seviyeye kadar yükseltebilmektedir. Bu durumda, kazancın doyuma ulaştığı söylenilmektedir.



Şekil 3.16 Sinyal yükseltici olarak çalışan bipolar npn transistör gösterimi.

Elektron çarpışma deneylerinde, dedektör (CEM) çıkışından alınan sinyalin genliği ~20mV değerindedir. Sinyalin işlenmesini kolaylaştırmak için şiddetini yükseltmek gerekmektedir. Bunun için, NIM standartlarına uygun, kazancı ayarlanabilen bir yükseltici kullanılmaktadır. Sinyalin şeklinin değişmemesi için, kullanılan yükselticinin lineer ve yüksek hızlı olması gereklidir. Deneylerde, CEM sinyali yaklaşık 10 kat yükseltilmektedir. Şekil 3.17'de yükseltici kazancının elektron sayım sayısına etkisi gösterilmektedir. Kazancın 10 değerini geçtiğinde yükselticinin doyuma girdiği görülmektedir.

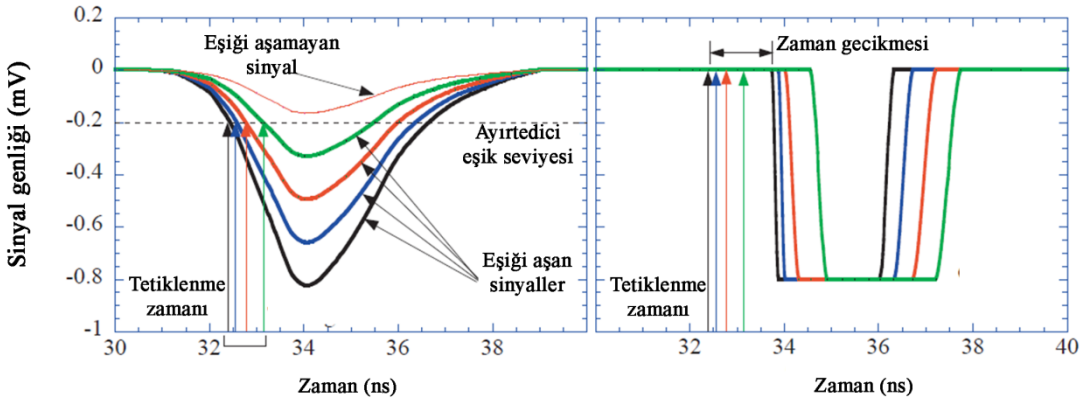


Şekil 3.17 Elektron sayımının yükseltici kazancına bağlı olarak değişimi (Özer 2013).

3.7.3 Ayırtedici (Diskriminatör)

Yükseltici çıkışından alınan sinyal, CEM'den alınan sinyalin yükseltilmiş halidir. Yükselticide sinyal ile birlikte gürültü de aynı oranda yükseltilmektedir, dolayısı ile yükseltici çıkışı gürültü de içerir. Sinyalin genliği ve genişliği deneysel ortama, gürültüye, cihazlara ve kablolara bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Elektron saçılma deneylerinin amacı olan tesir kesiti ölçümlerinin yapılabilmesi için, enerji ve açıya bağlı olarak elektron sayımları yapılmalıdır. Saçılan elektronları sayabilmek için, dedektörden alınan her bir sinyalin, bir elektron anlamına gelecek şekilde; gürültüden arınmış, standart genlik ve genişliğe sahip bir sinyale dönüştürülerek sayılabilir hale getirilmesi gereklidir. Bu amaçlarla, gerçek sinyali gürültüden ayırmak, sabit genlik ve genişliğe getirebilmek için ayırtedici cihaz kullanılmaktadır.

Deney sisteminde kullanılan ayırtedici, NIM standardında, sabit seviye tipi ayırtedici bir cihazdır. Ayırtedici girişine gelen sinyal, belirli bir eşik değerini (threshold) geçtiğinde tetiklenmekte ve çıkışında sabit genlik ve genişlikte negatif bir puls üretmektedir (Şekil 3.18). Cihazın tepki süresine bağlı olarak çıkış sinyalinde sabit bir gecikme olmaktadır.

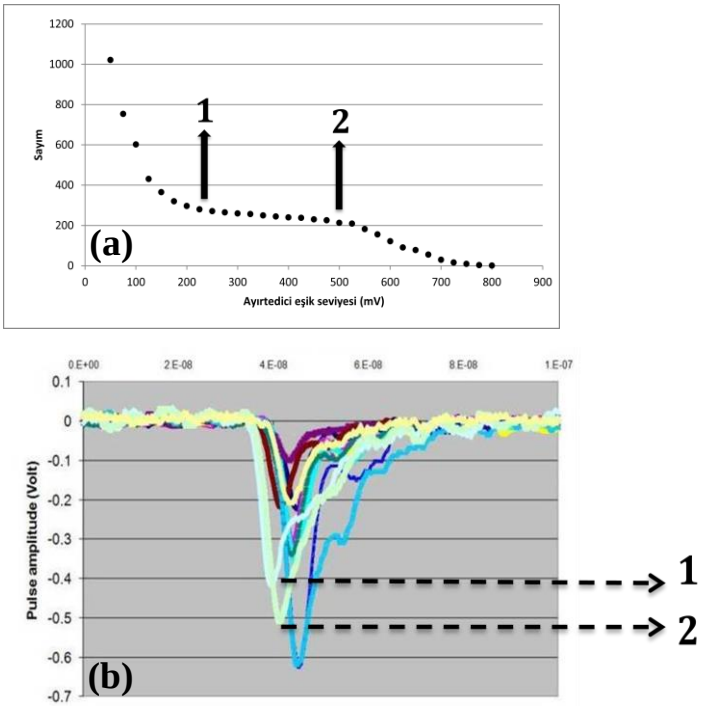


Şekil 3.18 Seviye ayırtedici işleyişi gösterimi. Sol tarafta ayırtedici giriş sinyali, sağ tarafta çıkış sinyali tetiklenme seviyesi ve zamanlarıyla gösterilmektedir (Murray 2005).

Seviye ayırtedici cihazlar (level/edge discriminators) yüksek hızda (GHz mertebesindeki frekanslarda) çalışabilmektedir ve kontrolü kolay olmaktadır. Buna karşın, seviye ayırtedicilerin bir dezavantajı bulunmaktadır. Ayırtedicinin tetiklenmesi sadece tek bir eşik seviyesine bağlı olduğu için, şeklinde veya genliğinde farklılıklara sahip sinyaller tarafından farklı zamanlarda tetikleneceklerdir. Deneysel ortamdan

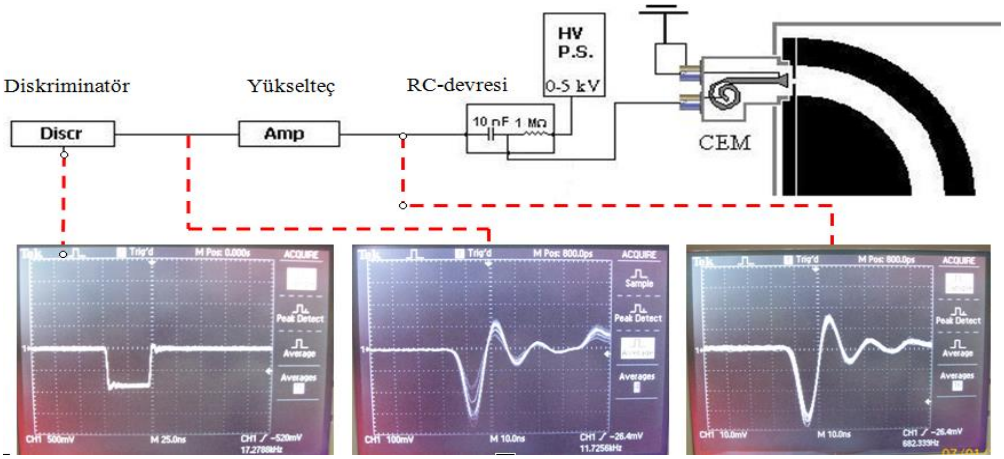
kaynaklanan bu tip sinyal farklılıkları ise muhtemel bir durumdur. Ayırtedici tetiklenme zamanının değişiminden dolayı, çıkış pulsu da seyirme (jitter) göstermektedir. Bu seyirme ise çakışma tekniği gibi zaman analizinin yapıldığı uygulamalarda daha düşük zaman çözünürlüğüne neden olmaktadır.

Ayırtedici eşik seviyesi ve çıkış puls genişliği ayarlanarak gerçek sinyal gürültüden arındırılmış olur. Kullanılan deney düzeneğinde ayırtedici çıkış genişliği 50ns olarak alınmıştır. Böylece, hattaki gürültü nedeniyle olabilecek sahte tetiklenmeler önlenmiş olmaktadır. Eşik seviyesini; gürültü bölgesinden uzakta olacak şekilde yüksekte, gerçek sinyalleri aşmayacak kadar da alçakta ayarlamak gerekmektedir. İdeal eşik seviyesini bulmak için, cihazın eşik seviyesi değiştirilerek elektron sayımları gözlenir ve gürültü bölgesinden yeterince uzakta ayarlamak pratik bir yöntemdir. Şekil 3.19a'da eşik seviyesi değişimine bağlı olarak elektron sayımındaki değişim, Şekil 3.19b'de bu değişimin yükseltici çıkışına göre fiziksel yorumu gösterilmektedir. Eşik seviyesi şekildeki (1) seviyesinden düşük seçilerek yükseltici çıkışındaki gürültünün ayırt edilmesi sağlanmıştır. Eşik seviyesinin (2) seviyesinden daha düşük ayarlandığı durumda ise gerçek sinyalden kayıplar başlamaktadır. İdeal eşik seviyesi olarak (1) ile (2) arasında bir değer ayarlanmalıdır.



Şekil 3.19 (a) Yükseltici çıkış sinyali temsili gösterimi, b) Eşik seviyesine bağlı olarak ayırtedici çıkışından okunan sayım sayıları gösterilmektedir.

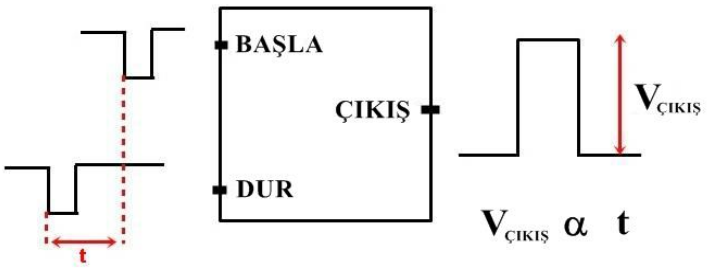
Yükseltici çıkışındaki sinyalin şekli ve genliği kullanılan cihazlar, sinyal iletim hattı, gürültü gibi deneysel koşullar nedeniyle değişebilmektedir, dolayısı ile analog bir sinyaldir. Yükseltilen sinyalin şekli ve genliği sabit olmadığı için analizör girişindeki elektron sayısı hakkında sayılabilir bilgi vermemektedir. Ayırtedici ile birlikte bu sinyal, negatif kare pulsa dönüştürülerek gürültüden arındırılmış ve NIM standartlarına uygun şekilde dijitalleştirilmiş olmaktadır. Ayırtedici çıkışındaki sinyallerin tümü sabit bir genliğe ve genişliğe sahiptir (Şekil 3.20). Böylece, sinyalin şekli veya genliği değil, varlığı veya yokluğu bir anlam kazanmaktadır. Ayırtedici çıkışında gözlenen her kare puls, belirlenen açı ve enerjide analizöre giren bir elektron varlığı anlamına gelmektedir. Artık elektriksel bir sinyal olmaktan çıkarak, bilgi taşıyan dijital paket haline dönüştürülmüştür. Elektron saçılma deneylerinin amacına uygun olarak, tesir kesiti ile ilişkilendirilebilecek şekilde sayılabilir hale getirilmiş olmaktadır. Şekil 3.20'de dedektörden alınan sinyalin yükseltici ile yükseltilmesi ve ayırtedici (diskriminatör) ile negatif kare pulsa dönüştürülmesi aşamalarında osiloskop ekranında gözlenen sinyaller gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Sinyal işleme ünitesinde; dedektör, yükseltici ve ayırtedici çıkışındaki sinyallerin osiloskop ekran görüntüleri (Okumuş 2009).

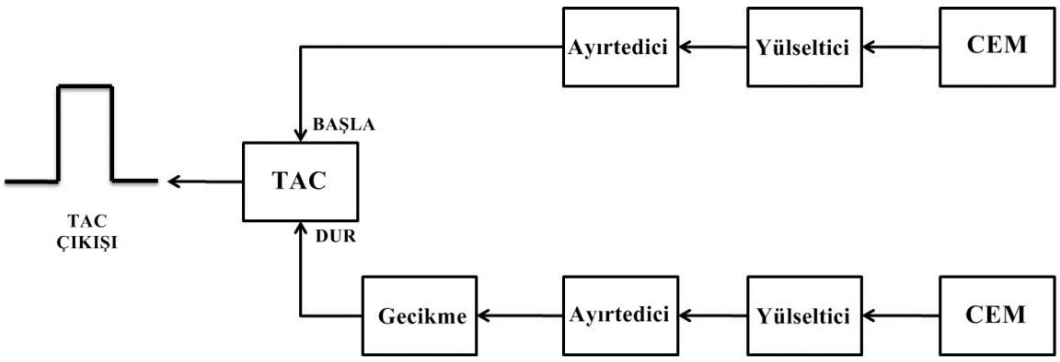
3.7.4 Zaman-Genlik Dönüştürücü (Time to Amplitude Converter; TAC)

Zaman-genlik dönüştürücü, başlatıcı ve durdurucu pulslar arasında zaman farkını ölçen ve çıkışında bu zaman farkı ile orantılı genlikte pozitif kare sinyal üreten cihazdır (Şekil 3.21). Ayırtedici çıkışındaki negatif kare pulslar TAC'ın başla ve dur sinyal girişlerini oluşturmaktadır.



Şekil 3.21 TAC'ın, başla ve dur (start-stop) girişlerine uygulanan sinyaller arasındaki zaman farkıyla orantılı genlikte çıkış sinyali üretmesi.

TAC, zaman analizinin yapıldığı ölçümlerde kullanılmaktadır. İki analizörün kullanıldığı, dedekte edilen iki elektron arasındaki zaman korelasyonunun incelendiği çakışma tekniği gibi uygulamalarda elektronların dedektörlere ulaşmaları arasındaki zaman farkının hassas bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bu durumda, her iki analizöre gelen elektronların ürettiği sinyal ayrı ayrı CEM-Yükseltici-Ayırtedici yolunu izlemektedir (Şekil 3.22). İki ayırtediciden gelen sinyallerin biri başlatma diğeri durdurma komutu vermektedir. TAC'ın iç yapısından dolayı belirli bir ölü zamanı bulunmaktadır. Başlatıldığı andan itibaren bir süre boyunca durdurma işlemi yapılamaz. Elektron saçılma deneylerinde iki elektronun eşzamanlı dedekte edildiği durumlarda başlatma ve durdurma zamanları arasındaki fark ~10ns kadar düşük olabilmektedir. Bu nedenle, durdurucu sinyalin tekrar komut verebilmesi için TAC'ın boşta olması gerekmektedir. Durdurucu sinyal uygun bir süre geciktirilerek TAC'ın işlevsiz olduğu ölü zamanında komut alması önlenmiş olmaktadır (Ortec 1985).



Şekil 3.22 İki analizörün kullanıldığı durumlarda, dedekte edilen elektronlar arasındaki zaman farkının TAC ile ölçümünde, sinyallerin izlediği yolun şematik gösterimi.

Tek analizörün kullanıldığı enerji kayıp spektrumu ölçümlerinde de TAC kullanılmaktadır. Bunun amacı, ayırtedici çıkışındaki negatif kare sinyali pozitife çevirmektir. Enerji kayıp spektrumunun alındığı MCS veri toplama kartı girişi sadece pozitif sinyalleri kabul etmektedir. Bu durumda, kullanılan analizörün bağlı olduğu ayırtedici çıkışı hem başla hem durdur komutu vererek TAC çıkışından sabit zaman farkıyla pozitif kare sinyal elde edilmektedir.

3.7.5 Çok Kanallı Sayıcı (Multi Channel Scaler; MCS)

Analizöre gelen elektronların enerji kayıp spektrumlarını oluşturmak amacıyla analizör seçici gerilimini sürmek (ramp) için, bilgisayarın ISA/PCI portuna takılan Ortec MCS kartı kullanılmaktadır. MCS, belirli zaman aralıklarında (dwell time), gerilimi adımlara bölerek bu kanallardaki sayım oranlarını kaydetmektedir. MCS yazılımı ekranında, enerjiye karşı giriş olaylarının sayım oranı gösterilmektedir.

Çok kanallı sayıcı, enerji kayıp spektrumu gibi tek analizörün kullanıldığı ölçümlerde, elektron enerji analizörünün seçici gerilimini belirli bir aralıkta değiştirerek (ramp) enerji spektrumunu elde etmek için kullanılmaktadır.

4. BULGULAR

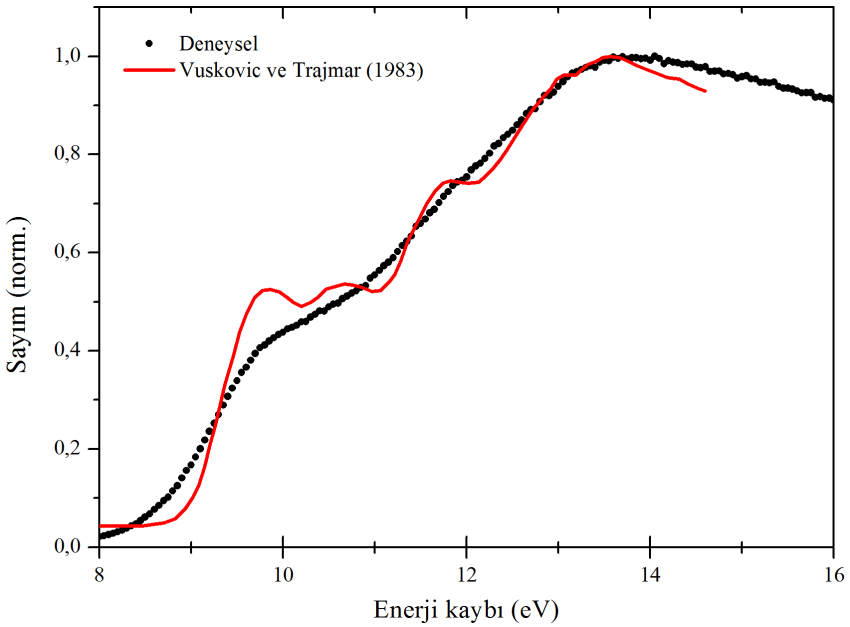
Bu araştırmada, elektron çarpışma spektrometresi kullanılarak metan molekülünün uyarılma tesir kesiti (enerji kayıp spektrumu), elastik saçılma diferansiyel tesir kesiti (DCS) ve iyonlaşma olayı hakkında temel bilgiler veren ikili diferansiyel tesir kesiti (DDCS) ölçümleri yapılmıştır.

Tek analizörün kullanıldığı ölçümlerde koparılan elektron için kullanılan analizör ile ölçüm alınmıştır. Analizörün taranılabilir açı değerleri θ = 25-130˚ aralığındadır. Elastik DCS ve DDCS spektrumları, analizörün belirli enerjideki elektronları dedekte edecek şekilde ayarlanması ve döner tablalar üzerinde hareket ettirilmesi ile açısal dağılımın belirlenmesi sonucu elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde mevcut bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Uyarılma (enerji kayıp) ve elastik saçılma (DCS) tesir kesitleri sıkça çalışılan konular olduğu için karşılaştırma yapılabilecek deneysel ve teorik sonuçlar verilmiştir. İkili diferansiyel tesir kesiti (DDCS) ölçümleri olarak literatürde sadece iki çalışma bulunmaktadır (Opal *et al.* 1972, Oda 1975). Bu çalışmalar ise, gelen elektron enerjisi, E_0, 500 ve 1000eV iken enerji dağılımına göre alınmıştır. Bu tez çalışması kapsamında alınan DDCS spektrumları, E_0=50-350eV aralığında ve açısl dağılıma göre alınmıştır. Dolayısıyla, karşılaştırma yapılacak sonuç bulunmamaktadır. Alınan DDCS sonuçları, tartışma ve sonuç bölümünde açıklanacağı gibi, genel beklentilere uygundur.

4.1 Enerji Kayıp Spektrumu

Enerji kayıp spektrumu, gelen elektron demetinin inelastik çarpışması durumunda, CH_4 molekülünü uyararak saçılması durumunda oluşmaktadır. Gelen elektron, enerjisinin bir kısmını moleküle aktarmakta, gelen elektronun kaybettiği enerji uyarılma enerji seviyeleri arasında geçişe neden olmaktadır. MCS kartı yardımıyla molekülün iyonlaşma potansiyelinden küçük enerji aktarımlarına karşılık gelecek şekilde enerji kayıp spektrumu oluşturulmaktadır. E_0=250eV iken elde edilen enerji kayıp spektrumu Şekil 4.1'de görülmektedir. Alınan ölçümler, Vuskovic ve Trajmar (1983) tarafından alınan ölçümlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Elde edilen uyumlu sonuç, spektrometrenin güvenilir çalışabildiğinin bir göstergesidir. Elde edilen spektrumda,

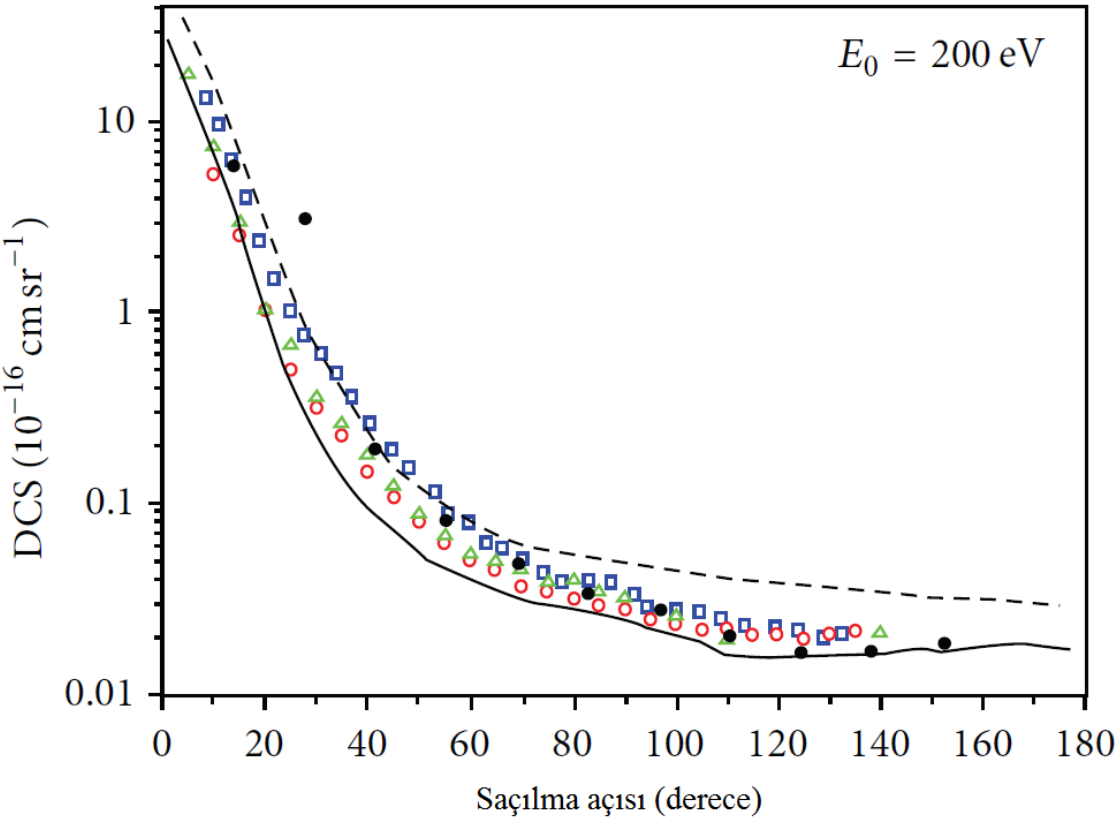
elektronik uyarılma seviyelerinin net bir şekilde ayırt edilememesi, kullanılan spektrometrenin çözünürlüğü ile ilişkilidir. Enerji kayıp spektrumunda görüldüğü gibi, metan molekülünün $1t_2$ orbitalinin bağlanma enerjisi olan 14,25 eV'den sonra spektrumda düz bir yapı gözlenmektedir. Bu düzlük, gelen elektron enerji kaybının hedefin iyonlaşma potansiyelini aşması sonucu iyonlaşma bölgesine karşılık gelmektedir.



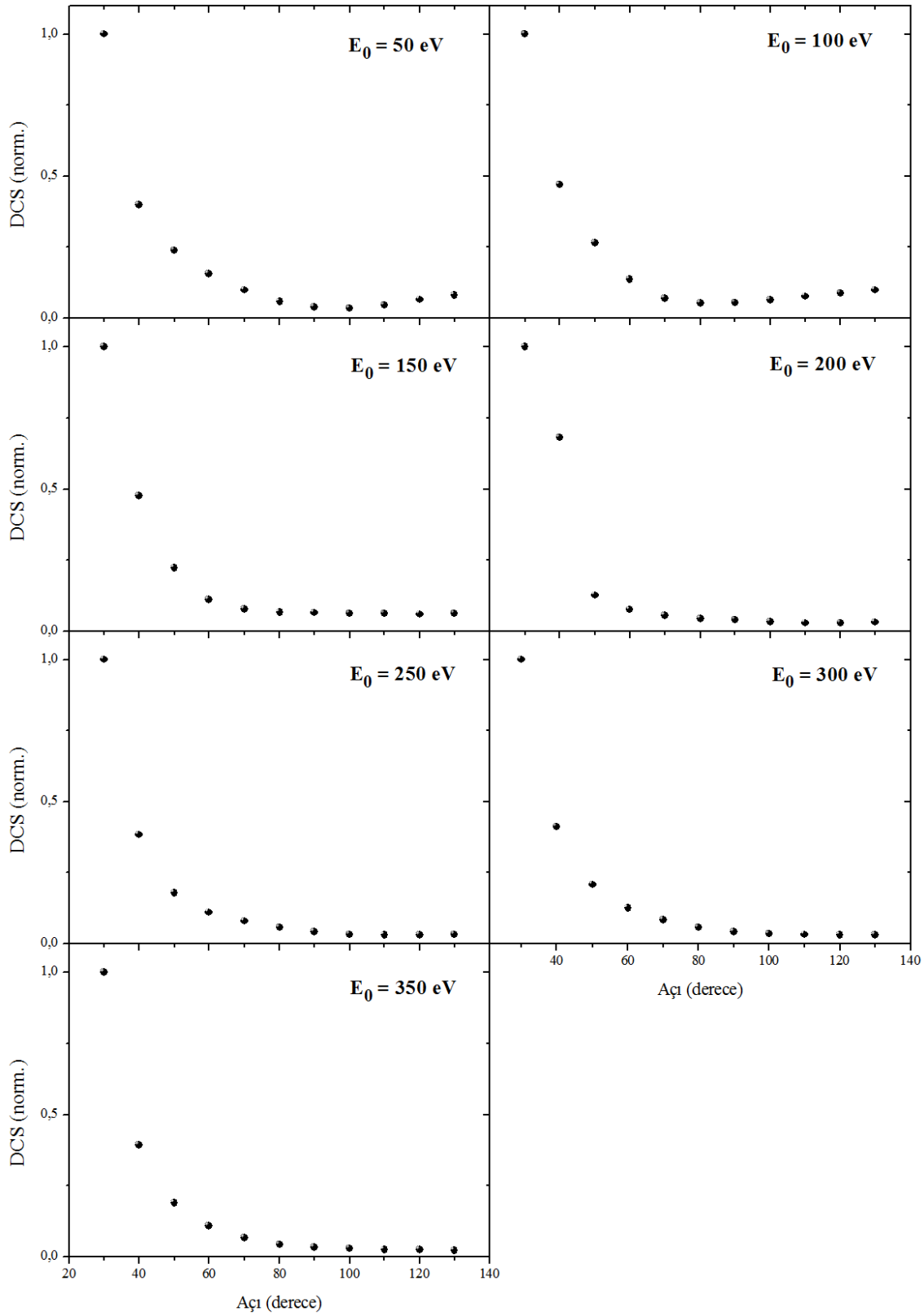
Şekil 4.1 Metan molekülünde E_0=250eV için alınan enerji kayıp spektrumu.

4.2 Elastik Diferansiyel Tesir Kesitleri (DCS)

Gelen elektronun CH_4 molekülüne enerji aktarmadan, elastik saçıldığı durumlarda saçılan elektronların açısal dağılımını elastik diferansiyel tesit kesiti (elastik DCS) vermektedir. Açısal değişime hassas olan bu dağılım, gösterdiği tepe ve dip gibi karakteristik yapılar nedeniyle önemlidir. Bu karakteristik yapılar, literatürde düşük enerjili elektronlar için gözlenmiştir (Iga *et al.* 2000). Şekil 4.2'de E_0=200eV için alınan DCS spektrumu literatürdeki diğer sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.3'te E_0=50-350 eV arası alınan elastik DCS spektrumları toplu halde verilmiştir. Elde edilen spektrumların tümü benzer yapıda olup, açı ile üssel azalan bir yapı göstermişlerdir. Orta ve yüksek enerjili elektronlarla çalışıldığı için elastik saçılma tesir kesitlerinde tepe veya dip gibi belirli gözlenmemiştir.



Şekil 4.2 E_0=200eV için alınan elastik DCS spektrumu. Alınan ölçümler literatürdeki diğer ölçümler ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilde; siyah noktalar bu çalışmada alınan ölçümleri, daireler Iga et al. (2000) ölçümlerini, mavi kareler Vuskovic and Trajmar (1983) ölçümlerini, üçgenler Sakae et al. (1989) ölçümlerini, düz çizgi Iga et al. (2000) teorik hesaplamalarını, kesikli çizgi Dhal et al. (1979) teorik hesaplamalarını göstermektedir (Dogan *et al.* 2013).



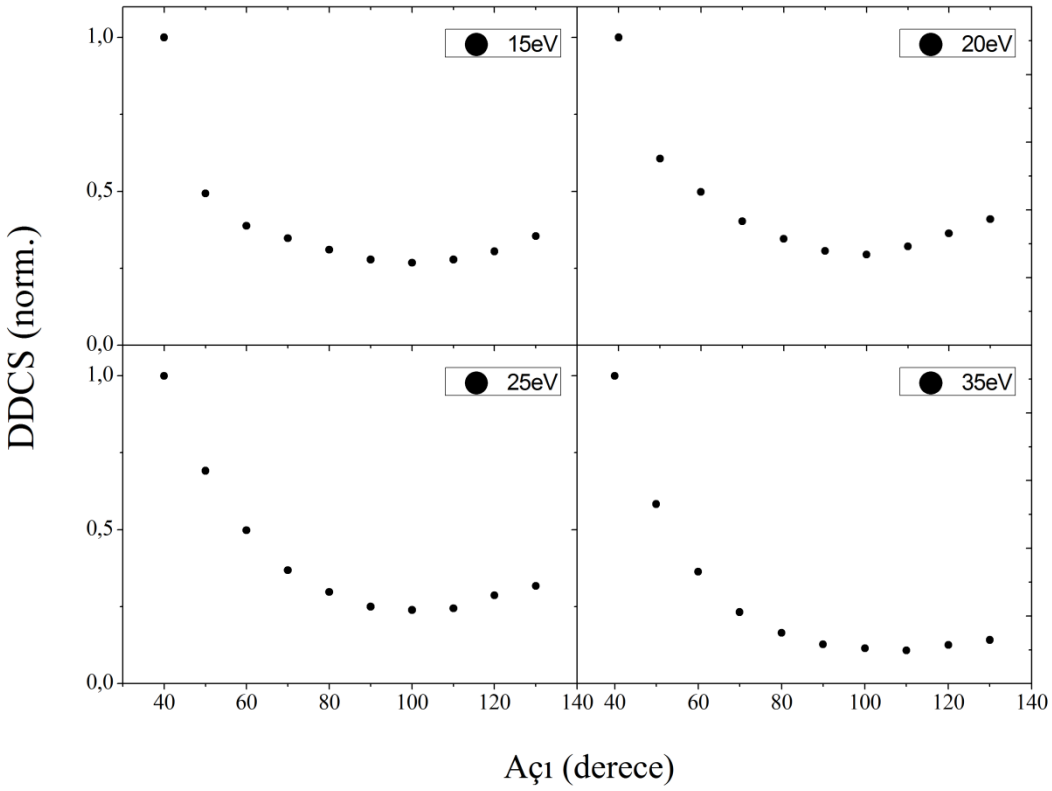
Şekil 4.3 Metan molekülünde E_0=50-350eV arası gelen elektron enerjileri için alınan elastik diferansiyel tesir kesiti ölçümleri.

4.3 İkili Diferansiyel Tesir Kesitleri (DDCS)

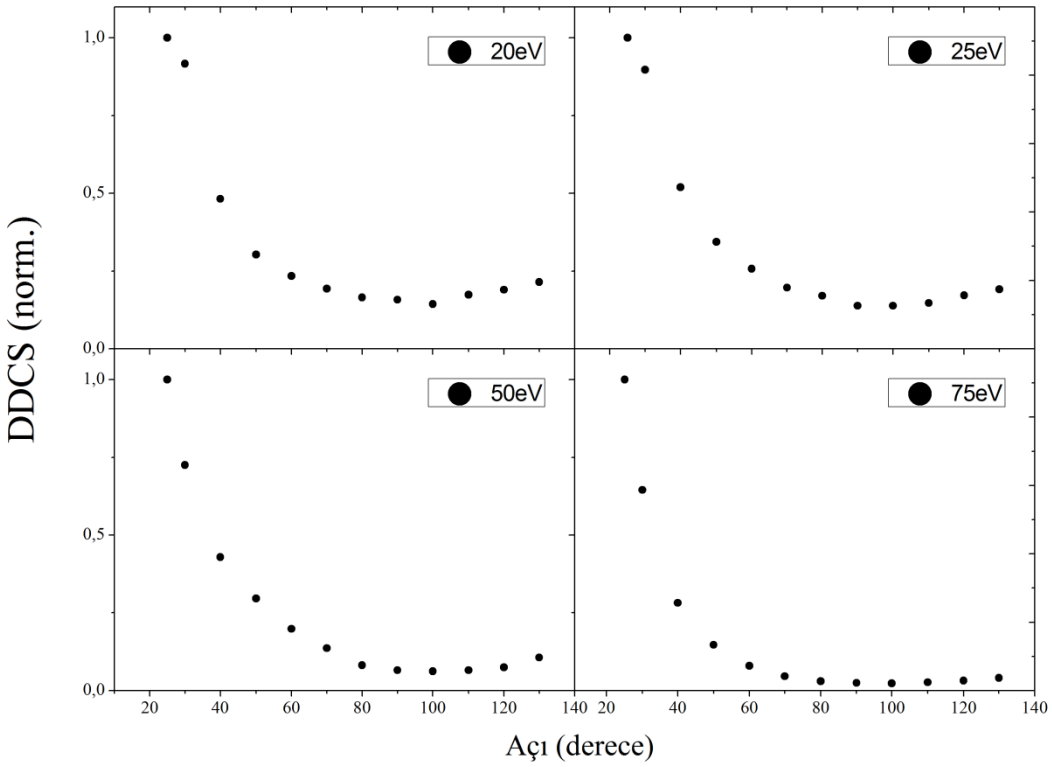
Gelen elektronun, çarpışma sonucu hedef molekülü iyonlaştıracak kadar enerji aktardığı durumlarda iyonlaşma olayı olmaktadır. Tekli iyonlaşma olayında, saçılan ve koparılan olmak üzere iki elektron ortaya çıkmaktadır. Bu elektronlar özdeştir ve ayırt edilemezler. İkili iyonlaşma tesir kesiti (DDCS) ölçümlerinde, çarpışma sonucu oluşan elektronlardan bir tanesinin enerji ve açısal dağılımı ölçülmektedir. Bu nedenle ölçülen elektronlardan hangisinin koparılan hangisinin saçılan olduğu ayırt edilemez.

DDCS, metan molekülünün iyonlaşmasıyla ortaya çıkan elektronlardan birinin enerji ve açısal dağılımını verir. Çıkan elektronlardan birinin göz ardı edilmesine rağmen bu tip diferansiyel tesir kesitlerinin ölçümünden iyonlaşma mekanizması hakkında bilgiler elde edinilmektedir. Deneysel olarak detekte edilemeyen elektronun enerjisi sabit tutulur. Böylece DDCS, detekte edilen diğer elektronun enerji ve saçılma açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Bu çalışmada, analizör ile dedekte edilen elektronun enerjisi sabit tutularak açıya bağlı elektron sayımları alınmıştır. Açısal dağılım aralığı, 25-130˚ arasındadır. Dedekte edilen elektron enerjileri 20 eV'den başlanılarak gelen elektron enerjisine (E_0) yakın değerlere kadar değiştirilmiştir.

Elektron saçılma deneylerinde gelen elektronun enerjisinin iyonlaşma potansiyeline yakın olduğu durumlar düşük enerjili çarpışmalar olarak kabul edilmektedir (Chaudry and Kleinpoppen 2011). Gelen elektron enerjisinin iyonlaşma potansiyelinden 10 katı kadar olduğu durumlar orta enerjili, 10 katından daha fazla olduğu durumlar ise yüksek enerjili çarpışmalar olarak ele alınmaktadır. Bu bağlamda, 50 ve 100 eV orta enerjilerde açı ile azalan bir DDCS spektrumu gözlenmektedir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Her iki enerjide de, yaklaşık 100º saçılma açısında bir dip yapısı gözlenmektedir ve düşük dedekte enerjilerinde bu minimum daha belirgindir.

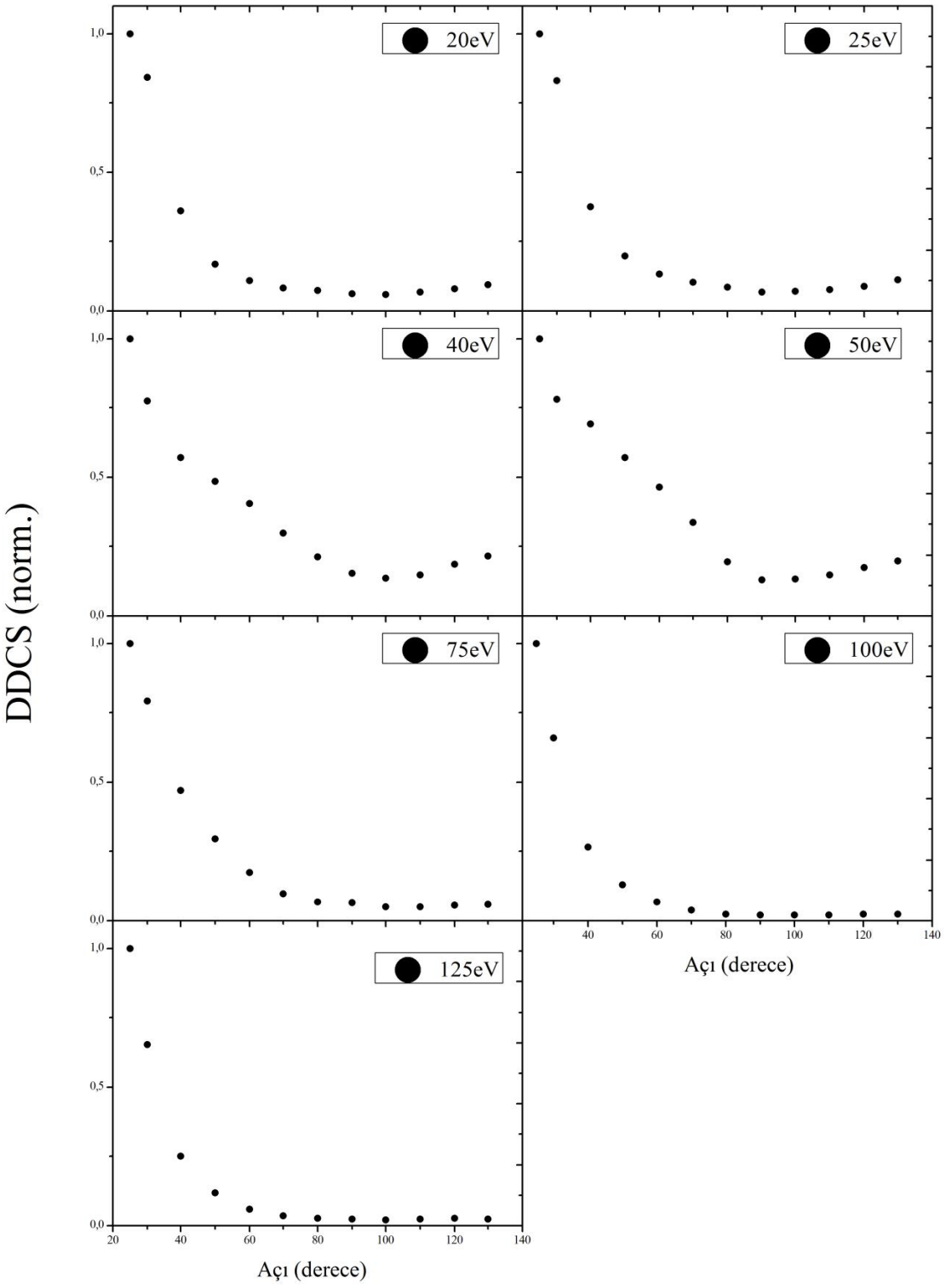


Şekil 4.4 E_0=50 eV için alınan DDCS sonuçları.



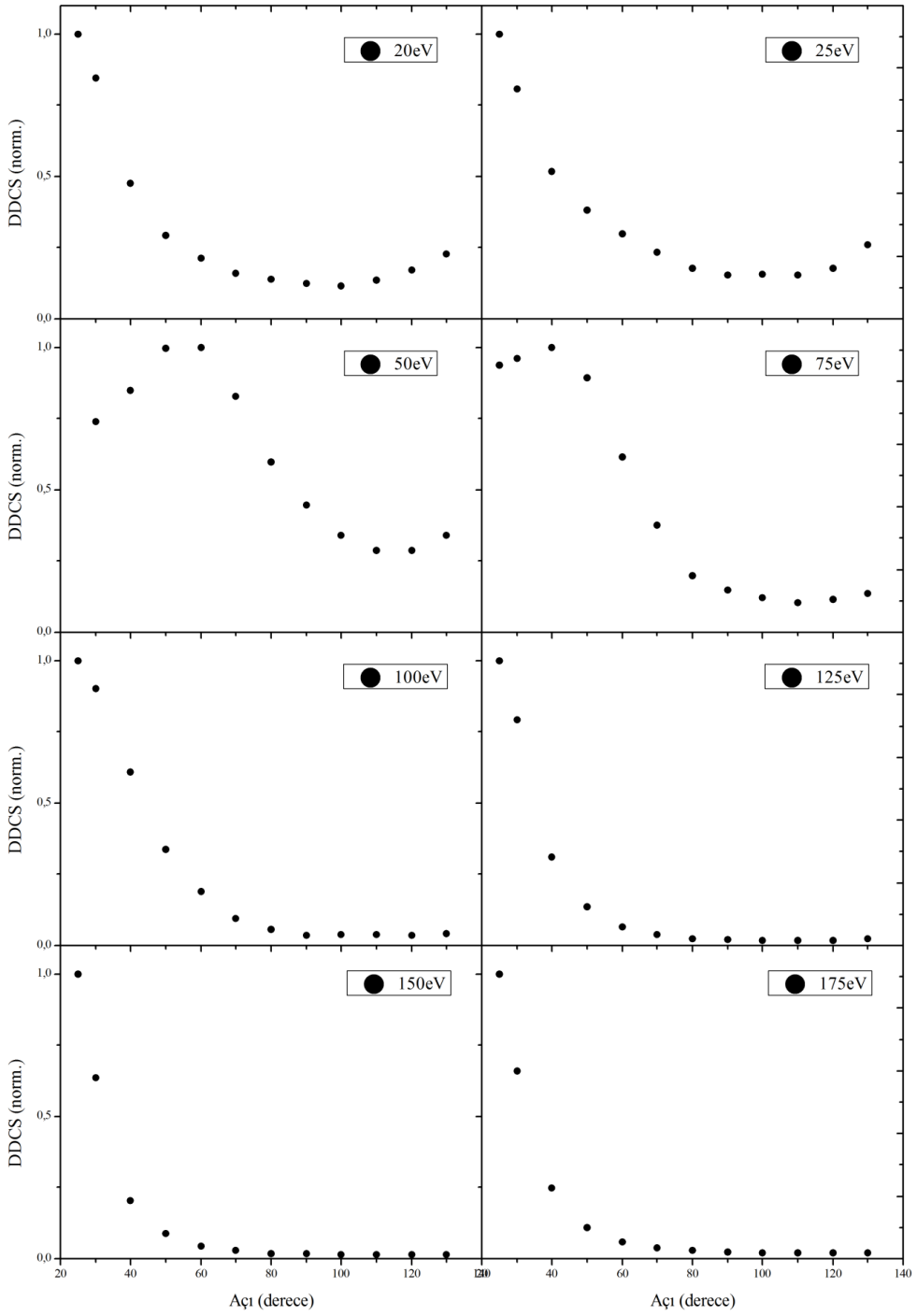
Şekil 4.5 E_0=100 eV için alınan DDCS sonuçları.

E_0=150 eV iken alınan spektrumlarda, dedekte edilen elektron enerjisi 50 eV'ye kadar olan enerjilerde benzer bir dip yapısı gözlenmektedir (Şekil 4.6). Daha yüksek enerjilerde ise açı ile üssel olarak azalan bir spektrum elde edilmiştir.



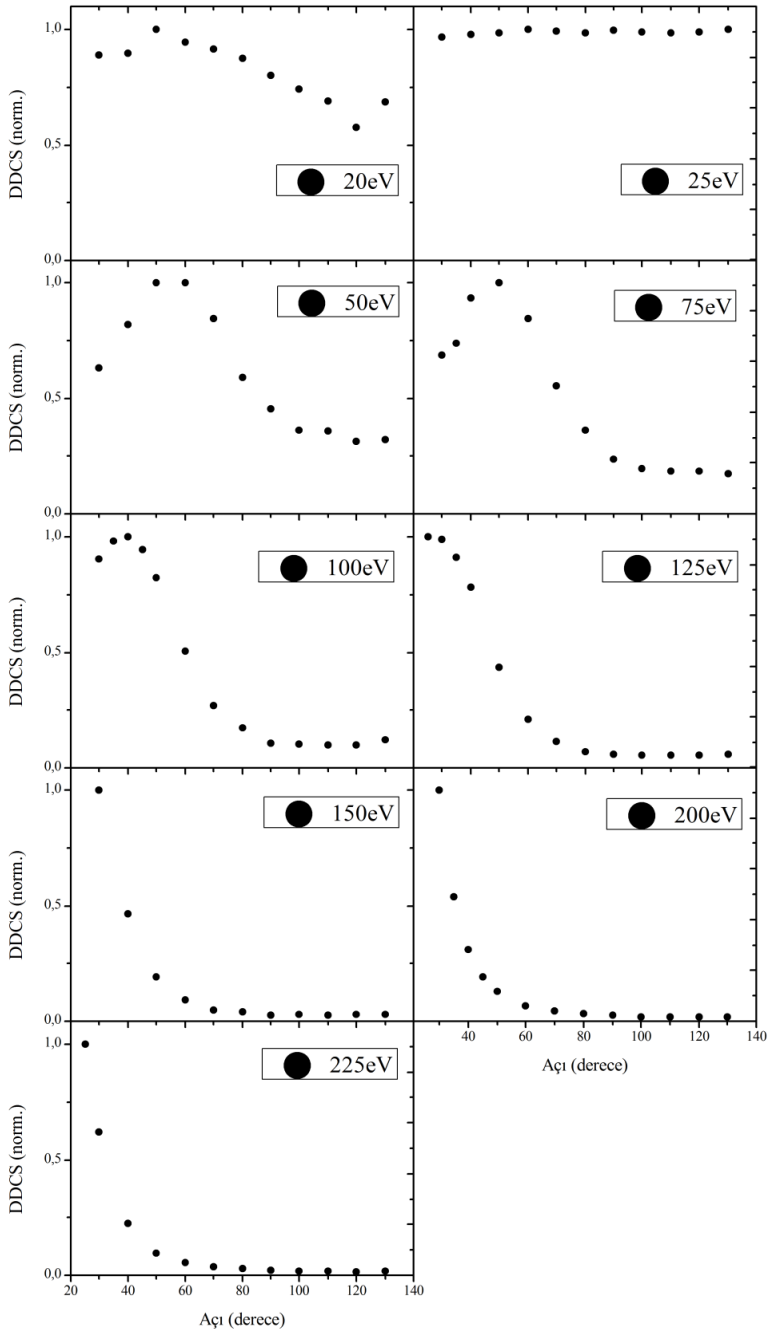
Şekil 4.6 E_0=150 eV için alınan DDCS sonuçları.

Şekil 4.7'de, E_0=200 eV iken, 20 ve 25 eV dedekte enerjilerinde, açı ile üssel azalan bir spektrum oluşumu devam etmekte; 50 ve 75 eV enerjilerinde ise saçılma açısının θ<90˚ olduğu bölgede belirgin bir pik gözlenmektedir. Daha yüksek enerjide dedekte elden elektronlar için alınan spektrumlarda ise, üssel azalan yapı baskındır, pik veya dip gibi özel yapıların oluşmadığı görülmektedir.



Şekil 4.7 E_0=200 eV için alınan DDCS sonuçları.

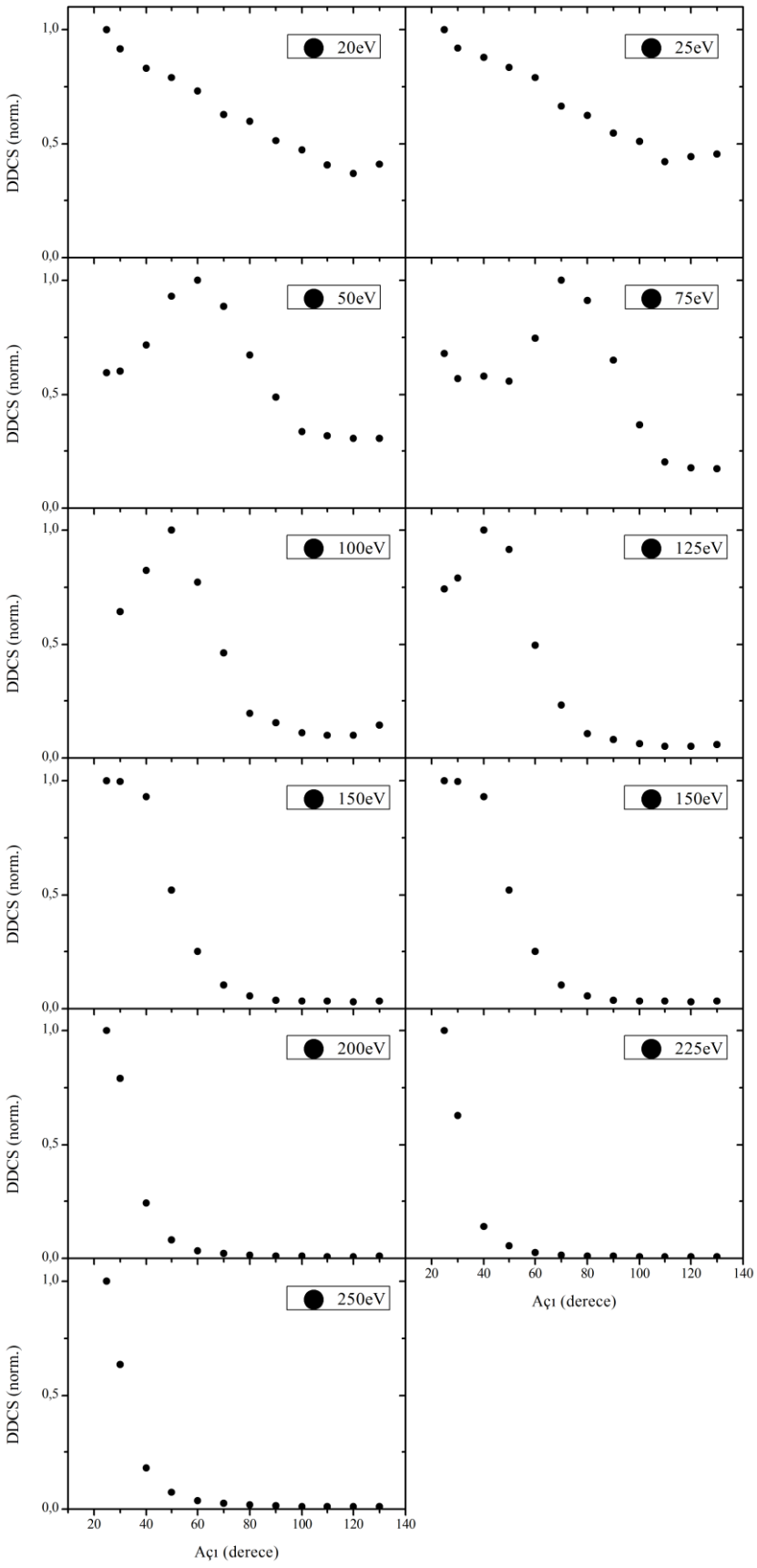
Şekil 4.8'de E_0=250 eV için alınan DDCS spektrumları verilmektedir. Dedekte edilen elektron enerjisi 20 ve 25 eV iken alınan spektrumlarda az değişen veya değişmeyen bir yapı gözlenmektedir. Dedekte edilen enerji 50-125 eV arasında iken ~55º açıda başlayan, enerji arttıkça daha küçük açılarda gözlenen ve 125 eV'de deneysel olarak ölçülemeyen açı bölgesine kayan pik görülmektedir. 150-225 eV dedekte enerjilerinde ise, açı ile üssel azalan yapı baskındır.



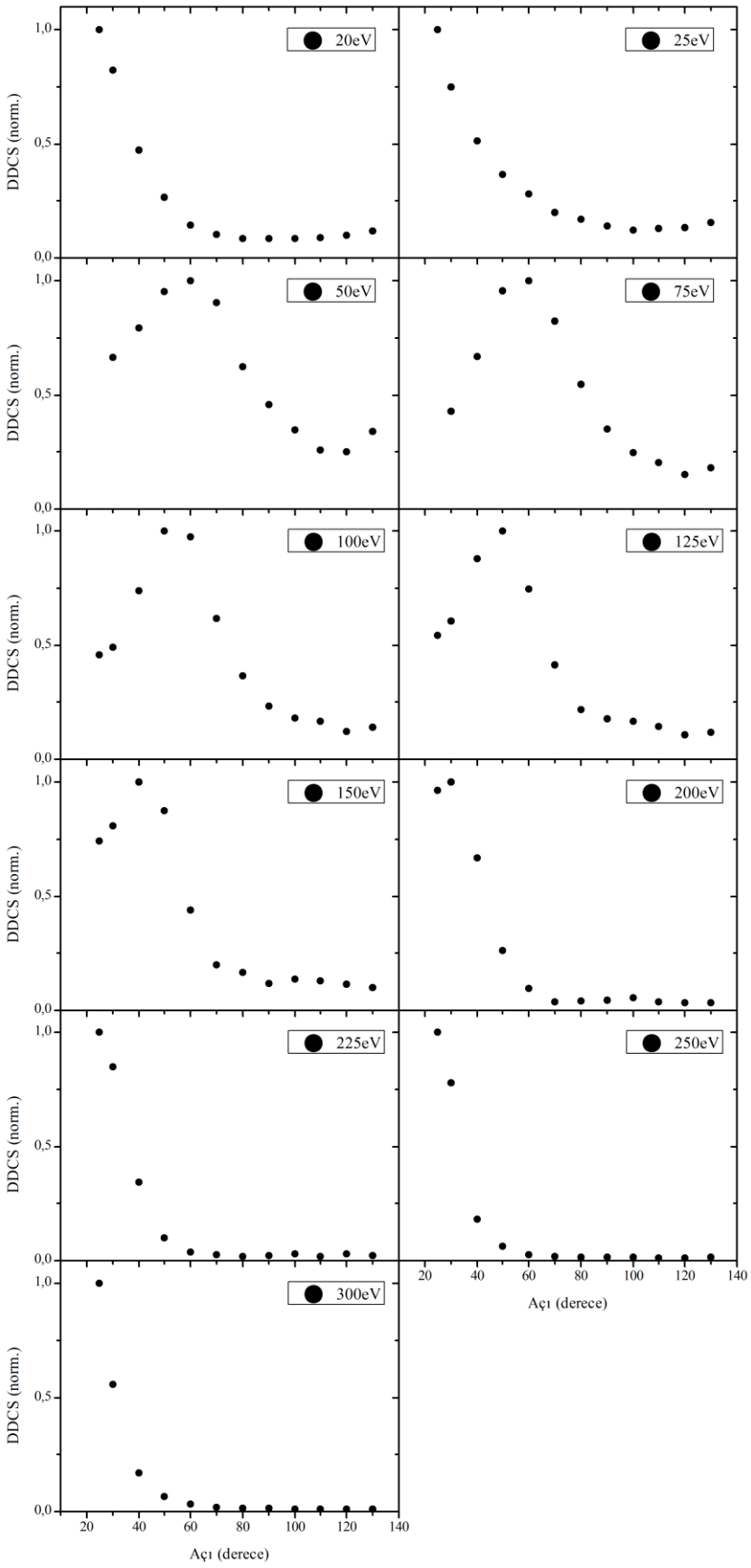
Şekil 4.8 E_0=250 eV için alınan DDCS sonuçları.

Şekil 4.9'da 300 eV gelen elektron enerjisi için alınan DDCS spektrumları verilmektedir. Dedekte edilen enerji 20 ve 25 eV iken açı ile azalan değişim gözlenmştir, ancak değişim üssel olarak değil, daha yavaş bir azalma göstermektedir. 50-150 eV enerjilerde pik gözlenmeye devam etmektedir. Pikin gözlendiği açısal konum, dedekte edilen enerji arttıkça küçük açılara kaymakta ve 200 eV enerjide kaybolmaktadır.

Şekil 4.10'da E_0=350 eV için alınan spektrumlar verilmektedir. Düşük dedekte enerjilerinde (20 ve 25 eV) açı ile üssel azalan değişim yapısı gözlenmektedir. 50-150 eV arasında, diğer E_0 enerjilerilerindeki spektrumlarla benzer şekilde pik gözlenmiştir. Yüksek dedekte enerjilerinde (200-300 eV arası) üssel azalan değişim gözlenmektedir.



Şekil 4.9 E_0=300 eV için alınan DDCS sonuçları.



Şekil 4.10 E_0=350 eV için alınan DDCS sonuçları.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Enerji kayıp spektrumu ve elastik saçılma tesir kesiti ölçümleri, DDCS ölçümleri alınmadan önce enerji ve açı kalibrasyonu amaçlı kullanılmıştır. Alınan ölçüm sonuçlarına göre, DDCS ölçümlerini alırken deneysel olarak herhangi bir açısal düzeltme gerekmediği görülmüştür. Enerji kayıp spektrumundan belirlenen 1,1 eV enerji kayması DDCS ölçüm sonuçlarında hesaba katılmış, gerekli düzeltmeler yapılmıştır.

E_0 = 200 eV için alınan elastik DCS ölçümleri, literatürdeki diğer deneysel ve teorik sonuçlarla karşılaştırılmış, alınan ölçümlerin diğer sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Orta ve yüksek enerjili elektronların kullanıldığı bu çalışmada, düşük enerjili elektronların elastik saçılmalarında gözlenen dip ve tepe yapıları gözlenmemiştir.

İkili diferansiyel tesir kesiti ölçümlerinde dedekte edilen elektronun saçılan veya koparılan olduğu belirsizdir. Saçılma etkisinin baskın olduğu durumlarda, DDCS spektrumlarında açıya bağlı olarak tesir kesitinde üssel azalma beklenmektedir. İyonlaşma olayının baskın olduğu durumlarda ise, tesir kesitinde pik gözlenmesi beklenmektedir. Alınan DDCS spektrumlarında beklentilere uygun olarak, saçılma ve iyonlaşma etkileri gözlenmiştir. Gelen elektron enerjisinin $E_0 \geq 200$eV durumlarda iyonlaşma piki gözlenmiştir. Bu pikin saçılma açısının $\theta<90^o$ olduğu konumlarda gözlenmesi, iyonlaşma olayında çarpışma sonucu koparılan elektronun ileri doğrultuda saçıldığının göstergesidir. Şekil 4.7-10'dan görüldüğü gibi, koparılarak dedekte edilen elektron enerjisinin 50-150 eV arasında olduğu belirlenmiştir. $E_0 \leq 150$eV olduğu orta enerjili durumlarda belirgin bir pik yapısı gözlenmemektedir.

Bazı durumlarda, spektrumlarda düzensiz bir dağılım gözlenmiştir. Gözlenen bu düzensizliklerin, ikincil emisyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Deney düzeneğinde ölçülebilir açı aralığını artırmak için büyük FET üzerine küçük FET yerleştirilmiştir. İkincil emisyonların kaynağı bu küçük FET'teki yansımalardan olabileceği sonucuna varılmıştır.

Çarpışma olayını anlamak için deneyi doğası gereği mutlak olarak ölçülemeyen çeşitli türden tesir kesiti ölçümlerinin yapılması deney düzeneğinin test edilmesi için önemlidir. Çarpışma sürecinin deneysel ve teorik olarak aydınlatılmasının, plazma fiziği, astrofizik, atmosfer fiziği radyasyon kimyası ve biyoloji gibi birçok alanda yeri vardır. Atom-molekül fiziğinde bu çalışmalar, özellikle kuantum teorisinin ve deteksiyon tekniklerinin gelişmesi ile saçılma olaylarının anlaşılmasında önemli katkılar sağlamıştır. Bu çalışmalar sayesinde temel seviyedeki çok parçacıklı sistemlerin dinamikleri hakkında bilgi edinmek mümkündür.

Bu çalışmada elde edilen tesir kesitleri, elektron-metan etkileşmeleri sonucu iyonlaşma olayı için halen geliştirilmekte olan teorilerin test edilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmanın devamında, elektron-atom/molekül etkileşmelerine yönelik teorik çalışmalar yapan farklı gruplarla iletişime geçilmiştir. Teorilerin bu ölçülerle karşılaştırılarak uluslar arası bazda yayın haline dönüştürülme çalışmaları planlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

Amaldi, U., Egidi, A., Marconero, R. and Pizzella, G. (1969). Use of a two channeltron coincidence in a new line of research in atomic physics. *Review of Scientific Instruments*, **40(8)**, 1001-1004.

Al-Hagan, O., Kaiser, C., Madison, D., and Murray, A. J. (2008). 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., and Kleinpoppen, H. (1993). Doubly differential cross section for the ionization of the hydrogen molecule by the impact of 100-eV electrons. *Physical Review A*, **47(4)**, 2922.

Arnot, F. L. (1931). The Diffraction of Electrons in Gases. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, **133(822)**, 615-636.

Avaldi, L., Camilloni, R., Fainelli, E. and Stefani, G. (1992). Ionization of the N2 3 sigma g orbital by electron impact studied by asymmetric (e, 2e) experiments. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **25(16)**, 3551-63.

Barbarito, E., Basta, M., Calicchio, M., and Tessari, G. (1979). Low energy electron scattering from methane. *The Journal of Chemical Physics*, **71**, 54.

Bellm, S. M., Builth-Williams, J. D., Jones, D. B., Chaluvadi, H., Madison, D. H., Ning, C. G., Wang, F., Ma, X. G., Lohmann, B., and Brunger, M. J. (2012). Dynamical (e, 2e) studies of tetrahydrofurfuryl alcohol. *The Journal of Chemical Physics*, ***136***, 244301.

Bellm, S. M., Colyer, C. J., Lohmann, B., and Champion, C. (2012). Experimental and theoretical study of the triple-differential cross section for electron-impact ionization of thymine molecules. *Physical Review A*, **85(2)**, 022710.

Bettega, M. H. F., Natalense, A. P. P., Lima, M. A. P., and Ferreira, L. G. (1995). Calculation of elastic scattering cross sections of low-energy electrons by PbH and SnH. *The Journal of Chemical Physics*, **103**, 10566.

Bettega, M. H. F., Varella, M. D. N., and Lima, M. A. P. (2003). Polarization effects in the elastic scattering of low-energy electrons by XH_4 (X= C, Si, Ge, Sn, Pb). *Physical Review A*, **68(1)**, 012706.

Bhowmik, P. (2012). Theoretical Studies on Electron Scattering Processes with Important Atomic and Molecular Targets. Doktora tezi, Sardar Patel University, Department of Physics, Vallabh Vidyanagar, Hindistan.

Boesten, L., and Tanaka, H. (1991). Elastic DCS for e+ CH4 collisions, 1.5-100 eV. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **24(4)**, 821.

Bray, I. (2002). Close-Coupling Approach to Coulomb Three-Body Problems, *Physical Review Letters*, **89**, 273201.

Broadfoot, A. L., Belton, M. J. S., Takacs, P. Z., Sandel, B. R., Shemansky, D. E., Holberg, J. B., ... and McElroy, M. B. (1979). Extreme ultraviolet observations from Voyager 1 encounter with Jupiter. *Science*, **204(4396)**, 979-982.

Brode, R. B. (1925). The absorption coefficient for slow electrons in gases. *Physical Review*, **25(5)**, 636.

Brüche, E. (1927). Wirkungsquerschnitt und Molekülbau. *Annalen der Physik*, **388(16)**, 1065-1128.

Brüche, E. (1930). Wirkungsquerschnitt und Molekelbau in der Kohlenwasserstoffreihe: CH4, C2H6, C3H8, C4H10. *Annalen der Physik*, **396(3)**, 387-408.

Builth-Williams, J. D., Bellm, S. M., Jones, D. B., Chaluvadi, H., Madison, D. H., Ning, C. G., Lohmann, B., and Brunger, M. J. (2012). Experimental and theoretical investigation of the triple differential cross section for electron impact ionization of pyrimidine molecules. *The Journal of Chemical Physics*, **136**, 024304.

Bundschu, C. T., Gibson, J. C., Gulley, R. J., Brunger, M. J., Buckman, S. J., Sanna, N., and Gianturco, F. A. (1997). Low-energy electron scattering from methane. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **30(9)**, 2239.

Burke, P. G. and Joachain, C. J. (1995). Theory of Electron-Atom Collisions: Part One: Potential Scattering. Plenum Press, New York and London, 255.

Byron, F. W. and Joachain, C. J. (1989). Theory of (e, 2e) reactions. *Physics Reports*, **179(4)**, 211-272.

Casagrande, E. M. S., Naja, A., Mezdari, F., Lahmam-Bennani, A., Bolognesi, P., Joulakian, B., Chuluunbaatar, O., Al-Hagan, O., Madison, D. H., Fursa, D. V. and

Bray, I. (2008). (e, 2e) ionization of helium and the hydrogen molecule: signature of two-centre interference effects. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **41(2)**, 025204.

Cavanagh, S. J., and Lohmann, B. (1999). Coplanar asymmetric (e, 2e) measurements of ionization of N_2O. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **32(12)**, L261-L70.

Chatterjee, S., Kasthurirangan, S., Kelkar, A. H., Stia, C. R., Fojón, O. A., Rivarola, R. D., and Tribedi, L. C. (2009). Fast-electron impact ionization of molecular hydrogen: energy and angular distribution of double and single differential cross sections and Young-type interference. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **42(6)**, 065201.

Chaudhry, A., and Kleinpoppen, H. (2011). *Analysis of excitation and ionization of atoms and molecules by electron impact* (Vol. 60). Springer.

Chérid, M., Lahmam-Bennani, A., Duguet, A., Zurales, R. W., Lucchese, R. R., Dal Cappello, M. C.and Dal Cappello, C. (1989). Triple differential cross sections for molecular hydrogen, both under Bethe ridge conditions and in the dipolar regime. Experiments and theory. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **22(21)**, 3483-3499.

Cho, H., Park, Y. S., y Castro, E. A., De Souza, G. L. C., Iga, I., Machado, L. E., ... and Lee, M. T. (2008). A comparative experimental–theoretical study on elastic electron scattering by methane. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **41(4)**, 045203.

Clark, S. A. C., Reddish, T. J., Brion, C. E., Davidson, E. R., and Frey, R. F. (1990). The valence orbital momentum distributions and binding energy spectra of methane by electron momentum spectroscopy: Quantitative comparisons using near Hartree-Fock limit and correlated wavefunctions. *Chemical Physics*, **143(1)**, 1-10.

Colyer, C. J. (2011). Electronic collisions with molecules of biological relevance. Doktora tezi, University of Adelaide, School of Chemistry and Physics, Adelaide.

Colyer, C. J., Bellm, S. M., Lohmann, B., Hanne, G. F., Al-Hagan, O., Madison, D. H.,

and Ning, C. G. (2010). Dynamical (e, 2e) studies using tetrahydrofuran as a DNA analog. *The Journal of Chemical Physics*, **133**, 124302.

Colyer, C. J., Stevenson, M. A., Al-Hagan, O., Madison, D. H., Ning, C. G., and Lohmann, B. (2009). Dynamical (e, 2e) studies of formic acid. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **42(23)**, 235207.

Coplan, M. A., Moore, J. H. and Doering, J. P. (1994). (e, 2e) spectroscopy. *Reviews of Modern Physics*, **66(3)**, 985.

Cravens, T. E., Lindgren, C. J. and Ledvina, A. S. (1998). A two-dimensional multifluid MHD model of Titans plasma environment. *Planetary and Space Science*, **46(9)**, 1193-1205.

Csanak, G., Taylor, H. S. and Yaris, R. (1971). Many-Body Methods Applied to Electron Scattering from Atoms and Molecules. II. Inelastic Processes. *Physical Review A*, **3(4)**, 1322.

Curry, P. J., Newell, W. R., and Smith, A. C. H. (1985). Elastic and inelastic scattering of electrons by methane and ethane. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **18(11)**, 2303.

Dhal, S. S., Srivastava, B. B., and Shingal, R. (1979). Elastic scattering of electrons by methane molecules at intermediate energies. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **12(16)**, 2727.

Doering, J. P., and Yang, J. (1996). Asymmetric (e, 2e) study of the 100-eV ionization of the $3\sigma_g$ and $1\pi_u$ molecular orbitals of N_2. *Physical Review A*, **54(5)**, 3977.

Dogan, M. (1999). Correlation studies of simultaneous excitation-ionization in helium. Doktora tezi, University of Newcastle upon Tyne, Newcatle.

Dogan, M., Ulu, M., and Sise, O. (2007). Design, simulation and construction of an electron–electron coincidence spectrometer. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, **161(1)**, 58-62.

Dogan, M., Ulu, M., Ozer, Z. N., Yavuz, M., and Bozkurt, G. (2013). Double Differential Cross-Sections for Electron Impact Ionization of Atoms and Molecules. *Journal of Spectroscopy*, **2013**, 192917.

DuBois, R. D., and Rudd, M. E. (1978). Absolute doubly differential cross sections for ejection of secondary electrons from gases by electron impact. II. 100-500-eV electrons on neon, argon, molecular hydrogen, and molecular nitrogen. *Physical Review A*, **17(3)**, 843.

Durić, N., Čadež, I., and Kurepa, M. (1991). Electron impact total ionization cross-sections for methane, ethane and propane. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, **108(1)**, R1-R10.

Ehrhardt, H., Jung, K., Knoth, G., and 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. and Willmann, K. (1969). Ionization of helium: angular correlation of the scattered and ejected electrons. *Physical Review Letters*, **22(3)**, 89.

Ehrhardt, H., Jung, K., Knoth, G., and Schlemmer, P. (1986). Differential cross sections of direct single electron impact ionization. *Zeitschrift für Physik D Atoms, Molecules and Clusters*, **1(1)**, 3-32.

Er-Jun, M., Yu-Gang, M., Xiang-Zhou, C., De-Qing, F., Wen-Qing, S. and Wen-Dong, T. (2007). Differential cross sections of elastic electron scattering from CH_4, CF_4 and SF_6 in the energy range 100–700 eV. *Chinese Physics*, **16(11)**, 3339.

Ferch, J., Granitza, B., and Raith, W. (1985). The Ramsauer minimum of methane. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **18(13)**, L445.

Floeder, K., Fromme, D., Raith, W., Schwab, A., and Sinapius, G. (1985). Total cross section measurements for positron and electron scattering on hydrocarbons between 5 and 400 eV. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **18(16)**, 3347.

Frank, J. and Hertz, G. (1914). Über Zusammenstösse zwischen Electronen und den Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin*, **16**, 457-467.

Fukuzawa, H., Odagiri, T., Nakazato, T., Murata, M., Miyagi, H., and Kouchi, N. (2005). Doubly excited states of methane produced by photon and electron

interactions. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **38(5)**, 565.

Garcia, G., and Manero, F. (1998). Electron scattering by CH_4 molecules at intermediate energies (400–5000 eV). *Physical Review A*, **57(2)**, 1069.

Gianturco, F. A., and Scialla, S. (1987). Local approximations of exchange interaction in electron-molecule collisions: the methane molecule. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **20(13)**, 3171.

Gianturco, F. A., Jain, A., and Pantano, L. C. (1987). Electron-methane scattering via a parameter-free model interaction. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **20(3)**, 571.

Gianturco, F. A., Rodrigues-Ruiz, J. A., and Sanna, N. (1995). The Ramsauer minimum of methane. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **28(7)**, 1287.

Goruganthu, R. R., Wilson, W. G., and Bonham, R. A. (1987). Secondary-electron-production cross sections for electron-impact ionization of molecular nitrogen. *Physical Review A*, **35(2)**, 540.

Hargreaves, L. R., Colyer, C., Stevenson, M. A., Lohmann, B., Al-Hagan, O., Madison, D. H. and Ning, C. G. (2009). (e, 2e) study of two-center interference effects in the ionization of N_2. *Physical Review A*, **80(6)**, 062704.

Hood, S. T., Weigold, E., McCarthy, I. E., and Teubner, P. J. O. (1973). Momentum Space Wave Functions and Binding Energies of the Valence Electrons in Methane measured by the (e, 2e) Technique. *Nature*, **245**, 65-68.

Hughes, A. L. and Klein, E. (1924). Ionization of Gases as a Function of the Energy of Electron Impacts. *Physical Review*, **23(4)**, 450.

Hughes, A. L., and McMillen, J. H. (1933). Electron Scattering in Methane, Acetylene and Ethylene. *Physical Review*, **44(11)**, 876.

Hussey, M. J. and Murray, A. J. (2002). Low energy (e, 2e) differential cross-section measurements on the $3\sigma_g$ and $1\pi_u$ molecular orbitals of N_2. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **35(16)**, 3399-3409.

Hussey, M. J., and Murray, A. J. (2005). Low energy (e, 2e) differential cross-section measurements on the 1πg and 4σg molecular orbitals of CO_2. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **38(16)**, 2965-77.

Hwang, W., Kim, Y. K., and Rudd M. E. (1997). New model for electron-impact ionization cross sections of molecules. *J. Chem. Phys.*, **104(8)**, 1026.

Iga, I., Lee, M. T., Homem, M. G. P., Machado, L. E., and Brescansin, L. M. (2000). Elastic cross sections for e^--CH_4 collisions at intermediate energies. *Physical Review A*, **61(2)**, 022708.

Imhof, R. E., Adams, A., and King, G. C. (1976). Energy and time resolution of the 180 degrees hemispherical electrostatic analyser. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **9(2)**, 138.

Jain, A. (1986). Total (elastic + absorption) cross sections for e-CH_4 collisions in a spherical model at 0.10–500 eV. *Physical Review A*, **34(5)**, 3707.

Jones, R. K. (1985). Absolute total cross section for the scattering of low energy electrons by methane. *The Journal of Chemical Physics*, **82**, 5424.

Jung, K., Schubert, E., Paul, D. A. L. and Ehrhardt, H. (1975). Angular correlation of outgoing electrons following ionization of H_2 and N_2 by electron impact. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **8(8)**, 1330-1337.

Kaiser, C., Spieker, D., Gao, J., Hussey, M., Murray, A., and Madison, D. H. (2007). Coplanar symmetric and asymmetric electron impact ionization studies from the $1b_1$ state of H_2O at low to intermediate impact energies. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **40(13)**, 2563-76.

Kanik, I., Trajmar, S., and Nickel, J. C. (1993). Total electron scattering and electronic state excitations cross sections for O_2, CO, and CH_4. *Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012)*, **98(E4)**, 7447-7460.

Kim, S. J. (1988). Infrared processes in the Jovian auroral zone. *Icarus*, **75(3)**, 399-408.

Kim, Y. K., Hwang, W., Weinberger, N. M., Ali M. A., and Rudd M. E. (1997). Electron-impact ionization cross sections of atmospheric molecules. *J. Chem. Phys.*, **106(3)**, 1026.

King, G.(2005).Experimental Collision Physics. In: QuAMP II Summer School Lecture Notes, Institute of Physics Atomic and Molecular Interactions Group, Milton Keynes, 36-40.

Kline, L. E., Partlow, W. D. and Bies, W. E. (1989). Electron and chemical kinetics in methane rf glow-discharge deposition plasmas. *Journal of Applied Physics*, **65(1)**, 70-78.

Lahmam-Bennani, A. (1991). Recent developments and new trends in (e, 2e) and (e, 3e) studies. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **24(10)**, 2401-2442.

Lahmam-Bennani, A., Naja, A., Casagrande, E. S., Okumus, N., Dal Cappello, C., Charpentier, I., and Houamer, S. (2009a). Dynamics of electron impact ionization of the outer and inner valence ($1t_2$ and $2a_1$) molecular orbitals of CH_4 at intermediate and large ion recoil momentum. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **42(16)**, 165201.

Lahmam-Bennani, A., Casagrande, E. S. and Naja, A. (2009b). Experimental investigation of the triple differential cross section for electron impact ionization of N_2 and CO_2 molecules at intermediate impact energy and large ion recoil momentum. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **42(23)**, 235205.

Lee, M. T., Iga, I., Machado, L. E., and Brescansin, L. M. (2000). Model absorption potential for electron-molecule scattering in the intermediate-energy range. *Physical Review A*, **62(6)**, 062710.

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

Lengsfield III, B. H., Rescigno, T. N., and McCurdy, C. W. (1991). Ab initio study of low-energy electron-methane scattering. *Physical Review A*, **44(7)**, 4296.

Lima, M. A., Gibson, T. L., Huo, W. M., and McKoy, V. (1985). Studies of electron–polyatomic-molecule collisions: Applications to e-CH_4. *Physical Review A*, **32(5)**, 2696.

Lino, J. L. (2009). Elastic electron scattering by CH_4 in the low-energy range. *Physica*

Scripta, **79(2)**, 025303.

Lohmann, B., and Buckman, S. J. (1986). Low-energy electron scattering from methane. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **19(16)**, 2565.

Machado, L. E., Lee, M. T., and Brescansin, L. M. (1998). Elastic Cross Sections for Low-Energy e^--CH_4 Collisions. *Brazilian Journal of Physics*, **28(2)**, 111-121.

Mahaffy, P. R. (2005). Intensive Titan exploration begins. Science, **308(5724)**, 969-970.

Mapstone, B., and Newell, W. R. (1992). Elastic differential electron scattering from CH_4, C_2H_4 and C_2H_6. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **25(2)**, 491.

March, N. H., Zecca, A., and Karwasz, G. P. (1994). Phenomenology and scaling of electron scattering cross sections from "almost spherical" molecules over a wide energy range. *Zeitschrift für Physik D Atoms, Molecules and Clusters*, **32(1)**, 93-100.

McCarthy, I. E. (1998). The development of electron momentum spectroscopy. *Australian Journal of Physics*, **51(4)**, 593-608.

McCarthy, I. E. and Weigold, E. (1988). Wavefunction mapping in collision experiments. *Reports on Progress in Physics*, **51(3)**, 299.

McNaughten, P., Thompson, D. G., and Jain, A. (1990). Low-energy electron-CH_4 collisions using exact exchange plus parameter-free polarisation potential. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **23(13)**, 2405S.

Milne-Brownlie, D. S., Cavanagh, S. J., Lohmann, B., Champion, C., Hervieux, P. A., and Hanssen, J. (2004). Dynamics in electron-impact ionization of H_2O. *Physical Review A*, **69(3)**, 032701-4.

Milne-Brownlie, D. S., Foster, M., Gao, J., Lohmann, B. and Madison, D. H. (2006). Young-Type Interference in (e, 2e) Ionization of H_2. *Physical Review Letters*, **96(23)**, 233201-4.

Mitsuda, Y., Kojima, Y., Yoshida, T. and Akashi, K. (1987). The growth of diamond in microwave plasma under low pressure. *Journal of Materials Science*, **22(5)**, 1557-1562.

Mohr, C. B. O., and Nicoll, F. H. (1932). The Large Angle Scattering of Electrons in Gases. II. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, **138(835)**, 469-478.

Möller, W. (1993). Plasma and surface modeling of the deposition of hydrogenated carbon films from low-pressure methane plasmas. *Applied Physics A*, **56(6)**, 527-546.

Murray, A. (2005). Experimental Collision Physics. In: QuAMP II Summer School Lecture Notes, Institute of Physics Atomic and Molecular Interactions Group, Milton Keynes, 41-53.

Murray, A. J., Hussey, M. J., Gao, J. and Madison, D. H. (2006). (e, 2e) ionization measurements from the $3\sigma_g$ and $2\sigma_u^*$ states of N_2—comparison between experiment and theoretical predictions of the effects of exchange, polarization and interference. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys*, **39**, 3945-3956.

Naja, A., Staicu-Casagrande, E. M., Lahmam-Bennani, A., Nekkab, M., Mezdari, F., Joulakian, B., Chuluunbaatar, O. and Madison, D. H. (2007). Triply differential (e, 2e) cross sections for ionization of the nitrogen molecule at large energy transfer. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **40(18)**, 3775-83.

Nestmann, B. M., Pfingst, K., and Peyerimhoff, S. D. (1994). R-matrix calculation for electron-methane scattering cross sections. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **27(11)**, 2297.

Nishimura, T., and Itikawa, Y. (1994). Elastic scattering of electrons by methane molecules. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **27(11)**, 2309.

Nixon, K. L., Murray, A. J., Al-Hagan, O., Madison, D. H., and Ning, C. (2010). Low-energy symmetric coplanar and symmetric non-coplanar (e, 2e) studies from the $3a_1$ state of H_2O. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **43(3)**, 035201.

Nixon, K. L., Murray, A. J., Chaluvadi, H., Amami, S., Madison, D. H., and Ning, C. (2012). Low energy (e, 2e) measurements of CH_4 and neon in the perpendicular

plane. *The Journal of Chemical Physics*, **136**, 094302.

Nixon, K. L., Murray, A. J., Chaluvadi, H., Ning, C., and Madison, D. H. (2011). Low energy (e, 2e) studies from CH_4: Results from symmetric coplanar experiments and molecular three-body distorted wave theory. *The Journal of Chemical Physics*, **134**, 174304.

Oda, N. (1975). Energy and angular distributions of electrons from atoms and molecules by electron impact. *Radiation Research*, **64(1)**, 80-95.

Okumuş, N., (2009). Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

Opal, C. B., Beaty, E. C., and Peterson, W. K. (1972). Tables of secondary-electron-production cross sections. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **4,** 209-253.

Orient, O. J., and Strivastava, S. K. (1987). Electron impact ionisation of H_2O, CO, CO_2 and CH_4. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **20(15)**, 3923.

Ortec, 1985. Principles and applications of timing spectroscopy. ORTEC Application Note, Oak Ridge.

Özer, Z. N. (2013). Doktora tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze.

Ozer, Z. N., Chaluvadi, H., Ulu, M., Dogan, M., Aktas, B. and Madison, D. (2013). Young's double-slit interference for quantum particles. *Physical Review A,* **87(4)**, 042704.

Pang, K. D., Ajello, J. M., Franklin, B., and Shemansky, D. E. (1987). Electron impact excitation cross section studies of methane and acetylene. *The Journal of Chemical Physics*, **86**, 2750.

Pozar, D. M. (2011). Microwave Engineering. John Wiley & Sons, 4. edition, USA.

Ramsauer, V. C., and Kollath, R. (1930). Über den Wirkungsquerschnitt der Nichtedelgasmoleküle gegenüber Elektronen unterhalb 1 Volt. *Annalen der Physik*, **396(1)**, 91-108.

Rapp, D., and Englander-Golden, P. (1965). Total cross sections for ionization and attachment in gases by electron impact. I. Positive ionization. *The Journal of Chemical Physics*, **43**, 1464.

Rescigno, T. N., Baertschy, M., Isaacs, W. A. and McCurdy, C. W. (1999). Collisional Breakup in a Quantum System of Three Charged Particles, *Science*, **286**, 2474-2479.

Rioual, S., Vien, G. N. and Pochat, A. (1996). Ionization in coplanar symmetric (e, 2e) experiments of N_2 and CO at intermediate energies. *Physical Review A*, **54(6)**, 4968.

Rohr, K. (1980). Cross beam experiment for the scattering of low-energy electrons from methane. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **13(24)**, 4897.

Romani, P. N. and Atreya, S. K. (1988). Methane photochemistry and haze production on Neptune. *Icarus*, **74(3)**, 424-445.

Rutherford, E. (1911). The Scattering of α and ß Particles by Matter and the Structure of the Atom. *Philosophical Magazine*, **21**, 669.

Sakae, T., Sumiyoshi, S., Murakami, E., Matsumoto, Y., Ishibashi, K., and Katase, A. (1989). Scattering of electrons by CH_4, CF_4 and SF_6 in the 75-700 eV range. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **22(9)**, 1385.

Schram, B. L., Van der Wiel, M. J., De Heer, F. J., and Moustafa, H. R. (1966). Absolute gross ionization cross sections for electrons (0.6–12 keV) in hydrocarbons. *The Journal of Chemical Physics*, **44**, 49.

Shyn, T. W. (1983). Doubly differential cross sections of secondary electrons ejected from gases by electron impact: 50-400 eV on N_2. *Physical Review A*, **27(5)**, 2388.

Shyn, T. W., and Cravens, T. E. (1990). Angular distribution of electrons elastically scattered from CH_4. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **23(2)**, 293.

Shyn, T. W., and Sharp, W. E. (1981). Angular distributions of electrons elastically scattered from H_2. *Physical Review A*, **24(4)**, 1734.

Shyn, T. W., Sharp, W. E., and Kim, Y. K. (1981). Doubly differential cross sections of secondary electrons ejected from gases by electron impact: 25-250 eV on H_2. *Physical Review A*, **24(1)**, 79.

Şişe, Ö. (2011). Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Sohn, W., Jung, K., and Ehrhardt, H. (1983). Threshold structures in the cross sections of low-energy electron scattering of methane. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **16(5)**, 891.

Sohn, W., Kochem, K. H., Scheuerlein, K. M., Jung, K., and Ehrhardt, H. (1986). Elastic electron scattering from CH_4 for collision energies between 0.2 and 5 eV. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **19(21)**, 3625.

Swain, M. R., Vasisht, G. and Tinetti, G. (2008). The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet. *Nature,* **452(7185)**, 329-331.

Takahashi, M. (2009). Looking at molecular orbitals in three-dimensional form: From dream to reality. *Bulletin of the Chemical Society of Japan,* **82(7)**, 751-777.

Tanaka, H., Kubo, M., Onodera, N., and Suzuki, A. (1983). Vibrational excitation of CH_4 by electron impact: 3-20 eV. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **16(15)**, 2861.

Tanaka, H., Okada, T., Boesten, L., Suzuki, T., Yamamoto, T., and Kubo, M. (1982). Differential cross sections for elastic scattering of electrons by CH_4 in the energy range of 3 to 20 eV. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **15(18)**, 3305.

Tanaka, H., Okada, T., Boesten, L., Suzuki, T., Yamamoto, T., and Kubo, M. (1982). Differential cross sections for elastic scattering of electrons by CH_4 in the energy range of 3 to 20 eV. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, **15(18)**, 3305.

Ulu, M. (2007). Doktora tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

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

U.S. NIM Committee, 1990. Standart NIM Instrumentation system. U.S. Department of Energy NIM Committee, Yayın no: DOE/ER-0457T, Washington.

Vuskovic, L., and Trajmar, S. (1983). Electron impact excitation of methane. *J. Chem. Phys.;(United States)*, **78(8)**, 4947.

Xu, S., Chaluvadi, H., Ren, X., Pflüger, T., Senftleben, A., Ning, C. G., ... and Dorn, A. (2012). Low energy (e, 2e) study from the $1t_2$ orbital of CH_4. *The Journal of Chemical Physics*, **137**, 024301.

Yang, J. and Doering, J. P. (2001). Asymmetric (e, 2e) study of the 100-eV ionization of the $1\pi_g$, $1\pi_u$, and $3\sigma_g$ molecular orbitals of O_2. *Physical Review A*, **63(3)**, 032717.

Zecca, A., Karwasz, G. P., and Brusa, R. S. (1992). Total-cross-section measurements for electron scattering by NH_3, SiH_4, and H_2S in the intermediate-energy range. *Physical Review A*, **45(5)**, 2777.

Zecca, A., Karwasz, G., Brusa, R. S., and Szmytkowski, C. (1991). Absolute total cross sections for electron scattering on CH_4 molecules in the 1-4000 eV energy range. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **24(11)**, 2747.

Zhang, P., Ma, X., Yan, S., Xu, S., Zhang, S. F., Zhu, X. L., ... and Liu, H. P. (2012). (e, 2e) processes on atomic targets (Ne, Ar) and molecular targets (CH_4, N_2, CO_2): Role of electron-nucleus scattering. *Physical Review A*, **86(1)**, 012712.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Murat YAVUZ

Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar 01.06.1983

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon/e-posta) : 0555 3965830 muratyavuz@live.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Kocatepe Anadolu Lisesi, 2001

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği, 2006

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fizik Bölümü, 2014

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Netaş Probil, 2008-2012

Yayınları (SCI ve diğer) :

Ulu, M., Ozer, Z. N., Yavuz, M., Zatsarinny, O., Bartschat, K., Dogan, M., & Crowe, A. (2013). Experimental and theoretical investigation of (e, 2e) ionization of Ar (3p) in asymmetric kinematics at 200 eV. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, *46*(11), 115204.

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*.