

**ELEKTRON SPEKTROMETRELERİ İÇİN
MANYETİK AÇI DEĞİŞTİRİCİ (MAC) AYGITIN
SİMÜLASYONU, DİZAYNI VE YAPIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HASAN CIRIK

DANIŞMAN

PROF. DR. MEVLÜT DOĞAN

FİZİK ANABİLİM DALI

TEMMUZ, 2011

Bu tez çalışması 109T738 numaralı TÜBİTAK projesi ve 10.FENED.03 numaralı AKÜ BAPK projesi ile desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRON SPEKTROMETRELERİ İÇİN
MANYETİK AÇI DEĞİŞTİRİCİ (MAC) AYGITIN
SİMÜLASYONU, DİZAYNI VE YAPIMI

HASAN CIRIK

DANIŞMAN

PROF. DR. MEVLÜT DOĞAN

FİZİK ANABİLİM DALI

TEMMUZ, 2011

TEZ ONAY SAYFASI

Hasan Cırık tarafından hazırlanan “**Elektron Spektrometreleri İçin Manyetik Açık Değiştirici (MAC) Aygıtın Simülasyonu, Dizaynı ve Yapımı**” 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: PROF. DR. MEVLÜT DOĞAN

Başkan

PROF. DR. HAMDİ ŞÜKÜR KILIÇ

İmza

Üye

PROF. DR. MEVLÜT DOĞAN

İmza

Üye

DOÇ. DR. MEHMET KARABACAK

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

...../...../..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Enstitü Müdürü

PROF. DR. MEVLÜT DOĞAN

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

28/07/2011

Hasan CIRIK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRON SPEKTROMETRELERİ İÇİN MANYETİK AÇI DEĞİŞTİRİCİ (MAC) AYGITIN SİMÜLASYONU, DİZAYNI VE YAPIMI

HASAN CIRIK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: PROF. DR. MEVLÜT DOĞAN

Atomik çarpışma deneyleri, atomik ve moleküler sistemlerin yapısını incelemek, biyolojik öneme sahip moleküllerin yapılarını belirlemek ve teorik modellerin doğruluklarını sınamak için temel önem taşımaktadır. Bu deneylerin yapılabilmesi için tasarlanan elektron spektrometrelerinde analizörlerin açısız konumları elektron tabancası ve Faraday Elektron Toplayıcı (FET) yüzünden sınırlıdır. Bu yüzden deneylerde genellikle açısız limit 45° - 135° ve 125° - 185° arasındadır. Bu çalışmada, Manyetik Açık Değişirici (MAC) aygıt ile üretilen düzgün bir manyetik alanla elektronların ölçülebilir açılara taşınması sağlanarak bu sorunun ortadan kaldırılması hedeflenmiştir.

MAC aygıtının elektron optiksel özellikleri yüklü parçacık optiğı simülasyon programı (CPO-3D) kullanılarak incelenmiş ve MAC aygıtı için mümkün olan en iyi geometri belirlenmiştir.

Dipol ve oktopol şartların birlikte sağlandığı iki veya üç solenoidli akım sistemlerinin oluşturduğu manyetik alanın radyal uzaklığa göre değişimleri incelenerek, saptırılan demetin radyal bir doğrultuya en erken ulaşma mesafeleri hesaplanmıştır.

MAC aygıtının saptırılan elektronlar üzerinde odaklama ve dağıtma etkisinin olduğu gözlenmiştir. MAC aygıtı tarafından saptırılan elektronların saptırma açıları

hesaplanarak MAC aygıtının elektron yörüngelerinde ek açısal dağılımlara ($\Delta\theta$) neden olduğu gösterilmiştir.

Elektron yörüngeleri üzerindeki odaklama ve dağıtma etkilerini incelemek için solenoidlere uygulanan akım değerlerine karşılık gelen büyütme oranları (γ) hesaplanmıştır. İdeal bir saptırma için gerekli olan γ parametresi, açısal çözünürlüğün iyileştirilmesi için mümkün olan en ideal MAC geometrisi ve solenoidlere uygulanacak en uygun akım çiftleri belirlenmiştir.

İmalat aşamasında ortaya çıkabilecek olası problemleri önceden tespit edebilmek amacıyla SolidWorks ve AutoCAD programlarında aygıtın 3-D modelleri oluşturulmuştur. MAC aygıtını oluşturan parçalar, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fizik Bölümünde bulunan Elektron Çarpışma Laboratuvarı'ndaki eCOL Malzeme İşleme Atölyesi'nde imal edilmiştir. Aygıt, montajı ve bakımı yapıldıktan sonra uygun deney şartları oluşturularak bir manyetometre cihazı ile test edilmiştir.

MAC aygıtı spektrometre içerisinde sürekli çalışması gerekeceğinden aşırı ısınma ihtimaline karşı maksimum akım değerleri uygulanarak aygıtın çalışma performansı test edilmiştir. MAC aygıtı, test işlemleri tamamlandıktan sonra çarpışma deneylerinde kullanılmak üzere elektron çarpışma deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

MAC aygıtının saptırma açısını belirlemek ve çalışma performansını test etmek amacıyla helyum atomunun kendiliğinden iyonlaşma rezonans düzeyleri için tesir kesiti ölçümleri alınmıştır. MAC kapalıyken 30° de alınan ölçümler ile MAC açıkken 48° de alınan ölçümlerin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu sayede 135° nin üzerindeki büyük açılarda MAC aygıtı ile ölçümler alınabilmektedir.

2011, xvii + 88 sayfa

Anahtar Kelimeler: Elektron-atom çarpışmaları, elektron spektrometresi, tesir kesiti, yüklü parçacık optiği, manyetik açı değiştirici aygıt (MAC), CPO-3D yüklü parçacık optiği simülasyon programı

ABSTRACT

M.Sc Thesis

DESIGN, SIMULATION AND CONSTRUCTION OF THE MAGNETIC ANGLE CHANGER (MAC) DEVICE FOR ELECTRON SPECTROMETERS

HASAN CIRIK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: PROF. DR. MEVLÜT DOĞAN

Atomic collision experiments are important to investigate the structure of atomic and molecular systems, which have biological importance, and to test the accuracy of theoretical models. Electron spectrometers that are designed to make these kinds of experiments have angular limitations caused by the electron gun and Faraday Cup (FC). So, in these experiments, the angular limit usually is between 45° - 135° and 125° - 185° . The aim of this work is to remove any angular limitation by moving electrons to measurable angles by generated uniform magnetic field using Magnetic Angle Changer (MAC).

Electron optical properties of MAC device are investigated using charged particle optics simulation program (CPO-3D) and the optimum geometry is determined for a MAC device.

By investigating magnetic fields generated by two or three solenoids systems that satisfy the dipole and octupole conditions as a function of radial distance, the positions that deflected beam has a radial direction are calculated.

It is found that MAC device has a focusing and dispersing effect on deflected electrons. Calculating deflection angles of the deflected electrons by MAC it is shown that MAC device causes further angular dispersion ($\Delta\theta$) in electron trajectories.

To evaluate the focusing and dispersion effects on electron trajectories, magnification ratios (γ) corresponding to the values of current that apply to solenoids are calculated. γ parameter for a ideal deflection is determined. To improve the angular resolution, the optimum MAC geometry and solenoids current pairs are determined.

To anticipate the production problems that can occur during manufacturing process, 3D modeling of the device is carried out using SolidWorks and AutoCAD programs. The components of MAC device are produced in the eCOL Workshop in Physics Department at Afyon Kocatepe University. After mounting and maintenance of the MAC device are finished, it is tested using a magnetometer.

Since the MAC device will work inside the spectrometer continuously and eventually overheating, the maximum current limit and its performance are tested. After these test measurements, the MAC device is installed in the electron collision experimental setup to use for collision experiments.

Cross section measurements for the helium autoionization resonance states were carried out in order to determine the deflection angle of the MAC device and to test the working performance of the system. It was found that the measurements taken at 30° with the MAC-ON case was in good agreement with that of taken at 48° with the MAC-OFF case. So, it is possible to take some measurements above 135° .

2011, xvii + 88 pages

Key Words: Electron-atom collisions, electron spectrometer, cross section, charged particle optics, the magnetic angle changer device (MAC), CPO-3D charged particle optics simulation programs

TEŞEKKÜR

Bilimsel desteğiyle ve akademik tecrübesiyle yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN'a, planlama ve proje aşamasında değerli görüşlerini aldığım Sayın Arş. Grv. Ömer ŞİŞE'ye, çalışmalarımın tüm aşamalarında desteklerini esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Melike ULU'ya ve Sayın Arş. Grv. Zehra Nur ÖZER'e, aygıtın teknik çizimlerinin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı Sayın Öğr. Grv. Ahmet DENİZ'e, simülasyon çalışmalarındaki katkılarından dolayı Sayın Arş. Grv. Nimet OKUMUŞ'a, aygıtın imalat aşamasındaki değerli katkıları için Sayın Bahadır BÜLBÜL'e, 109T738 no'lu yüksek lisans proje asistanlığı programı ile beni destekleyen TÜBİTAK kurumuna ve 10.FENED.03 numaralı proje ile beni destekleyen AKÜ BAPK Başkanlığı'na ve araştırmanın tüm aşamalarında desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

HASAN CIRIK
AFYONKARAHİSAR, 2011

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	2
3. MATERYAL ve METOT	35
3.1. MAC Aygıtının Kullanılacağı Deney Düzenegi	35
3.1.1. Vakum Sistemi	36
3.1.2. Elektron Tabancası	38
3.1.3. Elektron Enerji Analizörü.....	40
3.1.4. Faraday Elektron Toplayıcı (FET)	41
3.2. Lokalize Bir Manyetik Alanın Oluşturulması	42
3.3. Solenoid Çiftleri Manyetik Alanının Çok Kutuplu Açılımı	45
3.4. Saptırma Açısının Parametreleri.....	50
3.5. Saptırma Açısı ve Momentumun Korunumu.....	51
3.6. MAC Aygıtının Simülasyonu.....	56
4. BULGULAR	58
4.1 İki ve Üç Solenoidli Sistemlerde Manyetik Alan Şiddeti.....	58
4.2. Saptırılan Elektronların Yörüngelerinin Hesaplanması.....	62
4.3. MAC Aygıtının Odaklama ve Dağıtma Özellikleri.....	63
4.4. (e,2e) Deneylerinde MAC Aygıtının Kullanımı.....	69
4.5. MAC Aygıtlarının 3D Çizimleri.....	70
4.6. İmalat ve Test Çalışmaları	73
4.7. MAC Aygıtı İle Helyum Atomu İçin Diferansiyel Tesir Kesiti Ölçümü	76

5. TARTIŞMA ve SONUÇ	79
6. KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°	Derece
%	Yüzde
β	Saptırma açısının iş fonksiyonu ($A \cdot E^{-1/2}$)
Ar	Argon atomu
B	Manyetik alan
CH ₄	Metan gazı
CO	Karbon monoksit molekülü
E ₀	Gelen elektron enerjisi
eV	Elektron volt
G	Gauss, Manyetik alan birimi
He ⁺	Helyum (+) iyonu
H ₂ O	Su molekülü
Kr	Kripton atomu
L _{perp}	Açısal momentum parametresi
mT	Mili tesla, Manyetik alan birimi
μ	Manyetik geçirgenlik sabiti
N ₂	Azot molekülü
Ne	Neon atomu
O ₂	Oxygen (Oksijen molekülü)
R	Yarıçap
sr ⁻¹	Steradyan (Katı açı birimi)
Xe	Ksenon atomu

Kısaltmalar

CEM	Channel Electron Multiplier (Tek-Kanallı Elektron Çoğaltıcı)
CPO-3D	Charged Particle Optics Simulation Program (Yüklü Parçacık Optiği Simülasyon Programı)
DCSs	Scattering Differential Cross Sections (Saçılma Diferansiyel Tesir Kesiti)
FC	Faraday Cup (Faraday Elektron Toplayıcı)
FET	Faraday Elektron Toplayıcı (Faraday Cup)
HDA	Hemispherical Deflection Analyser (Yarı Küresel Enerji Analizörü)
MAC	Magnetic Angle Changer (Manyetik Açı Değiştirici)
SRS	Synchrotron Radiation Source (Sinkrotron Işıma Kaynağı)
SP	Splash Plate

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 MAC aygıtında kullanılan solenoidlerin yerleştirilmesi. (a) yan kesit görünüşü, (b) üst kesit görünüşü (Juarez 2002).	3
Şekil 2.2 MAC aygıtı ve Yarı Küresel Enerji Analizörü (HDA)' nün konumları. (a) Analizör gelen ışının polarizasyon eksenine göre 45° ye yerleştirilmiştir. (b) MAC aygıtının eksenine gelen demetin doğrultusuyla çakışmaktadır (Juarez 2002).	4
Şekil 2.3 Manyetik alanın radyal konuma göre değişimini göstermektedir (Juarez 2002).	5
Şekil 2.4 Gelen ve saçılan elektronların yörüngeleri. Döngüler iç ve dış solenoid çiftlerini temsil etmektedir. Seçilen manyetik alanın büyüklüğüne göre saçılan elektronlar için 95° de sapma meydana gelmektedir. Düşeydeki çizgi gönderilen elektron demetini, sağa, sola ve aşağıya sırasıyla 0°, 95° ve 180° saçılan elektron demetini göstermektedir (Zubek et al. 1996).	6
Şekil 2.5 Argon atomundan 10 eV enerjili elastik saçılan elektronlar için diferansiyel tesir kesiti ölçümleri. • 30–180° arasındaki sonuçları, — 20–180° de Fun et al. (1983) teorik sonuçları, □ 20–130° de Furst et al. (1989) deneysel sonuçları göstermektedir (Zubek et al. 1996).	7
Şekil 2.6 (a) Fotoelektron spektrometresinin şematik gösterimi. (b) Solenoidlerin kesit görünümü. Dipol momentin sıfır olduğu düzgün bir manyetik alan içindeki farklı enerjili elektronların izlediği yörüngeler gösterilmektedir (Cubric et al. 1997).	8
Şekil 2.7 27.6 eV foton enerjisinde, He ⁺ n=1 düzeyinin açısal dağılımlarının ölçümü. Boş (mavi) daireler analizörün mekanik olarak döndürülmesiyle elde edilen açısal tesir kesiti ölçümleridir. Dolu (kırmızı) daireler analizörün 45° de sabit tutulup MAC aygıtı ile elektronların saptırılarak elde edildiği ölçümlerdir. Bu sayede MAC aygıtının çalışma performansı test edilmiştir (Cubric et al. 1997).	9

Şekil 2.8 30, 40 ve 50 eV gelen elektron enerjilerinde Helyum atomunun 2^3S , 2^1S , 2^3P ve 2^1P düzeyleri için diferansiyel tesir kesiti ölçüm ve hesaplamaları (Cubric et al. 1999).	11
Şekil 2.9 (a) Hedef bölgede iki solenoid çifti ile spektrometrenin şematik görünümü. (b) Manyetik dipol momenti sıfır yapmak için solenoid sistemlerinin kesit görünümü (Cubric et al. 1999).	12
Şekil 2.10 a) Sarım sisteminin çeyrek kesiti. Gaz akış doğrultusu ve elektron demetinin yönü gösterilmektedir. b) Radyal uzaklığa bağlı manyetik alan grafiği (Cubric et al. 2000).	13
Şekil 2.11 Helyum enerji kayıp spektrumu. Gelen elektron enerjisi 120 eV dir. Elektron detektörü elektron tabancasına göre 90° ye konulmuştur. MAC aygıtı ile 0° ve 180° yi ölçmek için 90° lik saptırma uygulanmıştır. Düzeyleri ayırt etmek için monokromatör kullanılmıştır (Cubric et al. 2000).	14
Şekil 2.12 45 ve 55 eV de ölçülen açısall momentum parametresi (L_{perp}). MAC açıkken ve kapalıyken alınan ölçümler birbirleriyle tutarlıdır. Bu sayede 0° den 180° ye kadar tesir kesiti ölçümleri alınmıştır (Hussey et al. 2007).	15
Şekil 2.13 Kore grubu tarafından tasarlanan MAC aygıtı (Cho et al. 2003).	16
Şekil 2.14 Manyetik açı değıştirici aygıtın şematik çizimi ve aygıtın oluşturduğu manyetik alanın radyal uzaklığa göre değışimi. Gölgele alanlar μ -metal parçayı, küçük daireler sarımların kesitlerini göstermektedir (Cho et al. 2003).	17
Şekil 2.15 10 eV ve 15 eV de Kr atomundan elektron elastik saçılma diferansiyel tesir kesiti (Cho et al. 2003).	18
Şekil 2.16 50 eV enerjili elektronlar için saçılma boyunca elektron yörüngeleri. 0° de gönderilen elektron demeti 90° saptırılarak 270° de detekte edilmiştir. Deneyssel olarak iki FET kullanılmıştır. Biri tam 180° ye diğeri de 270° ye konulmuştur (Cho et al. 2003).	19
Şekil 2.17 Su molekülünden elastik elektron saçılması için mutlak diferansiyel tesir kesitleri (DCSs). 4 eV, 6 eV, 10 eV, 15 eV, 20 eV, 30 eV, 40 eV ve 50 eV de su molekülünden elde edilen elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri (Cho et al. 2004).	20
Şekil 2.17 (Devam) Su molekülünden elastik elektron saçılması için mutlak diferansiyel tesir kesitleri (DCSs). 4 eV, 6 eV, 10 eV, 15 eV, 20 eV, 30 eV, 40	

eV ve 50 eV de su molekülünden elde edilen elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri (Cho et al. 2004).....	21
Şekil 2.18 Polonya grubu tarafından tasarlanan MAC aygıtı a) Aygıtı oluşturan solenoidlerin sarım düzenlerinin gösterimi. b) MAC aygıtının geometrik ölçüleri (Mielewska et al. 2007).....	23
Şekil 2.19 CO ve N ₂ de gözlemlenen elastik elektron rezonans profilleri. Yatay eksen elektron enerjisini, dikey eksen ise rezonans profillerinin belirli bir background fonksiyonu üzerinden alınan farkını ifade etmektedir (Mielewska et al. 1999). ...	24
Şekil 2.20 (a) MAC aygıtının yerleştirildiği elektron spektrometresinin şematik görünümü. Gelen elektron demeti ile saçılan elektron 180° birbirlerinden ayrılmışlardır. (b) Manyetik alanın radyal konuma göre değişimi (Mielewska et al. 1999).....	25
Şekil 2.21 Çarpışma bölgesinde iç ve dış solenoidlerin yerleşimi. İç sarımın akımı 0.83 Amperdir. Oluşan manyetik alan 10 eV lik gelen ve saçılan elektronları birbirinden 180° saptırmaktadır (Linert et al. 2006).	26
Şekil 2.22 15 eV enerjisinde Ne atomu için ölçülen elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri (Linert et al. 2006).....	27
Şekil 2.23 Mac aygıtında 10 eV lik gelen ve elastik olarak farklı açılarda saçılan elektronların yörüngeleri. Bu şekil CPO-3D programı kullanılarak elde edilmiştir (Mielewska 2007).	28
Şekil 2.24 Ar ve Kr elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri (Mielewska 2007).	29
Şekil 2.25 H ₂ O ve O ₂ elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri (Mielewska 2007).	30
Şekil 2.26 CH ₄ elastik saçılma diferansiyel tesir kesiti (Mielewska 2007).	30
Şekil 2.27 Elektron çarpışmasıyla Argon 3p orbitali için ölçülen ve hesaplanan üçlü diferansiyel tesir kesiti. E ₀ =113.5 eV, saçılan elektron açısı -15° ve kopan elektron enerjisi 2 eV. İçi dolu daireler MAC yokken, içi boş olanlar MAC aygıtıyla alınan ölçümleri göstermektedir (Stevenson et al. 2007).	32
Şekil 2.28 Elektron çarpışmasıyla Argon 3p orbitali için ölçülen ve hesaplanan üçlü diferansiyel tesir kesiti, E ₀ = 113.5 eV, E _e = 5 eV, θ _s = -15° (Stevenson et al. 2008).	33

Şekil 2.29 a) MAC aygıtı kapalı durumda iken elektronların izlediği yörüngeler. b) MAC aygıtı açık durumda iken elektronların izlediği yörüngeler (Stevenson et al. 2008).....	34
Şekil 3.1 Vakum sisteminin şematik gösterimi (ölçekli değildir). Turbomoleküler Vakum Pompası (TMP) (1), Rotary pompa (2), Boşaltma sistemi bağlantı elemanları (3), TMP kontrol ünitesi (4), Hava kurutucu (5), Gaz iletim sistemi (6), Spektrometre parçalarının hareketinin çember dışından kontrolünü sağlayan hareket kolları (7), Spektrometre parçalarının hareketini sağlayan mekanik tabla (8), Elektron tabancası (9), Enerji analizörleri (10), Vakum çemberi (11), Faraday elektron toplayıcı iki boyutta çizim uygulandığından gösterilememiştir.....	37
Şekil 3.2 Elektron tabancasının mercek elemanlarının ve elektronik kontrol sisteminin şematik gösterimi.....	38
Şekil 3.3 Elektron tabancasının SolidWorks programında oluşturulan 3D görünümü. ..	39
Şekil 3.4 Elektron enerji analizörünün AutoCAD programında oluşturulan iki boyutlu (2D) görünümü. (a) Giriş lens optiği, (b) Yarıküresel deflektör, (c) (CEM) Elektron çoğaltıcı detektör.....	40
Şekil 3.5 Elektron tabancasında üretilen elektron demetinin Faraday elektron toplayıcı ile toplanması ve akım değerlerinin piko ampermetreler ile görüntülenmesi.....	41
Şekil 3.6 a) Coaxial (merkezsiz) dairesel akım döngüleri. b) Aynı a_1 ve a_2 değerlerine sahip coaxial solenoid çiftleri. Akımlar denklem (3.2)'de verilen koşulları sağlamaktadır. c) Aynı a_1 fakat farklı a_2 değerlerine sahip coaxial solenoid çiftleri. Akımlar denklem (3.3)'ü sağlayarak hem dipol hem de oktopol terimler sıfırlanmaktadır. $R_1=10$ mm, $R_2 = 12.5$ mm, $a_1 = 3$ mm, $a_2 = 7$ mm, $a_{21}=6.76$ mm ve $a_{22}= 9.00$ mm dir (Read and Channing 1996).	46
Şekil 3.7 Radyal uzaklığa göre manyetik alan şiddeti (Read and Channing 1996).	49
Şekil 3.8 a) Solenoidlerin merkezinde oluşan bir elektronun izlediği yörünge. Büyük uzaklıklarda, yörünge radyal olmaktadır. θ_T ise toplam sapıtma açısıdır (Read and Channing 1996). b) 0° ve 180° açılarda saçılan elektron yörüngelerinin gösterimi (Juarez 2002).....	50
Şekil 3.9 Sapıtma açısı (α_0)'nın β iş fonksiyonuna bağlı olarak değişimi.	55

Şekil 3.10 a) MAC aygıtı tarafından oluşturulan manyetik alanın demete etkisi. (a) Manyetik alan çizgilerinin yönelimi. (b) Manyetik vektör potansiyel çizgilerinin yönelimi.	56
Şekil 3.11 İki ve üç solenoidli sistemlerdeki 5-500 eV için sapıtma etkileri (Cırık ve ark. 2010).	57
Şekil 4.1 CPO-3D yüklü parçacık optiği simülasyon programı kullanılarak elde edilen iki ve üç solenoidli sistemler için uzaklığa bağlı manyetik alan şiddetinin değişimi grafiği.	59
Şekil 4.2 İki solenoidli sistemde, İç solenoid akımı $I_{ref}=0.5, 1, 1.5, 2$ ve 2.5 A için manyetik alan şiddetinin radyal uzaklığa göre değişimi ($I_2=-0.834 I_{ref}$).	60
Şekil 4.3 İç solenoid akımı $I_{ref}=0.5, 1, 1.5, 2$ ve 2.5 A için manyetik alan şiddetinin radyal uzaklığa göre değişimi ($I_2=0.7 I_{ref}$).	61
Şekil 4.4 $(-0.5,50,0)$, $(0,50,0)$, $(0.5,50,0)$ noktalarından MAC aygıtının merkezine doğru gönderilen 30 eV enerjili elektronların, aygıt tarafından sapıtıldıktan sonraki hesaplanan elektron yörüngeleri.	62
Şekil 4.5 MAC aygıtı tarafından sapıtılan 30 eV enerjili elektronların açısall dağılımları. Demet kalınlığı girişte 1 mm dir. Analizör, MAC aygıtının merkezinden 50 mm uzaklıkta bulunmaktadır.	63
Şekil 4.6 MAC aygıtı tarafından sapıtılan 30 eV enerjili elektronların açısall dağılımları.	64
Şekil 4.7 MAC aygıtı tarafından sapıtılan elektronların izlediği yörüngeler. Solenoidlere uygulanan akım değerleri sırasıyla $I_{ref}=1A$, $I_2=-0.534 A$ dir.	65
Şekil 4.8 Solenoidlere uygulanan akımlar, $I_2=-I_{ref}$ için ayırma etkisi, $I_2=+I_{ref}$ için odaklama etkisi sağlamaktadır. Solenoidlere uygulanan akım değerlerine karşılık gelen büyütme oranları (γ) hesaplanmıştır. Demet kalınlığı girişte 1 mm dir. İdeal sapıtma şartı $I_2=0.01I_{ref}$ için $\gamma = 0.845$ olarak belirlenmiştir.	67
Şekil 4.8 (Devam) Solenoidlere uygulanan akımlar, $I_2=-I_{ref}$ için ayırma etkisi, $I_2=+I_{ref}$ için odaklama etkisi sağlamaktadır. Solenoidlere uygulanan akım değerlerine karşılık gelen büyütme oranları (γ) hesaplanmıştır. Demet kalınlığı girişte 1 mm dir. İdeal sapıtma şartı $I_2=0.01I_{ref}$ için $\gamma = 0.845$ olarak belirlenmiştir.	68

Şekil 4.9 MAC aygıtı tarafından saptırılan 30 eV, 200 eV ve 250 eV enerjili elektronların saptırma açıları. Analizörler, MAC aygıtının merkezinden 50 mm uzaklıkta bulunmaktadır.....	69
Şekil 4.10 MAC aygıtlarının SolidWorks programında oluşturulan 3D modelleri. (a) İki solenoidli MAC aygıtı. (b) Üç solenoidli MAC aygıtı.	70
Şekil 4.11 MAC aygıtlarının SolidWorks programında çizilmiş parçaları. (a) İki solenoidli MAC aygıtı. (b) Üç solenoidli MAC aygıtı.	71
Şekil 4.12 Parçalar birbirinin içine sıfır geçme olacak şekilde tasarlanmıştır.	72
Şekil 4.13 MAC aygıtlarının kesit görünüşleri. (a) İki solenoidli MAC aygıtı. (b) Üç solenoidli MAC aygıtı.....	72
Şekil 4.14 MAC kapalıyken ve açıkken alınan tesir kesiti ölçümleri. İçi dolu (siyah) daireler MAC kapalıyken, çizgiler (kırmızı) MAC açıkken alınan ölçümleri göstermektedir. MAC OFF durumunda analizör 30° dir. MAC ON durumunda ise analizör 48° ye alınmıştır. Solenoidlere uygulanan akım değerleri $I_{ref}=0.24$ ve $I_2=-0.2$ A dir.	77
Şekil 4.15 Analizör 135° de iken, solenoidlere uygulanan farklı akım çiftleri için alınan tesir kesiti ölçümleri. MACOFF: MAC kapalıyken, MACON-1 (0.12A, -0.10A), MACON-2 (0.24A, -0.2A), MACON-3 (0.36A, -0.30A) MAC açıkken alınan ölçümleri göstermektedir.	78

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Manchester grubu tarafından tasarlanan MAC aygıtı (Juarez 2002).	2
Resim 2.2 Avustralya grubu (e,2e) deney düzeneği (Stevenson and Lohmann 2007). .	31
Resim 3.1 MAC'ın yerleştirileceği elektron-atom/molekül çarpışma deney düzeneğinin fotoğrafı.....	35
Resim 3.2 Elektron spektrometresinin genel fotoğrafı.	36
Resim 3.3 Yedi elemanlı lens sisteminden oluşan elektron tabancasının fotoğrafı.....	39
Resim 4.1 (a) MAC aygıtının imalat aşamasından bir görünüm. (b) Silindir şeklindeki pirinç malzemenin tornada işlenmesi.....	73
Resim 4.2 (a) MAC aygıtını oluşturan parçalar. (b) Solenoidlerin görünümü.	73
Resim 4.3 (a) İç solenoidin hazırlanışı. (b) MAC aygıtının tamamlanmış hali.	74
Resim 4.4 MAC aygıtına uygulanan kararlılık testleri aşamasından bir görünüm.	74
Resim 4.5 MAC aygıtının elektron spektrometresine yerleştirilmesi.	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Bir solenoid çiftinde oktopol terimi sıfırlayan a_1/R ve a_2/R değerleri (Read and Channing 1996).	48
Çizelge 3.2 Seçilmiş ρ/R_1 değerlerine karşı $B_z(\rho)/B_z(0)$ manyetik alan şiddet değerleri (Read and Channing 1996).	49
Çizelge 3.3 İki solenoidli bir MAC aygıtı tarafından saptırılan 30 eV enerjili elektronların hesaplanan saptırma açıları ($I_2 = -0.834 I_{\text{ref}}$).	54
Çizelge 4.1 İki ve üç solenoidli sistemler için uzaklığa bağlı manyetik alan şiddetinin değişimi.	58
Çizelge 4.2 30 eV enerjili elektronların saptırma açıları.	64

1. GİRİŞ

Manyetik açı değıştirici (MAC), elektron spektrometrelerinde çarpışma sonucu saçılan ve koparılan elektronların detekte edilmesinin fiziksel olarak mümkün olmadığı konumlarda açısal dağılımlarının ölçülmesi için kullanılan bir ağıttır. Elektron-atom/molekül çarpışma deney düzeneğinde detektörün yerleştiremediğı açılarda saçılan elektronlar bir lokal manyetik alan tarafından detekte edilebilecek başka açılara doğru saptırılır ve böylece elektron deteksiyonu gerçekleştirilmiş olur. Özellikle MAC ağıtıyla daha önceden ölçüm alınamayan konumlarda yapılan deneylerde teorik yaklaşımlarla elde edilen tesir kesitlerinde önemli farklılıklar görülmüştür. Bu alışmada, MAC ağıtının elektron optiksel özellikleri, yüklü parçacık optiğı simülasyon programı (CPO-3D) kullanılarak incelenmiştir. MAC ağıtı için, ideal geometri belirlenerek Afyon Kocatepe Üniversitesi Fizik Bölümünde bulunan Elektron arpışma (eCOL) Laboratuvarındaki Malzeme İşleme Atölyesinde imal edilerek elektron spektrometresine yerleştirilmiş ve test ölçümleri yapılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

MAC aygıtı ilk olarak Read ve Channing (1996) tarafından Manchester Üniversitesi'nde geliştirilmiştir. Manchester grubu, tasarladıkları MAC aygıtı tarafından üretilen manyetik alan ile çarpışma bölgesinde oluşan elektronları, belirlenen bir açıya saptırmışlardır. Bu tekniği ilk olarak 1996'da Argon atomu için elastik saçılma tesir kesiti ölçümlerine uygulamışlardır (Read and Channing 1996). 1997'de Helyum atomunun uyarılma enerji düzeylerini ve 1999'da Xe atomu için elektronların açısall dağılımlarını ölçmüşlerdir (Cubric *et al.* 1997, 1999). 2000 yılında Helyum enerji kayıp spektrumunu (Cubric *et al.* 2000), 2007'de de Kalsiyum atomunun elektron etkisi ile uyarılma olayını incelemişlerdir (Hussey *et al.* 2007).

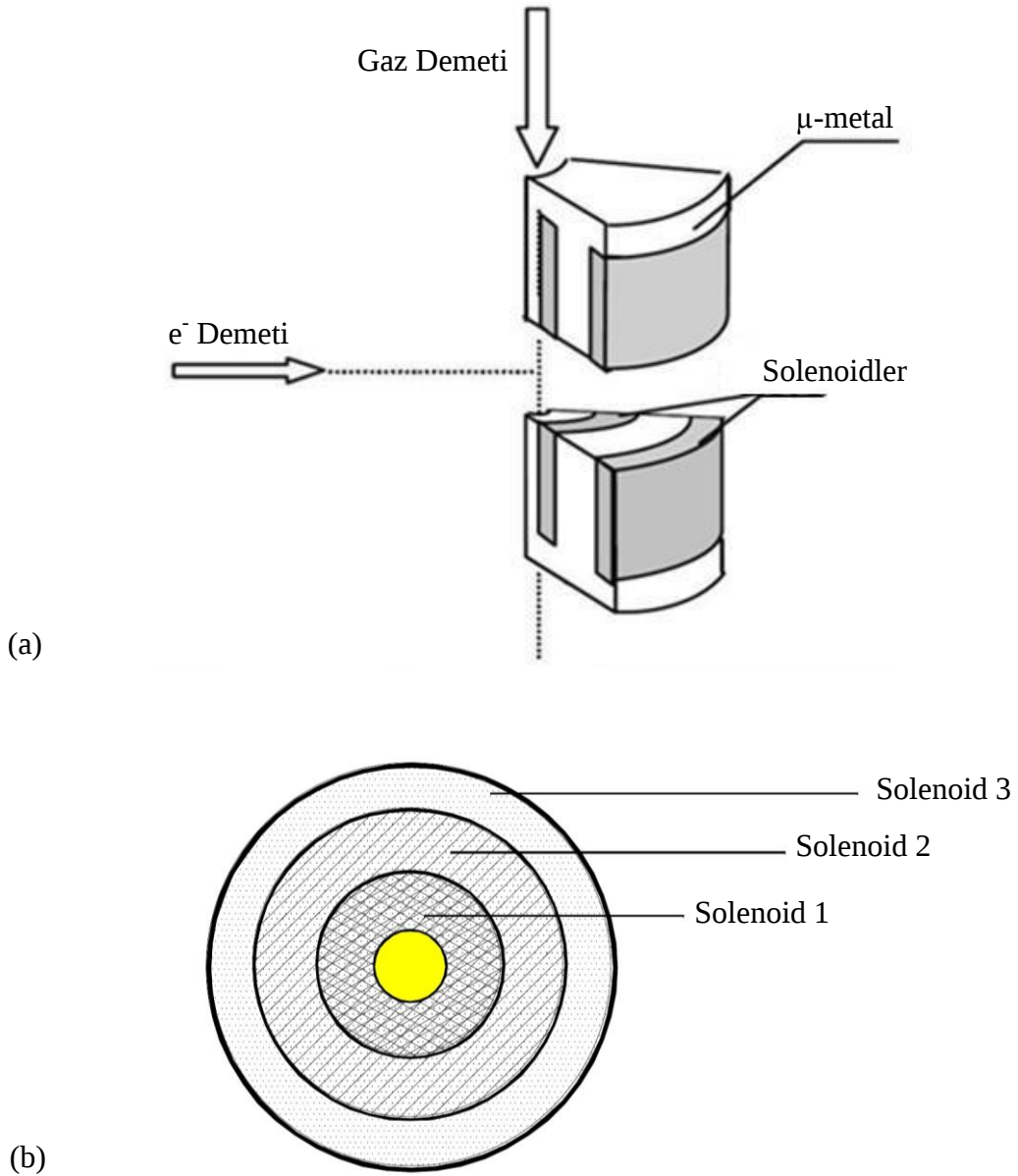


Resim 2.1 Manchester grubu tarafından tasarlanan MAC aygıtı (Juarez 2002).

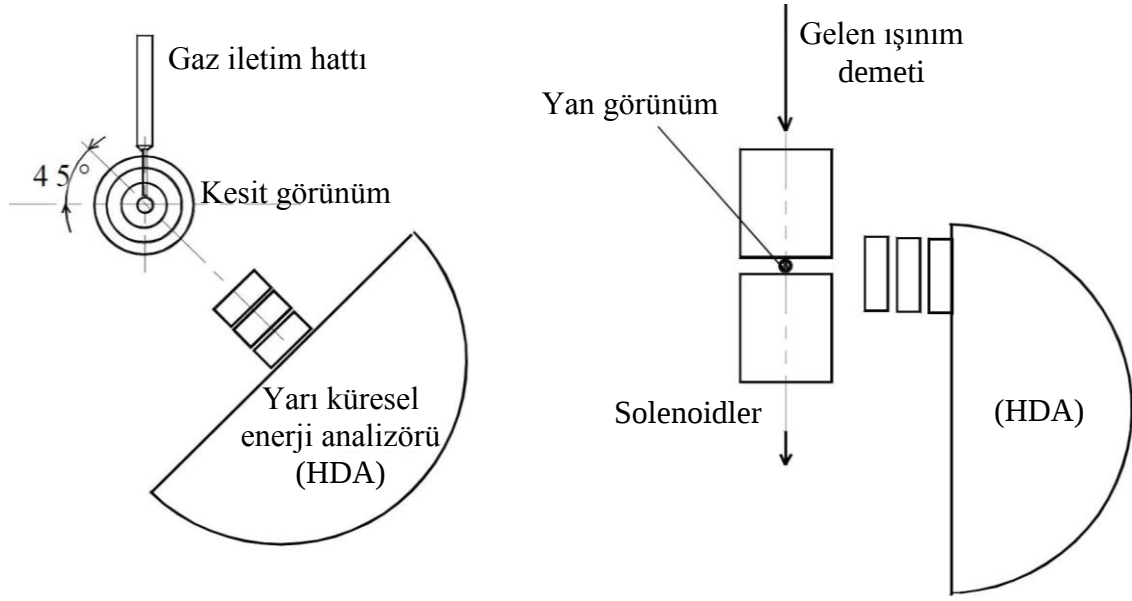
Manchester grubu tarafından tasarlanan MAC aygıtı üç parça solenoidden oluşmaktadır (Resim 2.1). Solenoidler iç içe geçirilmiş, silindirik geometride ve solenoid çiftleri birbirlerinden 5 mm uzaklıkla ayrılmışlardır (Şekil 2.1). Solenoidlerin ekseni demetin

geliş doğrultusu boyuncadır. Yarıküresel enerji analizörünün ve gaz demetinin pozisyonları Şekil 2.2’de gösterilmiştir (Juarez 2002).

Gaz demeti bir ince boru vasıtasıyla solenoidler arasındaki 5 mm aralıktan çarpışma bölgesine taşınmaktadır.



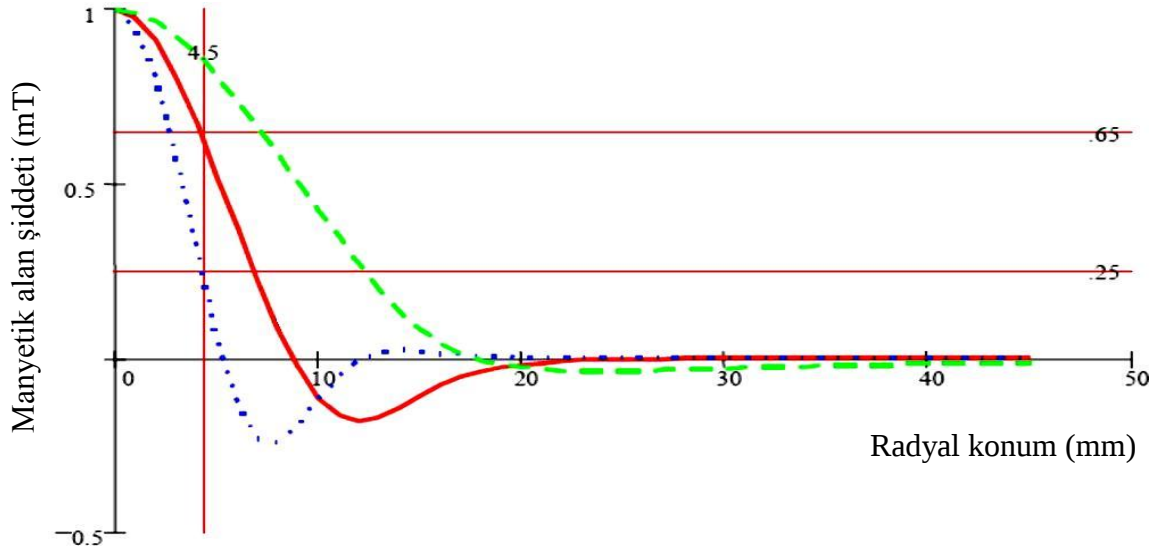
Şekil 2.1 MAC aygıtında kullanılan solenoidlerin yerleştirilmesi. (a) yan kesit görünüşü, (b) üst kesit görünüşü (Juarez 2002).



Şekil 2.2 MAC aygıtı ve Yarı Küresel Enerji Analizörü (HDA)' nün konumları. (a) Analizör gelen ışınının polarizasyon eksenine göre 45° ye yerleştirilmiştir. (b) MAC aygıtının eksenine gelen demetin doğrultusuyla çakışmaktadır (Juarez 2002).

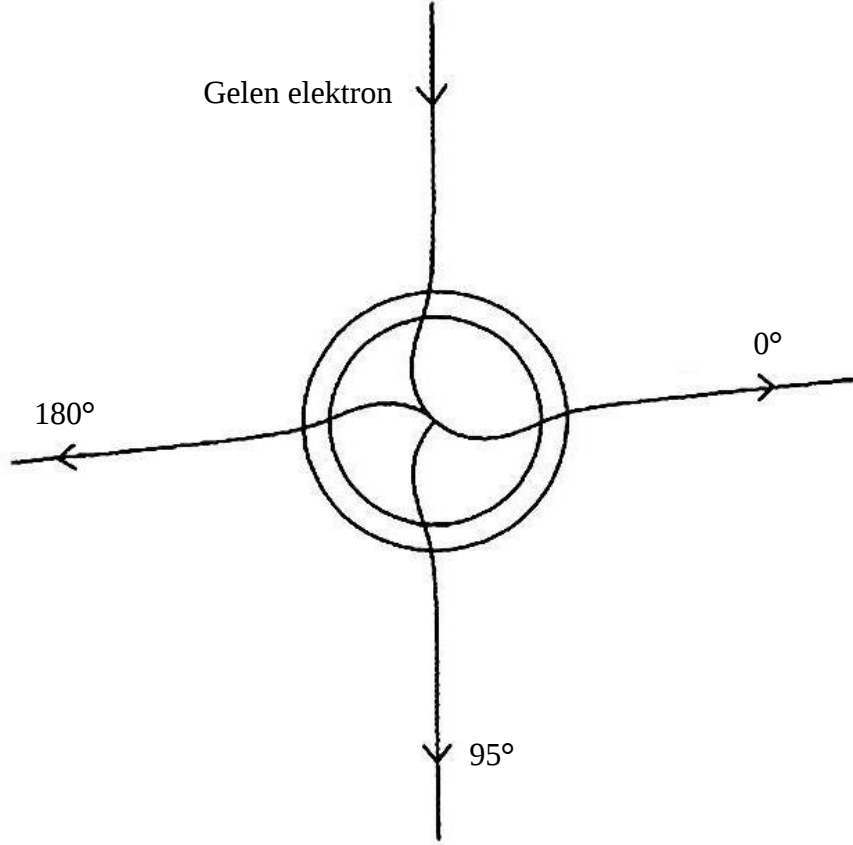
Çarpışma bölgesinde oluşan elektronlar MAC aygıtı tarafından üretilen manyetik alan ile daha önceden belirlenmiş bir açıya saptırılırlar. MAC aygıtının önemli bir özelliği, saptırılan elektronlar etkileşme bölgesinden uzakta bir radyal doğrultuya yönlendirilebilmektedir.

Solenoidlerin merkezinden uzaklaştıkça manyetik alan şiddetinin değişimi Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Bu şekilde manyetik momentlerin radyal konuma göre karşılaştırılması verilmiştir. Tüm manyetik momentlerin sıfırdan farklı olduğu durum kesikli çizgi ile, dipol momentin sıfır oktopol momentin sıfırdan farklı olduğu durum çizgi ile, hem dipol hem de oktopol momentin sıfır olduğu durum ise nokta ile gösterilmiştir. Bu iki durum tüm çok kutuplu momentlerin hesaba katıldığı normal alan durumu için de karşılaştırılmıştır. Dipol alanının şiddeti, eksenden 4.5 mm uzaklıkta, sonlu çok kutuplu momentlerden oluşan alanın şiddetine göre %80 dir.



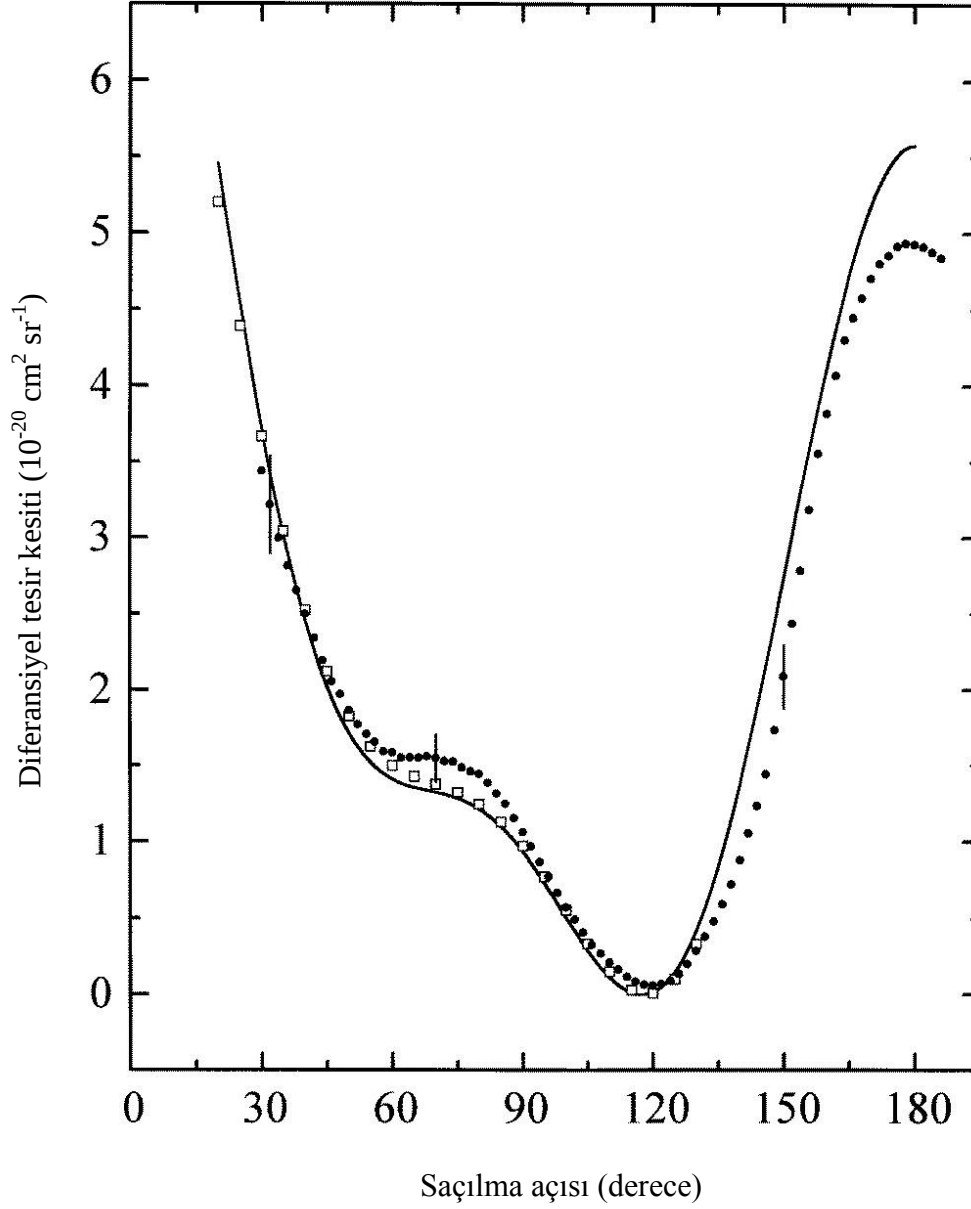
Şekil 2.3 Manyetik alanın radyal konuma göre değişimini göstermektedir (Juarez 2002).

Zubek ve ark. (1996), 180° ye kadar olan geri saçılma bölgelerinde elastik saçılan elektronların ölçülmesi için yeni bir deneysel yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem elektron spektrometresinin etkileşim bölgesine lokalize bir manyetik alan uygulanarak elde edilmiştir (Şekil 2.4).



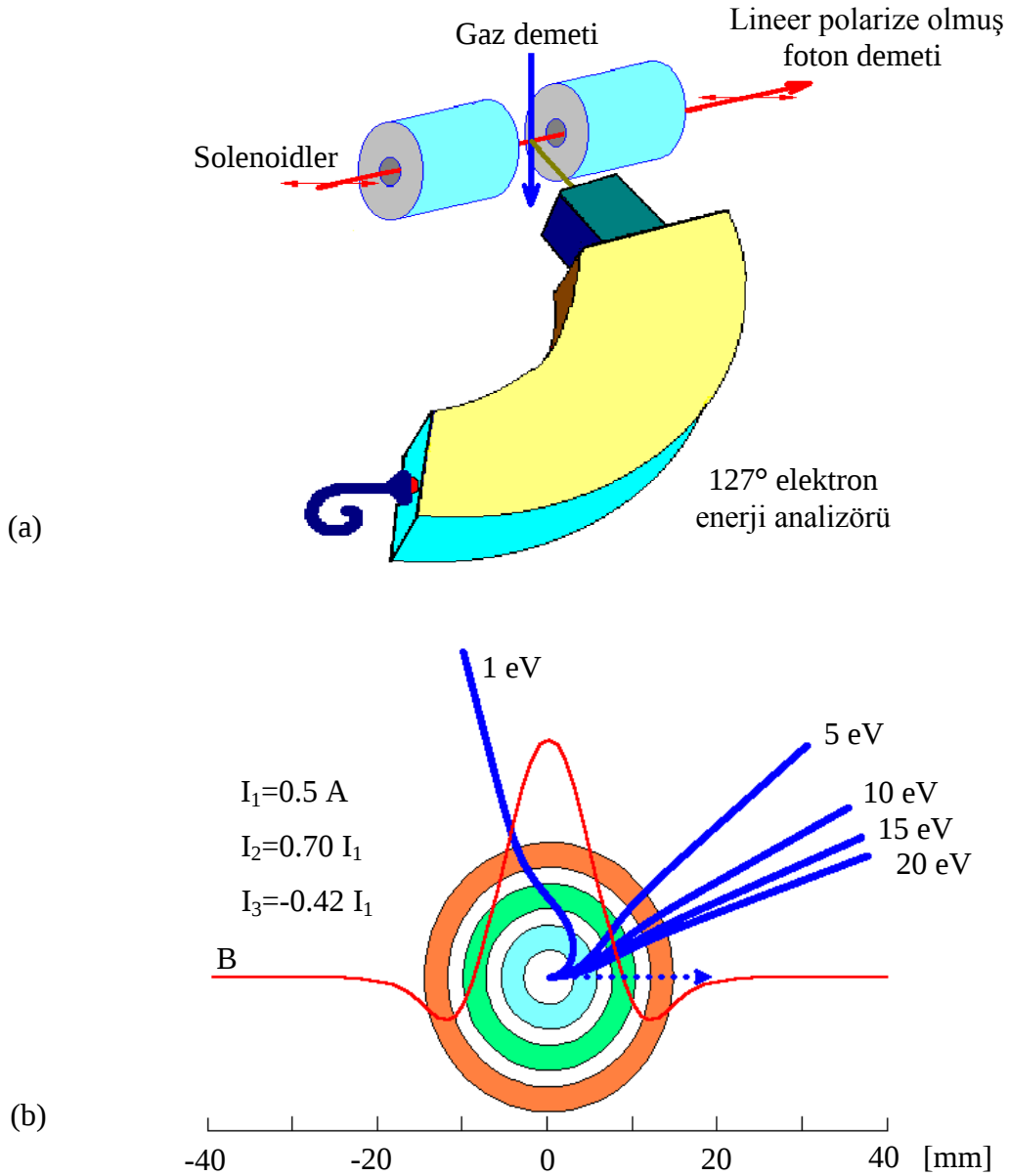
Şekil 2.4 Gelen ve saçılan elektronların yörüngeleri. Döngüler iç ve dış solenoid çiftlerini temsil etmektedir. Seçilen manyetik alanın büyüklüğüne göre saçılan elektronlar için 95° de sapma meydana gelmektedir. Düşeydeki çizgi gönderilen elektron demetini, sağa, sola ve aşağıya sırasıyla 0° , 95° ve 180° saçılan elektron demetini göstermektedir (Zubek et al. 1996).

Şekil 2.5'te Argon atomundan 10 eV enerjili elastik saçılan elektronlar için 30–180° de $2P_{3/2;1/2}$ rezonans düzeyleri için diferansiyel tesir kesiti ölçümleri verilmiştir.

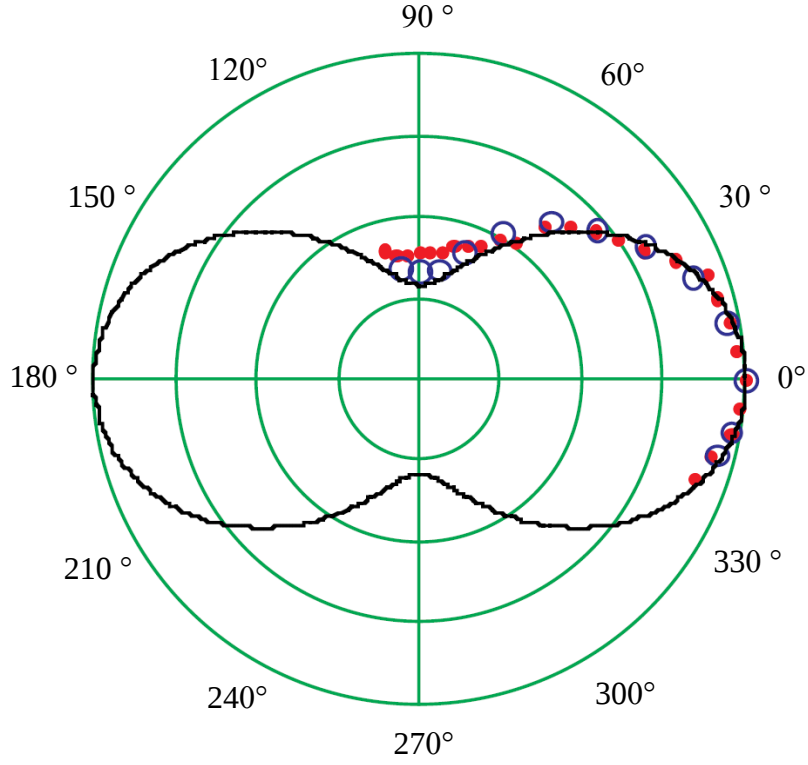


Şekil 2.5 Argon atomundan 10 eV enerjili elastik saçılan elektronlar için diferansiyel tesir kesiti ölçümleri. ● 30–180° arasındaki sonuçları, — 20–180° de Fun *et al.* (1983) teorik sonuçları, □ 20–130° de Furst *et al.* (1989) deneysel sonuçları göstermektedir (Zubek *et al.* 1996).

Cubric ve ark. (1997), Xe atomunun $5s^25p^6 \rightarrow 5s5p^6np$ rezonans düzeylerinin açısall dağılımlarını 20 ve 24 eV enerji aralığında Daresbury SRS parçacık hızlandırıcısını kullanarak çalışmışlardır (Şekil 2.6). Yeni manyetik açı değıştirici tekniği ilk kez fotoiyonlaştırmaya ölçümlerine uygulanmıştır. Bu teknik elektron spektrometresinin hareket etmeksizin açısall ölçüm yapmasına izin vermektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.6 (a) Fotoelektron spektrometresinin şematik gösterimi. (b) Solenoidlerin kesit görünümü. Dipol momentin sıfır olduğu düzgün bir manyetik alan içindeki farklı enerjili elektronların izlediği yörüngeler gösterilmektedir (Cubric *et al.* 1997).

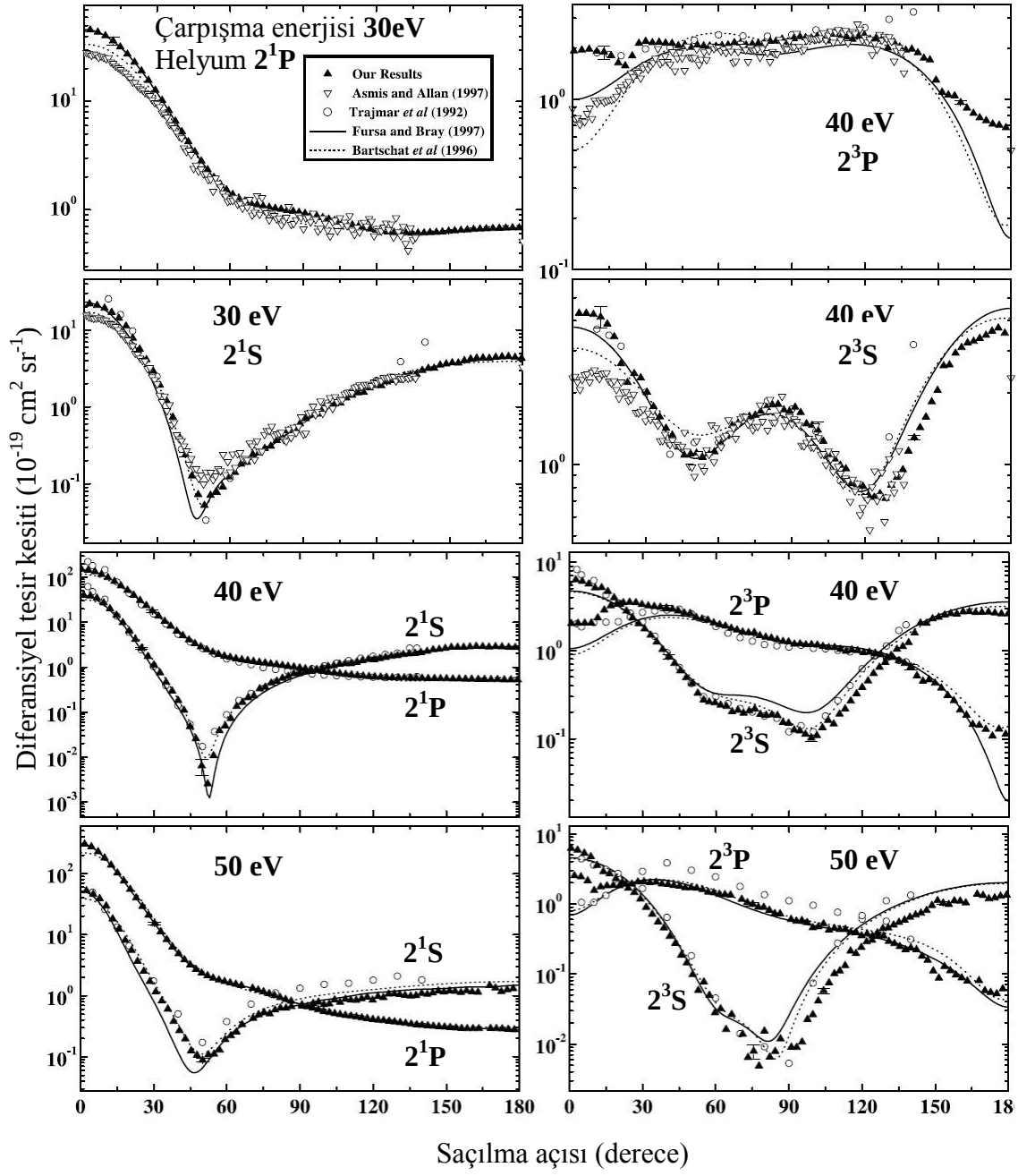


Şekil 2.7 27.6 eV foton enerjisinde, He^+ $n=1$ düzeyinin açısal dağılımlarının ölçümü. Boş (mavi) daireler analizörün mekanik olarak döndürülmesiyle elde edilen açısal tesir kesiti ölçümleridir. Dolu (kırmızı) daireler analizörün 45° de sabit tutulup MAC aygıtı ile elektronların saptırılarak elde edildiği ölçümlerdir. Bu sayede MAC aygıtının çalışma performansı test edilmiştir (Cubric *et al.* 1997).

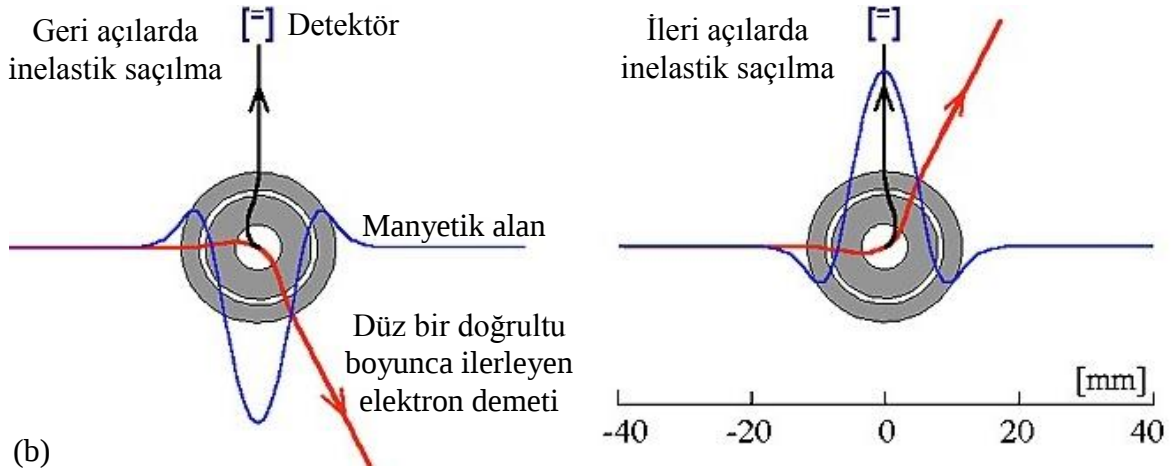
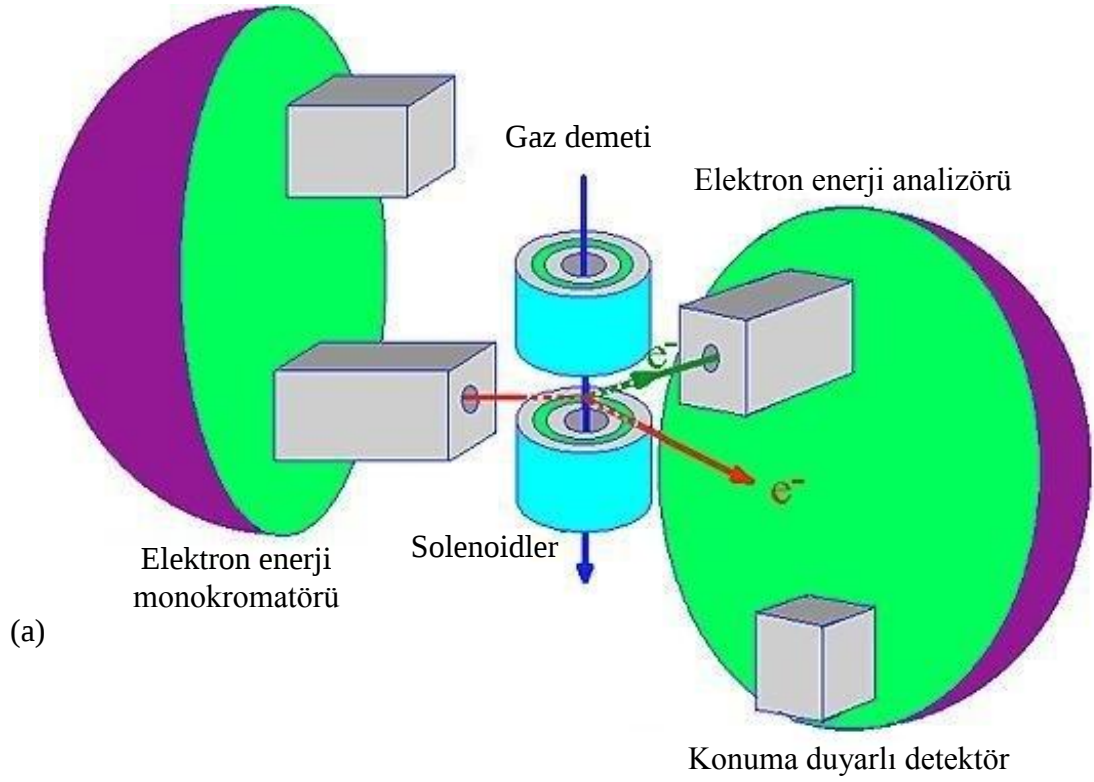
Şekil 2.7’de He^+ $n=1$ düzeyi için 27.6 eV foton enerjisinde alınmış açıya göre tesir kesiti ölçümleri verilmiştir. İçi boş daireler analizörün standart şekilde kullanılmasıyla alınmış ölçümlerdir. Bu ölçümler alınırken analizörlerin açısal konumları değiştirilmiştir. İçi dolu daireler ise analizörün 45° de sabit tutulduğu ve elektronların manyetik açı değiştirici ile saptırılarak analizöre taşındığı durumu göstermektedir. Görüldüğü gibi iki farklı metotla alınan ölçümler birbirleriyle uyum içerisindedir. Bazı açılarda küçük farklılıklar gözlenmektedir. Bunlar elektron optiği elemanlarından kaynaklanmaktadır (Cubric *et al.* 1997).

Cubric ve ark. (1999), Helyum atomunun ilk dört uyarılma enerji düzeylerinin 30 eV, 40 eV ve 50 eV enerjili elektronlarla uyarma olayı için diferansiyel tesir kesiti ölçümleri yapmışlardır (Şekil 2.8). Yeni (manyetik açı değiştirici) teknik 0° den 180° ye bütün açısal dağılımları ölçmek için kullanılmıştır (Şekil 2.9). Önceden deneysel yöntemle erişilemeyen açılarda teori ve deneyler arasında önemli farklılıklar görülmüştür (Şekil 2.8).

Şekil 2.8’de ölçülen diferansiyel tesir kesitleri gösterilmiştir. Deneysel olarak, ölçülen değerler, CCC teorisiyle karşılaştırılmıştır. Deneyle teori arasında tüm düzeyler için diferansiyel tesir kesitlerinde iyi bir uyum gözlenmiştir. Fakat bazı açı değerlerinde MAC aygıtı ile ölçülen sonuçlar teori ile uyuşmamaktadır. 2^1S düzeyine ait tesir kesitlerin, 45° ve 55° arası bir minimum göstermektedir. 30 ve 50 eV civarında ise R-matrix teorisi ile bazı sonuçlar uyuşmamaktadır. MAC aygıtı kullanılarak tüm açı değerlerinde tesir kesiti ölçümlerinin yapılması bu düzeylerin teorik karşılaştırmalarında önemli bir rol oynamaktadır (Cubric *et al.* 1999).

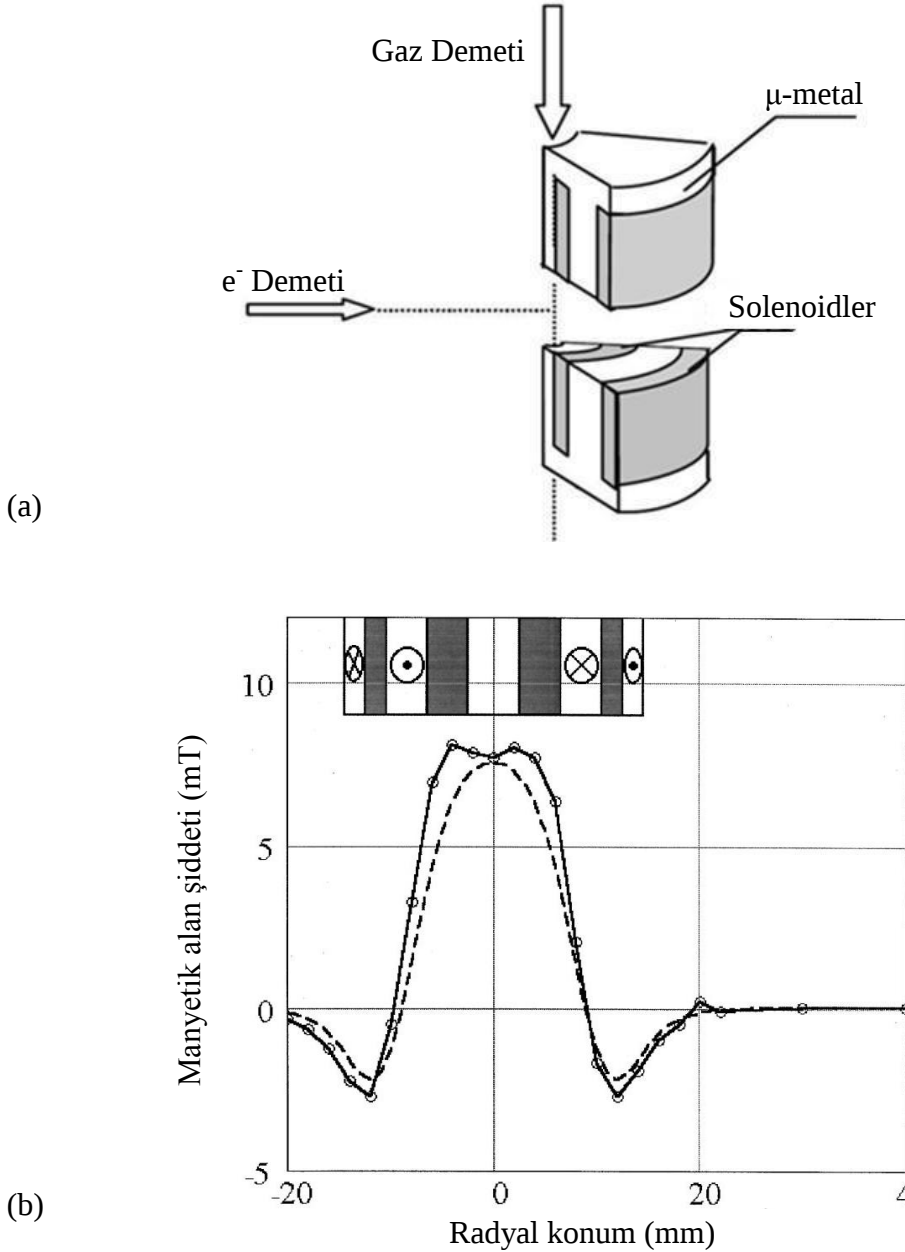


Şekil 2.8 30, 40 ve 50 eV gelen elektron enerjilerinde Helyum atomunun 2^3S , 2^1S , 2^3P ve 2^1P düzeyleri için diferansiyel tesir kesiti ölçüm ve hesaplamaları (Cubric *et al.* 1999).

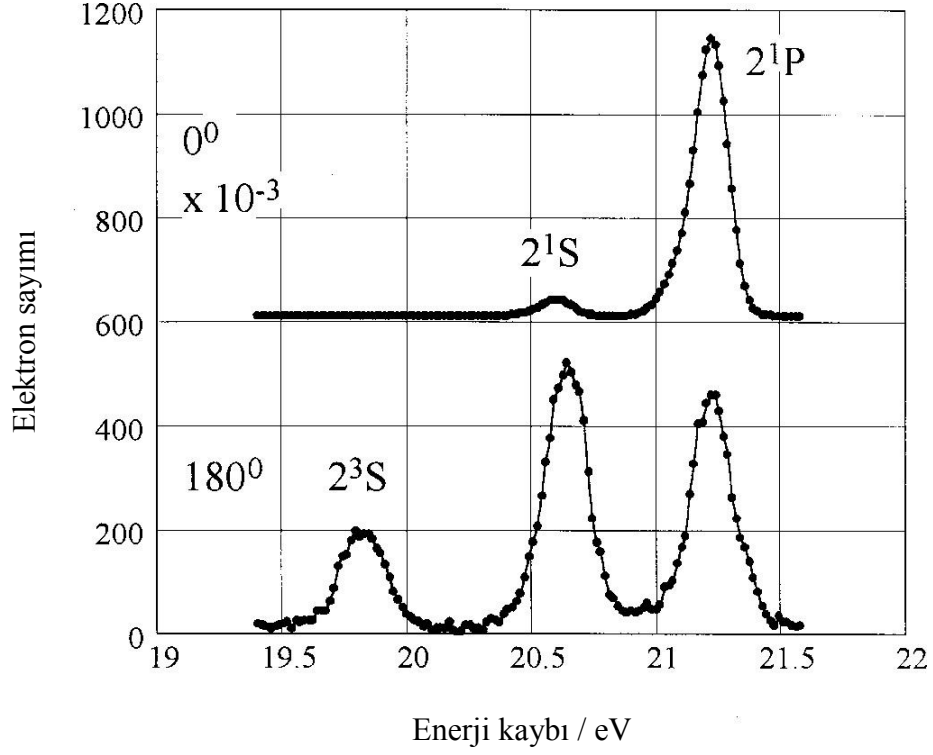


Şekil 2.9 (a) Hedef bölgede iki solenoid çifti ile spektrometrenin şematik görünümü. (b) Manyetik dipol momenti sıfır yapmak için solenoid sistemlerinin kesit görünümü (Cubric *et al.* 1999).

Cubric ve ark. (2000), yeni bir sarım sistemi olan manyetik açı değıştirici tekniğini yüksek enerjilerde kullanmıştır. Bu sistem lokalize manyetik alanı muhafaza edebilen mu-metal kılıf üzerine sarılan sarımlardan meydana gelmektedir (Şekil 2.10). Bu sistem Helyum enerji kayıp spektrumu üzerinde uyarlanmış ve Şekil 2.11’ deki gibi MAC 90° ye ayarlıyken spektrumu alınmıştır.

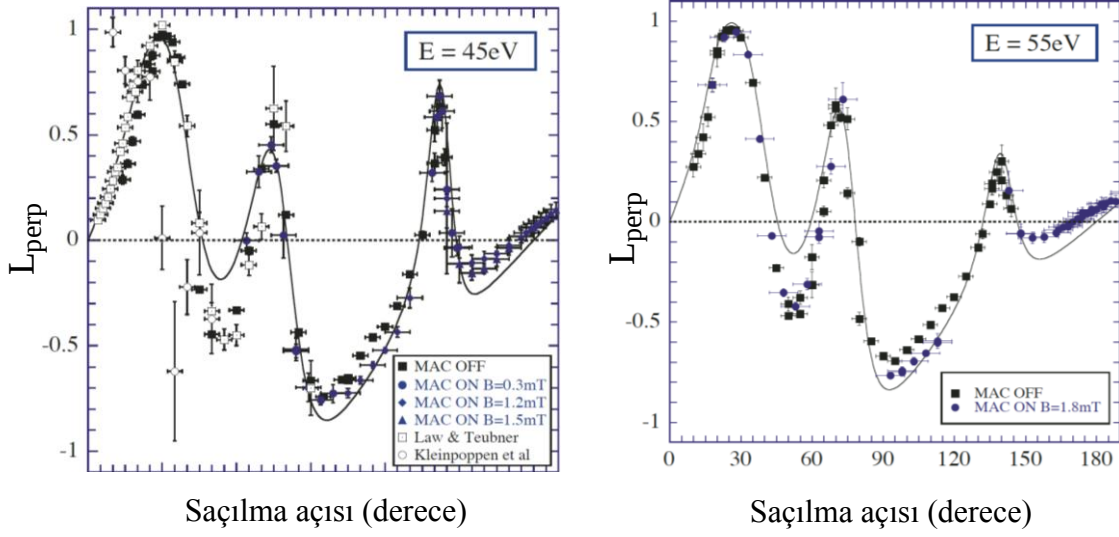


Şekil 2.10 a) Sarım sisteminin çeyrek kesiti. Gaz akış doğrultusu ve elektron demetinin yönü gösterilmektedir. b) Radyal uzaklığa bağlı manyetik alan grafiğı (Cubric *et al.* 2000).



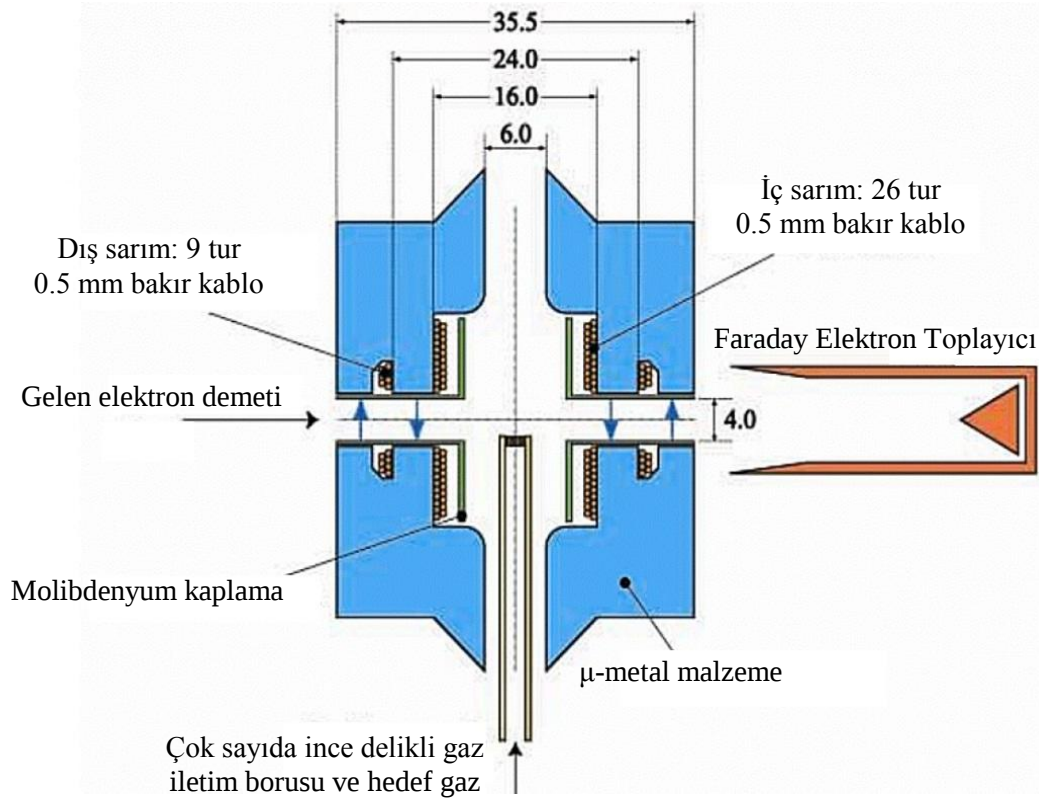
Şekil 2.11 Helyum enerji kayıp spektrumu. Gelen elektron enerjisi 120 eV dir. Elektron detektörü elektron tabancasına göre 90° ye konulmuştur. MAC aygıtı ile 0° ve 180° yi ölçmek için 90° lik sapıtma uygulanmıştır. Düzeyleri ayırt etmek için monokromatör kullanılmıştır (Cubric *et al.* 2000).

Hussey ve ark. (2007), kalsiyum atomunun elektron etkisiyle 4^1P_1 düzeyine uyarılması için 0° den 180° ye kadar diferansiyel tesir kesiti ölçümleri yapmışlardır (Şekil 2.12). Lazerle uyarılmış atomlardan saçılan süper elastik elektronları saptırmak için MAC aygıtı kullanılarak ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2.12 45 ve 55 eV de ölçülen açisal momentum parametresi (L_{perp}). MAC açıkken ve kapalıyken alınan ölçümler birbirleriyle tutarlıdır. Bu sayede 0° den 180° ye kadar tesir kesiti ölçümleri alınmıştır (Hussey *et al.* 2007).

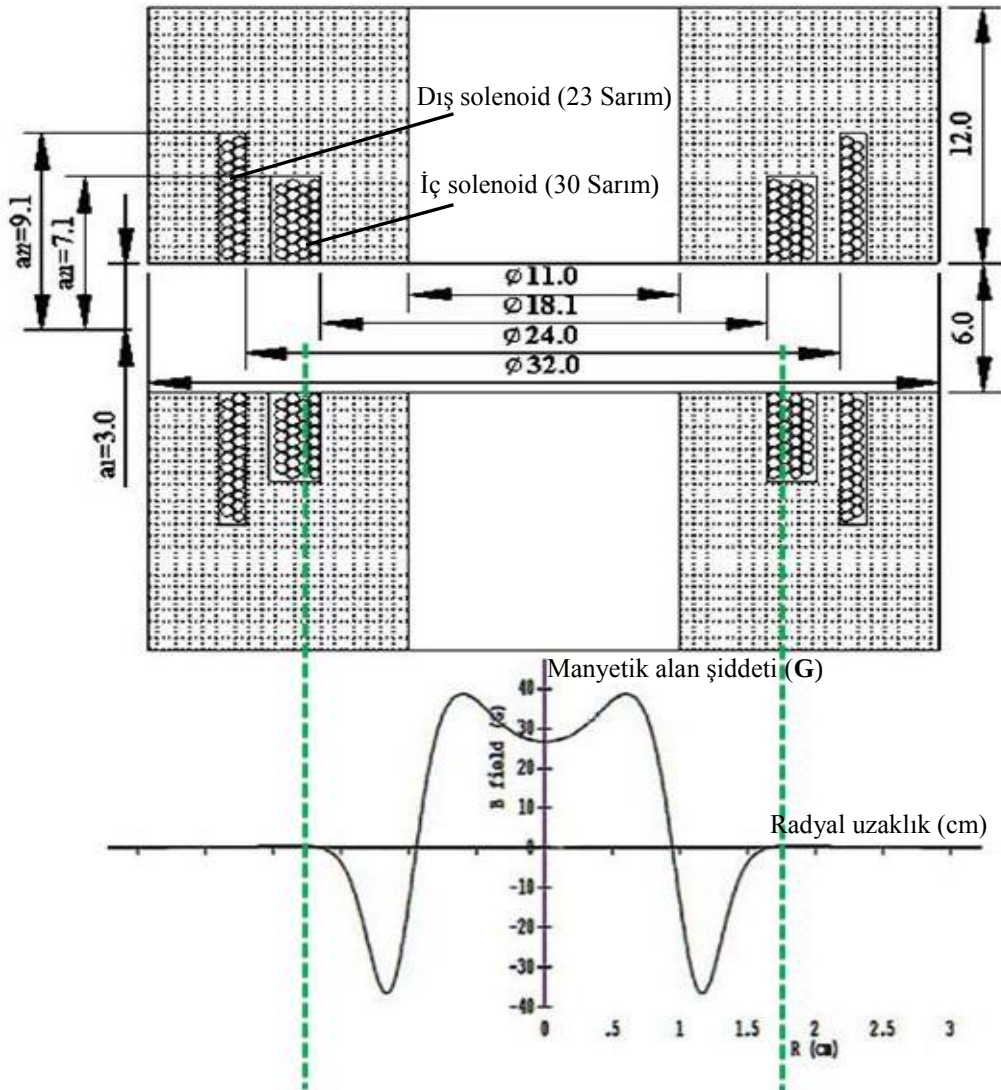
Cho ve ark. (2003a), tasarladıkları iki solenoid çiftinden oluşan MAC aygıtını Kr atomu için elastik saçılma tesir kesiti ölçümlerine uygulamışlar ve bununla birlikte yeni bir elektron spektrometresi tasarlamışlardır (Şekil 2.13).



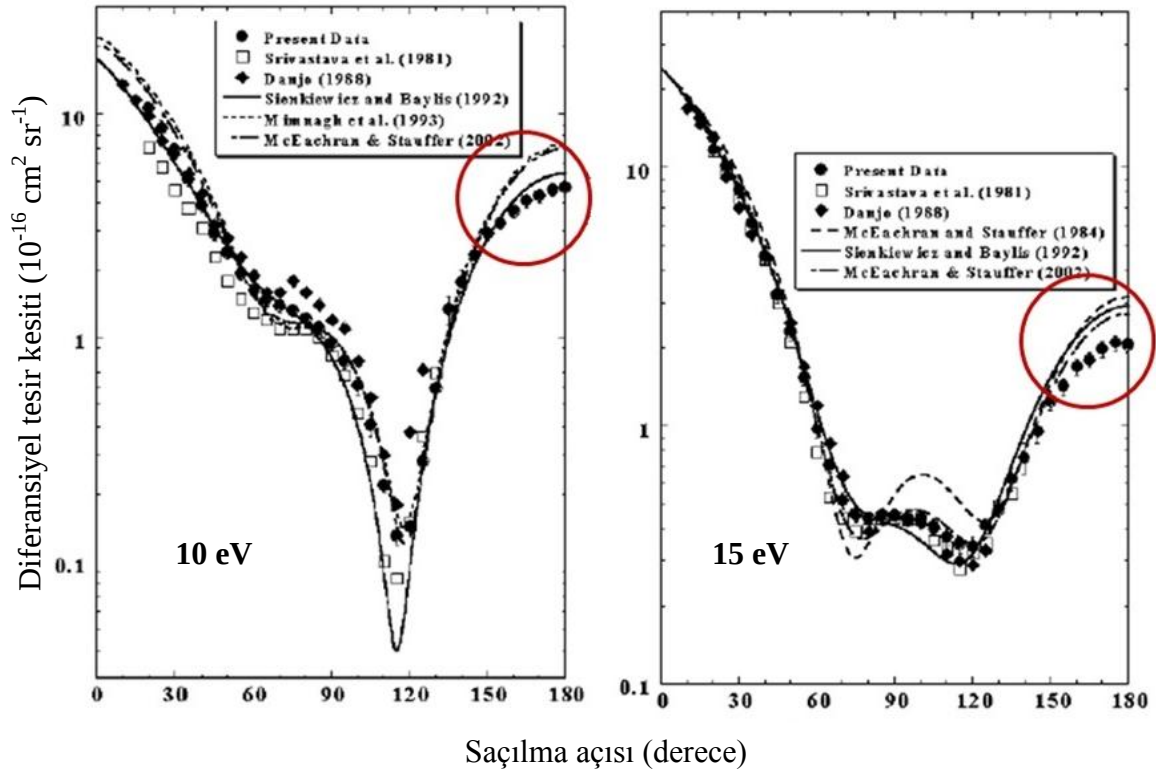
Şekil 2.13 Kore grubu tarafından tasarlanan MAC aygıtı (Cho et al. 2003a).

180° ye kadar geri açılarda elektron saçılma tesir kesitlerini ölçmek için manyetik açı değiştirici aygıt ile beraber bir elektron spektrometresi geliştirilmiştir. Manyetik açı değiştirici aygıt, sistemin ilk dört manyetik multipol momentlerinin aygıtın merkezinden uzaklaştıkça sıfırlayacak şekilde tasarlanmıştır. Aynı zamanda saçılma bölgesinde manyetik alanı daha iyi kontrol etmek için μ -metal malzeme kullanılmıştır. Su buharından elektronların elastik saçılma tesir kesitlerinin ölçümü, elektron spektrometresinin tüm kullanım kapasitesini ve MAC aygıtının performansını göstermek için örnek olarak verilmiştir. Özellikle uyarma tesir kesiti ölçümlerinde monokromatörün kullanılması gerekir. Bu, birbirine yakın enerji düzeylerini ayırt etmek açısından önemlidir.

Cho ve ark. (2003a), 10 eV ve 15 eV gelen elektron enerjisinde Kr atomundan elektron elastik saçılma tesir kesitini ölçmüşlerdir. Şekil 2.14'te geometrik ölçüleri verilen iki solenoid çiftinden oluşan manyetik açı değiştirici aygıtını kullanarak ölçümlemlerini 180° kadar yaymışlardır. Bunun sonucunda teorik çalışmalarla bu bölgede farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 2.15). Deneyde kullanılan aygıtın iç solenoidi 30, dış solenoidi 27 sarımdan oluşmaktadır. Solenoidlerde 0.50 mm çaplı bobin teli kullanılmıştır. İçi boş daireler sarım sayılarını, gölgeli alanlar ise μ -metal malzemeyi göstermektedir.



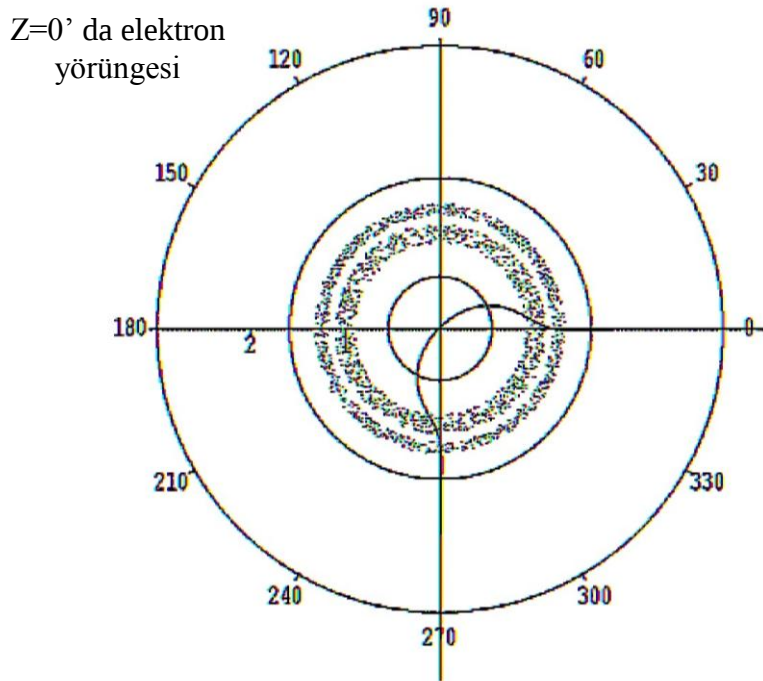
Şekil 2.14 Manyetik açı değiştirici aygıtın şematik çizimi ve aygıtın oluşturduğu manyetik alanın radyal uzaklığa göre değişimi. Gölge alanlar μ -metal parçayı, küçük daireler sarımların kesitlerini göstermektedir (Cho et al. 2003c).



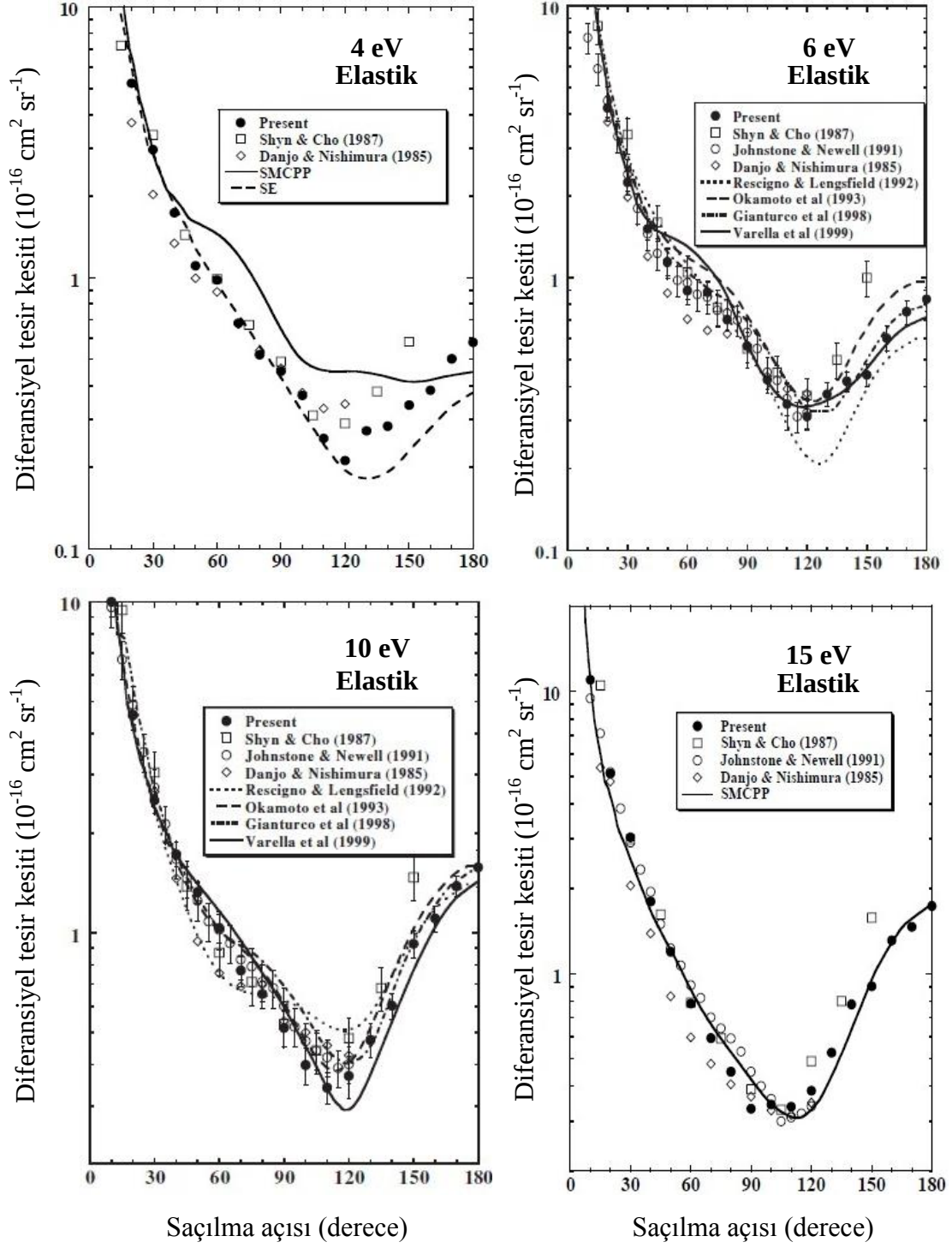
Şekil 2.15 10 eV ve 15 eV de Kr atomundan elektron elastik saçılma diferansiyel tesir kesiti (Cho *et al.* 2003a).

Cho ve ark. (2003c), tasarladıkları MAC aygıtının çalışma performansını test etmek için 0° den gönderilen 50 eV enerjili elektronları 90° saptırarak 270° de detekte etmişlerdir (Şekil 2.16). 4 ile 50 eV enerji değerleri arasında, su buharı molekülünden elastik elektron saçılması için mutlak diferansiyel tesir kesitlerini (DCSs) 10° – 180° derece saçılma açılarında ölçmüşlerdir. Manyetik açı değiştirici aygıtı kullanarak 125° – 180° geri saçılma açılarında ölçümler almışlardır. Elastik integral ve momentum transferi tesir kesitleri, elastik diferansiyel tesir kesitinden (DCSs) türetilmiştir (Şekil 2.17).

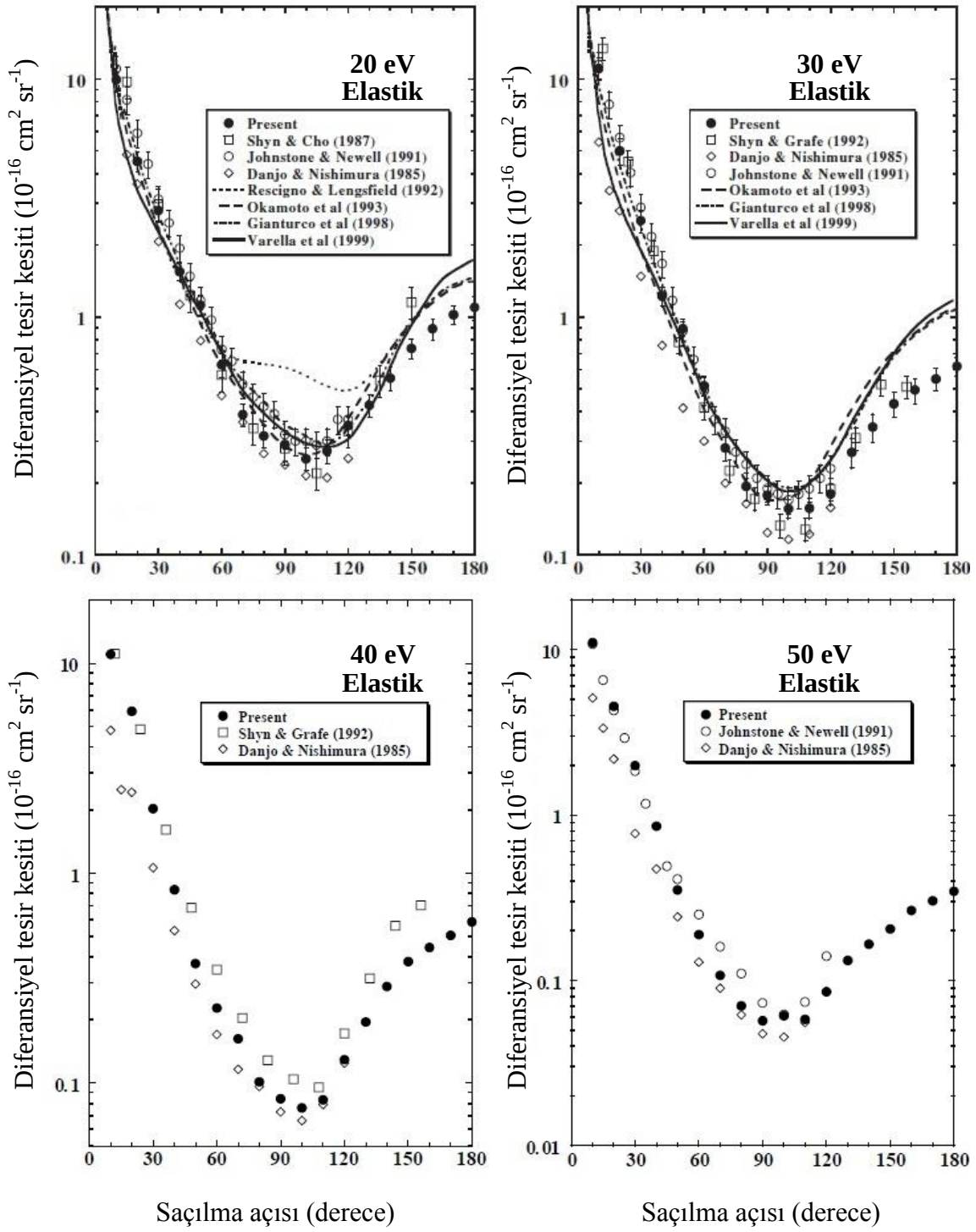
Cho ve ark. (2004), MAC aygıtını kullanarak 120° – 180° geri saçılma açılarında ölçümler almışlardır. 156° ye kadar olan geri saçılma açılarında daha önceden yaptıkları deneysel sonuçları ile şimdiki deneysel sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu gözlenmektedir.



Şekil 2.16 50 eV enerjili elektronlar için saçılma boyunca elektron yörüngeleri. 0° de gönderilen elektron demeti 90° saptırılarak 270° de detekte edilmiştir. Deneysel olarak iki FET kullanılmıştır. Biri tam 180° ye diğeri de 270° ye konulmuştur (Cho et al. 2003c).



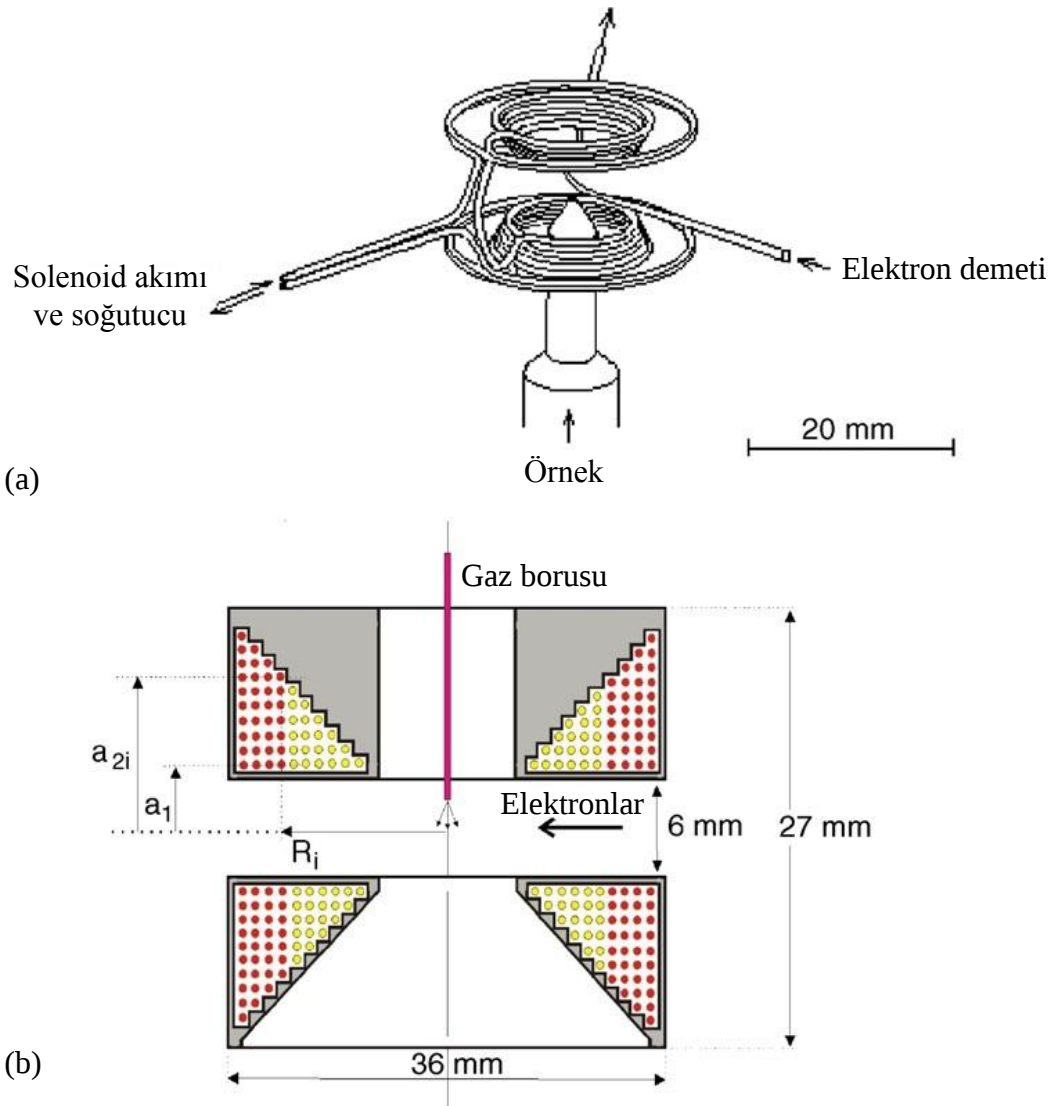
Şekil 2.17 Su molekülünden elastik elektron saçılması için mutlak diferansiyel tesir kesitleri (DCSs). 4 eV, 6 eV, 10 eV, 15 eV, 20 eV, 30 eV, 40 eV ve 50 eV de su molekülünden elde edilen elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri (Cho *et al.* 2004).



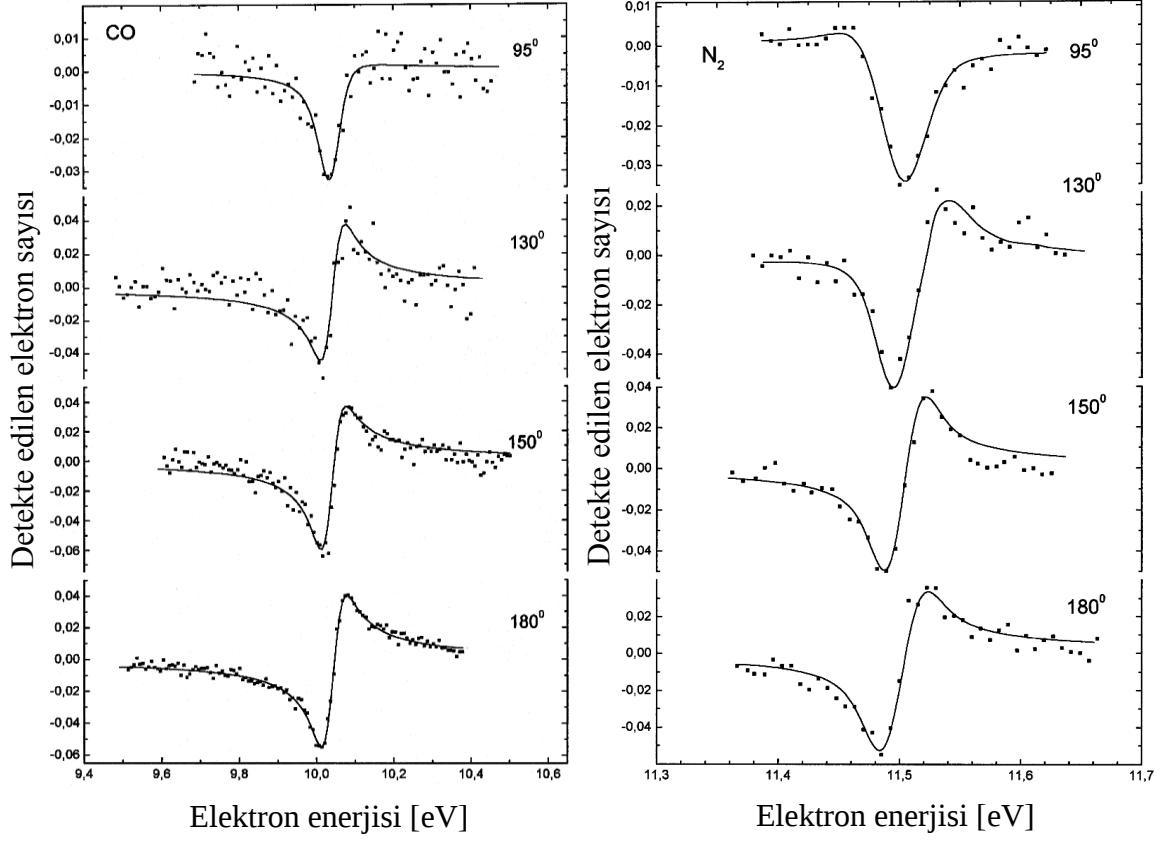
Şekil 2.17 (Devam) Su molekülünden elastik elektron saçılması için mutlak diferansiyel tesir kesitleri (DCSs). 4 eV, 6 eV, 10 eV, 15 eV, 20 eV, 30 eV, 40 eV ve 50 eV de su molekülünden elde edilen elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri (Cho *et al.* 2004).

120° nin üstünde diğer ölçümlerle ve aynı zamanda teorik yaklaşımlarla da bu bölgede bazı farklılıklar gözlemlenmiştir. 6 eV için alınan sonuçlarda 120° ye kadar iyi bir uyum gözlemlenirken, daha büyük açılarda Danjo ve Nishimura (1985) tarafından ölçülen sonuçlar, alınan ölçümlerden farklı olarak yüksek tesir kesitlerinde çıkmıştır. Gelen elektron enerjisinin artırılmasıyla deneyler arasındaki uyum daha iyi bir şekilde görülmektedir. 10 eV ve 15 eV’de alınan dört deneysel ölçüm iyi bir uyum içerisinde. Fakat yine de büyük açılarda alınan önceki sonuçlarla farklılıklar görülmüştür. Ancak hesaplanan tüm tesir kesitleri genel olarak bu açı değerlerinde iyi sonuç vermektedir.

Mielewska ve ark. (1999), tasarladıkları manyetik açı değıştirci aygıtı deney düzeneklerinde kullanarak CO ve N₂ de elastik elektron rezonans profillerini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.19). Yüksek enerjili elektronları saptırmak için solenoidlere uygulanan yüksek akımlar, sistemde aşırı ısınma problemi oluşturmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için sarımların yapıldığı solenoidlere ayrıca soğutma özelliği eklemişlerdir. Deneyde kullandıkları MAC aygıtı iki solenoid çiftinden meydana gelmektedir. Aygıtın iç solenoidi 21, dış solenoidi 34 sarımdan oluşmaktadır (Şekil 2.18).



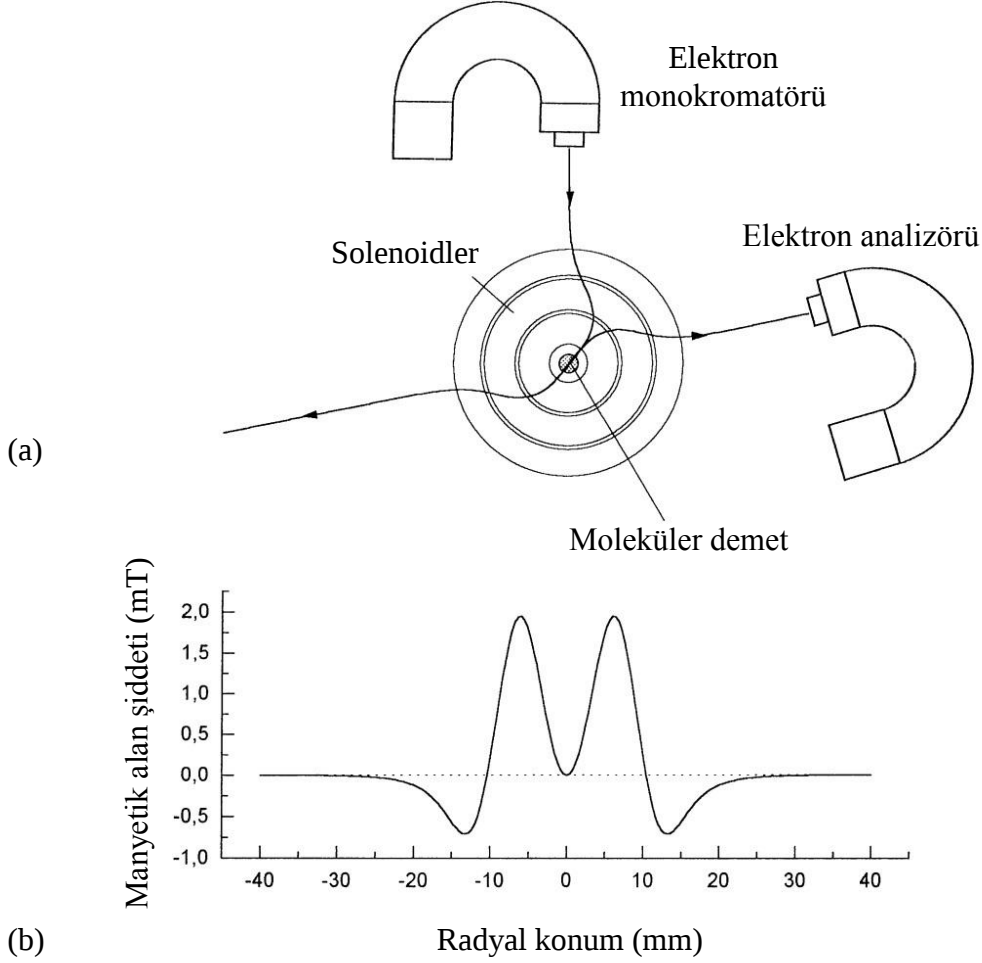
Şekil 2.18 Polonya grubu tarafından tasarlanan MAC aygıtı a) Aygıtı oluşturan solenoidlerin sarım düzenlerinin gösterimi. b) MAC aygıtının geometrik ölçüleri (Mielewska *et al.* 2007).



Şekil 2.19 CO ve N₂ de gözlemlenen elastik elektron rezonans profilleri. Yatay eksen elektron enerjisini, dikey eksen ise rezonans profillerinin belirli bir background fonksiyonu üzerinden alınan farkını ifade etmektedir (Mielewska *et al.* 1999).

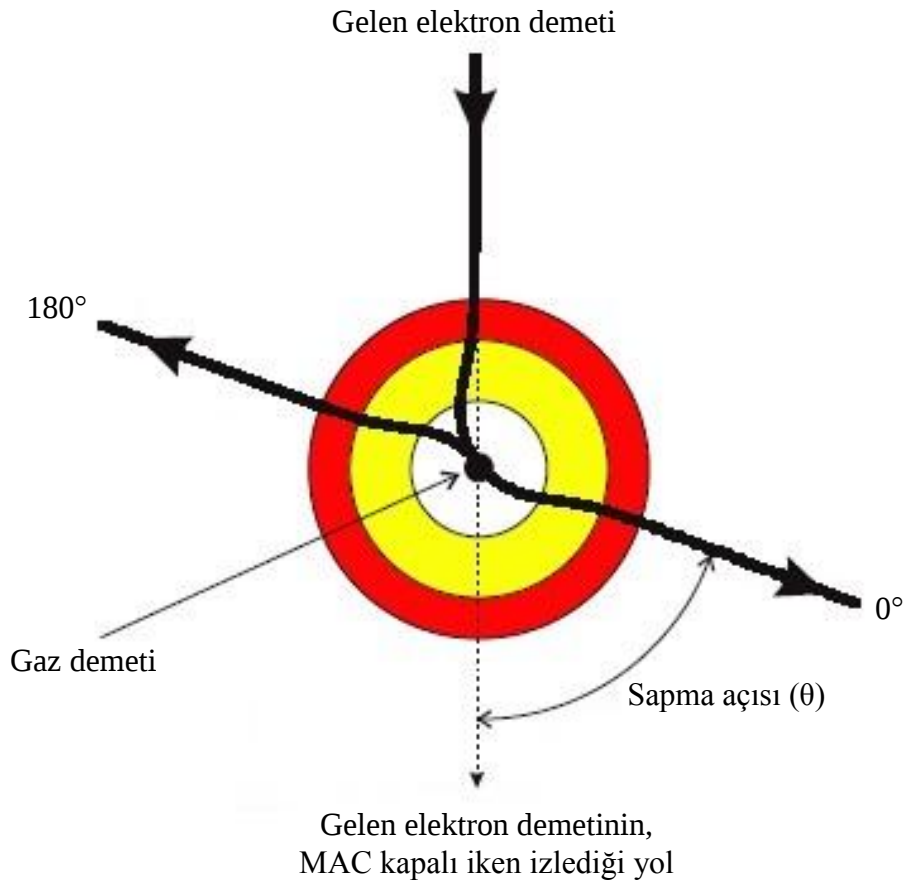
MAC aygıtı kullanılarak 95° den 180° ye kadar alınan sonuçlar şekil (2.19)'da verilmiştir. MAC aygıtı ile CO ve N₂ moleküllerinin rezonans düzeylerine ait spektrumlar alınmıştır. Alınan bu spektrumlar daha önceden ölçüm alınamayan açılarda önemli farklılıklar göstermektedir.

Şekil 2.20’de Mielewska’nın kullandığı deney düzeneğinin şematik gösterimi ile MAC aygıtı kullanılarak oluşturulan manyetik alanın radyal konuma göre değişimi verilmiştir.

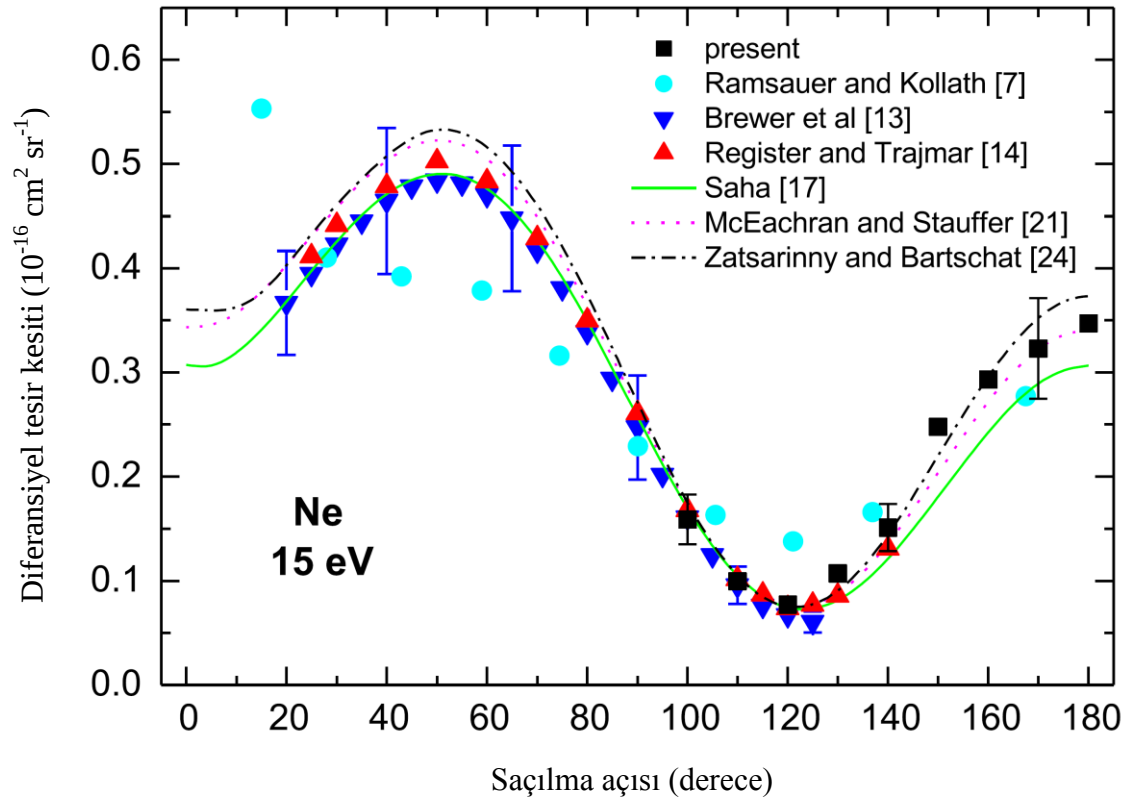


Şekil 2.20 (a) MAC aygıtının yerleştirildiği elektron spektrometresinin şematik görünümü. Gelen elektron demeti ile saçılan elektron 180° birbirlerinden ayrılmışlardır. (b) Manyetik alanın radyal konuma göre değişimi (Mielewska *et al.* 1999).

Şekil 2.21’de Linert ve ark. (2006) tarafından kullanılan MAC’ın çarpışma bölgesindeki solenoidlerinin yerleşimi gösterilmektedir. MAC aygıtı kapalıyken gönderilen elektron demeti kesikli çizgilerle gösterilen yolu izlemektedir. MAC aygıtı açıldığında demet belirli bir açı kadar saptırılarak 0° ile gösterilen yolu izlemektedir. Atomdan geri saçılan demet ise 180° ile gösterilen yolu izlemektedir. Sonuç olarak, oluşturulan manyetik alan ile 10 eV’lik gelen ve geri saçılan elektronlar birbirinden 180° ayrılmışlardır. Linert ve ark. (2006), 15 eV’de Ne atomu için elastik saçılma diferansiyel tesir kesiti ölçümleri yapmışlardır (Şekil 2.22).

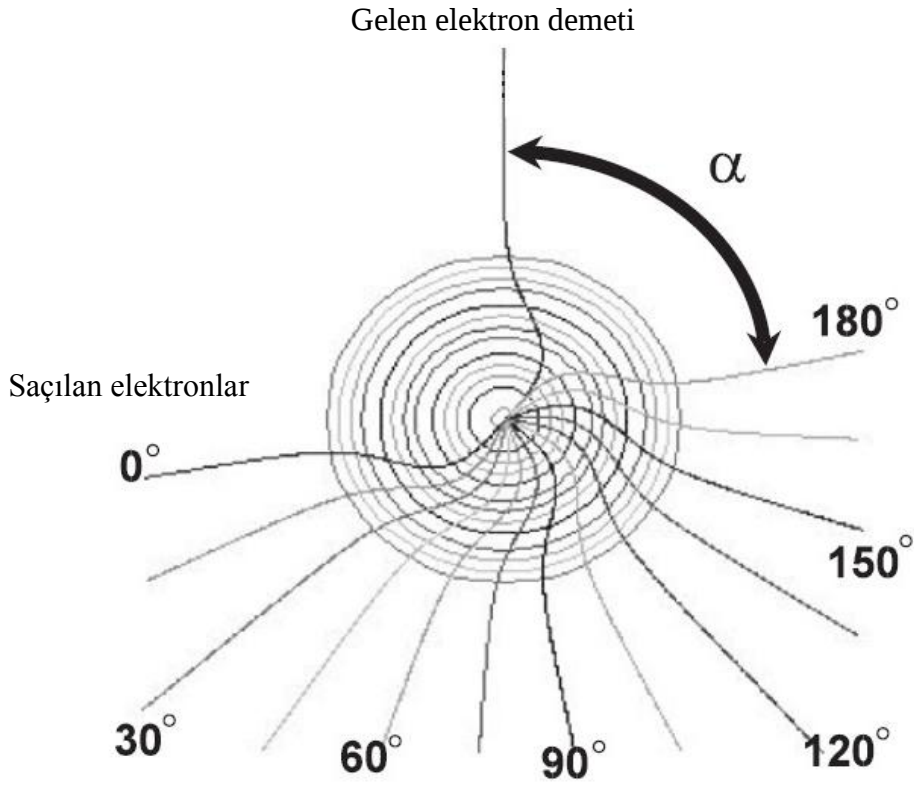


Şekil 2.21 Çarpışma bölgesinde iç ve dış solenoidlerin yerleşimi. İç sarımın akımı 0.83 Amperdir. Oluşan manyetik alan 10 eV ‘lik gelen ve saçılan elektronları birbirinden 180° saptırmaktadır (Linert *et al.* 2006).

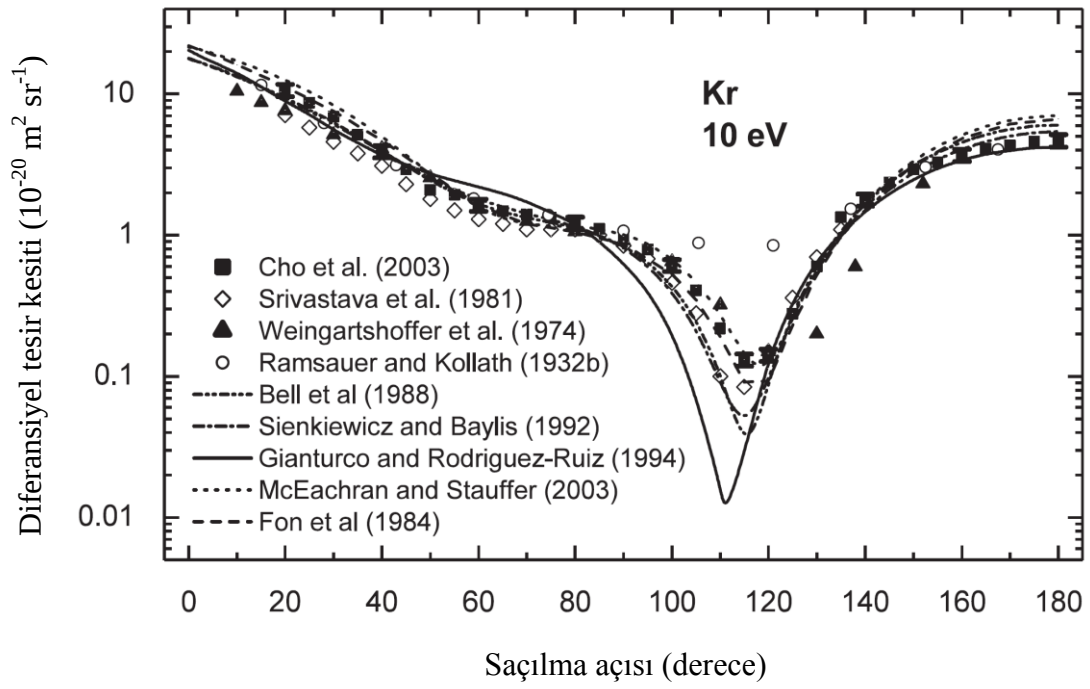
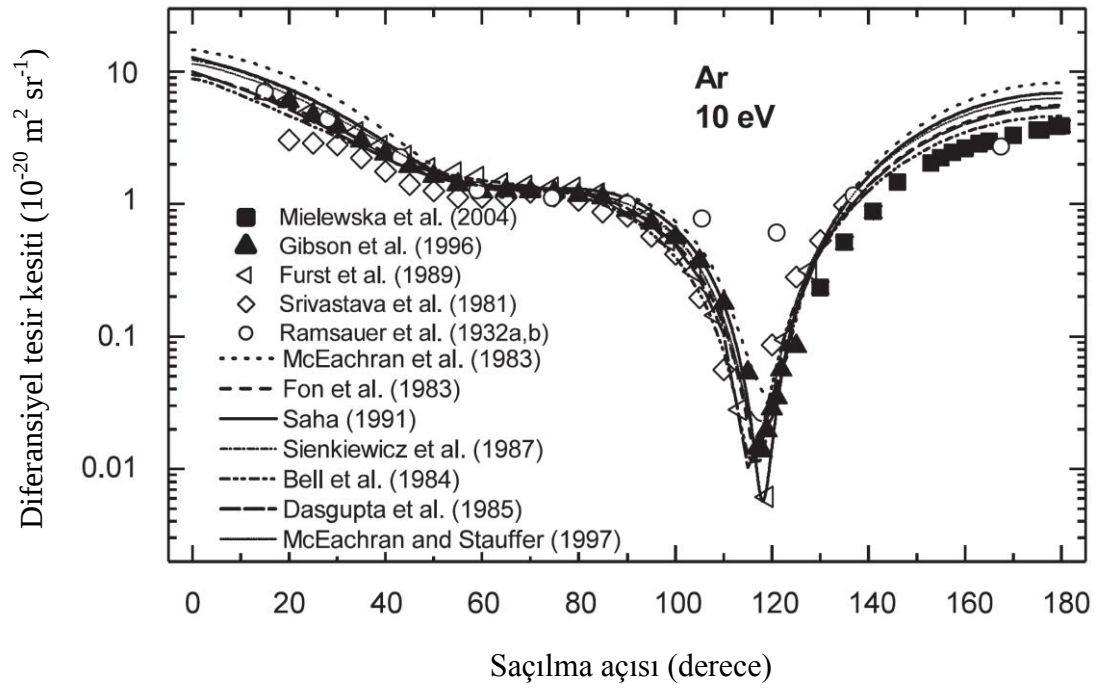


Şekil 2.22 15 eV enerjisinde Ne atomu için ölçülen elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri (Linert *et al.* 2006).

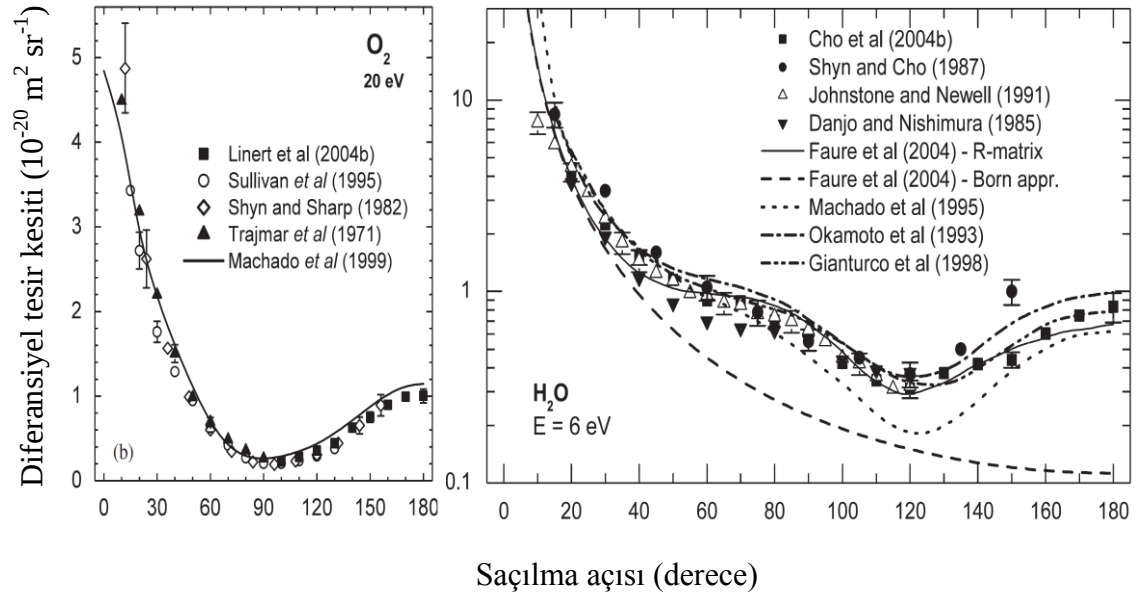
Mielewska (2007), 0° ile 180° arasında 10 eV lik gelen ve elastik olarak saçılan elektron yörüngelerini CPO-3D simülasyon programını kullanarak çizdirmişlerdir (Şekil 2.23). MAC aygıtını kullanarak 10 eV de Ar ve Kr (Şekil 2.24), 20 eV de O_2 , 6 eV de H_2O (Şekil 2.25) ve 5 eV de CH_4 (Şekil 2.26) için elastik saçılma diferansiyel tesir kesiti ölçümleri yapmışlardır. Ölçümler daha önce alınamayan açı değerlerinde MAC aygıtı alınarak tekrarlanmış ve önceki deneysel ve teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Böylece tüm açıları kaplayacak şekilde tesir kesitlerinin davranışı hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir. MAC aygıtının kullanılmasıyla alınan ölçümlerde özellikle büyük açı değerlerinde teorik çalışmalarla bazı farklılıklar görülmektedir.



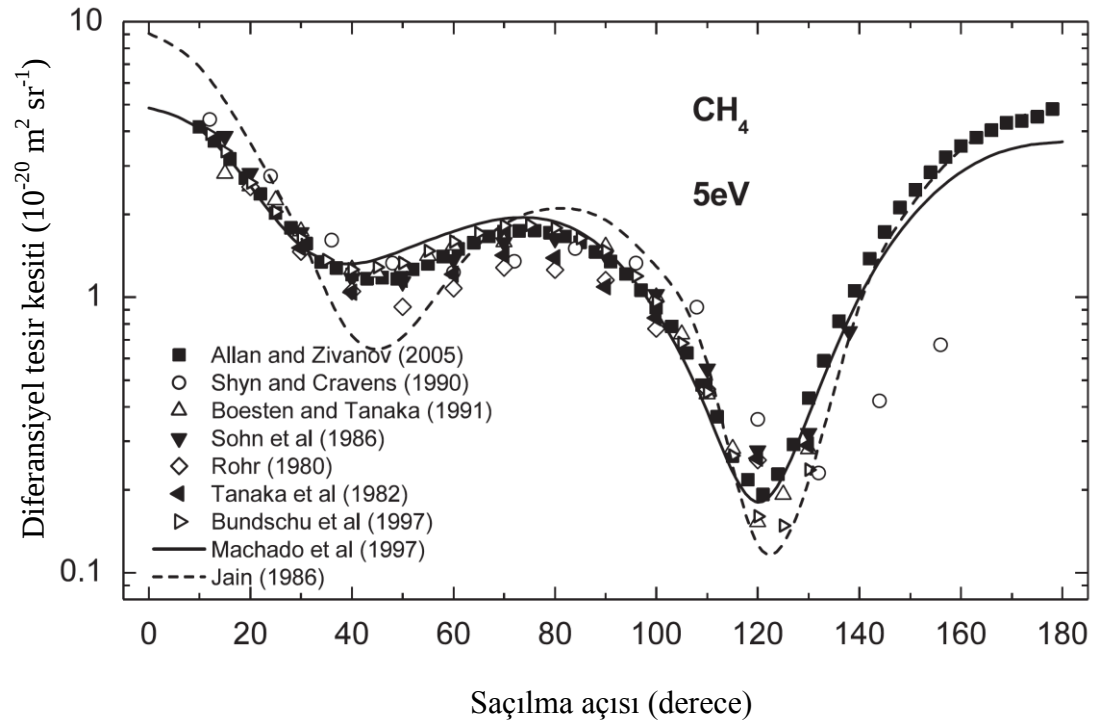
Şekil 2.23 Mac aygıtında 10 eV lik gelen ve elastik olarak farklı açılarda saçılan elektronların yörüngeleri. Bu şekil CPO-3D programı kullanılarak elde edilmiştir (Mielewska 2007).



Şekil 2.24 Ar ve Kr elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri (Mielewska 2007).

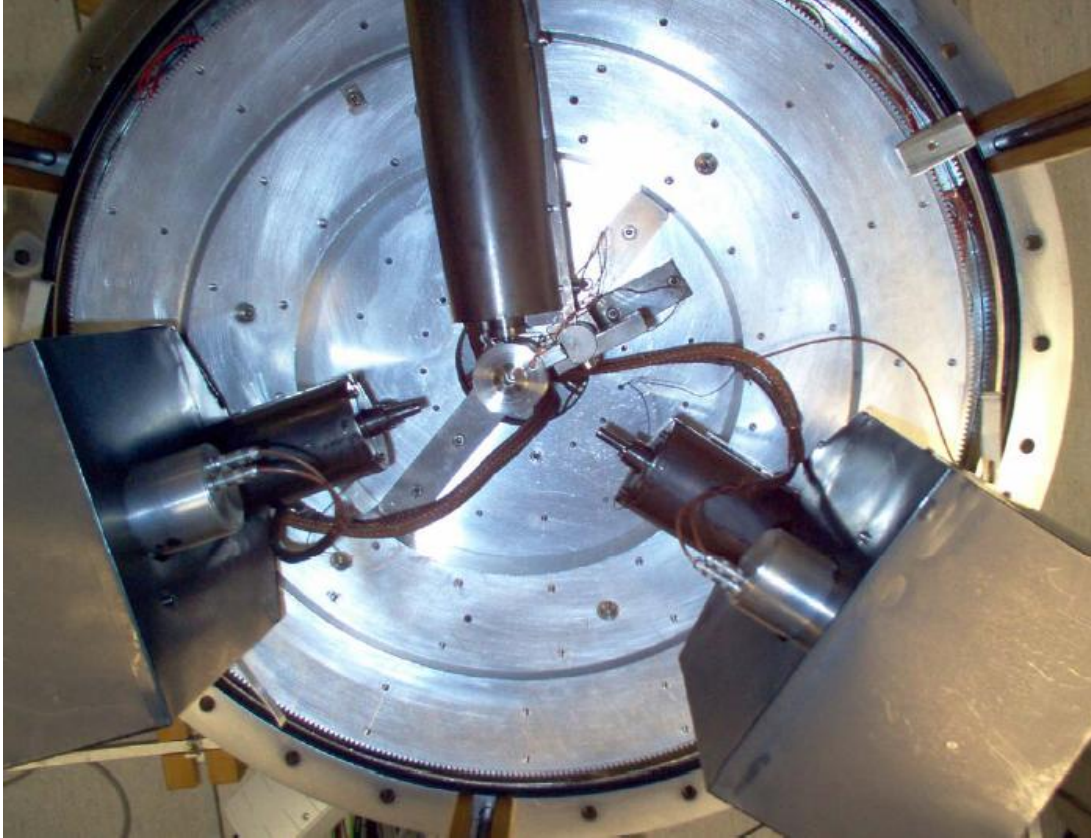


Şekil 2.25 H_2O ve O_2 elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri (Mielewska 2007).



Şekil 2.26 CH_4 elastik saçılma diferansiyel tesir kesiti (Mielewska 2007).

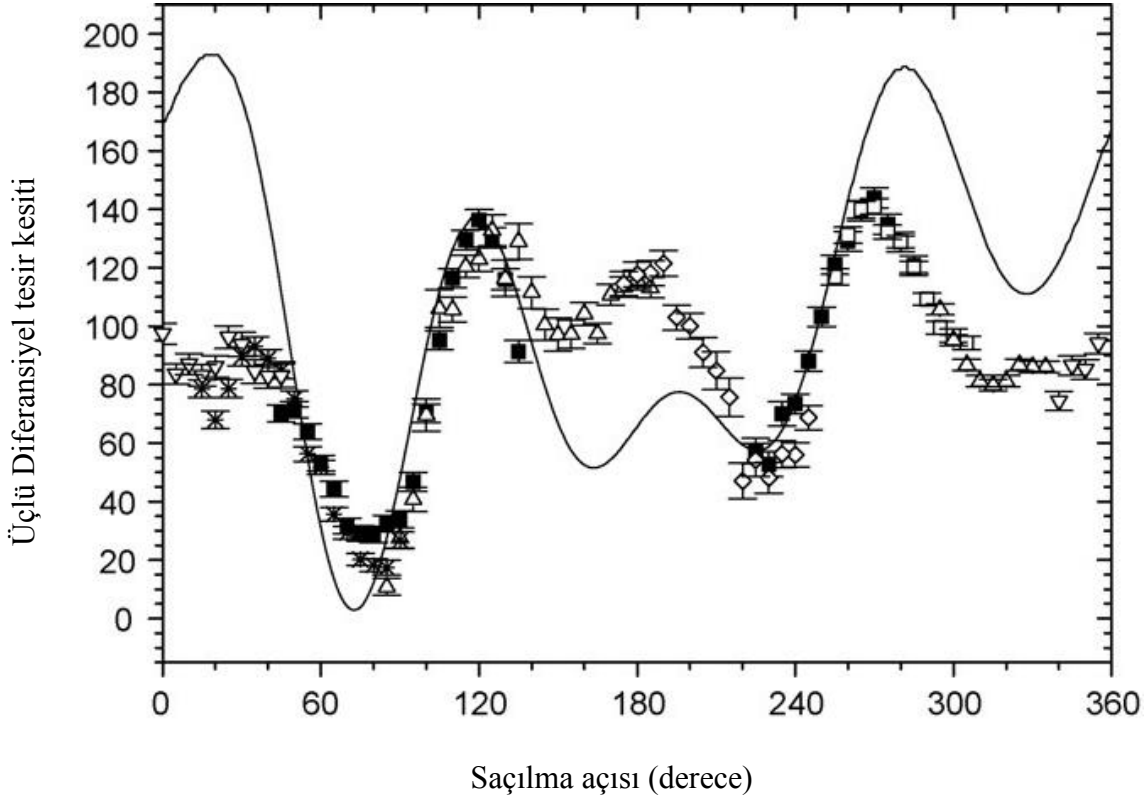
Stevenson ve Lohmann (2007), ilk kez manyetik açı değiştirici tekniğini (e,2e) tekniğine uygulamışlardır (Resim 2.2). 2 eV gelen elektron enerjisinde MAC kapalıyken ve MAC açıkken Argon 3p orbitali için ölçülen ve hesaplanan l diferansiyel tesir kesiti ölçümleri yapmışlardır. Buna göre, teorik yaklaşımlarla ileri ve geri açılarda önemli farklılıklar gözlemlenmiştir (şekil 2.27).



Resim 2.2 Avustralya grubu (e,2e) deney düzeneği (Stevenson and Lohmann 2007).

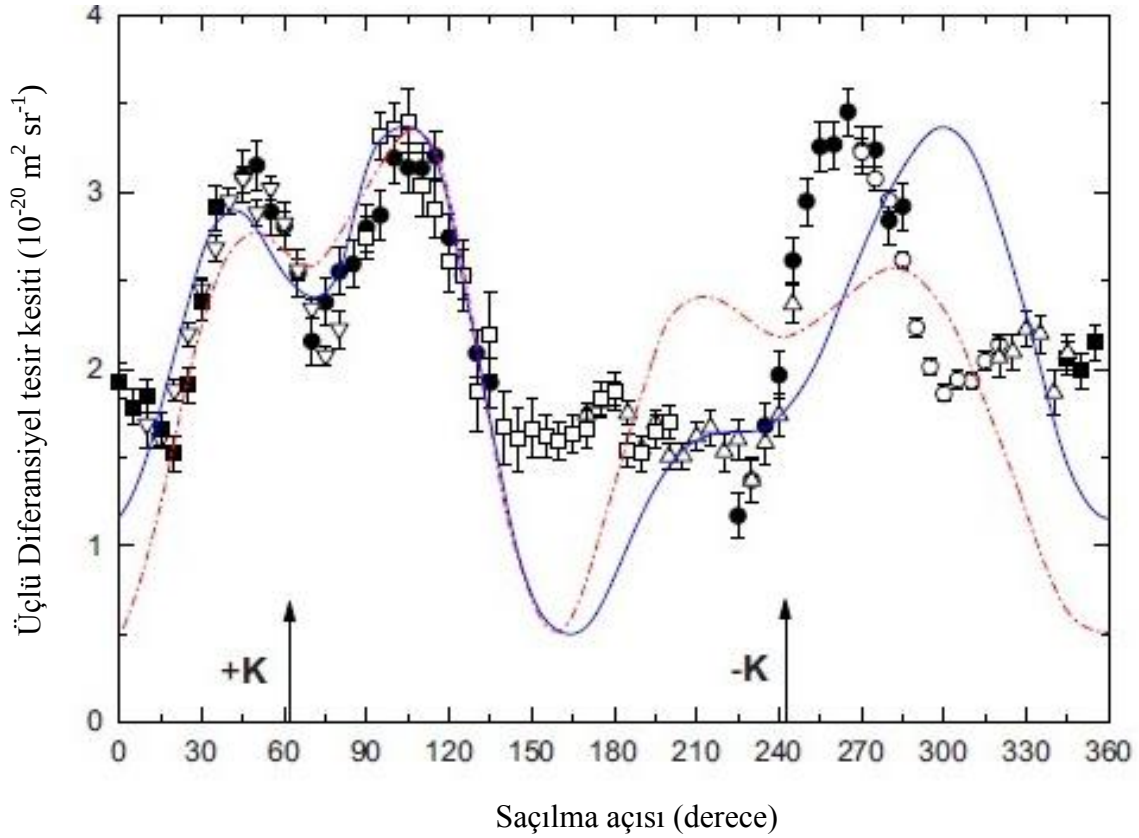
(e,2e) deneyleri hem saçılan hem de koparılan elektronların eşzamanlı olarak dedekte edildiği spektroskopik bir tekniktir. Saçılan elektronlar küçük açılarda sabit bir açıda dedekte edilirken, koparılan elektronlar tüm düzlemdeki açılarda dedekte edilmektedir. Resim 2.2’de görüldüğü gibi küçük açılarda FET ve büyük açılarda elektron tabancası fiziksel olarak bir yer işgal ettiği için bu açılarda ölçüm alınamamaktadır. MAC aygıtı kullanılarak hem saçılan, hem de koparılan elektronlar ölçüm alınabilen açılara doğru taşınırlar ve böylece elektronların açısal dağılımları bütün açılarda ölçülebilmektedir.

Şekil 2.27’de görüldüğü gibi MAC aygıtı kapalıyken alınan ölçümlerle, MAC aygıtı açıkken alınan ölçümlerin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Özellikle ölçüm alınamayan açılarda MAC aygıtı kullanılarak tesir kesiti ölçümleri yapılmıştır.

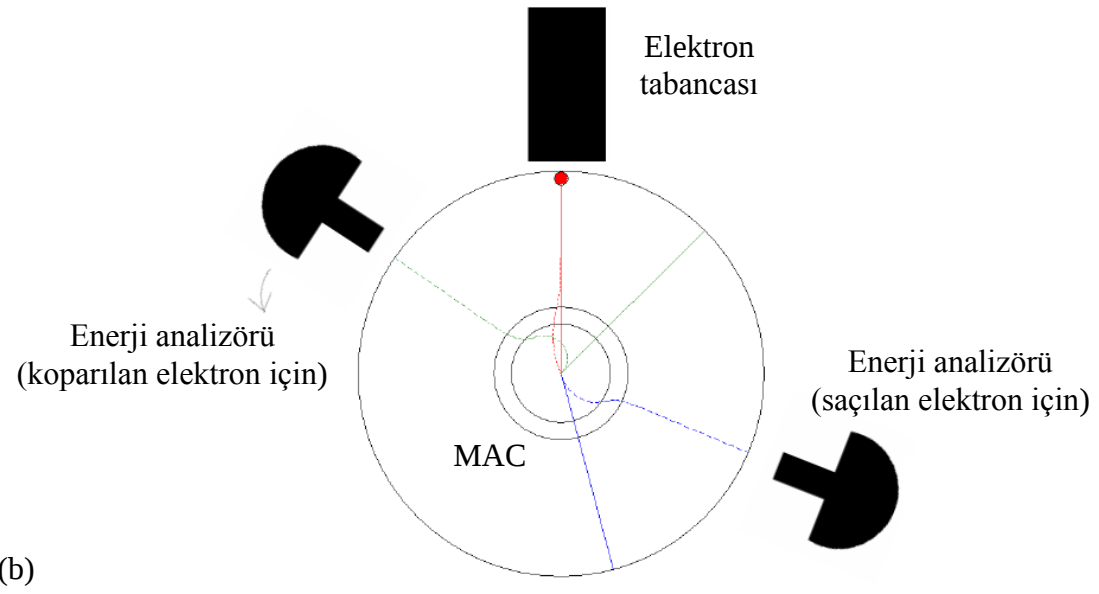
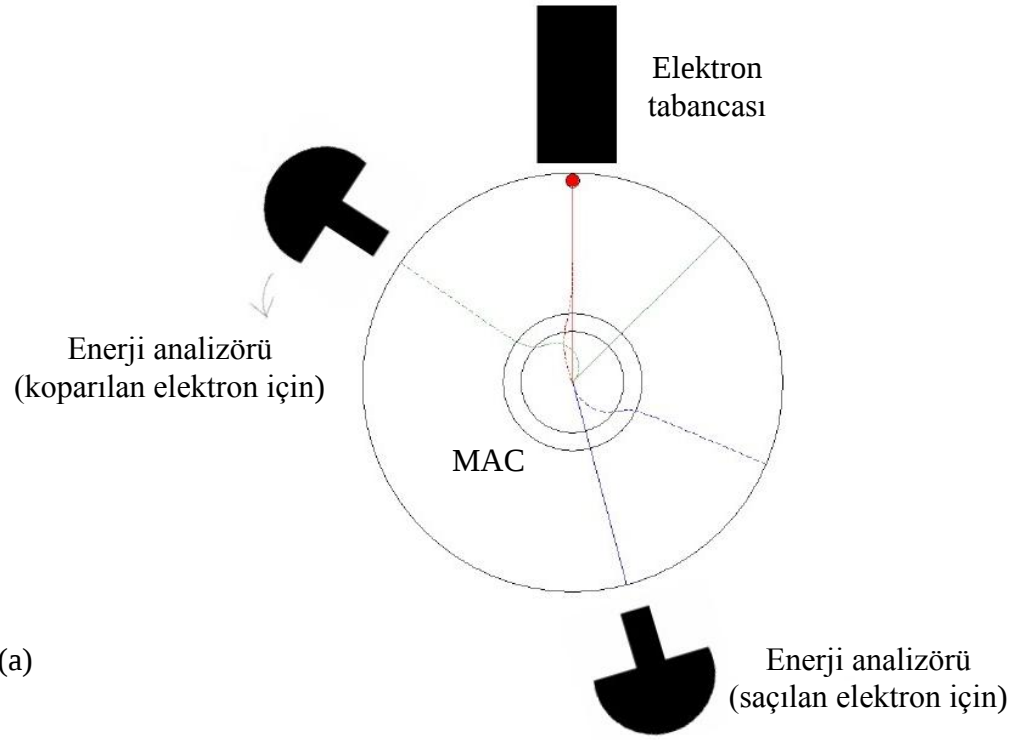


Şekil 2.27 Elektron çarpışmasıyla Argon 3p orbitali için ölçülen ve hesaplanan üçlü diferansiyel tesir kesiti. $E_0=113.5$ eV, saçılan elektron açısı -15° ve kopan elektron enerjisi 2 eV. İçi dolu daireler MAC yokken, içi boş olanlar MAC aygıtıyla alınan ölçümleri göstermektedir (Stevenson and Lohmann 2007).

Stevenson ve Lohmann (2008), 5 eV gelen elektron enerjisinde MAC kapalıyken ve MAC açıkken Argon 3p orbitali için ölçülen ve hesaplanan üçlü diferansiyel tesir kesiti ölçümleri yapmışlardır (Şekil 2.28). Şekil 2.29’da MAC aygıtı kapalı ve açık durumdayken, elektronların izlediği yörüngeler verilmiştir.



Şekil 2.28 Elektron çarpışmasıyla Argon 3p orbitali için ölçülen ve hesaplanan üçlü diferansiyel tesir kesiti, $E_0 = 113.5 \text{ eV}$, $E_e = 5 \text{ eV}$, $\theta_s = -15^\circ$ (Stevenson and Lohmann 2008).

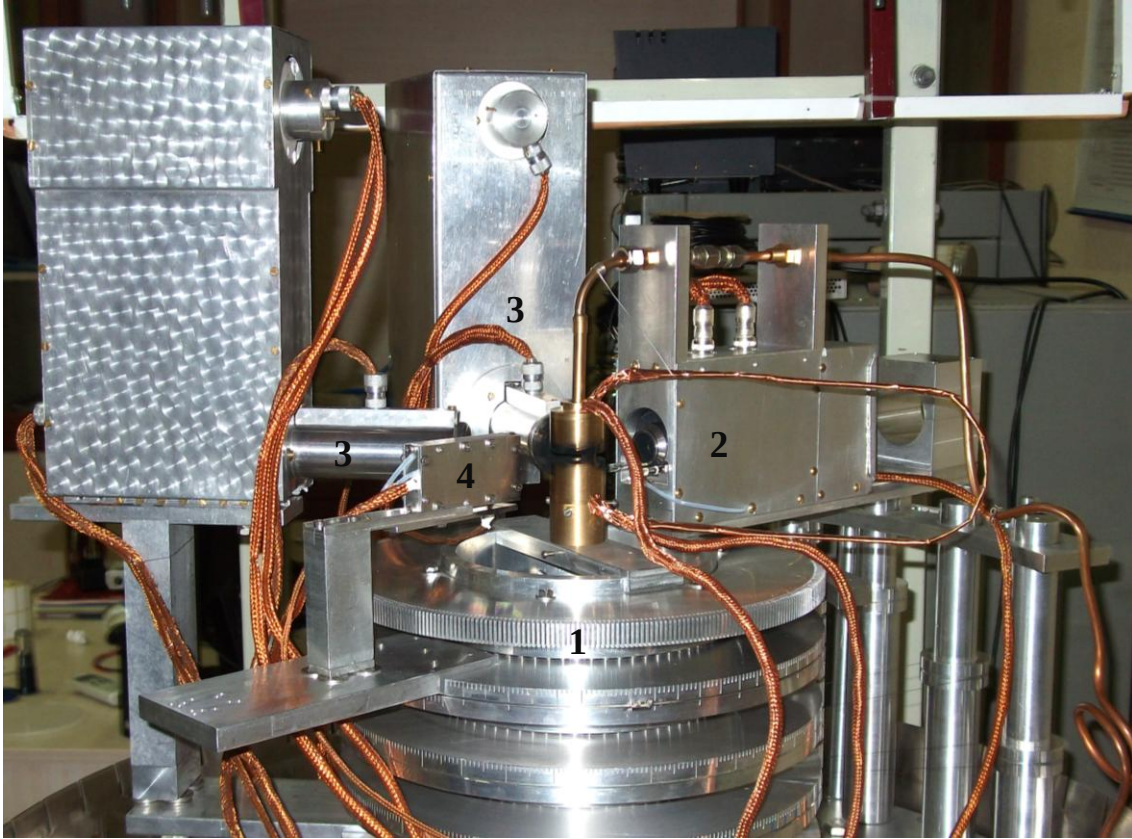


Şekil 2.29 a) MAC aygıtı kapalı durumda iken elektronların izlediği yörüngeler. b) MAC aygıtı açık durumda iken elektronların izlediği yörüngeler (Stevenson and Lohmann 2006).

3. MATERYAL ve METOT

3.1. MAC Aygıtının Kullanılacağı Deney Düzenegi

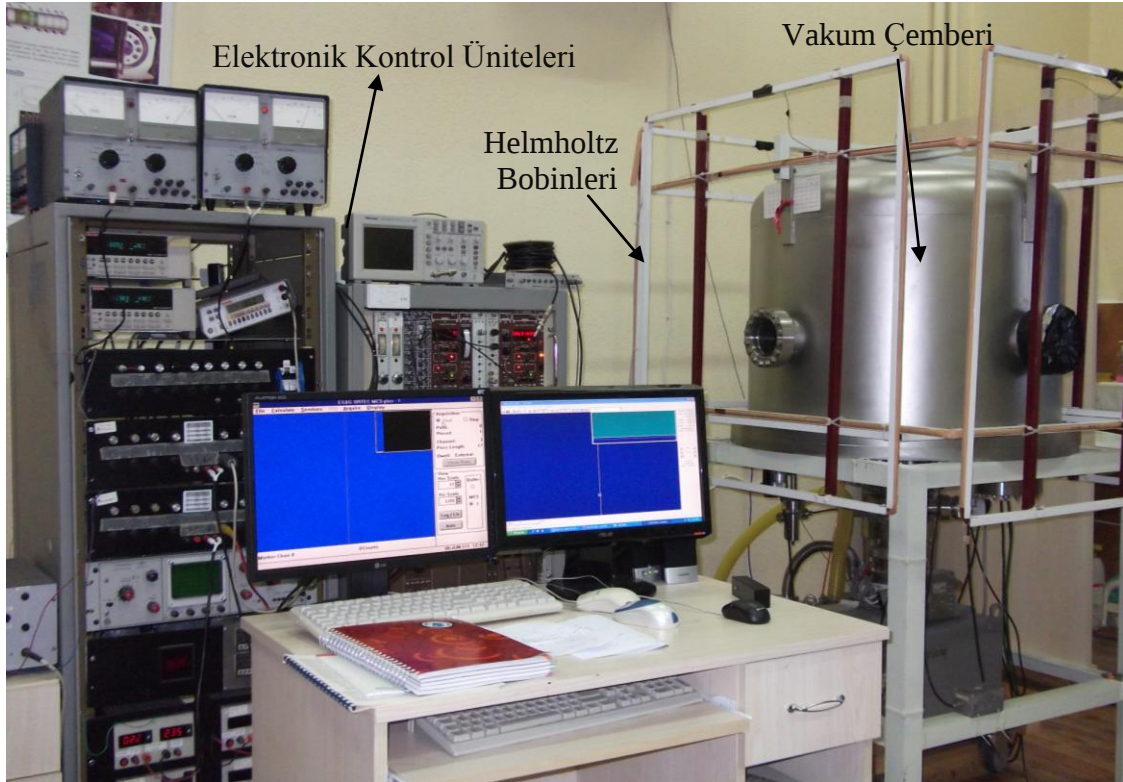
Deney düzenegi, çalışma basıncı $\sim 10^{-8}$ mbar olan vakum çemberi içerisine yerleştirilmiş, mekanik kontrol kısımları (1), elektron tabancası (2), elektron analizörleri (3) ve FET'ten (4) oluşan komple bir sistemdir (Resim 3.1). Bunun dışında spektrometre parçalarının elektronik kontrol üniteleri, çarpışma bölgesindeki manyetik alan etkilerini minimize eden Helmholtz bobinleri ve sinyal işleme ünitesi bulunmaktadır.



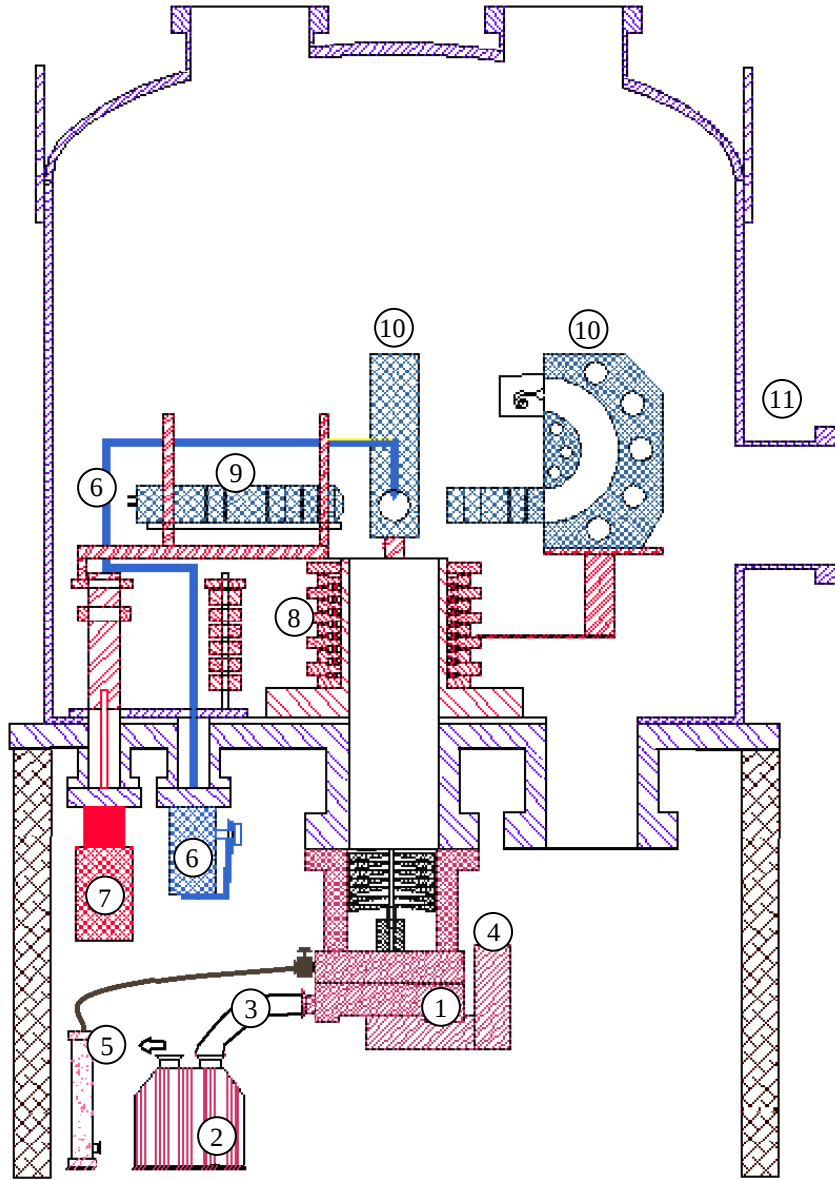
Resim 3.1 MAC'ın yerleştirildiği elektron-atom/molekül çarpışma deney düzeneginin fotoğrafı.

3.1.1. Vakum Sistemi

Vakum çemberi, dikey olarak hareket edebilmekte ve alt tablanın üzerine bir jaraskal yardımıyla kapanmaktadır (Resim 3.2). Vakum çemberinin iç basıncı, turbomoleküler pompa (TMP) ve ikincil destek pompasından oluşan bir boşaltma sistemiyle çalışma basıncına ($\sim 10^{-8}$ mbar) düşürülmektedir. Vakum çemberi, vakum boşaltma sistemi ve çakışma spektrometresinin yerleşimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Resim 3.2 Elektron spektrometresinin genel fotoğrafı.

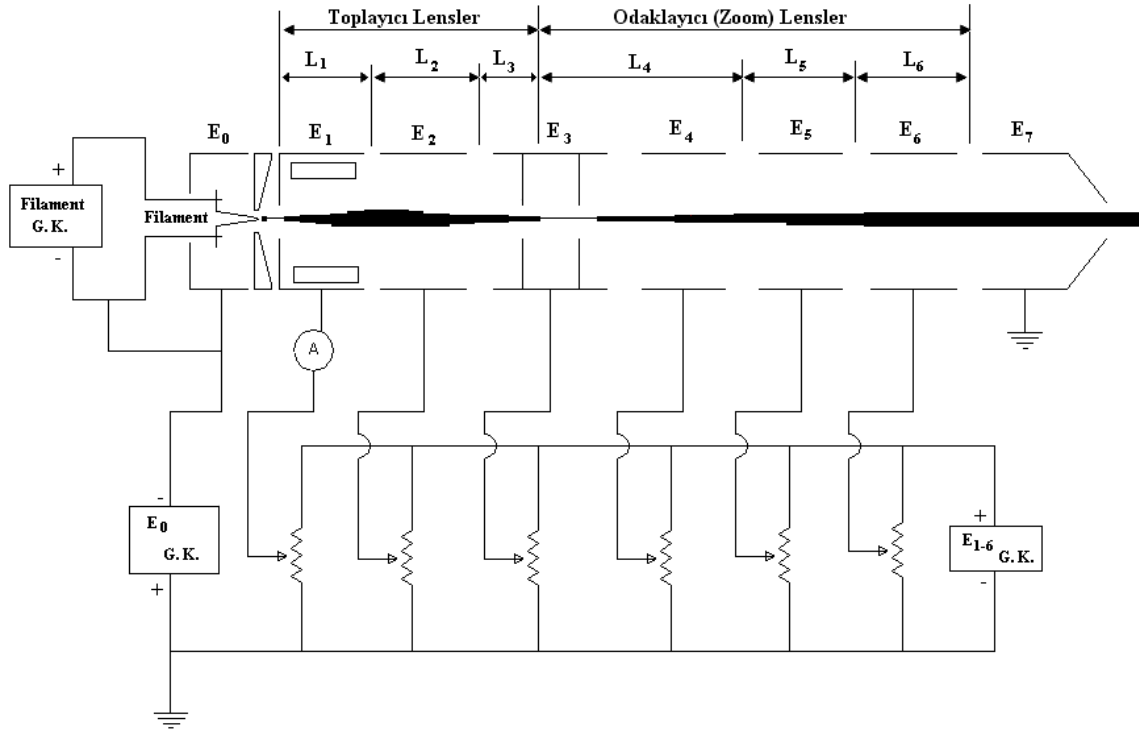


Şekil 3.1 Vakum sisteminin şematik gösterimi (ölçekli değildir). Turbomoleküler vakum pompası (TMP) (1), Rotary pompa (2), Boşaltma sistemi bağlantı elemanları (3), TMP kontrol ünitesi (4), Hava kurutucu (5), Gaz iletim sistemi (6), Spektrometre parçalarının hareketinin çember dışından kontrolünü sağlayan hareket kolları (7), Spektrometre parçalarının hareketini sağlayan mekanik tabla (8), Elektron tabancası (9), Enerji analizörleri (10), Vakum çemberi (11), Faraday elektron toplayıcı iki boyutta çizim uygulandığından gösterilememiştir.

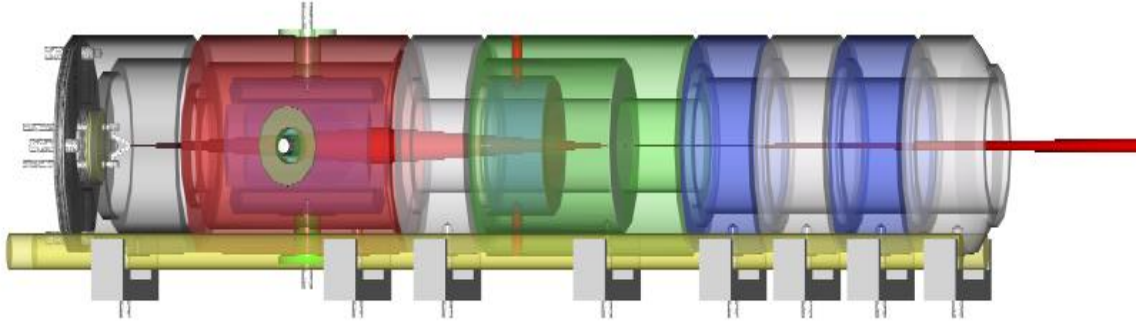
3.1.2. Elektron Tabancası

Elektron demetinin üretimi foton demetinin üretimine göre daha kolay ve ucuz bir yöntemdir. Ayrıca elektron demeti ile atomlar, taban durumlarından fotonlarla uyarılması yasak olan düzeylere uyarılabilmektedir. Dolayısıyla elektron saçılmaları ile atomların yapısının belirlenmesi önemli olmaktadır.

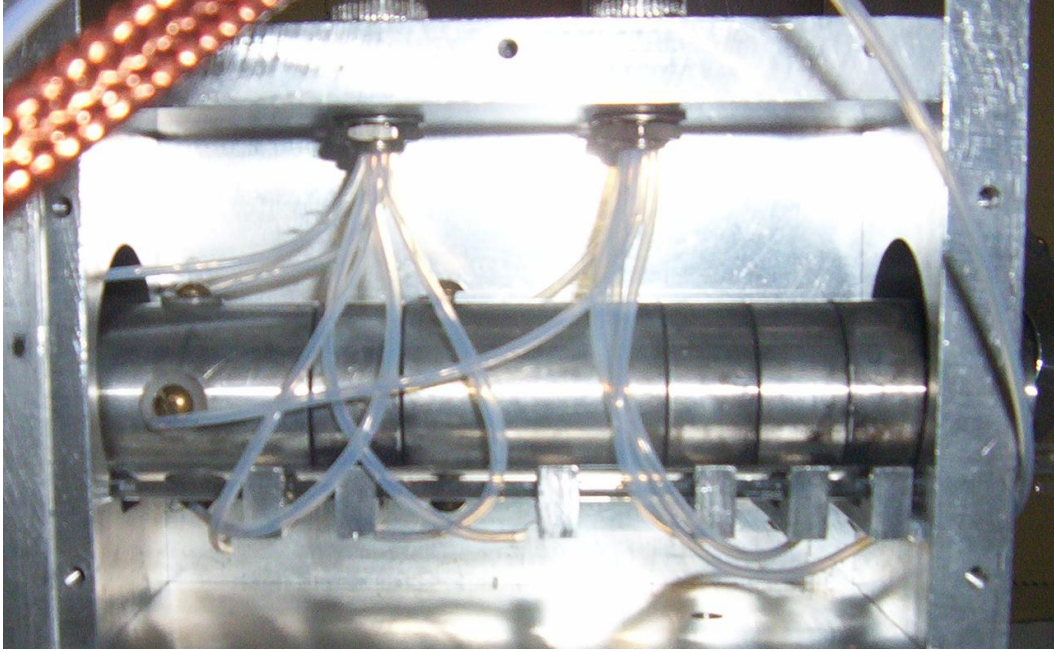
Genel olarak bir elektron tabancası, katot bölgesi (elektron kaynağı), yüzeyden kopan elektronların toplandığı anot sistemi ve elektronların hedef bölgesine istenilen enerjide taşınmasını ve odaklanmasını sağlayan elektrostatik lens sistemi olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.2). Şekil 3.3'te Solidworks programında modellenmiş yedi elemanlı bir lens sisteminden oluşan elektron tabancasının 3D görünümüne ve Resim 3.3'te deney düzeneğinde kullanılan elektron tabancasının fotoğrafına yer verilmiştir.



Şekil 3.2 Elektron tabancasının mercek elemanlarının ve elektronik kontrol sisteminin şematik gösterimi.



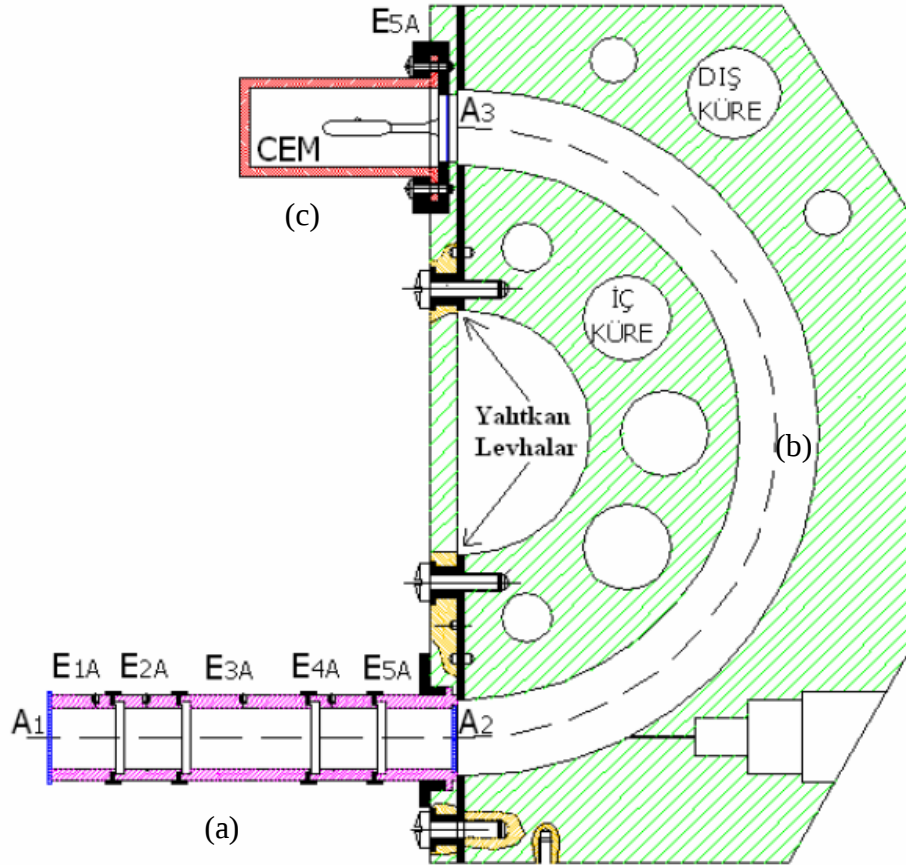
Şekil 3.3 Elektron tabancasının SolidWorks programında oluşturulan 3D görünümü.



Resim 3.3 Yedi elemanlı lens sisteminden oluşan elektron tabancasının fotoğrafı.

3.1.3. Elektron Enerji Analizörü

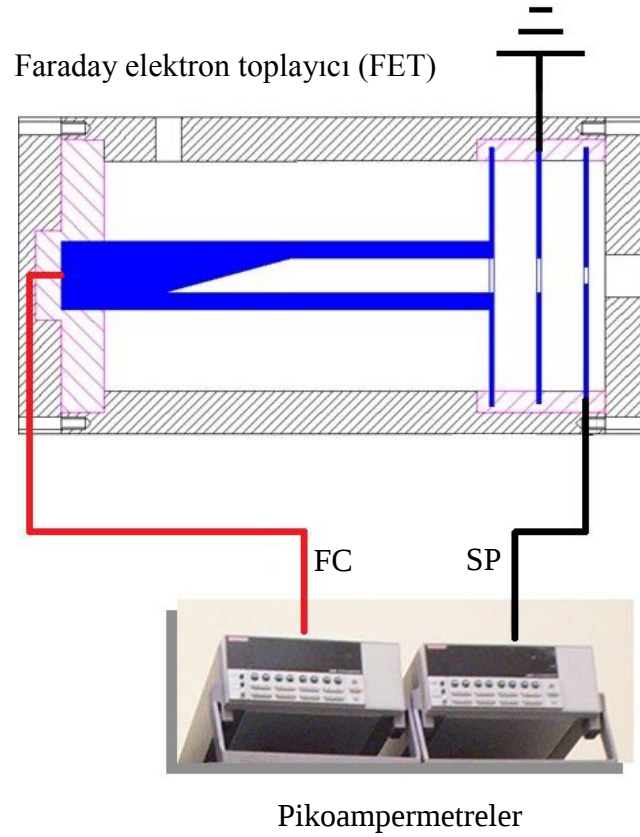
Elektron tabancasının çıkışında oluşturulan elektron demeti etkileşme bölgesinde hedef atomla çarpıştıktan sonra farklı açılarda ve enerjilerde yayılır. Analizörler, çarpışma sonrası hedeften saçılan ve iyonlaşan elektronları enerjilerine göre seçerek dedekte eden sistemlerdir. Bir analizör sistemi, etkileşme bölgesinden gelen elektron demetini odaklamak için kullanılacak olan giriş lens optiği, enerji analizinin yapılacağı 180° yarıküresel deflektör kısmı ve elektron çoğaltıcı detektör (CEM)'den oluşmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Elektron enerji analizörünün AutoCAD programında oluşturulan iki boyutlu (2D) görünümü. (a) Giriş lens optiği, (b) Yarıküresel deflektör, (c) (CEM) Elektron çoğaltıcı detektör.

3.1.4. Faraday Elektron Toplayıcı (FET)

Faraday elektron toplayıcı, üretilen elektron demetinin akımını ve tabancanın odaklama kalitesini belirlemekte kullanılmaktadır. Şekil 3.5, deney sisteminde kullanılan FET' in şeklini ve pikoampermetrelere bağlantısını göstermektedir. Faraday elektron toplayıcının giriş ve çıkışındaki elektrotlar bu ölçüm aletlerine bağlanmıştır ve sistemin dışından demetin akımı dijital göstergelerle okunabilmektedir.



Şekil 3.5 Elektron tabancasında üretilen elektron demetinin Faraday elektron toplayıcı ile toplanması ve akım değerlerinin pikoampermetreler ile görüntülenmesi.

3.2. Lokalize Bir Manyetik Alanın Oluşturulması

Geçmişten bugüne genellikle elektron spektrometrelerinde manyetik özelliği olan aygıtlar kullanılmamaktadır. Çünkü manyetik alanın varlığı spektrometre içinde elektron yörüngelerini bozmaktadır. Bu durum örneğin enerji çözünürlüğünü kötü yönde etkilemektedir. MAC aygıtı ile üretilen manyetik alan bu tür etkileri minimize edecek şekilde küçük bir alanda manyetik alan üretmekte ve elektronların uygun açılarda saçılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle lokalize bir manyetik alanın oluşturulması gerekmektedir. Bu da manyetik alanın yüksek mertebe çok kutuplu momentlerinin elimine edilmesine dayanmaktadır (Read and Channing 1996). Çok kutuplu momentlerin elimine edilmesi solenoidlere uygulanan akımların birçok olası durumlarının ayarlanmasıyla mümkündür. Bunun yapılmasıyla manyetik alan uzaklıkla hızlı bir şekilde azalır.

Genel bir sistemin çok kutuplu manyetik momentleri M_{lm} sabit akımlardan ($\mathbf{j}$) oluşur ve şu şekilde ifade edilir.

$$M_{lm} = \frac{\mu_0}{4\pi(l+1)} r^l Y_{lm}^*(\theta, \phi) \nabla \cdot (\vec{r} \times \vec{j}) dV \quad (3.1)$$

Bu ifadede Y_{lm}^* küresel harmoniklerdir ve $\mathbf{r}$ akım vektörü $\mathbf{j}$ 'nin konum vektörüdür. Manyetik vektör potansiyeli $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ herhangi bir manyetik alan için bu manyetik momentlerin bir seri açılımı şeklinde yazılabilir (Blatt and Weiskopff 1952). $\mathbf{j}$ akımlarından oluşan bir sistemden büyük $\mathbf{r}$ uzaklıklarında her moment M_{lm} , $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ 'ye $r^{-(l+1)}$ ile orantılı bir terimle etki eder. Dolayısıyla hızlı bir şekilde azalan bir manyetik alan oluşturmak için düşük mertebeli (l) manyetik çok kutuplu momentlerin elimine edilmesi gerekir. Eğer $l=1$ 'den 4 'e kadar manyetik momentler sıfır olursa $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ vektör potansiyelinin seri açılımında ilk terim r^{-6} ile orantılı olur. Manyetik alan $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ için bu terim r^{-7} ile azalır, çünkü $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ manyetik alanı $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ vektör potansiyelinin türevinden elde edilir.

Akım sistemleri, dairesel döngüler seti veya solenoidlerden oluşur (Jackson 1999). I akımı taşıyan bir tekli dairesel döngü için R yarıçap ve z=0 düzleminde yerleşmek üzere, M_{lm} çok kutuplu momentler sıfırdan farklıdır. Eğer sadece $m=0$ ve l 'tek ise,

$$M_{l0} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{(-1)^n}{(l+1)} \left(\frac{2l+1}{4\pi} \right)^{1/2} \frac{(2n+1)!}{2^{2n-1} (n!)^2} \pi R^{l+1} I \quad (3.2)$$

olur. Burada $n = \frac{1}{2}(l-1)$ 'dir. S alanına sahip bir döngü için manyetik dipol moment M_{10} , I.S ile orantılıdır. Kuadropol moment M_{20} sıfırdır ve oktopol moment M_{30} , I.S² ile orantılıdır.

Buradan küresel polar koordinatlarda $\mathbf{A}$ 'nın açılımı döngüden dışarıda bir r noktasında,

$$A_\phi = \mu_o I \sum_{n=0}^{\infty} c_n \left(\frac{R}{r} \right)^{2n+2} P_{2n+1}^1(\cos \theta) \quad (3.3)$$

ile verilir. Burada $r > R$ kabul edilir ve

$$C_n = \frac{(-1)^n (2n)!}{2^{2n+2} n! (n+1)!} \quad (3.4)$$

şeklindedir. $\mathbf{A}$ 'nın diğer bileşenleri sıfırdır. $\mathbf{I}$ 'nın işareti uygunluk açısından değiştirilerek A_ϕ için ilk üç terim şu şekilde verilebilir.

$$A_\phi = \frac{\mu_o I \sin \theta}{4} \left[\left(\frac{R}{r} \right)^2 + \frac{3}{8} (5 \sin^2 \theta - 4) \left(\frac{R}{r} \right)^4 + \frac{15}{64} (21 \sin^4 \theta - 28 \sin^2 \theta + 8) \left(\frac{R}{r} \right)^6 + \dots \right] \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)' te ilk, ikinci ve üçüncü terimler sırasıyla dipol, oktopol ve 32-pol momentleri göstermektedir.

Manyetik alanın sıfırdan farklı terimleri şunlardır:

$$B_r = -2\mu_o I \sum_{n=0}^{\infty} c_n (n+1)(2n+1) \times \left(\frac{R^{2n+2}}{r^{2n+3}} \right) P_{2n+1}^0(\cos \theta) \quad (3.6)$$

$$B_{\theta} = \mu_o I \sum_{n=0}^{\infty} c_n (2n+1) \times \left(\frac{R^{2n+2}}{r^{2n+3}} \right) P_{2n+1}^1(\cos \theta) \quad (3.7)$$

olarak yazılır. Solenoidler tarafından oluşturulan manyetik alan ise

$$B_z(z, \rho, R, I) = \frac{\mu_o I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R^2 - \rho R \cos(\phi)}{[\rho^2 + z^2 + R^2 - 2\rho R \cos(\phi)]^{3/2}} d\phi \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir. R_i yarıçaplı ve n_i sarım sayısına sahip olan I akımı taşıyan bir solenoid için dipol manyetik moment sıfır olmalıdır.

$$\sum_i n_i I_i R_i^2 = 0 \quad (3.9)$$

Aynı solenoid'te oktopol momentin sıfır olması için,

$$\sum_i n_i I_i R_i^4 = 0 \quad (3.10)$$

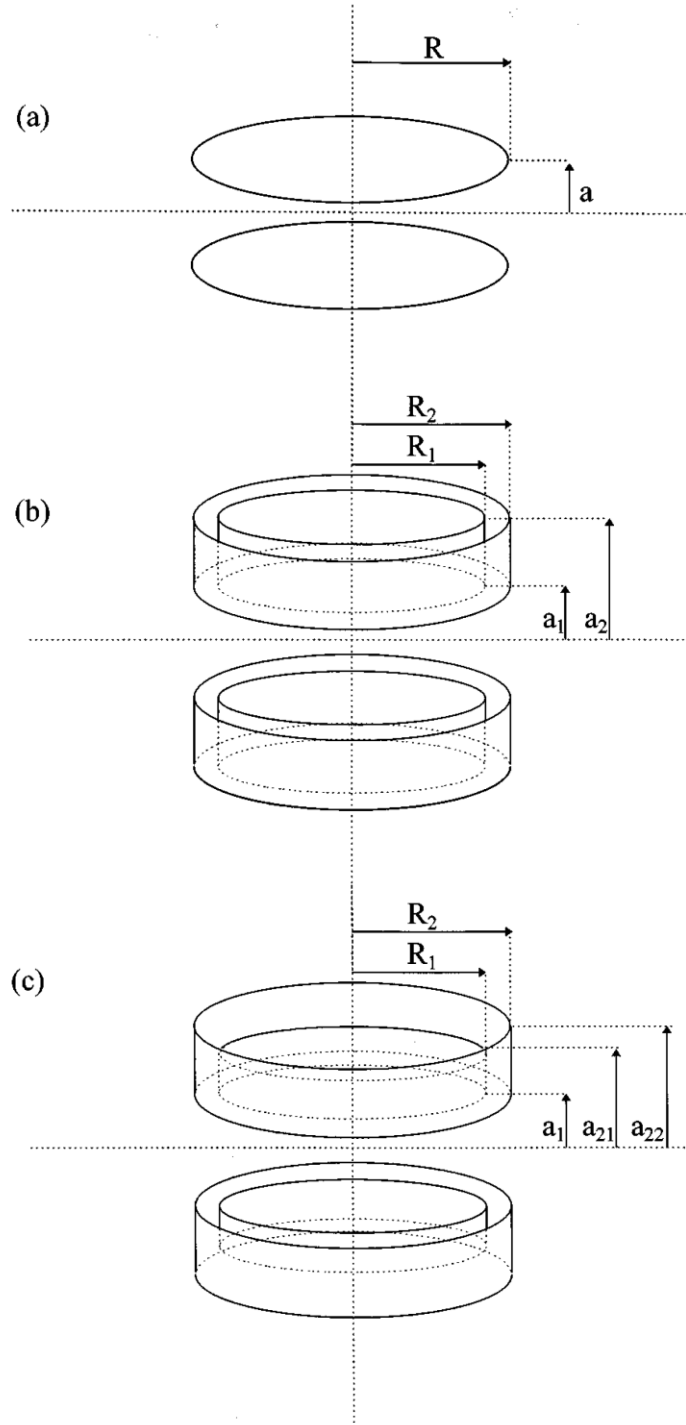
şartı sağlanmalıdır.

Denklem (3.9) ve denklem (3.10) ile verilen şartlara göre dipol veya dipol ve oktopol momentlerin sıfıra eşitlendiği konfigürasyonlar gösterilmiştir (Şekil 2.3).

3.3. Solenoid Çiftleri Manyetik Alanının Çok Kutuplu Açılımı

Bir akım sistemi birden fazla akım döngü seti veya solenoidlerden oluşuyorsa uzaktaki manyetik alan tüm sistemin çok kutuplu momentleri cinsinden seriye açılabilir. Örneğin, tüm toplam dipol moment, tek tek dipol momentlerin toplanması ile elde edilebilir ve bu sayede dipol momentlerin sıfırlanması sağlanabilir.

Şekil 3.6 (a)'da gösterilen ve paralel merkezi döngülerden oluşmuş bir sistemi ele alalım. Bu sistem Şekil 3.6 (b) ve 3.6 (c) merkezi solenoid çiftlerinin temelini oluşturmaktadır. Küresel koordinatlar kullanılarak (ρ, θ, ϕ) solenoidlerin merkezi orijin olarak kabul edilmiştir. Burada $z = 0$ düzlemi elektronların hareket ettiği düzlem olarak alınmıştır.



Şekil 3.6 a) Coaxial (merkezsiz) dairesel akım döngüleri. b) Aynı a_1 ve a_2 değerlerine sahip coaxial solenoid çiftleri. Akımlar denklem (3.2)'de verilen koşulları sağlamaktadır. c) Aynı a_1 fakat farklı a_2 değerlerine sahip coaxial solenoid çiftleri. Akımlar denklem (3.3)'ü sağlayarak hem dipol hem de oktopol terimler sıfırlanmaktadır. $R_1=10$ mm, $R_2=12.5$ mm, $a_1=3$ mm, $a_2=7$ mm, $a_{21}=6.76$ mm ve $a_{22}=9.00$ mm dir (Read and Channing 1996).

$z = \pm a$ uzaklığında R yarıçaplı iki döngü için denklem (3.5) aşağıdaki şekilde yazılır.

$$A_{\phi}(\rho, 0, \phi) = \frac{\mu_o I}{2} \left[\frac{R^2}{\rho^2} + \frac{3}{8} \left(\frac{R^2(r^2 - 4a^2)}{\rho^4} \right) + \frac{15}{64} \frac{R^2(R^4 - 12R^2a^2 + 8a^4)}{\rho^6} \left(\frac{R}{r} \right)^6 + \dots \right] \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)' deki ikinci terimde görüldüğü gibi tek bir döngüsü oktopol momenti için kullanılan R^4 terimi, döngü çifti (iki döngü) oktopol için kullanılan $R^2(r^2 - 4a^2)$ terimi ile yer değiştirilmiştir. Dolayısı ile bir çiftin oktopol momenti

$$a = \frac{R}{2} \quad (3.12)$$

alınırsa sıfırlanmış olur. İlginç olarak bu aynı zamanda Helmholtz koşulu olarak bilinen ve döngüler arasında düzgün bir manyetik alan oluşturmak için kullanılan koşulun aynısıdır.

Solenoidlerin merkezinde A_{ϕ} için eşitlik denklem (3.11) ile benzerdir, sadece I, nI çarpımı ile yer değiştirmelidir. Burada n her solenoid'te sarım sayısını göstermektedir. a^2 ve a^4 ise ortalama değerleri olan

$$\overline{a^2} = \frac{1}{3} (a_1^2 + a_1 a_2 + a_2^2) \quad \text{ve} \quad \overline{a^4} = \frac{1}{5} (a_1^4 + a_1^3 a_2 + a_1^2 a_2^2 + a_1 a_2^3 + a_2^4) \quad (3.13)$$

ile yer değiştirmelidir.

Denklem (3.12) $\{a = R/2\}$ koşulu oktopol momenti sıfırlamak için

$$a_1^2 + a_1 a_2 + a_2^2 = \frac{3}{4} R^2 \quad (3.14)$$

haline dönüşür. Çizelge 3.1'de bu koşulu sağlayan a_1 / R ve a_2 / R değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 Bir solenoid çiftinde oktopol terimi sıfırlayan a_1 / R ve a_2 / R değerleri (Read and Channing 1996).

a_1 / R	0.5	0.375	0.25	0.125	0
a_2 / R	0.5	0.615	0.714	0.797	0.866

Şekil 3.6 (b) ve 3.6 (c)'de gösterildiği gibi bir akım düzeninin birkaç çok kutuplu momentleri sıfırlanırsa manyetik alanın şiddeti merkezden uzaklaştıkça hızlı bir şekilde azalacaktır. İki veya daha fazla solenoid için toplam dipol moment denklem (3.9) koşulu sağlandığı zaman sıfırlanır. Burada i solenoid çiftlerini göstermektedir. Bu koşulu sağlamak kolaydır. Çünkü kuadrapol, 16-pol ve diğer tüm çift l 'ye sahip momentler otomatik olarak sıfırdır. Dolayısıyla diğer önemli moment oktopol momentidir. Eğer denklem (3.14) koşulu sağlanırsa her bir tek çiftin oktopol momentini sıfırlanır. Alternatif olarak farklı R değerlerine sahip fakat aynı a_1 ve a_2 değerlerine sahip olan solenoid sistemleri için üç veya üçten fazla solenoid çifti kullanılırsa ve denklem (3.10) koşulu sağlanırsa toplam oktopol moment sıfırlanır. Bu durumda ilk sıfırdan farklı manyetik moment 32-pol momentine olacaktır ve vektör potansiyelinin seri açılımında ilk terim r^{-6} olarak, manyetik alan ise r^{-7} olarak hızlı bir şekilde değişecektir.

Şekil 3.6 (b) ve şekil 3.6 (c)'de içteki solenoidlerin yarıçapı 10 mm ve dıştakilerin 12.5 mm'dir. Her solenoidin 100 sarımı bulunmaktadır ve $a_1 = 3$ mm dir. Şekil 3.6 (b)'deki sistem için solenoidlerin her iki çiftinde $a_2 = 7$ mm uzunluğuna sahiptir. Akımlar, I_1 ve I_2 , denklem (3.9)'u sağlayacak şekilde seçilmiştir.

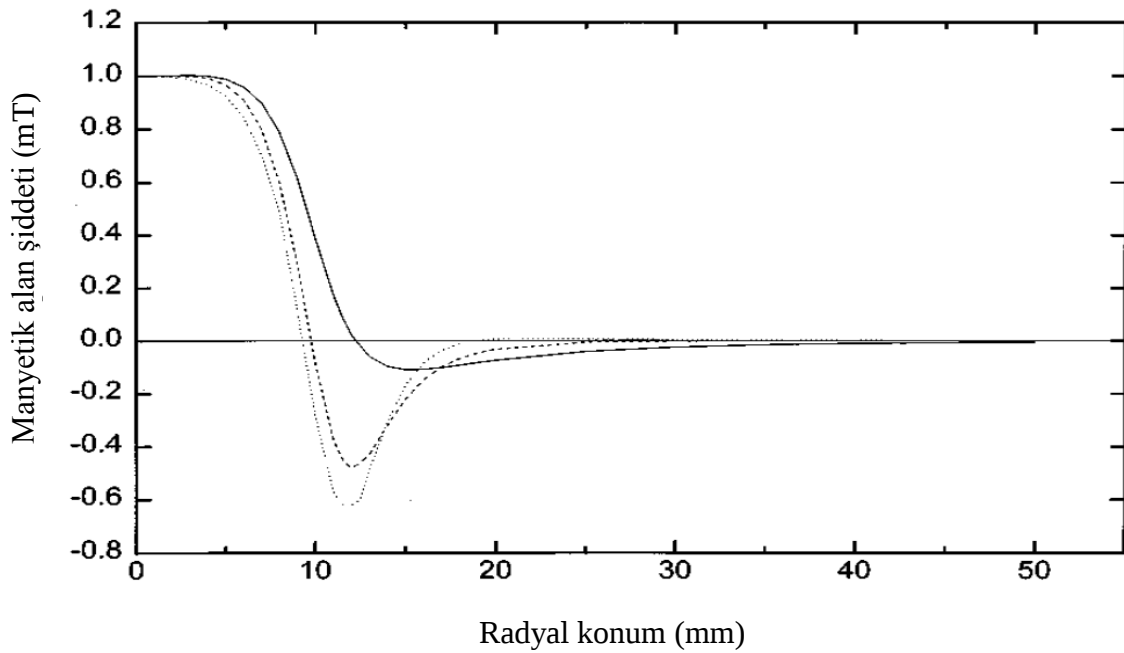
Şekil 3.6 (c)'deki sistem için içteki çift $a_{21} = 6.76$ mm ve dıştaki çift $a_{22} = 9.00$ mm dir. Her iki durumda denklem (3.14)'ü sağlayacak şekilde seçilmiştir ve I_1 ve I_2 akımları denklem (3.9)'u sağlamaktadır. Dolayısıyla solenoidlerin tek bir çifti sıfırdan farklı dipol ve oktopol momentlere sahip iken iki çiftten oluşan sistemde dipol moment sıfırdır, fakat oktopol moment sıfırdan farklıdır. Bu sistem şekil 3.6 (b)'de gösterilmiştir. Şekil 3.6 (c)'de oluşacak sistemde ise hem dipol hem de oktopol terimler sıfırdır. Çizelge 3.2 merkez düzlemde oluşan manyetik alan şiddetinin ρ / R_1 uzaklığına

göre değişimini göstermektedir. Merkez düzlemde ρ 'nun bağımlılığı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Seçilmiş ρ/R_1 değerlerine karşı $B_z(\rho)/B_z(0)$ manyetik alan şiddet değerleri (Read and Channing 1996).

ρ / R_1	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0
(a) $M_{10} \neq 0, M_{30} \neq 0$	1.00	$-4,19.10^{-2}$	$-5,56.10^{-3}$	$-1,65.10^{-3}$	$-6,98.10^{-4}$
(b) $M_{10}=0, M_{30} \neq 0$	1.00	$6.82.10^{-3}$	$3,17.10^{-4}$	$4,29.10^{-5}$	$1,03.10^{-5}$
(c) $M_{10}=0, M_{30}=0$	1.00	$-6.64.10^{-3}$	$-4,40.10^{-5}$	$-2,43.10^{-6}$	$-3,05.10^{-7}$

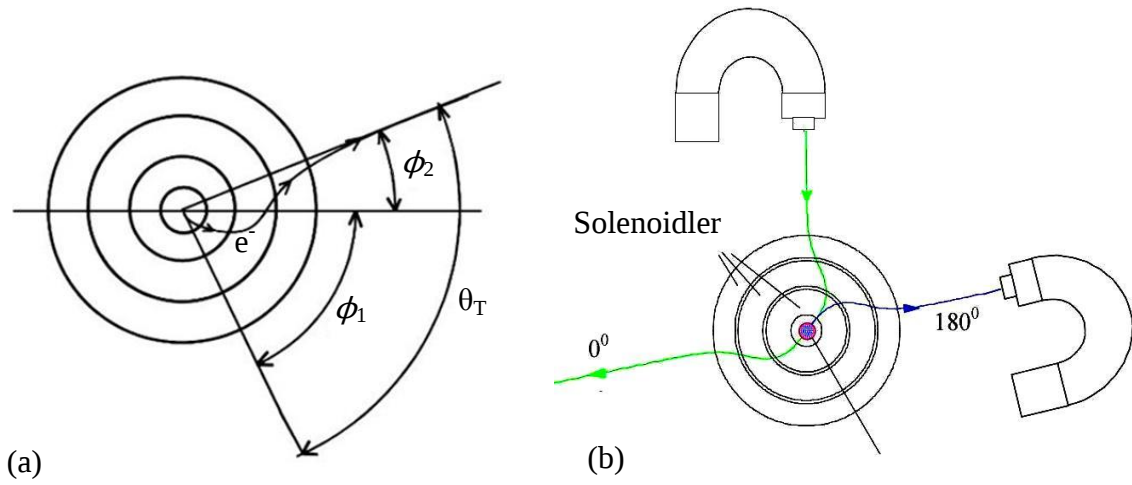
Çizelge 3.2 (a)'da tek çift solenoid için dipol ve oktopol terimler sıfırdan farklıdır. Çizelge 3.2 (b)'de ise iki çift solenoid Şekil 3.6 (b)'deki şekilde düzenlenen dipol terim sıfırlanır fakat oktopol terim sıfırdan farklıdır. Çizelge 3.2 (c)'de yine iki solenoid çifti Şekil 3.6 (c)'deki şekilde düzenlenirse hem dipol hem de oktopol terimler sıfırlanır.



Şekil 3.7 Radyal uzaklığa göre manyetik alan şiddeti (Read and Channing 1996).

3.4. Saptırma Açısının Parametreleri

MAC aygıtı ile saptırma işlemi yapılırken hangi enerjideki elektronların kaç derece saptırılacağı önemlidir. Diğer önemli bir nokta ise elektronların saptırılırken merkezden saçılma doğrultusunun değişmemesi gerekmektedir. Bu yüzden MAC aygıtının saptırma açısı parametrelerinin ve bunların enerjiye bağımlılığının belirlenmesi gerekir. Şekil 3.8’de saptırma açısının gösterimi ve elektron demetinin özel bazı açılardaki değişimi verilmiştir.



Şekil 3.8 a) Solenoidlerin merkezinde oluşan bir elektronun izlediği yörünge. Büyük uzaklıklarda, yörünge radyal olmaktadır. θ_T ise toplam saptırma açısıdır (Read and Channing 1996). b) 0° ve 180° açılarda saçılan elektron yörüngelerinin gösterimi (Juarez 2002).

3.5. Saptırma Açısı ve Momentumun Korunumu

Bir yüklü parçacık, denklem (3.9) ve denklem (3.10)'daki koşulları sağlayan silindirik simetriye sahip bir solenoid sisteminin merkezine doğru, uzak bir konumdan radyal bir doğrultuda gönderildiğinde, MAC aygıtı tarafından oluşturulan manyetik alan sonucu belirli bir açıya saptırılmakta ve r uzaklığında radyal bir doğrultuya sahip olmaktadır. Bu özelliğin kaynağı, bir doğrultu boyunca hareket eden yüklü parçacıkların düzgün bir manyetik alan etkisi altındayken momentumun (p_ϕ) korunumu ilkesinden ileri gelmektedir (Channing 1998). M kütleline, $\vec{v}$ hızına ve q yüküne sahip bir parçacığın, düzgün bir manyetik alan içindeki hareketinin lagrange ifadesi denklem (3.15)'de verilmiştir.

$$L = \frac{1}{2}mv^2 + q\vec{v} \cdot \vec{A}_\phi(r, z) \quad (3.15)$$

Denklem (3.15)'te ilk terim parçacığın kinetik enerjisini, ikinci terim ise manyetik alan tarafından enerjiye gelen katkıyı göstermektedir. Parçacığın sahip olduğu momentum bileşenleri r , z ve ϕ ye bağlı olarak

$$\pi_r = m\dot{r} \quad (3.16)$$

$$\pi_z = m\dot{z} \quad (3.17)$$

$$\pi_\phi = mr^2\dot{\phi} + qr A_\phi \quad (3.18)$$

şeklinde tanımlanır (Landau 1986). Sistemin hamiltonyeni

$$H = \frac{p^2}{2m} = \frac{(\pi - qA)^2}{2m} = sbt \quad (3.19)$$

şeklindedir. Burada $r=0$ için $\pi_\phi = 0$ olacaktır. Buna göre H 'ın ϕ 'ye göre kısmi türevi sıfır olduğundan

$$p_\phi = \frac{\partial H}{\partial \dot{\phi}} = -\frac{\partial \pi_\phi}{\partial t} = 0 \quad (3.20)$$

olmaktadır. Burada manyetik vektör potansiyeline katkıda bulunan tek terim azimutal bileşen olan $A_\phi(r,z)$ dir. Buna göre momentum,

$$p_\phi = mr^2\dot{\phi} + q r A_\phi = c \quad (3.21)$$

olmaktadır. Burada c bir sabittir. Eğer bir parçacık solenoidlerin merkezinde oluşursa, r sıfır olduğundan p_ϕ de sıfır olmaktadır. Büyük r değerlerinde dipol ve oktopol terimleri etkilerini kaybettikleri için A_ϕ sıfıra doğru gitmektedir. Dolayısıyla p_ϕ korunduğu için ϕ 'de büyük r değerlerinde sabit bir değer almaktadır.

Düzgün bir manyetik alan içindeki parçacıkların nasıl bir yörünge izlediklerini veren ifade denklem (3.22)'de gösterilmektedir.

$$\alpha_p = \int_{\phi_i}^{\phi_s} d\phi = -\frac{e}{mv} \int_{r_i}^{r_s} \frac{A_\phi}{\rho} dr \quad (3.22)$$

$\vec{B}$ manyetik alanı, $\vec{A}$ vektör potansiyelinin rotasyoneli olarak tanımlanır.

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (3.23)$$

Denklem (3.23), denklem (3.22)'de yerine yazılırsa, r_i ve r_s sınırları içindeki bir elektronun saptırma açısı parametresi,

$$\alpha_p = -\frac{e}{mv} \int_{r_i}^{r_s} B_z dr \quad (3.24)$$

olmaktadır.

Eğer bir elektron solenoidlerin merkezinde üretilirse ve ilk açısı gelen demetin polarizasyonuna göre ϕ_1 ve saptırmadan sonraki açısı uzak r değerleri için ϕ_2 olarak kabul edilirse toplam saptırma açısı θ_T ,

$$\theta_T = |\phi_2 - \phi_1| \quad (3.25)$$

şeklinde tanımlanır. Bu durum Şekil 3.8’de şematik olarak gösterilmiştir. Toplam saptırma açısı θ_T bu açı aralığında 0° den 95° ye kadar aşağıdaki şekilde tanımlanabilir (Read and Channing 1996).

$$\theta_T = \alpha_p = a \cdot \arcsin(k\beta) \quad (3.26)$$

Burada, β normalizasyon parametresidir ve bir referans akımının I_{ref} detekte edilen elektronun kinetik enerjisi (E)’ne oranı olarak tanımlanır (Denklem 3.27). Referans akımı I_{ref} , solenoid 1’den geçen akımdır ve solenoidlerin merkezinde oluşan B_0 manyetik alanı ile doğru orantılıdır.

$$\beta = I_1 E^{-1/2} \quad (3.27)$$

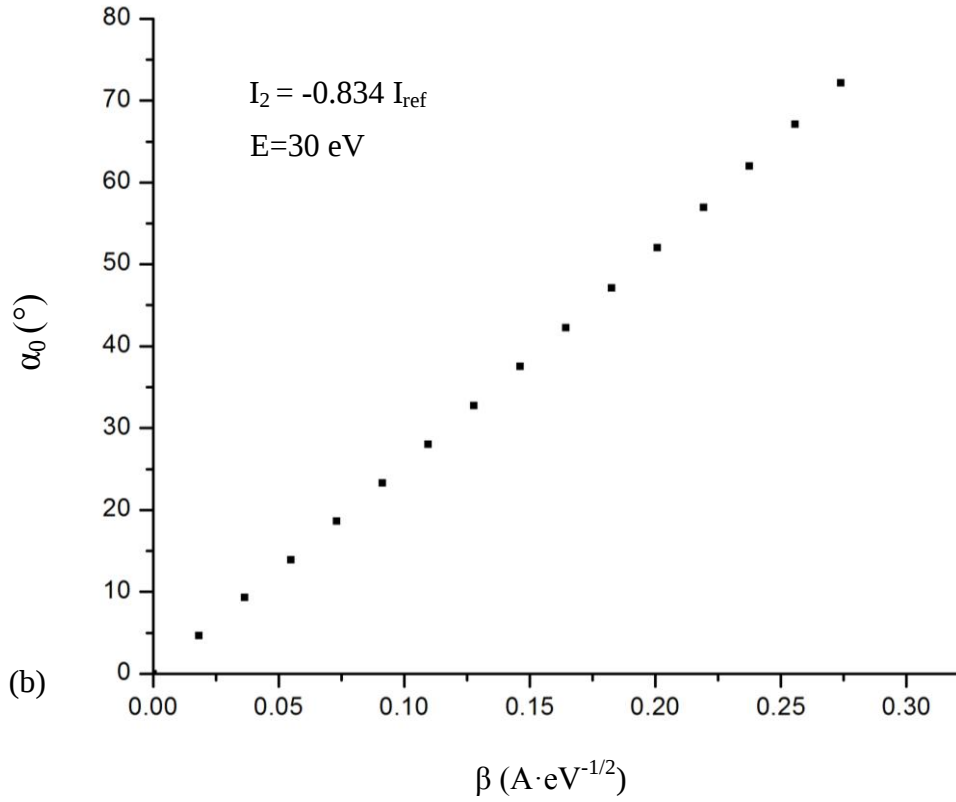
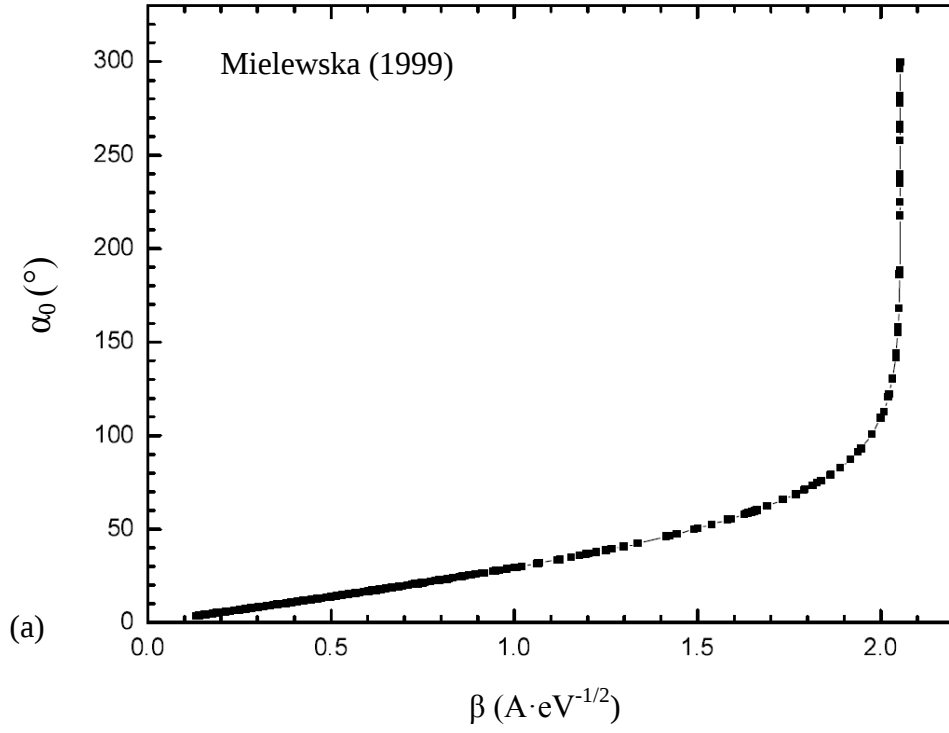
Buna göre saptırma açısı parametresi, β iş fonksiyonu cinsinden

$$\alpha_p = a \arcsin \frac{k I_1}{\sqrt{E}} \quad (3.28)$$

olarak ifade edilir. Burada a ve k, dipol ve oktopol şartları sağlayan geometriye ait olan sabitlerdir. Çizelge 3.3’te 30 eV enerjili elektronlar saptırma açısı (α_p)’nin β iş fonksiyonuna bağlı olarak değişimi verilmiştir (Şekil 3.9). Manyetik açı değiştiriciyi yaklaşık olarak lineer bir aralıkta tutmak için bunun mümkün olduğunca küçük saptırma açılarında kullanılması gerekmektedir.

Çizelge 3.3 İki solenoidli bir MAC aygıtı tarafından saptırılan 30 eV enerjili elektronların hesaplanan saptırma açıları ($I_2 = -0.834 I_{\text{ref}}$).

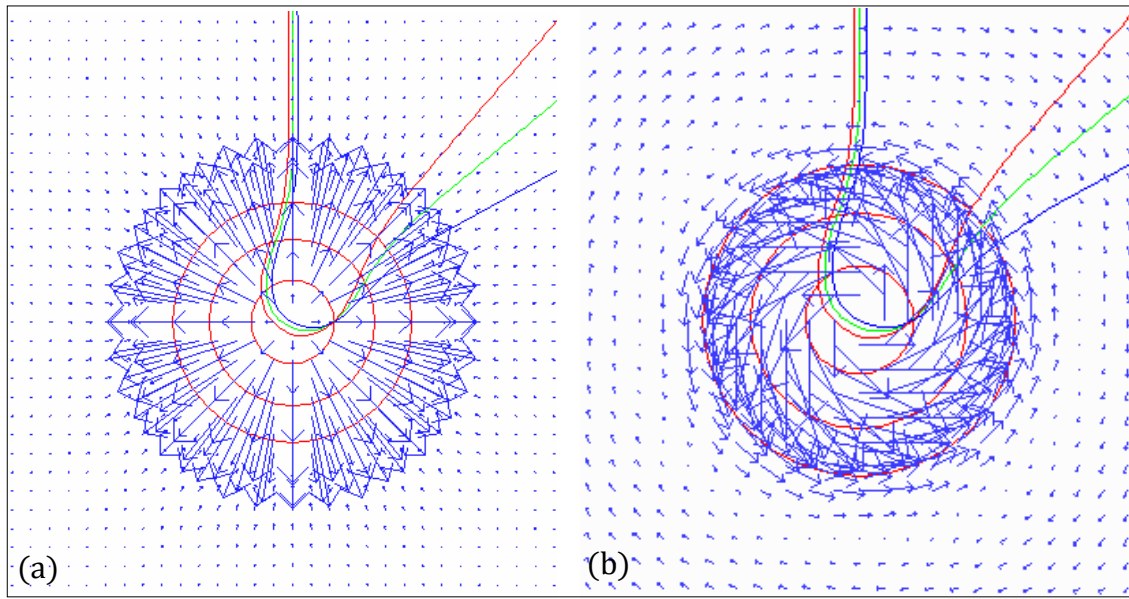
I_{ref} (A)	β (A·eV ^{-1/2})	α_0 (°)	I_{ref} (A)	β (A·eV ^{-1/2})	α_0 (°)
0	0.00	0.00	0.8	0.15	37.53
0.1	0.02	4.64	0.9	0.16	42.26
0.2	0.04	9.29	1	0.18	47.11
0.3	0.05	13.95	1.1	0.20	52.01
0.4	0.07	18.62	1.2	0.22	56.96
0.5	0.09	23.31	1.3	0.24	62.01
0.6	0.11	28.02	1.4	0.26	67.08
0.7	0.13	32.77	1.5	0.27	72.19



Şekil 3.9 Sapıtırma açısı (α_0)'nın β iş fonksiyonuna bağlı olarak değişimi.

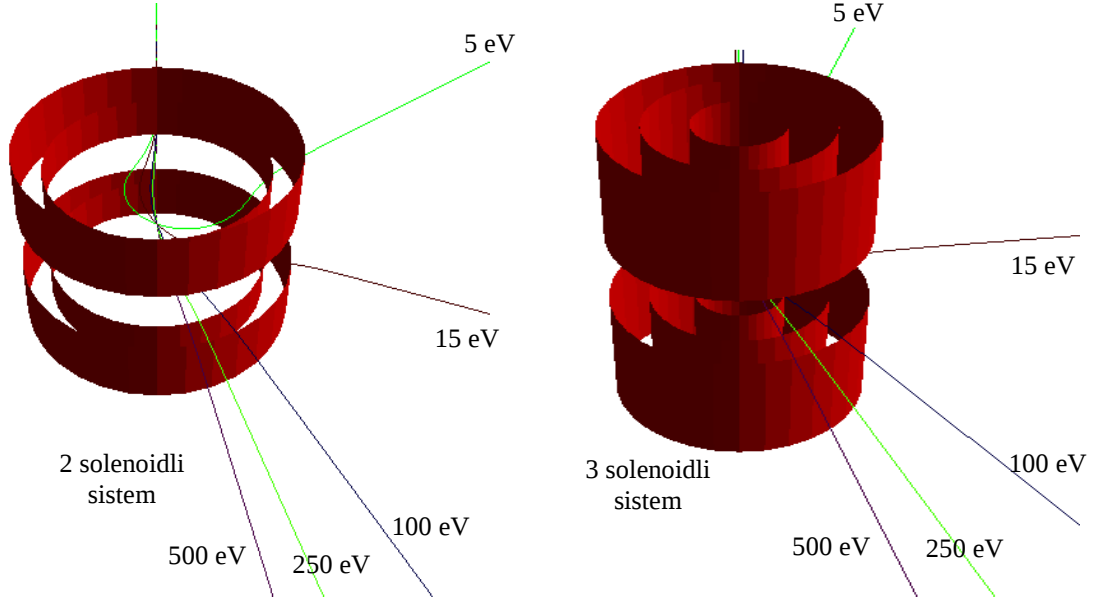
3.6. MAC Aygıtının Simülasyonu

CPO Simülasyon programı ile solenoidlere uygulanan akımların boşlukta oluşturdukları manyetik alan ve yüklü parçacıkların bu manyetik alanda izledikleri yörüngeler hesaplanabilmektedir. Simülasyon ile yüklü parçacıkların manyetik alan içinde nasıl bir yörüngeye sahip olduğu incelenebilir (Şekil 3.10). Odaklama ve saptırma katsayıları gibi karakteristik özellikler hesaplanabildiğinden değişik geometri ve boyutlarda sistemler tasarlanabilir ve test edilebilir.



Şekil 3.10 a) MAC aygıtı tarafından oluşturulan manyetik alanın demete etkisi. (a) Manyetik alan çizgilerinin yönelimi. (b) Manyetik vektör potansiyel çizgilerinin yönelimi.

Şekil 3.11’de CPO programıyla oluşturulan iki ve üç solenoidli ideal MAC aygıtlarının simülasyonu, üç boyutta elektron yörüngeleriyle birlikte gösterilmektedir.



Şekil 3.11 İki ve üç solenoidli sistemlerdeki 5-500 eV için saptırma etkileri (Cırık ve ark. 2010).

4. BULGULAR

4.1 İki ve Üç Solenoidli Sistemlerde Manyetik Alan Şiddeti

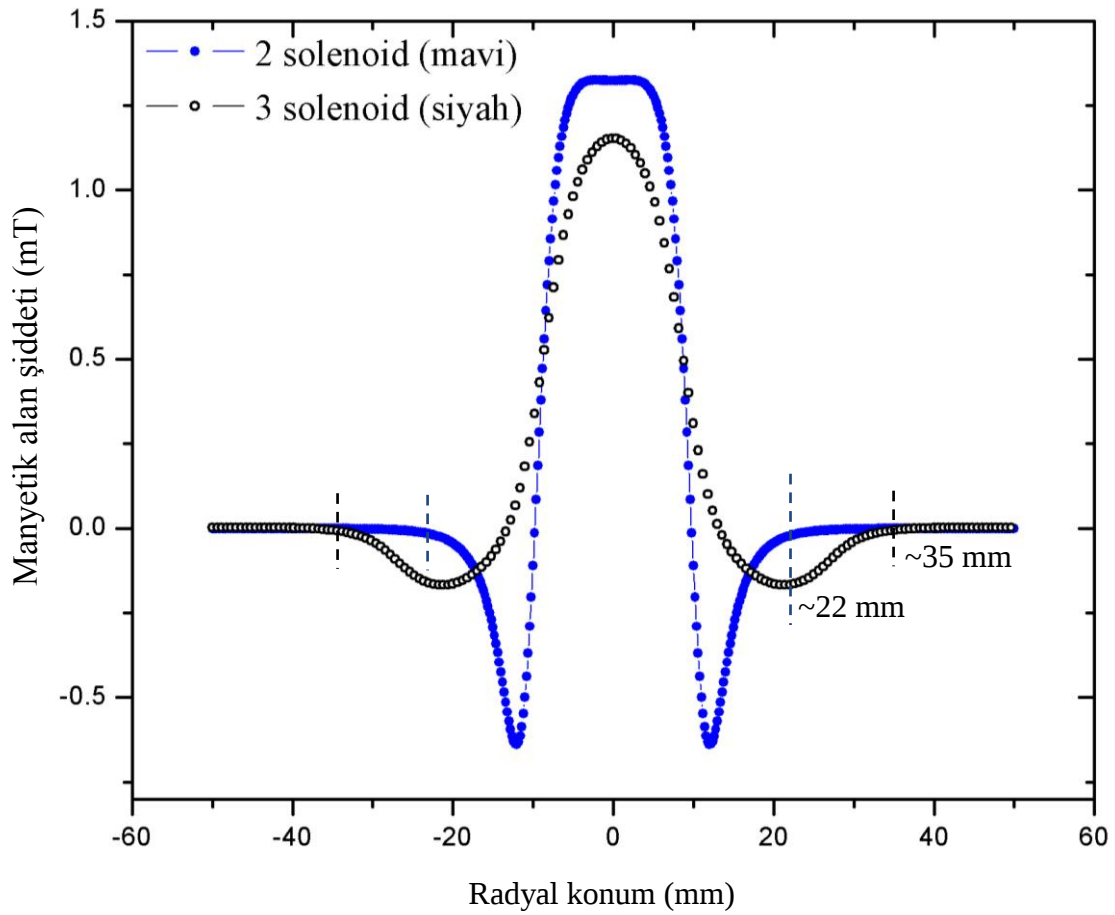
İdeal geometrileri belirlenen iki ve üç solenoidli iki MAC aygıtı CPO programı kullanılarak modellenmiştir. Belirli sarım sayılarına sahip solenoidlere, akımlar uygulanarak radyal uzaklığa göre manyetik alan şiddetinin değişim grafiği çizdirilmiştir (Şekil 4.1).

İki solenoidli MAC aygıtı için iç solenoid yarıçapı $R_1=10\text{mm}$ ve dış solenoid yarıçapı $R_2=12.5\text{mm}$ dir. Üç solenoidli MAC aygıtı için $R_1=4.5\text{mm}$, $R_2=9\text{mm}$ ve $R_3=13.5\text{ mm}$ dir. Analizörler, MAC aygıtının merkezinden 50 mm uzaklıkta bulunmaktadır. Bu nedenle, Çizelge 4.1’de iki ve üç solenoid çifti için manyetik alan şiddetinin $x = \pm 50\text{ mm}$ ‘deki değişimine yer verilmiştir.

Çizelge 4.1 İki ve üç solenoidli sistemler için uzaklığa bağlı manyetik alan şiddetinin değişimi.

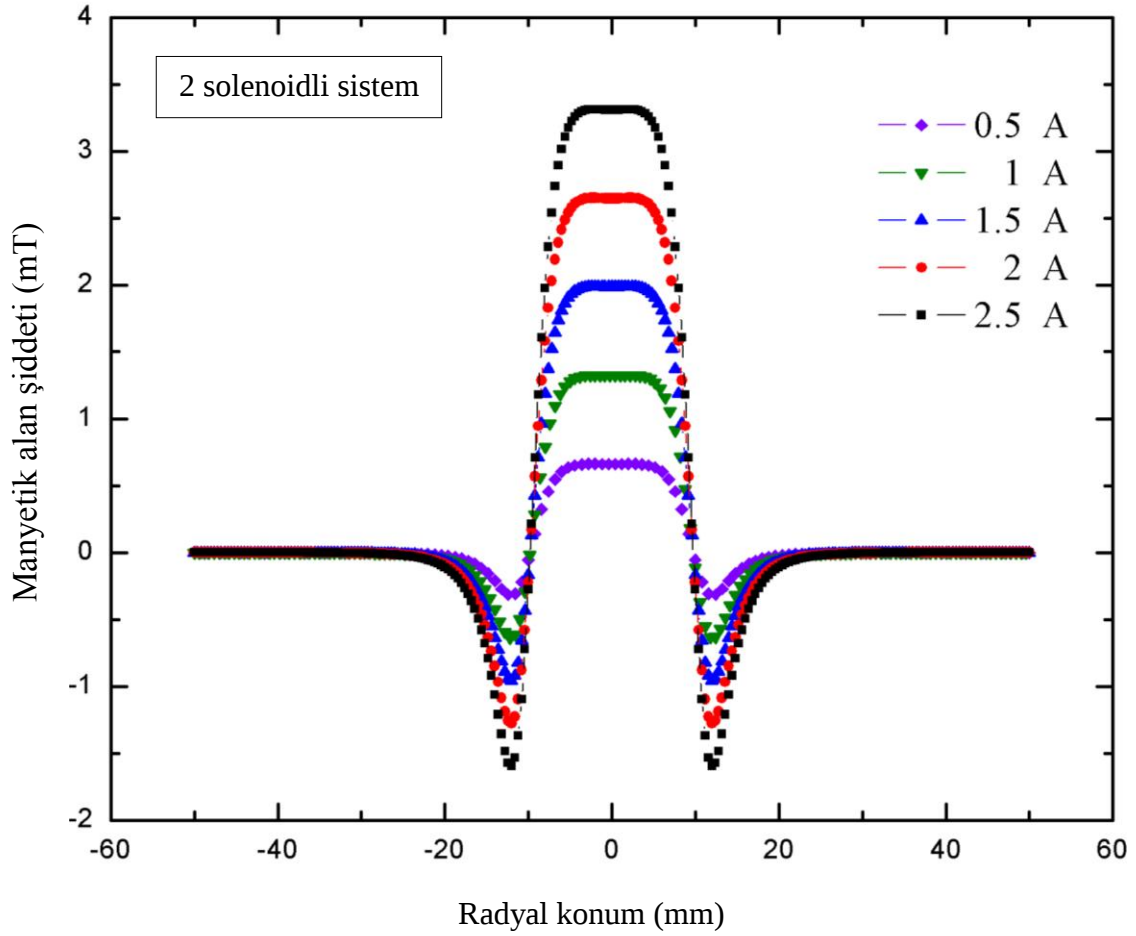
2 Solenoidli Sistem				3 Solenoidli Sistem			
x (mm)	$B_z(\text{T})$	x (mm)	$B_z(\text{T})$	x (mm)	$B_z(\text{T})$	x (mm)	$B_z(\text{T})$
-50	$-1.18 \cdot 10^{-7}$	0	$2.65 \cdot 10^{-3}$	-50	$5.30 \cdot 10^{-6}$	0	$2 \cdot 10^{-3}$
-40	$5.81 \cdot 10^{-7}$	10	$-2.22 \cdot 10^{-4}$	-40	$1.84 \cdot 10^{-6}$	10	$9.33 \cdot 10^{-4}$
-30	$-4.66 \cdot 10^{-6}$	20	$-8.75 \cdot 10^{-5}$	-30	$-1.4 \cdot 10^{-4}$	20	$-4.01 \cdot 10^{-4}$
-20	$-8.75 \cdot 10^{-5}$	30	$-4.66 \cdot 10^{-6}$	-20	$-4.01 \cdot 10^{-4}$	30	$-1.4 \cdot 10^{-4}$
-10	$-2.22 \cdot 10^{-4}$	40	$5.81 \cdot 10^{-7}$	-10	$9.33 \cdot 10^{-4}$	40	$1.84 \cdot 10^{-6}$
0	$2.65 \cdot 10^{-3}$	50	$-1.18 \cdot 10^{-7}$	0	$2 \cdot 10^{-3}$	50	$5.30 \cdot 10^{-6}$

Şekil 4.1’de CPO-3D yüklü parçacık optiği simülasyon programı kullanılarak elde edilen iki ve üç solenoidli sistemler için uzaklığa bağlı manyetik alan şiddetinin değişim grafiği verilmiştir. MAC aygıtının merkezine doğru gönderilen elektronları 45° saptırmak için solenoidlere uygulanan akım değerleri iki ve üç solenoidli sistemler için sırasıyla $I_1:I_2 = 1:-0.834$ A ve $I_1:I_2:I_3 = 0.3:0.21:-0.126$ A’dır. MAC aygıtı tarafından saptırılan elektronlar, iki solenoidli sistemde aygıtın merkezinden 22 mm uzaklıkta, üç solenoidli sistemde aygıtın merkezinden 35 mm uzaklıkta radyal doğrultularına ulaşmaktadır.



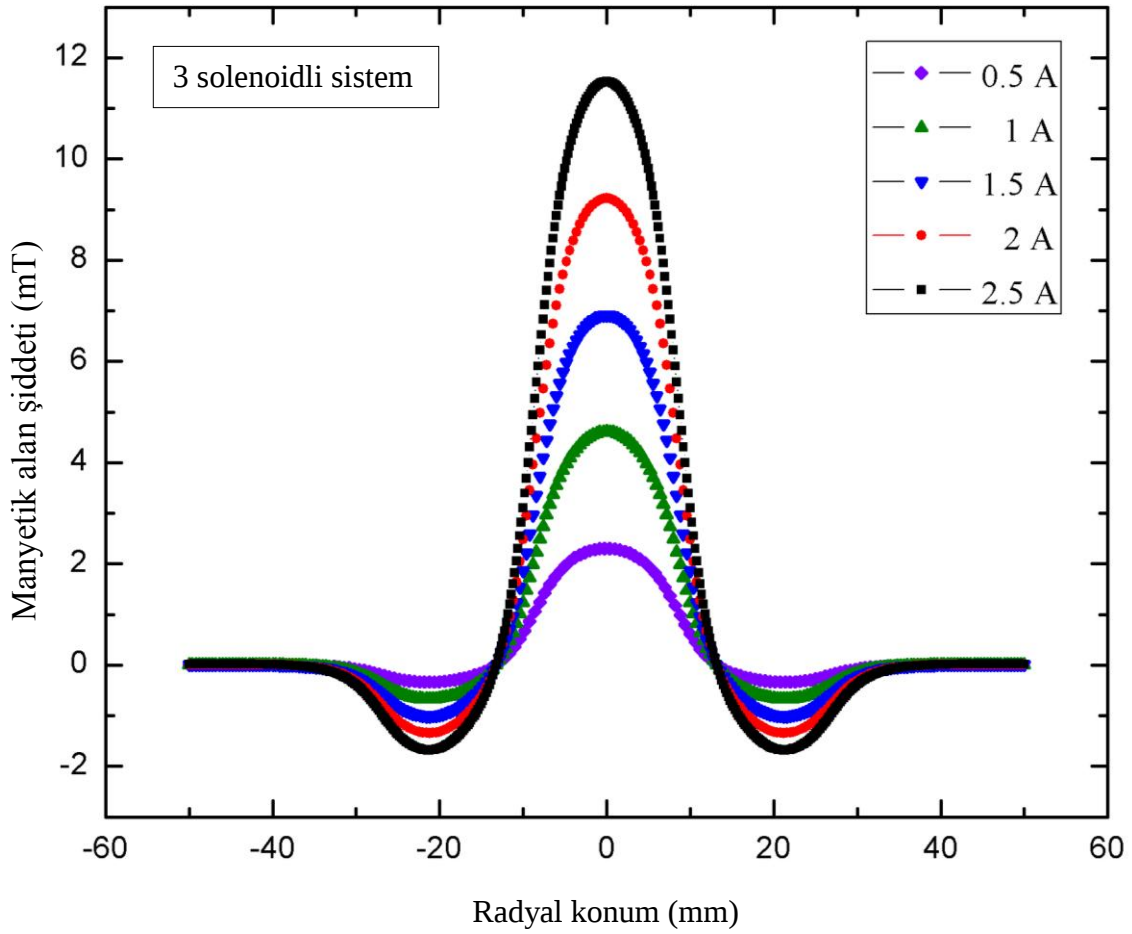
Şekil 4.1 CPO-3D yüklü parçacık optiği simülasyon programı kullanılarak elde edilen iki ve üç solenoidli sistemler için uzaklığa bağlı manyetik alan şiddetinin değişimi grafiği.

Şekil 4.2’de iki solenoidli bir MAC aygıtının beş ayrı durum için dipol ve oktopol şartların birlikte sağlandığı I_{ref} (iç solenoid) ve I_2 (dış solenoid) akımlarının oluşturduğu manyetik alanın radyal uzaklığa göre değişimi verilmiştir. Solenoidlere uygulanan akım değerleri yükseldikçe saptırılan demetin radyal bir doğrultuya en erken ulaşma mesafesi de artmaktadır.



Şekil 4.2 İki solenoidli sistemde, İç solenoid akımı $I_{ref}=0.5, 1, 1.5, 2$ ve 2.5 A için manyetik alan şiddetinin radyal uzaklığa göre değişimi ($I_2=-0.834 I_{ref}$).

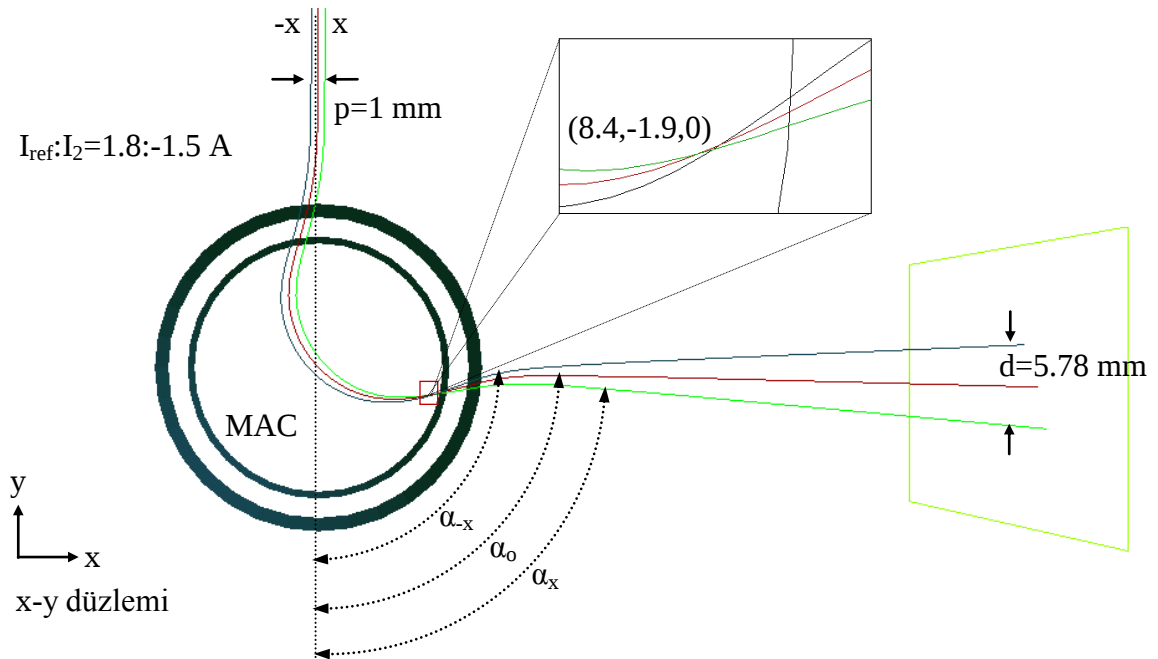
Şekil 4.3'te üç solenoidli bir MAC aygıtının beş ayrı durum için dipol ve oktopol şartların birlikte sağlandığı I_{ref} (iç solenoid), I_2 (orta solenoid) ve I_3 (dış solenoid) akımlarının oluşturduğu manyetik alanın radyal uzaklığa göre değişimi verilmiştir. İki solenoidli sistemde olduğu gibi, solenoidlere uygulanan akım değerleri yükseldikçe saptırılan demetin radyal bir doğrultuya en erken ulaşma mesafesindeki artışın üç solenoidli bir sistem için de geçerli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3 İç solenoid akımı $I_{ref}=0.5, 1, 1.5, 2$ ve 2.5 A için manyetik alan şiddetinin radyal uzaklığa göre değişimi ($I_2=0.7 I_{ref}$).

4.2. Saptırılan Elektronların Yörüngelerinin Hesaplanması

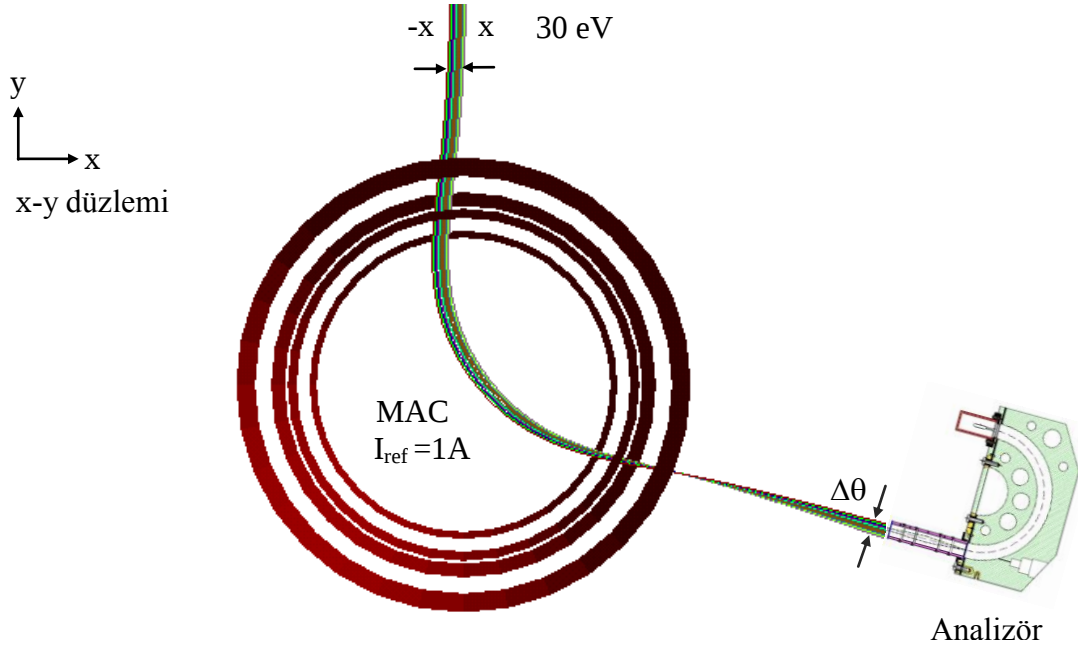
Elektron yörüngelerini hesaplamak ve açısal dağılımları belirleyebilmek için MAC aygıtı, yüklü parçacık optiği simülasyon programı CPO-3D kullanılarak modellenmiştir. MAC aygıtının odaklama etkisi etkileşme bölgesinin farklı bölgelerinde oluşturulan elektronların yörüngelerinin incelenmesiyle belirlenmiştir. Şekil 4.4'te iki solenoidli bir MAC aygıtının elektron yörüngeleri üzerine etkileri gösterilmiştir. Gönderilen elektronlara ait saptırma açıları sırasıyla $\alpha_{-0.50}=91.8^\circ$ (mavi), $\alpha_0=88.44^\circ$ (kırmızı), $\alpha_{0.50}=85.18^\circ$ (yeşil) dir. (0,50,0) noktasındaki demet kalınlığı 1 mm, aygıttan 50 mm uzaklıkta (50,0,0) noktasındaki demet kalınlığı ise 5.78 mm olarak ölçülmüştür. Büyütme oranı $\gamma=d/p=5.78$ ve demetin $\Delta\theta$ açısal dağılımı 6.62° olarak hesaplanmıştır. MAC aygıtı tarafından saptırılan elektronların, aygıtın (8.4,-1.9,0) noktasında odaklandığı gözlenmiştir.



Şekil 4.4 (-0.5,50,0), (0,50,0), (0.5,50,0) noktalarından MAC aygıtının merkezine doğru gönderilen 30 eV enerjili elektronların, aygıt tarafından saptırıldıktan sonraki hesaplanan elektron yörüngeleri.

4.3. MAC Aygıtının Odaklama ve Dağıtma Özellikleri

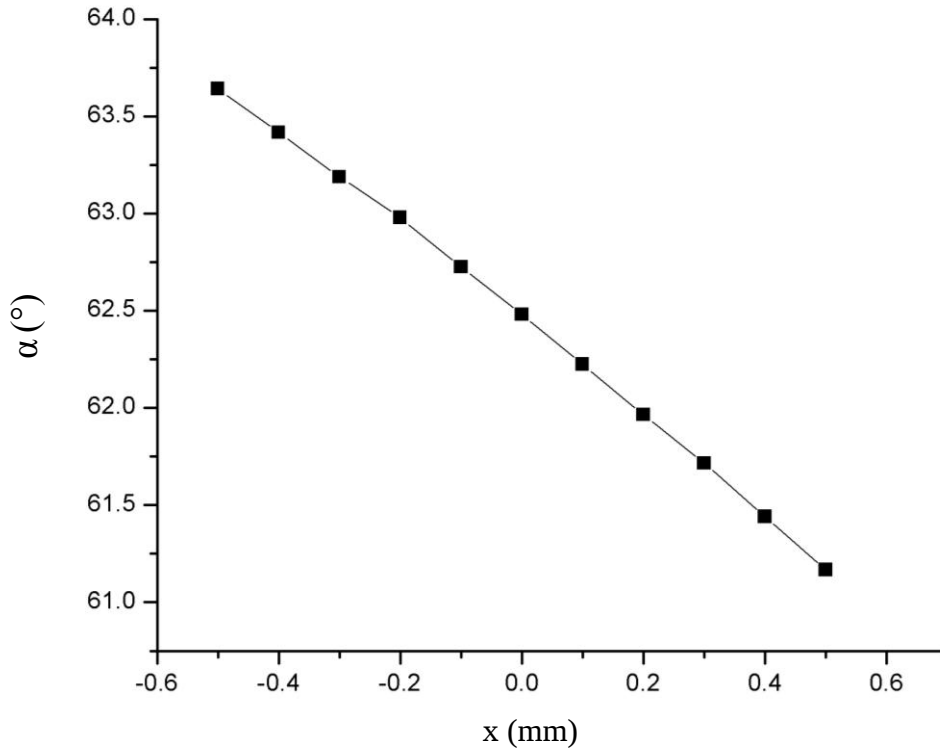
MAC aygıtının saptırılan elektronlar üzerinde odaklama etkilerinin olduğu gösterilmiştir (Read and Channing 1996). Bu etkiler detekte edilen elektron demetinin şiddetinde değişiklikler oluşturabilir. Fakat bu şiddet değişimleri helyum atomundan elde edilen normalizasyon spektrumlarıyla düzeltilebilir. Bu etkilerin aynı zamanda elektron yörüngelerinde ek açısal dağılımlara ($\Delta\theta$) neden oldukları görülmektedir. Bu etkilerin en aza indirilmesi için mümkün olan en ideal MAC geometrisi ve solenoidlere uygulanacak en uygun akım çiftleri belirlenmelidir. Deneylerde etkileşme bölgesi sonlu bir büyüklüğe sahip olduğu için açısal etkilerin kantitatif olarak hesaplanması gereklidir. Böylece ölçümlerin açısal çözünürlüğe etkisi belirlenebilir. Şekil 4.5'te MAC aygıtı tarafından saptırılan elektronların açısal dağılımları gösterilmiştir. $(0,50,0)$, $(\pm 0.1,50,0)$, $(\pm 0.2,50,0)$, $(\pm 0.3,50,0)$, $(\pm 0.4,50,0)$, $(\pm 0.5,50,0)$ noktalarından $v_y=-1$ doğrultusunu izleyecek şekilde MAC aygıtının merkezine doğru gönderilen elektronların saptırma açıları çizelge 4.2'de verilmiştir. Saptırılan elektronların aygıtın merkezinden 50 mm uzaklıktaki açısal dağılımı 2.4° olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.5 MAC aygıtı tarafından saptırılan 30 eV enerjili elektronların açısal dağılımları. Demet kalınlığı girişte 1 mm dir. Analizör, MAC aygıtının merkezinden 50 mm uzaklıkta bulunmaktadır.

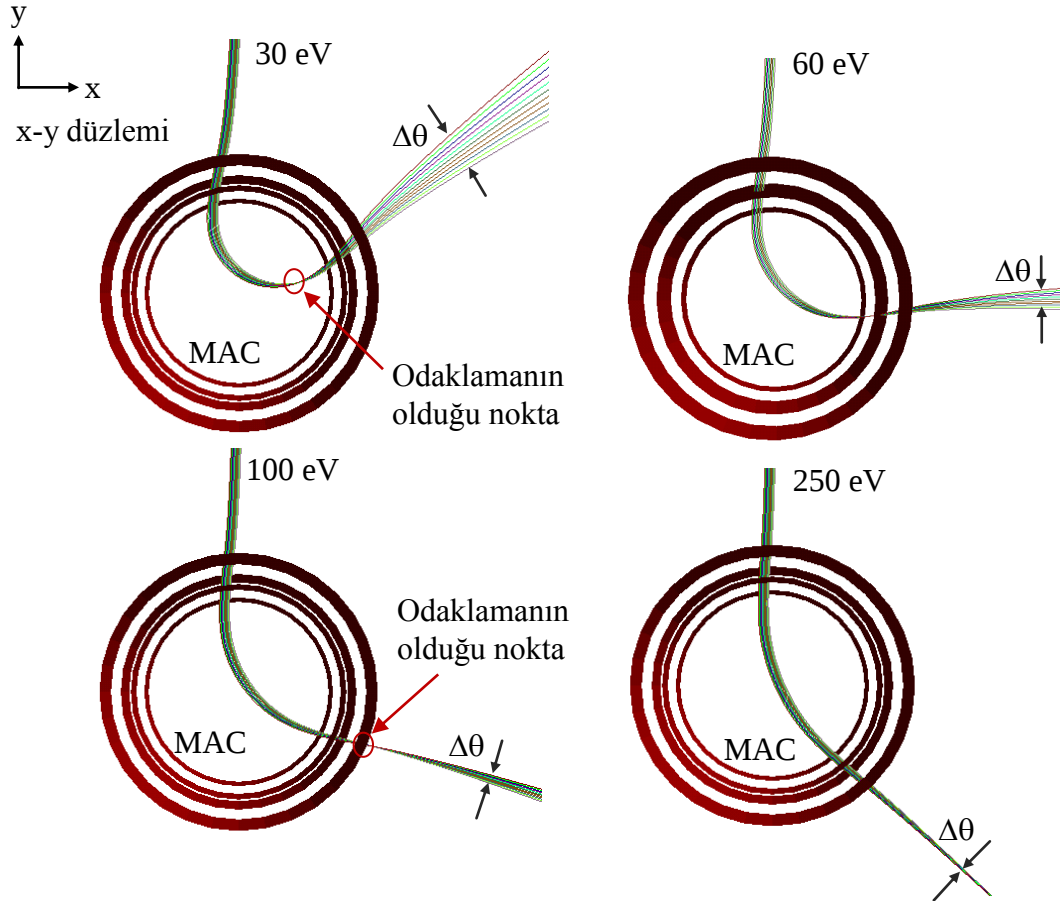
Çizelge 4.2 30 eV enerjili elektronların sapıtma açıları.

x (mm)	Sapıtma açısı α (°)	x (mm)	Sapıtma açısı α (°)
-0.5	63.64	0	62.48
-0.4	63.41	0.1	62.22
-0.3	63.18	0.2	61.96
-0.2	62.97	0.3	61.71
-0.1	62.72	0.4	61.44
0	62.48	0.5	61.16



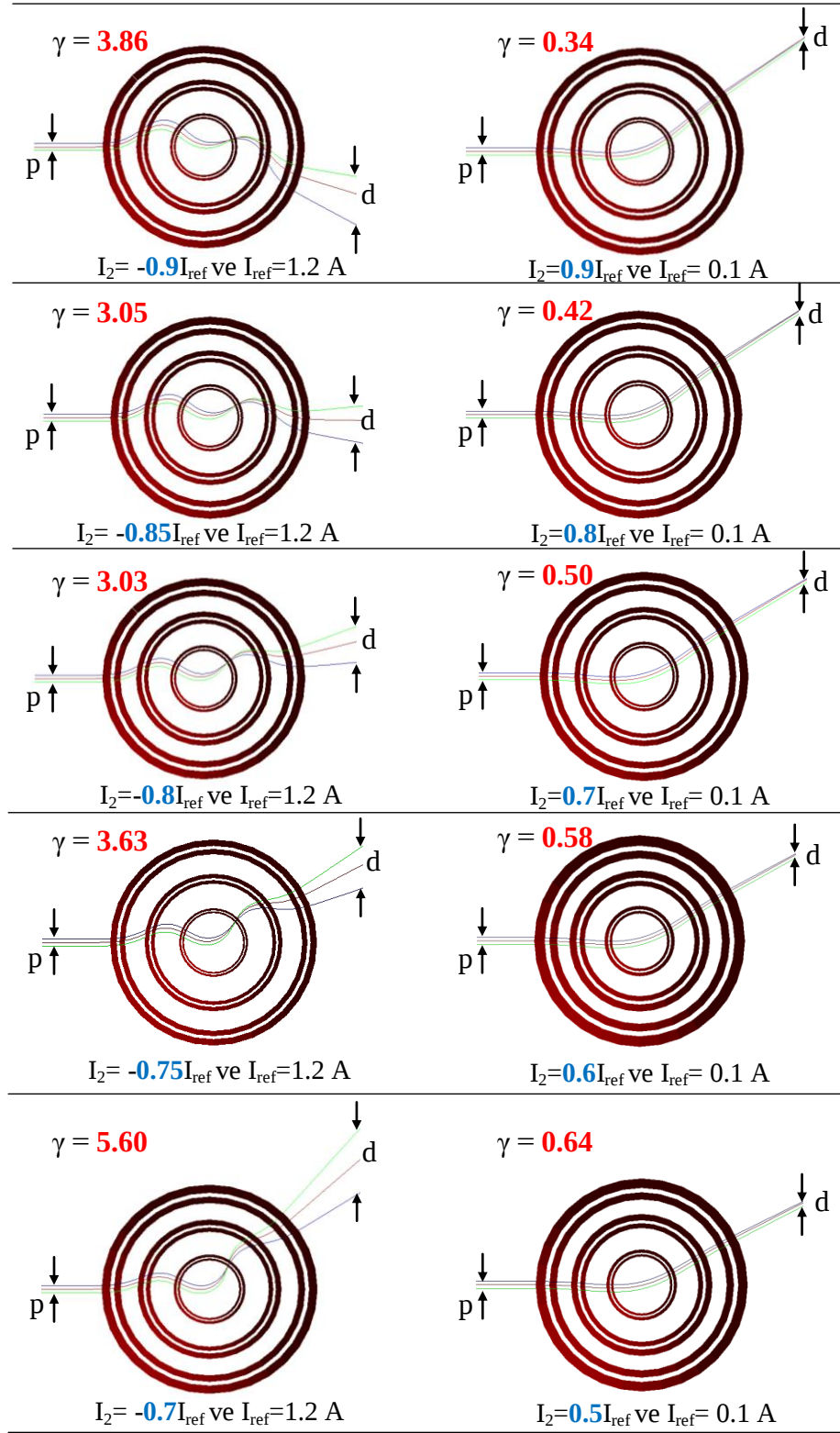
Şekil 4.6 MAC aygıtı tarafından sapıtılan 30 eV enerjili elektronların açısal dağılımları.

Şekil 4.7’de MAC aygıtı tarafından sapıtılan 30 eV, 60 eV, 100 eV ve 250 eV enerjilerdeki elektronların izlediği yörüngeler gösterilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda MAC aygıtının, sapıtılan elektronlar üzerinde odaklama özelliğinin olduğu görülmüştür (Şekil 4.7). MAC aygıtının merkezine doğru $v_y=-1$ doğrultusunu izleyecek şekilde gönderilen elektronların başlangıç konumları $(0,50,0)$, $(\pm 0.1,50,0)$, $(\pm 0.2,50,0)$, $(\pm 0.3,50,0)$, $(\pm 0.4,50,0)$, $(\pm 0.5,50,0)$ şeklindedir. Gönderilen elektronun enerjisi azaldıkça, elektronların MAC aygıtı tarafından sapıtıldıktan sonraki açısal dağılımını ifade eden $\Delta\theta$ ’nin arttığı görülmektedir. Bu da, aygıtın elektron yörüngeleri üzerinde bozulma etkisinin olduğunu göstermektedir.

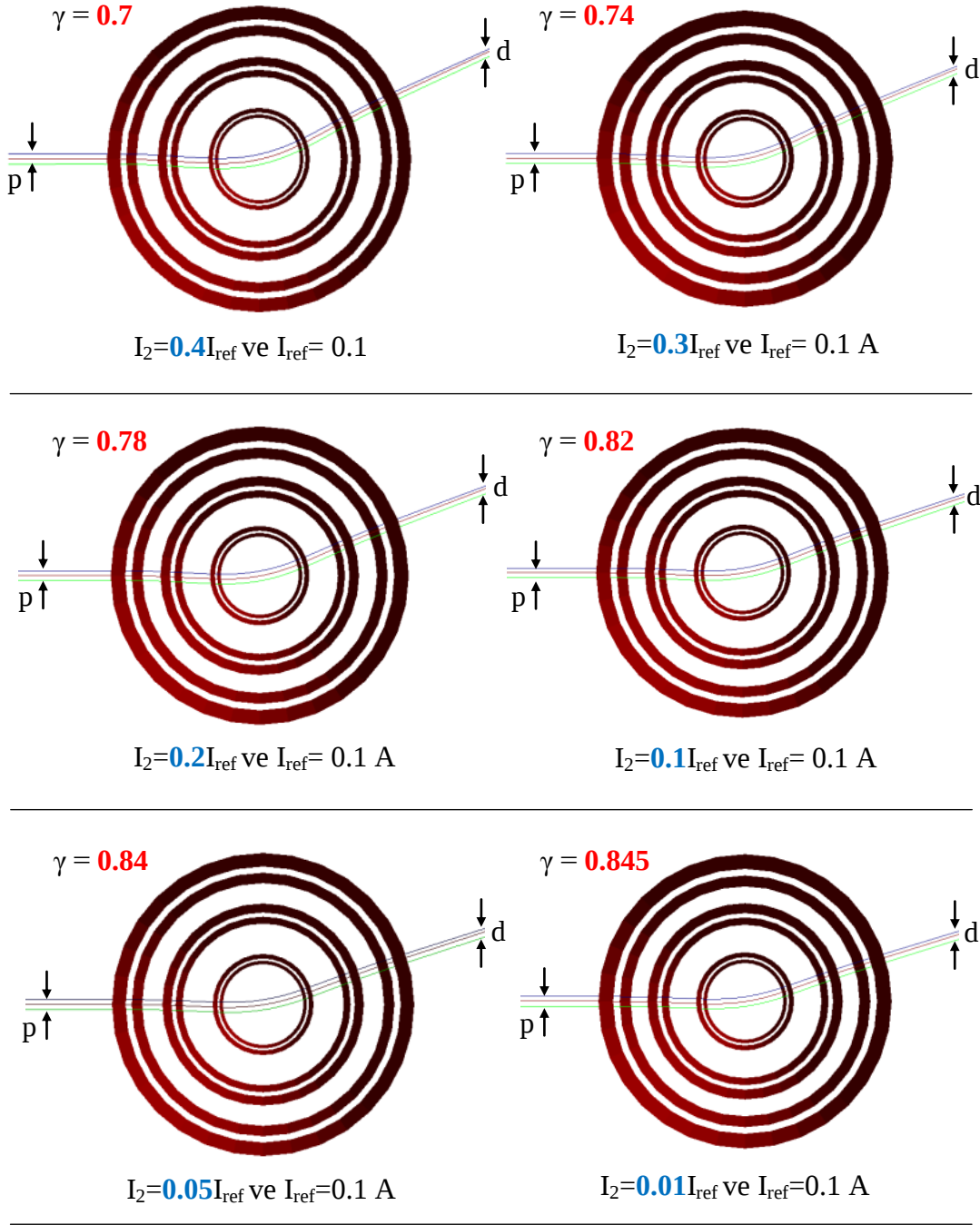


Şekil 4.7 MAC aygıtı tarafından sapıtılan elektronların izlediği yörüngeler. Solenoidlere uygulanan akım değerleri sırasıyla $I_{ref}=1A$, $I_2=-0.534 A$ dir.

MAC aygıtının, saptırılan elektronların yörüngeleri üzerindeki odaklama ve dağıtma etkilerini incelemek için bir büyütme parametresi (γ) tanımlanmıştır. Şekil 4.8’de üç solenodli bir MAC aygıtının $x=50$ mm uzaklıktaki odaklama ve dağıtma etkileri gösterilmiştir. İdeal büyütme oranı $\gamma=1:1$ olarak kabul edilerek, solenoidlere uygulanan akım değerlerine karşılık gelen büyütme oranları (γ) hesaplanmıştır. Her bir oran, elektron yörüngelerinin tek tek hesaplanması ile elde edilmiştir. İdeal bir saptırma için ($\gamma=0.845$), I_2/I_{ref} oranı 0.01 olarak belirlenmiştir.



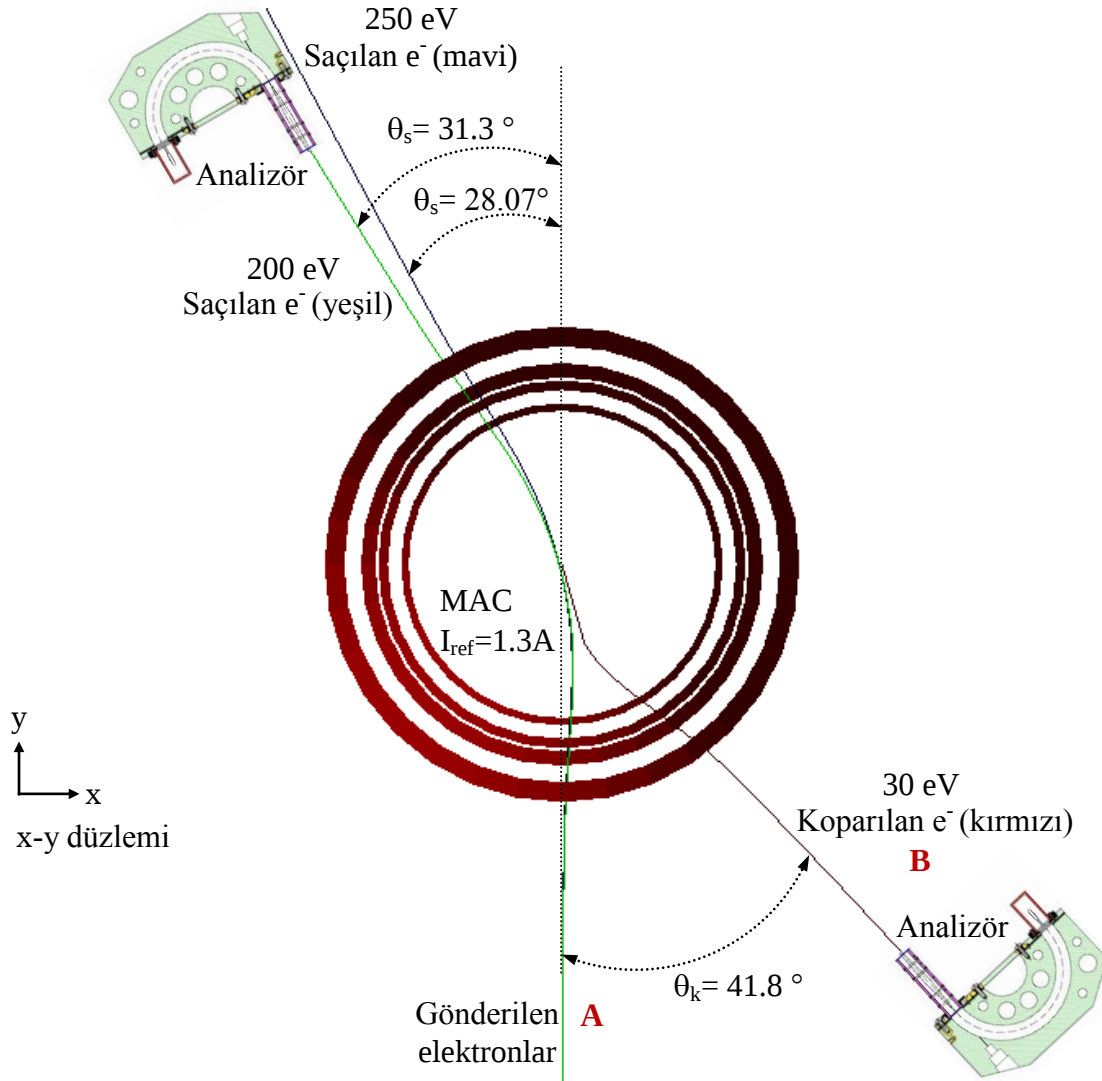
Şekil 4.8 Solenoidlere uygulanan akımlar, $I_2 = -I_{ref}$ için ayırma etkisi, $I_2 = +I_{ref}$ için odaklama etkisi sağlamaktadır. Solenoidlere uygulanan akım değerlerine karşılık gelen büyütme oranları (γ) hesaplanmıştır. Demet kalınlığı girişte 1 mm dir. İdeal saptırma şartı $I_2 = 0.01 I_{ref}$ için $\gamma = 0.845$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.8 (Devam) Solenoidlere uygulanan akımlar, $I_2 = -I_{ref}$ için ayırma etkisi, $I_2 = +I_{ref}$ için odaklama etkisi sağlamaktadır. Solenoidlere uygulanan akım değerlerine karşılık gelen büyütme oranları (γ) hesaplanmıştır. Demet kalınlığı girişte 1 mm dir. İdeal saptırma şartı $I_2 = 0.01 I_{ref}$ için $\gamma = 0.845$ olarak belirlenmiştir.

4.4. (e,2e) Deneylerinde MAC Aygıtının Kullanımı

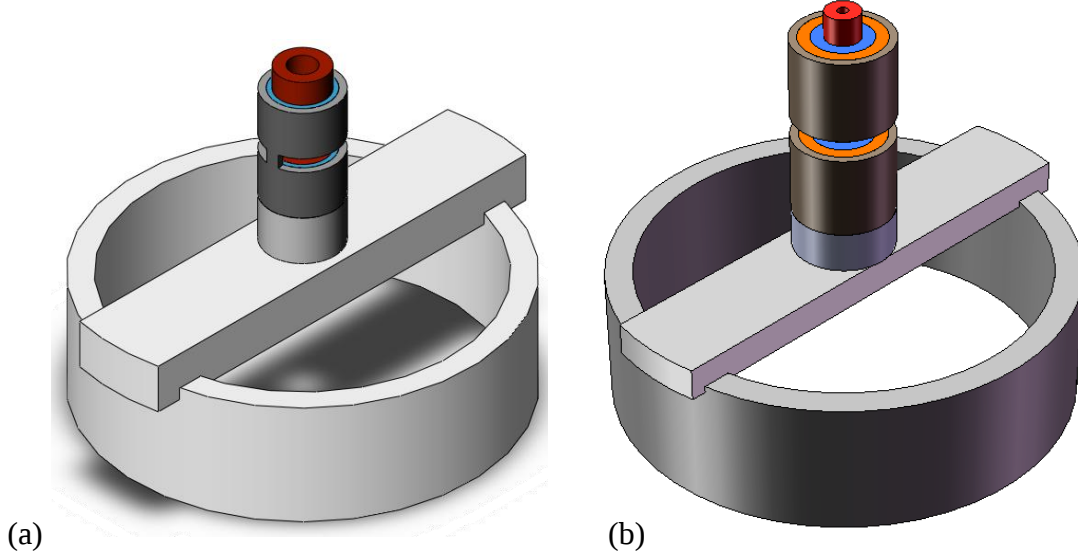
($x=0$, $y=-50$, $z=0$) noktasından MAC aygıtının merkezine doğru gönderilen ve $v_x=0$, $v_y=1$, $v_z=0$ doğrultusunu izleyen elektronlar MAC aygıtı tarafından sapıtılmıştır (Şekil 4.9). Gönderilen elektronların enerjileri sırasıyla 200 eV ve 250 eV dir. 200 eV enerjili elektronlar için sapıtma açısı $\theta_s = 31.3^\circ$, 250 eV enerjili elektronlar için sapıtma açısı $\theta_s = 28.07^\circ$ dir. (0,0,0) noktasında, aygıtın merkezinde oluşturulan, $v_y=-1$ doğrultusunu izleyen ve MAC aygıtı tarafından sapıtılan 30 eV enerjili elektronlar için sapıtma açısı $\theta_k = 41.8^\circ$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9 MAC aygıtı tarafından sapıtılan 30 eV, 200 eV ve 250 eV enerjili elektronların sapıtma açıları. Analizörler, MAC aygıtının merkezinden 50 mm uzaklıkta bulunmaktadır.

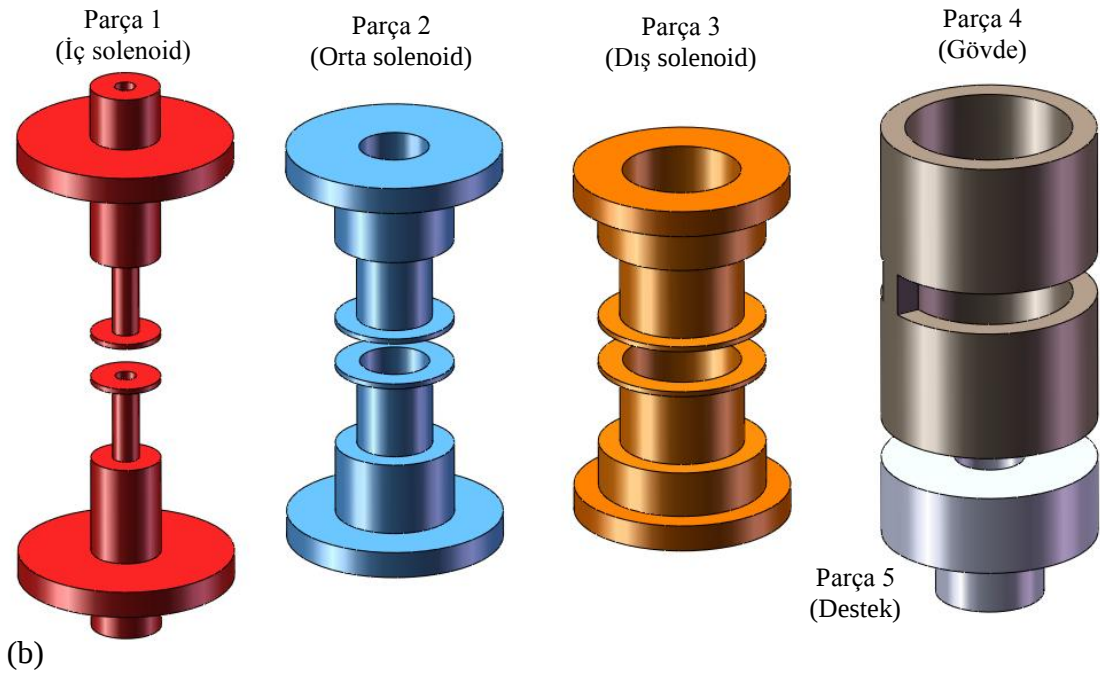
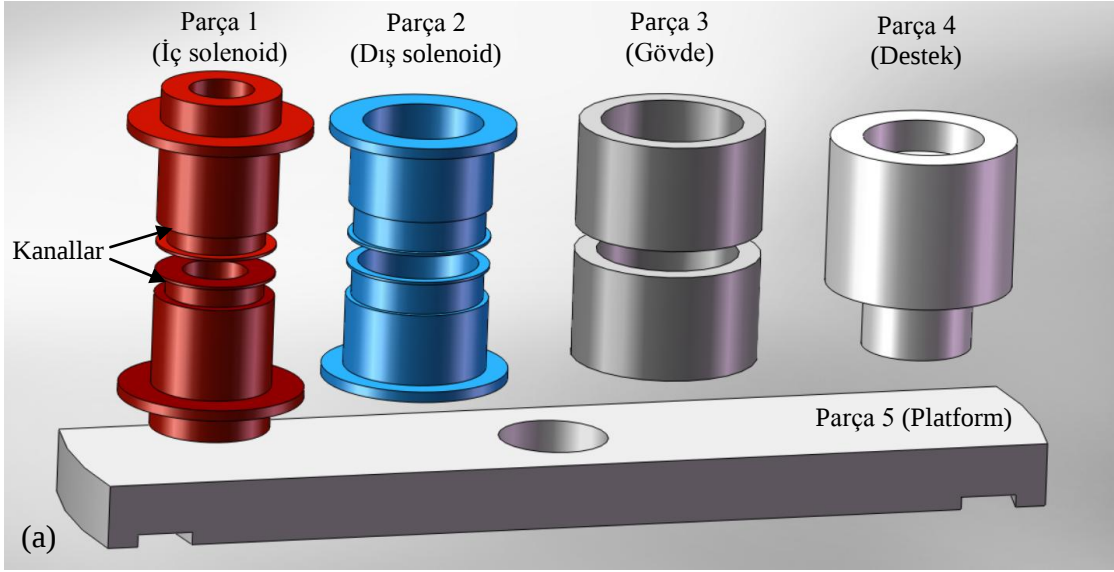
4.5. MAC Aygıtlarının 3D Çizimleri

Dipol ve oktopol şartların birlikte sağlandığı en uygun geometri CPO-3D programı kullanılarak belirlenmiştir. İmalat aşamasında karşılaşılabilecek olası sorunları önceden tespit edebilmek amacıyla iki ve üç solenoidli MAC aygıtları, SolidWorks programında modellenmiştir (Şekil 4.10). Aygıtların imalat çizimleri AutoCAD programında oluşturulmuştur.

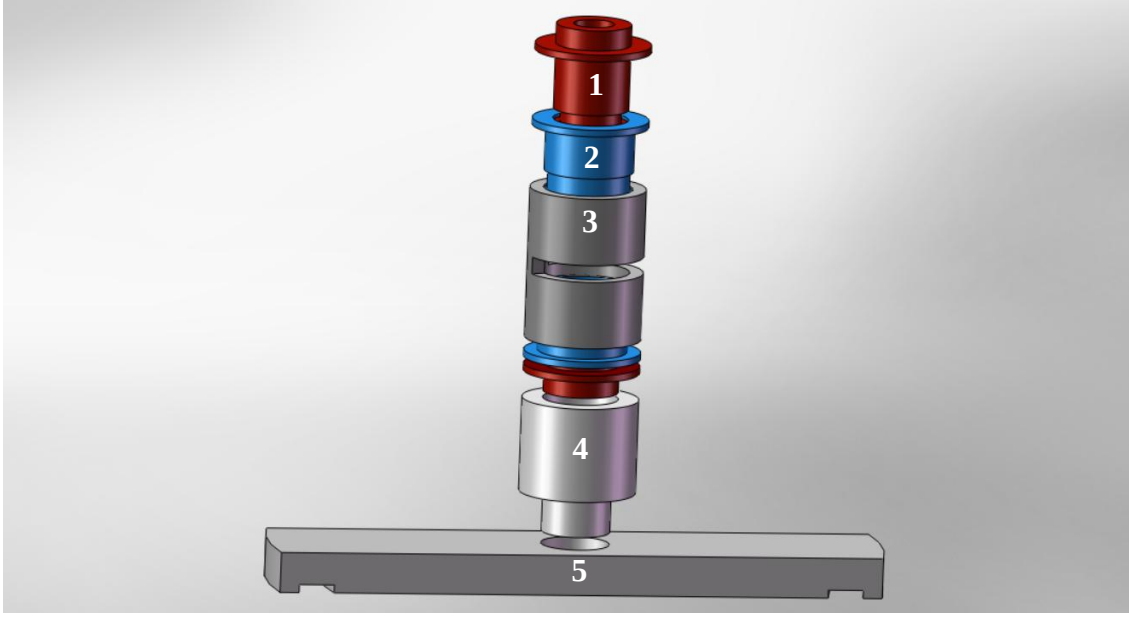


Şekil 4.10 MAC aygıtlarının SolidWorks programında oluşturulan 3D modelleri. (a) İki solenoidli MAC aygıtı. (b) Üç solenoidli MAC aygıtı.

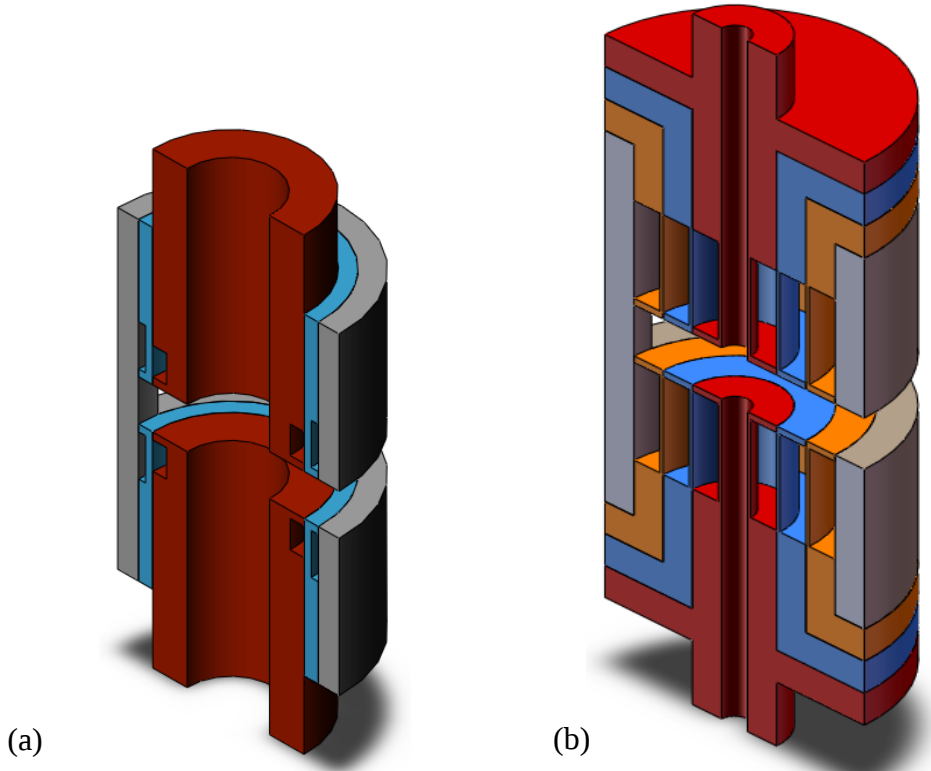
İki solenoidli MAC aygıtı, iki adet iç solenoid, iki adet dış solenoid, bir adet gövde, bir adet destek olmak üzere altı ayrı parçadan oluşmaktadır. Üç solenoidli MAC aygıtı, iki adet iç solenoid, iki adet orta solenoid, iki adet dış solenoid, bir adet gövde, bir adet destek olmak üzere sekiz parçadan oluşmaktadır (Şekil 4.11). Şekil 4.11’de görülen platform her iki aygıtta da kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Aygıtlara yapılan sarımlar, iç ve dış solenoid üzerinde bulunan kanallara yapılmıştır. MAC aygıtını oluşturan parçalar birbirinin içine sıfır geçme olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 4.12). Bu nedenle bobin uçlarının güç kaynaklarına bağlantıları yapılabilmesi için solenoidlerin yan yüzeyleri üzerine kablo hatları için kanallar açılmıştır. Şekil 4.13’te MAC aygıtlarının üç boyutlu (3D) kesit görünümüne yer verilmiştir.



Şekil 4.11 MAC aygıtlarının SolidWorks programında çizilmiş parçaları. (a) İki solenoidli MAC aygıtı. (b) Üç solenoidli MAC aygıtı.



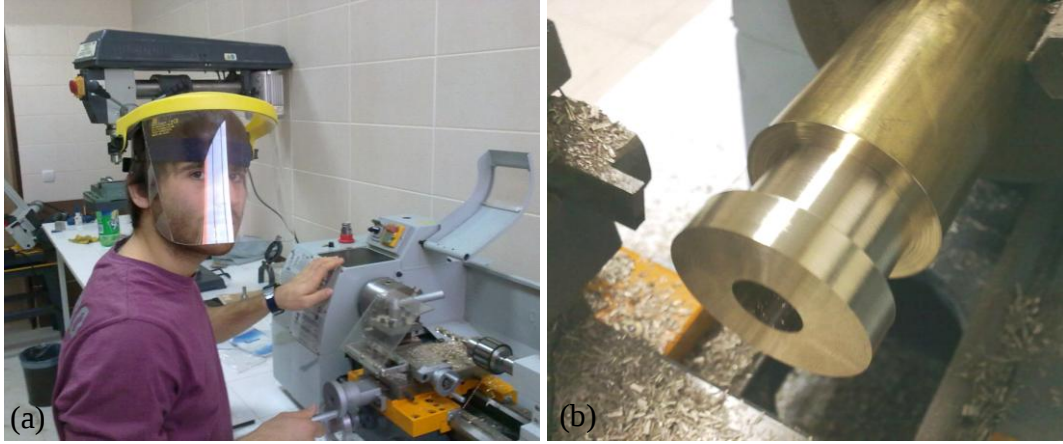
Şekil 4.12 Parçalar birbirinin içine sıfır geçme olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4.13 MAC aygıtlarının kesit görünümleri. (a) İki solenoidli MAC aygıtı. (b) Üç solenoidli MAC aygıtı.

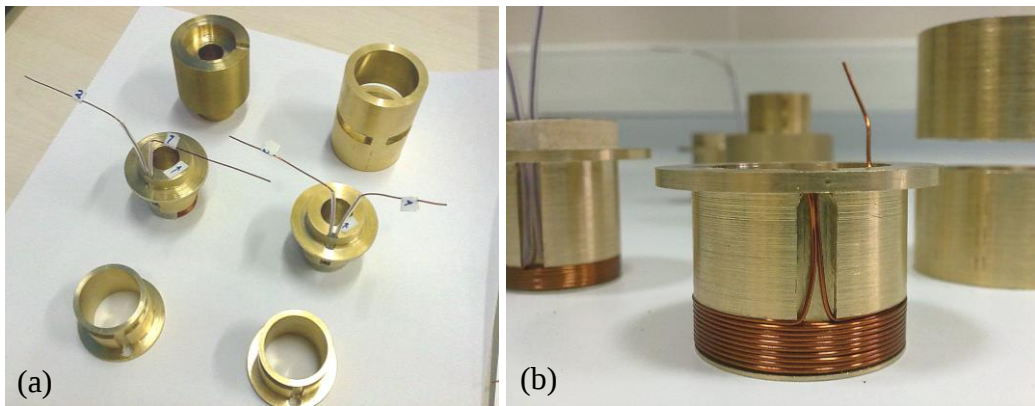
4.6. İmalat ve Test Çalışmaları

MAC aygıtının imalatı, 109T738 numaralı Tübitak projesi ve 10.FENED.03 numaralı AKÜ BAPK projesi kapsamında Afyon Kocatepe Üniversitesi Elektron Çarpışma Laboratuvarı'ndaki eCOL Malzeme İşleme Atölyesinde tamamlanmıştır (Resim 4.1).

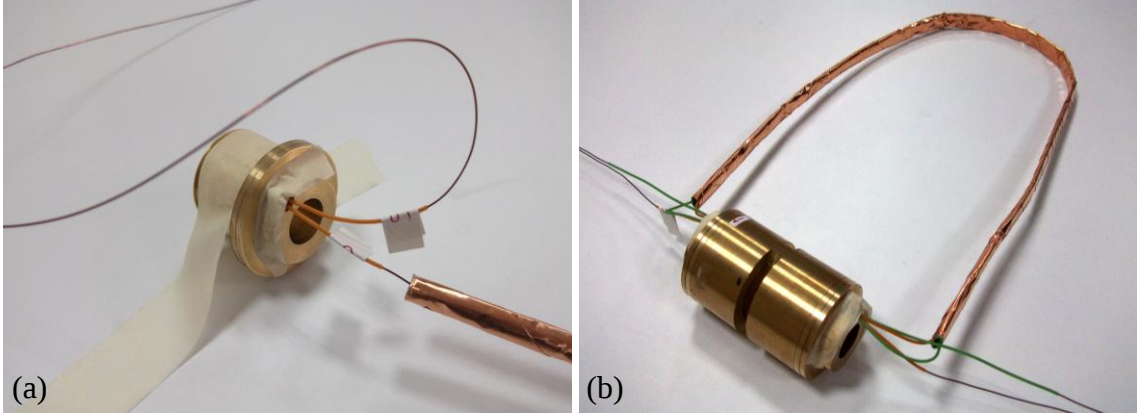


Resim 4.1 (a) MAC aygıtının imalat aşamasından bir görünüm. (b) Silindir şeklindeki pirinç malzemenin tornada işlenmesi.

İki solenoid çiftinden oluşan aygıt, spektrometre içerisine yerleştirilebilecek en uygun geometriye sahip olarak tasarlanmıştır. Solenoidlerde 210°C ye kadar özelliğini koruyabilen 0.40 mm bakır tel kullanılmıştır (Resim 4.2).

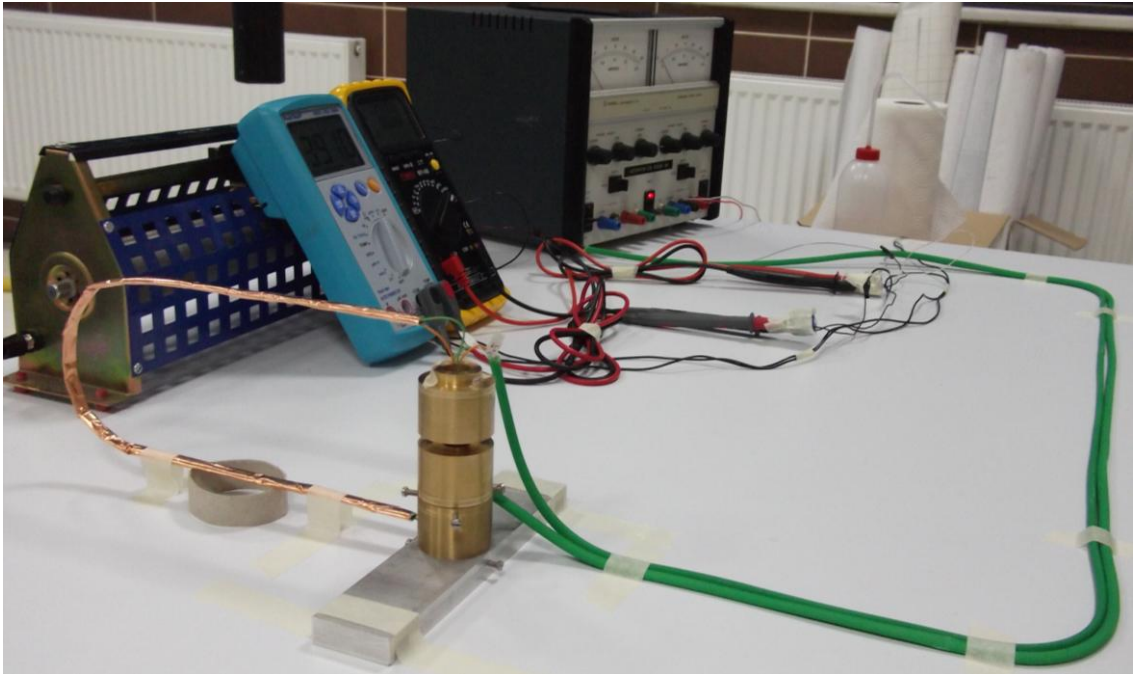


Resim 4.2 (a) MAC aygıtını oluşturan parçalar. (b) Solenoidlerin görünümü.



Resim 4.3 (a) İç solenoidin hazırlanışı. (b) MAC aygıtının tamamlanmış hali.

MAC aygıtı, spektrometre içerisinde aralıksız çalışması gerektiğinden solenoidlerin aşırı ısınma ihtimaline karşı maksimum akım değerleri uygulanarak çalışma performansı test edilmiştir. MAC aygıtına 14 gün boyunca sürekli çalışması koşuluyla bazı kararlılık testleri uygulanmıştır. Testlerden sonra herhangi bir ısınma problemine veya başka bir probleme rastlanmamıştır (Resim 4.4).



Resim 4.4 MAC aygıtına uygulanan kararlılık testleri aşamasından bir görünüm.

MAC aygıtı, test işlemleri tamamlandıktan sonra elektron spektrometresine yerleştirilmiştir (Resim 4.5).



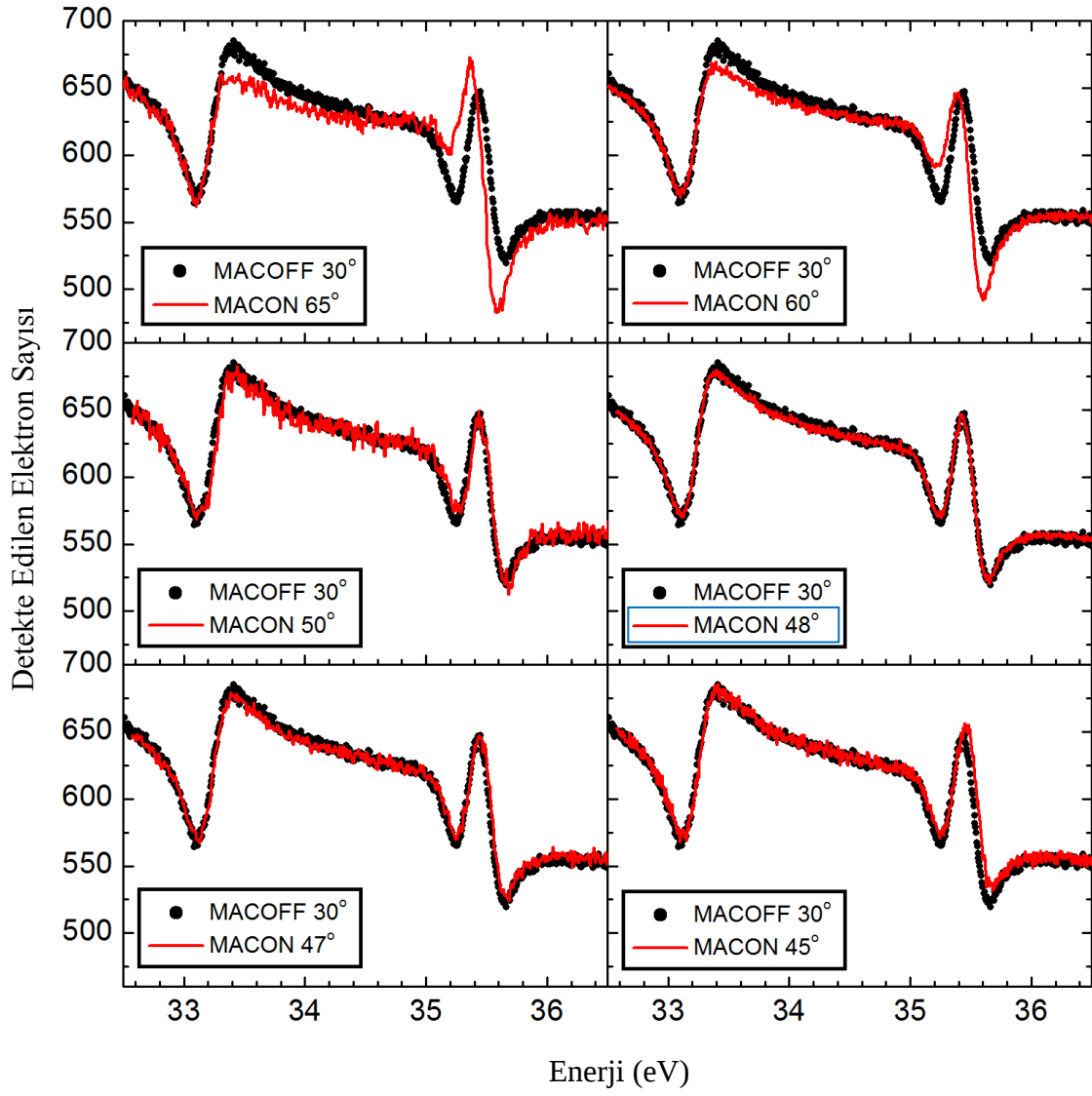
Resim 4.5 MAC aygıtının elektron spektrometresine yerleştirilmesi.

4.7. MAC Aygıtı İle Helyum Atomu İçin Diferansiyel Tesir Kesiti Ölçümü

Helyum atomunun kendiliğinden iyonlaşma rezonans düzeyleri için alınan tesir kesiti ölçümleri açığa bağımlı olarak hızlı bir şekilde değişmektedir. Dolayısıyla MAC aygıtının saptırma açısının belirlenmesinde rezonans düzeylerine ait ölçümler kullanılmıştır. MAC aygıtı kapalıyken (MAC OFF) ve açıkken (MAC ON) alınan ölçümler sayesinde saptırma açısı tam olarak hesaplanmış ve böylece aygıtın çalışma performansı test edilmiştir.

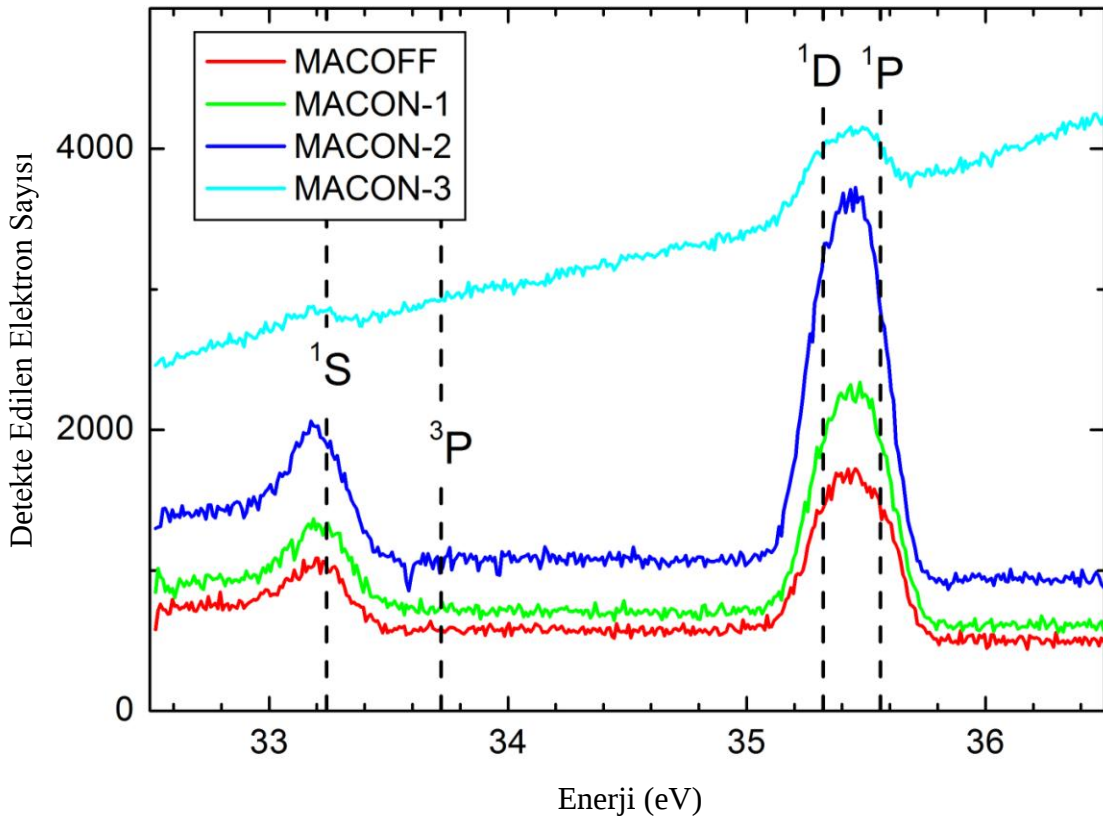
Kullanılan MAC aygıtı iki solenoidli sarım sisteminden oluşmaktadır. Belirli sarım sayılarına sahip olan solenoidlere belirli akımların uygulanmasıyla, helyum atomunda $(2s^2)^1S$, $(2s2p)^3P$, $(2p^2)^1D$ ve $(2s2p)^1P$ rezonans düzeylerine ait farklı açılarda ölçümler alınmıştır (Şekil 4.14). Rezonans düzeyleri direk iyonlaşma enerji düzeyleri ile dejenere olduğu için spektrumlarda yapıcı ve yıkıcı girişim etkileri gözlenmektedir. Rezonans düzeyleri bu tez çalışmasının konusu değildir fakat açığa bağımlı değişimlerinden dolayı MAC aygıtının test edilmesinde kullanılmıştır.

Analizör ile farklı açılarda ölçümler alınarak MAC aygıtının saptırma açısı belirlenmiştir. MAC kapalıyken 30° de alınan ölçümler ile MAC açıkken 48° de alınan ölçümlerin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla MAC aygıtı, elektron yörüngelerini bozmadan 18° lik bir saptırma gerçekleştirerek etkileşme bölgesinden kopan elektronların detekte edilebilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.14 MAC kapalıyken ve açıkken alınan tesir kesiti ölçümleri. İçi dolu (siyah) daireler MAC kapalıyken, çizgiler (kırmızı) MAC açıkken alınan ölçümleri göstermektedir. MAC OFF durumunda analizör 30° dir. MAC ON durumunda ise analizör 48° ye alınmıştır. Solenoidlere uygulanan akım değerleri $I_{ref}=0.24$ A ve $I_2=-0.2$ A dir.

Şekil 4.15'te MAC kapalı ve MAC açık durumlarında analizör 135° de sabit tutularak farklı akım değerleri için ölçümler alınmıştır. Rezonans profilleri büyük açılarda simetrik bir yapı göstermektedir. Farklı akım değerleri için alınan tesir kesitlerindeki şiddet değişimleri, analizörün detekte ettiği açı değerinden kaynaklanmaktadır. Analizör fiziksel olarak en fazla 135° ye konulabilmektedir. Dolayısıyla MAC aygıtına uygulanan solenoid akımları $I_{ref}=0.12$ A ve $I_2=-0.10$ A için 144° deki elektronlar 9° saptırılarak 135° de, $I_{ref}=0.24$ A ve $I_2=-0.20$ A için 153° deki elektronlar 18° saptırılarak yine 135° de detekte edilmiştir. Yüksek akım değerlerinde (0.36A, -0.30A) rezonans profilleri bozulmaktadır.



Şekil 4.15 Analizör 135° de iken solenoidlere uygulanan farklı akım çiftleri için alınan tesir kesiti ölçümleri. MACOFF: MAC kapalıyken, MACON-1 (0.12A, -0.10A), MACON-2 (0.24A, -0.20A), MACON-3 (0.36A, -0.30A) MAC açıkken alınan ölçümleri göstermektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

MAC aygıtının elektron çarpışma deneylerinde kullanılması yeni bir çalışma konusudur. Özellikle MAC aygıtıyla daha önceden ölçüm alınamayan konumlarda yapılan deneylerde teorik yaklaşımlarla elde edilen tesir kesitlerinde önemli farklılıklar görülmüştür. Bunun yanında elektron yörüngelerinin hesaplanması ve simüle edilmesi önemli bilimsel alt yapının oluşmasını sağlamıştır.

Bilgisayar ortamındaki simülasyon çalışmaları ile ideal değerlerin belirlenmesi, sistemin daha önceden test edilmesine ve imalatında ortaya çıkabilecek problemlere önceden çözüm üretilmesine imkan tanımaktadır. Bu nedenle MAC aygıtının geometrisinin belirlenmesi, yüklü parçacık optiği simülasyon programı CPO-3D kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CPO-3D simülasyon programı ile solenoidlere uygulanan akımların boşlukta oluşturdukları manyetik alan ve yüklü parçacıkların bu manyetik alanda izledikleri yörüngeler hesaplanmıştır. Odaklama ve saptırma katsayıları gibi karakteristik özellikler hesaplanarak MAC aygıtı için ideal özellikler belirlenmiştir.

MAC aygıtı ile yapılan deneylerde genelde sadece dipol şartı göz önünde bulundurulmuş oktopol şartı fazla dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada, dipol ve oktopol şartlarının ayrı ayrı ve birlikte sağlandığı olası durumlar iki ve üç solenoidli sistemler için karşılaştırılmış, saptırma ve odaklama özellikleri incelenmiştir. Buna göre, dipol ve oktopol şartların birlikte sağlandığı durumlar için iki solenoidli bir sistemde elektron yörüngelerinin daha kısa mesafelerde (~22 mm) radyal doğrultularına ulaştıkları gözlemlenmiştir. Ayrıca üç solenoidli bir sistemin iki solenoidli bir sisteme göre daha iyi odaklama özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir.

Daha önceden çalışılan akım değerleri üzerinde tanımlanan bir parametrizasyon ile üç solenoidli bir MAC aygıtının elektron yörüngeleri üzerindeki saptırma ve odaklama özellikleri 2.5 kat iyileştirilmiştir. İdeal saptırma için büyütme oranı 0.825 olarak belirlenmiştir.

MAC aygıtının saptırma açısını belirlemek ve çalışma performansını test etmek amacıyla helyum atomunun kendiliğinden iyonlaşma rezonans düzeyleri için tesir kesiti ölçümleri alınmıştır. MAC kapalıyken 30° de alınan ölçümler ile MAC açıkken 48° de alınan ölçümlerin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla MAC aygıtı, elektron yörüngelerini bozmadan 18° lik bir saptırma gerçekleştirerek etkileşme bölgesinden kopan elektronların detekte edilebilmesini sağlamaktadır.

Analizör fiziksel olarak en fazla 135° ye konulabildiği için MAC kapalı ve MAC açık durumlarında farklı akım değerleri için ölçümler alınmıştır. MAC aygıtına uygulanan solenoid akımları $I_{ref}=0.12$ A için 144° deki elektronlar 9° saptırılarak 135° de, $I_{ref}=0.24$ A için 153° deki elektronlar 18° saptırılarak yine 135° de detekte edilmiştir. Bu sayede 135° nin üzerindeki büyük açılarda MAC aygıtı ile ölçümler alınabilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Allan, M., Zivanov, S., 2005. 14th International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms- satellite of ICPEAC 27-30 July, 2005, Campinas, SP-Brazil, p. 94.
- Asmis, K. R. and Allan, M. 1997. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **30** 1961.
- Bartchat, K., Hudson, E. T., Scott, M. P., Burke, P. G. and Burke, V. M. 1996. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **29** 2875.
- Bell, K.L., Scott, N.S., Lennon, M.A., 1984. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **17**, 4757–4765.
- Bell, K.L., Berrington, K.A., Hibbert, A., 1988. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **21**, 4205–4216.
- Blatt, J.M. and Weiskopff, V.F. 1952. Theoretical nuclear physics, 35 p., Wiley, NewYork.
- Boesten, L., Tanaka, H., 1991. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **24**, 821–832.
- Brewer, D. F. C., Newell, W. R., Harper, S. F. W and Smith, A. C. H. 1981. J. Phys. B **14**, L749.
- Cırık, H., Okumuş, N., Şişe, Ö., Erengil, Z. N., Ulu, M. ve Doğan, M. 2010. Elektron Spektrometreleri için Manyetik Açık Değiştirici (MAC) Aygıtın Simülasyonu ve Dizaynı, ADIM Fizik Günleri-I.
- Cubric, Thompson, Cooper, King and Read. 1997. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **30**, L857-L864.

- Cubric, Mercer, Channing, King and Read. 1999. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **32**, L45–L50.
- Cubric, D., Ward, R., King, G.C. and Read, F.H. (2000). Rev. Sci. Instru. **71**:3323-5.
- Cho, H., Gulley, R. J., Trantham, K. W., Uhlman, L. J., Dedman, C. J. and Buckman, S. J. 2000. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **33** 3531.
- Cho, H., Gulley, R. J. and Buckman, S. J. 2003a. J. Korean Phys. Soc. **42** 71.
- Cho, H., Lee, H. and Park, Y. S. 2003b. Radiat. Phys. Chem. **68** 115.
- Cho, H., Lee, H. and Park, Y. S. 2003c. J. Korean Phys. Soc. **43** 40.
- Cho, Park, Tanaka and Buckman. 2004. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **37**, 625-634.
- Danjo, A., Nishimura, H., 1985. J. Phys. Soc. Jpn. **54**, 1224–1227.
- Dasgupta, A., Bhatia, A.K., 1985. Phys. Rev. A **32**, 3335–3343.
- Faure, A., Gorfinkel, J.D., Tennyson, J., 2004. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **37**, 801–807.
- Fon, W. C., Berrington, K. A., Burke, P. G. and Hibbert, A. 1983. J. Phys. B: At. Mol. Phys. **16**, 307–21.
- Fon, W.C., Berrington, K.A., Hibbert, A., 1984. J. Phys. B: At. Mol. Phys. **17**, 3279–3294.
- Fursa, D. V. and Bray, I. 1997. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **30** 757.

- Furst, J. E., Golden, D. E., Mahgerefteh, M., Zhou, J. and Mueller, D. 1989. Phys. Rev. A **40** 5592–5600.
- Gianturco, F.A., Rodriguez-Ruiz, J.A., 1994. Phys. Rev. A **47**, 1075–1086.
- Gianturco, F.A., 1997. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **30**, 2239–2259.
- Gianturco, F. A., Meloni, S., Paoletti, P., Lucchese, R. R. and Sanna, N. 1998. J. Chem. Phys. **108** 4002.
- Gibson, J.C., Gulley, R.J., Sullivan, J.P., Buckman, S.J., Chan, V., Burrow, P.D., 1996. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **29**, 3177–3195.
- Hussey, Murray, MacGillivray, King and Bowring. 2007. Journal of Physics: Conference Series 88.
- Jackson, J.D. 1999. Classical electrodynamics, 109 p., Wiley, New York.
- Jain, A., 1986. Phys. Rev. A **34**, 3707–3722.
- Johnstone, W. M. and Newell, W. R. 1991. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **24** 3633.
- Juarez, A. 2002. AMLaM group, The Magnetic Angle-Changer.
- Kłosowski, Ł., Piwinski, M., Dziczek, D., Wisniewska, K. and Chwiot S. 2007. Magnetic angle changer a new device allowing extension of electron–photon coincidence measurements to arbitrarily large electron scattering angles, Meas. Sci. Technol, **18**, 3801-3810.
- Landau, L.D. Lifszyc E.M. 1986. Krótki kurs fizyki teoretycznej cz. 1, PWN Warszawa.
- Linert, Mielewska, King, and Zubek. 2006. Phys. Rev. A **74**, 042701.

- Linert, Mielewska, King, and Zubek. 2007. Radiation Physics and Chemistry **76**, 418-425.
- Machado, L.E., Ribeiro, E.M.S., Lee, M.-T., Fujimoto, M.M., Brescansin, L.M., 1999. Phys. Rev. A **60**, 1199–1205.
- Machado, L.E., Mu-Tao, L., Brescansin, L.M., Lima, M.A.P., McKoy, V., 1995. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **28**, 467–475.
- McEachran, R.P., Stauffer, A.D., 1983. J. Phys. B: At. Mol. Phys. **16**, 4023–4038.
- McEachran, R.P., Stauffer, A.D., 2003. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **36**, 3977–3984
- Mielewska, King, Read and Zubek. 1999. Chemical Physics Letters **311**. 428-432.
- Mielewska, B. 2007. Radiation Physics and Chemistry **76** 418–425.
- Okamoto, Y., Onda, K. and Itikawa, Y. 1993. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **26** 745.
- Ramsauer, C. and Kollath, R., 1932a. Ann. Phys. Lpz. **12**, 529–561.
- Ramsauer, C. and Kollath, R., 1932b. Ann. Phys. Lpz. **12**, 837–848.
- Read, F. H. and Channing, J. M. 1996. Production and optical properties of an unscreened but localized magnetic field Rev. Sci. Instrum, **67** p., 2373.
- Register, D. F. and Trajmar, S. 1984. Phys. Rev. A **29**, 1785.
- Rescigno, T. N. and Lengsfeld, B. H. 1992. Z. Phys. D **24** 117.
- Rohr, K., 1980. J. Phys. B: At. Mol. Phys. **13**, 4897–4905.

- Saha, H. P. 1989. Phys. Rev. A **39**, 5048.
- Saha, H.P., 1991. Phys. Rev. A **43**, 4712–4722.
- Shyn, T.W. and Sharp, W.E., 1982. Phys. Rev. A **26**, 1369–1372.
- Shyn, T.W. and Cho, S.Y., 1987. Phys. Rev. A **36**, 5138–5142.
- Shyn, T.W. and Cravens, T.E., 1990. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **23**, 293–300.
- Sienkiewicz, J.E., Baylis, W.E., 1987. J. Phys. B: At. Mol. Phys. **20**, 5145–5156.
- Sienkiewicz, J.E., Baylis, W.E., 1992. J. Phys. B: At. Mol. Phys. **25**, 2081–2088.
- Sohn, W., Kochem, K.-H., Scheuerlein, K.-M., Jung, K. and Ehrhardt, H., 1986. J. Phys. B: At. Mol. Phys. **19**, 3625–3632.
- Srivastava, S.K., Tanaka, H., Chutjian, A., Trajmar, S., 1981. Phys. Rev. A **23**, 2156–2166.
- Stevenson, M.A. and Lohmann, B. 2006. Phys. Rev. A **73** 020701.
- Stevenson, M.A. and Lohmann, B. 2007. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena **161** 31–34.
- Stevenson, M.A. and Lohmann, B. 2008. Phys. Rev. A **77**, 032708.
- Sullivan, J.P., Gibson, J.C., Gulley, R.J., Buckman, S.J., 1995. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **28**, 4319–4328.
- Tanaka, H., Okada, T., Boesten, L., Suzuki, ., Yamamoto, T., Kubo, M., 1982. J. Phys. B: At. Mol. Phys. **15**, 3305–3319.

- Trajmar, S., Cartwright, D.S., Williams, W., 1971. Phys. Rev. A **4**, 1482–1492.
- Trajmar, S., Register, D. F., Cartwright, D. C. and Csanak. G., 1992. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **25** 4889.
- Trajmar, S., McConkey, J.W., 1994. In: Inokuti, M. (Ed.), Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics: Cross-section Data, Vol. **33**. Academic, New York, p. 63.
- Varella, M. T., Do, N., Bettega, M., Lima, M. and Ferreira, L. 1999. J. Chem. Phys. **111** 6396.
- Zatsarinny, O., and Bartschat, K. 2004. J. Phys. B **37**, 2173.
- Zubek, Gulley, King and Read. 1996. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **29**, L239-L244.
- Weingartshofer, A., Willman, K. and Clarke, E.M., 1974. J. Phys. B **7**, 79–90.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : HASAN CIRIK
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar, 12.08.1988
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : +90 506 569 92 59 / fizikoliq@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Lisesi (2002-2005)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Bölümü (2005-2009)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Fizik AnaBilim Dalı (2009-2011)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

TÜBİTAK Proje Asistanı - 109T738 numaralı TÜBİTAK Projesi (2009-2011)
“Elektron Spektrometresi Kullanılarak Moleküllerin İyonlaşma Durumlarının Elektron Çarpışma Deneyleriyle İncelenmesi”

Yayınları (SCI ve diğer)

Akpınar, R., Olgaç, F., Cırık, H., Erengil, Z. N., Okumuş¹, N., Şişe, Ö., Ulu, M. ve Doğan, M., AKÜ FİZİK BÖLÜMÜNDE KURULUMU TAMAMLANAN ELEKTRON ÇARPIŞMA LABORATUVARI VE ARAŞTIRMA OLANAKLARI, (Poster Bildiri AMPF – P9), ADIM Fizik Günleri-I / 21-22 Mayıs 2010 - Afyon Kocatepe Üniversitesi Özet Kitabı.

Cırık, H., Okumuş¹, N., Şişe, Ö., Erengil, Z. N., Ulu, M. ve Doğan, M., ELEKTRON SPEKTROMETRELERİ İÇİN MANYETİK AÇI DEĞİŞTİRİCİ (MAC) AYGITIN SİMÜLASYONU VE DİZAYNI, (Poster Bildiri AMPF – P10), ADIM Fizik Günleri-I / 21-22 Mayıs 2010 - Afyon Kocatepe Üniversitesi Özet Kitabı.

Ozer, Z. N., Sise, O., Ulu, M., Cırık H., Olgac, F. and Dogan, M., INVESTIGATION OF IONIZATION DYNAMICS OF HYDROGEN MOLECULE BY ELECTRON IMPACT USING AN ELECTRON SPECTROMETER, Department of Physics, Science and Arts Faculty, Afyon Kocatepe University, 03200 Afyon, Turkey. International Symposium on (e,2e), Double Photoionization and Related Topics & 16th International Symposium on Polarization and Correlation in Electronic and Atomic Collisions, University College Dublin, Dublin, Ireland. 4-6 August, 2011.

Ulu, M., Şişe, Ö., Erengil, Z. N., Okumuş¹, N., Cırık, H., Olgaç, F., Akpınar, R. ve Doğan, M., YÜKSEK ENERJİ ÇÖZÜNÜRLÜĞÜNE SAHİP ELEKTRON SPEKTROMETRESİNİN ELEKTRON-MOLEKÜL ÇARPIŞMA FİZİĞİNDE KULLANIMI, Türk Fizik Derneği 27. Uluslararası Fizik Kongresi (14-17 Eylül 2010) Özet Kitabı (kod no: 01_PP84, sayfa no:500).

Mesleki Konulardaki Tecrübeler

106T722-TÜBİTAK Projesi, Araştırmacı Öğrenci (2008-2009). Çarpışma Fiziğinde Kullanılmak Üzere Yüksek Çözünürlüğe Sahip Yüklü Parçacık Analizör Sisteminin Geliştirilmesi.

- Elektron Spektrometreleri (Elektron Tabancası, Elektrostatik Lens Sistemleri, Enerji Analizörleri, Vakum Sistemleri, Elektronik Kontrol Sistemleri)
- Yüklü Parçacık Optiği ve Elektroniği
- Manyetik Açık Değiştirici Aygıt
- Sinyal İşleme Tekniği (Amplifier, Discriminator, Detektörler vb.)
- Malzeme Üretim-İşleme Tekniği (Torna, Freze Operatörü)

Bilgisayar Becerileri

- SIMION ve CPO 3-D Yüklü Parçacık Optiği Simülasyon Programları
- MAESTRO Paket Programı (Elektron-Atom Çarpışma Deneyleri)
- SolidWorks 3D Modelleme, ORIGIN Grafik-Veri İşleme Programı
- AutoCAD Teknik Çizim Programı
- Maple ve Mathematica Uygulamaları
- WEB Tasarımı ve bazı özel paket programları (Proteus, CorelDraw, Photoshop vb.)