

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



$^{15}\text{C} + ^{208}\text{Pb}$  SAÇILMASININ COULOMB BARIYERİ CİVARINDAKİ  
ENERJİLERDE İNCELENMESİ

Necmettin CEYLAN  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019  
ANTALYA

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

$^{15}\text{C} + ^{208}\text{Pb}$  SAÇILMASININ COULOMB BARIYERİ CİVARINDAKİ  
ENERJİLERDE İNCELENMESİ

Necmettin CEYLAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 10/07/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr.Öğr.Üyesi Haris DAPO (Danışman)

Doç.Dr. Mesut KARAKOÇ

Dr.Öğr.Üyesi Vakkas BOZKURT

*Haris Dapo*  
*M. Karakoç*  
*V. Bozkurt*

## ÖZET

### $^{15}\text{C} + ^{208}\text{Pb}$ SAÇILMASININ COULOMB BARIYERİ CİVARINDAKİ ENERJİLERDE İNCELENMESİ

Necmettin CEYLAN

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Haris DAPO

Temmuz 2019; 49 sayfa

1980’li yılların ortalarında halo çekirdeklerin keşfedilmesi nükleer fizik camiasını oldukça heyecanlandırmıştır. Bu yeni keşfedilen halo çekirdekler incelenmek üzere o zamana kadar incelenen çekirdeklerden farklı birçok özelliklere sahip olduğu anlaşıldı. Halo çekirdekler üzerinde çalışılması ile fizikçiler nükleer teorileri nükleer kararlılık eğrisinin limitlerine kadar genişletme imkanı buldu. Bin dokuzyüz seksenli yıllardan günümüze kadar fizikçiler nükleer teori, parçacık hızlandırıcıları ve parçacık dedektörlerindeki birçok gelişme ile birlikte halo çekirdeklerin ilginç davranışlarını anlamaya çalışmaktadır. Bu çalışmalar günümüzde de devam etmektedir.

Bu tezin konusu ise Fransa-İsviçre sınırında bulunan Cern’in (Avrupa nükleer araştırma merkezi) Isolde radyoaktif ışın demeti laboratuvarlarında gerçekleştirilen IS619: "Coulomb enerjisi civarında  $^{15}\text{C}$ ’nin halo yapısının saçılma deneyiyle incelenmesi" isimli araştırmanın ön analizi ve Monte Carlo simülasyonunun yapılmasıdır.

Bu deneyde kullanılan GLORIA dedektör sistemi, altı tane DSSSD teleskobunun bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Bu tezde ön teleskoplardan birinin analizi ve NPTool programı kullanılarak da Monte Carlo simülasyonu yapılmıştır. NPTool, Root ve GEANT4 programlarını birleştirerek nükleer saçılma simülasyonlarının yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Verilerin analizi ve deneyin simülasyonu yapıldıktan sonra elde edilen spektrumların tam uyuşmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple diğer beş teleskobunda incelenmesinin bitirilip karşılaştırmaların tekrar yapılması ile daha iyi sonuçlar elde edilmesi beklenmektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:**  $^{15}\text{C}$ , Cern, Element Analizi, Geant4, Halo çekirdek, Isolde, Karbon 15, Nükleer fizik, NPTool, Root, Saçılma çemberi, Simülasyon, Srim.

**JÜRİ:** Dr.Öğr.Üyesi Haris DAPO

Doç.Dr. Mesut KARAKOÇ

Dr.Öğr.Üyesi Vakkas BOZKURT

## ABSTRACT

### PRELIMINARY STUDY OF $^{15}\text{C} + ^{208}\text{Pb}$ SCATTERING AT ENERGIES AROUND THE COULOMB BARRIER

Necmettin CEYLAN

MSc Thesis in PHYSICS

Supervisor: Asst.Prof.Dr. Haris DAPO

July 2019; 49 pages

The discovery of halo nuclei in the mid-1980s electrified the community of nuclear physicists. These nuclei presented a rich variety of phenomena to study, and stretched our understanding of nuclear theory to the limits. Since then with theory and with newly developed accelerators as well as particle detectors physicist continue to understand interesting behavior of the halo nuclei.

The topic on which this thesis is focused is the preliminary study and Monte Carlo simulation of the experiment which took place in Cern's Isolde radioactive beam facility called IS619: "Effects of the neutron halo in  $^{15}\text{C}$  scattering at energies around the Coulomb barrier".

GLORIA dedector system has been chosen for this study which combines six DSSSD telescopes. In this thesis, one of the front telescopes analysed then also Monte Carlo simulation has been done using NPTool software which combines ROOT and GEANT4 softwares and makes it possible to make scattering simulations. Then we compared spectrum taken from the experiment and simulation.

Currently the results of the analysis is not in good agreement with the simulation. Therefore studies of all other telescopes and simulation is continuing.

**KEYWORDS:**  $^{15}\text{C}$ , Cern, Geant4, Halo nuclei, Isolde, NPTool, Nuclear analysis, Nuclear physics, Root, Scattering chamber, Simulation, Srim.

**COMMITTEE:** Asst.Prof.Dr. Haris DAPO

Assoc.Prof.Dr. Mesut KARAKOÇ

Asst.Prof.Dr. Vakkas BOZKURT



## ÖNSÖZ

Günümüzde, egzotik çekirdeklerle yapılan çalışmaların önemi oldukça yüksektir. Nükleer teoriyi daha iyi anlamak ve geliştirmek için önemli kilometre taşlarından birisidir. Ayrıca halo çekirdeklerin özelliklerini anlamak için deneysel çalışmaların önemi hiç şüphesiz ki çok büyüktür. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte aynı zamanda daha iyi nükleer dedektörler ve parçacık hızlandırıcıları sayesinde önümüzdeki yıllarda halo çekirdek ve diğer egzotik çekirdeklerin özelliklerinin bu konularda çalışan bilim insanları tarafından daha iyi bir şekilde aydınlatılacağına hiç şüphe yoktur.

Bu tezi hazırlarken çok değerli katkılarından dolayı tez danışmanım Dr. Haris Dapo'ya (Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü) aynı zamanda tez çalışmam dolayısıyla sağladığı her türlü destek ve eğitimim süresince bana katkılarından dolayı teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmanın konusu olan deneyler yapılırken sağladığı destek ve yardımlarından dolayı ayrıca Prof. Dr. Ismael Martel Bravo'ya (Universidad de Huelva de Departamento Ciencias Integradas) teşekkürü borç bilirim.

Son olarak Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN (Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü) Ülkemizde Nükleer fizik adına gerçekleştirdiği projeler ve genç bilim insanlarına sağladığı destek ve katkılarından dolayı özel olarak teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET . . . . .	i
ABSTRACT . . . . .	ii
ÖNSÖZ . . . . .	iii
AKADEMİK BEYAN . . . . .	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR . . . . .	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ . . . . .	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ . . . . .	xii
1. GİRİŞ . . . . .	1
1.1. Kısa Tarihçe . . . . .	1
1.2. Halo Çekirdeklere Bakış . . . . .	2
1.3. Nötron Zengini Karbon İzotopları . . . . .	3
2. KAYNAK TARAMASI . . . . .	4
2.1. Atom . . . . .	4
2.2. Atom Çekirdeği ve Özellikleri . . . . .	4
2.2.1. Notasyon ve temel kavramlar . . . . .	4
2.2.2. Özellikleri . . . . .	5
2.2.3. Yarıçap . . . . .	5
2.2.4. Yük . . . . .	6
2.2.5. Çekirdek seviyesinde kütleler . . . . .	7
2.3. Bağlanma Enerjisi . . . . .	7
2.4. Kararlı Çekirdekler . . . . .	7
2.5. Radyoaktif Çekirdekler . . . . .	7
2.6. Bozunum Türleri . . . . .	8
2.6.1. Alfa bozunumu . . . . .	8
2.6.2. Beta bozunumu . . . . .	9
2.6.3. Gama bozunumu . . . . .	9

2.7. Nükleer Reaksiyonlar . . . . .	9
2.8. Radyasyon Madde Etkileşimi . . . . .	10
2.8.1. Ağır yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi . . . . .	12
2.8.2. Elektronların maddeyle etkileşimi . . . . .	14
2.8.3. Gama ışınlarının maddeyle etkileşimi . . . . .	15
2.8.4. Fotoelektrik olay . . . . .	15
2.8.5. Compton saçılması . . . . .	16
2.8.6. Çift oluşumu . . . . .	17
2.9. Halo Çekirdek Özellikleri . . . . .	18
2.9.1. Nötron halo . . . . .	21
2.9.2. Proton halo . . . . .	21
2.9.3. <sup>15</sup> C'ye Detaylı Bakış . . . . .	21
3. MATERYAL VE METOT . . . . .	24
3.1. Deney . . . . .	24
3.1.1. HIE-ISOLDE Laboratuvarı . . . . .	24
3.1.2. GLORIA dedektör sistemi . . . . .	27
3.1.3. Reaksiyon çemberi . . . . .	28
3.1.4. Hedef çekirdek . . . . .	28
3.1.5. Kalibrasyon materyali . . . . .	29
3.1.6. Deneyin gerçekleştirilmesi, elektronikler ve veri toplama . . . . .	31
3.2. Veri Analizi ve Simülasyon . . . . .	32
3.2.1. ROOT . . . . .	32
3.2.2. GEANT4 . . . . .	33
3.2.3. SRIM . . . . .	34
3.2.4. NPTool . . . . .	35
3.2.5. Simülasyonun yapılması . . . . .	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA . . . . .	38
5. SONUÇLAR . . . . .	43

6. KAYNAKLAR . . . . .	46
ÖZGEÇMİŞ	



## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “ $^{15}\text{C} + ^{208}\text{Pb}$  saçılmasının Coulomb bariyeri civarındaki enerjilerde incelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

10 / 07 / 2019

Necmettin CEYLAN



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler:

A	: Kütle numarası
Z	: Atom numarası
$c$	: Işık hızı
Li	: Lityum
Ca	: Kalsiyum
Be	: Berilyum
He	: Helyum
B	: Bor
C	: Karbon
N	: Azot
Ne	: Neon
Pb	: Kurşun
$p$	: Proton parçacığı
Au	: Altın
Hg	: Cıva
Po	: Polonyum
U	: Uranyum
$n$	: Nötron parçacığı
$\alpha$	: Alfa parçacığı
$\beta$	: Beta parçacığı
$\beta^+$	: Beta pozitif parçacığı
$\beta^-$	: Beta negatif parçacığı
$\bar{\nu}_e$	: Anti elektron nötrino
$\nu_e$	: Elektron nötrino
$\gamma$	: Gama ışını
$^{\circ}\text{C}$	: Derece santigrat
$e$	: Elektronun yükü
C	: Coulomb, yük birimi

### Kısaltmalar:

fm	: Uzunluk birimi (femtometre)
rms	: Root mean square (ortalama karekök)
keV	: Enerji birimi (Kilo elektronvolt)
MeV	: Enerji birimi (Mega elektronvolt)
GeV	: Enerji birimi (Giga elektronvolt)
DSSSD	: Çift katmanlı şeritli silikon dedektör (Double-sided silicon strip detectors)
$\mu\text{m}$	: Uzunluk birimi (Mikrometre)
mm	: Uzunluk birimi (Milimetre)
Lab	: Laboratuvar
akb	: Atomik kütle birimi
u	: akb

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 1.1</b> $^{11}\text{Li}$ ve $^{48}\text{Ca}$ çekirdeklerinin karşılaştırılması. $^{48}\text{Ca}$ çekirdeğinin $^{11}\text{Li}$ çekirdeğinden çok daha fazla nükleona sahip olmasına rağmen, $^{11}\text{Li}$ 'nin halo yapısı nedeniyle benzer büyüklüktedirler . . . . .	1
<b>Şekil 1.2</b> Halo yapısı olduğu bilinen ve düşünülen çekirdekler. Koyu yeşil renkliler halo yapısı olduğu bilinenler ve açık yeşil renkliler ise halo yapısına sahip olduğu düşünülenlerdir. Turuncu renkliler proton halosuna sahip olanlar (Al-Khalili 2017) . . . . .	2
<b>Şekil 1.3</b> Hafif çekirdeklerin ortalama karekök yarıçapları (Tanihata ve Kanungo 2003) . . . . .	3
<b>Şekil 2.4</b> Mendeleev periyodik cetveli . . . . .	4
<b>Şekil 2.5</b> Bohr atom modeline göre bir atomun temsili (Anonim 1) . . . . .	5
<b>Şekil 2.6</b> Bazı kararlı çekirdeklerin elektron saçılmasıyla elde edilmiş yük yoğunlukları. Grafikte görüldüğü üzere 58 nükleondan oluşan nikel'in ( $^{58}\text{Ni}$ ) yük yoğunluğu yarıçapı 12 nükleondan oluşan karbondan ( $^{12}\text{C}$ ) daha büyük ve 208 nükleondan oluşan kurşun ( $^{208}\text{Pb}$ ) ise bu grafikteki en büyük yük yoğunluğu yarıçapına sahiptir. (Al-Khalili 2017) . . . . .	6
<b>Şekil 2.7</b> Nükleer kararlılık eğrisi (Anonymous 10) . . . . .	8
<b>Şekil 2.8</b> Nükleer reaksiyonlar . . . . .	10
<b>Şekil 2.9</b> Çeşitli radyasyon türlerinin madde içerisinde gidebilecekleri uzaklıklar(Anonymous 12) . . . . .	11
<b>Şekil 2.10</b> Parçacıkların madde içerisinde karakteristik menzilleri (Knoll 2010) . . . . .	11
<b>Şekil 2.11</b> Çeşitli materyeller için menzil-enerji ilişkisi (Krane 2001) . . . . .	12
<b>Şekil 2.12</b> Aynı enerjiye sahip bazı elektronların madde içerisinde izlediği yollar (izleri) (Knoll 2010) . . . . .	14
<b>Şekil 2.13</b> (a) Fotoelektrik olay gösterimi ve (b) X-ışını yayımlanması . . . . .	15
<b>Şekil 2.14</b> Compton saçılması (Gilmore 2011) . . . . .	16
<b>Şekil 2.15</b> Compton saçılmasına uğrayan foton sayısını gösteren polar grafik (Knoll 2010) . . . . .	17
<b>Şekil 2.16</b> Fotoelektrik, çift oluşumu ve Compton saçılması etkileşimleri için lineer sönüm katsayıları (Gilmore 2011) . . . . .	17

<b>Şekil 2.17</b> Çift oluşum mekanizması (Gilmore 2011) . . . . .	18
<b>Şekil 2.18</b> Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumunun baskın olduğu bölgeler (Knoll 2010) . . . . .	18
<b>Şekil 2.19</b> Halo ve kararlı çekirdeklerin farklılıklarını gösteren grafik (Markenroth 2001) . . . . .	19
<b>Şekil 2.20</b> $^{18}\text{C}$ ve $^{16}\text{C}$ izotoplarının momentum dağılımı (Anonymous 13) . . . . .	20
<b>Şekil 2.21</b> İki valans nükleona sahip halo çekirdeklerde nötron-nötron-çekirdek etkileşiminin grafiksel gösterimi. Kesikli çizgi sanal bağlı durum, sürekli çizgi ise normal bağlı durumdur (Duran 2016) . . . . .	21
<b>Şekil 2.22</b> Coulomb bariyeri . . . . .	22
<b>Şekil 2.23</b> $^{15}\text{C}$ bozunum şeması ve enerji seviyeleri (Anonymous 14) . . . . .	23
<b>Şekil 3.24</b> Fransa ve İsviçre sınırındaki Cern'in Meyrin bölgesinde bulunan ISOLDE laboratuvarı (Kadi, Blumenfeld, Venturini Delsolaro, Fraser, Huyse, Papageorgiou Koufidou, Rodriguez, Wenander 2017) . . . . .	25
<b>Şekil 3.25</b> HIE-ISOLDE isolde laboratuvarının (1) Hedef çekirdek bölgesi, (2) ayrıştırıcı bölgesi, (3) REXEBIS, (4) Linac ve yüksek enerjili ışın demeti transfer hattı, (5) düşük enerjili ışın demeti transfer hattı (Catherall vd. 2013) . . . . .	25
<b>Şekil 3.26</b> HIE-ISOLDE radyoaktif ışın laboratuvarının şematik diyagramı (Anonymous 1) . . . . .	26
<b>Şekil 3.27</b> HIE-linac'ın 2016 yılındaki plan çizimi. IS619 deneyi saçılma deneyleri bölümünde gerçekleştirildi(SEC) (Kadi, Blumenfeld, Venturini Delsolaro, Fraser, Huyse, Papageorgiou Koufidou, Rodriguez, Wenander 2017) . . . . .	26
<b>Şekil 3.28</b> İzotop ayırma tekniğinin şematik çizimi (Kamigaito vd. 2013) . . . . .	27
<b>Şekil 3.29</b> GLORIA dedektörü (Marquinez-Duran vd. 2016) . . . . .	28
<b>Şekil 3.30</b> Deneyde kullanılan hedef çekirdek merdiveni . . . . .	29
<b>Şekil 3.31</b> Reaksiyon çemberinin dışarıdan görüntüsü . . . . .	29
<b>Şekil 3.32</b> $^{226}\text{Ra}$ kaynak çekirdeğinin BeamDump dedektörünün ilk katmanının ( $\Delta E$ ) spektrumu . . . . .	30
<b>Şekil 3.33</b> $^{226}\text{Ra}$ kaynak çekirdeğinin, BeamDump dedektörünün ikinci katmanının (E) spektrumu . . . . .	30
<b>Şekil 3.34</b> GLORIA dedektör sisteminin trigger çalışma düzeni (Duran 2016) . . . . .	31



<b>Şekil 3.35</b>	ROOT'ta çizilmiş iki boyutlu histogram örneği. Kalın silikon dedektöre 59 MeV enerji ile gönderilen $^{15}\text{N}$ spektrumu . . . . .	33
<b>Şekil 3.36</b>	LISA dedektörünün GEANT4 simülasyonundaki görünümü (Anonymous 3) . . . . .	34
<b>Şekil 3.37</b>	Simülasyonda kullanılan dedektörün farklı açılardan görünümü . . . . .	35
<b>Şekil 3.38</b>	NPTool reaksiyon dosyasının görünümü . . . . .	36
<b>Şekil 3.39</b>	NPTool dedektör dosyasının içeriği . . . . .	37
<b>Şekil 4.40</b>	Deneyde elde edilen E, $\Delta E$ spektrumu. X eksenini $\Delta E$ , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir . . . . .	38
<b>Şekil 4.41</b>	Deneyde elde edilen E, $\Delta E+E$ spektrumu. X eksenini $\Delta E+E$ , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir . . . . .	38
<b>Şekil 4.42</b>	57 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini $\Delta E+E$ , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir . . . . .	39
<b>Şekil 4.43</b>	57 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini $\Delta E$ , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir . . . . .	40
<b>Şekil 4.44</b>	59.5 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini $\Delta E+E$ , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir . . . . .	40
<b>Şekil 4.45</b>	59.5 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini $\Delta E$ , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir . . . . .	41
<b>Şekil 4.46</b>	65 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini $\Delta E+E$ , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir . . . . .	41
<b>Şekil 4.47</b>	65 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini $\Delta E$ , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir . . . . .	42
<b>Şekil 5.48</b>	Deneyden ve simülasyonda elde edilen spektrumun karşılaştırılması. Spektrumlarda tam bir tutarlılık sağlanamamıştır. Yukarıdaki spektrum deneyden elde edilen spektrum, aşağıdaki spektrum ise 59.5 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumudur . . . . .	44
<b>Şekil 5.49</b>	Deneyden ve simülasyonda elde edilen spektrumun karşılaştırılması. Spektrumlarda tam bir tutarlılık sağlanamamıştır. Yukarıdaki spektrum deneyden elde edilen spektrum, aşağıdaki spektrum ise 59.5 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumudur . . . . .	45

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1</b>	Bazı parçacıkların yükleri . . . . .	6
<b>Çizelge 2.2</b>	Bazı parçacıkların ve elementlerin çeşitli birimlerde kütleleri (Serway, Jewett 2018) . . . . .	7
<b>Çizelge 2.3</b>	$^{15}\text{C}$ taban durumu ve ilk uyarılmış durumu (Anonymous 14) . . .	22
<b>Çizelge 3.4</b>	Deneyin takvimi . . . . .	24
<b>Çizelge 3.5</b>	Çeşitli izotopların enerji değerleri . . . . .	30
<b>Çizelge 3.6</b>	GLORIA dedektör sisteminde kullanılan elektronikler . . . . .	32



## 1. GİRİŞ

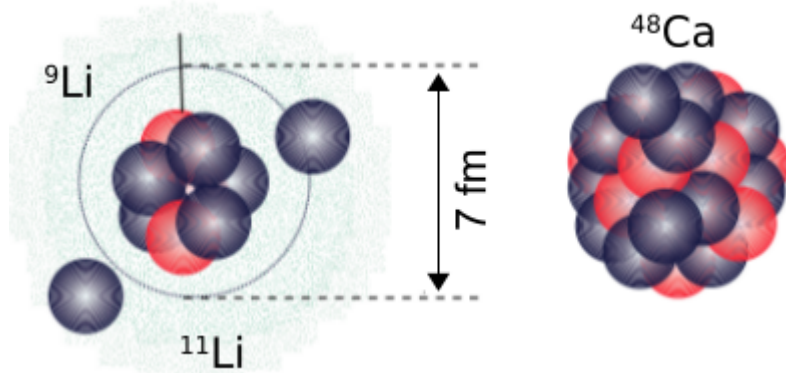
### 1.1. Kısa Tarihçe

Bugün kullandığımız atom kelimesi Antik Yunan'daki atomos kelimesinden gelmektedir. Antik Yunan'da atomos kelimesi "parçalanamaz" veya "bölünemez" anlamlarına gelmekteydi. Daha fazla bölünemez, parçalanamaz atom düşüncesi ilk olarak Antik Yunan filozofları tarafından ortaya çıkartılmıştır. Leukippos (Leucippus) atomculuk teorisini başlatan ilk Antik Yunan filozofudur. Leukippos ve öğrencisi Demokritos (Democritus) bütün maddelerin atomos denilen çok küçük ve parçalanamaz parçalardan oluştuğunu ileri sürmüşlerdir. Leukippos ve Demokritos gibi atomcuların "Bir maddeyi sürekli kesmeye devam edersek ne olur?" sorusu atomculuk teorisini başlatan temel sorudur. Antik Yunan'dan günümüze atom hakkındaki bilgilerimiz değişmekle birlikte devam etmektedir. Modern atom teorisine 19. ve 20. yüzyılda başlanılmış olup halen daha atomlar ve atom altı parçacıklar hakkından yeni keşifler yapılmaya devam edilmektedir (Serway, Jewett, Hernandez ve Lopez 2005; Taylor vd. 2010; Russell 2013).

Nükleer fizik, radyoaktivitenin Henri Becquerel tarafından keşfedilmesiyle başlamıştır (Becquerel 1896). Sonraki yıllarda Marie Curie ve Ernest Rutherford'un çalışmaları nükleer fizik için çok önemli kilometre taşlarındandır.

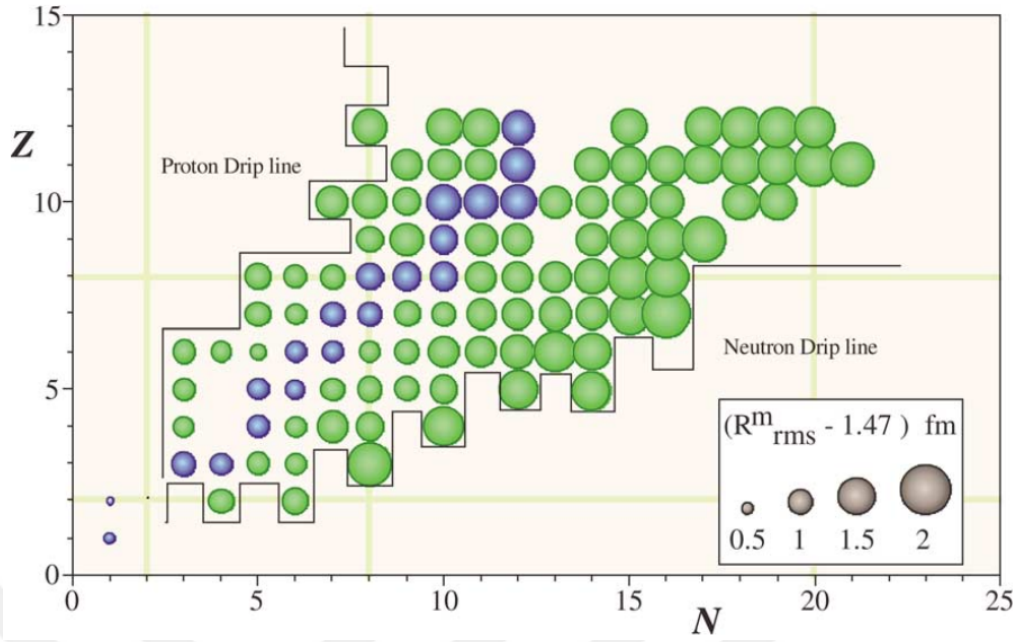
Nükleer reaksiyonlar, atom çekirdeğini incelemek için önemli araçlardır. Bu alanda öncü deneysel çalışmalardan birisi Ernst Rutherford tarafından yapılmış olan saçılma deneyidir (Rutherford 1911). O günden, bu zamana kadar saçılma deneyleri atom çekirdeğinin daha iyi anlaşılması ve hakkında daha fazla bilgi edinmek için nükleer fizikte kullanılan önemli bir araç olmuştur.

Deneysel olarak halo çekirdeklerinin bulunduğu ilk çalışma Isao Tanihata tarafından 1985 yılında gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak bulunan ilk halo izotop, lityum izotopu olan  $^{11}\text{Li}$ 'dir ve nötron halosuna sahiptir (Tanihata vd. 1985).



**Şekil 1.1.**  $^{11}\text{Li}$  ve  $^{48}\text{Ca}$  çekirdeklerinin karşılaştırılması.  $^{48}\text{Ca}$  çekirdeğinin  $^{11}\text{Li}$  çekirdeğinden çok daha fazla nükleona sahip olmasına rağmen,  $^{11}\text{Li}$ 'nin halo yapısı nedeniyle benzer büyüklükte dirler



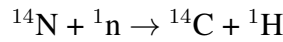


**Şekil 1.3.** Hafif çekirdeklerin ortalama karekök yarıçapları (Tanihata ve Kanungo 2003)

### 1.3. Nötron Zengini Karbon İzotopları

Doğada Kararlı halde bulunan karbon izotopları iki tanedir ve bunlar  $^{12}\text{C}$  ve  $^{13}\text{C}$ 'dir.  $^{14}\text{C}$ ,  $^{15}\text{C}$ ,  $^{16}\text{C}$ ,  $^{17}\text{C}$ ,  $^{18}\text{C}$ ,  $^{19}\text{C}$ ,  $^{20}\text{C}$ ,  $^{22}\text{C}$  ise nötron zengini karbon izotoplarıdır. Bu nötron zengini karbon izotoplarından  $^{15}\text{C}$ ,  $^{19}\text{C}$  ve  $^{22}\text{C}$  nötron halo yapısına sahiptirler.

Doğada en çok bulunan karbon izotopu  $^{12}\text{C}$ 'dir. Kararlı karbon çekirdeklerinin doğadaki bolluk oranı  $^{12}\text{C}$  ve  $^{13}\text{C}$  için sırasıyla 98.9% ve 1.1% olarak bulunmuştur. En uzun yarı ömüre sahip olan radyo izotop ise  $^{14}\text{C}$ 'dir. Yarı ömrü 5700 yıldır ve aşağıda ifade edilen kozmojenik reaksiyonlar (kozmetik radyasyonların etkisiyle) nedeniyle eser miktarlarda sürekli oluşmaktadır.  $^{14}\text{C}$  arkeolojide, radyometrik yaş tayini için kullanılmaktadır (Anonymous 5).



Bu tezin konusu olan karbon izotopu ise  $^{15}\text{C}$  izotopudur. Yarı ömür süresi 2.45 saniyedir ve bir nötron koparma enerjisi 1218 keV'dir (Ajzenberg-Selove 1991; Murillo, Sen, Darden 1994; Martel 2015 ). Dolayısıyla nötron halo yapısını daha iyi anlamak için  $^{15}\text{C}$  önemli bir çekirdektir.

## 2. KAYNAK TARAMASI

### 2.1. Atom

Atom bir maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini taşıyan en küçük yapı taşıdır. Atomlar proton, nötron ve elektron olarak isimlendirilen üç tane atomaltı parçacıktan oluşurlar. Proton ve nötronlar atomun merkezinde bulunurlar ve atom çekirdeğini oluştururlar. Elektronlar ise bu atom çekirdeğinin etrafında elektron bulutu oluşturacak biçimde atom çekirdeğini sararlar. Nötronlar yüksüz, Protonlar pozitif, elektronlar negatif yüke sahiptir. Proton ve nötronlar, elektronlardan yaklaşık olarak 1840 kat daha fazla kütleyle sahiptirler. Atom büyüklükleri Angstrom yani  $10 \times 10^{-10}$  m mertebesindedir. 1969 yılında Dmitri Mendeleev elementleri atom numarasına göre düzenleyerek Şekil 2.4'te görülen Mendeleev periyodik cetvelini oluşturmuştur.

Group Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac *	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
				* 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
				* 90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Şekil 2.4. Mendeleev periyodik cetveli

### 2.2. Atom Çekirdeği ve Özellikleri

Nükleer fizik, atom çekirdeğini inceler. Temel amacı atom çekirdeğinin özelliklerini, yapısını ve çekirdeği bir arada tutan kuvvetleri anlamaktır. Atom çekirdeğinin yük, kütle, yarıçap gibi özelliklerini tanımlamak önemlidir. Şekil 2.5'te Bohr atom modeline göre bir atomun temsili şekli gösterilmektedir. Çekirdekte proton ve nötronlar ve bu çekirdeğin etrafında elektronlar bulunmaktadır.

#### 2.2.1. Notasyon ve temel kavramlar

Atom çekirdeği tanımlanırken sahip olduğu proton ve nötron sayılarına göre tanımlanır. En genel halde bir atom çekirdeğini ifade etmek için  ${}^A_ZX$  sembolü kullanılır. Burada:

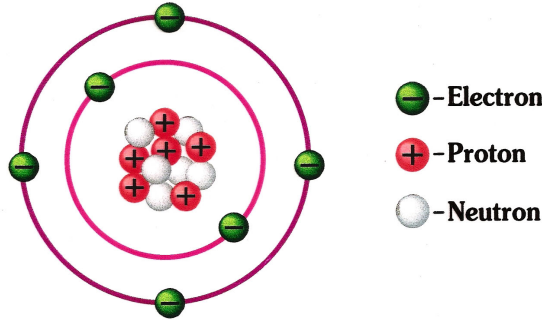
- **Atom numarası Z:** Çekirdeğin içerisindeki proton sayısı.

- **Nötron sayısı N:** Çekirdeğin içerisindeki nötron sayısı.
- **Kütle numarası A :**  $A = Z + N$ , çekirdeğin içerisindeki nükleonların toplam sayısıdır.

X ise elementin kimyasal sembolünü temsil eder. Örneğin bir karbon çekirdeği  $^{12}_6\text{C}$  veya  $^{12}\text{C}$  şeklinde gösterilir ve burada 12 kütle numarası, 6 ise atom numarasıdır.

Atom çekirdekleri için sık kullanılan kavramlardan bazıları izotop, izoton ve izobardır.

- **İzotop:** Z proton sayıları aynı, N nötron sayıları farklı çekirdeklerdir. Örneğin  $^{12}_6\text{C}$  ve  $^{13}_6\text{C}$  çekirdekleri birbirlerinin izotop çekirdekleridir.
- **İzoton:** N nötron sayıları aynı, Z proton sayıları farklı çekirdeklerdir. Örneğin  $^{36}_{16}\text{S}$  ve  $^{37}_{17}\text{Cl}$  çekirdekleri birbirlerinin izotonudur.
- **İzobar :** Aynı A kütle numarasına sahip, farklı Z proton sayılarına sahip olan çekirdeklerdir.  $^{12}_6\text{C}$  ve  $^{12}_5\text{B}$  çekirdekleri ise izobar çekirdekler olarak örnek verilebilir.



Şekil 2.5. Bohr atom modeline göre bir atomun temsili (Anonim 1)

### 2.2.2. Özellikleri

Atom çekirdeği, proton ve nötronlardan oluşur. Proton ve nötronlar, nükleon olarak adlandırılırlar. Atomu bir arada tutan kuvvetler yani nükleonların bir arada durmasını sağlayan kuvvet güçlü nükleer kuvvettir.

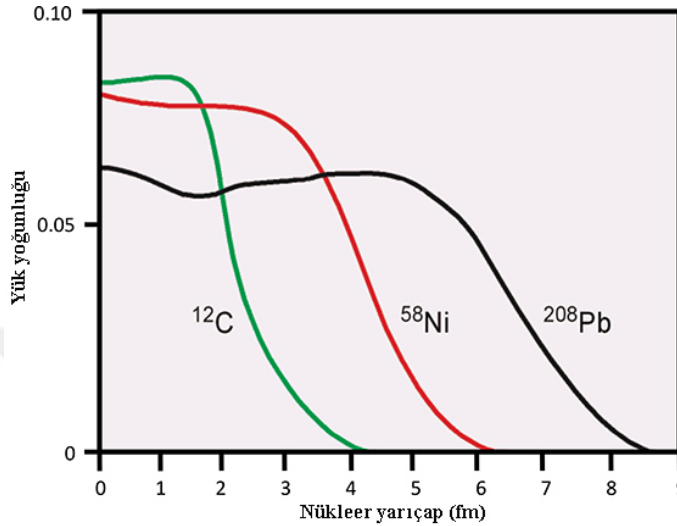
### 2.2.3. Yarıçap

Atom çekirdeği yarıçapı günlük hayatta karşılaştığımız gibi maddelerin örneğin katı bir kürenin yarıçapı gibi hesaplanamaz. Bunun sebebi atom çekirdeklerinin bir küre gibi keskin sınırlara sahip olmamalarıdır. Bu yüzden nükleer yarıçapı tanımlarken yoğunluğun yarıya indiği nokta yarıçap olarak kabul edilir.

Nükleer fizikte karşılaştığımız büyüklükler femtometre,  $10^{-15}$  m mertebesindedir. Atom çekirdeği yarıçapları zayıf çekirdekler için 1.7566 fm (hidrojen yarıçapı) ile başlar ve ağır çekirdeklerde 11.7142 fm (uranyum) büyüklüğüne kadar ulaşır. Nükleer yarıçap kararlı atom çekirdekleri için (halo çekirdekleri için geçerli değil) aşağıdaki:

$$R = r_0 A^{1/3}$$

Formülü ile yaklaşık olarak hesaplanabilir. Burada  $R$  çekirdek yarıçapı,  $A$  kütle numarası,  $r_0$  ise bir sabittir.  $r_0=1.25 \text{ fm}=1.25 \times 10^{-15} \text{ m}$  (Krane 2001). Bu formülü  $^{12}_6\text{C}$ ,  $^{107}_{47}\text{C}$ ,  $^{238}_{92}\text{C}$  çekirdekleri için hesaplandığında sırasıyla 3 fm, 6.2 fm ve 8.1 fm olarak bulunur.



**Şekil 2.6.** Bazı kararlı çekirdeklerin elektron saçılmasıyla elde edilmiş yük yoğunlukları. Grafikte görüldüğü üzere 58 nükleondan oluşan nikel'in ( $^{58}\text{Ni}$ ) yük yoğunluğu yarıçapı 12 nükleondan oluşan karbondan ( $^{12}\text{C}$ ) daha büyük ve 208 nükleondan oluşan kurşun ( $^{208}\text{Pb}$ ) ise bu grafikteki en büyük yük yoğunluğu yarıçapına sahiptir. (Al-Khalili 2017)

#### 2.2.4. Yük

Elektron  $-1e$ , Proton  $+1e$ , nötron ise 0 net yüke sahiptir. Proton ve nötronlar, kuark denilen parçacıklardan meydana gelirler. Proton iki yukarı kuark ve bir aşağı kuarktan meydana gelir. Nötron bir yukarı kuark ve iki aşağı kuarktan meydana gelir. Yukarı kuark  $+2/3e$ , aşağı kuark  $-1/3e$  yüke sahiptir. Burada  $e$  temel yüküdür ve  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$  değerine sahiptir (Anonymous 4). Şekil 2.6'da  $^{12}\text{C}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  elementlerinin nükleer yarıçap, yük yoğunluğu grafiği verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Bazı parçacıkların yükleri

Parçacık	Yük
Proton	$-1/3e$
Nötron	0
Elektron	$-1e$
Yukarı kuark	$+2/3e$
Aşağı kuark	$-1/3e$



### 2.2.5. Çekirdek seviyesinde kütleler

Proton, nötron, elektron gibi parçacıklar birbirlerinden farklı kütlelere sahiptirler. Protonun kütlesi  $1.67262 \times 10^{-27}$  kg dir. Nötronun ve elektronun ise kütleleri ise sırasıyla  $1.67493 \times 10^{-27}$  kg ve  $9.10938 \times 10^{-31}$  kg dir. Açılımı atomik kütle birimi olan akb nükleer fizikte sık olarak kullanılır ve 1 akb,  $^{12}_6\text{C}$  atomunun kütlelerinin 1/12 sine eşittir. Bazı parçacıkların kütle değerleri farklı birimlerde aşağıdaki tabloda verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Bazı parçacıkların ve elementlerin çeşitli birimlerde kütleleri (Serway, Jewett 2018)

Parçacık	Kg	Akb	MeV/c <sup>2</sup>
Proton	$1.67262 \times 10^{-27}$	1.007276	938.27
Nötron	$1.67493 \times 10^{-27}$	1.008665	939.57
Elektron	$9.10938 \times 10^{-31}$	$5.48579 \times 10^{-4}$	0.510999
$^{12}_6\text{C}$	$1.992 \times 10^{-27}$	12.000	11177.9

### 2.3. Bağlanma Enerjisi

Nükleer bağlanma enerjisi, atom çekirdeğindeki proton ve nötronları tamamen ayırabilmek için gerekli olan enerjidir. Nükleonları ayırmak için dışarıdan bir enerji verilmesi gerekmektedir. Herhangi bir  $^A_Z\text{X}$  çekirdeğinin  $B$  bağlanma enerjisi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$B = [Zm(^1\text{H}) + Nm_n - m(^A\text{X})]c^2$$

Burada bağlanma enerjisi  $B$ , çekirdeğin proton sayısı  $Z$ , çekirdeğin nötron sayısı  $N$ , hidrojen atomunun kütlesi  $m(^1\text{H})$ , bağlanma enerjisini hesaplamak istediğimiz çekirdeğin kütlesi  $m(^A\text{X})$  ve son olarak  $c$  ise ışık hızıdır.

### 2.4. Kararlı Çekirdekler

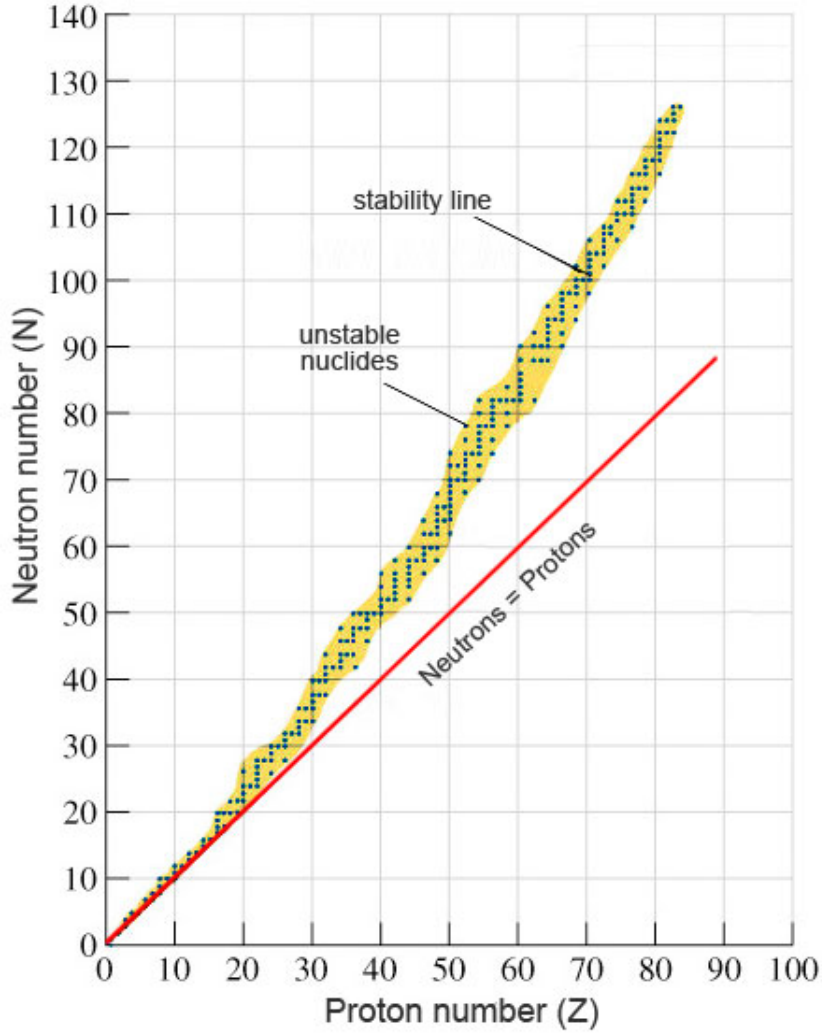
Çekirdeği bir arada tutan kuvvetler elektro-manyeti kuvvet ve güçlü nükleer kuvvettir. Kararlı çekirdekler, çekirdeğin içerisindeki nükleonları kalıcı olarak bir arada tutmaya yetecek bağlanma enerjisine sahip olan çekirdeklerdir. Doğadaki birçok atom çekirdeği kararlı haldedir (Anonymous 10). Şekil 2.7'de görülen nükleer kararlılık eğrisinde mavi reklı olarak verilen çekirdekler kararlı çekirdeklerdir.

### 2.5. Radyoaktif Çekirdekler

Radyoaktif çekirdekler fazla enerjiye sahiptirler. Bu sahip olduğu fazla enerjiden atom altı parçacık salarak kurtulurlar ve daha dengeli hale gelirler. Şekil 2.7'de görülen nükleer kararlılık eğrisinde sarı reklı olarak verilen çekirdekler radyoaktif çekirdeklerdir. Radyoaktif çekirdekler farklı bozunumlara uğrayabilirler.

## 2.6. Bozunum Türleri

Temel olarak bozunum türleri üç tanedir. Bunlar alfa, beta ve gama bozunumlarıdır. Bozunum türleri üçten daha fazla olsa da diğerleri bu tezin konusu dışında olduğu için açıklanmamıştır.

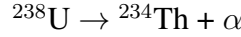


Şekil 2.7. Nükleer kararlılık eğrisi (Anonymous 10)

### 2.6.1. Alfa bozunumu

Alfa bozunumunda atom çekirdeği alfa parçacığı yayımlar ve bunun sonucunda bozunum sonrasındaki çekirdek bozunum öncesi çekirdekten farklıdır. Bu bozunum türü kararsız ağır atom çekirdeklerinde görülür.  $^{238}\text{U}$  çekirdeği alfa bozunumu yapar, uranyum çekirdeği  $^{234}\text{Th}$  toryum çekirdeğine dönüşür ve alfa parçacığı yayımlar. Bu bozunum sonucunda oluşan çekirdek bozunuma uğrayan çekirdekten daha kararlıdır (Anonymous 11).

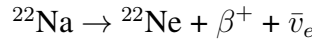
Alfa bozunumu gösterimi:



### 2.6.2. Beta bozunumu

Diğer bozunum çeşidi beta bozunumudur. Bu bozunum türünde bozunuma uğrayan çekirdekten beta parçacığı ve nötrino yayımlanır. Bu bozunum beta pozitif ve beta negatif olmak üzere ikiye ayrılır.

Beta pozitif bozunumu örneği:



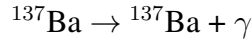
Beta negatif bozunumu örneği:



### 2.6.3. Gama bozunumu

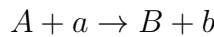
Genel olarak alfa veya beta bozunumu sonrasında ortaya çıkan kararsız çekirdekten gama ışınları yayımlanır. Çekirdek içerisindeki fazla enerji gama parçacığı yayımlanarak atılır. Bozunum öncesindeki ve sonrasında ortaya çıkan kararsız çekirdek aynıdır.

Gama bozunumu gösterimi:



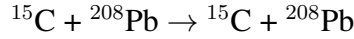
## 2.7. Nükleer Reaksiyonlar

Atom çekirdeklerini araştırmak ve üretmek için kullanılan en önemli araçlardan birisi nükleer reaksiyonlardır. Parçacıklar çarpıştığında birçok farklı süreç gerçekleşebilir (Satchler 1980). Nükleer reaksiyonları tarif etmenin en genel ifadesi:

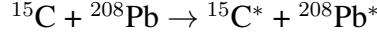


ile verilir. Şekil 2.8'de Nükleer reaksiyon şeması verilmiştir. Burada, A hedef çekirdek, a fırlatılan çekirdek, B reaksiyon dolayısıyla değişen çekirdek, b gözlemlenen parçacıktır. B, b veya ikisi de reaksiyon sonrası uyarılmış durumda olabilir böyle durumlarda B\* veya b\* şeklinde gösterilir. Reaksiyonda yayılan enerji, Q, reaksiyondan sonra parçacıkların kinetik enerjisi ( $E_f$ ) eksi reaksiyondan önce parçacıkların kinetik enerjisi ( $E_i$ )'dir. Q değeri pozitif (ekzotermik reaksiyon), negatif (endotermik reaksiyon) veya sıfır olabilir. Çeşitli reaksiyonlar gerçekleşebilir:

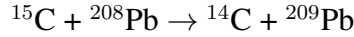
**Elastik saçılma:** Bu tür reaksiyonda  $b = a$  ve  $B = A$ , çekirdek iç yapısı değişmez ve reaksiyon Q değeri sıfırdır. Enerji reaksiyon öncesi ve sonrasında aynıdır. Örneğin:



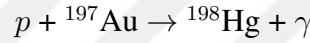
**İnelastik saçılma:** B, b veya ikisi uyarılmış durumdadır, dolayısıyla  $Q=-E$ , parçacıkların uyarılması için gerekli enerji  $E$ 'dir. Örneğin:



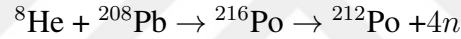
**Transfer reaksiyonu:** Burada mermi ve hedef çekirdek arasındaki nükleon değişiminden dolayı  $b \neq a$  ve  $B \neq A$  olur.



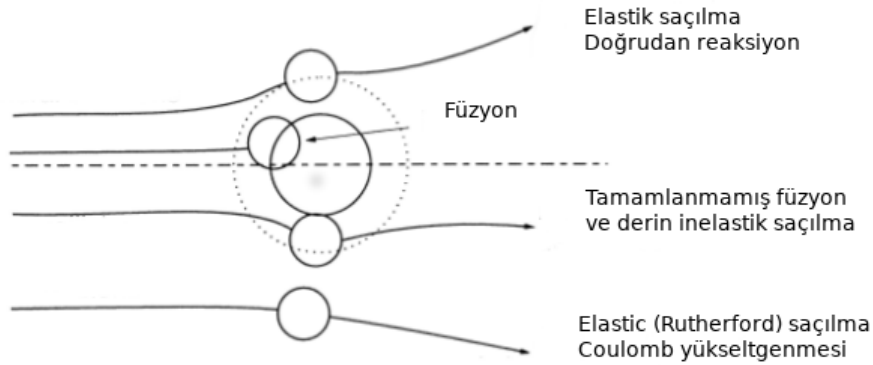
**Yakalama reaksiyonları:**  $a$ 'nın  $A$  çekirdeği tarafından yakalandığı reaksiyonudur, genellikle uyarılmış durumdadır ve bu yüzden sonrasında bir veya daha fazla gama ışını yayarak taban duruma döner. Örneğin:



**Füzyon-buharlaştırma (fusion-evaporation) reaksiyonu:** Bu tür reaksiyonda  $A$  ve  $a$  birleşirler ve sonrasında parçacık yayımlayarak kararlı hale veya taban duruma geçerler. Örneğin:



**Parçalanma reaksiyonları:** Bu tür reaksiyonlarda fırlatılan çekirdek genellikle zayıf bağlıdır, hedef çekirdekteki nükleer ve elektro-manyetik alan nedeniyle bir veya daha fazla parçaya ayrılır (Durán 2016).

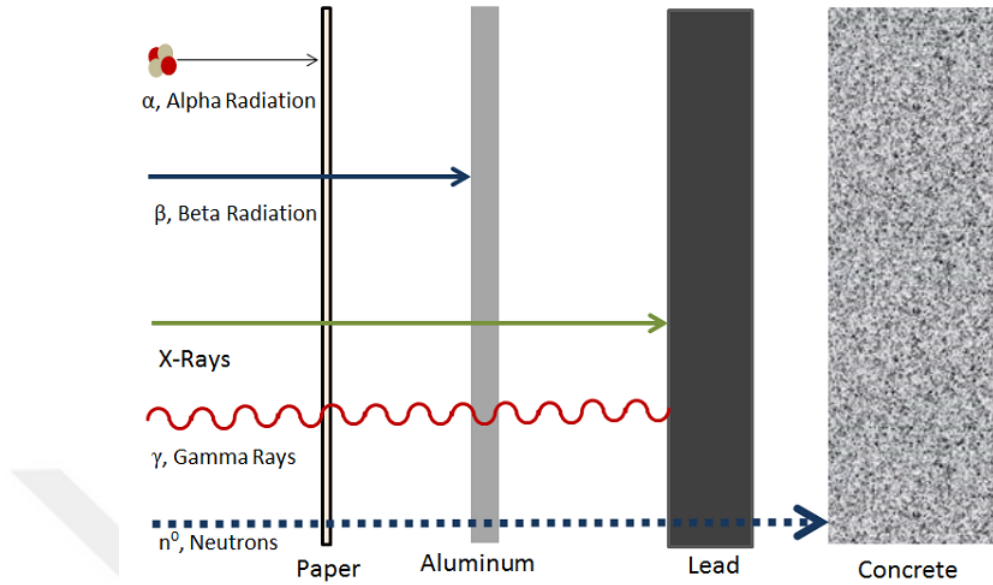


**Şekil 2.8.** Nükleer reaksiyonlar

## 2.8. Radyasyon Madde Etkileşimi



Radyasyon ölçümü yapıldığında, radyasyon ve madde etkileşiminin anlaşılması önemlidir çünkü dedektöre gelen veya gönderilen radyasyon ışınının, dedektörün yapıldığı ma-

teryal ile etkileşimi ve bu maddeye enerjisini aktarmasıyla radyasyon tespiti gerçekleşir.



**Şekil 2.9.** Çeşitli radyasyon türlerinin madde içerisinde gidebilecekleri uzaklıklar (Anonymous 12)

Basit olarak nükleer dedektörlerin çalışma prensipleri: Radyasyon dedektöre girer, dedektörün yapıldığı madde ile etkileşir ve enerjisinin bir kısmını veya tamamını kaybeder ve göreceli olarak düşük enerjili olan elektronların salınmasına neden olur. Bu elektronlar toplanır ve analiz edilmek üzere elektronik devreler tarafından akım pulsu veya voltaja çevirilir.

Yüklü Parçacıklar		Yüksüz Parçacıklar
Ağır yüklü parçacıklar (Karakteristik yarıçap $\cong 10^{-5}$ m)		Nötronlar (Karakteristik yarıçap $\cong 10^{-1}$ m)
Hızlı elektronlar (Karakteristik yarıçap $\cong 10^{-3}$ m)		X ve gama ışınları (Karakteristik yarıçap $\cong 10^{-1}$ m)

**Şekil 2.10.** Parçacıkların madde içerisinde karakteristik menzilleri (Knoll 2010)

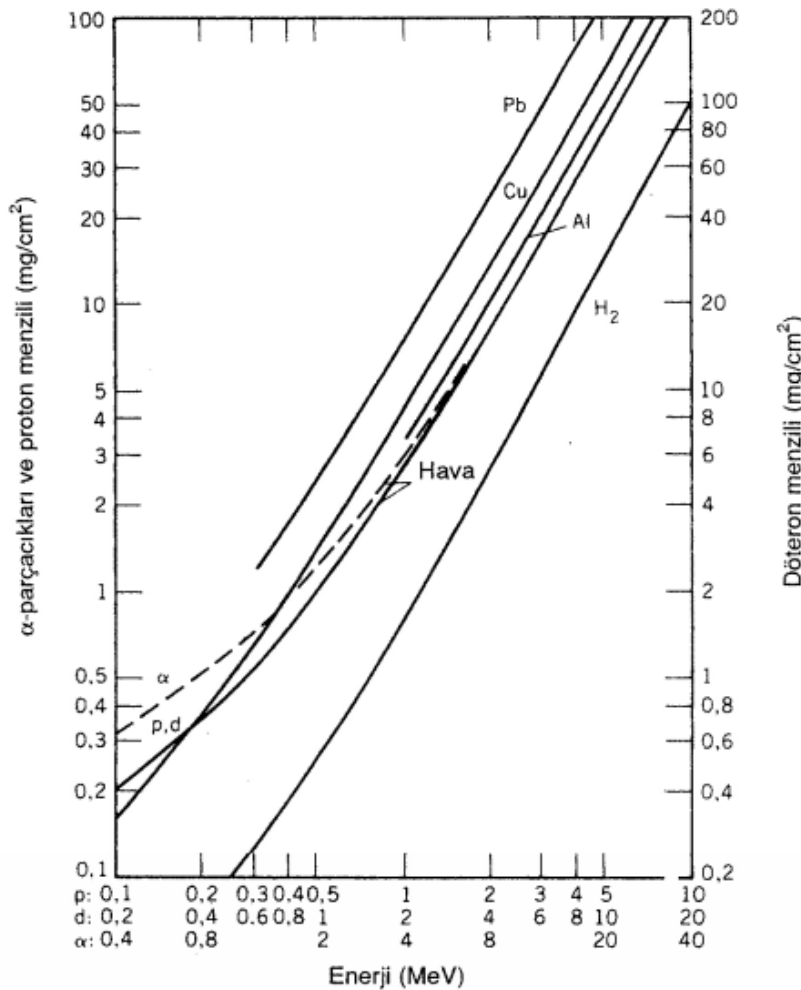
Nükleer radyasyon dedektörlerinin yapımında kullanılan materyal, tespit edilmesi istenilen radyasyon türüne ve bu radyasyonun tespit edilmesi istenilen niceliğine göre seçilir. Şekil 2.9'da görüldüğü üzere farklı radyasyon türleri madde içerisinde farklı mesafeler alırlar. Radyoaktif bozunumlardan saçılan alfa parçacıklarının veya düşük enerjili yüklü parçacıkların tespiti için 100  $\mu$ m kalınlığa sahip çok ince dedektörler yeterli olabiliyor-ken beta bozunumundan saçılan elektronları tespit etmek için 0.1 mm - 1 mm kalınlığına sahip dedektörler gerekmektedir. Gama ışınlarının tespiti için ise daha kalın dedektörler gereklidir ve 5 cm kalınlığa sahip dedektörler bile gelen gama ışınına tespit etmek için ye-

terli olmayabilirler (Krane, Halliday 1987). Şekil 2.10'da ise farklı parçacıkların madde içerisindeki karakteristik menzilleri verilmiştir.

### 2.8.1. Ağır yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi

Madde içerisinde ilerleyen parçacıklar enerjilerini dört şekilde kaybederler (Tsoulfanidis 2010).

1. Coulomb etkileşimi
2. Bremsstrahlung ışınması
3. Nükleer etkileşim
4. Cherenkov ışınması



Şekil 2.11. Çeşitli materyeller için menzil-enerji ilişkisi (Krane 2001)

Alfa parçacığı gibi ağır yüklü parçacıklar ilk olarak Coulomb kuvveti ile etkileşirler. Yüklü parçacıklar madde içerisine girdiği andan itibaren sürekli olarak birçok elektronla etkileşir ve bu etkileşimlerin sonucunda bazı elektronlar uyarılmış duruma geçebilir

veya atomdan tamamen kopabilirler. Aynı zamanda yüklü parçacıktan elektrona aktarılan enerji kadar, yüklü parçacık hız kaybeder. Bu etkileşim sonucunda transfer edilebilecek maksimum enerji, kütlesi  $M$ , kinetik enerjisi  $T$  olan yüklü parçacık ve  $m$  kütlesine sahip elektron için  $4Tm/M$  dir. Yaklaşık olarak yüklü parçacığın nükleon başına düşen enerjisinin  $1/500$  üne karşılık gelir. Yüklü parçacık her bir etkileşimde enerjisinin çok küçük bir kısmını kaybettiği için madde içerisinde ilerlerken birçok kez elektronlarla etkileşime girer ve yüklü parçacık durana kadar madde içerisinde hız kaybeder.

Buradan çıkarılabilecek sonuçlar şunlardır:

1. Parçacık, enerjisinin tümünü kaybetmeden önce binlerce benzer saçılma meydana gelir. Kafa kafaya çarpışmada elektrona maksimum enerji aktarılır, pek çok başka çarpışmada ise parçacığın enerji kaybı daha küçük olacaktır.

2. Bir elektron ve bir ağır parçacık arasındaki çarpışmada, ağır parçacık ihmal edilebilir bir açıyla saptırılır. Böylece parçacık hemen hemen doğru bir yol boyunca ilerler.

3. Coulomb kuvveti sonsuz menzile sahip olduğundan parçacık aynı anda birçok elektronla etkileşebilir ve böylece yolu boyunca enerjisini adım adım fakat sürekli olarak kaybeder. Belli bir mesafeyi kat ettikten sonra enerjisinin tümünü kaybeder, bu mesafeye parçacığın menzili denir. Menzil parçacığın türüne, materyalin yapısına ve parçacığın enerjisine bağlıdır. Genellikle ortalama menzille ilgilenilir. Ortalama değişimler çok küçük olduğundan ortalama menzil kullanışlıdır ve kesin tanımlı bir niceliktir.

4. Bir atomu iyonlaştırmak için, yani bir elektronu atomdan koparmak için gerekli enerji  $10 \text{ eV}$  civarındadır, bu nedenle birçok çarpışma atomu iyonlaştırmak için elektrona yeterli enerjiyi aktaracaktır. Eğer bir iyon üretmek için elektrona yeterli enerji verilmezse atom uyarılmış duruma geçer ve hızla taban duruma geri döner. Dahası, aktarılan keV mertebesindeki enerjilerle, ki bunlar delta ışını olarak bilinirler, elektronların kendileri de çarpışmalarla iyon üretebilirler ve daha da fazla ikincil elektronlar oluşturabilirler. Parçacık tarafından kaybedilen enerjiyi belirlemek için atomik uyarmalar kadar birincil ve ikincil elektronlar da göz önüne alınmalıdır (Krane 2001).

Menzil ve enerji arasındaki teorik ilişki çarpışma işleminin kuantum mekaniksel hesabından elde edilebilir. Bu hesap ilk kez 1930 'da Hans Bethe tarafından yapılmıştır. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi enerji arttıkça menzilde artmaktadır. Hesaplamalar birim uzunluk başına enerji kaybının büyüklüğünü, yani durdurma gücü denilen ifadeyi verir ve aşağıdaki gibi gösterilir (Krane 2001).

$$\frac{dE}{dx} = \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{4\pi z^2 N_0 Z \rho}{mc^2 \beta^2 A} \left[ \ln \left( \frac{2mc^2 \beta^2}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (2.1)$$

Burada  $v = \beta c$  parçacığın hızı,  $ze$  parçacığın elektrik yükü,  $Z$ ,  $A$  ve  $\rho$  sırasıyla atom sayısı, atom ağırlığı ve durdurucu materyalin yoğunluğudur.  $N_0$  avogadro sayısı,  $m$  elektronun kütlesi,  $I$  atom elektronlarının ortalama uyarılma enerjisidir. Pratikte  $I$  empirik bir sabit olarak kabul edilir;  $10Z$  civarında eV mertebesinde bir değere sahiptir.

Menzil, yukarıdaki denklemin, parçacığın tüm enerjileri üzerinden integrali alınarak hesaplanır.

$$R = \int_T^0 \left( -\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE \quad (2.2)$$

Ancak menzil sonundaki düşük enerjilerde; Bu denklem geçerliliğini kaybeder, çünkü elektronların bu bölgede yavaş hareket eden parçacık tarafından yakalanmasını bu denklem hesaba katmaz.

### 2.8.2. Elektronların maddeyle etkileşimi

Hızlı elektronlar ağır yüklü parçacıklarla karşılaştırıldığında enerjilerini daha yavaş kaybederler ve materyal içerisinde izledikleri yol daha düzensizdir. Aynı enerjiye sahip bazı elektronların izlediği doğrultular Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.12.** Aynı enerjiye sahip bazı elektronların madde içerisinde izlediği yollar (izleri) (Knoll 2010)

Elektronun doğrultusunun bu kadar sapmalara uğramasının sebebi madde içerisinde saçılmaya uğradığı elektronlarla aynı kütleyle sahip olmasıdır ve tek çarpışmada enerjisinin büyük bir kısmını aktarabilmesidir.

Elektronlar veya pozitronlar tıpkı ağır yüklü parçacıklar gibi atomik elektronlarla Coulomb saçılmasıyla etkileşirler. Ancak bir takım önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Krane 2001).

1. Özellikle beta bozunumlarında yayımlanan elektronlar göreceli hızlarla hareket ederler.
2. Elektronlar diğer elektronlarla çarpışmalarında büyük sapmalara uğrarlar ve düzensiz yörüngeler izlerler. Böylece, menzil, yani materyal içine lineer nüfuz edebilme mesafesi elektronların takip ettikleri yol uzunluğundan çok farklı olacaktır.
3. Elektron bir diğer elektronla kafa kafaya çarpışmasında ilk enerjisinin büyük bir kısmını diğer elektrona aktarabilir. (Gerçekte, elektron-elektron çarpışmalarında iki parçacığın özdeşliği göz önüne alınmalıdır ; çünkü çarpışmadan sonra, hangisinin gelen elektron, hangisinin çarpılan elektron olduğu bilinemez.)
4. Elektron hızının doğrultusu ve büyüklüğünde hızlı bir değişiklik olabileceğinden,



büyük bir ivmeye maruz kalabilir ve ivmeli yüklü parçacıklar da elektromanyetik radyasyon yayınlırlar. Bu radyasyona "Bremsstrahlung" (frenleme) ışınımı denir.

### 2.8.3. Gama ışınlarının maddeyle etkileşimi

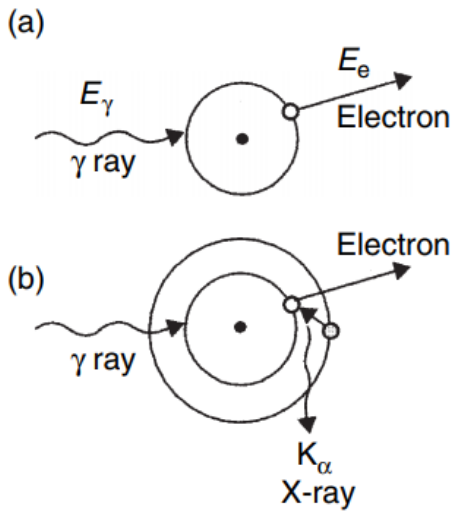
Çok sayıda olası madde-gama ışını etkileşim mekanizması bilinmesine rağmen sadece üç türü radyasyon tespitinde önemli rol oynamaktadır. Bunlar: Fotoelektrik olay, Compton saçılması, çift oluşumu. Bütün bu etkileşimlerin sonucunda gama ışınının sahip olduğu enerjinin bir kısmı veya tamamı elektronlara aktarılır ve bu enerji aktarımı sonucunda gama ışını büyük açılar ile sapabilir veya tamamen madde tarafından soğurulur. Gama ışını madde içerisinde ilerlerken yüklü parçacıkların madde içerisinde ilerlemesine benzer şekilde, sürekli enerji kaybederek ilerler (Knoll 2010).

### 2.8.4. Fotoelektrik olay

Fotoelektrik olayda bir foton yörüngedeki bir elektronla enerjisinin tamamını kaybedecek şekilde etkileşerek absorbe olur. Fotoelektrik olayın şematik olarak gösterimi Şekil 2.13'te verilmiştir. Yörüngedeki elektron etkileşim sonucunda  $E_e$  kinetik enerjisi ile yörüngesinden kopar.  $E_\gamma$  gelen gama ışınının enerjisidir ve  $E_b$  ise elektronun yörüngedeki bağlanma enerjisine karşılık gelmektedir.

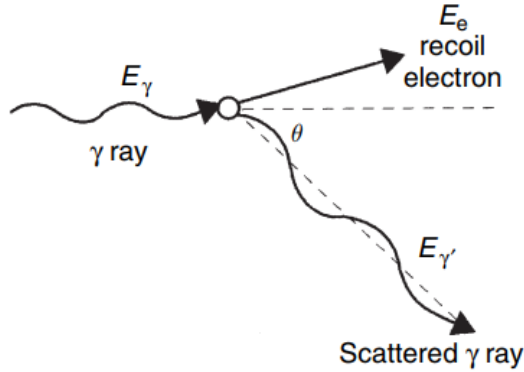
$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (2.3)$$

Bu etkileşim sonrasında atom kararsız haldedir ve kararlı hale geçmek için iki yol izleyebilir. Birinci yol atom sahip olduğu fazla enerjiyi kalan elektronları arasında paylaşır ve bu atomdan daha fazla elektron kopmasına sebep olur. İkinci olarak ise atomdan koparılan elektronun yörüngesine daha yüksek yörüngedeki bir elektron geçer ve karakteristik X-ışını yayımlar.



Şekil 2.13. (a) Fotoelektrik olay gösterimi ve (b) X-ışını yayımlanması

### 2.8.5. Compton saçılması



**Şekil 2.14.** Compton saçılması (Gilmore 2011)

Compton saçılmasında gama ışını ve elektron etkileşir ve bu etkileşim sonucunda gama ışını enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır. Şekil 2.14'te Compton saçılmasının şematik gösterimi verilmiştir. Saçılan elektronun sahip olduğu enerji denklemi:

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma \quad (2.4)$$

veya

$$E_e = E_\gamma \left\{ 1 - \frac{1}{1 + E_\gamma(1 - \cos\theta)/m_0c^2} \right\} \quad (2.5)$$

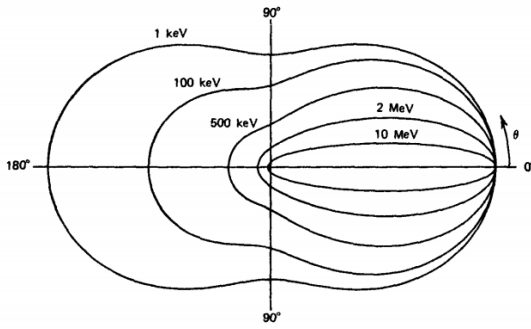
olarak verilmektedir.

Gama ışınının saçılma açısı  $\theta$  nın farklı değerlerini kullanarak bu denklemlerden soğurulma enerjisi ve saçılma açısı arasındaki ilişki elde edilir.  $\theta = 0$  değerini incelersek gama ışınına bir sapma olmadığını görürüz dolayısıyla  $E_e = 0$  olur ve gama ışınının enerjisi değişmemiş ve hiç bir enerji aktarımı olmamıştır.

Saçılan gama ışınlarının açısal dağılımı Klein-Nishina formülü aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left( \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left( \frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left( 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right) \quad (2.6)$$

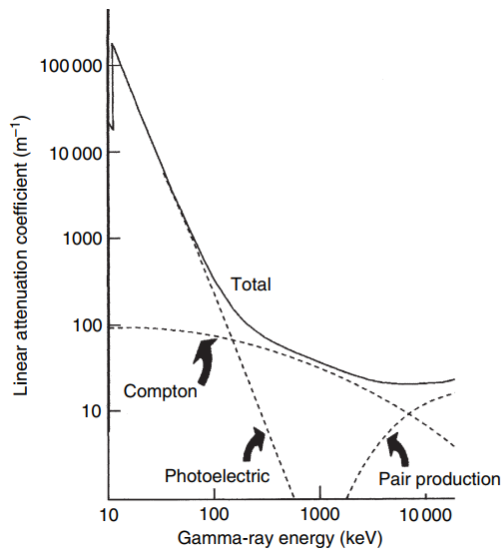
Burada,  $\alpha \equiv hv/m_0c^2$  ve  $r_0$  elektron yarıçapıdır. Bu dağılım Şekil 2.15'te verilmiştir. Bu grafikte görüldüğü üzere yüksek enerjili fotonlarda backscattering (geri saçılma) daha az görülmektedir.



**Şekil 2.15.** Compton saçılmasına uğrayan foton sayısını gösteren polar grafik (Knoll 2010)

### 2.8.6. Çift oluşumu

Çift oluşumu gama ışını(foton) ile çekirdek arasındaki etkileşimdir. Bu etkileşim sonucunda elektron-pozitron çifti oluşurken gama ışını kaybolur. Bunun sonucunda çekirdekte herhangi bir değişim olmaz çekirdek aynı kalır. Şekil 2.17’de Çift oluşum mekanizmasının şematik gösterimi verilmiştir. Bu etkileşimin gerçekleşmesi için gelen gama ışınının enerjisinin durgun elektron enerjisinin en az iki katı olması  $h\nu = 2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$  gerekmektedir. Gama ışını sahip olduğu enerjinin bir kısmını çift oluşumuna harcar ve kalan enerji elektron-pozitron çifti arasında kinetik enerji olarak paylaşılır. Şekil 2.16’da üç olayın lineer sönüm katsayıları verilmiştir.



**Şekil 2.16.** Fotoelektrik, çift oluşumu ve Compton saçılması etkileşimleri için lineer sönüm katsayıları (Gilmore 2011)

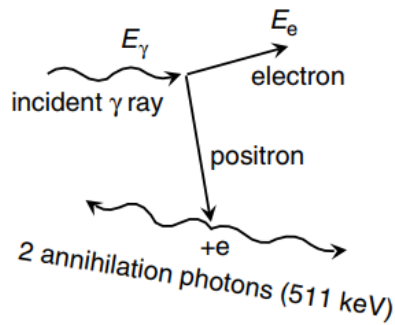
Enerji korunumunu kullanarak elektron ve pozitron enerjisi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$T_{e^-} + T_{e^+} = E_\gamma - 1.022 \text{ MeV} \quad (2.7)$$

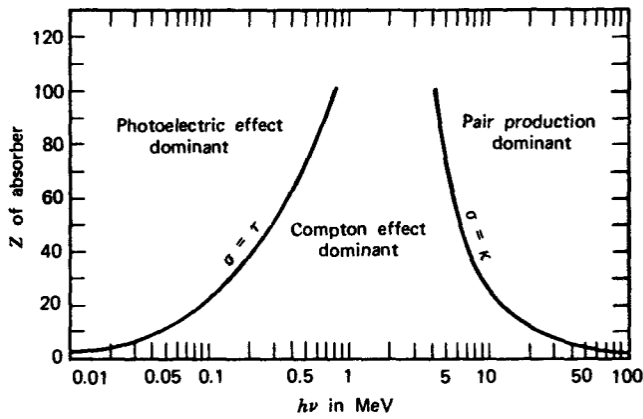
Kinetik enerji elektron ve pozitron arasında eşit olarak dağılır ve sonuç olarak

$$T_{e^-} = T_{e^+} = \frac{1}{2} (E_\gamma - 1.022 \text{ MeV}) \quad (2.8)$$

formülü elde edilir. Çift oluşumda gelen gama ışını kaybolur fakat pozitronun yok olması dolayısıyla iki tane foton oluşur. Şekil 2.18'de Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve Çift oluşumu olaylarının baskın olduğu bölgeler verilmiştir.



Şekil 2.17. Çift oluşum mekanizması (Gilmore 2011)

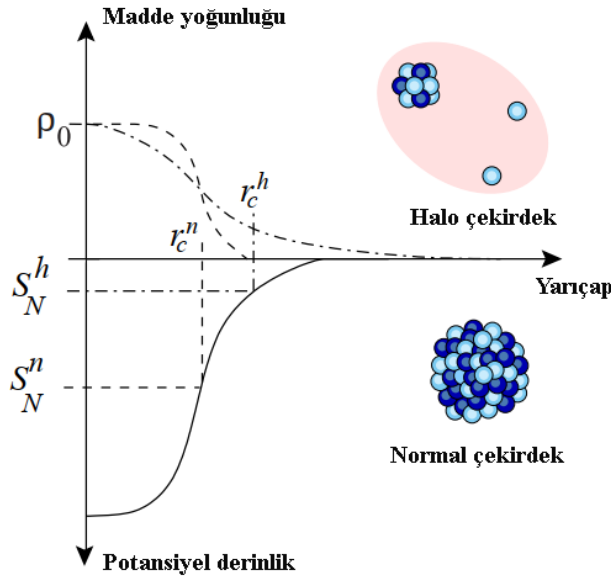


Şekil 2.18. Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumunun baskın olduğu bölgeler (Knoll 2010)

## 2.9. Halo Çekirdek Özellikleri

Halo kelimesi birçok yerde ve birçok bilim dalında karşımıza çıkar. Örneğin, güneş fiziğinde 'Halo olayı' olarak adlandırılan bir olay vardır. Genel olarak baktığımızda halo, merkezdeki bir objenin dışında ondan daha geniş ve çembersel bir yapıya sahiptir. Nükleer

fizikteki halo'lar kuantum etkileri sayesinde oluşurlar. En bilindik halo çekirdek  $^{11}\text{Li}$ 'dir. Üç proton ve sekiz nötrondan oluşur. Son yörüngedeki iki nötron çok zayıf bir şekilde çekirdeğe bağlıdır. Bu sebeple dalga fonksiyonları diğer dokuz nükleondan daha uzağa yayılmıştır.  $^{11}\text{Li}$  ve  $^{208}\text{Pb}$  çekirdeklerinin neredeyse aynı büyüklükte olmasının sebebi bu çok zayıf bağlı son iki nötrondur.  $^{11}\text{Li}$ 'nin ortalama yarıçapı 3.5 fm olmasına rağmen son yörüngedeki iki nötronun olasılık yoğunluğu çekirdeğin merkezinden 6 fm'ye kadar uzanmaktadır. Kütle numarası 11 olan ve halo yapısı olmayan çekirdekleri incelediğimizde yarıçaplarının 2.7 fm civarında oldukları görülmektedir. Şekil 2.19'da halo ve kararlı çekirdeklerin farklılıklarını gösteren verilmiştir.



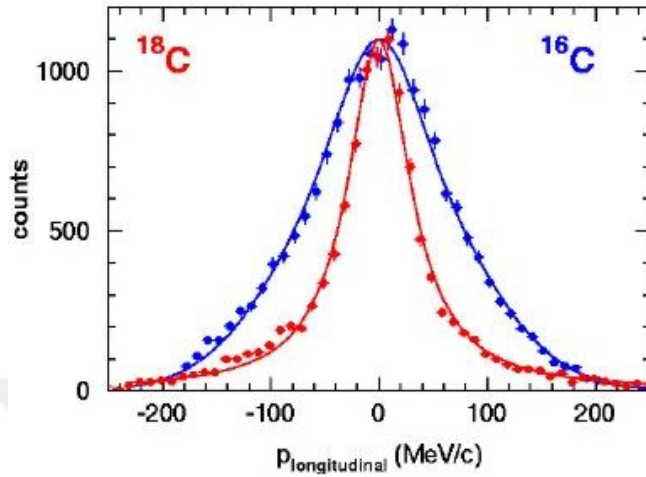
**Şekil 2.19.** Halo ve kararlı çekirdeklerin farklılıklarını gösteren grafik (Markenroth 2001)

Halo çekirdeklerin 1980'li yıllarda keşfedilmesi nükleer fizik alanında büyük bir heyecan yarattı. Halo çekirdeklerin keşfedilmesiyle birlikte çekirdek teorilerinde bu fenomeni açıklamak için gelişmeler olmaya başladı. Aynı zamanda deneysel nükleer fizikte de bu yeni fenomeni açıklamak için yeni parçacık hızlandırıcıları ve dedektörlerin yapımında motivasyon kaynağı oldu. Altı nötrondan oluşan helyum izotopu  $^8\text{He}$  ve on altı nötrondan oluşan karbon izotopu  $^{22}\text{C}$  keşifleri halo çekirdekleri için önemli keşifler oldu.

Halo çekirdeğinin daha kesin tanımını yaparsak bir veya iki çok zayıf bağlı valans nükleon tarafından oluşan sınır etkisidir(threshold effect). Bu valans nükleonlar diğer bütün nükleonların bulunduğu çekirdeğin göreceli olarak dışındadırlar. Bu olay kuantum mekaniksel bir olaydır. Bu valans nükleonlar çekirdeğin diğer nükleonlarından daha zayıf bağlı olmaları nedeniyle valans nötronlar çekirdeğin dışına tünellerler.

Halo çekirdeklerin fizikçiler için kabul edilen tanımında ise taban durumundaki bir çekirdeğin, nötron halosunun olasılık yoğunluğunun çekirdek potansiyelinden %50 daha fazla olması gerekmektedir.

Halo çekirdeklerde valans nükleonların ve çekirdeğin ayrı olması ve düşük koparma enerjisine sahip olması yanı sıra sahip olmaları gereken diğer bir özellik ise küçük açısal momentuma sahip olmalarıdır.



Şekil 2.20.  $^{18}\text{C}$  ve  $^{16}\text{C}$  izotoplarının momentum dağılımı (Anonymous 13)

Halo çekirdek olarak sınıflandırırken dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus ise uyarılmış durumda bulunan çekirdeklerin nötron koparma enerjisinin düşük olması bu çekirdeklerin halo çekirdeği olduğu veya halo çekirdeği etkisi gösterdiği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bir izotopun halo çekirdek olduğunu söylememiz için tek koşul çok düşük koparma enerjisi değildir aynı zamanda çekirdek ve valans nükleonun birbirinde uzakta, ayrılmış olarak bulunmaları gerekmektedir.

Halo çekirdeklerin farklı özelliklerinden biri de sihirli numaralardır. Halo çekirdeklerin sihirli sayıları, kararlı çekirdeklerden farklıdır.

Halo çekirdekler çok kısa yarı-ömüre sahip oldukları için deneysel araştırmalar ancak radyoaktif ışın demeti laboratuvarlarında gerçekleştirilebilmektedir (Al-Khalili 2017).

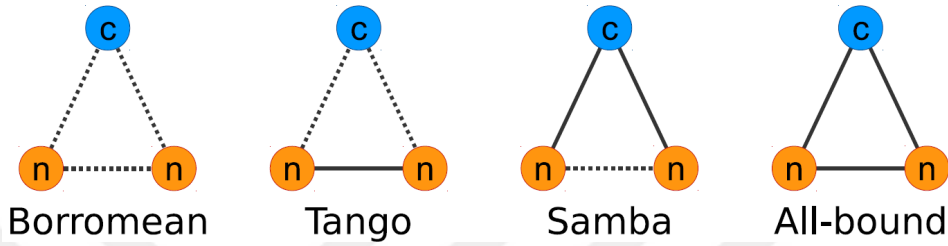
Bir çekirdeğin halo çekirdek olması için gereken özellikler aşağıda verilmiştir.

- Son yörüngedeki nükleonların çok düşük enerjilerle bağlı olması.
- Son yörüngedeki nükleonların olasılık yoğunluğunun yüksek olması.
- Şekil 2.20'de görüldüğü üzere Heisenberg belirsizlik ilkesi sebebiyle momentum dağılımının aynı kütle numarasına sahip kararlı çekirdeklere göre daha keskin olması.
- Aynı kütle numarasına sahip kararlı çekirdeklere göre daha yüksek parçalanma tesir kesitine sahip olmaları.
- Yoğunluk dağılımının uzun kuyruklu bir yapıda olması.

### 2.9.1. Nötron halo

Nötron halosuna örnek olarak  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{Be}$ ,  ${}^{17}\text{B}$ ,  ${}^{15}\text{C}$  ve  ${}^{19}\text{C}$  çekirdekleri verilebilir. Bu çekirdeklerde nötron fazlalığı vardır ve bir veya iki nötron halo yapısına sahiptirler. Bilinen çoğu halo çekirdeği sadece tek bir bağlı durumu sahiptirler ve uyarıldıklarında bozunurlar. Fakat  ${}^{11}\text{Be}$  çekirdeği iki bağlı duruma sahiptir.

İki valans nükleona sahip halo çekirdekler üç cisim etkileşimi nötron-nötron-çekirdek dolayısıyla dört olası durum vardır. Bu durumların gösterimi Şekil 2.21’de verilmiştir.



**Şekil 2.21.** İki valans nükleona sahip halo çekirdeklerde nötron-nötron-çekirdek etkileşiminin grafiksel gösterimi. Kesikli çizgi sanal bağlı durum, sürekli çizgi ise normal bağlı durumdur (Duran 2016)

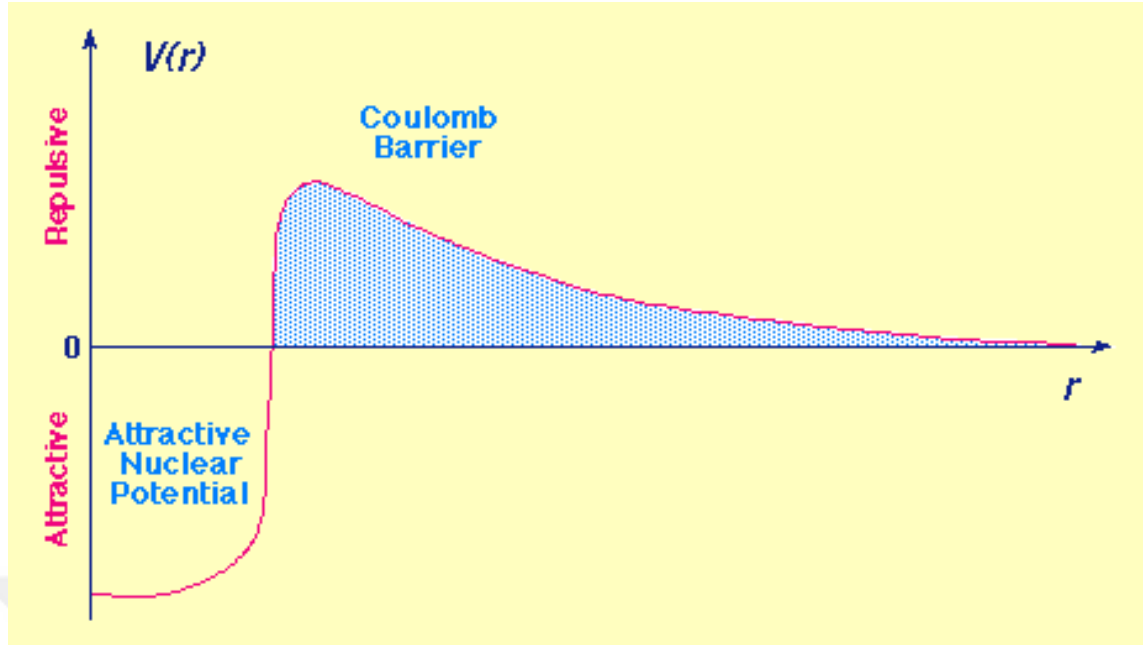
- **Borromean:** Sanal durum enerjisi ile nötron-nötron ve nötron-çekirdek sistemleri serbesttir.
- **Samba:** Sadece nötron-çekirdek alt sistemi bağlıdır.
- **Tango:** nötron-nötron sisteminin bağlı, nötron-çekirdek sisteminin sanal olduğu durum.
- **Bağlı çekirdek sistemi:** nötron-nötron ve nötron-çekirdek sistemlerinin ikisinde bağlı durumdadır.

### 2.9.2. Proton halo

Proton halosuna örnek olarak  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^{13}\text{N}$  ve  ${}^{17}\text{Ne}$  çekirdekleri verilebilir. Proton haloları, nötron haloları kadar ilginç değillerdir sebebi ise Coulomb bariyerinin etkisiyle proton halosunun çekirdeğe daha yakın olmasıdır. Şekil 2.22’de Coulomb bariyeri verilmiştir.

### 2.9.3. ${}^{15}\text{C}$ ’ye Detaylı Bakış

${}^{15}\text{C}$  yarı ömrü 2.449 saniye olan radyoaktif bir karbon izotopudur. Beta negatif bozunumuna uğrayarak  ${}^{15}\text{N}$ ’ye bozunur. Bozunum şeması Şekil 2.23’te verilmiştir. Spin-parite değerleri taban ve ilk uyarılmış durum için sırasıyla  $I^\pi = 1/2^+, 5/2^+$  şeklindedir. Bu durumlar  ${}^{14}\text{C}$  çekirdeğinin taban durumundaki  $s_{1/2}$  veya uyarılmış durumundaki  $d_{5/2}$  orbitalleriyle çiflenme halinde olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 2.22. Coulomb bariyeri

Bu bozunumun gösterimi:



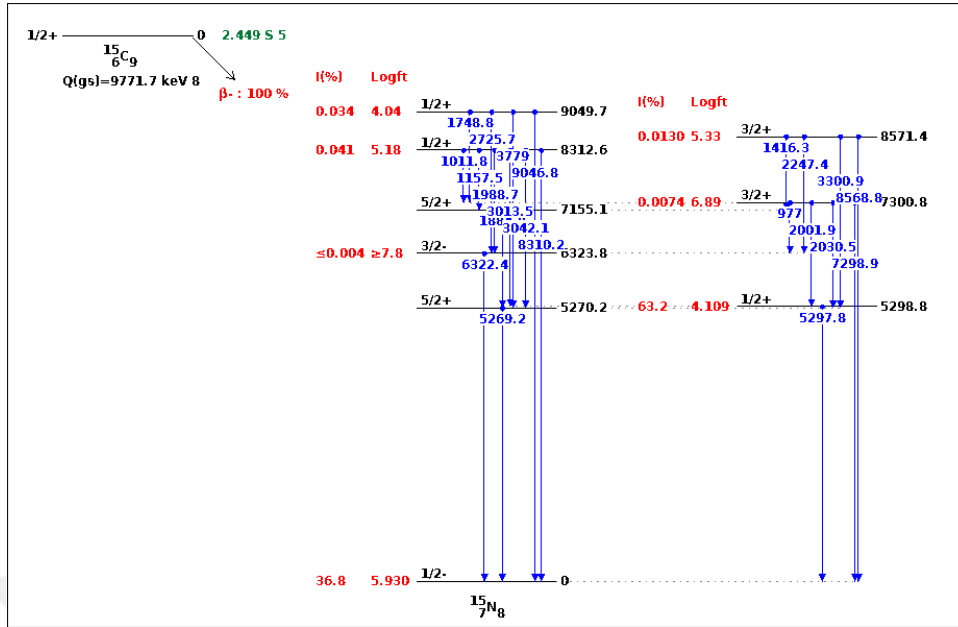
$^{15}\text{C}$  çekirdeğinin halo yapısı daha önce bir kaç deneyde yüksek enerjilerde incelenmiştir. Transvers-momentum dağılımı, tek nötron koparılması için 67(3) MeV/c (FWHM) olarak bulunmuştur. Bu değer yakınındaki izotoplarla karşılaştırıldığında  $^{14}\text{C}$  ve  $^{16}\text{C}$  ( $\sim 200$  MeV/c) çok daha küçük olmasına rağmen iyi bilinen  $^{11}\text{Li}$  ve  $^6\text{He}$  gibi halo çekirdekleriyle karşılaştırıldığında ( $\sim 40$  MeV/c) daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Martel vd. 2016).

Ozawa'nın 2004 yılında gerçekleştirdiği çalışmasında 83 MeV/u'da ölçülen reaksiyon tesir kesiti  $^{15}\text{C}$  izotopu için artış gösterdiği gözlemlenmiştir (Ozawa 2004). Bu davranışın sebebi  $^{15}\text{C}$  çekirdeğinin halo özelliği göstermesine atfedilmiştir.

Çizelge 2.3.  $^{15}\text{C}$  taban durumu ve ilk uyarılmış durumu (Anonymous 14)

$E_{level}$ (MeV)	$J_\pi$	$T_{1/2}$
0.0	1/2+	2.449
740.0	5/2+	2.61





Şekil 2.23.  $^{15}\text{C}$  bozunum şeması ve enerji seviyeleri (Anonymous 14)

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Deney

IS619: "Coulomb enerjisi civarında  $^{15}\text{C}$ 'nin halo yapısının saçılma deneyiyle incelenmesi" ("Effects of the neutron halo in  $^{15}\text{C}$  scattering at energies around the Coulomb barrier") deneyi Cern'deki Isolde laboratuvarında, 01/08/2017 ile 06/09/2017 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Deneyin takvimi

Deney Programı						
Ay	Ağustos	Ağustos	Ağustos	Ağustos	Ağustos	Eylül
Hafta no.	31	32	33	34	35	36
Pazartesi		7	14	21	28	4
Salı	1	8	15	22	29	5
Çarşamba	2	9	16	23	30	6
Perşembe	3	10	17	24	31	7
Cuma	4	11	18	25	1	8
Cumartesi	5	12	19	26	2	9
Pazar	6	13	20	27	3	10

Deney araçları, işbirliği yapan üniversiteler tarafından 11 Ağustos'ta kurulumu tamamlandı. 11-17 Ağustos tarihleri arasında ise Daq(Data Acquisition System) ve online görüntüleme sistemleri kuruldu.

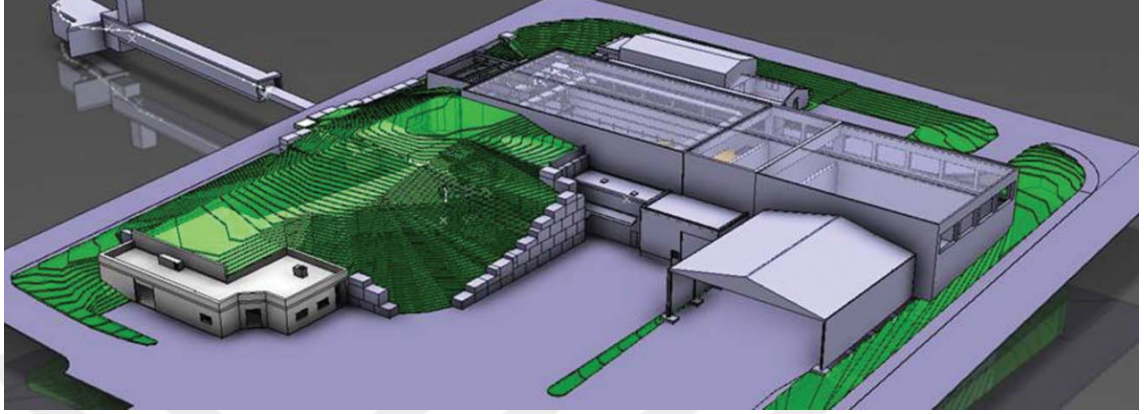
İlk kalibrasyon 18-20 Ağustos tarihlerinde gerçekleştirildi. 21-24 Ağustos arasında ışın demetinin testi yapıldı. 25 Ağustos - 3 Eylül arasında deney gerçekleştirildi. 4-6 Eylül'de ise ikinci kalibrasyon yapıldı ve deney tamamlandı. Tablo 3.4'te deneyin takvimi verilmiştir.

#### 3.1.1. HIE-ISOLDE Laboratuvarı

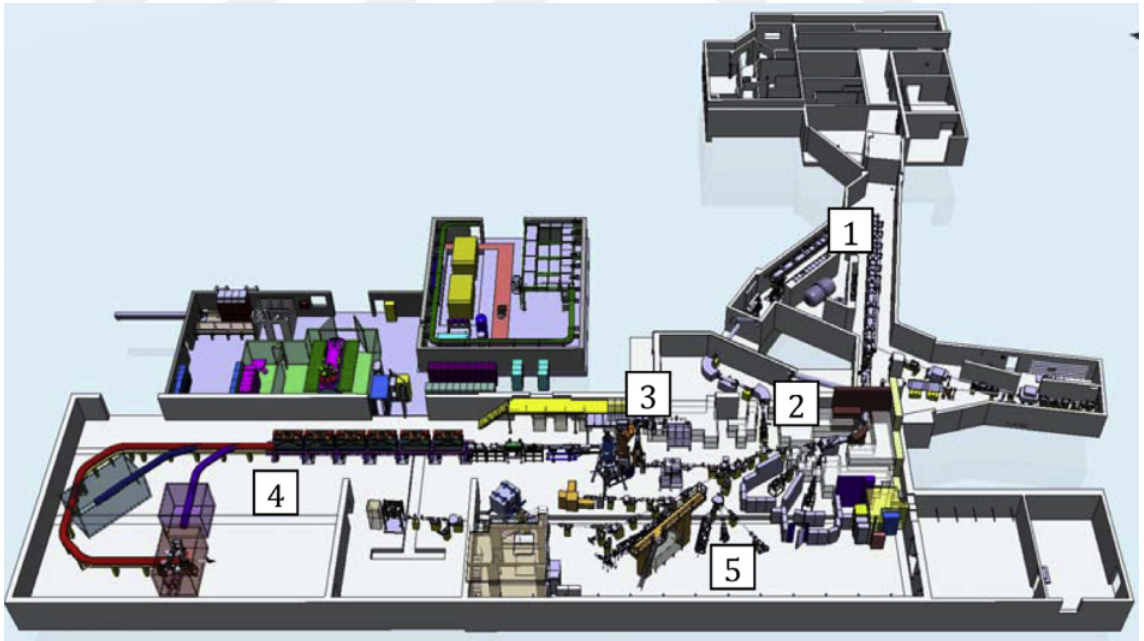
Isolde dünyanın en önde gelen radyoaktif iyon ışın demeti laboratuvarlarından biridir. Fransa ve İsviçre sınırında, Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi içerisindeki Proton-Sinkrotron hızlandırıcısı üzerine kurulmuştur. Şekil 3.24'te ISOLDE laboratuvarının üç boyutlu çizimi verilmiştir. 1967'den günümüze aktif olarak faaliyet göstermektedir ve açıldığı günden bu zamana kadar, yüksek enerjili ışın demeti göndermek ve daha çok egzotik çekirdek çalışmaları yapılabilmesi için sürekli yenilenmektedir. İsolde'de yılda ortalama 50 deney yapılmaktadır (Herlert 2010; Borge M.J.G. 2015; Kadi, Blumenfeld, Venturini Delsolaro, Fraser, Huyse, Papageorgiou Koufidou, Rodriguez, Wenander 2017).

REX-ISOLDE (Radioactive beam EXperiment) aşaması 1994 yılında teklif edildi. 2001 yılında yenilenen hızlandırıcı REX-ISOLDE ismiyle çalışmaya başladı(Wenander, Batzner, Ratzinger,Kugler 1995). Başlangıçta Isolde'de deneyler 60 keV/u maksimum enerjide yapılabiliyorken REX-ISOLDE ile bu enerji 3 MeV/u maksimum enerji kapasitesine ulaştı.

2016 yılı sonbaharında daha yüksek enerjide ışın demetleri kullanabilmek için HIE-ISOLDE (High Intensity and Energy ISOLDE) ismiyle yeni bir iyileştirme gerçekleştirildi. Bu iyileştirmede iki yeni cryomodule daha eklendi ve maksimum enerji 5.5 MeV/u ya ulaştırılmış oldu.



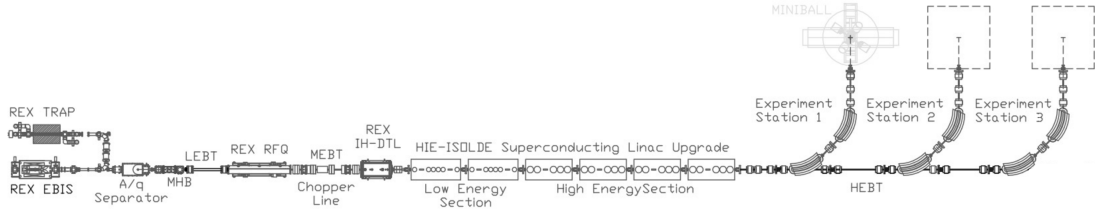
**Şekil 3.24.** Fransa ve İsviçre sınırındaki Cern'in Meyrin bölgesinde bulunan ISOLDE laboratuvarı (Kadi, Blumenfeld, Venturini Delsolaro, Fraser, Huyse, Papageorgiou Koufidou, Rodriguez, Wenander 2017)



**Şekil 3.25.** HIE-ISOLDE isolde laboratuvarının (1) Hedef çekirdek bölgesi, (2) ayrıştırıcı bölgesi, (3) REXEBIS, (4) Linac ve yüksek enerjili ışın demeti transfer hattı, (5) düşük enerjili ışın demeti transfer hattı (Catherall vd. 2013)

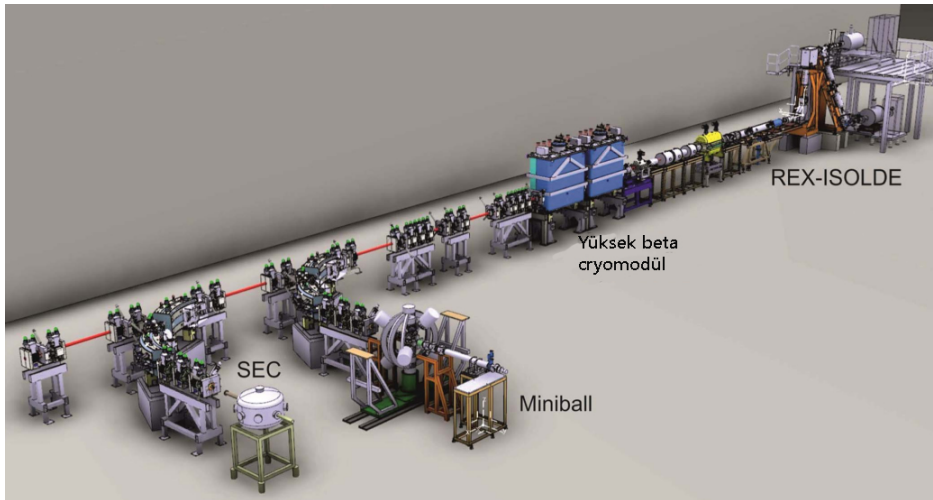
HIE-ISOLDE için önümüzdeki yıllarda iki yeni cryomodule eklenerek yeni bir iyileş-

tirme yapılması planlanıyor ve bunun sonucunda ışın demeti enerjisinin 10 MeV/u ulaşılması hedefleniyor (Kadi, Blumenfeld, Venturini Delsolaro, Fraser, Huyse, Papageorgiou Koufidou, Rodriguez, Wenander 2017). Şekil 3.25'te ISOLDE labrotuvarının bölümlerini gösteren şematik çizim verilmiştir.



**Şekil 3.26.** HIE-ISOLDE radyoaktif ışın laboratuvarının şematik diyagramı (Anonymous 1)

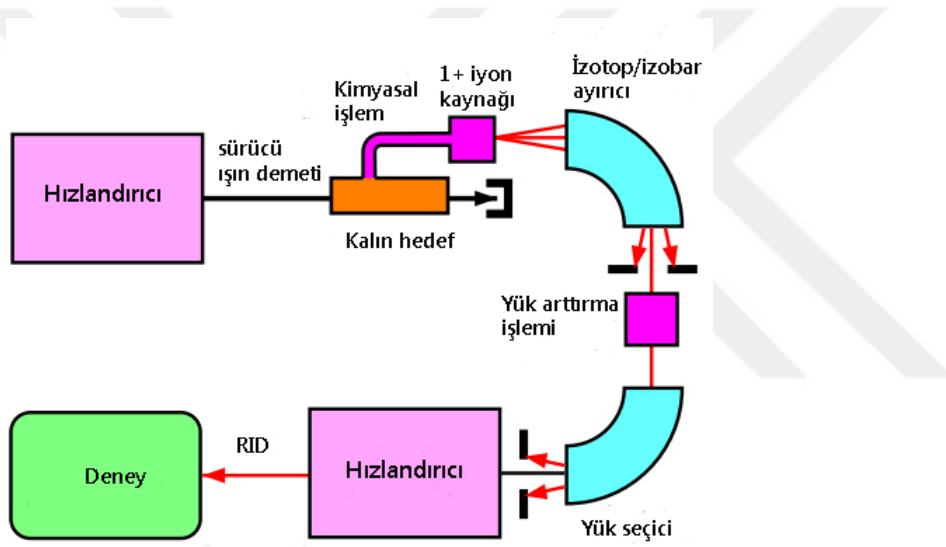
Isolde'de ışın demeti üretilmesinde Proton-Sinkrotron hızlandırıcısı kullanılıyor. Proton-Sinkrotron hızlandırıcısı, 1.4 GeV enerjili ve ortalama akım maksimum  $2 \mu\text{A}$  olan proton ışın demeti atması gerçekleştirebiliyor. Isolde'deki hedefe her 1.2 saniyede  $3 \times 10^{13}$  ışın demeti gönderiliyor. Farklı radyoaktif izotopların üretilmesi için sıvı veya katı olmak üzere 25 farklı hedef materyal kullanılmaktadır. Isolde'de 75 elementin, 1000'den fazla radyoaktif izotop ve izobarı üretilmektedir. Uranyum karbit ( $\text{UC}_x$ ) en çok kullanılan hedef materyeli olmakla birlikte 2007 yılında tüm ışınlama zamanının %67 sinde kullanılmıştır. Genellikle hedef materyaller yüksek sıcaklıkta saklanırlar. Uranyum karbit için bu sıcaklık  $2000^\circ\text{C}$ 'dir (Herlert 2010; Duppen ve Riisager 2011; Correia, Johnston, Wahl 2012).



**Şekil 3.27.** HIE-linac'ın 2016 yılındaki plan çizimi. IS619 deneyi saçılma deneyleri bölümünde gerçekleştirildi(SEC) (Kadi, Blumenfeld, Venturini Delsolaro, Fraser, Huyse, Papageorgiou Koufidou, Rodriguez, Wenander 2017)

Günümüzde radyoaktif ışın demeti üretimi için kullanılan iki temel yöntem vardır. In-flight metodu (Tanihata vd. 1985) ve izotop ayırma tekniği (isotope separation on-line) (Decrock vd. 1991). Isolde’de kullanılan yöntem ise izotop ayırma tekniğidir. Şekil 3.28’de bu tekniğin şematik çizimi verilmiştir. Bu teknik hafif elementleri mermi çekirdek olarak kullanıp, tantal ve uranyum (uranyum karbit) gibi ağır elementlerin hedef çekirdek olarak kullanılarak parçalanması veya fizyona uğratılması ile gerçekleşir (Kamigaito vd. 2013). Şekil 3.26’da ISOLDE’nin şematik diyagramı verilmiştir.

HIE-ISOLDE ikinci iyileştirmesinin tamamlanmasının ardından daha yüksek enerjilere ulaşılması ve daha fazla radyoaktif ışın demeti üretilmesi mümkün olacak. Bu sayede, radyoaktif ışın demetlerinin yüksek akılarda üretilebilmesi egzotik çekirdekler hakkındaki bilgilerimizi arttırmamıza yardımcı olacak ve nükleer kararlılık eğrisinin limitlerine yaklaşmamızı ve anlamamızı mümkün kılacaktır. Şekil 3.27’de deneyin saçılma çemberi, linac ve cryomodule’ler görülmektedir.



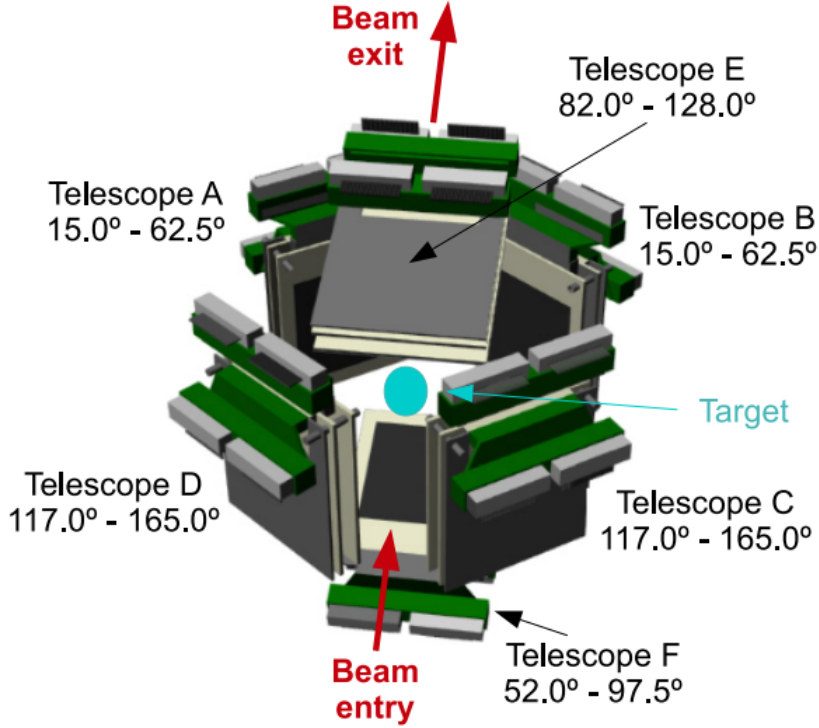
Şekil 3.28. İzotop ayırma tekniğinin şematik çizimi (Kamigaito vd. 2013)

### 3.1.2. GLORIA dedektör sistemi

Radyoaktif ışın demeti laboratuvarlarındaki reaksiyon parçacıklarının düşük yoğunlukta olması ve reaksiyon sonucunda farklı parçacıkların ortaya çıkması dolayısıyla, deneyde kullanılan dedektör sisteminin büyük katı açıları tespit etmesi gereklidir. Bu ihtiyaç nedeniyle GLORIA(GLObal Reaction Array) dedektör sistemi geliştirilip ilk kez Coulomb enerjisi civarında  $^8\text{He}+^{208}\text{Pb}$  (GANIL laboratuvarı, Fransa) reaksiyonu deneyinde kullanılmıştır (Marquinez-Duran vd. 2016). Şekil 3.29’da GLORIA dedektörünün üç boyutlu çizimi verilmiştir.

IS619: "Coulomb enerjisi civarında  $^{15}\text{C}$ 'nin halo yapısının saçılma deneyiyle incelenmesi" başlıklı deneyde, kompakt ve büyük katı açılı, silikon dedektörlerden oluşan GLORIA dedektör sistemi kullanıldı. GLORIA sistematik belirsizlikleri azaltmak için

mekanik olarak sabitlenmiş bir yapıya sahip. GLORIA altı tane teleskoptan oluşmaktadır. Her bir teleskop iki katmanlı yapıya sahip olan DSSSD dedektörü bulunmaktadır. Teleskobun ilk katmanındaki silikon dedektör ( $\Delta E$ ) 40  $\mu\text{m}$  ve ikinci katmanı ise 1 mm kalınlığına sahiptir. GLORIA iki katmanlı dedektör yapısı sayesinde elastik kanal spektrumunda parçacıkları yük ve ağırlıklarına göre ayrıştırabilmektedir. GLORIA  $15^\circ$  ve  $165^\circ$  (Lab) aralığındaki açıyı tespit etmektedir. Reaksiyon sonrası çıkan parçacık sayılarının az olması ve gönderilen ışın demetlerinin düşük yoğunlukta olması dolayısıyla bu şekilde yüksek açıyı tespit edebilen dedektör gerektirmektedir.



Şekil 3.29. GLORIA dedektörü (Marquinez-Duran vd. 2016)

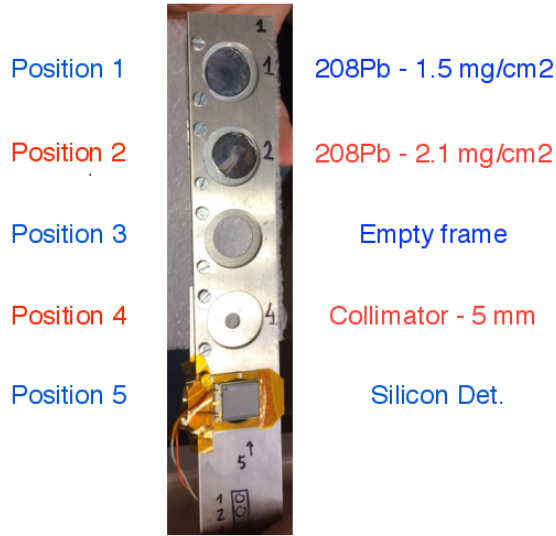
### 3.1.3. Reaksiyon çemberi

IS619 deneyinde GLORIA dedektör sistemi reaksiyon çemberi olarak adlandırılan deney sistemi içerisine monte edildi. Deneyin başlatılabilmesi için reaksiyon çemberi içerisindeki vakum maksimum  $1 \times 10^{-7}$  mbar değeri hedeflendi. Böylece havadaki atom çekirdeklerinin saçılmaları önemli ölçüde etkilememesi sağlandı. Deneyde kullanılan reaksiyon çemberi Şekil 3.31’de verilmiştir.

### 3.1.4. Hedef çekirdek

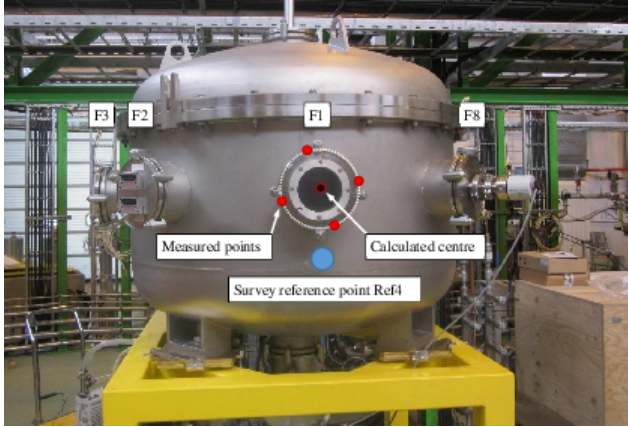
Bu deneyde hedef çekirdeği olarak  $^{208}\text{Pb}$  kullanıldı. Enerji çözünürlüğü ve veri istatistiği sebebiyle kalınlığı  $1.5 \text{ mg/cm}^2$  olan ince hedef çekirdek kullanıldı.  $^{208}\text{Pb}$  hedef çekirdeği yüksek Coulomb etkisine sahiptir dolayısıyla  $^{15}\text{C}$  mermi çekirdeğinin elastik saçılmalarını gözlemlemek için ideal bir hedef çekirdektir.





**Şekil 3.30.** Deneyde kullanılan hedef çekirdek merdiveni

Kullanılan  $^{208}\text{Pb}$  hedef çekirdeğinin izotopik kompozisyonu,  $^{208}\text{Pb}$  98.43%,  $^{207}\text{Pb}$  1.05%,  $^{206}\text{Pb}$  0.51%,  $^{204}\text{Pb}$  0.01% şeklindedir. Şekil 3.30'da deneyde kullanılan hedef çekirdek merdiveni verilmiştir.



**Şekil 3.31.** Reaksiyon çemberinin dışarıdan görüntüsü

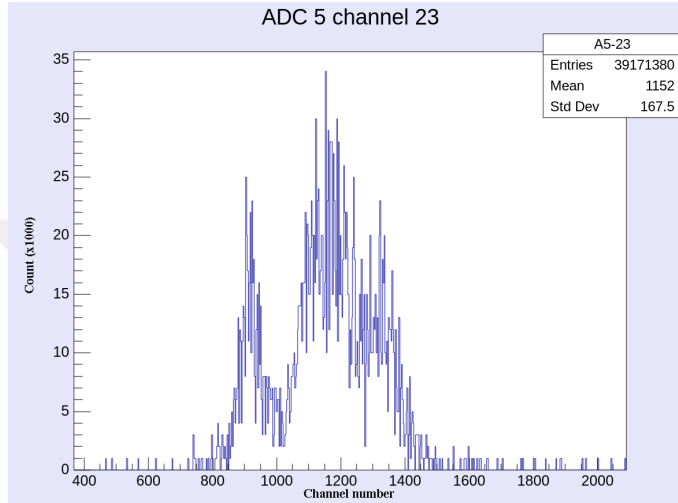
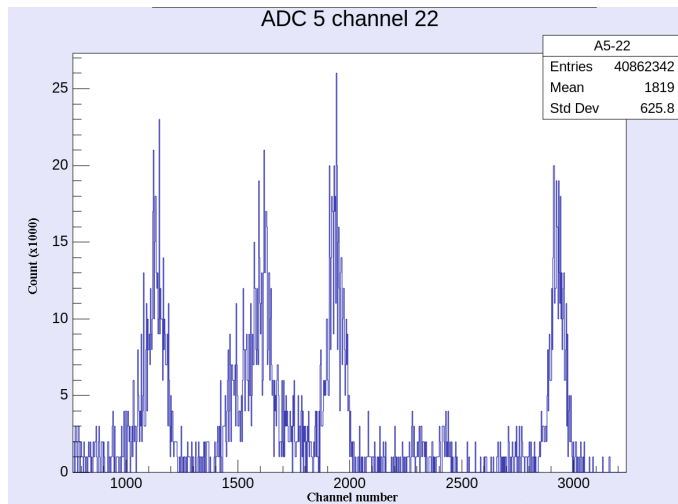
### 3.1.5. Kalibrasyon materyali

Kalibrasyon materyali olarak  $^{226}\text{Ra}$  alfa kaynağı kullanılmıştır ve  $^{226}\text{Ra}$  alfa kaynağı 4784.34 keV, 5304.33 keV, 5489.48 keV, 6002.3 keV, 7689.82 keV enerjilerinde piklere sahiptir Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Kalibrasyon materyalinin, deneyin ilk kalibrasyonunda alınan spektrumu Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'te verilmiştir.

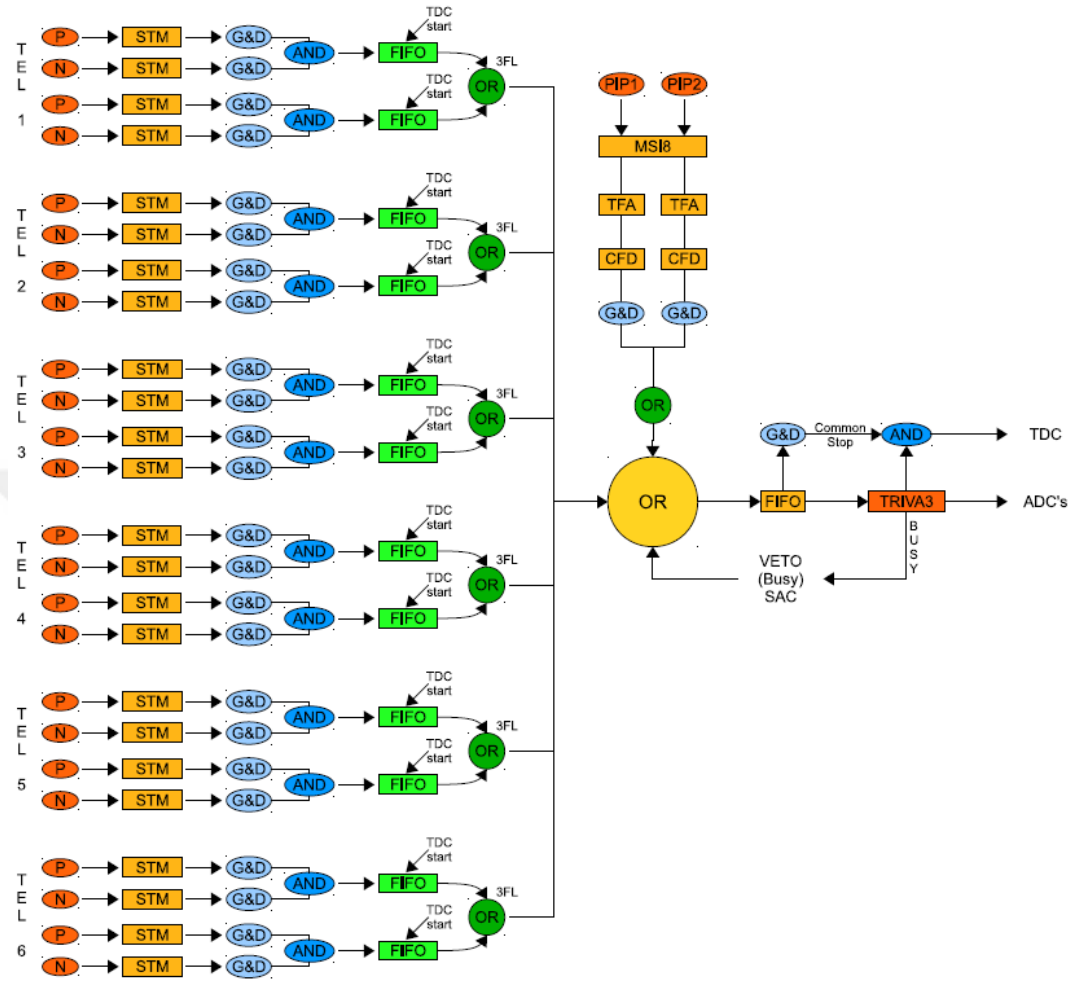
**Çizelge 3.5.** Çeşitli izotopların enerji değerleri

Isotope	Energy (keV)	Intensity (%)
$^{226}\text{Ra}$	4784.34	93.84
$^{210}\text{Po}$	5304.33	100
$^{222}\text{Rn}$	5489.45	99.9
$^{218}\text{Po}$	6002.3	99.98
$^{214}\text{Po}$	7689.82	99.99

**Şekil 3.32.**  $^{226}\text{Ra}$  kaynak çekirdeğinin BeamDump dedektörünün ilk katmanının ( $\Delta E$ ) spektrumu**Şekil 3.33.**  $^{226}\text{Ra}$  kaynak çekirdeğinin, BeamDump dedektörünün ikinci katmanının (E) spektrumu



### 3.1.6. Deneyin gerçekleştirilmesi, elektronikler ve veri toplama



Şekil 3.34. GLORIA dedektör sisteminin trigger çalışma düzeni (Duran 2016)

İlk olarak deneyde ortak çalışan üniversiteler deney malzemelerinin Isolde laboratuvarına transferini gerçekleştirdiler. Sonrasında deney sisteminin kurulması ve testlerinin yapılması gerçekleştirildi. Kalibrasyon yapıldı. Sistemin doğru bir şekilde çalıştığı onaylandıktan sonra ise deney verisi toplanmaya başlandı.

Online izleme için GSI tarafından geliştirilen Go4 arayüzü kullanılmıştır. Bu arayüz ROOT programı ile entegre olarak çalışmaktadır (Adamczewski vd. 2004).

Veriler ROOT ile her bir veri dosyası maksimum 30 megabayt olacak şekilde kaydedilmiştir. Deney sonunda yaklaşık olarak 200 gigabayt veri toplanmıştır.

Her bir DSSSD dedektörü 32 sinyal çıkışına sahiptir. İki PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon) dedektörde eklendikten sonra GLORIA dedektör sistemi yükseltgenmesi, şekillendirilmesi, dijital sinyale dönüştürülmesi gereken toplamda 386 kanala sahiptir. Günümüzde bu kadar yüksek kanal sayısı nükleer modüller kullanılarak incelenebilmektedir. Tablo 3.6'te deneyde kullanılan elektronikler verilmiştir. Şekil 3.34'de ise

GLORIA dedektör sisteminin trigger çalışma düzeni verilmiştir.

**Çizelge 3.6.** GLORIA dedektör sisteminde kullanılan elektronikler

Unit type	Modules (x channel)	Model	Supplier
Preamplifier	6(x64)	MPR64	Mesytec GmbH
Detector bias	3(x4)	MHV4	Mesytec GmbH
Shaper	12(x16)	STM16	Mesytec GmbH
Preamplifier and shaper	1(x8)	MSI8	Mesytec GmbH
Fan-In-Fan-Out	4(x4)	N454	Caen SpA
Dual Timer	2	N93B	Caen SpA
Triple 4-Fold Logic	6(x3)	N405	Caen SpA
Constant Fraction Discriminator	2(x8)	N843	Caen SpA
Fast Amplifier	2	N979	Caen SpA
Gate-and-Delay	3(x8)	GG8020	Ortec
Crate Controller	1	RIO2	CES
Trigger Manager	1	TRIVA3	GSI
Digital counter / Scaler	1(x32)	V830	Caen SpA
Analog-to-Digital Converter	13(x32)	V785	Caen SpA
Time-to-Digital Converter	2(x32)	V775	Caen SpA
Slow Control	2(x32)	MRC1	Mesytec GmbH

## 3.2. Veri Analizi ve Simülasyon

### 3.2.1. ROOT

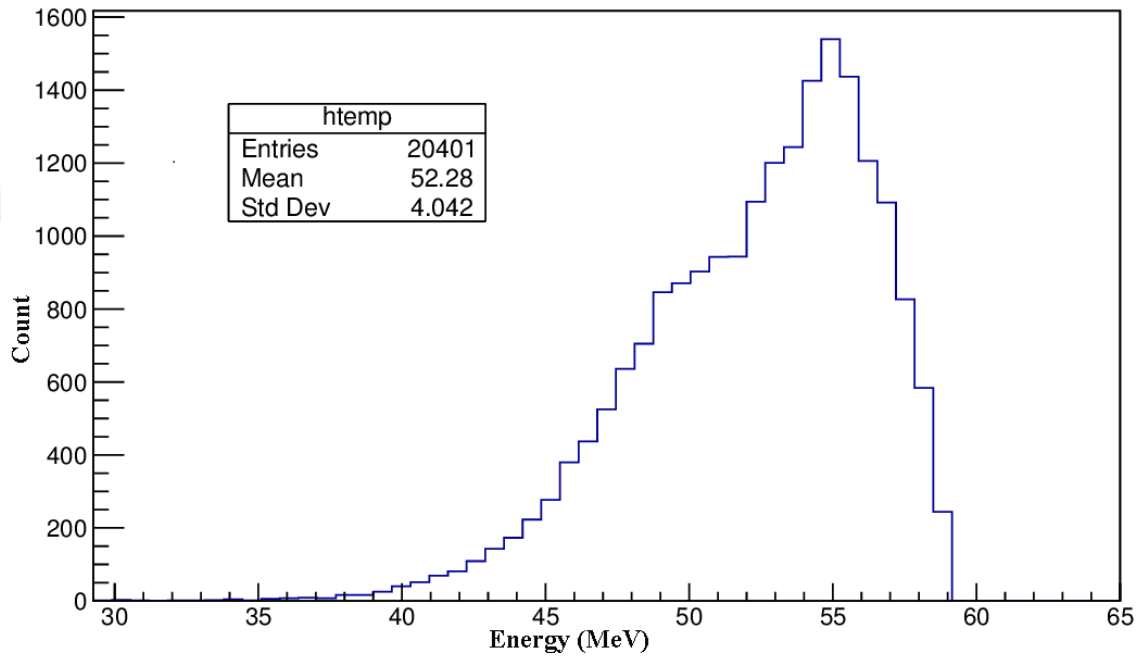
ROOT büyük ölçekli veri analizinde kullanılan, nesne yönelimli bir arayüz programıdır. Temel olarak kodlama ve komut dili C++'dır. Bunun yanı sıra Mathematica, Python ve R programlama dilleriyle de programlanabilir. ROOT projesi ilk olarak Rene Brun ve Fons Rademakers tarafından 1995 yılında başladı. O dönemde Fortran'ın büyük ölçekli veri analizinde kullanılmak için yeterli olmadığı anlaşıldı. Bunun üzerine o tarihteki Cern'deki NA49 deneyinde ROOT tasarlanmaya ve kullanılmaya başlandı. NA49 deneyi her çalışmasında 10 terabayt işlenmemiş veri oluşturuyordu. Hem bu deney ve bundan sonra gelecek olan yüksek enerjili nükleer fizik deneylerinin ihtiyaçlarını karşılamak üzere ROOT projesi önem kazandı. Fakat bu proje ilk başladığında özel bir proje olarak başlamıştı sonrasında ise LHC (büyük hadron çarpıştırıcısı) ve Cern'in desteğini aldı.

Günümüzde ROOT veri analizi, istatistiksel analiz, veri madenciliği, görselleştirme ve veri saklamak gibi çeşitli amaçlarda kullanılmaktadır. ROOT petabaytlarca verinin saklanması ve analizinin daha kolay ve daha verimli hale gelmesini sağladı. Ayrıca ROOT farklı ihtiyaçlar için farklı paketlere sahip. Örneğin Roofit paketi, kompleks veri analizi ve modellemesini mümkün kılmaktadır. ROOT'un sahip olduğu makrolar ise veri analizini daha hızlı ve daha verimli olmasını sağlamaktadır. Şekil 3.35'da ROOT ile elde edilen bir spektum verilmiştir.

Histogramlar, grafikler, fitler ve şematik çizimler birçok fizikçi için önemlidir. ROOT aynı zamanda bu ihtiyaçlara da çözüm sunuyor. TGraph sınıfı ile iki boyutlu 2D(x,y) gra-

fikler, TH1 sınıfı ile histogramlar, TH1::Draw() ile ise şematik çizimler üretilebilir. Ayrıca birden fazla ROOT dosyası gereken durumlarda TTree ve TChain sınıfları kullanılabilir.

IS619 deneyinde ROOT arayüz programını veri saklama, veri analizi ve bunun yanında simülasyon verisinin saklanması ve analizinde de kullanıldı. Bu deneyde veri paketlerinin her biri 30mb olarak saklanması tercih edildi. Deneyde elde edilen toplam işlenmemiş veri yaklaşık 200 gigabayt boyutundadır. Analiz sürecinde ROOT 6.08.02 versiyonu kullanılmıştır (Brun ve Rademakers 1997; Antcheva vd. 2009, 2011; Anonymous 6; Anonymous 7).



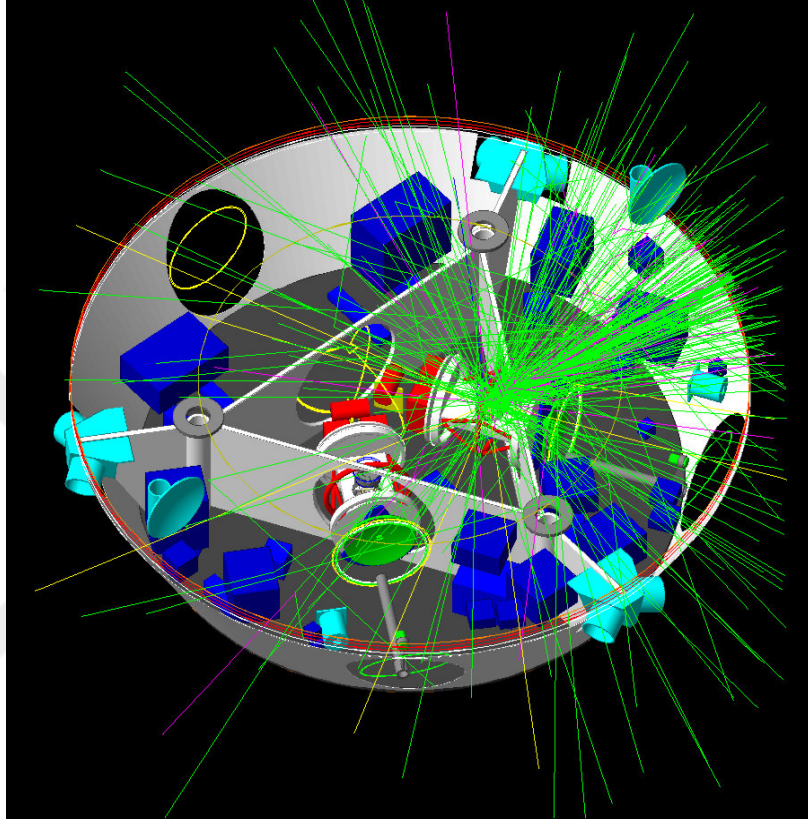
**Şekil 3.35.** ROOT'ta çizilmiş iki boyutlu histogram örneği. Kalın silikon dedektöre 59 MeV enerji ile gönderilen  $^{15}\text{N}$  spektrumu

### 3.2.2. GEANT4

GEANT4 (GEometry ANd Tracking) parçacıkların madde içerisinden geçişlerinin simülasyonunu yapmayı sağlayan bir programdır. Nesne yönelimli programlama teknolojisiyle üretildi ve programlama dili olarak C++'yı kullanmaktadır. GEANT4 uluslararası bir işbirliği ile tasarlandı ve geliştirildi. GEANT4 farklı amaçlar için kullanılabilir örneğin, parçacık takibi, dedektör geometrisi tasarlama veya simülasyonunun yapılması, fizik modellerinin simülasyonunun yapılması gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Bu sebeple yüksek enerji fiziği, astrofizik, uzay bilimi, medikal fizik, radyasyondan korunma gibi birçok farklı alanda çalışan fizikçiler bu programı kullanmaktadırlar.

GEANT4 ile düşük enerjili nükleer fizik deneylerinin yanı sıra yüksek enerjili reaksiyonlara sahip olan LHC (büyük hadron çarpıştırıcısı) veya kozmik ışın deneylerinde simülasyonları yapılabilmektedir. İyonize atomları, leptonlar, fotonlar ve hadronlar gibi parçacıklar kullanılabilirler.

Günümüzdeki fizik deneylerinde kullanılan veya ihtiyaç duyulan dedektörler çok kompleks ve yüksek bütçeli sistemlerdir. Bu sebeple üretilmek istenilen dedektör sisteminin limitlerinin, yeteneklerinin ve verimliliğinin test edilmesi ve bunların dedektörler üretilmeden önce yapılması önem arz ediyor. GEANT4 simülasyonları tam olarak bu ihtiyaçlara cevap vermektedir. Şekil 3.36’de GEANT4 ile yapılan simülasyonun görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 3.36.** LISA dedektörünün GEANT4 simülasyonundaki görünümü (Anonymous 3)

Bu tezin konusu olan deneyde kullanılan GEANT4 versiyonu 10.3.0’dır.

### 3.2.3. SRIM

SRIM(Stopping and Range of Ions in Matter) programı mermi iyonların hedef çekirdek içerisinde durma mesafesini hesaplamak için geliştirilmiş bir programdır. İlk üretildiği yıl olan 1985’ten bu zamana kadar sürekli olarak literatürdeki deneysel çalışmalara dayanılarak düzeltmeler ve güncellenmeler yapılmaktadır(Ziegler, Biersack 2004,2010; Anonymous 8).

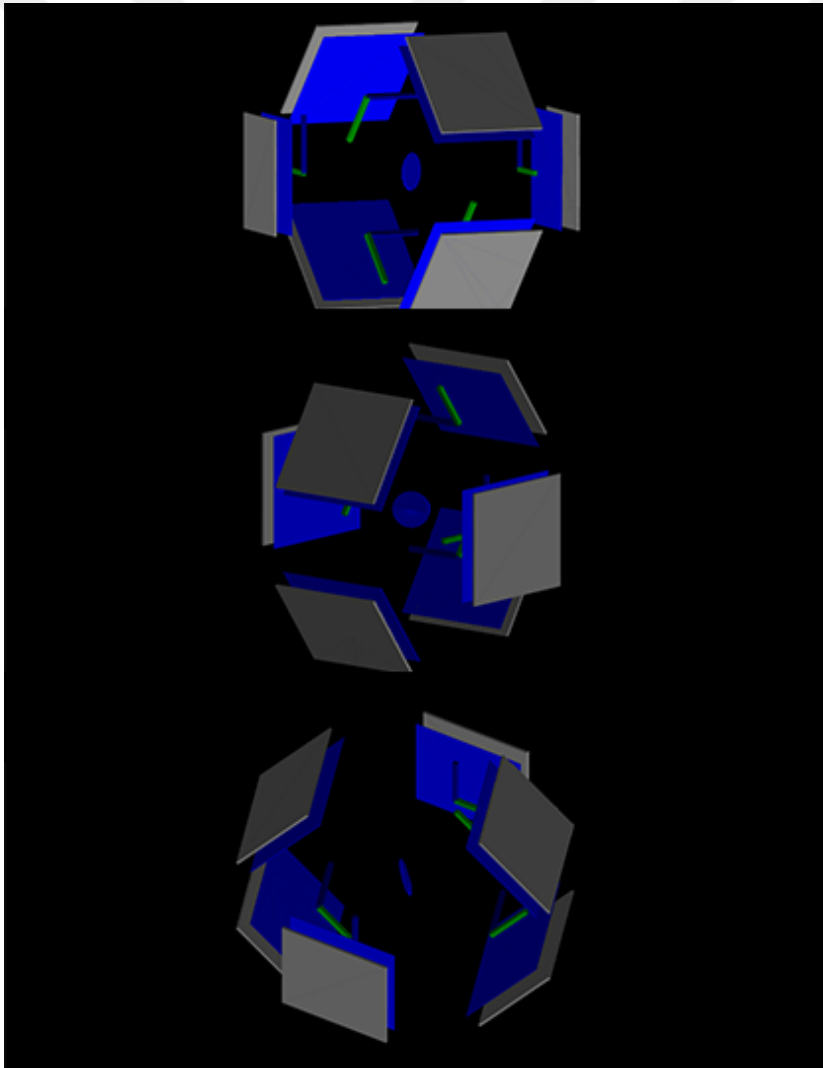
Bu tezde SRIM’de hesaplanan, madde içerisindeki çeşitli iyonların durma verileri NP-Tool simülasyonlarında kullanılmıştır.

### 3.2.4. NPTool

NPTool(Nuclear Physics Tool) düşük enerjili nukleer fizik deneyleri için geliştirilen bir simülasyon arayüzüdür. Düşük enerjili radyoaktif ışın demeti kullanılan nukleer fizik deneyleri için geliştirilmiştir. NPTool, GEANT4 ve ROOT programlarının birlikte kullanılarak simülasyonu ve simülasyondan elde edilen verilerin analizini hızlı ve etkili bir şekilde yapılmasına imkan verir. İçerisinde birçok farklı dedektör tasarımı da bulunmaktadır. GANIL, RIKEN, ALTO ve TRIUMF gibi birçok laboratuvar tarafından kullanılmaktadır (Matta vd. 2016; Anonymous 9).

Bu tez için NPTool ile GLORIA dedektörü tasarlanarak deneyin simülasyonu yapılmıştır.

### 3.2.5. Simülasyonun yapılması



**Şekil 3.37.** Simülasyonda kullanılan dedektörün farklı açılardan görünümü

Simülasyon için NPTool programı kullanılmıştır. Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere NPTool, GEANT4 ve ROOT programlarını birlikte kullanarak saçılma simülasyonlarının yapılmasına ve yapılan simülasyonun analizine hızlı ve verimli çözümler sunmaktadır.

Simülasyonun yapıldığı sistem ve program bilgileri şu şekildedir: Linux versiyonu 17.10, GEANT4 versiyonu 10.3, CLHEP versiyonu 2.3.4.3, ROOT versiyonu 6.08.02 ve NPTool versiyonu 2.dev'dir.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Beam energy given in MeV ; Excitation in MeV ; emittance in rad

Beam
  Particle= 15C
  Energy= 65.0 MeV
  SigmaEnergy= 0.1 MeV
  SigmaThetaX= 0.00 deg
  SigmaPhiY= 0.00 deg
  SigmaX= 1 mm
  SigmaY= 1 mm
  MeanThetaX= 0 deg
  MeanPhiY= 0 deg
  MeanX= 0 mm
  MeanY= 0 mm

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

TwoBodyReaction
  Beam= 15C
  Target= 208Pb
  Light= 15C
  Heavy= 208Pb
  ExcitationEnergyLight= 0.0 MeV
  ExcitationEnergyHeavy= 0.0 MeV
  CrossSectionPath= flat_def_0a90.txt   CS
  ShootLight= 1
  ShootHeavy= 0

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ShootLight= 1 -> therefore we shoot light particle
%ShootHeavy= 0 -> therefore we DO NOT shoot heavy particle
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

**Şekil 3.38.** NPTool reaksiyon dosyasının görünümü

Simülasyonun yapılması için NPTool kütüphanelerinde bulunan Gaspard dedektörü kullanılmıştır. Gaspard dedektörünün ilk ve ikinci katmanları deneyde kullanıldığı gibi ilk katman 40  $\mu\text{m}$  ikinci katman 1 mm olarak ayarlanmıştır. Ayrıca hedef çekirdek, hedef çekirdeğin açısı, yarıçapı, kalınlığı dedektör geometrisi vb. bilgiler GLORIA dedektör sisteminin özelliklerine göre ayarlanmıştır. NPTool ile oluşturulan dedektör geometrisi Şekil 3.37'de farklı açılardan verilmiştir.

Terminalden NPTool dedektör dosyasının olduğu klasöre girdikten sonra ise (./np-tool/Inputs/DetectorConfiguration) simülasyon aşağıdaki komutlarla başlatılabilir. Reaksiyon dosyalarının olduğu klasörde (./npool/Inputs/EventGenerator) gereken reaksiyon yok ise yeni bir dosya oluşturabilmek mümkündür.

- **computer@ubuntu:~\$** npsimulation -D xxx.detector -E yyy.reaction -O zzz
- **computer@ubuntu:~\$** npsimulation -D MUST2.detector -E 10He.reaction -O must2\_10He
- **computer@ubuntu:~\$** npsimulation -D telesc1\_arandela\_1.5.detector -E 15C208pb.reaction -O 15C208pb\_2

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
GeneralTarget
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Target
  THICKNESS=1.9
  RADIUS=10
  MATERIAL=Pb
  ANGLE= +30
  X=0
  Y=0
  Z=0

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Forward DERECHA TELESCOPIO B
% Forward
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
GaspardTracker Square
  R= 60
  THETA= 38
  PHI= 90
  BETA= 0 0 0
  FIRSTSTAGE= 1
  SECONDSTAGE= 1
  THIRDSTAGE= 1
  VIS= all

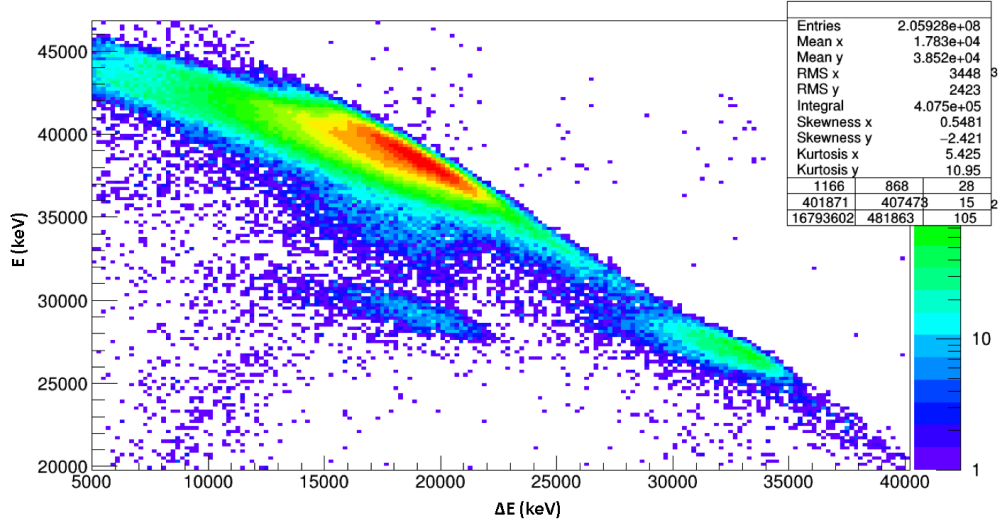
```

**Şekil 3.39.** NPTool dedektör dosyasının içeriği

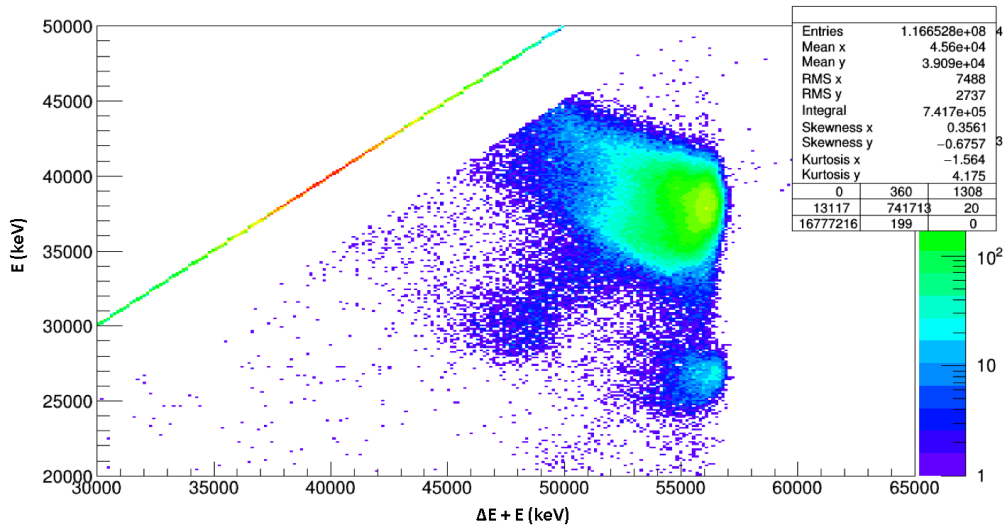
NPTool simülasyon için hazır hale geldikten sonra üç ayrı enerji seviyesinde simülasyon tekrarlandı ve verileri kaydedildi bunlar sırasıyla 57 MeV, 59.5 MeV, 65 MeV enerji değerleridir. Şekil 3.38’de NPTool reaksiyon dosyası örneği ve Şekil 3.39’ta ise NPTool dedektör dosyası örneği verilmiştir.



## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA



**Şekil 4.40.** Deneyde elde edilen  $E$ ,  $\Delta E$  spektrumu. X eksen  $\Delta E$ , Y eksen  $E$  teleskoplarının enerjilerini göstermektedir



**Şekil 4.41.** Deneyde elde edilen  $E$ ,  $\Delta E + E$  spektrumu. X eksen  $\Delta E + E$ , Y eksen  $E$  teleskoplarının enerjilerini göstermektedir

Halo çekirdeklerini anlamak için nükleer fizikte kullanılabilecek en önemli araçlardan birisi nükleer saçılma reaksiyonlarıdır. Saçılmalar sayesinde, çekirdeğin reaksiyon



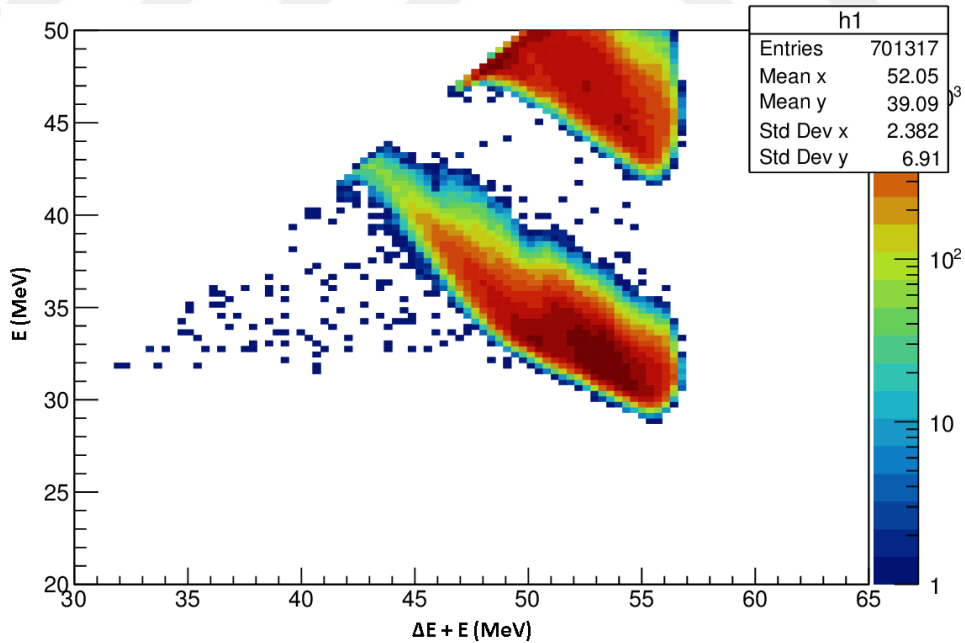
tesir kesitleri vb. gibi bilgilere ulaşmamızı mümkün olur. Dolayısıyla saçılma deneyleri günümüzde de deneysel nükleer fizikçiler tarafından kullanılan önemli bir araçtır.

Coulomb bariyeri civarında (65 MeV) saçılma deneyi sonucunda elde edilen spektrumlar Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de görülmektedir. Şekil 4.41’deki grafik E- $\Delta E$  (Dedektörün ikinci katmanı(E) y ekseninde, dedektörün ilk katmanı  $\Delta E$  x eksenindedir ) spektrumunu göstermektedir. Şekil 4.42’de görülen grafik ise E- $\Delta E+E$  (Dedektörün ikinci katmanı(E) y ekseninde, ilk katmanı  $\Delta E$  artı ikinci katman(E) ise x eksenindedir.) spektrumunu göstermektedir.

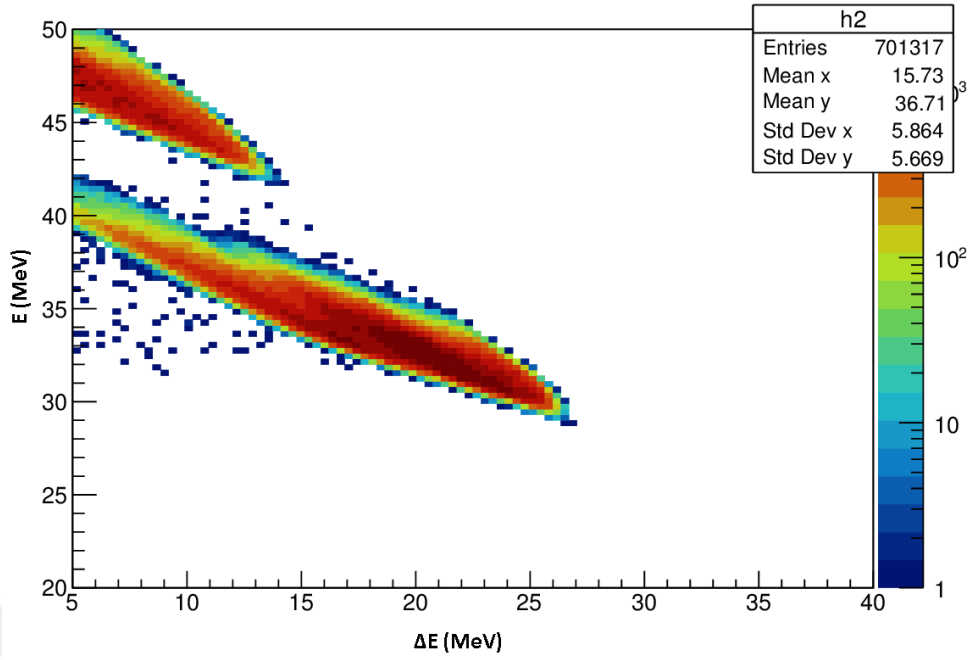
Bu çalışma GLORIA dedektör sisteminin ön tarafındaki bir teleskobunun spektrumu elde edilmesi ve NPTool kullanılarak deneyin simülasyonu yapılması olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır.

Simülasyonda elde edilen ilk spektrumların madde içerisindeki çeşitli iyonların durma verileri Srim programının verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu verilerin uyuşmadığı gözlemlenmiştir ve dolayısıyla simülasyona Srim’in madde içerisindeki durma verileri tercih edilerek, uygulanmıştır.

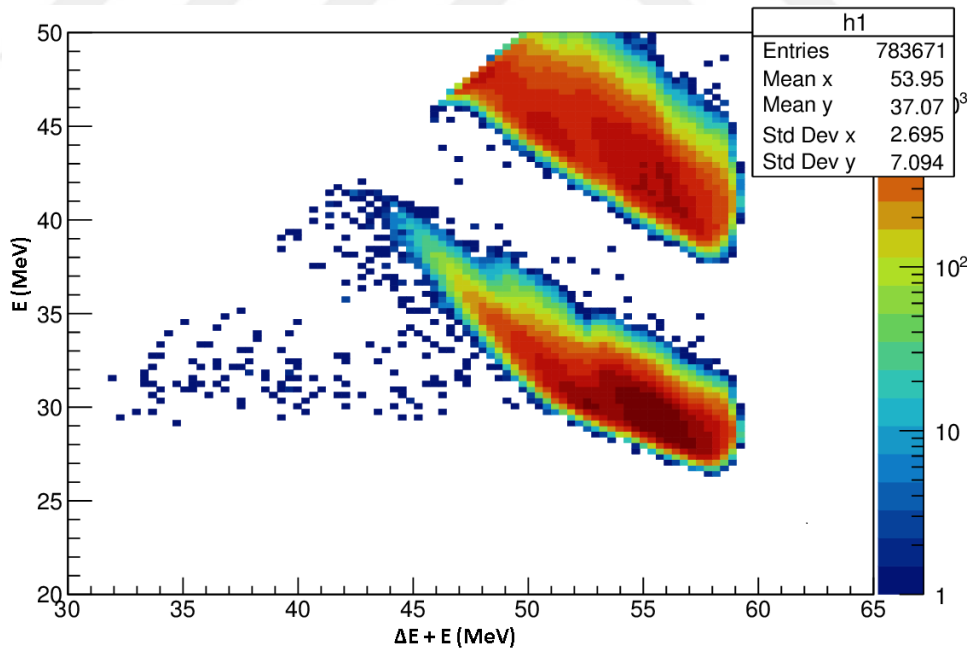
Simülasyondan elde edilen spektrumlar Şekil 4.43, Şekil 4.44, Şekil 4.45, Şekil 4.46, Şekil 4.47 ve Şekil 4.48’de görülmektedir. Şekil 4.43 ve 4.44 57 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonu, Şekil 4.45 ve 4.46 59.5 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun, şekil 4.47 ve 4.48 ise 65 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun sonuçlarını göstermektedir.



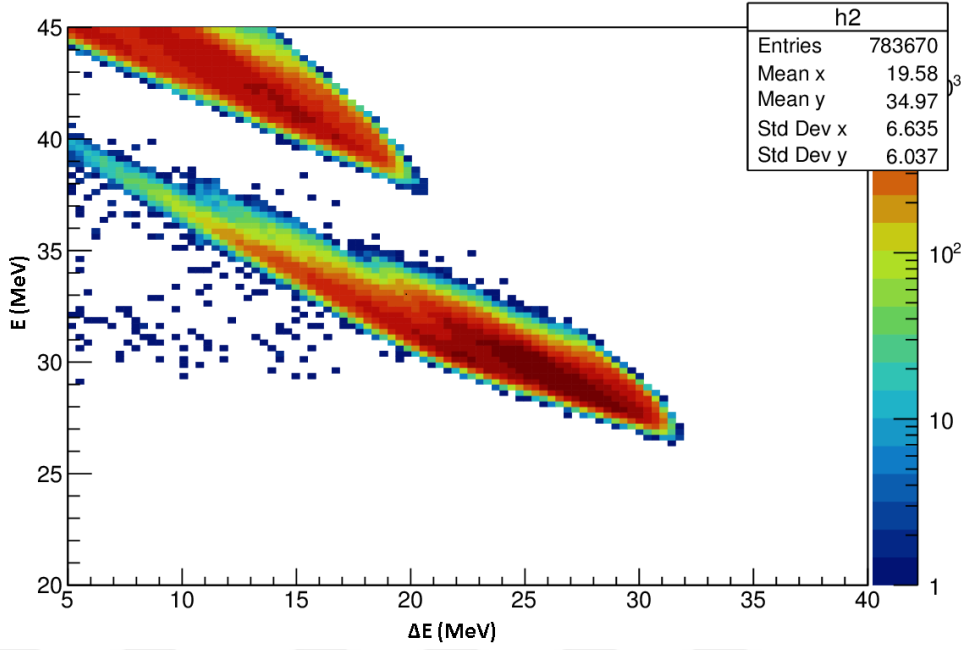
**Şekil 4.42.** 57 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini  $\Delta E+E$  , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir



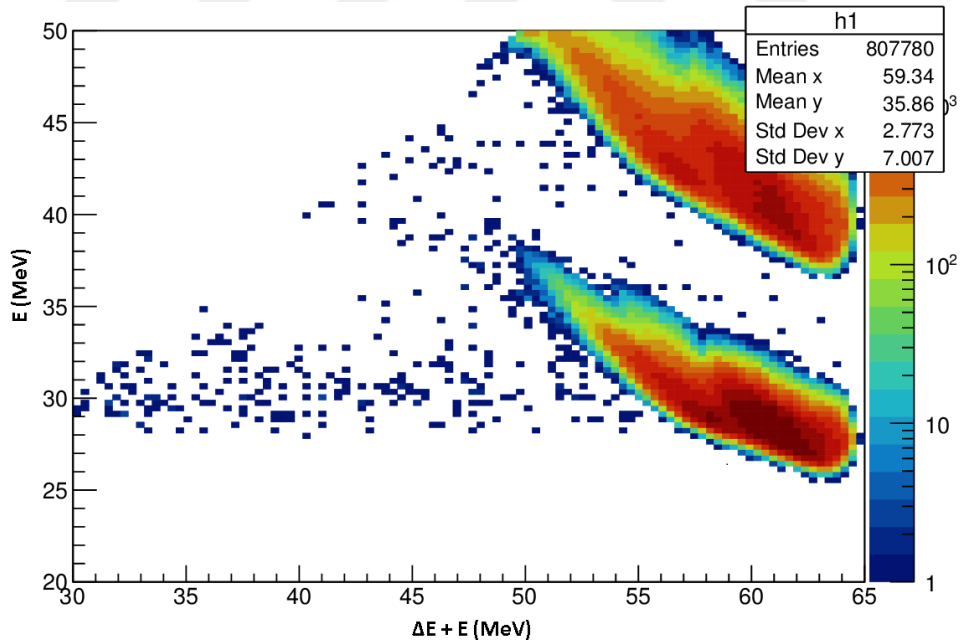
**Şekil 4.43.** 57 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini  $\Delta E$  , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir



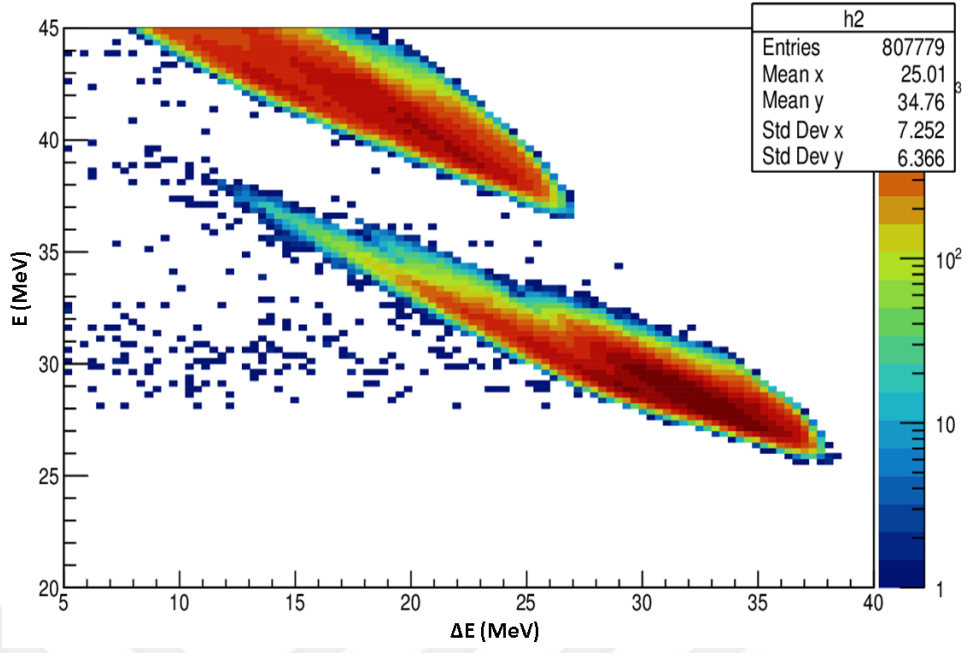
**Şekil 4.44.** 59.5 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini  $\Delta E + E$  , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir



**Şekil 4.45.** 59.5 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini  $\Delta E$  , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir



**Şekil 4.46.** 65 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini  $\Delta E + E$  , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir



**Şekil 4.47.** 65 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumu. X eksenini  $\Delta E$  , Y eksenini E teleskoplarının enerjilerini göstermektedir

## 5. SONUÇLAR

Şekil 4.41, dedektör sisteminin sahip olduğu sadece bir teleskoptan alınan verilerle elde edilen bir grafiktir. Y eksenini bu teleskobun arkasındaki silikon dedektörün enerji spektrumudur (E). X eksenini ise bu teleskobun ön tarafındaki silikon dedektörün enerji spektrumudur ( $\Delta E$ ). Burada x ve y eksenlerinin birimi keV'dir. Burada grafikten ilk olarak görülen dağılımın üç farklı merkezde toplandığıdır. Şekil 4.41'deki grafiği Huelva Üniversitesinden Prof.Dr Ismael Martel Bravo denetimi altındaki analizin sonucunda bu grafiğin sol üst köşesinde kırmızı olarak görülen bölgenin (18000, 39000) hedef çekirdekten en çok saçılmasını beklediğimiz  $^{15}\text{N}$  çekirdeği olduğunu tahmin ediyoruz. En çok  $^{15}\text{N}$  çekirdeğinin olmasının sebebi ise yarı-ömrü yaklaşık olarak 2.45 saniye olan  $^{15}\text{C}$  çekirdeğinin üretilmesi sonrasında hedef çekirdeğe gelene kadar geçen süredir. Diğer en yoğun sayım alınan bölge olan grafiğin sağ alt köşesinde (33000, 27000) bulunan dağılımın ise  $^{15}\text{C}$ 'ye ait olduğunu düşünüyoruz. Üçüncü olarak sayımların toplandığı bölge olan (19000, 30000) pikinin tam olarak ne olduğu tek bir teleskopla tam olarak anlaşılammıştır ancak  $^{14}\text{C}$  izotopu olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 4.42 ise yine aynı deneyden elde edilen verilerin y ekseninde E ve x ekseninde  $\Delta E+E$  olan spektrumdur. Burada x ve y eksenlerinin birimi keV'dir. Bu şeklin üst kısmında görülen yeşil bölgenin (56000, 35000)  $^{15}\text{N}$  çekirdeği ve onun hemen altındaki bölgenin (56000, 25000) ise  $^{15}\text{C}$  çekirdeği olduğu tahmin edilmektedir. Bu çekirdeklerin solunda kalan alanda (48000, 35000) bulunan sayımın ise  $^{14}\text{C}$  çekirdeği olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.43 ve Şekil 4.44 57 MeV enerjili mermi çekirdekleri kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarını temsil etmektedir. Şekil 4.43'te y ekseninde teleskobun arka katmanının enerji spektrumu ve x eksenindeki spektrum ise iki katmanın toplam enerji spektrumudur ( $\Delta E+E-E$ ). Şekil 4.44'te y ekseninde arka katmanının enerji spektrumu ve y ekseninde ön katmanın enerji spektrumu ( $\Delta E-E$ )'dur. Burada x ve y eksenlerinin birimi MeV'dir.

Şekil 4.43'ün üst kısmındaki dağılım  $^{15}\text{N}$ 'nin dağılımıdır. Altındaki dağılım ise  $^{15}\text{C}$  dağılımıdır. Şekil 4.44'ün yine üstte görülen dağılım  $^{15}\text{N}$  ve aşağıda görülen dağılım ise  $^{15}\text{C}$ 'ye aittir.

Şekil 4.45 ve Şekil 4.46 59.5 MeV enerjili mermi çekirdekleri kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarını temsil etmektedir. Şekil 4.45'te y ekseninde teleskobun arka katmanının enerji spektrumu ve x eksenindeki spektrum ise iki katmanın toplam enerji spektrumudur ( $\Delta E+E-E$ ). Şekil 4.46'da y ekseninde arka katmanının enerji spektrumu ve y ekseninde ön katmanın enerji spektrumu ( $\Delta E-E$ )'dur. Burada x ve y eksenlerinin birimi MeV'dir.

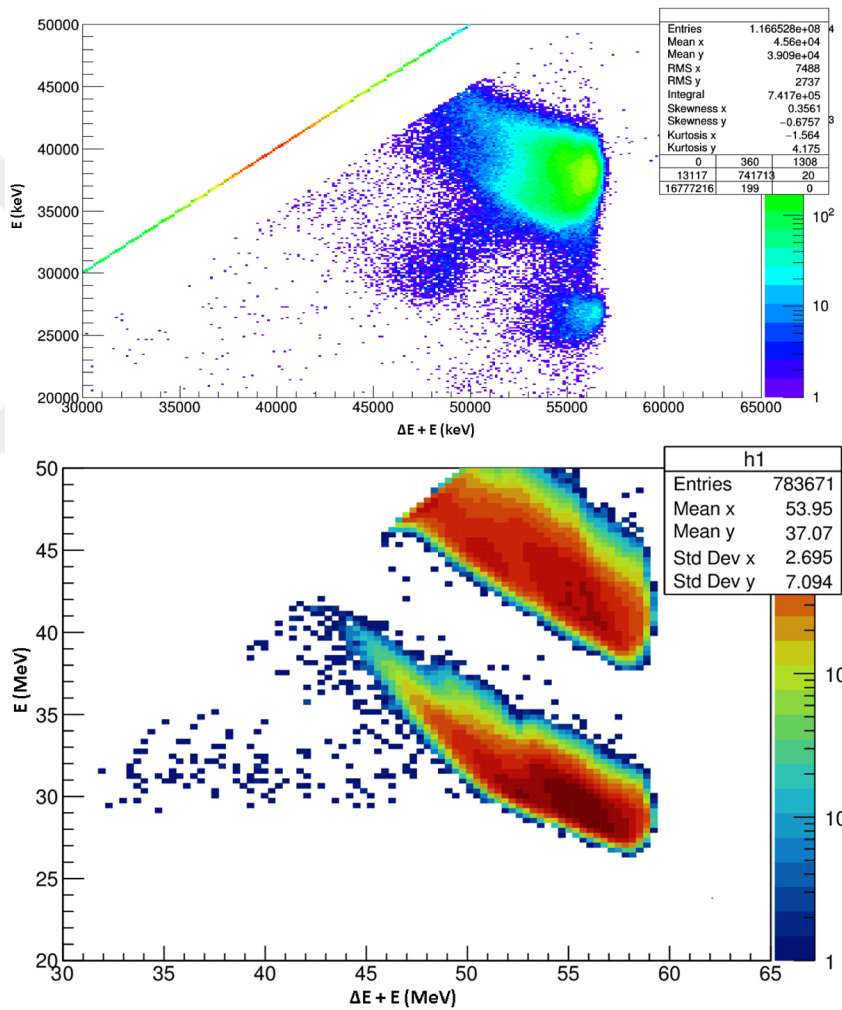
Şekil 4.45'in üst kısmındaki dağılım  $^{15}\text{N}$ 'nin dağılımıdır. Altındaki dağılım ise  $^{15}\text{C}$  dağılımıdır. Şekil 4.46'nın yine üstte görülen dağılım  $^{15}\text{N}$  ve aşağıda görülen dağılım ise  $^{15}\text{C}$ 'ye aittir.

Şekil 4.47 ve Şekil 4.47 65 MeV enerjili mermi çekirdekleri kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarını temsil etmektedir. Şekil 4.47'de y ekseninde teleskobun arka katmanının enerji spektrumu ve x eksenindeki spektrum ise iki katmanın toplam enerji spektrumudur ( $\Delta E+E-E$ ). Şekil 4.47'de y ekseninde arka katmanının enerji spektrumu ve

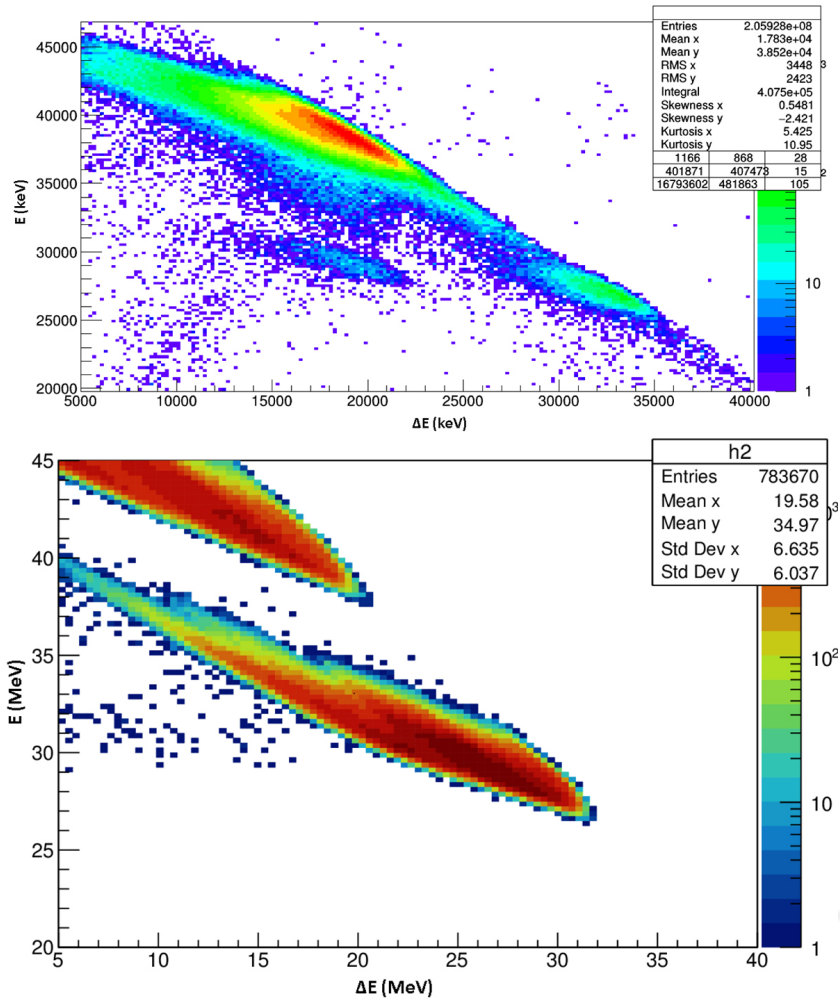
y ekseninde ön katmanın enerji spektrumu ( $\Delta E-E$ )'dur. Burada x ve y eksenlerinin birimi MeV'dir.

Şekil 4.47'nin üst kısmındaki spektrum  $^{15}\text{N}$ 'nin dağılımıdır. Altaki spektrum ise  $^{15}\text{C}$  dağılımıdır. Şekil 4.47'in yine üstte görülen dağılım  $^{15}\text{N}$  ve aşağıdaki görülen dağılım ise  $^{15}\text{C}$ 'ye aittir.

Deneyde elde edilen spektrumlar ile simülasyondan elde edilen spektrumlar Şekil 5.48 ve Şekil 5.49'de görüldüğü gibi, karşılaştırıldığında, sonuçlarda tutarlılık sağlanamamıştır. Daha verimli karşılaştırma için tüm teleskopların analizlerinden elde edilmiş spektrumla karşılaştırılması gereklidir. Dolayısıyla tek bir teleskop yerine tüm teleskoplardan alınan verinin daha detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.



**Şekil 5.48.** Deneyden ve simülasyonda elde edilen spektrumun karşılaştırılması. Spektremlerde tam bir tutarlılık sağlanamamıştır. Yukarıdaki spektrum deneyden elde edilen spektrum, aşağıdaki spektrum ise 59.5 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumudur



**Şekil 5.49.** Deneyden ve simülasyonda elde edilen spektrumun karşılaştırılması. Spektremlerde tam bir tutarlılık sağlanamamıştır. Yukarıdaki spektrum deneyden elde edilen spektrum, aşağıdaki spektrum ise 59.5 MeV enerjili mermi çekirdekle yapılmış simülasyonun spektrumudur

## 6. KAYNAKLAR

- Adamczewski, J. et al. 2004. "Go4 on-line monitoring." *IEEE Transactions on Nuclear Science* 51.3 (2004): 565-570.
- Ajzenberg-Selove, F. 1991. *Nucl. Phys.* A523 1.
- Al-Khalili, J. 2004. "An introduction to halo nuclei." *The Euroschool Lectures on Physics with Exotic Beams, Vol. I.* Springer, Berlin, Heidelberg, 77-112, pp. 1-53
- Al-Khalili, J. 2017. *Halo Nuclei.* Morgan & Claypool Publishers, pp. 8-43
- Antcheva, I., Maarten, B., Bertrand, B., Marek, B., Rene, B., Nenad, B., Canal, P., Diego, C., Olivier, C., Valery, F., et al. 2009. Root—a c++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization. *Computer Physics Communications*, 180(12):2499–2512.
- Antcheva, I., Maarten, B., Bertrand, B., Marek, B., Rene, B., Nenad, B., Canal, P., Diego, C., Olivier, C., Valery, F., et al. 2011. Root—a c++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization. *Computer Physics Communications*, 182(6):1384–1385.
- Becquerel, H. 1896. On the rays emitted by phosphorescence. *Compt. Rend. Hebd. Seances Acad. Sci.*, 122:420–421.
- Bjerge, T. 1936. *Nature* 138: 400.
- Borge, M. 2015. Highlights of the isolde facility and the hie-isolde project. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 376:408 – 412, 2016. ISSN 0168-583X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.12.048>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X16000057>. Proceedings of the XVIIth International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2015), Grand Rapids, MI, U.S.A., 11-15 May 2015.
- Brun, R., Rademakers, F. 1997. Root—an object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 389(1-2):81–86.
- Catherall, R., Augustin, M., Babcock, C., Barlow, R., Bernardes, A., Cimmino, S., Czapski, M., Fowler, T., Giles, T., Hermann, M., et al. 2013. An overview of the hie-isolde design study. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 317:204–207.
- Correia, J., Johnston, K., Wahl, U. 2012. Nuclear radioactive techniques applied to materials research. *Radiochimica Acta International journal for chemical aspects of nuclear science and technology*, 100(2):127–137.
- Decrock, P., Delbar, T., Duhamel, P., Galster, W., Huyse, M., Leleux, P., Licot, I., Lienard, E., Lipnik, P., Loiselet, M., et al. 1991. Determination of the n 13 (p, ) 14 o reaction cross section using a n 13 radioactive ion beam. *Physical review letters*, 67(7):808.



- Duppen, P., Riisager, K. 2011. Physics with rex-isolde: from experiment to facility. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 38(2):024005.
- Duran, M. 2016. "Near barrier scattering of  $^8\text{He}$  from heavy targets."
- Gilmore, G. 2011. Practical gamma-ray spectroscopy. John Wiley & Sons.
- Hansen, P., Jonson B. 1987. "The neutron halo of extremely neutron-rich nuclei." *EPL (Europhysics Letters)* 4.4: 409.
- Herlert, A. 2010. The isolde facility. *Nuclear Physics News*, 20(4):5–12, doi: 10.1080/10619127.2010.529735. URL <https://doi.org/10.1080/10619127.2010.529735>.
- Kadi, Y., Blumenfeld, Y., Venturini, D., Fraser, M., Huyse, M., Koufidou, P., Rodriguez, J., Wenander, F. 2017. Post-accelerated beams at isolde. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 44(8):084003, 2017. URL <http://stacks.iop.org/0954-3899/44/i=8/a=084003>.
- Kamigaito, O. et al. 2013. Overview of the world-wide rib facilities-status and challenges. IPAC2013: Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference. 12-17 May 2013, Shanghai, China.
- Knoll, G.F. 2010. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons, pp. 205-269
- Krane, S., Halliday, D. 1987. Introductory nuclear physics, pp. 51-357
- Krane, S., 2001. Nükleer fizik I. Palme Yayıncılık, pp. 43-215
- Markenroth, K., 2001. Exploring the Exotic: Experimental investigations far from stability, Doktora tezi, Department of Experimental Physics Chalmers University of Technology and Göteborg University Göteborg, Sweden.
- Marquinez-Duran, G., Strojek, T., Standyło, T., Acosta, L., Raabe, R., Alvarez, M., Cubero, M., Labrador, J., Rusek, K., Pierrousakou, D., et al. 2016. Study of the near-barrier scattering of  $^8\text{He}$  on  $^{208}\text{Pb}$ . *Acta Phys. Polon.*, 47:841.
- Martel, I. 2015. Probing the halo structure of  $^{15}\text{C}$  at energies around the coulomb barrier. No. CERN-INTC-2015-045.
- Martel, I. 2016. Effects of the neutron halo in  $^{15}\text{C}$  scattering at energies around the Coulomb barrier. No. CERN-INTC-2016-025.
- Matta, A., et al. 2016. "NPTool: a simulation and analysis framework for low-energy nuclear physics experiments." *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 43.4: 045113.
- Murillo, G., Sen, S., Darden, S.E. 1994. *Nucl. Phys. A* 579 125.
- Ozawa, A. 2004. "Reaction cross-sections for carbon isotopes." *Nuclear Physics A* 738 (2004): 38-44.

- Raymond, S., Jewett, J., Hernandez, A., Lopez, E. 2005. *Fisica para ciencias e ingenieria, volume 9. Thomson.*
- Russell, B. 2013. *History of western philosophy: Collectors edition.* Routledge, pp. 20-200
- Rutherford, E. 1911. Lxxix. the scattering of and particles by matter and the structure of the atom. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21(125):669–688.
- Satchler, R. 1980. *Introduction to Nuclear Reactions.* MacMillan Education LTD.
- Serway, A., Jewett, J. 2018. *Physics for scientists and engineers with modern physics.* Cengage learning, 1382 s.
- Tanihata, I., Hamagaki, H., Hashimoto, O., Nagamiya, S., Shida, Y., Yoshikawa, N., Yamakawa, O., Sugimoto, K., Kobayashi, T., Greiner, D., Takahashi, N., Nojiri, Y. 1985. Measurements of interaction cross sections and radii of he isotopes. *Physics Letters B*, 160(6):380 – 384. ISSN 0370-2693. doi: [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(85\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0370-2693(85)90005-X). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037026938590005X>.
- Tanihata, I., Rituparna, K. 2003. Halo and skin nuclei. *Comptes Rendus Physique*, 4(4-5):437–449.
- Taylor, W. et al. 2010. *The atomists, Leucippus and Democritus: fragments: a text and translation with a commentary, volume 5.* University of Toronto Press, pp. 50-200
- Tsoufanidis, N. 2010. *Measurement and detection of radiation.* CRC press, pp. 60-200
- Wenander, F., Batzner, K., Ratzinger, U., Kugler, E. 1995. *Radioactive beam experiments at isolde: Coulomb excitation and neutron transfer reactions of exotic nuclei.*
- Ziegler, J. 2004. "SRIM-2003." *Nuclear instruments and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms* 219: 1027-1036.
- Ziegler, J., Ziegler M., Biersack, J. 2010. "SRIM–The stopping and range of ions in matter (2010)." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 268.11-12: 1818-1823.
- Anonim 1: <http://bilgili.co/wp-content/uploads/2016/11/atomic.jpg>, [Son erişim tarihi: 04.12.2018].
- Anonymous 1: *ISOLDE şematik diyagram.* <https://hie-isolde-project.web.cern.ch/> [Son erişim tarihi: 28.11.2018].
- Anonymous 2: *Doubled Sided / DC Strip Detectors without Bias Resistors.* <http://www.micronsemiconductor.co.uk/strip-detectors-double-sided/> [Son erişim tarihi: 03.12.2018].
- Anonymous 3: <https://geant4.web.cern.ch/gallery> [Son erişim tarihi: 05.12.2018].

- Anonymous 4: Introduction To Nucleus, <http://physicsanduniverse.com/introduction-to-nucleus/> [Son erişim tarihi: 05.12.2018].
- Anonymous 5: Carbon isotopes, [https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes\\_of\\_carbon](https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_carbon) [Son erişim tarihi: 18.12.2018].
- Anonymous 6: <https://root.cern.ch/> [Son erişim tarihi: 05.12.2018].
- Anonymous 7: <https://root.cern.ch/about-root> [Son erişim tarihi: 05.12.2018].
- Anonymous 8: <http://www.srim.org> [Son erişim tarihi: 05.12.2018].
- Anonymous 9: <http://nptool.org> [Son erişim tarihi: 05.12.2018].
- Anonymous 10: <http://www.passmyexams.co.uk/GCSE/physics/stable-and-unstable-nuclei.html> [Son erişim tarihi: 05.12.2018].
- Anonymous 11: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory\\_Chemistry/Map%3A\\_Introductory\\_Chemistry\\_\(Tro\)/17%3A\\_Radioactivity\\_and\\_Nuclear\\_Chemistry/17.03%3A\\_Types\\_of\\_Radioactivity%3A\\_Alpha%2C\\_Beta%2C\\_and\\_Gamma\\_Decay](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Map%3A_Introductory_Chemistry_(Tro)/17%3A_Radioactivity_and_Nuclear_Chemistry/17.03%3A_Types_of_Radioactivity%3A_Alpha%2C_Beta%2C_and_Gamma_Decay) [Son erişim tarihi: 05.12.2019].
- Anonymous 12: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gamma\\_decay](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gamma_decay) [Son erişim tarihi: 05.12.2019].
- Anonymous 13: <https://www.fuw.edu.pl/~standylo/physics.html> [Son erişim tarihi: 02.04.2019].
- Anonymous 14: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/> [Son erişim tarihi: 02.04.2019].

## ÖZGEÇMİŞ

**Necmettin CEYLAN**

**necmettinceylan@hotmail.com**

**github.com/NecmettinCeylan**

**necmettinceylan.github.io/cv/**



### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2016-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Antalya
Lisans 2009-2015	Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Antalya