

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**LABR3:CE KRİSTALİ KULLANILARAK İNORGANİK SİNTİLAYON
DEDEKTÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ**

Selçuk Oktay SOLAKCI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ARALIK 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**LABR3:CE KRİSTALİ KULLANILARAK İNORGANİK SİNTİLAYON
DEDEKTÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ**

Selçuk Oktay SOLAKCI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ARALIK 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LABR3:CE KRİSTALİ KULLANILARAK İNORGANİK SİNTİLASYON
DEDEKTÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ**

Selçuk Oktay SOLAKCI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon
Birimi tarafından FDK-2018-2937 nolu proje ile desteklenmiştir.**

ARALIK 2022

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LABR3:CE KRİSTALİ KULLANILARAK İNORGANİK SİNTİLASYON
DEDEKTÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ

Selçuk Oktay SOLAKCI

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 27/12/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN (Danışman)
Prof. Dr. Erhan CENGİZ
Doç. Dr. Mesut KARAKOÇ
Doç. Dr. Edip BAYRAM
Doç. Dr. Hasan ÖZDOĞAN

ÖZET

LABR3:CE KRİSTALİ KULLANILARAK İNORGANİK SİNTİLASYON DEDEKTÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ

Selçuk Oktay SOLAKCI

Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. İsmail BOZTOSUN

ARALIK 2022, 64 sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, INFN-LNS bünyesinde devam etmekte olan, çift yük değişimli ağır iyon çarpışmalarına ait Nükleer Matris Elemanlarının belirlenmesi için yürütülen NUMEN deney düzeneğini geliştirmek amaçlı $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalli inorganik sintilasyon dedektörü yapılmıştır. Dedektör kurulumu için gerekli fotoçoğaltıcı tüp ve elektronik sistem gereksinimleri hem Akdeniz Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarı hem de INFN-LNS tarafından sağlanmıştır. Yapılan dedektörün karakteristik özelliklerini belirlemeye yönelik ilk testler, Akdeniz Üniversitesi Nükleer Fizik laboratuvarında yürütülmüştür. Daha sonra testlere INFN-LNS’de devam edilmiş olup burada, dedektörün farklı çalışma gerilimlerinde ve farklı elektronik sistemlerdeki verileri alınarak karakteristik değişimi araştırılmıştır. Elde edilen veriler simülasyon verileri ile karşılaştırılarak dedektörün verimliliği ifade edilmiştir. Elde edilen enerji spektrumları üzerinden yapılan hesaplamalar neticesinde $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörünün ortalama enerji çözünürlüğü %4,5 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın son aşamasında $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalli sintilasyon dedektörü MAGNEX spektrometre düzeneğine monte edilerek ilk kez ağır iyonların çarpışma deneylerinde test edilmiştir. Deney aşamasında meydana gelen yüksek arka plan saçılmasına rağmen $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ enerji spektrumunda simülasyonla uyumlu enerji pikleri görülmüştür. Sonuç olarak, elde edilen veriler tartışılarak NUMEN sisteminin gelişimi için öneriler sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: Çözünürlük, Çift Yük Değişimi, Dedektör, $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, Sintilasyon, Magnex

JÜRİ: Prof.Dr. İsmail BOZTOSUN

Prof. Dr. Erhan CENGİZ

Doç. Dr. Mesut KARAKOÇ

Doç. Dr. Edip BAYRAM

Doç. Dr. Hasan ÖZDOĞAN

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF AN INORGANIC SCINTILLATION DETECTOR USING LABR₃:CE CRYSTAL

Selçuk Oktay SOLAKCI

PhD Thesis in PHYSICS

Supervisor: Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN

Dec 2022, 64 pages

Within the scope of this thesis, LaBr₃:Ce crystalline inorganic scintillation detector was built to improve the NUMEN experimental setup, which was carried out to determine the Nuclear Matrix Elements of double charge exchange heavy ion collisions, which is ongoing within the INFN-LNS. Photomultiplier tube and electronic system requirements for detector installation were provided by both Akdeniz University Nuclear Physics Laboratory and INFN-LNS. The first tests to determine the characteristic features of the detector were carried out in the Nuclear Physics laboratory of Akdeniz University. Then, the tests were continued in INFN-LNS, where the characteristic change was investigated by taking the data of the detector at different operating voltages and different electronic systems. The efficiency of the detector was expressed by comparing the obtained data with the simulation data. As a result of the calculations made on the energy spectra obtained, the average energy resolution of the LaBr₃:Ce detector was calculated as %4,5. At the last stage of the study, the LaBr₃:Ce crystalline scintillation detector was mounted on the MAGNEX spectrometer setup and tested for the first time in the collision experiments of heavy ions. Despite the high background scattering that occurred during the experiment phase, energy peaks compatible with the simulation were observed in the LaBr₃:Ce energy spectrum. As a result, the obtained data were discussed and suggestions were presented for the development of the NUMEN system.

KEYWORDS: Resolution, Double Charge Exchange, Detector, LaBr₃:Ce, Scintillation, Magnex

COMMITTEE: Prof.Dr. İsmail BOZTOSUN

Prof.Dr. Erhan CENGİZ

Assoc.Prof.Dr. Mesut KARAKOÇ

Assoc.Prof.Dr. Edip BAYRAM

Assoc.Prof.Dr. Hasan ÖZDOĞAN

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında tecrübe, bilgi ve vizyonundan faydalandığım saygıdeğer danışmanım sayın Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN'a hem doktora eğitimi hem de tez çalışma sürecimde özverili desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel süreçlerde bilgi ve tecrübesinden yararlandığım, çalışmamız süresinde INFN-LNS'in imkanlarından yararlanmamı sağlayan Prof. Dr. Francesco CAPPUZZELLO'ya ve NUMEN deney gurubuna bütün desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Tez süresi boyunca bilgi alışverişi yaptığımız ve desteğini esirgemeyen değerli çalışma arkadaşım Dr. Aydın YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Son olarak, sevgili eşim Seray Şahin SOLAKCI'ya, bu stresli, uzun soluklu ve zorlu yolun her adımında yanımda benimle olduğu ve desteğini her an hissettirdiği için minnettarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	6
3. MATERYAL VE METOT	11
3.1. Gama Işını Etkileşimleri	12
3.1.1. Fotoelektrik Etki	12
3.1.2. Compton Saçılması	13
3.1.3. Çift Oluşumu	14
3.2. Sintilasyon Dedektörleri	15
3.2.1. İnorganik Sintilatörler	16
3.3. Sintilatörlerin Özellikleri	20
3.3.1. Sintilasyon Dedektörleri İçin Ölü Zaman (Dead Time)	20
3.3.2. Enerji Çözünürlüğü	21
3.3.3. Verim Hesabı	22
3.3.4. Dayanıklılık	23
3.4. Sintilasyon Dedektörlerinde Arka Plan Kaynakları	23
3.5. Fotoçoğaltıcı Tüp	24
3.6. Sayısallaştırıcı Elektronik Devreler	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1. LNS testleri ve Enerji Çözünürlüğü Hesapları	29
4.2. Simülasyon Karşılaştırmaları	51
4.3. Zaman Çözünürlüğü	56
4.4. Verim Hesabı	57
4.5. DCE testleri	58
5. SONUÇLAR	61
6. KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “LaBr₃:Ce Kristali Kullanılarak İnorganik Sintilasyon Dedektörü Geliştirilmesi ” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

27/12/2022

Selçuk Oktay SOLAKCI



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler:

c	: Işık Hızı
e	: Elektron
Ω	: Katı açısı
m_0	: Durgun Kütle
Z_{eff}	: Etkin atom numarası
β	: Beta Parçacığı
Γ	: Yarı derinlikteki tam genişlik
γ	: Gama Fotonu
ε_{mutlak}	: Mutlak verim
ε_{pik}	: Enerji pik verimi
ν	: Nötrino
σ	: Gauss fonksiyonunda standart sapma
$0\nu\beta\beta$	: Nötrinossuz Çift Beta Bozunumu
$R(E_0)$	: E_0 enerjisindeki çözünürlük değeri

Kısaltmalar:

CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
CS	: Süperiletken Siklotron (superconductor Cyclotron)
DCE	: Çift Yük Değişimi (Double Charge Exchange)
FPD	: Odak Düzlem Dedektörü (Focal Plane Detector)
FWHM	: Yarı Maksimumdaki Tam Genişlik (Full Width at Half Maximum)
INFN	: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
kGy	: kilogray
keV	: kilo elektronvolt
LaBr ₃	: Lantanyum Bromür (Lanthanum Bromide)
LaBr ₃ (Ce)	: Seryum Katkılı Lantanyum Bromür (Cerium Doped Lanthanum Bromide)
LNS	: Laboratori Nazionali del Sud
NME	: Nükleer Matris Elemanları (Nuclear Matrix Elements)
NUMEN	: Nuclear Matrix Elements for Neutrinoless Double Beta Decay
MeV	: mega elektronvolt
PGNAA	: Hızlı Gama ışını Nötron Aktivasyon analizi
PET	: Pozitron Salınım Tomografisi (Positron Emission Tomography)
TOF	: Uçuş süresi (Time-of-flight)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	NUMEN deneyinin yapıldığı MAGNEX spektrometresi	2
Şekil 1.2	NUMEN deney sisteminin CAD planı (Cappuzzello vd. 2018)	4
Şekil 2.1	^{138}La 'nın içsel aktivitesi (Marcer vd. 2022)	9
Şekil 2.2	^{22}Na 'nın bozunum şeması	9
Şekil 3.1	Gama ışınlarının enerjilerine göre madde ile etkileşimi (Nelson ve Reilly 1991)	11
Şekil 3.2	$h\nu$ enerjili gama ışınlarının oluşturacağı enerji spektrumu	13
Şekil 3.3	Kristalin izinli ve yasaklı enerji bantları	17
Şekil 3.4	a) $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalinin CAD planı; b) $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristali	19
Şekil 3.5	Zaman çözünürlüğü hesabı için kullanılan plan	20
Şekil 3.6	Zaman farkı spektrumu (Knoll'un (2010) "Radiation Detection and Measurement" kitabından alınarak uyarlanmıştır)	21
Şekil 3.7	Çözünürlük hesabı yapılırken kullanılan çizgi parametreleri	22
Şekil 3.8	Fotoçoğaltıcı tüp ile sintilasyon kristali montaj planı	24
Şekil 3.9	Dedektör yapımında kullanılan fotoçoğaltıcı tüp – 9214B	26
Şekil 3.10	Deneyde kullanılan V1725 (Solda) ve DT5751 (Sağda) sayısallaştırıcılar	26
Şekil 4.1	$\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalli inorganik sintilasyon dedektörü	27
Şekil 4.2	Dedektör ile nokta kaynaklar arasındaki etkileşimin osiloskopta gözlenmesi	28
Şekil 4.3	V1725 sayısallaştırıcı giriş-çıkış sinyallerini gösteren CoMPASS ekranı	29
Şekil 4.4	INFN-LNS'de yürütülen $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ testleri	30
Şekil 4.5	Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörüne 900V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumu	31
Şekil 4.6	Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörüne 900V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumunun enerji kalibrasyonu yapılmış gösterimi	31
Şekil 4.7	900V uygulama voltajında, Na-22 radyoaktif kaynağının enerji değerleri ile elde edilen spektrumdaki piklerin kanal numaralarının lineer eşleştirilme fiti	32
Şekil 4.8	900V uygulama voltajında, Na-22 'nin 511 keV piki için yapılan Gaussian fiti	33
Şekil 4.9	900V uygulama voltajında, Na-22 'nin 1275 keV piki için yapılan Gaussian fiti	33
Şekil 4.10	900V uygulama voltajında, ^{138}La içsel aktivitesinden kaynaklı 1470 keV piki için yapılan Gaussian fiti	34
Şekil 4.11	Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörüne 950V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumu	35
Şekil 4.12	950V uygulama voltajında, Na-22 radyoaktif kaynağının enerji değerleri ile elde edilen spektrumdaki piklerin kanal numaralarının lineer eşleştirilme fiti	36

Şekil 4.13 Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, LaBr ₃ :Ce dedektörüne 950V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumunun enerji kalibrasyonu yapılmış gösterimi	36
Şekil 4.14 950V uygulama voltajında, Na-22'nin 511 keV piki için yapılan Gaussian fiti	37
Şekil 4.15 950V uygulama voltajında, Na-22'nin 1275 keV piki için yapılan Gaussian fiti	38
Şekil 4.16 950V uygulama voltajında, ¹³⁸ La piki için yapılan Gaussian fiti	38
Şekil 4.17 Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, LaBr ₃ :Ce dedektörüne 980V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumu	39
Şekil 4.18 980V uygulama voltajında, Na-22 radyoaktif kaynağının enerji değerleri ile elde edilen spektrumdaki piklerin kanal numaralarının lineer eşleştirilme fiti	40
Şekil 4.19 Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, LaBr ₃ :Ce dedektörüne 980V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumunun enerji kalibrasyonu yapılmış gösterimi	40
Şekil 4.20 980V uygulama voltajında, Na-22'nin 511 keV piki için yapılan Gaussian fiti	41
Şekil 4.21 980V uygulama voltajında, Na-22'nin 1275 keV piki için yapılan Gaussian fiti	42
Şekil 4.22 980V uygulama voltajında, ¹³⁸ La içsel aktivitesinden kaynaklı 1470 keV piki için yapılan Gaussian fiti	42
Şekil 4.23 Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, LaBr ₃ :Ce dedektörüne 950V gerilim uygulanırken analog elektronik sistemde elde edilen kanal spektrumu	43
Şekil 4.24 Analog elektronik kullanılarak 950V uygulama voltajında, Na-22 radyoaktif kaynağının enerji değerleri ile elde edilen spektrumdaki piklerin kanal numaralarının lineer eşleştirilme fiti	44
Şekil 4.25 950V analog elektronik kullanılarak alınmış Na-22 enerji spektrumu	45
Şekil 4.26 950V uygulama voltajında analog elektronikte Na-22'nin 511 keV piki için yapılan Gaussian fiti	45
Şekil 4.27 950V uygulama voltajında analog elektronikte Na-22'nin 1275 keV piki için yapılan Gaussian fiti	46
Şekil 4.28 950V uygulama voltajında analog elektronikte ¹³⁸ La içsel aktivite piki	46
Şekil 4.29 Analog sistem kullanılarak 1270V'da elde edilen kanal spektrumu	47
Şekil 4.30 Analog sistem için 1270V gerilimde enerji-kanal eşleştirmesi lineer fiti	48
Şekil 4.31 1270V analog elektronik kullanılarak alınmış Na-22 enerji spektrumu	48
Şekil 4.32 Analog sistemde 1270V uygulama voltajında Na-22'nin 511 keV piki için yapılan Gaussian fiti	49
Şekil 4.33 Analog sistemde 1270V uygulama voltajında, Na-22'nin 1275 keV piki için yapılan Gaussian fiti	49
Şekil 4.34 1270V uygulama voltajında analog elektronikte ¹³⁸ La içsel aktivite piki	50
Şekil 4.35 LaBr ₃ :Ce dedektörü ile Na-22 nokta kaynağının GEANT4 ile yapılmış simülasyon görüntüsü	52

Şekil 4.36 Simülasyondan elde edilen Na-22 enerji pikleri ile ve La-138 iç aktivitesinin spektrumu (logaritmik)	52
Şekil 4.37 ^{22}Na kaynağının $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristali ile etkileşiminin simülasyonundan elde edilen enerji spektrumu	53
Şekil 4.38 Deneysel sonuçların simülasyon ile karşılaştırılması (logaritmik) . . .	54
Şekil 4.39 Deney sonuçlarının simülasyon ile karşılaştırılması	54
Şekil 4.40 ^{22}Na nokta kaynağının, $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü ile 950V gerilimde elde edilen kanal ve enerji spektrumları (logaritmik)	55
Şekil 4.41 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ ve NaI:Tl sintilatörlerinin çözünürlüklerinin karşılaştırmak ve $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 'ün zaman çözünürlüğünü hesaplamak için kurulan düzenek	55
Şekil 4.42 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ ve NaI:Tl dedektörleri ile alınmış ^{22}Na enerji spektrumlarının karşılaştırılması	56
Şekil 4.43 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ ile BC-408 dedektörleri kullanılarak alınmış zaman spektrumu	57
Şekil 4.44 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörünün ağır iyon çarpışmalarındaki test düzeneği . .	58
Şekil 4.45 ^{20}Ne çekirdeklerinin hızlandırılarak ^{116}Cd 'ye çarptırılması sonucu meydana gelebilecek reaksiyonların şematik gösterimi (Cappuzzello vd. 2021) . .	59
Şekil 4.46 Hızlandırılan ^{20}Ne iyonlarının ^{116}Cd hedefe çarptırılmasından sonra saçılan gama ışınlarının $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü ile tanımlanması	60
Şekil 4.47 Hızlandırılan iyonların HOPG hedefe çarptırılmasından sonra saçılan gama ışınlarının $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü ile tanımlanması	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1	900V uygulama voltajında elde edilen çözünürlük değerleri	32
Çizelge 4.2	950V uygulama voltajında elde edilen çözünürlük değerleri	35
Çizelge 4.3	980V uygulama voltajında elde edilen çözünürlük değerleri	41
Çizelge 4.4	950V uygulama voltajında analog elektronik ile elde edilen çözünürlük değerleri	44
Çizelge 4.5	1270V uygulama voltajında analog elektronik ile elde edilen çözünürlük değerleri	47
Çizelge 4.6	Farklı elektronik sistemlerin dedektör özelliklerine etkisi	51
Çizelge 4.7	Dedektör verimi ölçüm değerleri	57



1. GİRİŞ

Bilim insanları, uzun yıllardan beri, yapılan teorik çalışmaların doğrulamasını, araştırılan konuların içeriğine göre tasarlanmış olan deneysel sistemler kullanarak yapmaktadırlar. Deney sistemlerinin çalışılan konulara uygun olarak tasarlanması, elde edilecek olan sonuçların hem kolay alınmasını hem de doğruluğunu etkilemektedir.

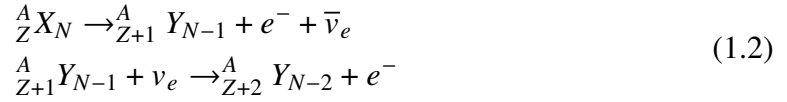
Nükleer fizikte atom altı parçacıkların ayırt edilebilmesi için farklı deney düzenekleri kullanılmaktadır. Parçacıkların ayırt edilebilmesinin yanı sıra sahip oldukları fiziksel parametrelerin de belirlenme gereksinimi deney sistemlerinin farklılaşmasıyla birlikte geliştirilmesini de zorunlu kılmaktadır. Uygulamadaki en büyük zorluklardan birisi, test edilmesi planlanan deneysel sürecin; örneğin bu belirli bir radyoaktif elemente ait enerji geçişi olabilir; diğer fiziksel süreçlerinden arındırılarak gözlenmeye çalışılmasıdır. Ancak ne kadar mükemmel deney sistemleri kurulursa kurulsun gerçekleşen diğer fiziksel süreçlerin verileri de sonuçlara, arka plan olarak karışacaktır. Bazen arka planda gerçekleşen olaylar asıl amaçlanan sonucun elde edilmesini oldukça zorlaştırır. Bu nedenle deney düzenekleri ile ilgili geliştirmeler sürekli olarak devam etmektedir.

Deney sistemlerinin geliştirilmesi ile ilgili önemli çalışmalardan birisi de İtalya'nın Katanya şehrinde bulunan INFN-LNS laboratuvarında bulunan NUMEN gurubu tarafından yapılmaktadır. Gurup, nötrinossuz çift beta ($0\nu\beta\beta$) geçişlerine ait nükleer matris elemanlarını (NME) belirlemeye yönelik çalışmalar yürütmektedir. Ancak, $0\nu\beta\beta$ reaksiyonları oldukça uzun yarı ömürlere ($\approx 10^{24}$ yıl) sahip olması nedeniyle gözlenmesi zorlaşmaktadır. Bunun yanında, $0\nu\beta\beta$ ve çift yük değişim (Double Charge Exchange - DCE) reaksiyonlarının her ikisinde de çekirdekleri temsil eden başlangıç ve bitiş dalga fonksiyonunun aynı olması, buradaki geçişlerin aynı nükleer matris elemanı ile temsil edilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, NUMEN gurubu $0\nu\beta\beta$ olayının benzeri olan çift yük değişim (DCE) reaksiyonlarının NME'lerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmaktadır (Cappuzzello vd. 2018). Deneysel çalışmalar Şekil 1.1'de gösterilen MAGNEX spektrometresi ile yürütülürken, deneysel düzenek ihtiyaçlara göre sürekli geliştirilerek proje devam etmektedir. Planlanan deneyin başarı ile sonuçlanması durumunda DCE reaksiyonlarında lepton sayısının korunmadığı ispatlanacak, nötrino parçacığının etkin kütlesi bulunmuş olacak ayrıca nötrinoların, Majorana ve Dirac doğası hakkında kesin bir yargıya varılabilecektir (Cappuzzello vd. 2018). Çift beta bozunumunu genel olarak Denklem 1.1'deki gibidir.

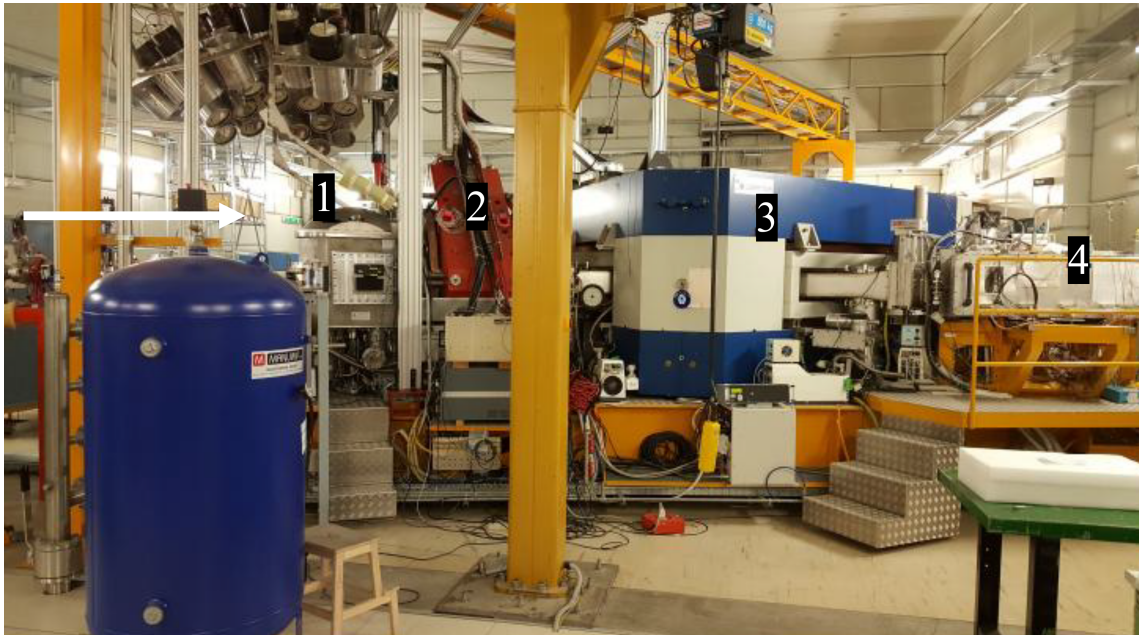
$${}^A_ZX_N \rightarrow {}^A_{Z+2}Y_{N-2} + 2e^- + 2\bar{\nu}_e \quad (1.1)$$

Buradaki nükleer reaksiyonda, çekirdek bir durumdan başka bir duruma geçerken 2 elektron ve 2 nötrino salmıştır. Eğer, nötrino ve antinötrino, madde-anti madde ikilemine uymuyorsa, yani farklı parçacık değilse, bu durumda reaksiyon nötrinossuz gerçekleşebilir (Krane 1987) ve reaksiyon zinciri Denklem 1.2 eşitlikleri ile verilir. Bu eşitliklerde

(Denklem 1.1 ve Denklem 1.2) görüleceği gibi her iki reaksiyon da çift beta bozunumunu gösterirken, Denklem 1.2’de yer alan eşitliklerde gösterilen reaksiyon zincirinde salınan nötrinin tekrar soğurulma olayı gerçekleşmiştir. Reaksiyon sonunda dışarıya nötrino yayılımı olmamıştır. Bu durum nötrino parçacığının Majorana doğasına işaret eder (deShalit ve Feshbach 1974).



NUMEN projesinin deney aşamasında, ayrı bir odada K800 Süperiletken Siklotron hızlandırıcıda hızlandırılan ağır iyonlar, deney odasına yönlendirilerek spektrometrenin hemen ön tarafında konumlanmış olan hedef odası (target chamber) içerisinde bulunan çekirdek ile çarpıştırılmaktadır. Çarpışmadan sonra ürünler saçılırken ışın geliş doğrultusunda hareket etmeye devam eden çekirdekler quadropol mıknatıs içerisinde yönelir. Bu kısımdaki esas amaç gelen iyon demetini, ince kenarlı merceğin ışık ışınlarını topladığı şekilde toplayarak düzeneğin bir diğer elemanı olan dipol mıknatısa göndermektir. Dipol mıknatıs, iyon demetinde bulunan çekirdekleri, yatay düzlemde kütlelerine göre ayırarak, çekirdeklerin tanımlanmasının yapıldığı son eleman olan düzlem alan dedektörüne (Focal Plane Detector – FPD) yönlendirir. Burada tanımlanan parçacıklar gerçekleşen nükleer reaksiyonun türü hakkında bilgi vermektedir. Projedeki esas amaç çift beta bozunumu reaksiyonlarını analiz etmek olduğu için, gerçekleşen diğer tüm nükleer süreçler verilere arka plan olarak yansımaktadır. Dolayısıyla gerçekleşen tüm reaksiyonların doğrulukla tespit edilmesi, arka plan reaksiyonlarını çıkarmak için de önemlidir.



Şekil 1.1. NUMEN deneyinin yapıldığı MAGNEX spektrometresi

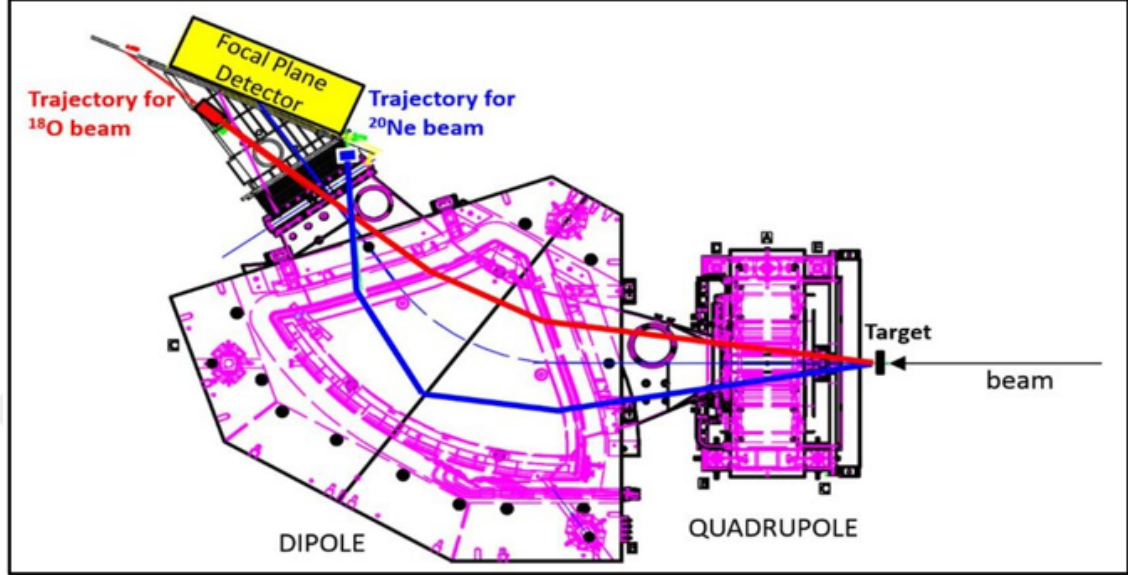
Şekil 1.1’de gösterilen deney düzeneğinde (ve Şekil 1.2’deki CAD planında) ok işareti ile işaretlenmiş kısım doğrultu hızlandırılan ağır iyonların hedefe geliş doğrultusudur. İyonların hedef ile etkileştiği yer olan hedef odası 1 rakamı ile gösterilmiştir. Çarpışma sonrasında ürünlerin bir kısmı hedef odası etrafında saçılma yaparken, etkileşime girmiş iyonların bir kısmı gelen demet doğrultusunda yoluna devam ederek 2 numaralı kuadropol mıknatısına gelir. Buradan odaklanarak geçen iyonlar 3 numara ile gösterilen dipol mıknatısta oluşan manyetik alan etkisiyle kütlelerine göre birbirlerinden ayrılarak tanımlanacakları yer olan düzlem alan dedektörüne gelirler (4 numara).

NUMEN deneyinde incelenecek nükleer süreçler, DCE ve gerçekleşen diğer reaksiyonlarla deforme olmuş veya olmamış çekirdekleri içerir. Magnex spektrometresinin çözünürlüğü, düşük reaksiyon enerjilerinde deforme olmamış hedef çekirdekler için taban durumu (0^+) ile birinci uyarılmış seviye (2^+) ayrımı yapabilmek için yeterlidir. Ancak incelenen reaksiyonlar ^{110}Pd , ^{150}Nd ve ^{160}Gd gibi yüksek derecede deforme çekirdekler içerdiğinde, FPD’nin çözünürlüğü, enerji seviyelerini görmede yetersiz kalmaktadır. Bu gibi durumlarda, yakın enerji durumları arasındaki ayrımı sağlayan manyetik spektrometreye yardımcı bir gama dedektör dizisine ihtiyaç duyulmaktadır. DCE deneylerinde kullanılacak yüksek ışın şiddetleri nedeniyle hedef bölge gama ışınları, hızlı nötronlar, elektronlar, hafif ve ağır iyonlar olmak üzere çok güçlü radyasyon kaynağı haline gelmektedir. Meydana gelen düşük enerjili X ışınlarının yanı sıra yüklü parçacıklar hedefi saran katı malzeme tarafından emilebilmektedir. Dolayısıyla gama ışınlarının enerjilerine en duyarlı malzeme olan ve hızlı nötronlar için en dayanıklı dedektör malzemesi inorganik sintilatörler olmaktadır. Gama ışını enerjisine ve inorganik sintilatör malzemesine bağlı olarak %3-30 arasındaki tipik enerji çözünürlükleri, ^{160}Gd gibi güçlü bir şekilde deforme olmuş çekirdeklerin en taban seviyelerdeki gama geçişleri arasında ayırım yapmak için yeterlidir. Bununla birlikte yüksek fotopik verimi için yüksek atom numaralı malzemeler seçilmelidir.

NUMEN deneylerinde gerçekleşen gama ışını yayılımı GHz mertebesine ulaşmaktadır. Bununla beraber dedektörlerde sinyal oluşturabilecek nötron yayılımı da mümkündür. Nötron sinyallerinin dedektöre gelerek spektrumda yığılma oluşturma olasılığını azaltmak için dedektörlerin boyutlarının küçük tutulması planlanmaktadır. Deneyde asıl gözlenmesi planlanan DCE reaksiyonlarının da tesir kesitleri küçük olduğu için küçük boyutta yapılan gama dedektörlerinin sayısını artırmak gerekmektedir. Hedef odasının etrafı küçük boyutta gama dedektörleri ile sarılırsa bu durum DCE’lerin gözlenme olasılığını artıracaktır.

Deneyde siklotrondan çıkan her bir demetin hedefle çarpışmasından sonra gerçekleşecek nükleer reaksiyonlar düşünüldüğünde, beklenen yüksek ışık akısının önemli bir dezavantajı, oluşacak yüksek arka plan sayımı olacaktır. Ayrıca siklotrondan hızlandırılan iyon demetleri 20-50 ns aralığında çıkmaktadır. Bu durumda kullanılacak dedektörlerin

zaman çözünürlüğü her demet ile gerçekleşen reaksiyonları ayırt edebilmek için verilen bu sürelerden daha kısa olmalıdır. Bu zaman çözünürlüğüne ulaşmak için yine en iyi dedektör materyali inorganik sintilatörler görünmektedir.



Şekil 1.2. NUMEN deney sisteminin CAD planı (Cappuzzello vd. 2018)

Bu tez çalışması kapsamında yapılmış olan, seryum katkılanırılmış Lantanyum Bromür - $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ ($\rho = 5,1 \text{ g/cm}^3$, $Z_{\text{eff}} \approx 43$) kristalli inorganik sintilasyon dedektörü, yüksek enerji çözünürlüğü, etkinlik ve radyasyon toleransı, bunun yanında kısa zaman çözünürlüğü nedeniyle NUMEN düzeneğinin geliştirilmesi için önerilen en önemli dedektörlerden birisidir. Burada Z sembolü ile gösterilen etkin atom numarasının hesaplanması Denklem 1.3'te verilmiştir. $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ inorganik sintilasyon kristalli dedektör, Akdeniz Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarı'nda yapılarak nokta kaynaklar ve laboratuvarın elektronik malzemeleriyle test edilmiştir. Daha sonra INFN-LNS bünyesinde kullanılan deneysel ekipmanlar ile karakteristik özellikleri belirlenmiş, son olarak da NUMEN düzeneğine monte edilerek ağır iyon çarpışma deneylerindeki etkinliği gözlenmiştir.

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^L \frac{w_i}{A_i} Z_i^2}{\sum_{i=1}^L \frac{w_i}{A_i} Z_i} \quad (1.3)$$

$$w_i = \frac{N_i A_i}{M} \quad (1.4)$$

Denklem 1.3'te L değeri molekülde bulunan element sayısıdır ve bu değer LaBr_3 için 2'dir. w_i i. elementin ağırlık fonksiyonunu, A_i kütle numarası, Z_i ise atom numara-

sını göstermektedir. Molekül ağırlığı M olan bileşik için w_i ağırlık fonksiyonu Denklem 1.4'deki gibidir. Fonksiyondaki N_i , bileşikteki aynı türden atom sayısını göstermektedir.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde NUMEN deneyinin önemine ve $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ inorganik sintilasyon dedektörünü geliştirmeye, karakteristik özelliklerini belirlemeye yönelik literatürde yapılmış olan çalışmalara değinilmiştir. Sonraki bölümde inorganik sintilatörlerin özelliklerine yer verilmiş ve temel karakteristikleri belirlemeye yönelik kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Sonrasında, dedektörün yapımı ve ilk laboratuvar testlerine geçilmiştir. Elde edilen bulgular simülasyon verileri ile karşılaştırılmış, elde edilen bilgilerden yola çıkarak ağır iyon çarpışmalarındaki testler yapılarak sonuçların verimliliği ile sistemin daha da geliştirilebilmesi için atılabilecek adımlar tartışılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Elektron-pozitron çifti gibi, tüm temel parçacıklar, zıt yüklü bir anti-parçacığa sahiptir. Bir parçacığın karşıt parçacığı ile buluşması her ikisinin de yok olmasıyla sonuçlanır. Nötrinolar gibi Majorana fermiyonları adı verilen özel parçacıklar sınıfının, kendi antiparçacıklarıyla aynı olan parçacıklar olduğu tahmin edilmektedir (Majorana 1937). Majorana nötrinolarını tespit edebilmek için en hassas yöntem, nötrinosuz çift beta bozunması ($0\nu\beta\beta$) olarak bilinen nükleer süreçtir. Bu bozunmada çekirdek nötrino salmadan sadece iki elektron salarak başka bir çekirdeğe dönüşür. $0\nu\beta\beta$ 'nın yarı ömrü, nükleer matris elemanı (NME) ve nötrininonun kütlesi ile ilgilidir. Bu nedenle, $0\nu\beta\beta$ bozunmasının gözlemlenmesi, temel Majorana parçacıklarını keşfedecek, lepton sayısı ihlalini gösterecek ve en azından NME'lerin teorik belirsizliği dahilinde nötrino kütlesini ölçecektir (Vogel 2012).

$\beta\beta$ bozunumunun, nötrinoların doğası ve lepton sayısının korunması konusundaki öneminden dolayı, bu olayın gözlemine yönelik çalışmalar uzun yıllardan beri devam etmektedir. Çünkü eğer nötrino ve antinötrino aynı parçacık ise bu durum $0\nu\beta\beta$ bozunumunun gözlenmesine imkân sağlayabilecektir. $\beta\beta$ bozunumunun doğasını anlayabilmek için, bozunan çekirdeğin bozunma öncesi ve sonrası dalga fonksiyonları arasındaki geçişi tanımlayan NME'leri belirlemek gerekmektedir. Bu sayede bozunumun yarı ömrü ve nötrininonun efektif kütlesi belirlenebilecektir (Cappuzzello vd. 2018). Ancak doğrudan $\beta\beta$ bozunumlarının sahip olduğu yüksek yarı ömür, bu sürecin gözlenmesini oldukça zorlaştırmaktadır (Krane, 1987). Doğrudan $\beta\beta$ bozunumuna alternatif olarak araştırılan çift yük transfer deneyleri (DCE), bozunma öncesi ve bozunma sonrası çekirdek durumlarının benzerliğinden dolayı NME'yi belirleme konusunda daha uygulanabilir olmaktadır. Son yıllarda bu alanda birçok deney yapılmakla birlikte en önemlilerinden birisi de bu tez çalışması ile katkıda bulunulan, INFN-LNS'deki NUMEN gurubu tarafından yürütülen ağır iyon çarpışmalarında çift yük transfer reaksiyonlarının NME'lerinin belirlenmesine yönelik çalışmadır (Cappuzzello vd. 2018).

NUMEN, DCE reaksiyonlarının tesir kesitlerini ölçerek, $0\nu\beta\beta$ bozunumunun yaşam süresi ile ilişkili NME'lere erişmeyi öneren yenilikçi bir tekniktir. Proje, INFN-LNS'de gerçekleştirilen $^{40}\text{Ca}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{Ne})^{40}\text{Ar}$ DCE reaksiyonunun başarılı ilk sonuçların teşvik edici etkisiyle ortaya çıkmıştır (Cappuzzello vd. 2015). Deney verimini etkileyen önemli hususlar, gerekli yüksek çözünürlüklü ve düşük emisyonlu ağır iyon ışınlarının hızlandırılması için K800 Süperiletken Siklotron (CS) ve saçılan ürünlerin tespiti için MAGNEX manyetik spektrometresinin kullanılmasıdır. MAGNEX'te uygulanan parçacık tanımlama ve yüksek sıralı yörünge rekonstrüksiyonu için güçlü tekniklerin kullanılması, diğer reaksiyon kanallarından gelen geniş bir arka plan üzerinde çok düşük kesit ile karakterize edilen DCE geçişlerini ölçmek için gereken zorlu hassasiyete ve çözünürlüğe ulaşmaya izin vermektedir (Cappuzzello vd. 2018). INFN-LNS kurumu, bu araştırma

için, dünya çapında ideal bir kuruluştur. Bununla birlikte, incelenen tüm reaksiyonlarda, nötrino fiziğine sistematik olarak doğru veriler sağlamak için hızlandırıcı tarafından iletilen ışın akımı üzerindeki ana sınırlama ve MAGNEX düzlem alan dedektörü tarafından kabul edilen maksimum hassasiyet makul bir şekilde aşılmalıdır. Böyle çalışmalar eşliğine INFN-LNS tesisinde bulunan deney sistemlerinin geliştirilmesi NUMEN projesinin bir parçasıdır (Cappuzzello vd. 2018). NUMEN kapsamında $0\nu\beta\beta$ bozunumuna deneysel yaklaşım sağlayacak ilk çalışma Cappuzzello ve ark. tarafından (2015) yılında yapılmış, bu çalışmada $0\nu\beta\beta$ ile DCE arasındaki benzerliklere değinilmiştir. Ayrıca sonuç olarak farklı bombardıman enerjileri ve farklı çekirdeklerin denenmesi, çift nükleon transferi yanısıra gerçekleşen diğer süreçlerin de ölçümlerinin zorunluluğu vurgulanmıştır. Calabrese vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, DCE reaksiyonlarındaki parçacık tanımlama sınırlarını belirlemek için MAGNEX spektrometresinden kaynaklanan arka plan saçılmalarının tesit kesiti ölçümüne etkisi analiz edilmiştir. Burada elde edilen sonuçlar doğrultusunda beklenen arka plan ölçümü için prosedür çıkarılmıştır. Deneyde gerçekleşen bütün nükleer süreçleri tanımlamak sonuçların doğruluğunu önemli derecede etkilemektedir.

NUMEN projesinde incelenen mermi-hedef çarpışma reaksiyonları, DCE veya diğer nükleer reaksiyonlar aracılığıyla deforme olmuş ve deforme olmamış çekirdeklerin ürün olarak çıkmasına vesile olur. ^{110}Pd , ^{150}Nd ve ^{160}Gd gibi orta derecede ve kuvvetli şekilde deforme olmuş kütle bölgelerindeki ilgili çekirdekler için ve tüm yüksek gelen enerji durumlarında, düzlem alan dedektöründeki spektrumlar tek başına reaksiyon ürünlerinin durumları arasında çözümlenemez. Bu gibi durumlarda, hedef bölgeye yakın bir gama detektör dizisinin, yakın enerji durumları arasında gerekli ayrımı sağlamak için FPD'deki spektrometreye yardımcı bir cihaz olarak tasarlanması düşünülmüştür (Finocchiaro vd. 2020). Ayrıca yine aynı çalışmada ihtiyaç duyulan gama dedektör dizisinin sahip olması gereken özellikler; yüksek çözünürlük, yüksek radyasyona karşı dayanıklılık, hızlı cevap süresi belirlenmiş ve dedektörlerin sayısı belirtilerek, konumlandırılacağı geometri tasvir edilmiştir. Oliveira vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, 275 MeV'de hızlandırılan ^{18}O çekirdeklerinin ^{76}Se hedefine çarptırılması sonucu DCE reaksiyonları gerçekleştirilmiş, bu çalışmada hedef bölgeye yakın olarak yerleştirilen 21 adet NE-213 likit sintilatör ile gama ışınları ve nötron spektrumları ölçülmüştür. Sistemin GEANT4 simülasyonları yapılarak veriler karşılaştırıldığında sonuçlar %26'lık bir farkla elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen veriler, sistemin geliştirilmesi aşamasında faydalı olacak bilgiler sunmuştur.

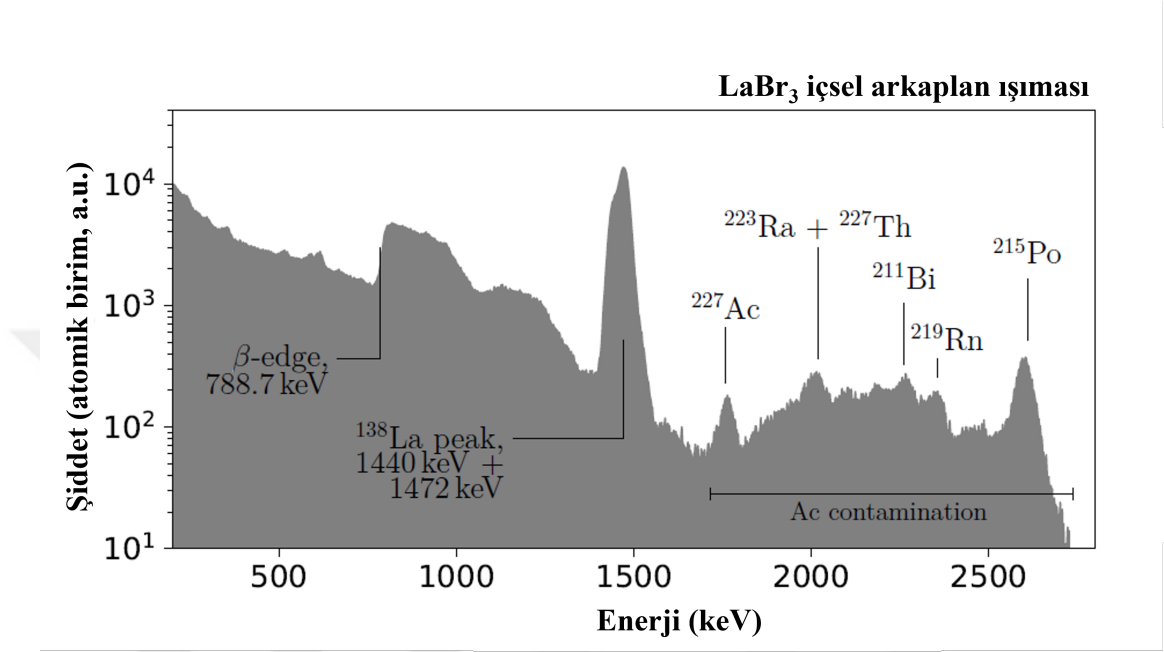
Finocchiaro vd. (2020) tarafından önerilen gama dedektör dizisine öncül olacak ağır iyon çarpışmalarındaki ilk etkinlik testleri, bu tez çalışması kapsamında yapılan $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü ile yürütülmüştür. $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü inorganik sintilasyon dedektörüdür ve bu dedektöre yönelik karakteristik belirleme ve geliştirme çalışmaları uzun yıllardan beri yapılmaktadır. Radyasyon tanımlama işleminde İnorganik sintilatörlerin önemi ve geliştirilmesine yönelik bilgilendirmeler Carel ve van Eijk (2001) tarafından yapılmış olup bu çalışmada ışık çıkışı, çözünürlük, hızlı cevap süresi gibi karakteristik değerlerde,

sintilatörün sahip olması gereken özellikler anlatılmıştır. Aynı yıl van Loef vd. (2001) Ce^{+3} aktivatörü ile katkılanmış $LaBr_3$ kristalinin incelemesini yapmış, bu çalışmada $LaBr_3:Ce$ sintilatörünü, $LaCl_3:Ce$ ve $NaI:Tl$ ile karşılaştırarak ışık çıkışı, enerji çözünürlüğü gibi önemli parametreler yönünden üstünlüğünü göstermişlerdir. Sonraki yıl, van Loef vd. (2002) "ideal sintilatör" arayışı çerçevesinde yaptıkları çalışmada yüksek yoğunlukta ve yüksek ışık çıkışına sahip oksit sintilatörlerden yüksek ışık çıkışı, mükemmel enerji çözünürlüğü ve kısa ölü zamana sahip halojenürlere geçiş sürecini anlatmışlardır. Yine aynı çalışmada $LaBr_3$ kristalinin saf hali ile farklı oranlarda Ce aktivatörü katkılanarak, aktivatör oranının ışık çıkışına olan etkileri araştırılmıştır. Çalışmada $LaBr_3$ üzerindeki Ce katkı oranları sırasıyla %0, %0.5, %4, ve %10 olarak belirlenmiş böylece 1 MeV'lik foton için elde edilen ışık çıkışları sırasıyla 17000, 61000, 48000, 45000 MeV/foton olarak bulunarak en ideal aktivatör oranı %0,5 olarak belirlenmiştir. Bessiere vd. (2005) yılında yaptıkları çalışmada sintilatör malzemesinin sahip olduğu band genişliğinin sintilasyon verimi üzerine çalışmış, dar band aralığında sintilasyon verimi artarken malzemenin sıcaklık bağımlılığını artırdığını göstermiştir. Moszynska vd. (2006) $LaBr_3:Ce$ kristalinin karakteristik özelliklerinin sıcaklığa göre değişimini incelemişler, yapılan çalışmada -30 ila 60 °C sıcaklıkları arasında ışık çıkışı çözünürlük değerlerinde değişiklik görülmezken enerji pikinin pozisyonunda gerçekleşen değişimi rapor etmişlerdir. $LaBr_3:Ce$ 'ün performans ölçümlerine yönelik bir diğer çalışma Chewpraditkul ve Moszynski (2011) tarafından yapılmıştır. Çalışmada seryum katkılı kristallerin gama ışını ölçümlerindeki verimliliği belirlenmiştir. Dedektör özelliklerini karşılaştırmak için belirlenen enerji 662 keV olup bu enerjideki en iyi çözünürlüğe ulaşan kristal %3,5 ile $LaBr_3:Ce$ olmuştur. $LaBr_3:Ce$ inorganik sintilasyon dedektörünün radyasyona karşı dayanıklılık testleri Normand vd. (2007) tarafından yapılmış, bu çalışmada yoğun olarak kullanılan bir başka inorganik sintilasyon dedektörü olan $NaI:Tl$ ile radyasyon direnci karşılaştırılmıştır. Çalışmada 3.4 kGy doz verilen $LaBr_3:Ce$ kristalinin rengi, ışık çıkışı ve çözünürlük faktörlerinde değişiklik gözlenmezken, $NaI:Tl$ 'nin, artan toplam doz ile, bütün özelliklerinde düşüş gözlenmiştir. Kumar vd. (2009), $LaBr_3:Ce$ dedektörü ile yaptıkları, sintilatör etkinlik belirleme çalışmalarında oluşturulan farklı geometrilerin, ışık toplama gücüne etkisi tartışmışlardır. Çalışmada dedektör kaynak arası mesafe azaltıldığında enerji spektrumdaki toplam piklerin (sum pik) sayısında artış gözlenmiştir. Daha sonra ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoaktif kaynakları kullanılarak dedektörün etkinlik hesabını yapmışlardır. Mutlak verim hesabı için kullandıkları eşitlik Denklem 2.1'de verilmiştir. Bu eşitlikte ϵ_{mutlak} mutlak verimi, N_{det} dedektör tarafından algılanan gama ışını sayısını, A kaynağın aktivitesini, t ölçüm süresini, p foton salınım olasılığını ve C_d ise ölü zamandan dolayı düzeltme faktörünü ifade etmektedir.

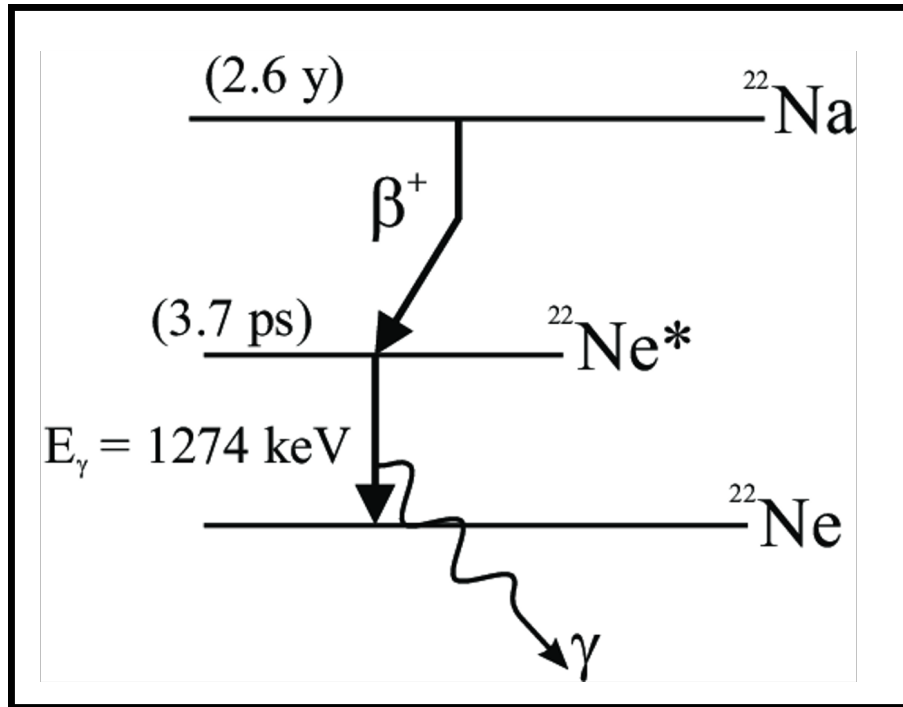
$$\epsilon_{mutlak} = \frac{N_{det}}{Atp} C_d \quad (2.1)$$

BiLanCe tarafından üretilen $LaBr_3:Ce$ kristalinin özellikleri $NaI:Tl$ ile karşılaştırıldığında, zaman çözünürlüğünün daha iyi olduğu, ışık çıkışının %60 oranda daha iyi olduğu, ^{60}Co ile alınmış enerji spektrumları üzerinden yapılan çözünürlük hesaplarında

%2,9'luk çözünürlükle NaI:Tl(%7)'dan daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (Gilmore 2008). Marcer vd. (2022) yaptıkları çalışmada LaBr₃'ün iç ışıması oluşturduğu arka plan etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada arka plan kaynağı gösterilen yayınımlardan özellikle ¹³⁸La'un 1470 keV bölgesindeki enerji piki bu çalışma kapsamında yapılan testlerde de görülmüştür (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. ¹³⁸La'nın içsel aktivitesi (Marcer vd. 2022)

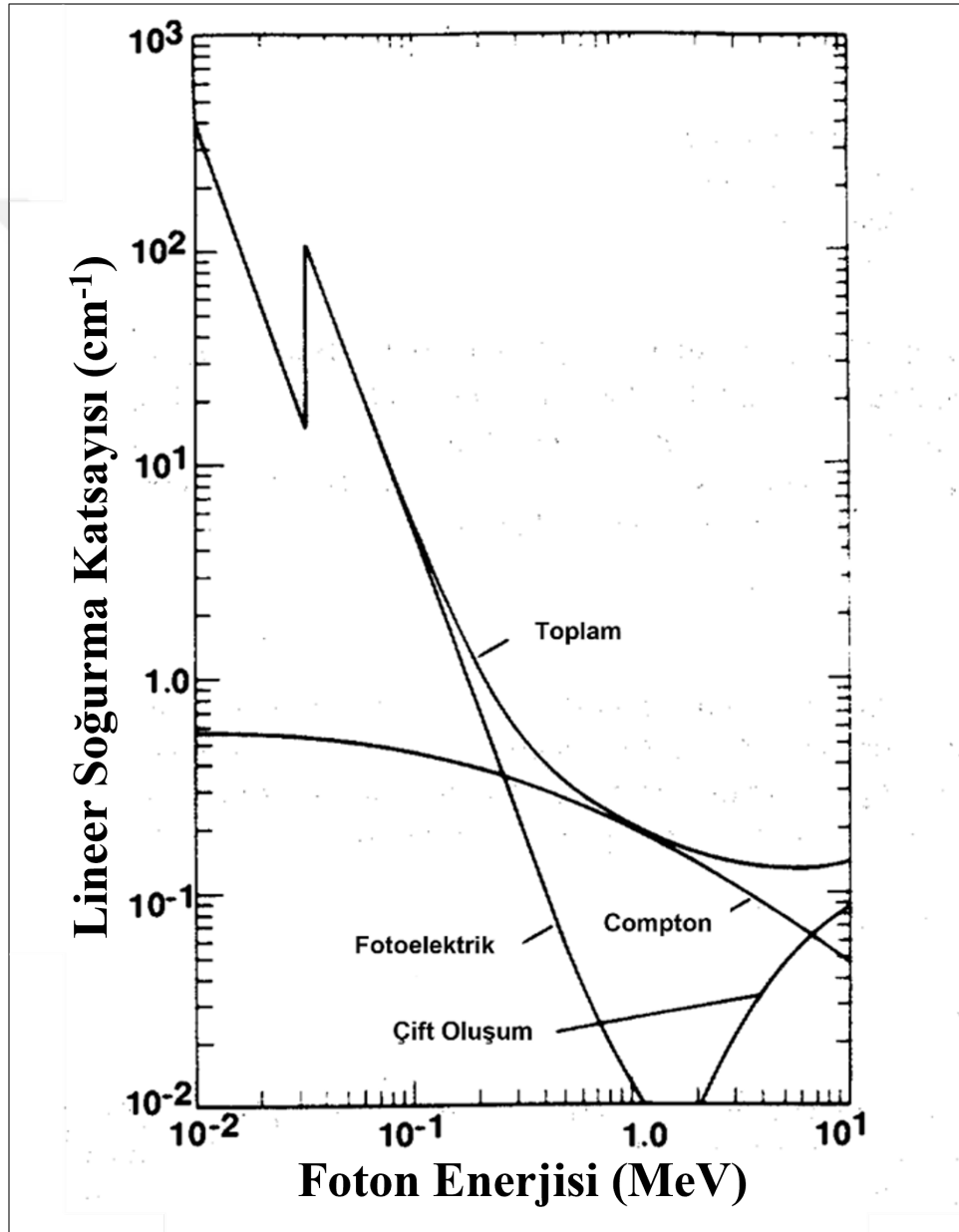


Şekil 2.2. ²²Na'nın bozunum şeması

NUMEN deney düzeneğinin geliştirilmesi için önemli adımlardan birisi olan hedef etrafına konuşlandırılacak gama dedektör dizisine öncü olacak $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ dedektörü, bu tez çalışması kapsamında yapılmıştır. $3.8\text{cm} \times 3.8\text{cm}$ boyutlu $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ kristaline sahip inorganik sintilasyon dedektörü, Akdeniz Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarında yapılarak temel karakteristiklerini belirlemek için ilk testler yine Nükleer Fizik Laboratuvarında bulunan nokta kaynaklar kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ dedektörü, INFN-LNS laboratuvarında, bozunum şeması Şekil 2.2’te verilen ^{22}Na nokta kaynağı kullanılmıştır. Kaynağın bozunma şeması dikkate alındığından bir pozitron salınımı ile ^{22}Ne ’nin uyarılmış seviyesine geçtiği görülmektedir. Salınan pozitron hızla kaybolurken 511 KeV’lik foton yayar ve uyarılmış olan ^{22}Ne taban duruma geçerken 1274 keV’lik foton yayar. Dolayısıyla beklenen enerji spektrumunda 511 ve 1274 keV’lik enerji pikleri bulunacaktır. $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ dedektörü farklı elektronik devrelerde çalıştırılmış, burada da gama ışını enerji ölçümleri yapılmıştır. Son olarak NUMEN projesi kapsamında önerilen gama dedektör dizisinin ön değerlendirilmesinin yapılabilmesini sağlayacak şekilde ağır iyon çarpışma deneylerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar NUMEN projesinin geliştirilmesi konusunda tartışılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışması kapsamında yapılan dedektör, $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalli inorganik sintilasyon dedektörü olduğu ve daha çok gama kalorimetresi olarak kullanılacağı için bu kısımda göz önünde bulundurulacak unsurlar, bir gama ışınının sintilasyon malzemesi ile etkileşimi esnasında gerçekleşen temel mekanizmalar olacaktır. Ayrıca çalışmada kullanılan dedektör materyalleri ve gama ışınının kristalle etkileşiminden anlamlı sinyallere dönüşüm süreçleri ve verilerin analiz yöntemleri anlatılacaktır.



Şekil 3.1. Gama ışınlarının enerjilerine göre madde ile etkileşimi (Nelson ve Reilly 1991)

3.1. Gama Işını Etkileşimleri

Gama ışınları yüksüz parçacıklar oldukları için Coulomb kuvvetinden etkilenmeden dedektör malzemesine girerler, burada enerjisinin tümünü veya bir kısmını elektrona aktarana kadar etkileşimde bulunurlar. Bu nedenle enerji kaybı, sintilasyon malzemesi içindeki atomların iyonlaşması ve uyarılması yoluyla olur. Radyasyon ölçümünde üç tip etkileşim önemli rol oynamaktadır. Bunlar fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumdur. Tüm bu süreçler, gama ışını enerjisinin elektron enerjisine kısmen veya tamamen aktarılmasına yol açar. Bu etkileşimler sonucunda gama ışını kaybolur veya önemli bir açıyla saçılmaya uğrar. Düşük enerjili gama ışınları (birkaç yüz keV'a kadar) için fotoelektrik soğurma baskındır, çift oluşumu süreçleri yüksek enerjili gama ışınları için baskınken (5-10 MeV'in üzerinde) Compton saçılması bu aralıkta en olası işlemdir. Etkileşim mekanizmalarının temelleri ve inorganik sintilatörlerin tepkisi üzerindeki etkileri bu bölümde tartışılmıştır.

3.1.1. Fotoelektrik Etki

Fotoelektrik soğurma işleminde, enerjisi $h\nu$ olan bir foton, fotonun tamamen kaybolduğu bir soğurucu atom ile etkileşime girer. Bunun yerine, atomun, E_b enerjisi ile bağlı kabuklarından birinden enerjik (E_e) bir fotoelektron fırlatılır. Etkileşim bir bütün olarak atomladır ve serbest elektronlarla gerçekleşemez. Momentumun korunumu, bu süreçte atomun geri tepmesini gerektirir, ancak geri tepme enerjisi çok küçüktür ve genellikle ihmal edilebilir. Yeterli enerjiye sahip gama ışınları için, fotoelektronun en olası kaynağı atomun en sıkı bağlı veya K kabuğudur. Fotoelektronun kazandığı enerji Denklem 3.1'de verilmiştir.

$$E_e = h\nu - E_b \quad (3.1)$$

Fotoelektron salınımının bir sonucu olarak elektron kabuğunda oluşan boşluk, elektron yeniden düzenlenmesi ile hızla doldurulur. Bu süreçte, bağlanma enerjisi ya karakteristik bir X-ışını ya da Auger elektronu şeklinde serbest bırakılır. Auger elektronları, düşük enerjilerinden dolayı son derece kısa menzile sahiptir (Broyles 1915). Karakteristik X-ışınları, soğurucu atomların daha az sıkı bağlı elektron kabukları ile fotoelektrik etkileşimler yoluyla yeniden soğurulmadan kaçması zaman zaman önemli olabilse de genel olarak tamamen soğurulurlar. Böylece, fotoelektrik absorpsiyonun etkisi, fotoelektronun orijinal bağlanma enerjisinin absorpsiyonuna karşılık gelen bir veya daha fazla düşük enerjili elektronla birlikte gama ışını enerjisinin çoğunu taşıyan bir fotoelektronun serbest kalmasıdır. Dedektörden hiçbir şey kaçmazsa, oluşan elektronların kinetik enerjilerinin toplamı gama ışını fotonun orijinal enerjisine eşit olmalıdır. Yani tek enerjili bir kaynaktan elde edilecek fotoelektronların kinetik enerjileri birbirine eşit olacaktır (Knoll 2010).

3.1.2. Compton Saçılması

Compton saçılması, bir fotonun serbest elektronla çarpışması ve saçılma açısına bağlı olarak ikisi arasındaki enerji bölüşümü ile bir geri tepme elektronu ve saçılan gama ışını fotonunun yaratılmasıdır. Saçılma açısına bağlı olarak saçılan foton için enerji ifadesi Denklem 3.2'deki gibidir.

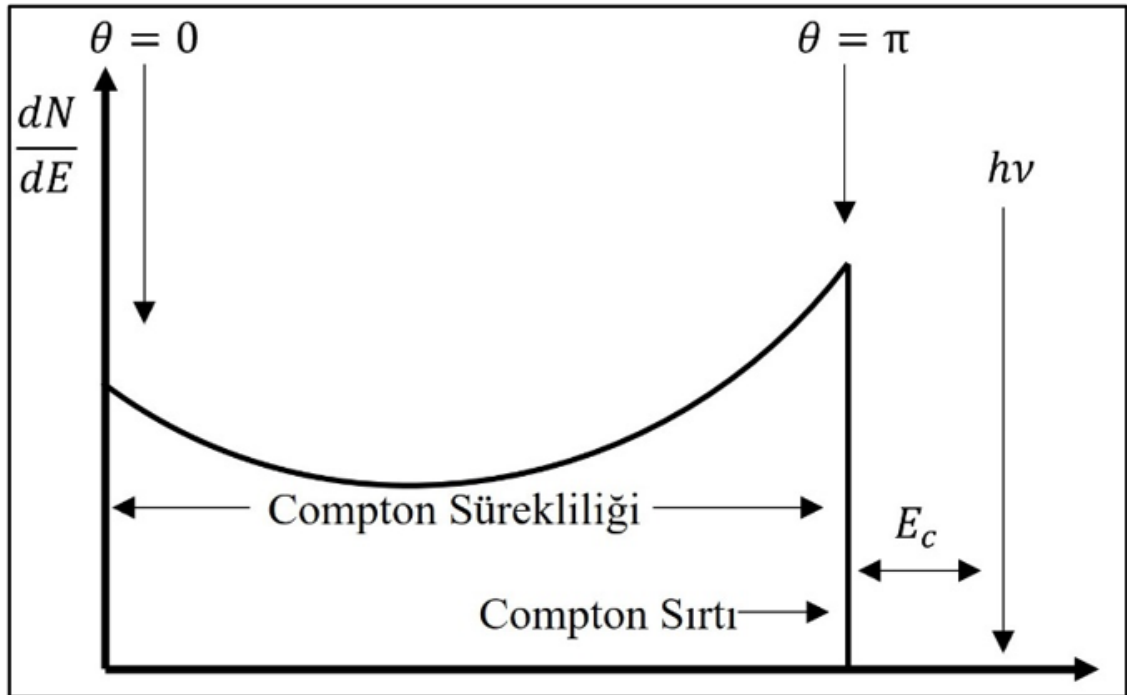
$$h\nu' = h\nu \frac{h\nu}{1 + (\frac{h\nu}{m_0c^2})(1 - \cos \theta)} \quad (3.2)$$

Burada m_0c^2 durgun kütle enerjisi olup değeri 0.511 MeV'dir. Geri tepme elektronu için enerji ifadesi ise Denklem 3.3'te verilmiştir.

$$E_{e^-} = h\nu - h\nu' = h\nu \left(\frac{(\frac{h\nu}{m_0c^2})(1 - \cos \theta)}{1 + (\frac{h\nu}{m_0c^2})(1 - \cos \theta)} \right) \quad (3.3)$$

Denklem 3.2 ve Denklem 3.3'te verilen eşitliklere bakarak iki sınır durumundan bahsedilebilir. Bu sınırlar:

1. $\theta \approx 0$ olduğu durumda gelen gama ışını enerjisi saçılan gama ışını enerjisine çok yakın ($h\nu \approx h\nu'$) olacağı için elektrona aktarılan kinetik enerji çok düşük ($E_e \approx 0$) olacaktır.
2. $\theta \approx \pi$ olduğu durumda gelen gama, geldiği yöne çok yakın açılarda saçılmaya uğrayacak böylece elektrona maksimum enerji aktarımı gerçekleşecektir.



Şekil 3.2. $h\nu$ enerjili gama ışınlarının oluşturacağı enerji spektrumu

Normal koşullarda, dedektörde tüm açılarda saçılma oluşacaktır. Bu nedenle, sıfır dereceden denklem ile tahmin edilen maksimuma kadar değişen bir enerji sürekliliği elektrona aktarılabilir. Herhangi bir belirli gama ışını enerjisi için, elektron enerji dağılımı Şekil 3.2’te gösterildiği gibidir. Burada gama ışını enerjisi ile Compton sırtı arasında kalan E_c Denklem 3.4 ile ifade edilir.

$$E_c = h\nu - E_{e^-}|_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + \frac{2h\nu}{m_0c^2}} \quad (3.4)$$

Bu denklemde $h\nu \gg m_0c^2$ olduğunda Denklem 3.5 hesaplanır.

$$E_c \cong \frac{m_0c^2}{2} (= 0.256 \text{ MeV}) \quad (3.5)$$

Compton saçılımı başlangıçta serbest veya bağlanmamış elektronları içerdiği varsayımına dayanmaktadır. Gerçek dedektör malzemelerinde, saçılma işleminden önce elektronun bağlanma enerjisi, Compton sürekliliğinin şekli üzerinde ölçülebilir bir etkiye sahip olabilir. Bu etkiler, özellikle düşük gelen gama ışını enerjisi için fark edilir olacaktır. Süreklilikteki yükselişin üst ucuna yakın bir yerde yuvarlanmasını ve Compton kenarının ani düşüşüne sonlu bir eğimin eklenmesini içerirler. Bu etkiler genellikle dedektörün sonlu enerji çözünürlüğü nedeniyle görünmez ancak yüksek doğal çözünürlüğe sahip dedektörlerin spektrumlarında belirgin olabilir. Yörünge elektronlarının sonlu momentumu, aynı zamanda, tek bir enerjinin aksine, monoenerjetik bir kaynaktan sabit bir açıyla saçılan gama ışını fotonlarının enerjilerinde dar bir dağılıma ("Doppler yayılımı") sahip olmasına neden olur (Knoll 2010).

3.1.3. Çift Oluşumu

Üçüncü önemli gama ışını etkileşimi çift oluşumdur. İşlem, soğurucu malzemenin çekirdeğindeki protonların yakınındaki yoğun elektrik alanında meydana gelir ve gelen gama ışını fotonun tamamen kaybolma noktasında bir elektron-pozitron çiftinin yaratılmasına tekabül eder. Elektron-pozitron çiftini oluşturmak için $2m_0c^2$ ’lik bir enerji gerektiğinden, süreci enerjik olarak mümkün kılmak için minimum 1,02 MeV’lik bir gama ışını enerjisi gereklidir. Gelen gama ışını enerjisi bu değeri aşarsa, fazla enerji elektron-pozitron çifti tarafından paylaşılan kinetik enerji şeklinde görünür. Bu nedenle süreç, gelen gama ışını fotonun elektron ve pozitron kinetik enerjilerine dönüştürülmesinden oluşur (Denklem 3.6).

$$E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 2m_0c^2 \quad (3.6)$$

Çift oluşumda hem elektron hem de pozitron, tüm kinetik enerjilerini soğurucu ortama kaybetmeden önce en fazla birkaç milimetre yol alır. Gelen gama ışını tarafından yaratılan toplam (elektron + pozitron) yüklü parçacık kinetik enerjisinin bir grafiği yine basit bir delta fonksiyonudur, ancak enerji, gama ışını enerjisinin $2m_0c^2$ altında yer

almaktadır. Dedektör içinde bir çift oluşum etkileşimi meydana geldiğinde bu miktarda enerji biriktirilecektir. Bu enerji, gerçek gama ışını enerji spektrumundaki 0.511 MeV'lik iki fotonun çift kaçış piki konumuna karşılık gelir.

Nükleer fizikte bu üç temel etkileşimden faydalanarak gama ışını spektrumlarının analizleri yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılacak dedektör yukarıda anlatılan etkileşimleri tespit etmede kullanılacak inorganik sintilasyon dedektörü olduğu için. Bir sonraki bölümde inorganik sintilasyon dedektörlerinin gama ışını ile etkileşim süreçleri ve anlamlı sinyallere dönüştürülen gama ışını yayınımalarının analiz basamakları olacaktır (Knoll 2010).

3.2. Sintilasyon Dedektörleri

1950'lerin başlarında talyumla aktive olan sodyum iyodür sintilasyon dedektörlerinin yaygın olarak bulunması, gama ışınlarının spektroskopisinin ilk kez küçük, taşınabilir aletlerle gerçekleştirilmesine izin verdi. Bu gelişme ile, gama ışınlarının tespiti için yüksek bir verimlilik sağlayabilecek ve aynı zamanda, çok enerjili gama ışını kaynaklarının katkılarını ayırmada faydalı olmak için yeterince iyi enerji çözünürlüğü sağlayabilecek pratik bir dedektör mevcuttu. Sintilatörlerin kullanıldığı gama ışını spektroskopisi, o zamandan beri etkileyici bir dizi teknik alandaki uygulamalarla olgun bir bilim haline geldi.

Sintilasyon işlemi iyonlaştırıcı radyasyon türünün belirlemesi için kullanılan en eski yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde yüksek enerjili radyasyon sıvı, katı veya gaz materyalle etkileşerek daha küçük enerjilerde fotonlar yayar. Sintilatörün sahip olması gereken önemli özelliklerinden birisi yüksek ışık çıkışına sahip olması olsa da üretilen fotonların analiz edilebilmesi için çoğaltılması gereklidir. Öyle ki sintilatörden çıkan fotonlar bir fotoçoğaltıcı içine yönlendirilerek yaklaşık 10^6 kat güçlendirilip analize hazır hale getirilmektedir. Bilgisayarlarda işlenen veriler vasıtasıyla sintilatör ile etkileşime giren radyasyonun istenilen özellikleri belirlenebilir. İdeal bir sintilatörün sahip olması gereken özellikler aşağıda listelenmiştir (Knoll 2010).

- Etkinliğinin yüksek olması, yani gelen yüksek enerjili radyasyonu yüksek oranda, düşük enerji seviyesine indirgemesi.
- Lineer olmalıdır. Işık verimi, mümkün olduğunca geniş bir aralıkta depolanan enerji ile orantılı olmalıdır.
- Sintilatör, yüksek enerjili foton ile etkileşimi sonrası yaydığı düşük enerjili fotonlara karşı geçirgen olmalıdır.
- Hızlı sinyaller üretebilmesi için kısa ölü zamana sahip olması gerekmektedir.
- Sintilatör olarak kullanılacak malzeme, yeterli büyüklüklerde üretilebilir ve iyi bir optik kaliteye sahip olmalıdır.

- Sintilasyon ışınlarının fotoçoğaltıcı tüpe kolay geçiş yapabilmeleri için, malzemenin kırılma indisi camın kırılma indisine yakın olmalıdır.

Pratikte, aynı anda bütün bu özelliklere sahip materyalleri bulmak zordur. İnorganik hammaddeli sintilatörler, yavaş cevap hızına sahip olmalarına rağmen, lineer özellik göstererek en iyi ışık çıkışına sahip sintilatörler olmuştur. Önemli inorganik sintilatörlerden birisi olan sodyum iyodür (NaI:Tl), sayılan özelliklerin büyük bir kısmını sağladığı için birçok çalışmada etkin olarak kullanılırken son yıllarda çözünürlük, ışık çıkışı ve dayanıklılık gibi malzeme karakteristikleri göz önünde bulundurularak Lantanyum bromür ($\text{LaBr}_3\text{:Ce}$) kullanılmaya başlanmıştır (van Eijk 2001; Normand 2007). Organik sintilatörler ise buna zıt olarak hızlı cevap süresine sahiptir ancak onlarda da ışık verimi oldukça düşük olmaktadır. Bir sintilatör seçerken dikkat edilmesi gereken husus, yapılması planlanan deneyin içeriğidir. Örneğin gama ışını spektroskopisi için yüksek Z değerine sahip, yüksek yoğunluklu inorganik sintilatörler kullanılırken, beta ölçümü için organik sintilatörler tercih edilmelidir (Knoll 2010).

3.2.1. İnorganik Sintilatörler

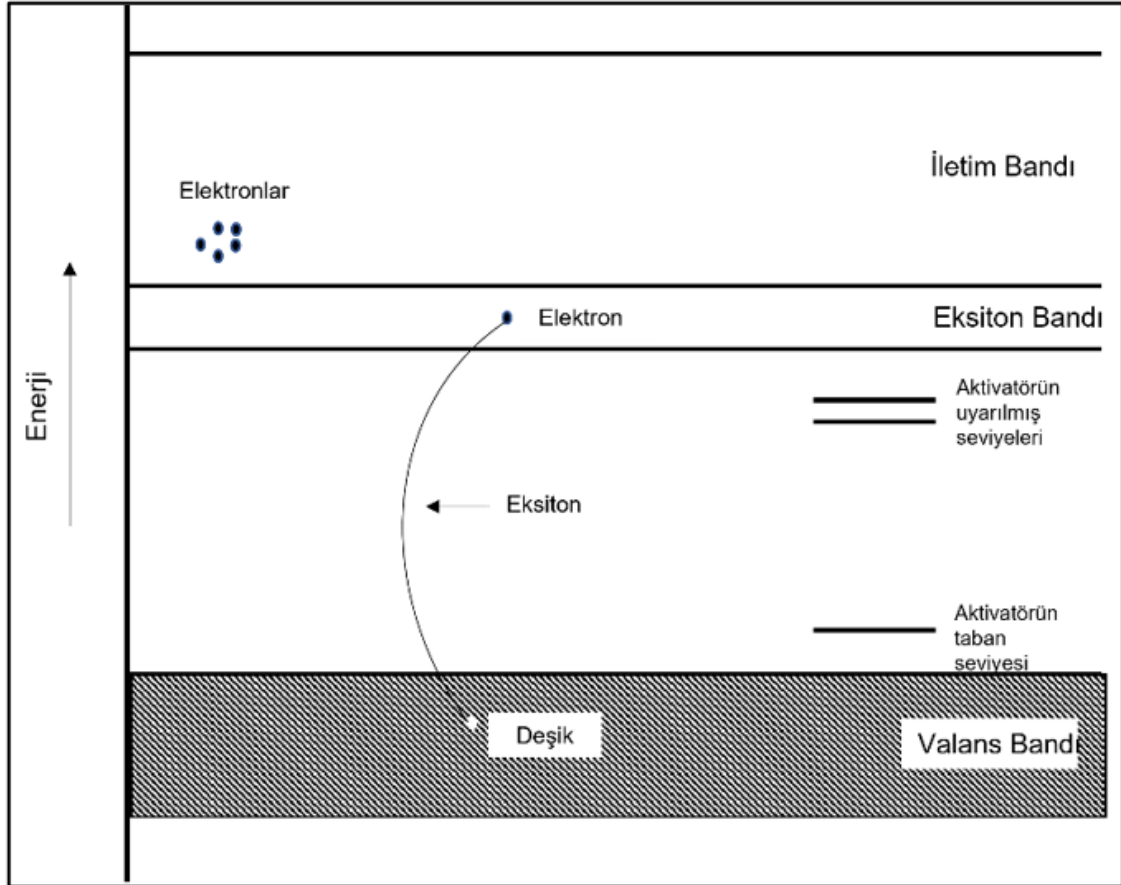
İnorganik sintilatörler, genel olarak bir miktar safsızlık içeren alkali metal kristalleridir. Örneğin; $\text{LaBr}_3\text{(Ce)}$, NaI(Tl) , CsI(Tl) , $\text{CaF}_2\text{(Eu)}$ gibi. Burada parantez içinde gösterilen elementler kristaldeki safsızlık olarak nitelendirilir. Kristal içinde safsızlık oranı oldukça düşük olmakla birlikte bu oran doğrudan malzemenin sintilasyon özelliğini etkilemektedir (Tsoulfanidis 1995).

İnorganik sintilatörlerin lüminesansı, bir kristalin izin verilen ve yasaklanan enerji bantları açısından anlaşılabilir. Kristalin taban durumunda valans bandı tamamen doluyken iletim bandı boştur. Gelen radyasyon valans bandındaki bir elektrona çarptığında elektron iletim bandına geçerken yerinde hareket edebilen bir boşluk bırakır. Bazen de elektrona verilen enerji onu iletim bandına çıkarmak için yeterli olmaz. Bu durumda oluşan elektron, valans bandında bıraktığı deşığe elektostatik olarak bağlı kalır. Bu şekilde oluşan elektron-boşluk çiftine eksiton denir (Şekil 3.3).

Enerji durumları açısından, eksiton, elektronun valans değerinden daha yüksek, ancak iletim bandından daha düşük bir duruma yükselmesine karşılık gelir. Sonuç olarak, eksiton durumları, üst seviye iletim bandının alt seviyesi ile çakışan ince bir bant oluşturur. Eksiton bandının genişliği 1 eV mertebesinde iken değerlik ve iletim bantları arasındaki boşluk 8 eV mertebesinde (Tsoulfanidis 1995).

Eksiton bandına ek olarak, kristal kusurları veya safsızlıklar nedeniyle değerlik ve iletim bantları arasında enerji durumları oluşturulabilir. Burada önemli olan safsızlıkların getirdiği enerji seviyeleridir. Aktivatör (safsızlık) atom, temel durumda veya uyarılmış durumlarından birinde bulunabilir. Uyarılmış bir duruma yükselme, bir foton absorpsiyono-

nunun veya bir eksitonun yakalanmasının veya bir elektron ve bir deliğin art arda yakalanmasının sonucu olabilir. Safsızlık atomunun uyarılmış halden temel duruma geçişi, eğer izin verilirse, 10^{-8} s mertebesinde bir foton emisyonu ile sonuçlanır. Bu fotonun elektromanyetik spektrumun görünür kısmında bir dalga boyu varsa, bir sintilasyona katkıda bulunur.



Şekil 3.3. Kristalin izinli ve yasaklı enerji bantları

Bir sintilatör tarafından yayılan ışık, esas olarak kristalin değil, aktivatör atomlarının geçişlerinin sonucudur. Kristal üzerine gelen enerji sonrası aktivatörler tarafından üretilen lüminesans durumu, enerjinin konak kristalden safsızlığa aktarıldığı anlamına gelir. Bir sintilatör için yüksek ışık çıkışı ve yayılan ışığın dalga boyu, aranan en önemli özelliklerinden ikisidir. Işık çıkışı, fotoçoğaltıcı tüpün girişinde katotta üretilen fotoelektronların sayısını etkiler, bu da sayma sisteminin çıkışında üretilen pik yüksekliğini etkiler. Sintilatörü uygun kuantum etkinliğine sahip fotoçoğaltıcı tüp ile eşleştirmek için buradan çıkan fotonların dalga boyu hakkında bilgi gereklidir. Bir diğer önemli faktör sıcaklıktır. Sintilatörlerin ışık çıkışları ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir.

Fotonlar, uyarılmış durumların bozunmasının bir sonucu olarak yayıldığından, emisyonlarının zamanı, ilgili farklı durumların bozunma sabitlerine bağlıdır. Bu bozunma

eşitliği ise Denklem 3.7’de verilmiştir.

$$N(t) = N_0 e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} \quad (3.7)$$

Burada $N(t)$, t zamanda yayınlanan foton sayısını verirken, T bozunma süresini gösterir. Uyarılmış durumların çoğu aynı T ömrüne sahiptirler. Bununla birlikte, daha uzun ömürleri olan bazı durumlar, sonradan ışıma olarak bilinen sintilatörün bozunmasında yavaş bir bileşene katkıda bulunur. Tüm inorganik sintilatörlerde bir dereceye kadar mevcuttur ve fototüpün bütünleşmiş çıkışının kullanıldığı bazı ölçümlerde önemli olabilir.

Sintilatör kullanan bir sayma sisteminde, kristal tarafından üretilen ışık, bir fotoçoğaltıcı tüp tarafından yükseltilir ve Denklem 3.7’de verilen üstel davranışa sahip bir elektrik akımına dönüştürülür. Bu akım, bir RC devresiyle beslenir ve bir voltaj darbesi üretilir (Denklem 3.8).

$$V(t) = V_{\infty} \left(e^{-\left(\frac{t}{RC}\right)} - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} \right) \quad (3.8)$$

Bu denklemde (Denklem 3.8), $t \ll RC$ olarak düşünülürse eşitlik Denklem 3.9 haline gelir.

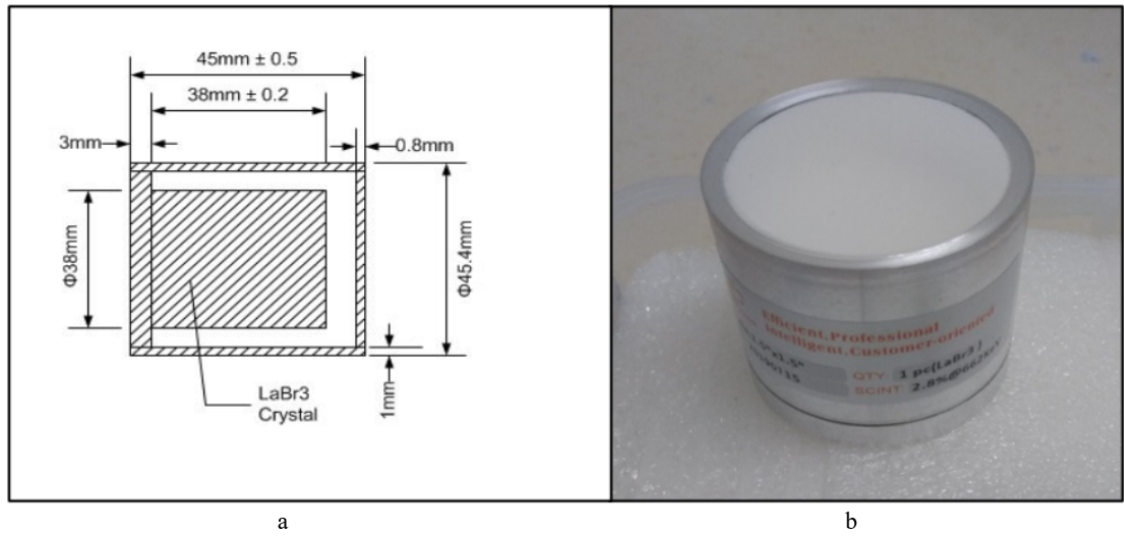
$$V(t) = V_{\infty} (1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)}) \quad (3.9)$$

Denklem 3.9’da pikin değerinin doğrudan T ’ye bağlı olduğu görülmektedir. Bu bağlılık özellikle zaman çözünürlüğü ölçümlerinde çok büyük öneme sahiptir.

Bir sintilatör ile gelen parçacığın enerjisini ölçmek için, puls ile sintilatörde depolanan enerji arasındaki ilişki bilinmelidir. Puls, fotoçoğaltıcının çıktısı ile orantılı olduğundan, çıktı da sintilatör tarafından üretilen ışıkla orantılı olduğundan, gelen radyasyonun türü ve enerjisinin bir fonksiyonu olarak sintilatörün ışık dönüştürme verimliliğini bilmek gerekir (Tsoufanidis 1995).

LNS’de bulunan MAGNEX spektrometresinin geliştirilmesine yönelik tasarlanan dedektör malzemesi seçilirken en önemli gereklilikler, dedektörün boyutunun küçük olması, taşınabilir olması ve soğutma sorununun olmaması olarak belirlendi. Bu özellikleri taşıyan inorganik sintilasyon dedektörleri için Bölüm 2’de özetlenen çalışmalar doğrultusunda $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristali kullanılarak yapılacak sintilasyon dedektörünün mevcut deney sistemini geliştirmek için en doğru dedektör olduğu düşünülmüştür. Dedektör ile istenilen verim ve çözünürlük değerlerine ulaşabilmek için $3,81 \times 3,81 \text{ cm}$ boyutlarında tercih edilen $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ inorganik sintilasyon kristali, uygun malzeme olarak belirlendi ve son bölümde anlatılacağı gibi dedektör yapılarak temel karakteristikleri belirlenerek ve başlıca ağır iyon çarpışma testlerindeki etkinliği gözlenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan dedektörde kullanılan $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristali %5 oranda Seryum(Ce) katkılanmış olup 3,81 çap ve 3,81 cm yüksekliğe sahip silindir şeklindedir. Kristalin sintilasyon fotonlarının maksimum olduğu dalga boyu 380 nm'dir. Dorenbos vd. 2006 yılında yapılan bir çalışmada $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristali için valans ile iletim bandı arası mesafe 5.2 eV verilmiştir. Chenliang Li vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada ise $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalinde 1 elektron-boşluk çifti oluşturmak için rapor edilen enerji 3,75 eV'dir. Kristalin nem duyarlılığı nedeniyle 1 mm kalınlıkta alüminyum kaplama içerisinde muhafaza edilirken sintilasyon ışınlarının çıkabilmesi için kristalin ön kısmında quartz pencere bulunmaktadır. Şekil 3.4 dedektör yapımında kullanılan $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalinin planı ve orijinal görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.4. a) $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalinin CAD planı; b) $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristali

Dedektör montajında quartz pencere fotoçoğaltıcı tüpe temas halinde olmalı ve kristal malzemesi içinde oluşan sintilasyon fotonları minimum kayıpla fotoçoğaltıcı tüpe iletilmelidir. $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ yeni tipte bir sintilasyon dedektörüdür. Bu tip bir dedektör enerji çözünürlüğü ve yüksek verimi sayesinde diğer dedektörlerle karşılaştırıldığında daha kaliteli veri sağlamaktadır. Bu sebeple hem zamansal hemde uzaysal olarak kullanım alanları vardır. Kullanım alanlarına ile örnek olarak Nükleer Rezonan Floresans (NRF) çalışmaları gelir. Bu çalışmalarda $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ nükleer yapıyı araştırmak için kullanılmaktadır (Kneissl, 1996). Bu dedektör aynı zamanda hızlı gama ışını nötron aktivasyon analizlerinde (PGNAA) kullanılır. PGNAA'da $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kullanımıyla örnekler içerisindeki izotopların oranları belirlenir (Duffey ve El-Kady 1970). Ayrıca $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü son yıllarda nötron tanımlama çalışmalarında kullanılmıştır (Oberstedt 2013, Ebran vd. 2014). $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü medikal görüntülemelerde TOF (uçuş süresi) ve PET (pozitron salınım tomografisi) sistemleri gibi tümör ve diğer medikal analizler de kullanılmaktadır (Kuhn vd. 2006, Schaart vd. 2010)

3.3. Sintilatörlerin Özellikleri

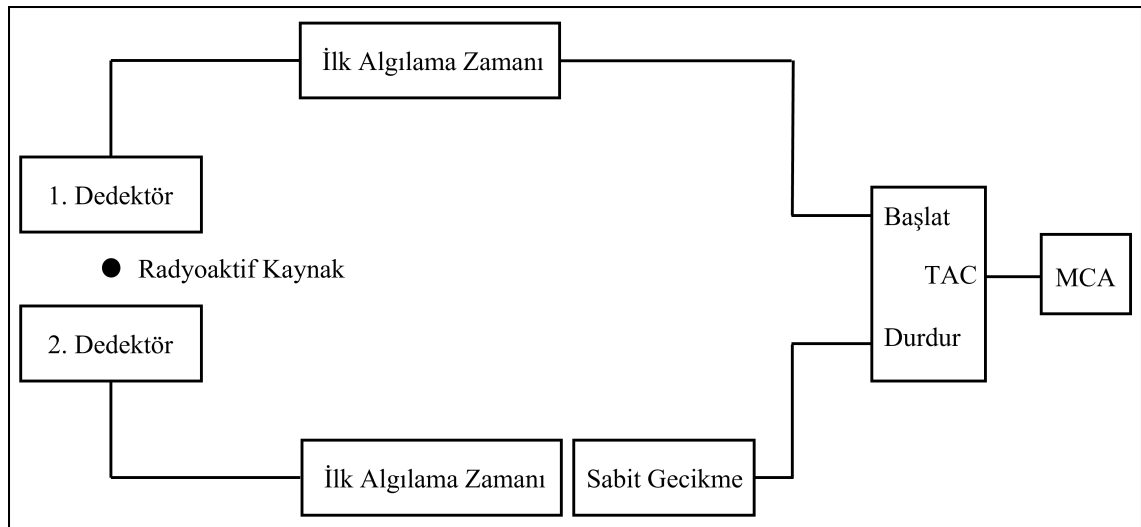
3.3.1. Sintilasyon Dedektörleri İçin Ölü Zaman (Dead Time)

Ölü zaman, dedektöre gelen her bir parçacık enerjisinin sintilatörle etkileştiği süreçten anlamlı bir sinyal oluşturmaya kadar geçen minimum süredir. Bir sintilasyon sayacı için bu süre, aşağıda verilen üç zaman aralığının toplamına eşittir.

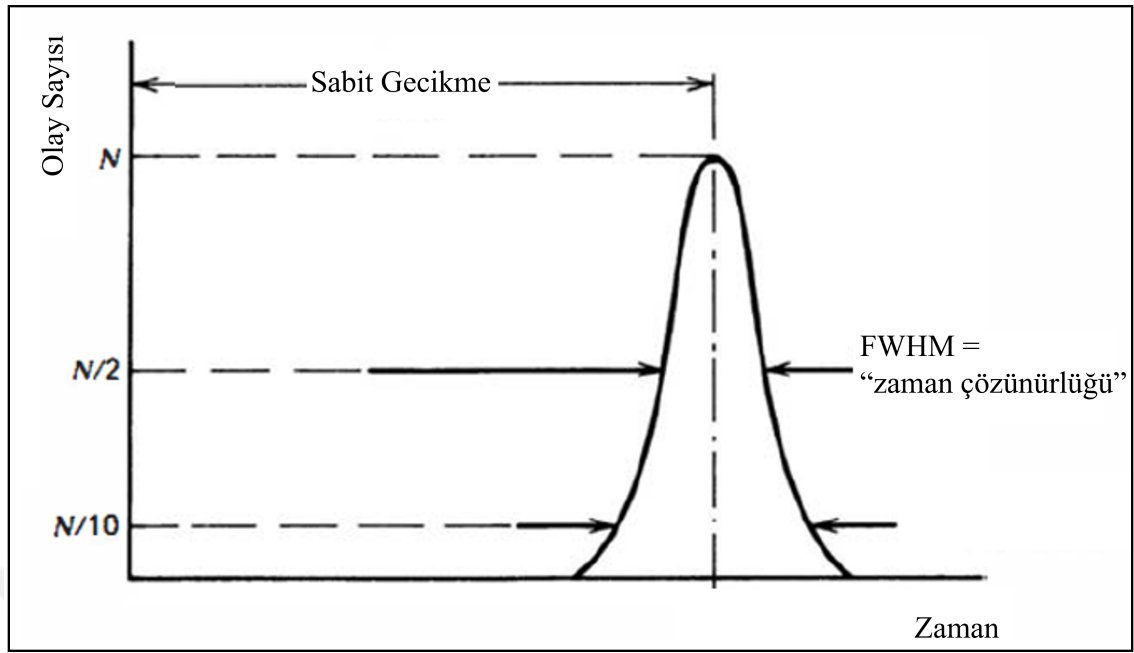
1. Sintilasyonu üretmek için geçen süre, sintilatörün zaman çözünürlüğü.
2. Fototüpте электрон çoğalması için geçen süre.
3. Sinyali yükseltmek ve bir ölçekleyici tarafından kaydetmek için geçen süre.

Yukarıdaki basamakları dikkate alırsak, sintilasyon dedektörlerini kullanırken verimli ve hızlı sonuçlar elde edebilmek için sintilasyon malzemesi seçerken cevap süresinin hızlı olması, fotoçoğaltıcı tüpün sintilatöre uygun verimde çalışması ve elektronik sistemin de örnekleme oranının dedektörün ışık çıkışına uygun olduğuna dikkat edilmelidir.

Zaman çözünürlüğü belirleme çalışmalarında genel olarak kullanılan plan Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Şekilde gösterilen 1. ve 2. dedektörler aynı türden olup kaynaktan aldıkları sinyalleri çok kanallı analizöre (MCA) gönderirken, 2 nolu dedektörden sonra devreye sinyal geciktirici eleman konulmuştur. Devrede 1 nolu dedektörden gelen sinyal ile aktif hale geçen zaman-genlik dönüştürücüyü (TAC) 2 nolu dedektörden gelen sinyal durdurmaktadır. Dönüştürücünün aktif kaldığı süre iki dedektörden gelen sinyaller arasındaki gecikmeyi vermektedir. Eğer farklı türden iki dedektör sistemi kullanılırsa, dedektörlerin sinyal iletme hızları farklı olacak böylece sinyaller arasında Şekil 3.6'da gösterilen ΔT gibi bir zaman farkı oluşacaktır. Elde edilecek zaman farklarının olay sayısına göre grafiği dedektörün zaman çözünürlüğü hakkında bilgi verecektir. Sonuç olarak elde edilecek zaman spektrumu (Şekil 3.6) üzerinden zaman çözünürlüğü hesabı yapılabilecektir (Knoll 2010).



Şekil 3.5. Zaman çözünürlüğü hesabı için kullanılan plan



Şekil 3.6. Zaman farkı spektrumu (Knoll'un (2010) "Radiation Detection and Measurement" kitabından alınarak uyarlanmıştır)

3.3.2. Enerji Çözünürlüğü

Enerji ölçümleri için kullanılan bir dedektör sisteminin performansının kalitesi, monoenerjetik kaynaktan elde edilen darbe-yükseklik dağılımının genişliği ile karakterize edilir. Her parçacığın dedektörde tam olarak aynı enerjiyi aktardığı durumda bile, darbe-yükseklik dağılımı tek bir çizgi olmayacak, bunun yerine aşağıda sıralanan nedenlerden dolayı belirli bir sonlu genişliğe sahip olacaktır.

- Dedektörde üretilen yük taşıyıcılarının sayısındaki istatistiksel dalgalanmalar,
- Dedektörün kendisinde, ön yükselticide ve yükselticide elektronik gürültü,
- Dedektörde üretilen yükün eksik toplanması.

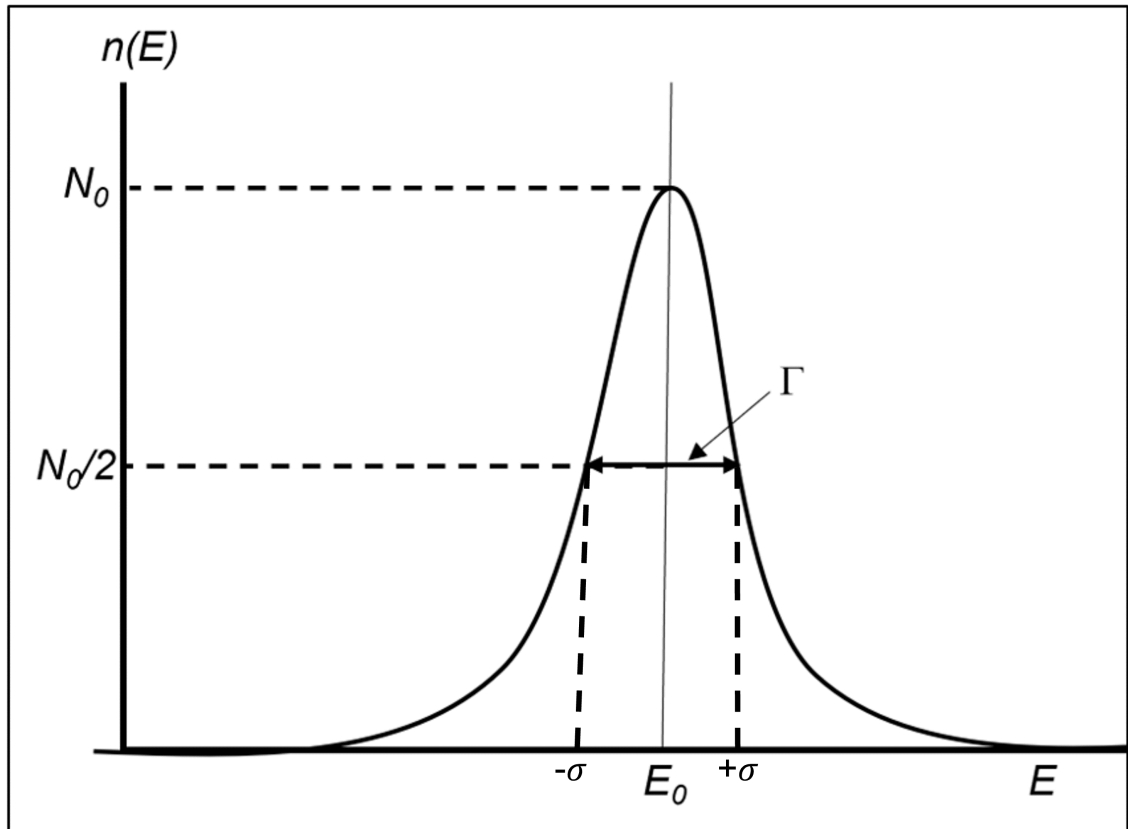
Şekil 3.7'deki eğrinin maksimumunun yarısı değerinde ölçülen genişlik, Γ ile veya yarı maksimumda tam genişlikle (FWHM) gösterilir. Dedektörlerin enerji çözünürlükleri FWHM cinsinden ifade edilir. Yani birbirine yakın enerji değerlerindeki çizgi pulslarını ayırt edebilmek için, dedektöre gelen sinyaller yeterince küçük FWHM'lere sahip çizgilere dönüştürülmelidir. Çözünürlük değeri genel olarak $FWHM(\Gamma)$ cinsinden ya da $R(E_0)$ oranı cinsinden verilir (Denklem 3.10). Buradaki $R(E_0)$ değeri, E_0 çizgisi üzerinden ölçülen çözünürlük değerini ifade etmektedir.

$$R(E_0) = \frac{\Gamma}{E_0} = \frac{FWHM}{E_0} = \frac{2,35\sigma}{E_0} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10'deki enerji dağılımı, Gauss dağılımı şeklinde düşünülürse, bir Gauss dağılımdaki yarı derinlik Denklem 3.11'teki gibi hesaplanabilir.

$$f(E) = Ae^{-(E-\bar{E})^2/2\sigma^2} \quad (3.11)$$

Gauss dağılımı üzerinde yarı derinlikteki genişliği hesaplamak için eşitlikte $f(E)$ için $A/2$ değeri verilirse $A/2 = Ae^{-\Delta E^2/2\sigma^2}$, $\ln 1 - \ln 2 = -\frac{\Delta E^2}{2\sigma^2}$ eşitlikleri elde edilir. Buradan da $\Delta E = \pm\sigma\sqrt{2\ln 2}$ çıkar. Hesaplanan ΔE değeri çizginin FWHM'sini belirtmektedir. Elde edilen değer Gauss merkezinden her iki tarafa olan uzaklıkları ifade ettiği için sonuç olarak FWHM değeri $\Delta E = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} \cong 2,35\sigma$ olarak bulunur. Gauss eşitliği içindeki σ değeri, dağılımın standart sapmasını ifade etmektedir. Eğer enerji spektrumunda görülen piklere Gaussian fit edilirse doğrudan sigma değeri belirlenecektir. Böylece çözünürlük hesabı yapılabilecektir.



Şekil 3.7. Çözünürlük hesabı yapılırken kullanılan çizgi parametreleri

3.3.3. Verim Hesabı

Dedektörün etkinliği, üzerine gelen gama ışınlarını anlamlı sinyallere dönüştürebilmesinin bir ölçüsüdür. Bu çalışma kapsamında yapılan $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ inorganik sintilasyon dedektörünün verim hesabı için Kumar vd. (2009) tarafından önerilen Denklem 3.12'de verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$\varepsilon_{mutlak} = \frac{N_{det}}{Atp} C_d \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'deki terimlerden ε_{peak} hesaplanması amaçlanan mutlak dedektör etkinliğini belirtmektedir. N_{det} terimi, dedektör tarafından algılanan gama ışını sayısını göstermektedir. A, kaynağın aktivitesi, t ölçümün yapıldığı süre ve p ise foton emisyon olasılığını belirtmektedir. Son olarak eşitlikteki C_d , ölü zamandan kaynaklı, yapılması gereken düzeltme terimidir.

Tez çalışması kapsamında yapılan dedektörün verim hesabında dedektörden geçen gama ışın akısını belirlemek için nokta kaynakların katı açı hesabı yapılmıştır. Katı açı hesabında kullanılan eşitlik Denklem 3.13'de verilmiştir. Denklemde Ω dedektörün kapladağı katı açısı belirtmektedir. d kaynakla dedektör arası mesafe ve a ise dedektörün kaynağa bakan etkin dairesel alanın yarıçapıdır. Kaynağın aktivitesine göre kaynaktan çıkan gama ışınlarından dedektör üzerine düşenlerin miktarının belirlenmesi için katı açı hesabı gerekmektedir.

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}}\right) \quad (3.13)$$

3.3.4. Dayanıklılık

Sintilatörlerin önemli özelliklerinden bir diğeri de dayanıklılıktır. 2007 yılında Normand ve ark. tarafından yapılan çalışmada $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ ve NaI:Tl kristallerinin radyasyon direnci ölçülmüş, yüklenen dozlara karşı $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalinde önemli değişiklikler gözlenmezken, NaI:Tl kristalinin renginde sararma, ışık çıkışında ve veriminde düşüş görülmüştür.

Kristalin dayanıklılığını gösteren bir diğere parametre ise sıcaklıktır. Ortamın sıcaklığı veya maruz kalınan radyasyon nedeniyle, kristallerin sintilasyon özellikleri değişebilmektedir. $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalinin karakteristik özelliklerinin sıcaklığa göre değişimini görmek için yapılan çalışmada sıcaklık değeri -30 ila 60 °C değiştirilerek ışık çıkışı ve çözünürlük değerleri gözlenmiştir. Bu iki parametrede değişiklik görülmezken sıcaklığın artışıyla birlikte enerji pikinin pozisyonunda değişim görülmüştür (Moszynskia vd. 2006).

3.4. Sintilasyon Dedektörlerinde Arka Plan Kaynakları

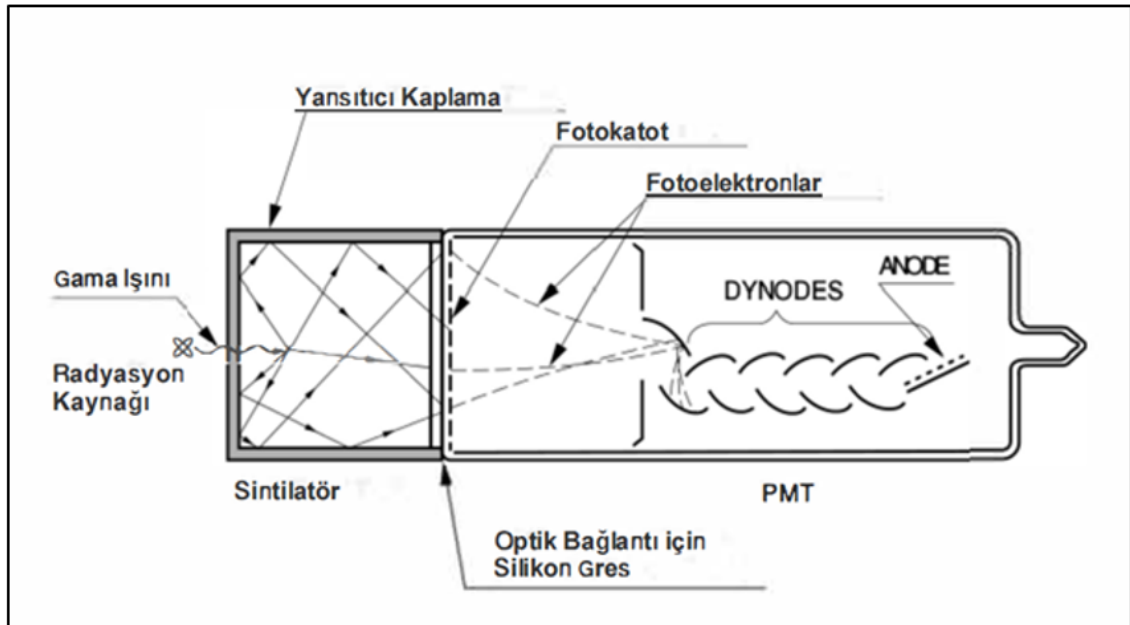
Bir sintilasyon dedektöründe arka plan sayımlarının ana kaynaklarından birisi dedektörün karanlık akımıdır (dark current). Diğer arka plan kaynakları, doğal olarak oluşan radyoizotoplar, kozmik ışınlar ve fosforesans maddelerdir. Özellikle, ^{40}K her zaman mevcuttur. Fosforesans terimi, atomların veya moleküllerin eksitasyonunun bir sonucu olarak gecikmeli ışık emisyonunu ifade eder. Fosforesansların yarı ömürleri saatlere kadar uzayabilir. Bu arka plan kaynağı, fototüpün camında, numune tutucunun duvarlarında

veya numunenin kendisinde bulunan fosforlu maddelerden kaynaklanabilir. Yüksek enerjili yüklü parçacıklar olan kozmik ışınlar, her tür dedektörde arka plan oluşturur ve sintilatörler istisna değildir. Kozmik ışın arka planının etkisi ve daha önce bahsedilen diğer kaynakların etkisi, iki sayaç çakışma kullanılırsa azalacaktır.

3.5. Fotoçoğaltıcı Tüp

Fotoçoğaltıcı tüp veya foto tüp, bir sintilasyon sayacının ayrılmaz bir parçasıdır. Fotoçoğaltıcı tarafından üretilen amplifikasyon olmadan, bir sintilatör radyasyon dedektörü olarak işe yaramaz. Fotoçoğaltıcı esasen hızlı bir yükselticidir ve 10^{-9} s zamanlarında görünür ışığın gelen darbesini 10^6 veya daha fazla kat yükseltir.

Bir fotoçoğaltıcı, girişinde bir fotokatot ve iç kısmında birkaç dinot bulunan boşaltılmış bir cam tüpten oluşur. Bir dizi dinodun sonunda bulunan anot, elektron toplayıcı görevi görür. Sintilatörde üretilen fotonlar fototüpe girer ve ışık çarptığında elektron yayan bir malzemeden yapılmış fotokatota çarpar. Fotokatot tarafından yayılan elektronlar, bir elektrik alanı yardımıyla, elektronlar üzerine çarptığında ikincil elektronlar yayan bir madde ile kaplanmış olan birinci dinoda doğru yönlendirilir. Birinci dinottan gelen ikincil elektronlar ikinciye, oradan üçüncüye doğru ve daha sonra diğer dinotlara hareket eder. Ardışık dinotlar tarafından ikincil elektronların üretimi, elektron sayısının nihai bir yükseltilmesi ile sonuçlanır.



Şekil 3.8. Fotoçoğaltıcı tüp ile sintilasyon kristali montaj planı

Dinotlar arasındaki elektrik alanı, her bir dinota art arda artan pozitif yüksek voltaj uygulanarak oluşturulur. Ardışık iki dinot arasındaki voltaj farkı 80-120 V düzeyindedir. Çoğu ticari fototüpte kullanılan fotokatot malzemesi, sezyum ve antimonun

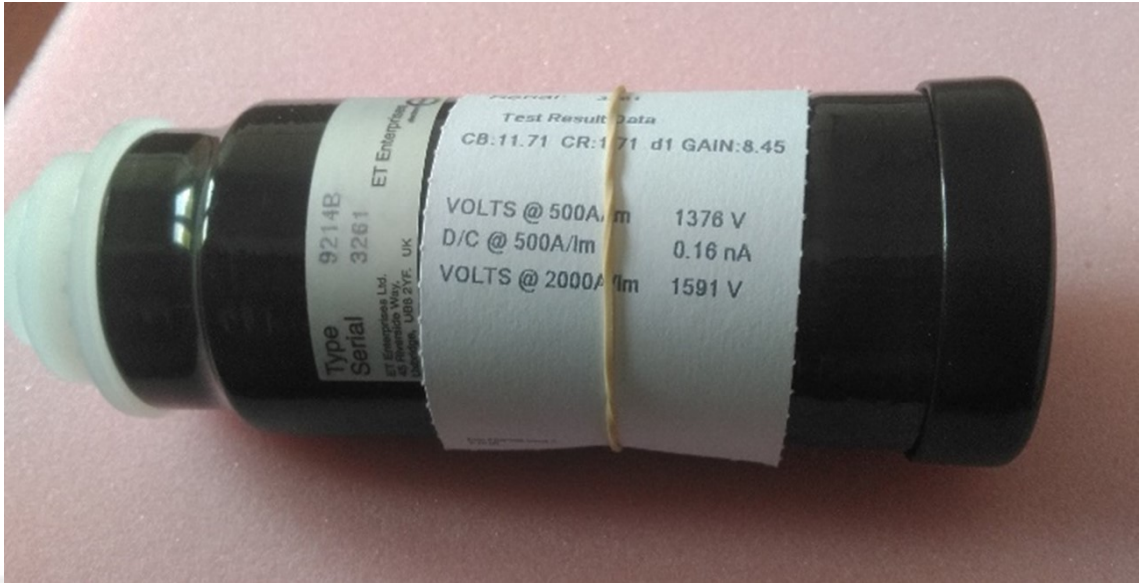
(Cs-Sb) bir bileşimidir. Dinotları kaplamak için kullanılan malzeme ya Cs-Sb ya da gümüş-magnezyumdur (Ag-Mg). Dinotların ikincil emisyon hızı, sadece yüzey tipine değil, aynı zamanda uygulanan voltaja da bağlıdır.

Her fotoçoğaltıcı tüpün çok önemli parametresi, fotokatodunun spektral duyarlılığıdır. En iyi sonuçlar için, sintilatörün spektrumu, fotokatodun duyarlılığı ile eşleşmelidir. Cs-Sb yüzeyi, 440 nm’de maksimum hassasiyete sahiptir ve bu, çoğu sintilatörün spektral tepkisi ile uyumludur.

Bir fototüpün bir diğer önemli parametresi, karanlık akımının büyüklüğüdür. Karanlık akım, esas olarak termal enerji emildikten sonra katot tarafından yayılan elektronlardan oluşur. Bu sürece sıcaklığa bağlı emisyon denir. Üzerine gelen foton miktarına bağlı olarak elekttron üreten, 50 mm çapındaki katot penceresi, karanlıkta oda sıcaklığında 10^5 elektron/s’ye kadar serbest bırakabilir. Katodun soğutulması, bu gürültü kaynağını sıcaklıktaki her 10-15 °C’lik düşüş için yaklaşık 2 kat azaltır. Sıcaklığa bağlı emisyon, dinotlardan ve tüpün cam duvarından da meydana gelebilir, ancak bu katkı küçüktür. Tüpte kalan gazın iyonlaşmasından gelen pozitif iyonlar tarafından bombardımanı sonucunda fotokatottan elektronlar salınabilir. Son olarak, iyonların yeniden birleşmesinin bir sonucu olarak yayılan ışık, katoda veya dinotlara çarptığında elektronları serbest bırakabilir. Açıkçası, radyasyon kaynağının çok zayıf olduğu durumlarda karanlık akımın büyüklüğü önemlidir. Bir fototüp satın alındığında hem karanlık akım hem de spektral tepki dikkate alınmalıdır.

Elektronların bir dinottan diğerine bir elektrik alanı tarafından yönlendirildiğini hatırlayın. Bir manyetik alan mevcutsa, elektronları, hepsi bir sonraki dinoda çarpmayacak şekilde saptırabilir ve amplifikasyon azalır. Dünyanın zayıf manyetik alanı bile bazen bu istenmeyen etkiye neden olabilir. Manyetik alanın etkisi, fotoçoğaltıcı tüpü μ -metal adı verilen silindirik bir metal levha ile çevreleyerek en aza indirilebilir. μ -metal, çeşitli şekil ve boyutlarda ticari olarak temin edilebilir.

Yapılan dedektörde sintilasyon malzemesinden çıkan fotonları elektrik sinyaline dönüştürmek için kullanılacak fotoçoğaltıcı tüp ET Elektronik’in 9214B kodlu ürünüdür. 9214B, mavi-yeşil duyarlı bialkali fotokatot ve lineer odaklı tasarıma sahip, Cs-Sb dinotlu 5,1 cm çaplı katot penceresine sahip fotoçoğaltıcıdır. Aktif pencere genişliği 46 mm olup 290 nm ile 630 nm arasında gelen fotonları yüksek kararlılıkta elektriksel sinyale dönüştürme özelliğine sahip olmasının yanında kuantum etkinliğinin en yüksek olduğu dalgaboyu 375 nm bölgesindedir ki bu değer kristalden çıkan fotonların dalgaboyuna çok yakındır. İlgili fotoçoğaltıcı tüpün görseli Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Dedektör yapımında kullanılan fotoçoğaltıcı tüp – 9214B

3.6. Sayısallaştırıcı Elektronik Devreler

Dedektöre gelen gama ışınlarının sinyalleri fotoçoğaltıcı tüpte güçlendirildikten sonra analiz edilebilmesi için sayısallaştırıcı bir elektroniğe daha ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma kapsamında analog elektronik ve CAEN tarafından üretilen örneklem oranları birbirinden farklı V1725 ve DT5751 kodlu dijital sayısallaştırıcılar (Şekil 3.10) kullanılarak farklı elektronik sistemlerin dedektör verimi üzerine etkileri gözlenmiştir.



Şekil 3.10. Deneyde kullanılan V1725 (Solda) ve DT5751 (Sağda) sayısallaştırıcılar

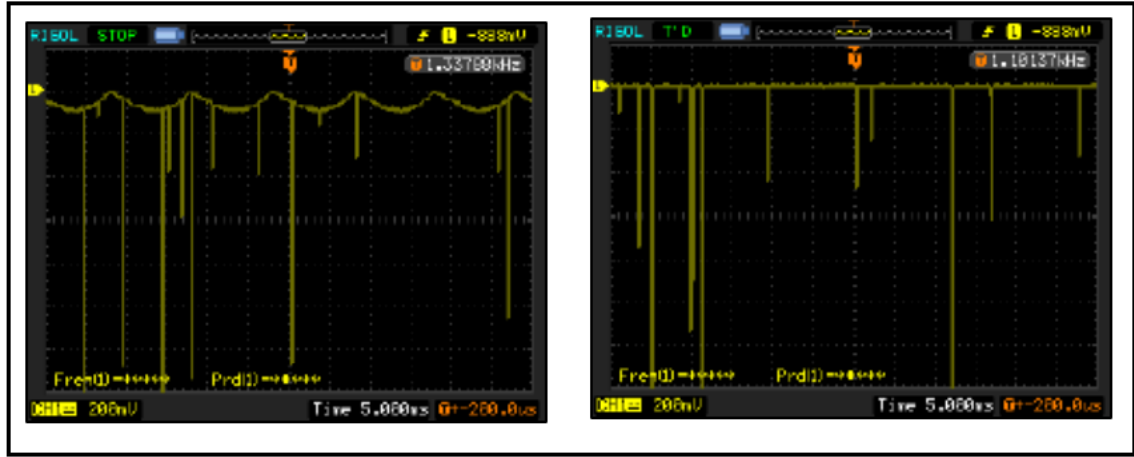
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında yapılmış olan $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalli inorganik sintilasyon dedektörünün görüntüsü ve nokta kaynakları içeren test düzeneği Şekil 4.1’de yer almaktadır. Hazırlanan dedektör Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Nükleer Fizik Laboratuvarında bulunan nokta kaynaklar kullanılarak verimlilik hesabı yapmak için yüksek voltajlı nükleer modüllere bağlanmış ve ilk sinyal çıkışları osiloskop kullanılarak gözlenmiştir.



Şekil 4.1. $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristalli inorganik sintilasyon dedektörü

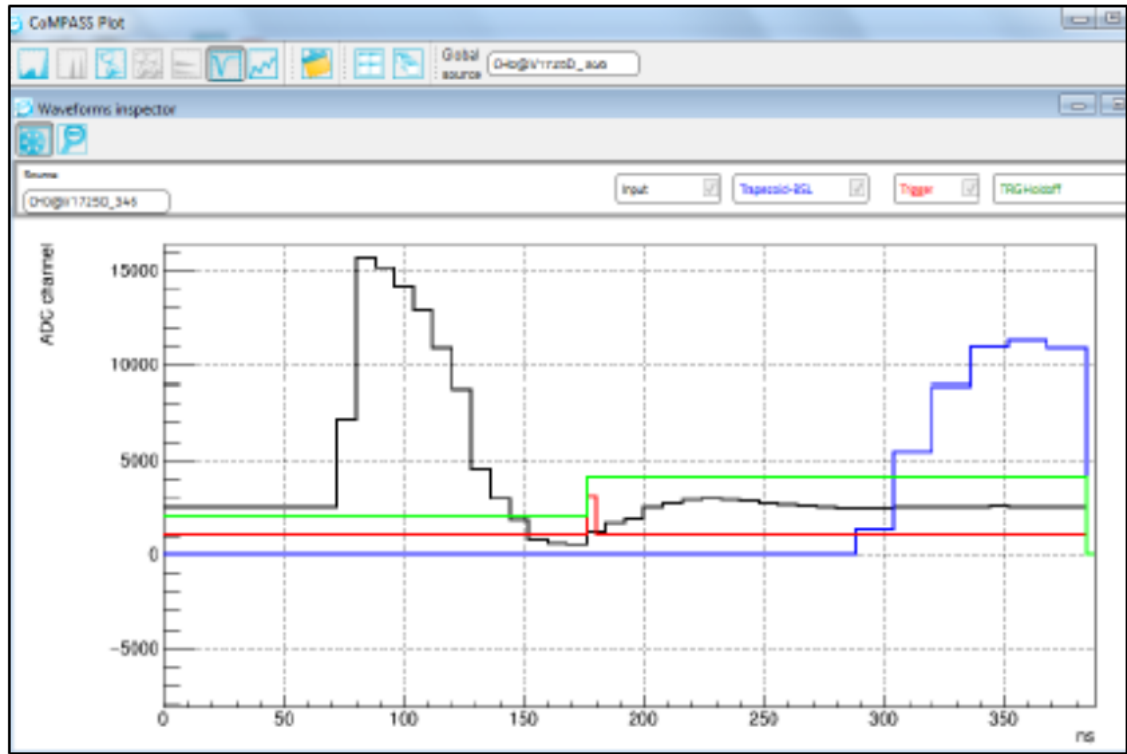
Osiloskopta gözlenen sinyaller nükleer fizikte yapılan deneylerin ilk etkilerinin görülmesi açısından en önemli yöntemlerden birisidir. Burada yapılan çalışmada elde edilen ilk osiloskop görüntüleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Gözlenen görüntülerde dikkat çeken en önemli etki, sistemin dış ortamlardan gelen ışığa karşı yeterince izole olmadığıdır. Fotoçoğaltıcı tüp, ortamdaki fotonlara karşı çok hassas olduğu için dışarıdan gelen fotonlar düzenekten alınan veriler üzerinde periyodik bir dalgalanma etkisi yaratmıştır. Daha sonra izolasyon üzerinde iyileştirilmeler yapılarak sistem daha kararlı bir duruma getirilmiştir.



Şekil 4.2. Dedektör ile nokta kaynaklar arasındaki etkileşimin osiloskopta gözlenmesi

Osiloskopta, yüksek voltaj uygulanan dedektörden yeterli sinyal elde edildikten sonra, sistem yüksek voltajlı modüllere ve CAEN V1725 sayısallaştırıcısına bağlanarak çalışmaya devam edilmiştir. Nokta kaynakların enerji spektrumunu bilgisayarda görebilmek için yapılan denemelerden sonra kristalin yüksek ışık çıkışıyla birlikte fotoçoğaltıcıda çoğaltılan elektronlar için V1725 sayısallaştırıcısının yeterli örnekleme oranına sahip olmadığı fark edilmiştir. Fotoçoğaltıcıda üretilen sinyallerin “Rise Time” değeri 10 ns civarında iken V1725 sayısallaştırıcısının örnekleme oranı (sampling rate) 250 MS/s, 8 ns olduğundan elektronik sistem doğru zamanda tetiklenememiş, böylelikle sinyal sönümlenirken de tetiklemeye devam etmiştir. Burada yapılan çalışmada dedektörün sorunsuz bir şekilde çalıştığı görülürken veriler sayısallaştırıcısının düşük örnekleme oranından dolayı bilgisayara aktarılamamıştır. Şekil 4.3’te V1725 Digitizer’ın çalıştırıldığı CoPASS yazılımı üzerinden giriş sinyalinin (siyah) üretim süresi ve uygun şekilde oluşamayan (mavi) çıkış sinyalinin durumu gösterilmiştir. Buradaki sorunu çözmek için daha yavaş bir fotoçoğaltıcı tüp kullanılması veya daha yüksek örnekleme oranına sahip bir sayısallaştırıcı kullanılması gerekmektedir.

Deneyin ikinci aşamasında dedektör testlerini daha yüksek örnekleme oranına sahip bir sayısallaştırıcı ile yapabilmek için İtalya’nın Katanya şehrinde bulunan INFN-LNS bünyesinde ve bu çalışma kapsamında geliştirilmesi planlanan NUMEN deney sistemine ait cihazlar kullanılmıştır. NUMEN gurubunun sahip olduğu DT5751 sayısallaştırıcısı yüksek örnekleme oranıyla (1 GS/s) dedektörden aldığı sinyalleri bilgisayara sorunsuz aktararak dedektör karakteristiklerini belirleyebilmek için faydalı sonuçlar vermiştir.

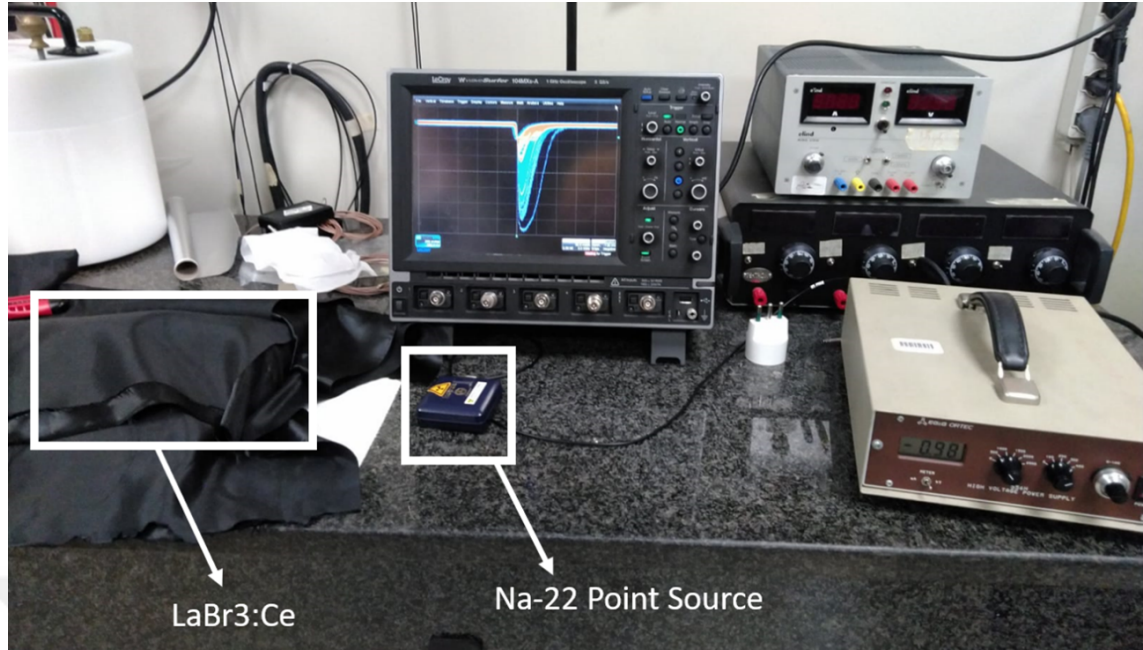


Şekil 4.3. V1725 sayısallaştırıcı giriş-çıkış sinyallerini gösteren CoMPASS ekranı

Dedektörün testinin LNS’de yapılan süreçlerinde sinyal görüntülemekiçin Na-22 radyoaktif nokta kaynağı kullanılmıştır. Test aşamasında önemli olan bir diğer unsur da kristalin ışık çıkışıyla fotoçoğaltıcı tüpün sinyali güçlendirme ilişkisi olmuştur. 9214B fotoçoğaltıcı tüp için etkin çalışma gerilimi kılavuzunda 1376 V olarak verilmiş olsa da kristalin yüksek ışık çıkışından dolayı yüksek voltajlarda enerji spektrumunda önemli satürasyonlar gözlenmiştir. Bu satürasyonlar, ekstra piklerin spektrumda belirmesine ve arka plan sayımlarında artışlara yol açarak veri kalitesini düşürmüştür. Bu durum fotoçoğaltıcı tüpün geriliminin kademeli olarak artırılarak doğru çalışma geriliminin bulunmasını sağlamıştır. Farklı gerilimler elde edilen kanal spektrumları enerji kalibrasyonu ile yapılan değerlendirmelerden en doğru çalışma gerilimi belirlenmiştir. Ayrıca farklı voltajlarda elde edilen her bir enerji spektrumu üzerinden çözünürlük değerleri hesaplanmıştır. LNS’de yapılan testlerde farklı elektronik sistemleri ve farklı çalışma gerilimlerinde elde edilen sonuçlar Bölüm 4.1.’de verilmiştir.

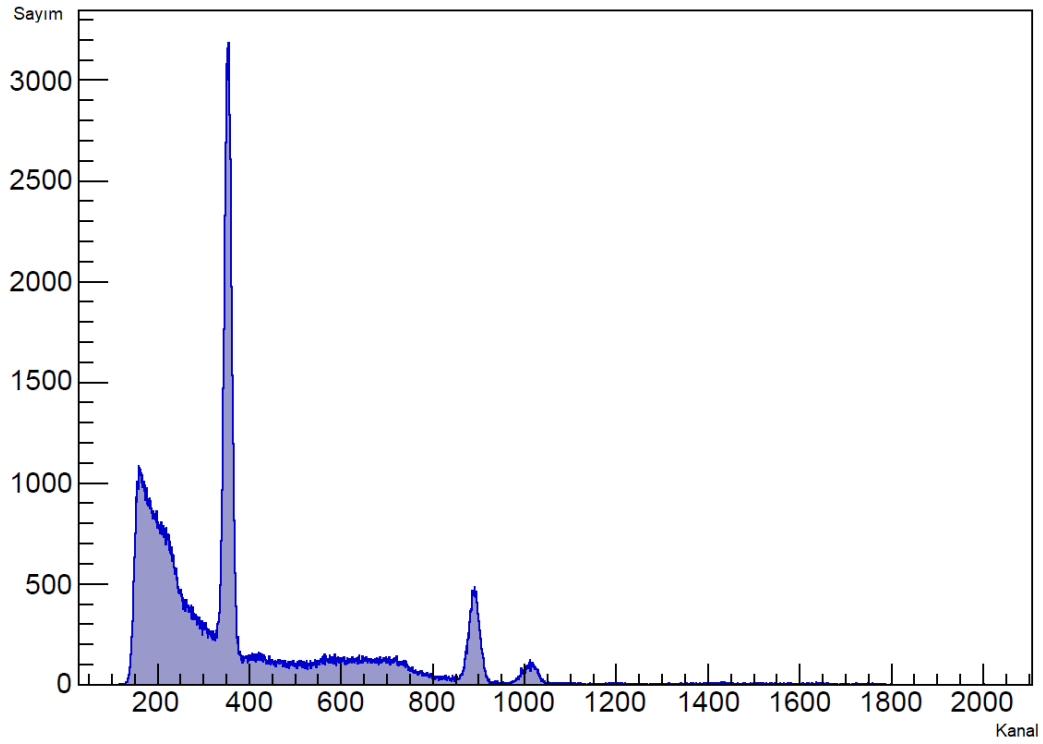
4.1. LNS testleri ve Enerji Çözünürlüğü Hesapları

Tez çalışması kapsamında yapılan dedektörün karakteristiklerini belirlemek amaçlı INFN-LNS’de yürütülen deneysel süreçle ilişkin görsel Şekil 4.4’te gösterilmiştir.

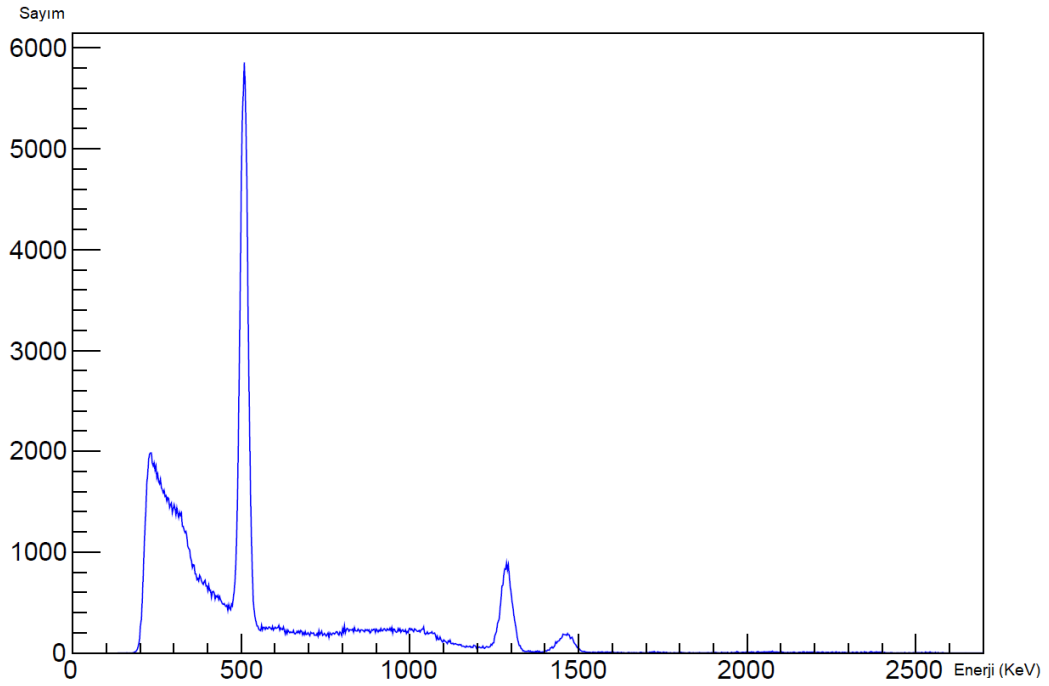


Şekil 4.4. INFN-LNS’de yürütülen LaBr₃:Ce testleri

Burada yapılan çalışmada LaBr₃:Ce dedektörü ile 45.7 kBq aktiviteye sahip Na-22 nokta kaynağı aralarında 20 cm olacak şekilde düz bir zemine yerleştirilmiş, daha sonra dedektör DT5751 sayısallaştırıcısına bağlanarak ve farklı voltajlarda kanal spektrumları elde edilmiştir. Dedektöre uygulanan gerilim ilk başta 1300 V olarak ayarlandı ancak oluşan yüksek satürasyondan dolayı kademeli voltaj artışıyla testler yapıldı. Sisteme 900V gerilim uygulandığından elde edilen ve sorunsuz görünen Na-22 kanal spektrumu Şekil 4.5’te verilmiştir. Verilen kanal spektrumunda yatay eksen doğrudan kanal sayısını verirken dikey eksen her bir kanalda toplanan sinyal sayısını göstermektedir. Veri toplama aşamasında COMPASS programı kullanılırken enerji kalibrasyonu ve çözünürlük işlemleri için ROOT programı kullanılmıştır. Kanal spektrumunu enerji spektrumuna dönüştürürken dedektörün lineer olma özelliğinden faydalanarak kanal spektrumundaki sinyal pikler Na-22’nin 511 keV ve 1275 keV bozunma enerjileriyle lineer olarak eşleştirilmiştir. Ayrıca 1470 bölgesinde bulunan ve ¹³⁸La iç aktivitesinden (Şekil 2.1) kaynaklanan sinyal kanal spektrumunda görülen bir diğer enerji piki olmuştur. 900 V uygulama voltajında elde edilen kanal spektrumunun enerji kalibrasyonu yapılmış hali Şekil 4.6’daki gibidir.

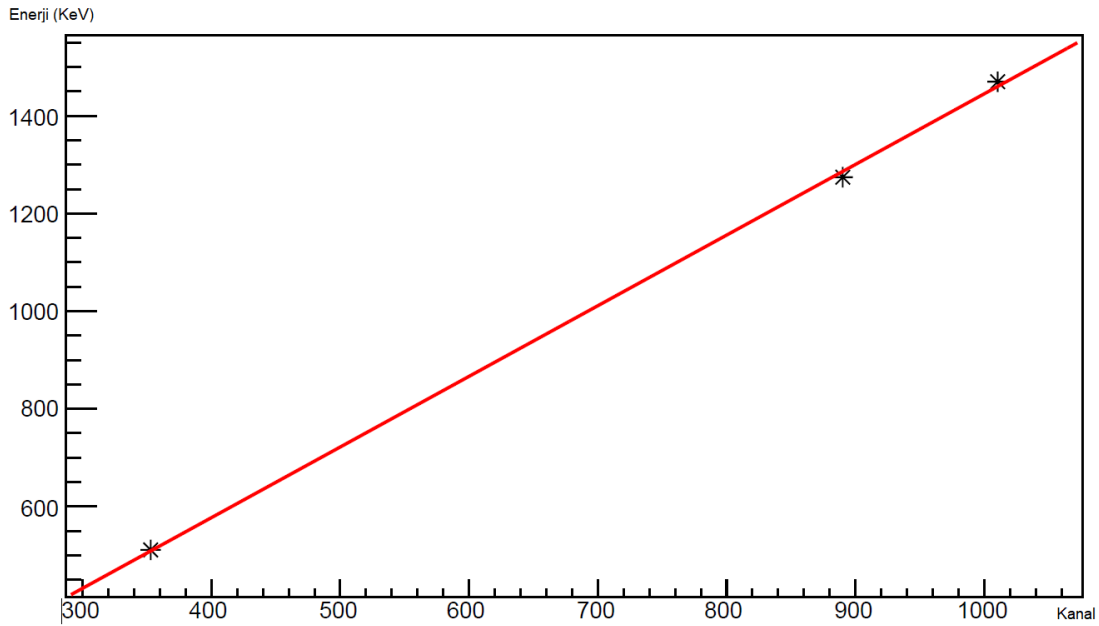


Şekil 4.5. Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ dedektörüne 900V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumu



Şekil 4.6. Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ dedektörüne 900V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumunun enerji kalibrasyonu yapılmış gösterimi

Kalibrasyon aşamasında Na-22 çizgileriyle kanallar arasında çakıştırmaların yapıldığı lineer fit Şekil 4.7'deki gibi elde edilmiştir. Kanal spektrumundaki çizgi merkezleri ile kaynağın yayınım yaptığı enerji değerleri lineer olarak eşleştirildiği için buradaki fit doğrusal çıkmıştır. Kanal-enerji eşleştirmelerinin aynı doğru üzerinde çizilmesi, dedektörlerde ihtiyaç duyulan lineerlik özelliğini doğrulamaktadır.

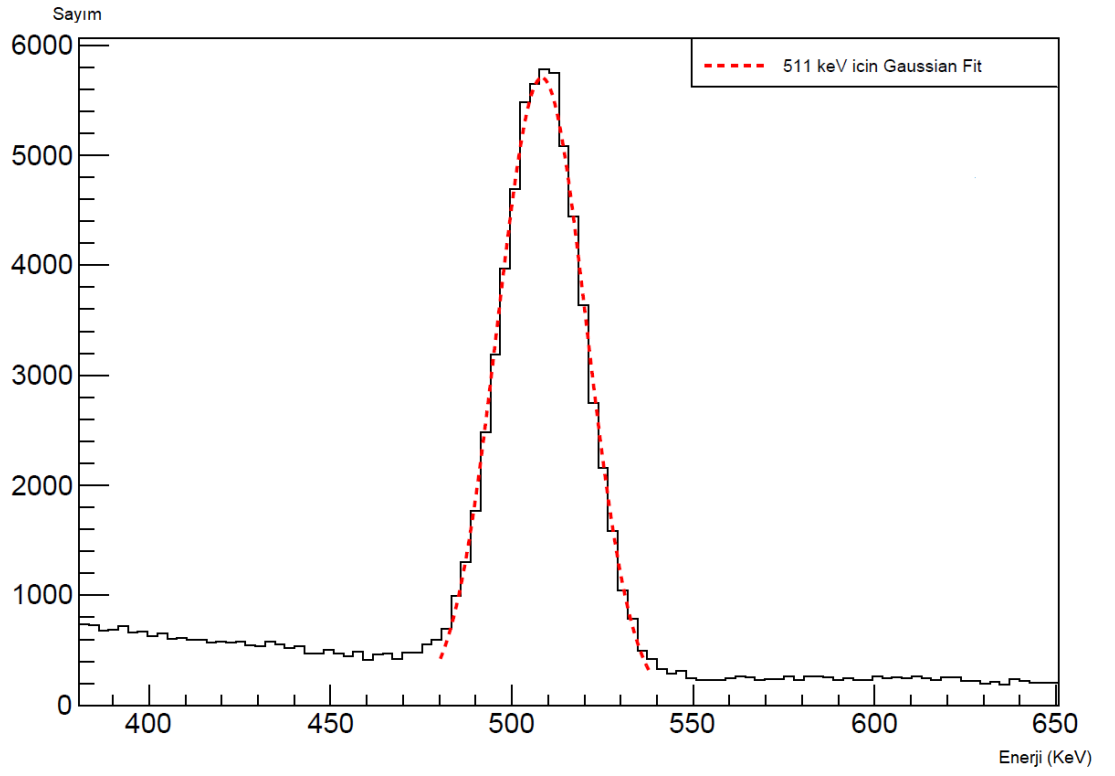


Şekil 4.7. 900V uygulama voltajında, Na-22 radyoaktif kaynağının enerji değerleri ile elde edilen spektrumdaki piklerin kanal numaralarının lineer eşleştirilme fiti

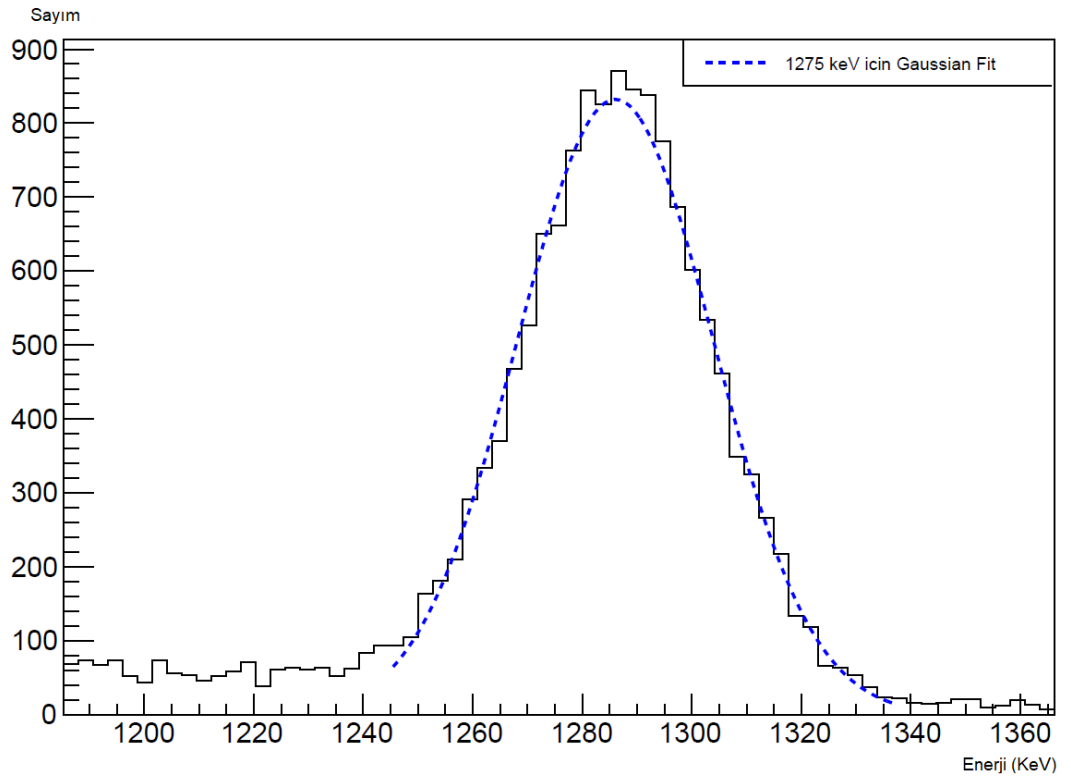
Sonraki aşamada, elde edilen enerji spektrumu üzerinden, ROOT programı kullanılarak çözünürlük değerleri Denklem 3.10 yardımı ile hesaplanmıştır. İlk olarak her bir enerji çizgisinin merkezi belirlenmiş ve ROOT içinde bulunan fit prosedürü ile her çizgiye ayrı Gaussian eğriler fit edilmiştir. Bölüm 3'te anlatıldığı gibi yapılan Gaussian eğri fitlerinden çizgilerin sigma değeri (standart sapma) belirlenmiş ve bu değerler çizgi genişliklerini ölçmede kullanılmıştır. Çizgilere yapılan fitler sırasıyla Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir. 900V uygulama geriliminde çizgileri fit edilen her bir Gauss eğrisi üzerinden hesaplanan sigma ve çözünürlük değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 900V uygulama voltajında elde edilen çözünürlük değerleri

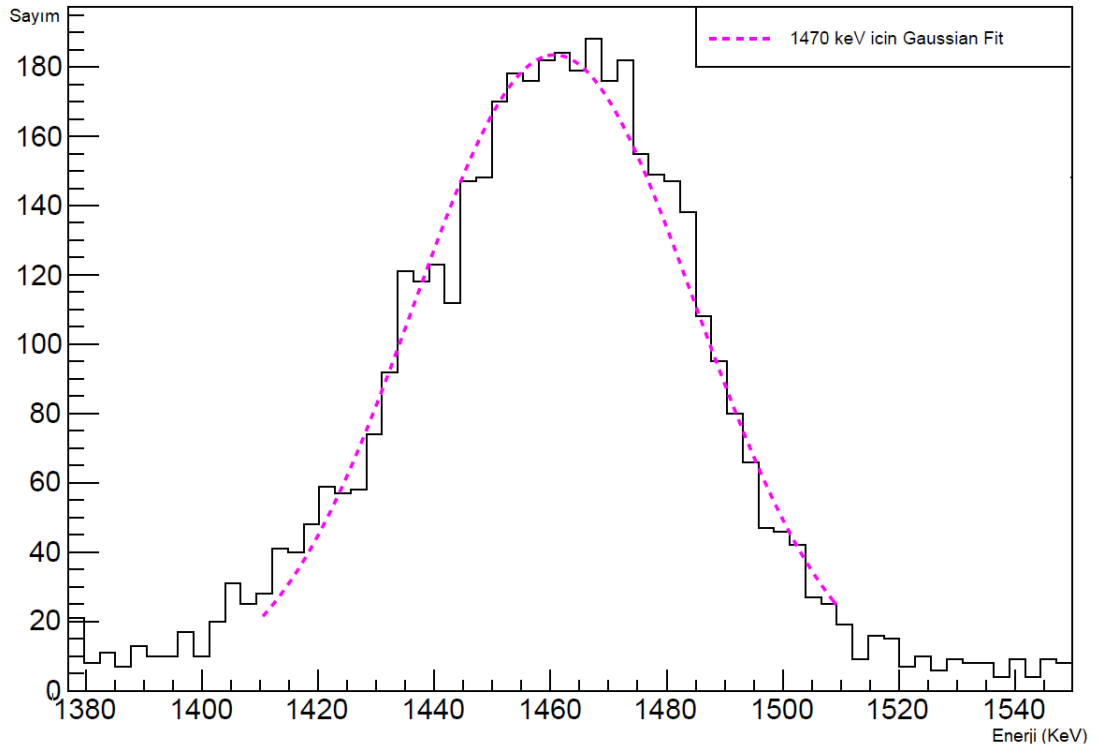
Çizgi Merkezi (keV)	Sigma (σ)	Çözünürlük (%)
508	12,27	5,69
1286	17,96	3,29
1460	24,25	3,91



Şekil 4.8. 900V uygulama voltajında, Na-22'nin 511 keV piki için yapılan Gaussian fiti

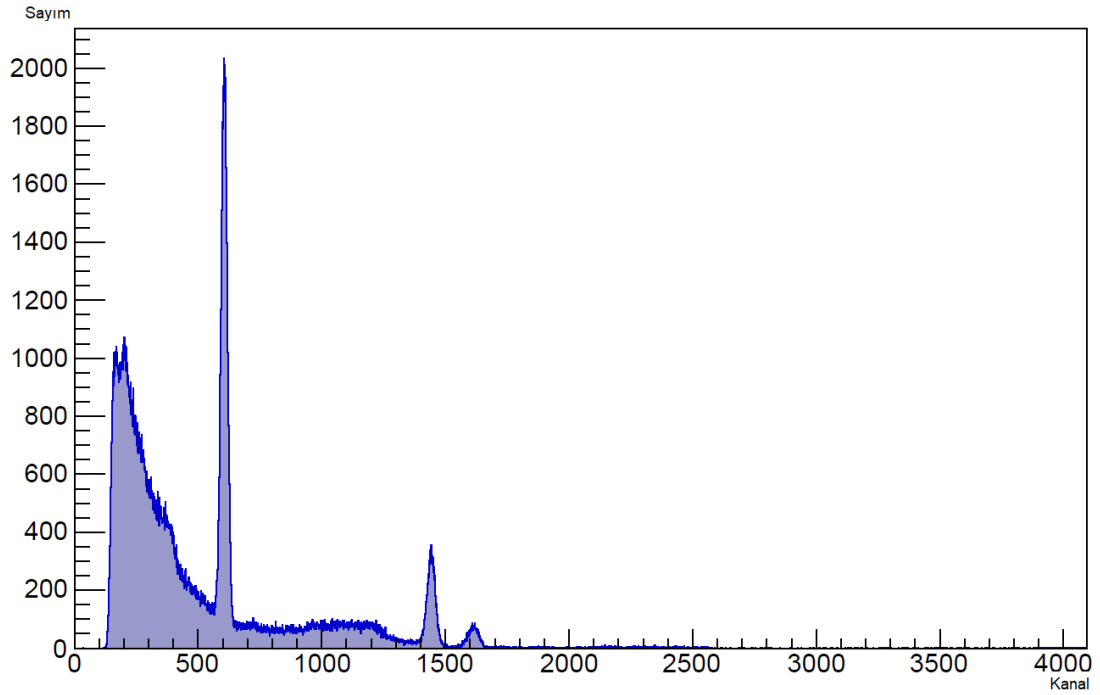


Şekil 4.9. 900V uygulama voltajında, Na-22'nin 1275 keV piki için yapılan Gaussian fiti



Şekil 4.10. 900V uygulama voltajında, ^{138}La içsel aktivitesinden kaynaklı 1470 keV piki için yapılan Gaussian fiti

Elde edilen enerji spektrumları incelendiğinde, piklere yapılan Gauss eğrilerinin profilleri, çizgiler ile uyumlu görünmektedir. Bu Gauss değerlerinden hesaplanan çözünürlük değerleri de NUMEN deneylerinde kullanmak için kabul edilebilir olan %30'dan küçük değerler bulunmuştur. Her ne kadar çizgi profilleri düzgün görünse de voltajın artmasıyla birlikte sinyaller güçlenecek ve verilerin kalitesi artacaktır. Bu nedenle sistemin kararlı çalıştığı en uygun gerilimi bulabilmek için sistem voltajı 950V'a çıkarılarak aynı ölçüm tekrar edilmiştir. Elde edilen kanal spektrumu Şekil 4.11'de verilmiştir.

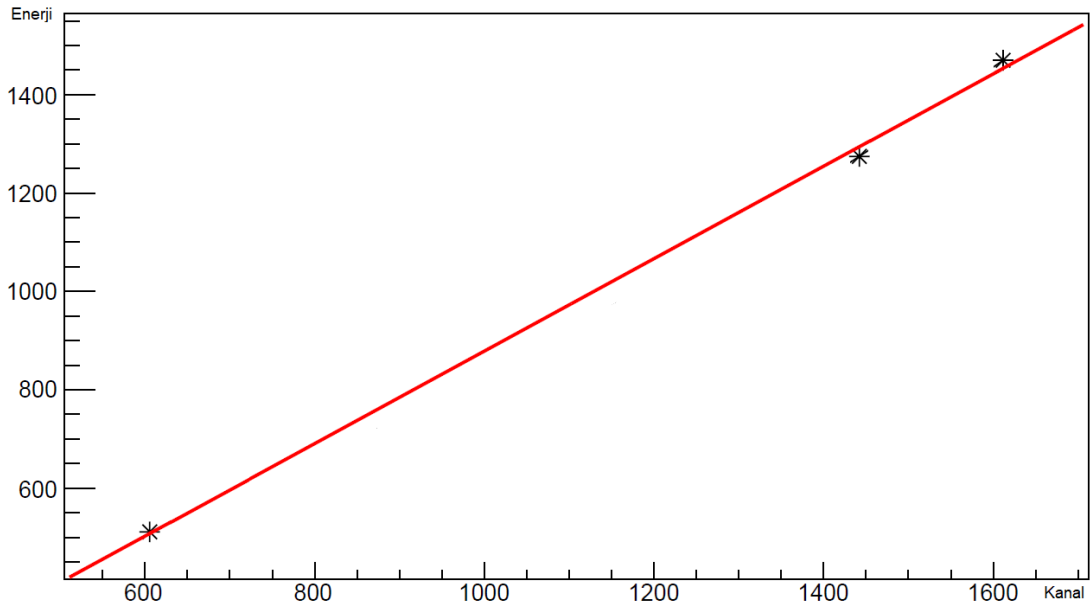


Şekil 4.11. Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, LaBr₃:Ce dedektörüne 950V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumu

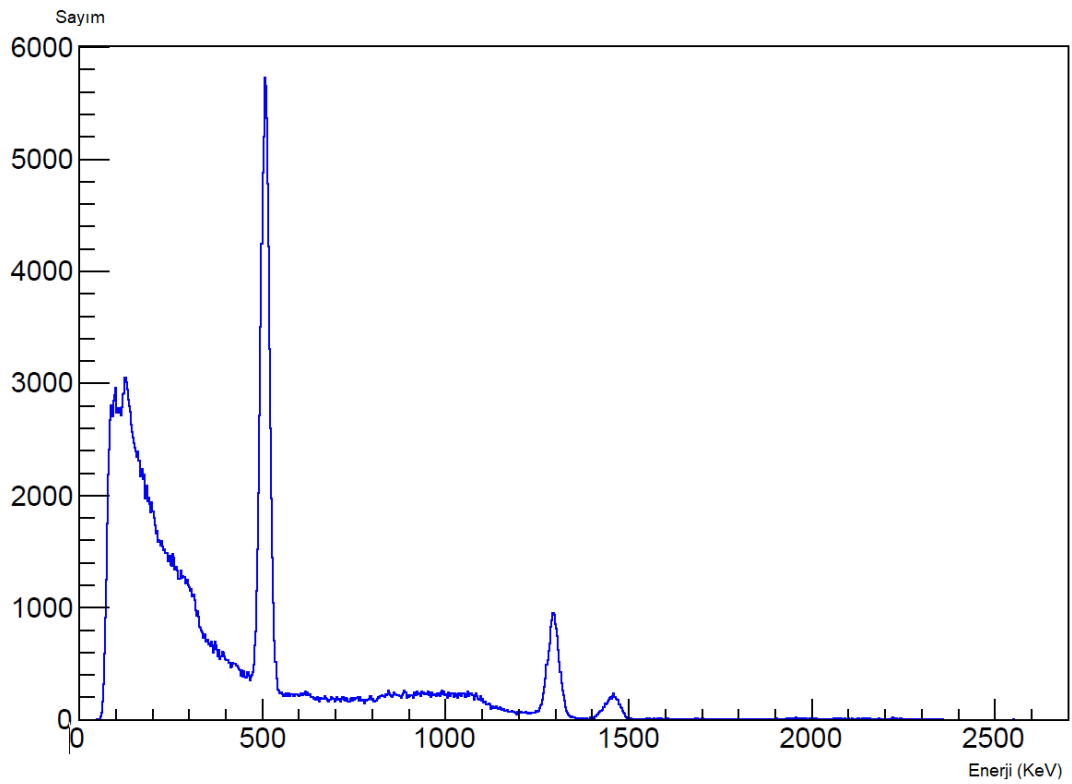
Kanal spektrumu üzerindeki sinyal pikleri Na-22'nin bozunma enerjileri ile eşleştirilerek kalibrasyon yapılmıştır. Kalibrasyon fiti ve enerji spektrumları sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Enerji kalibrasyonundan sonra Na-22 pikleri incelenmiş ve Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 gösterildiği gibi Gaussian fitler yapılarak çözünürlük değerleri hesaplanmıştır. Gauss eğirilerinden faydalanarak belirlenen çizgi merkezleri, hesaplanan sigma ve çözünürlük değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. 950V uygulama voltajında elde edilen çözünürlük değerleri

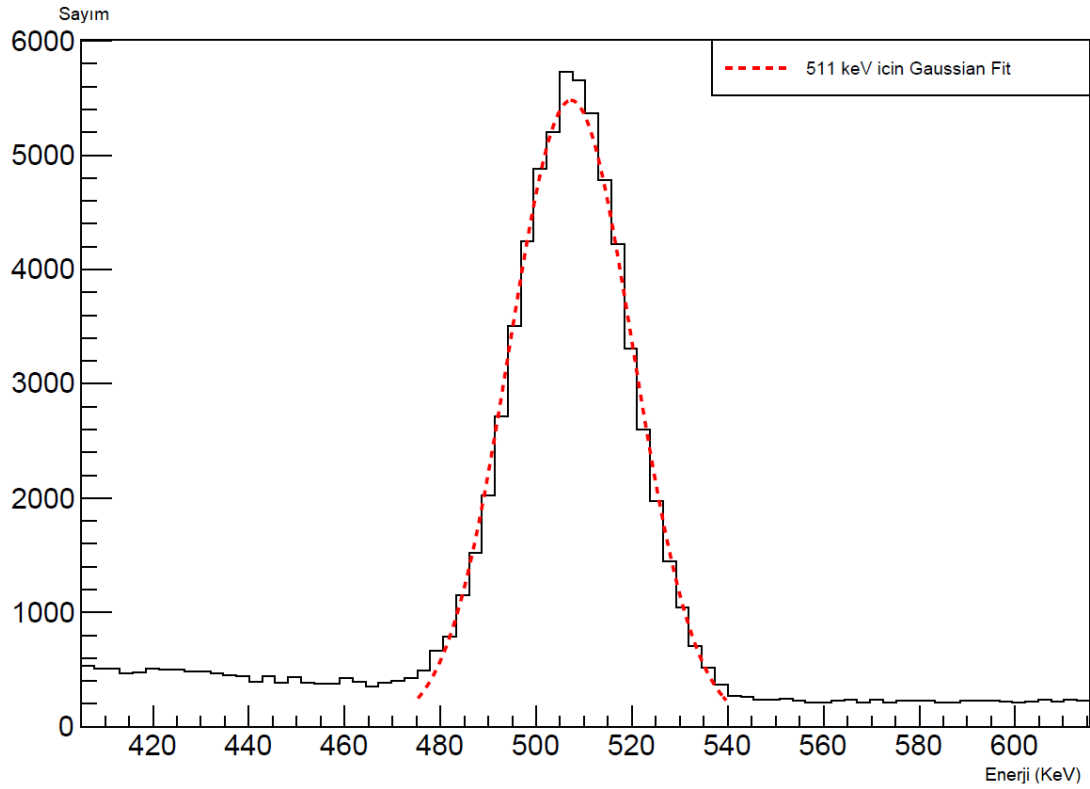
Çizgi Merkezi (keV)	Sigma (σ)	Çözünürlük (%)
507	12,86	5,97
1293	16,66	3,03
1453	21,15	3,42



Şekil 4.12. 950V uygulama voltajında, Na-22 radyoaktif kaynağının enerji değerleri ile elde edilen spektrumdaki piklerin kanal numaralarının lineer eşleştirilme fiti

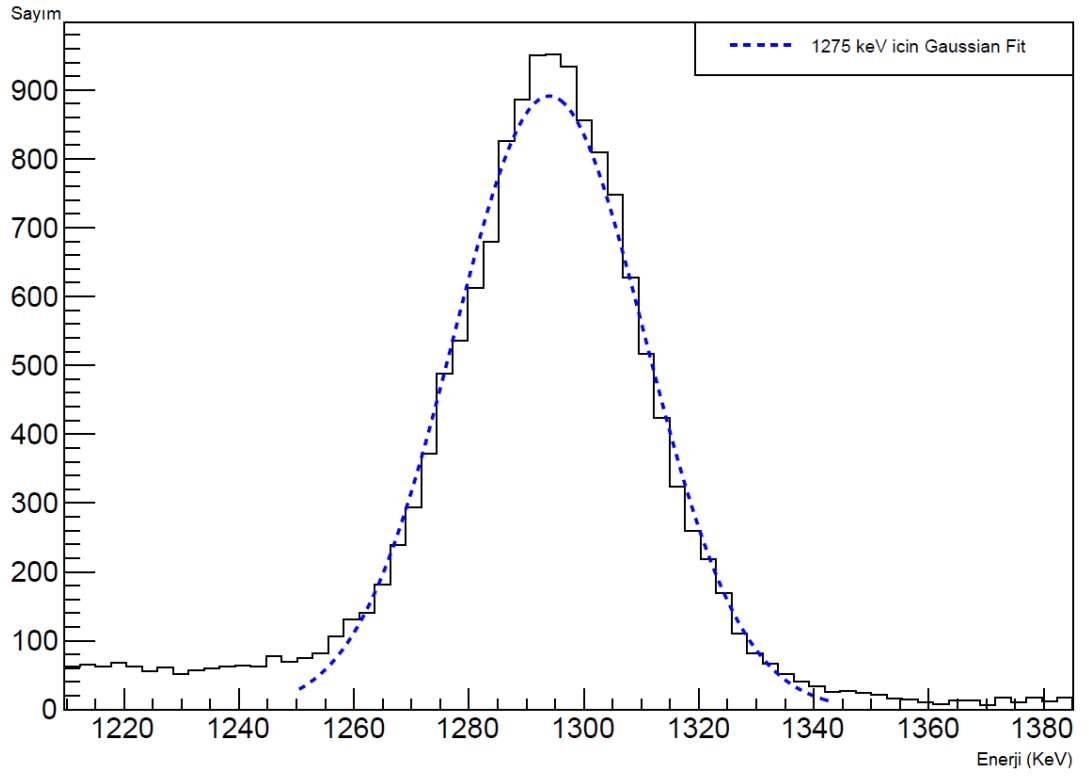


Şekil 4.13. Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, LaBr₃:Ce dedektörüne 950V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumunun enerji kalibrasyonu yapılmış gösterimi

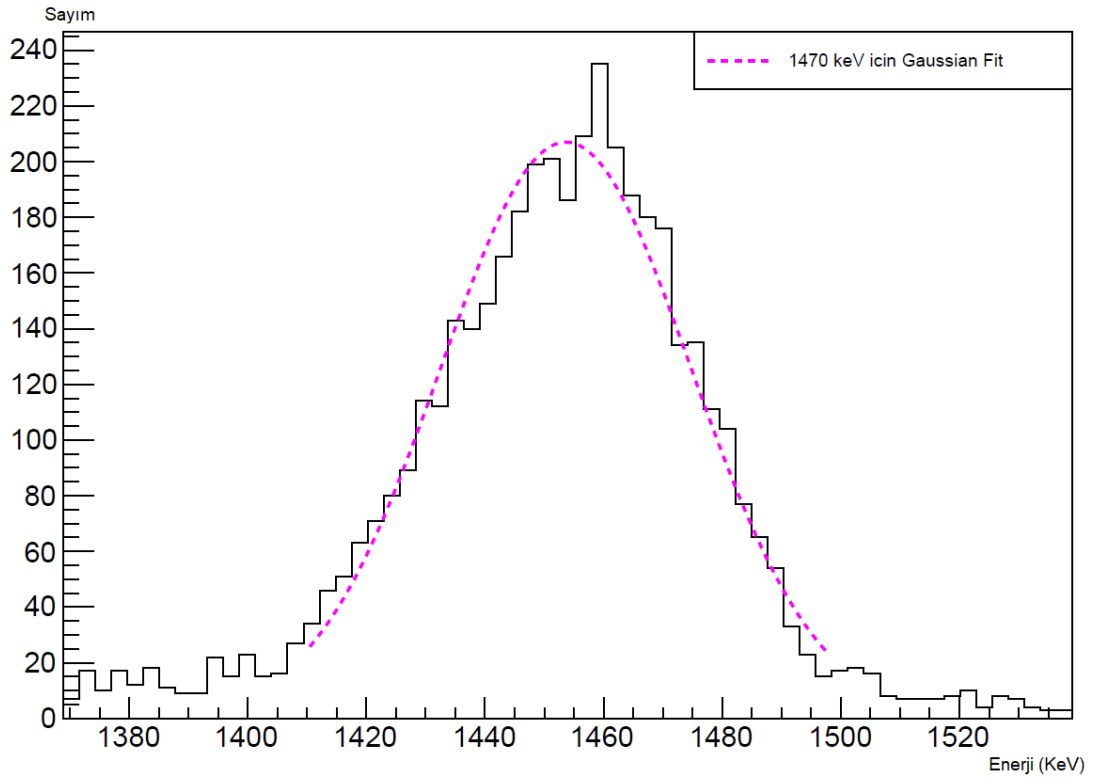


Şekil 4.14. 950V uygulama voltajında, Na-22'nin 511 keV piki için yapılan Gaussian fiti

Enerji piklerine yapılan Gaussian fitler incelendiğinde özellikle 1470 KeV bölgesinde çizgi merkezlerinin tam çakışmadığı görülmüştür. Bunun nedeni 1470 keV pikinin ^{138}La 'ın iç aktivitesinden gelen ve sinyal gücü nispeten düşük olan çizgi olması olarak düşünülmüştür. 511 keV ve 1275 keV çizgileri için Gauss eğrilerinin merkezleri uygun görülmüştür. Çizgilerden elde edilen çözünürlük değerleri kabul edilebilir seviye aralığında çıkmıştır.

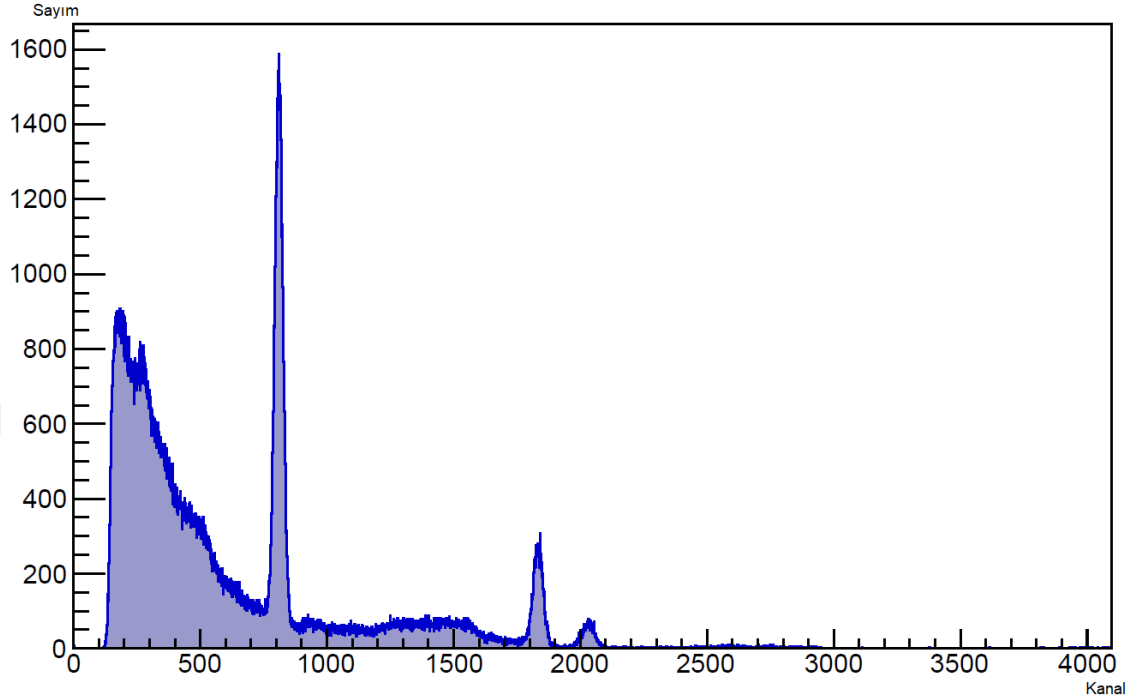


Şekil 4.15. 950V uygulama voltajında, Na-22'nin 1275 keV piki için yapılan Gaussian fiti



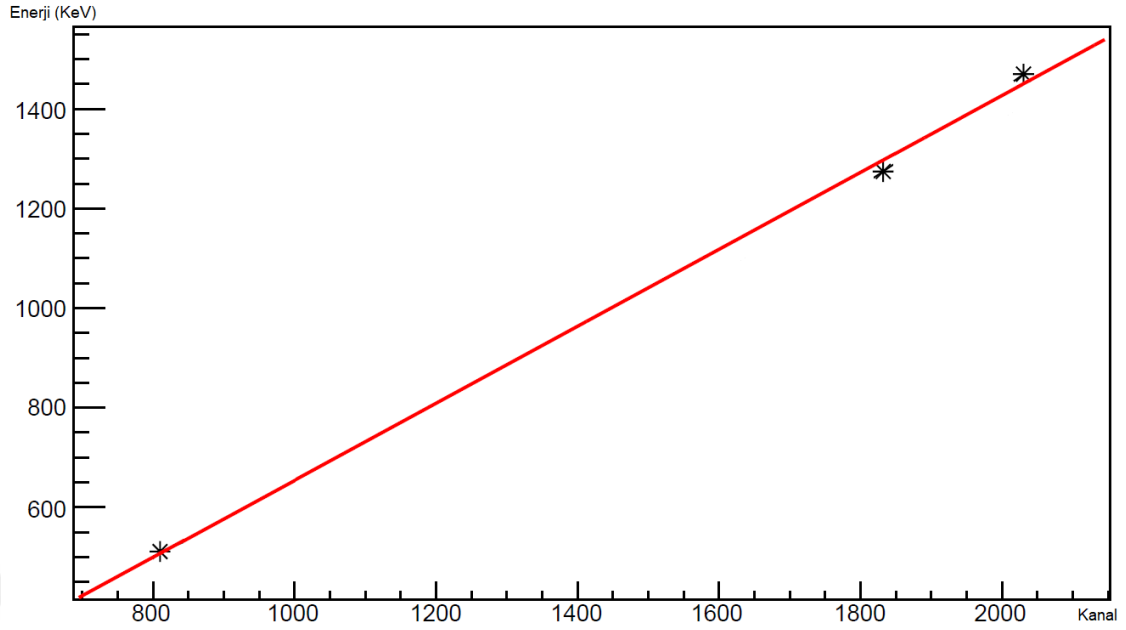
Şekil 4.16. 950V uygulama voltajında, ^{138}La piki için yapılan Gaussian fiti

Dedektöre uygulanan gerilim 980V'a çıkarıldığında elde edilen kanal spektrumu Şekil 4.17'de gösterildiği gibi çıkmıştır. Spektrumdaki gürültü miktarı nispeten fazla görülsede pikler analiz edilebilecek düzeyde temiz görülmektedir.

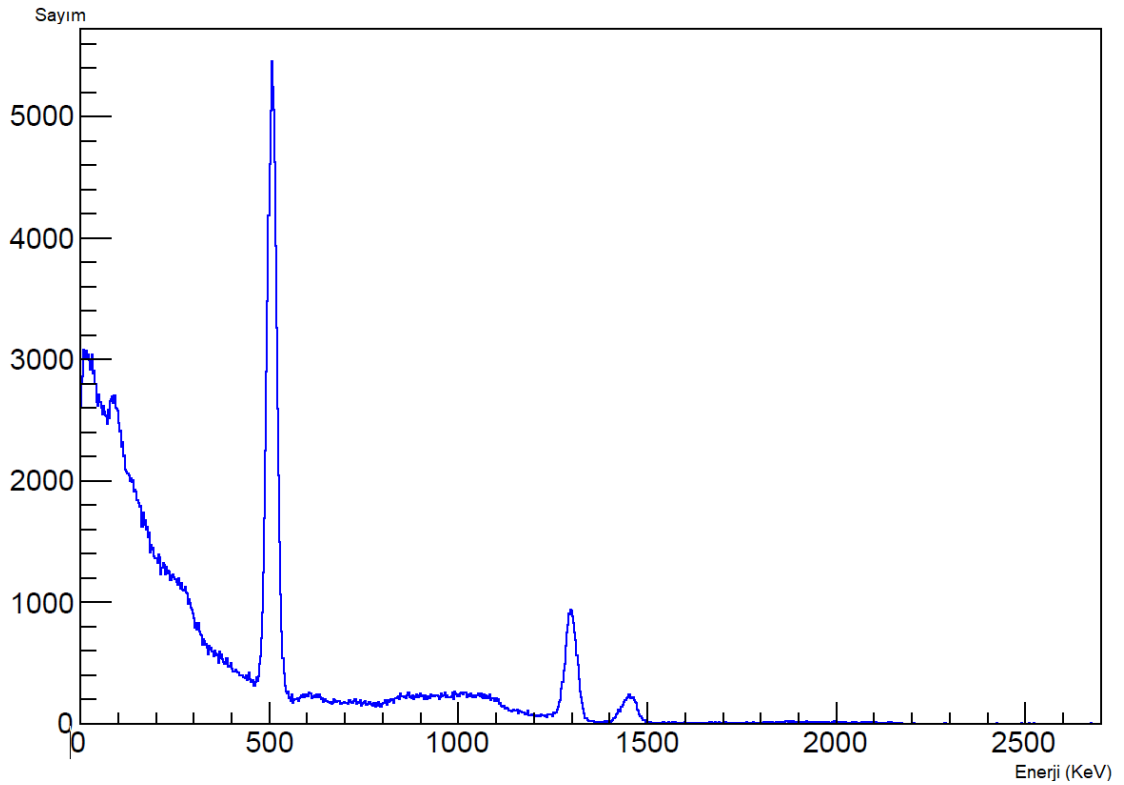


Şekil 4.17. Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, LaBr₃:Ce dedektörüne 980V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumu

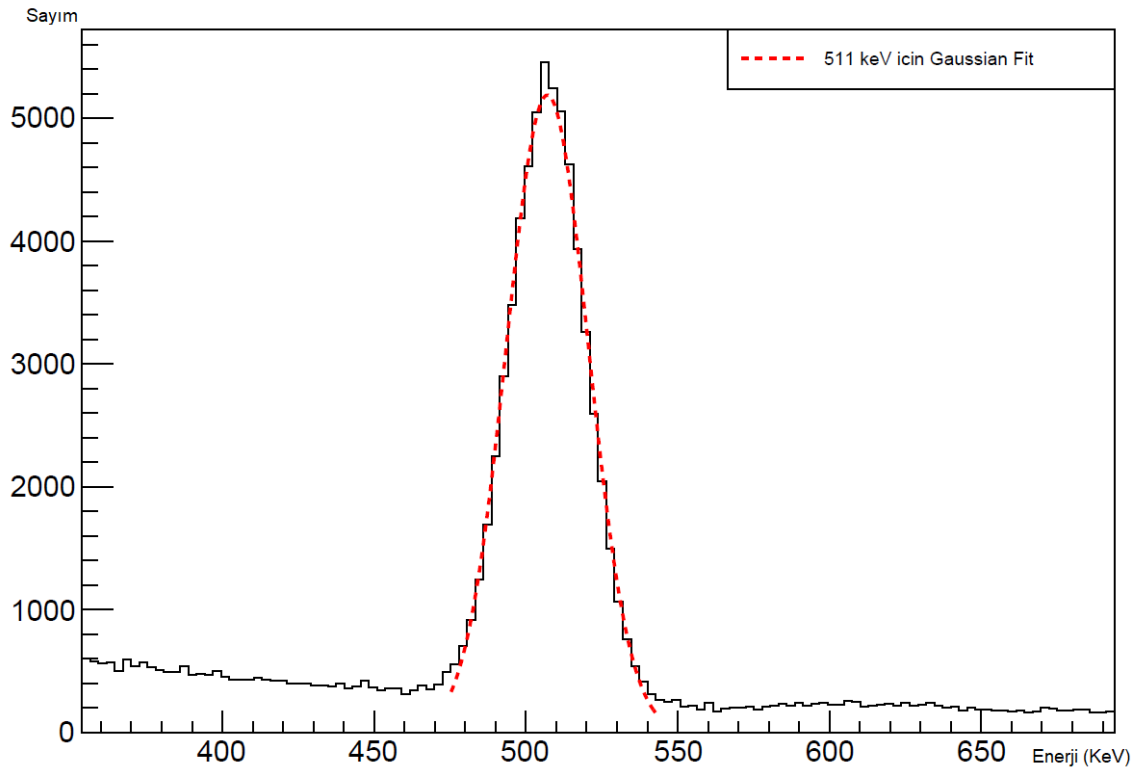
Kanal spektrumu üzerinden enerji spektrumuna geçmek için yapılan kanal ile enerji arasındaki dönüşüm fiti Şekil 4.18'deki gibi elde edilmiştir. Yapılan önceki işlemlere benzer olarak Şekil 4.19'da gösterildiği gibi enerjiye karşı sayım spektrumu çizilmiş ve her bir pik üzerinden çözünürlük hesapları yapılmıştır. Dedektör gerilimi 980V olarak ayarlanarak alınan kanal spektrumuna, enerji kalibrasyonu sonrası Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22' de gösterilen Gaussian fitler, yüksek enerji bölgesinde küçük kaymalar olsa da genel olarak uyum göstermiştir. Özellikle 1470 keV bölgesinde çizgi merkezinin kayması enerji pikinin düşük sinyalinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Piklerden elde edilen çözünürlük değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.18. 980V uygulama voltajında, Na-22 radyoaktif kaynağının enerji değerleri ile elde edilen spektrumdaki piklerin kanal numaralarının lineer eşleştirilme fiti



Şekil 4.19. Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, LaBr₃:Ce dedektörüne 980V gerilim uygulanırken elde edilen kanal spektrumunun enerji kalibrasyonu yapılmış gösterimi

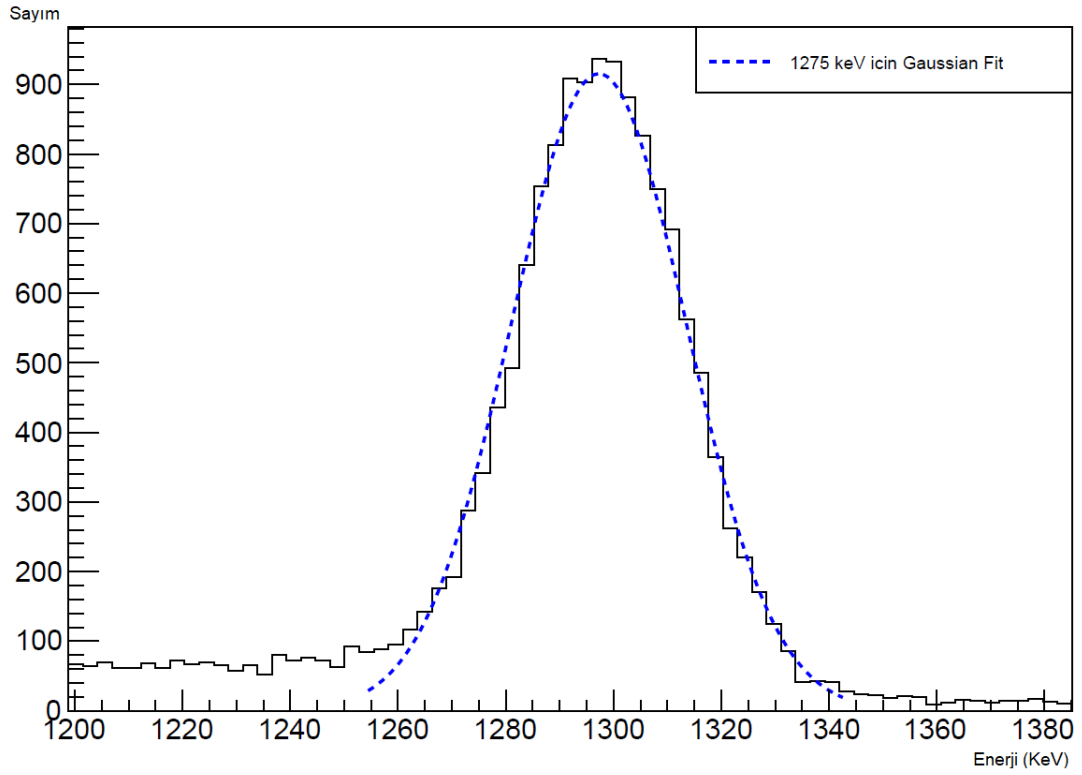


Şekil 4.20. 980V uygulama voltajında, Na-22'nin 511 keV piki için yapılan Gaussian fiti

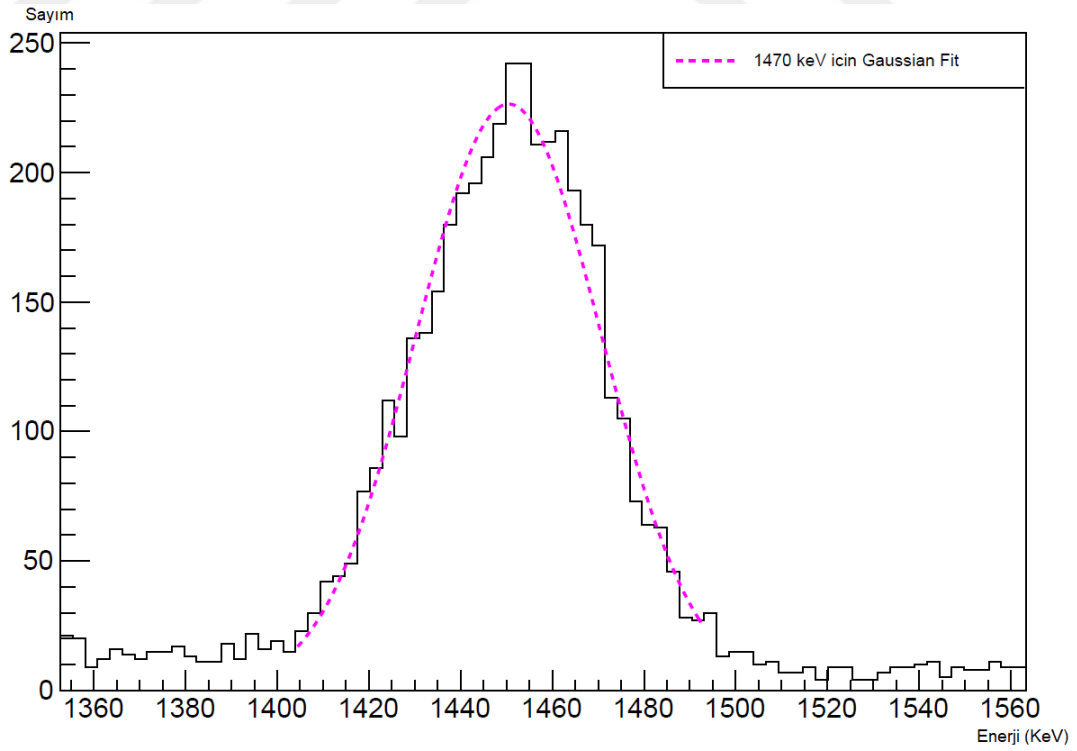
Çizelge 4.3. 980V uygulama voltajında elde edilen çözünürlük değerleri

Çizgi Merkezi (keV)	Sigma (σ)	Çözünürlük (%)
507	13,51	6,27
1297	16,28	2,95
1450	20,20	3,28

Dijital elektronik kullanılarak yapılan testlerde spektrumun düşük enerji bölgesindeki çizgi merkezi yüksek enerji bölgesindeki çizgiye göre daha kararlı olduğu gözlenmiştir. Başka bir ifadeyle, uygulama geriliminin artmasıyla birlikte, uzun enerji bölgesinde fit edilen Gauss merkezleri çizgi merkezinden uzaklaşmıştır. Bunun nedeni olarak gerilimin artmasıyla birlikte fotoçoğaltıcı tüpün lineer olmayan etkilerinin görülmesi olarak düşünülmüştür. Dahası uygulama geriliminin artmasıyla yüksek enerji bölgesindeki çizgi profilinin daralması çözünürlükte artış olarak verilere yansımaktadır.

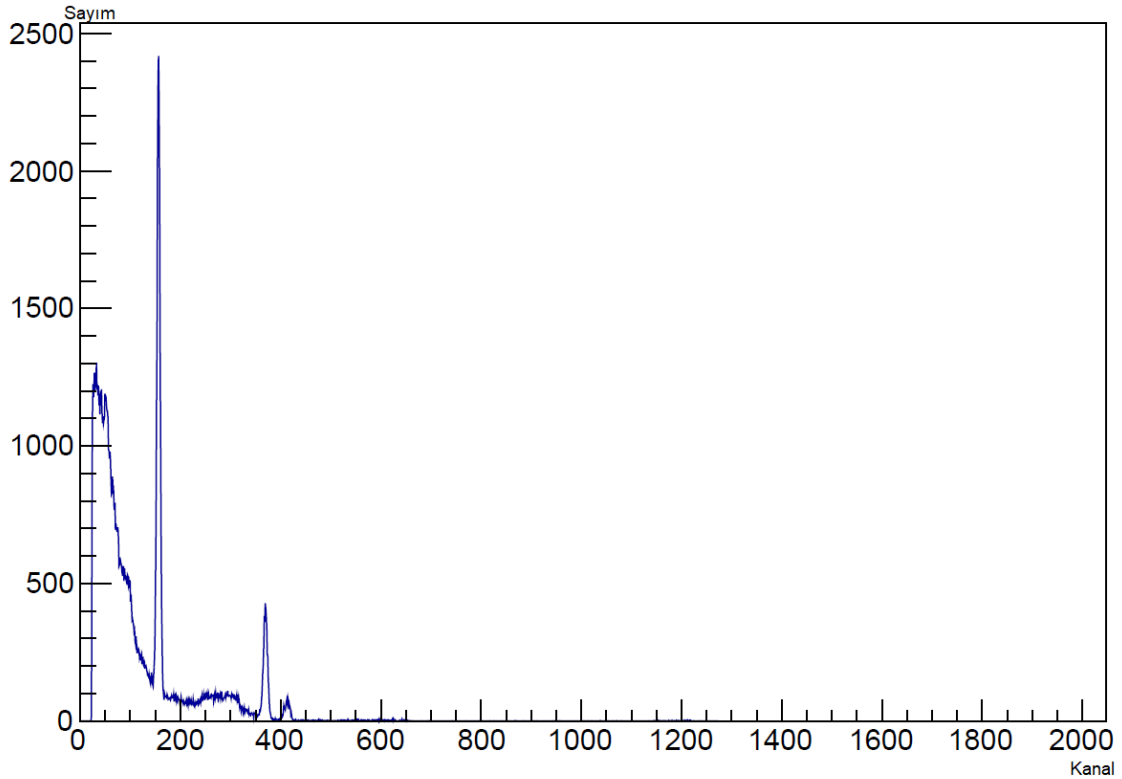


Şekil 4.21. 980V uygulama voltajında, Na-22'nin 1275 keV piki için yapılan Gaussian fiti



Şekil 4.22. 980V uygulama voltajında, ^{138}La içsel aktivitesinden kaynaklı 1470 keV piki için yapılan Gaussian fiti

Dijital elektronik devrelerde uygulanan gerilimin dedektör verimi üzerine ilk etkileri görüldükten sonra, dedektör analog sistemlere bağlanarak çalışmalar sürdürülmüştür. Çalışmanın bu bölümünde analog sayısallaştırıcıya ek olarak ORTEC 133 ön yükseltici kullanılmıştır. İlk olarak dedektör için 950V gerilim uygulanarak Şekil 4.23'teki gibi bir kanal spektrumu elde edilmiştir. Analog sistemlerde yapılan ölçüm verileri daha kısa süreli alınsa da elde edilen verilerden yapılan verim hesabında, dedektör veriminin analog sistemde daha iyi olduğu görülmüştür.



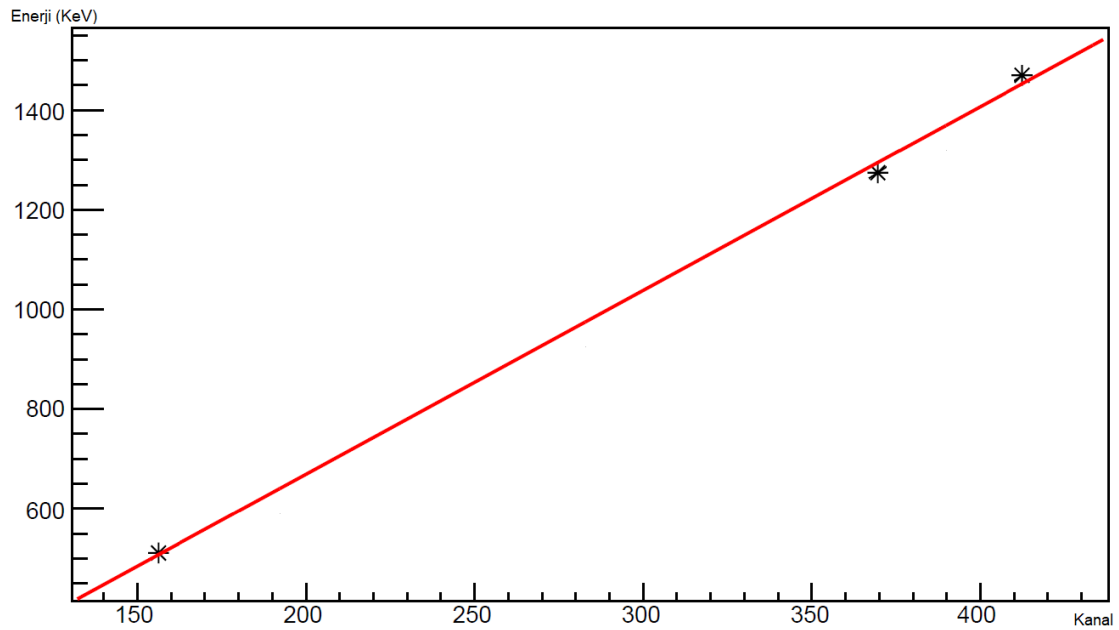
Şekil 4.23. Na-22 radyoaktif nokta kaynağının, LaBr₃:Ce dedektörüne 950V gerilim uygulanırken analog elektronik sistemde elde edilen kanal spektrumu

Çalışmanın bütün kısımlarında elde edilen verilerin görüntülemesi, enerji kalibrasyonu ve çözünürlük hesapları ROOT programı kullanılarak yapılmıştır. Kanal enerji dönüşümü için kullanılan fit grafiği Şekil 4.24'te ve enerji spektrumu da Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Önceki işlemlere benzer olarak enerji spektrumunda görülen Na-22 pikleri için çözünürlük hesabı yapılmıştır. Analog elektronik sistem kullanılarak yapılan testlerde spektrumda görülen 511 keV (Şekil 4.26), 1275 keV (Şekil 4.27) ve 1470 keV (Şekil 4.28)'de enerji piklerine yapılan Gauss fitler gösterilirken hesaplamalardan elde edilen çözünürlük değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. 950V uygulama voltajında analog elektronik ile elde edilen çözünürlük değerleri

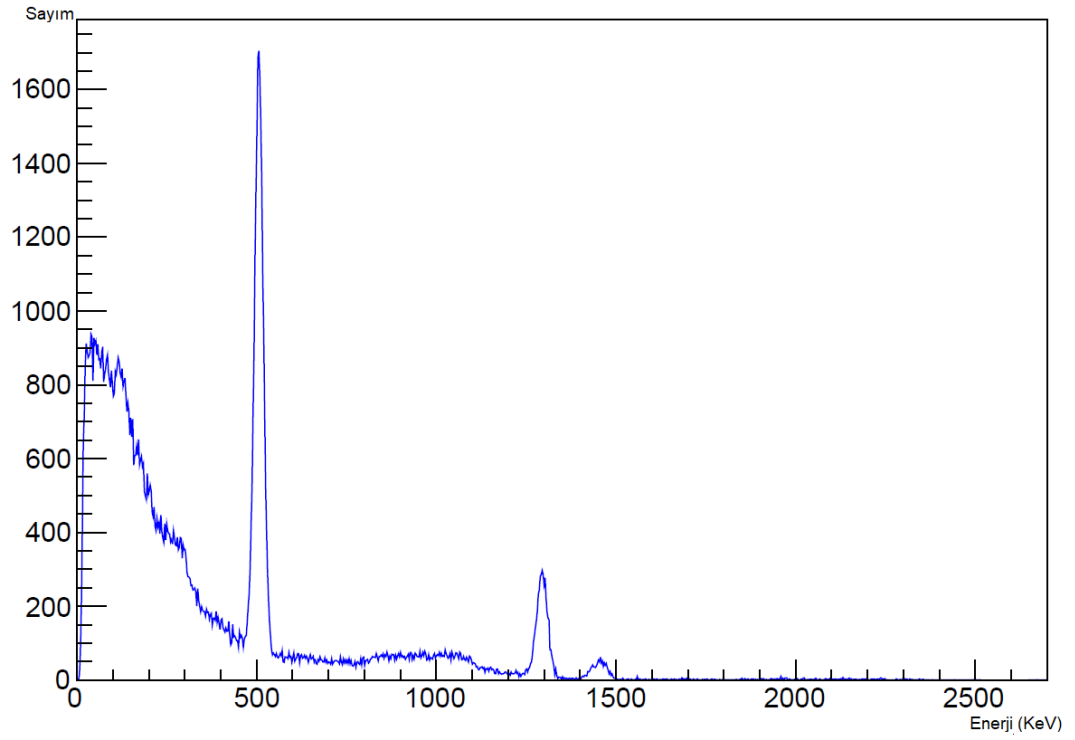
Çizgi Merkezi (keV)	Sigma (σ)	Çözünürlük (%)
506	13,39	6,23
1293	16,16	2,94
1453	20,96	3,72

Alınan verilerden hesaplanan çözünürlük değerleri incelendiğinde ilk dikkat çeken durum, düşük enerji bölgesinde düşük görünen çözünürlük değerlerinin yüksek enerji bölgesinde yüksek olmasıdır. Aradaki farkın nedenlerinden birisi yüksek enerji bölgesindeki düşük çizgi şiddetinden dolayı çizgi profili daha düzgünken düşük enerji bölgesindeki pikin şiddet fazlalığından dolayı çizgi profilindeki bozulmadan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Dedektöre gelen sinyallerin zayıf olduğu da düşünülürse elde edilen çözünürlük değerleri bu durumda bile DCE deneyleri için yeterli görünmektedir.

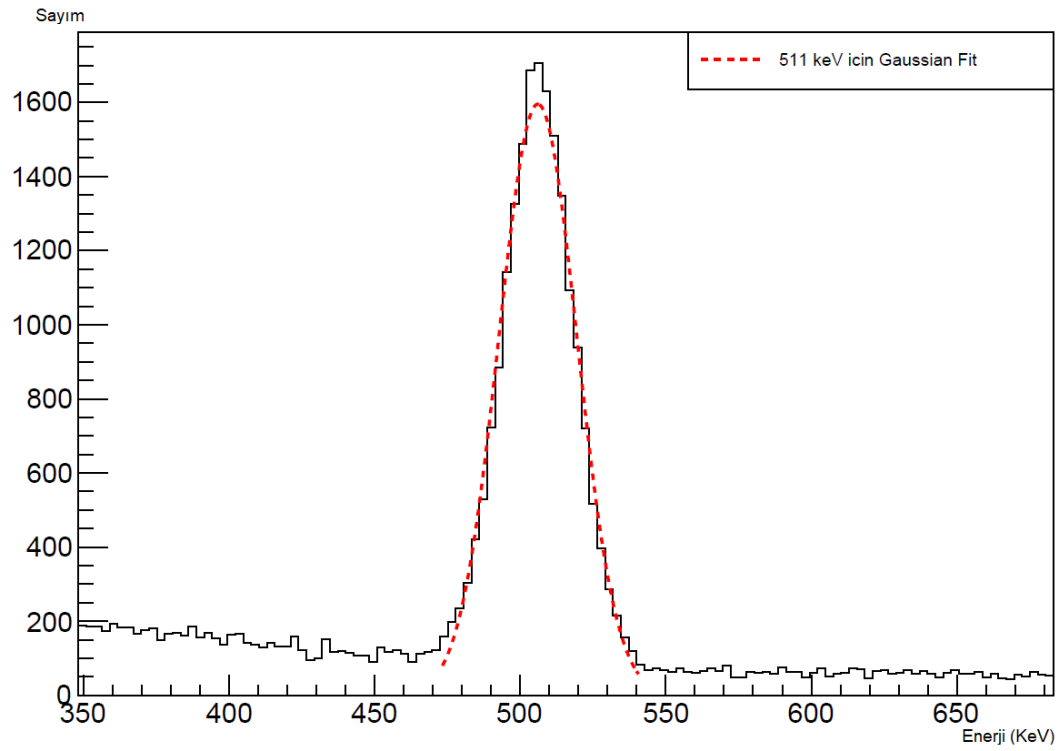


Şekil 4.24. Analog elektronik kullanılarak 950V uygulama voltajında, Na-22 radyoaktif kaynağının enerji değerleri ile elde edilen spektrumdaki piklerin kanal numaralarının lineer eşleştirilme fiti

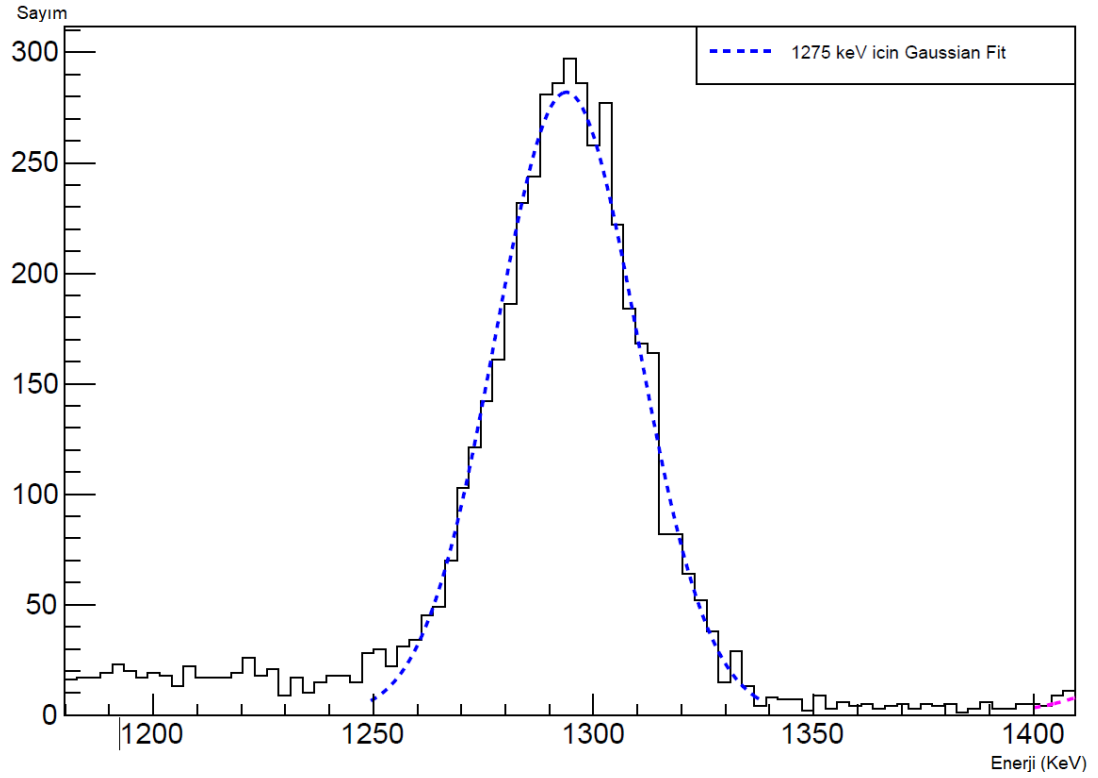
Enerji piklerine yapılan fitlerde çizgi şiddetleri düşük olmasına rağmen çizgi profillerinin düzgün görünmesi ve fitlerin çizgiler ile uyumlu olması verilerin doğru ve analiz edilebilir olduğunu göstermiştir.



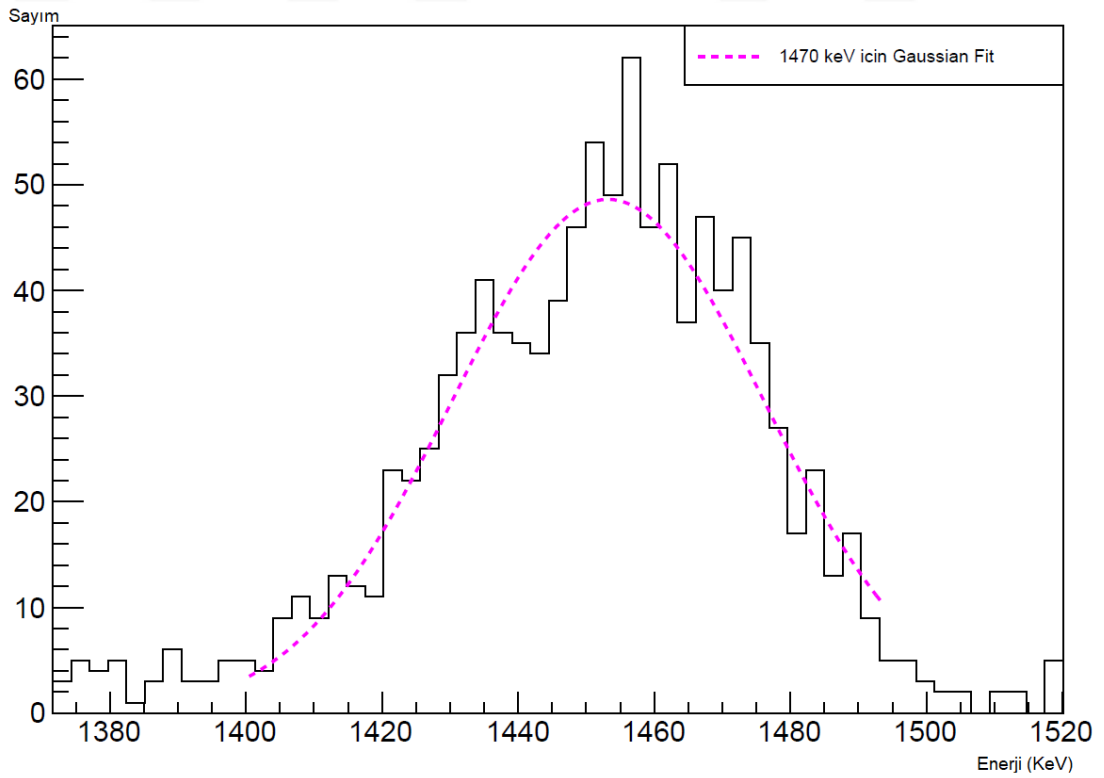
Şekil 4.25. 950V analog elektronik kullanılarak alınmış Na-22 enerji spektrumu



Şekil 4.26. 950V uygulama voltajında analog elektronikte Na-22'nin 511 keV piki için yapılan Gaussian fiti



Şekil 4.27. 950V uygulama voltajında analog elektronikte Na-22'nin 1275 keV piki için yapılan Gaussian fiti

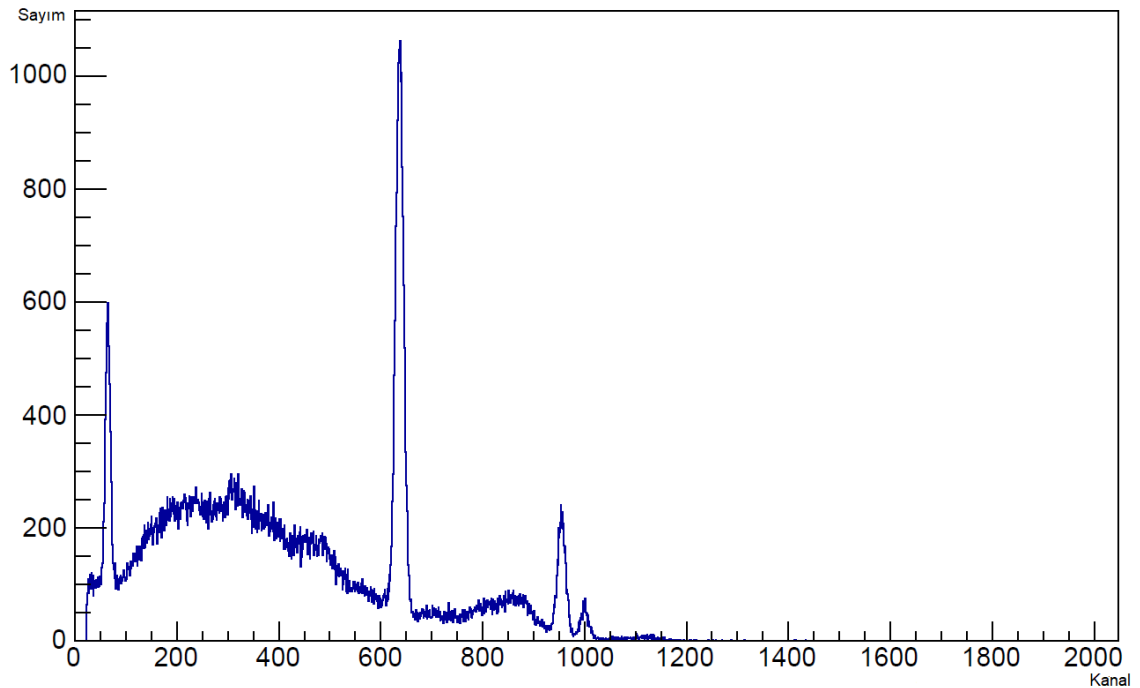


Şekil 4.28. 950V uygulama voltajında analog elektronikte ^{138}La içsel aktivite piki

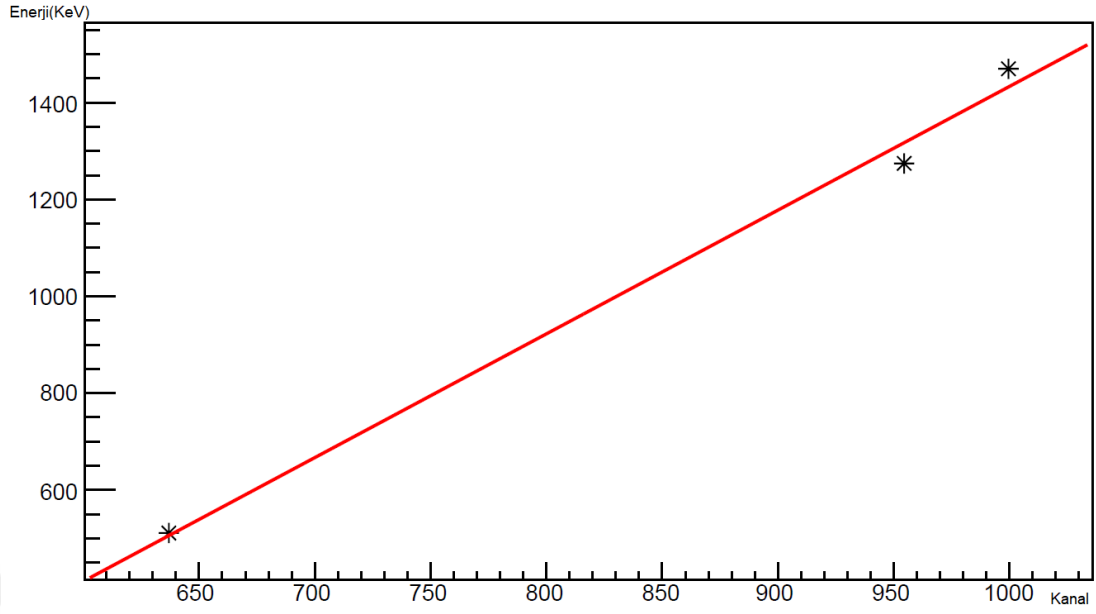
Dedektörün karakteristiklerinin belirlenmesiyle ilgili bu kısımdaki son ölçümde analog sistem kullanılmış olup gerilim 1270V olarak uygulanmıştır. Fotoçoğaltıcı tüp için imalatçı firma tarafından önerilen uygun çalışma gerilimi 1376V olmasına rağmen kristalin yüksek ışık çıkış özelliğinden dolayı çıkış sinyali satüre olmuş bu nedenle spektrumda bazı bozulmalar gözlenmiştir. Şekil 4.29'da gösterilen kanal spektrumunda Compton sırtları nispeten kaybolmuş özellikle düşük enerji bölgesinde ciddi bir arka plan saçılması meydana gelmiştir. Ayrıca, yüksek enerji bölgesinde bulunan 1275 keV ve 1470 keV pikleri birbirine çok yaklaşmıştır. Uygulanan 1270V voltaj değerinde dedektör lineerlikten bir miktar uzaklaşmıştır. Piklerin kanal değerleri, enerji çizgileriyle eşleştirilerek fit grafiği çizilmiştir. Elde edilen fit grafiği Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Her bir enerji piki için önceki ölçümlere benzer olarak Gaussian fitler yapılmıştır. 511, 1275 ve 1470 keV için yapılmış fitler sırasıyla Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te gösterilmiştir. Çizgi ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak yapılan çözünürlük hesaplamalarının sonucu Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. 1270V uygulama voltajında analog elektronik ile elde edilen çözünürlük değerleri

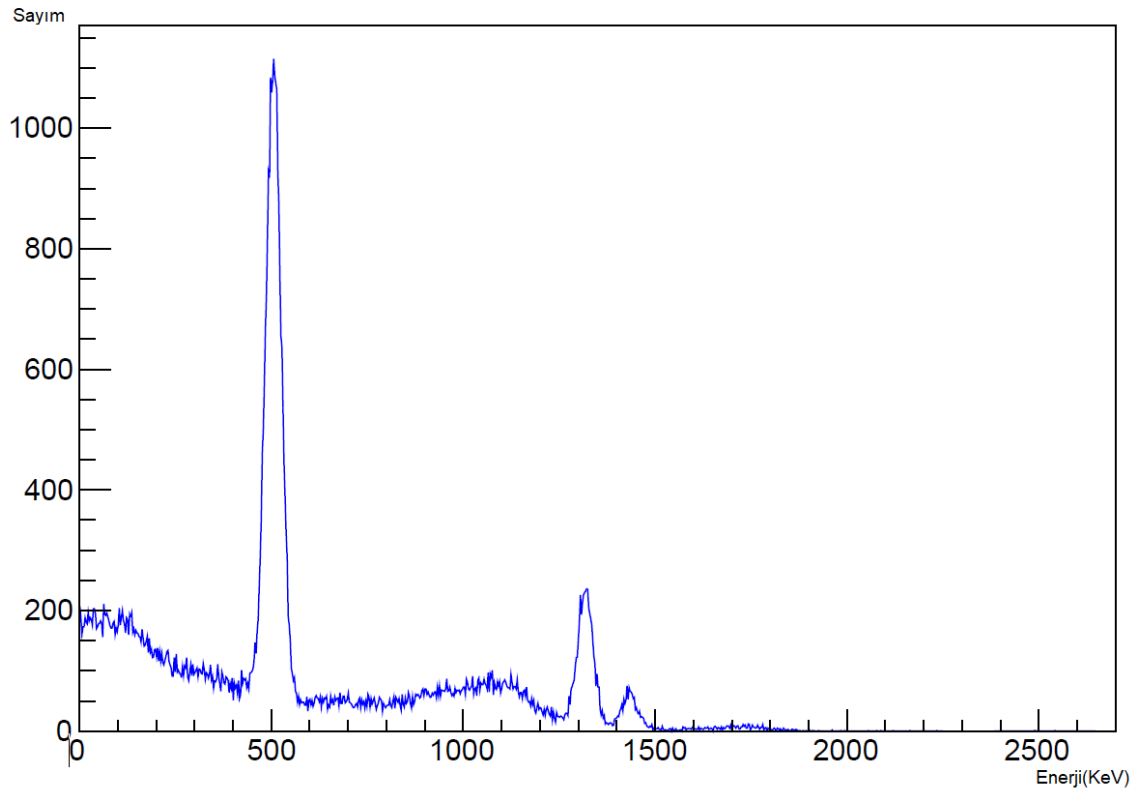
Çizgi Merkezi (keV)	Sigma (σ)	Çözünürlük (%)
505	21,56	10,04
1317	21,78	3,89
1432	23,09	3,79



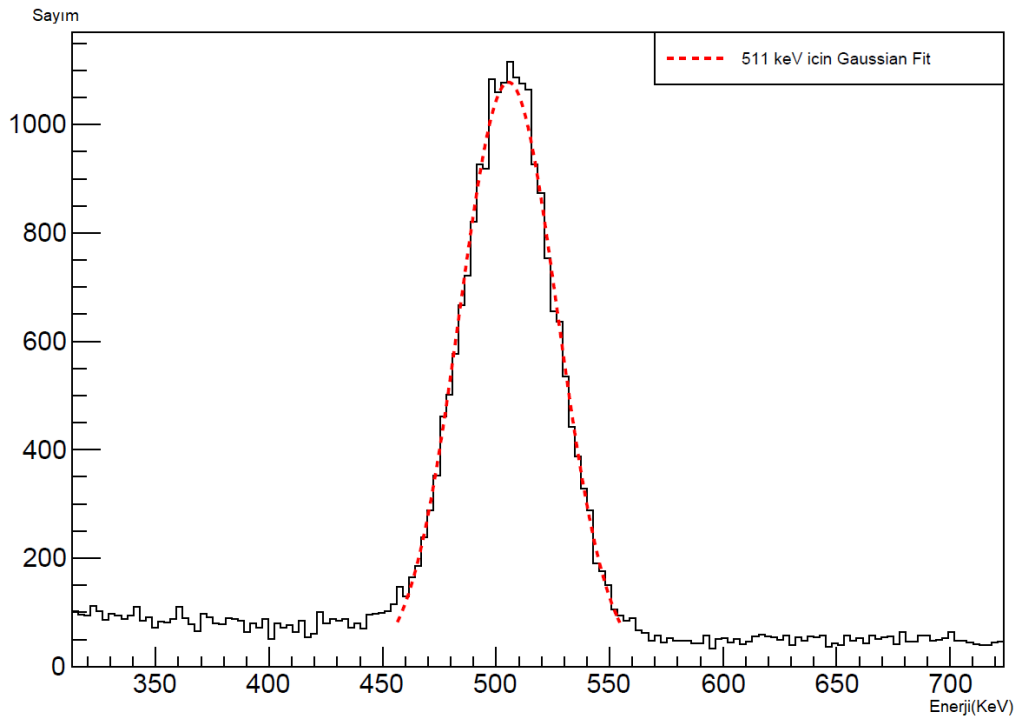
Şekil 4.29. Analog sistem kullanılarak 1270V'da elde edilen kanal spektrumu



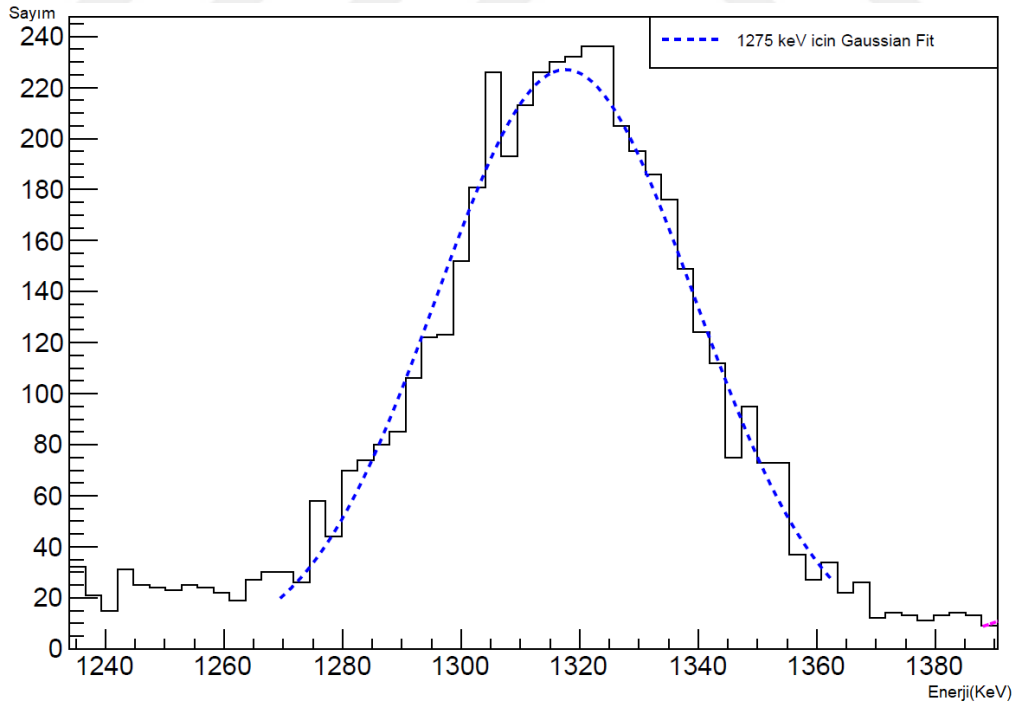
Şekil 4.30. Analog sistem için 1270V gerilimde enerji-kanal eşleştirmesi lineer fiti



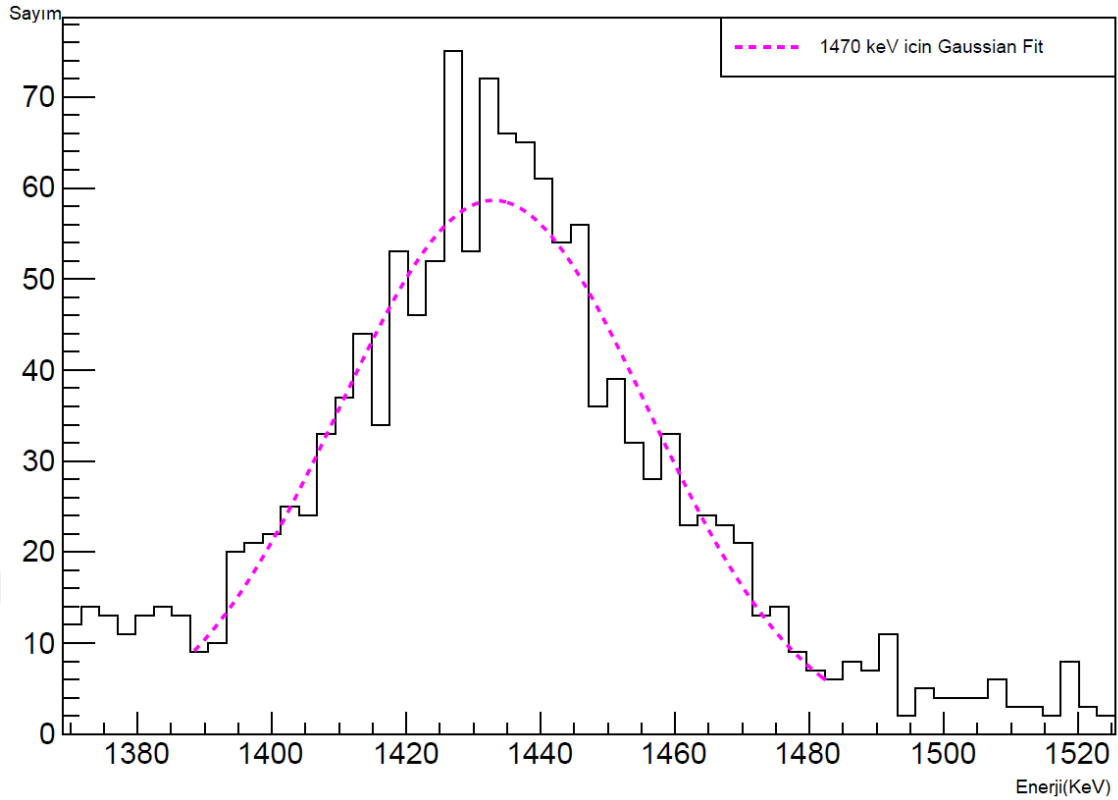
Şekil 4.31. 1270V analog elektronik kullanılarak alınmış Na-22 enerji spektrumu



Şekil 4.32. Analog sistemde 1270V uygulama voltajında Na-22'nin 511 keV piki için yapılan Gaussian fiti



Şekil 4.33. Analog sistemde 1270V uygulama voltajında, Na-22'nin 1275 keV piki için yapılan Gaussian fiti



Şekil 4.34. 1270V uygulama voltajında analog elektronikte ^{138}La içsel aktivite piki

$\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü ile özelliklerini belirlemeye yönelik yapılan ilk testlerde dedektörün çalışma gerilimine ve elektronik sistemdeki farklılıklara karşı çizgi merkezindeki sapmalar ve çözünürlük değişimi incelenmiştir. Yukarıdaki hesaplanan değerler özet olarak Çizelge 4.6’da verilmiştir. Burada elde edilen veriler karşılaştırıldığında, dedektörün çalışma geriliminin ve çalıştırıldığı elektronik sistemin doğrudan dedektör verimini etkilediği görülmüştür. Özellikle voltajın artması ile çizgi merkezlerinde kaymalar gözlenirken çizgi profillerinin değişmesine bağlı olarak çözünürlük değerlerinde farklılaşmalar meydana gelmiştir. Elde edilen çözünürlükler değerlendirildiğinde genel olarak yüksek enerji bölgesinde daha düşük çözünürlük değerleri gözlenmiştir. Enerji çözünürlüğü belirlemeye yönelik çalışmalardan birisi Van Loef vd. (2001) tarafından yapılmıştır. Çalışmada 622 KeV enerjide %2,85 enerji çözünürlüğü rapor etmişlerdir. Bir diğer karakterizasyon işlemi Prosper vd. (2012) tarafından yapılmıştır. Çalışmada $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ karakterizasyonu yapılırken farklı enerjilerde dedektörün çözünürlük değerleri belirlenmiş ve 200 KeV civarında %7,5 ölçülen çözünürlük değeri 900 KeV bölgesinde %2 civarında ölçülmüştür. Aynı çalışma da 662 KeV için %2,6 çözünürlük rapor edilmiştir.

Dedektörün lineer olarak maksimum verimde çalışabileceği gerilimi belirlemek amaçlı yapılan ölçümlerde çizgi profillerinin yapısı ve hesaplanan enerji çözünürlük değerleri dikkate alınarak yapılan değerlendirmelerde 950V’un en verimli çalışma gerilimi olduğu saptanmıştır. Ayrıca voltaj değişimi ile ortaya çıkan, dedektörün lineer olmayan

cevapları deney düzeneğinin Şekil 4.35'te görülen simülasyonu yapılarak elde edilmiş spektrumlarda çok daha net ortaya çıkmıştır.

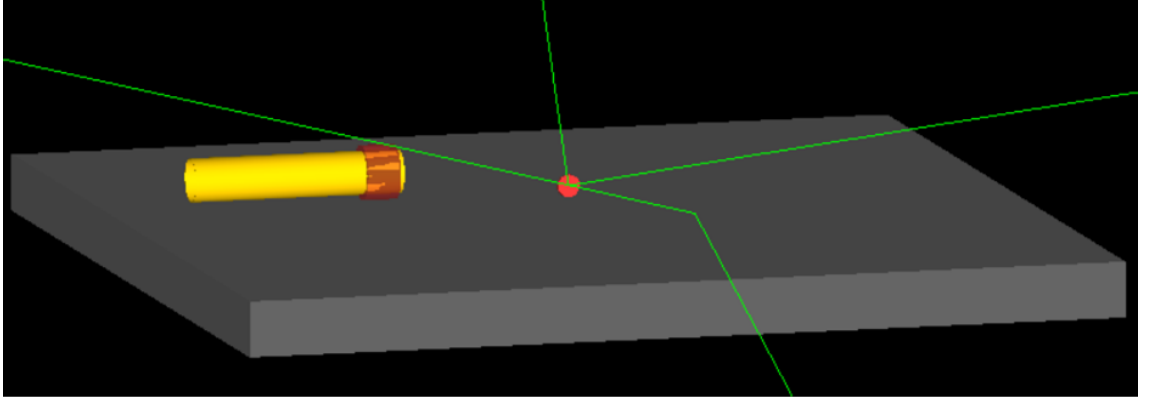
Çizelge 4.6. Farklı elektronik sistemlerin dedektör özelliklerine etkisi

Test No	Kullanılan Elektronik	Çalışma Gerilimi (V)	Çizgi Merkezi (keV)	Gaussian Merkezi (keV)	Hesaplanan Çözünürlük FWHM(%)
1	Dijital	900	511	508	5.68
1	Dijital	900	1275	1286	3.28
1	Dijital	900	1470	1460	3.91
2	Dijital	950	511	507	5.97
2	Dijital	950	1275	1293	3.03
2	Dijital	950	1470	1453	3.42
3	Dijital	980	511	507	6.27
3	Dijital	980	1275	1297	2.95
3	Dijital	980	1470	1450	3.28
4	Analog	950	511	506	6.23
4	Analog	950	1275	1293	2.94
4	Analog	950	1470	1453	3.72
5	Analog	1270	511	505	10.04
5	Analog	1270	1275	1317	3.89
5	Analog	1270	1470	1432	3.79

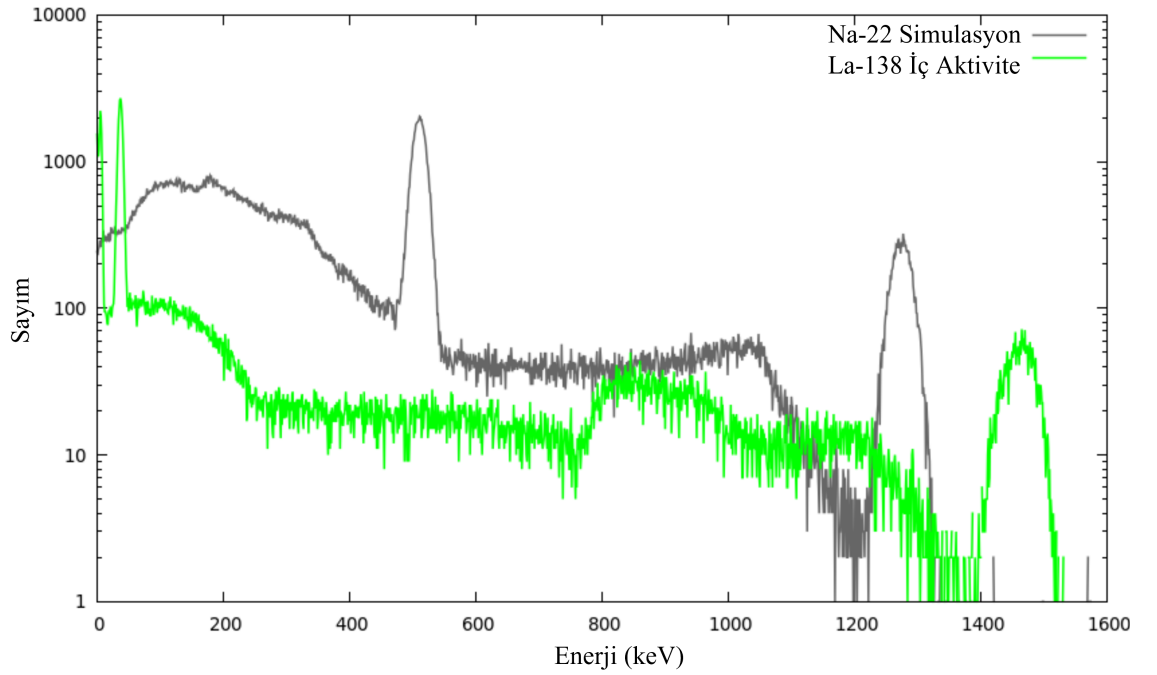
4.2. Simülasyon Karşılaştırmaları

Yapılan simülasyonda, LaBr₃:Ce kristali 3,81x3,81cm boyutlarında kullanılarak dedektör simüle edilmiş, 45.7 kBq aktiviteye sahip Na-22 nokta kaynağı ile aralarında 20 cm'lik mesafe olacak şekilde düz bir zeminde konumlandırılmış ve ölçümler 20 dakika sürelerle alınmıştır. Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'da gösterilen simülasyon spektrumu ile 950V gerilimde alınan enerji spektrumu karşılaştırıldığında 511 keV bölgesinde uyum gözlenirken 1275 keV ve La-138'in iç aktivitesi olan 1470 keV bölgesinde çizgi merkezlerinde ciddi kaymalar gözlemlenmiştir. Kısımdaki sorunu çözmek için Pani vd. (2011) tarafından önerilen spektrumun farklı bölgelerinde farklı fit parametreleri kullanma yöntemi ile kalibrasyonlar düzeltilmiştir. Bu kısımda yapılan kalibrasyonda pik ve Compton sırtı bölgeleri ayrı fit alanları olarak seçilmiş ve Denklem 4.1 kullanılarak farklı bölgeler için parametreler aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

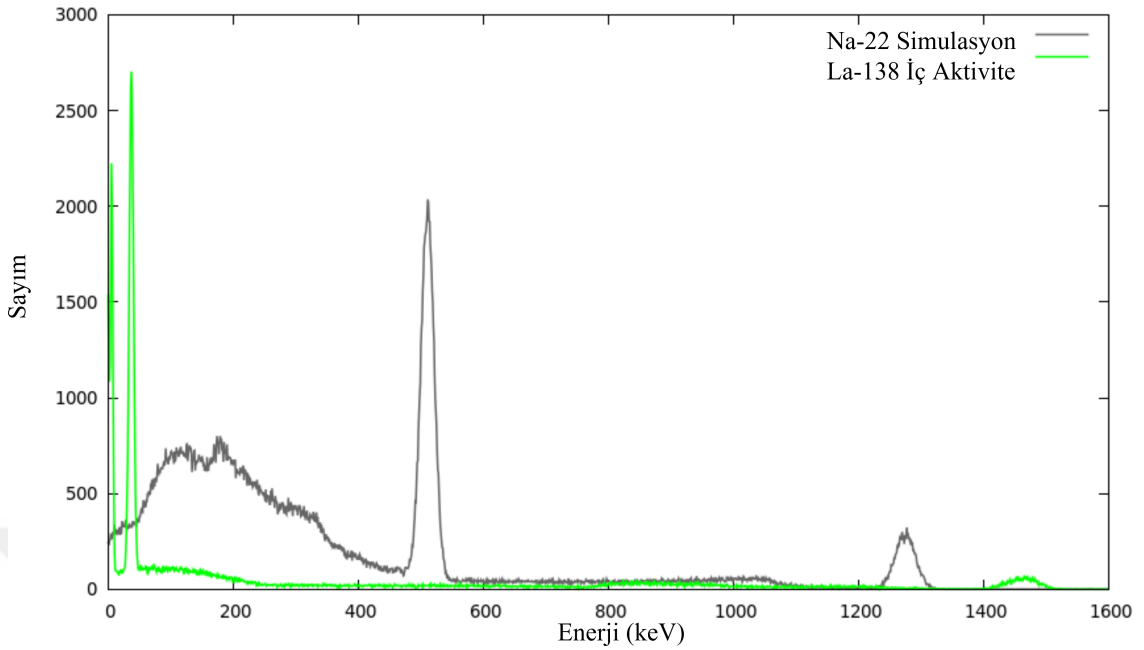
$$E = a_0 + a_1 \times (\text{kanal no}) \quad (4.1)$$



Şekil 4.35. LaBr₃:Ce dedektörü ile Na-22 nokta kaynağının GEANT4 ile yapılmış simülasyon görüntüsü



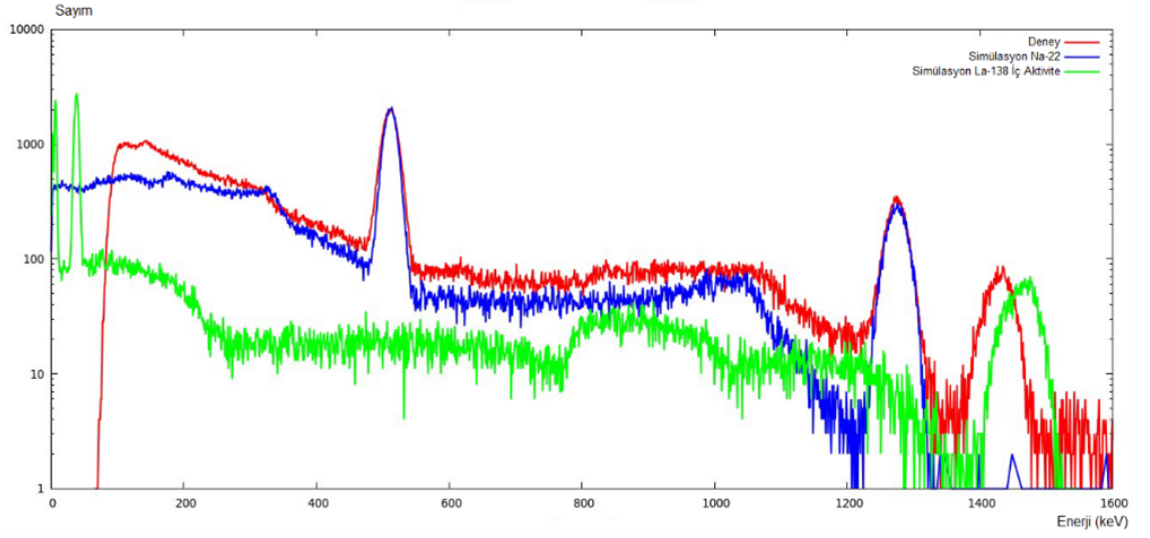
Şekil 4.36. Simülasyondan elde edilen Na-22 enerji pikleri ile ve La-138 iç aktivitesinin spektrumu (logaritmik)



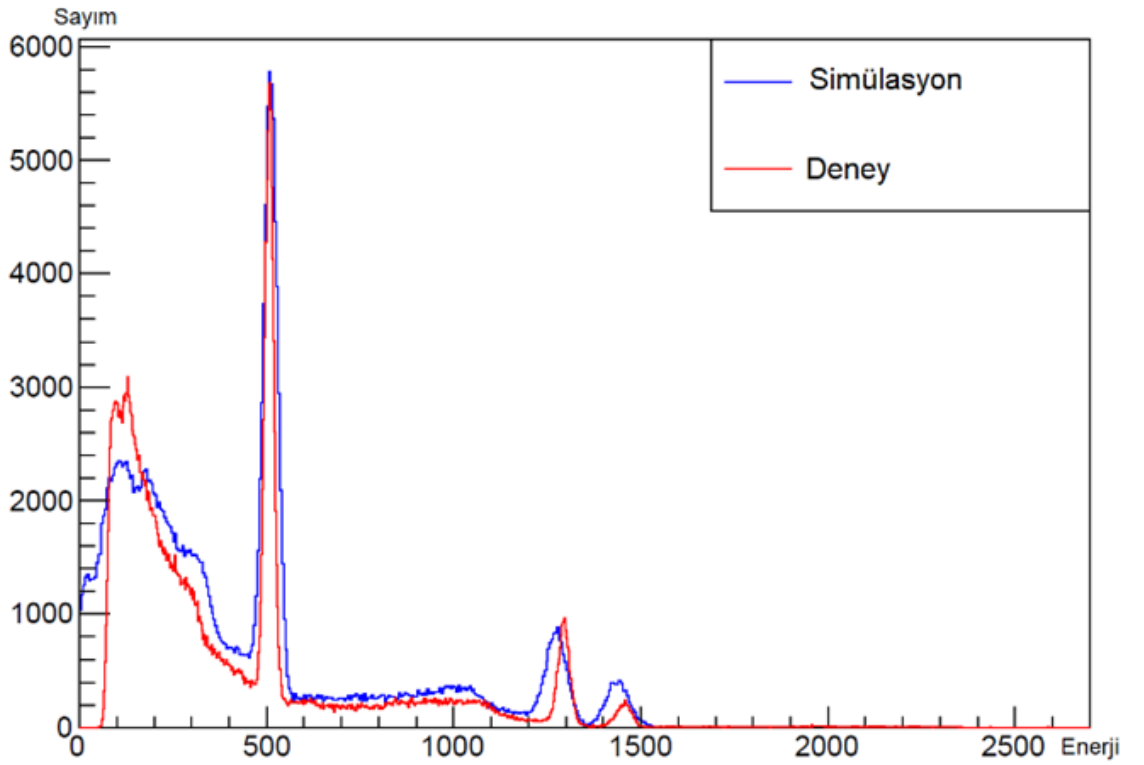
Şekil 4.37. ^{22}Na kaynağının $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ kristali ile etkileşiminin simülasyonundan elde edilen enerji spektrumu

- 1. Bölge: Kanal 100 ile 406 arası
 $a_0 = 4,647$
 $a_1 = 0,823529$
- 2. Bölge: Kanal 407 ile 606 arası
 $a_0 = -9,473$
 $a_1 = 0,858283$
- 3. Bölge: Kanal 607 ile 913 arası
 $a_0 = -40,812$
 $a_1 = 0,909980$
- 4. Bölge: Kanal 914 ile 1443 arası
 $a_0 = -43,990$
 $a_1 = 0,913462$
- 5. Bölge: Kanal 1444 ile 1622 arası
 $a_0 = -339,616$
 $a_1 = 1,118274$

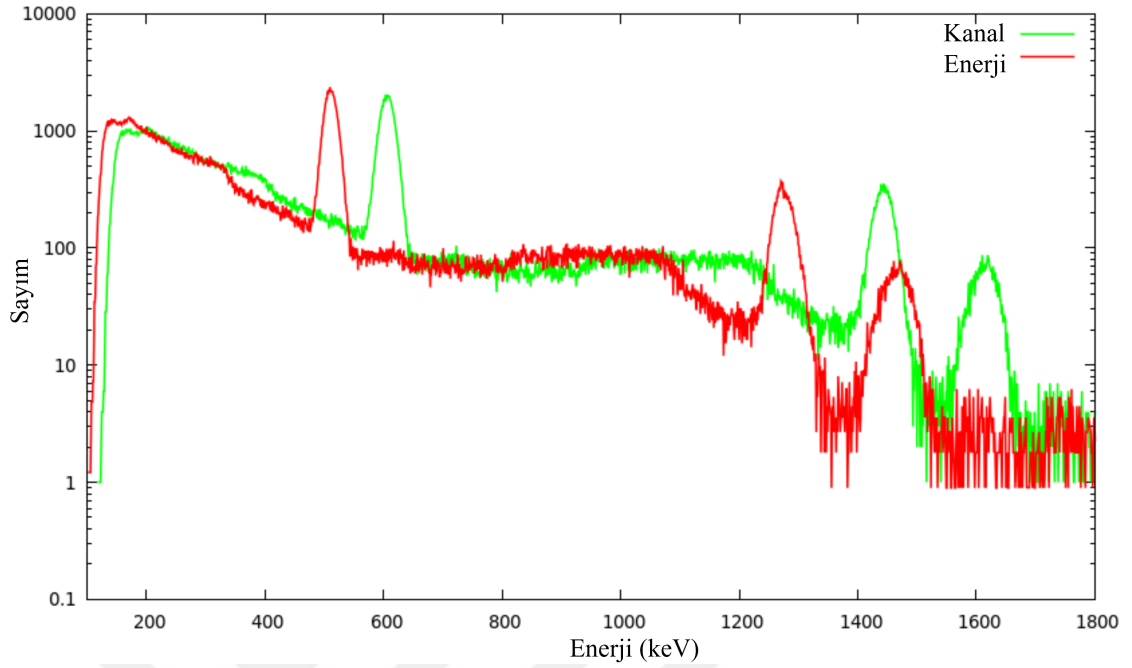
Elde edilen deneysel verilerin kalibrasyonu, yukarıdaki verilen parametreler dikkate alınarak yapıldığında çizgi merkezlerinin simülasyon ile uyum sağladığı görülmüştür (Şekil 4.39).



Şekil 4.38. Deneysel sonuçların simülasyon ile karşılaştırılması (logaritmik)

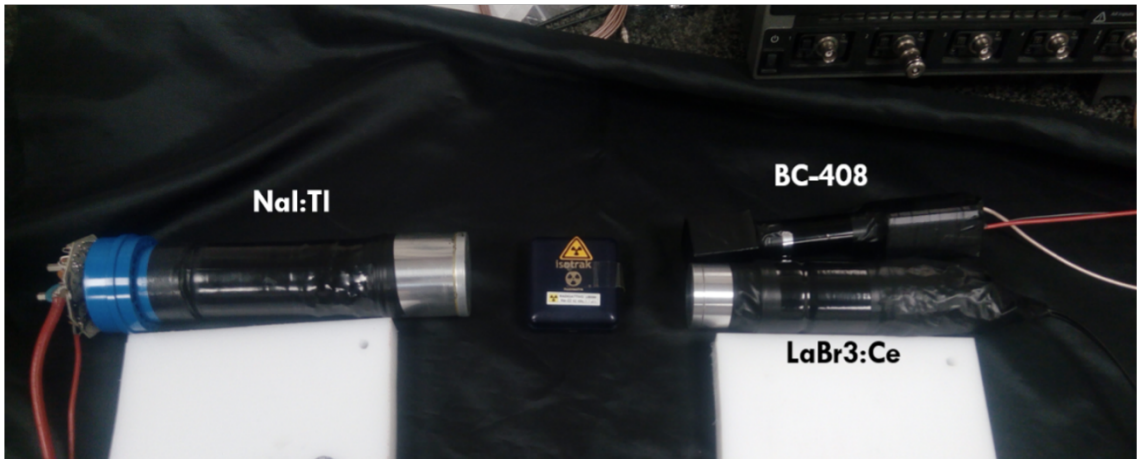


Şekil 4.39. Deney sonuçlarının simülasyon ile karşılaştırılması

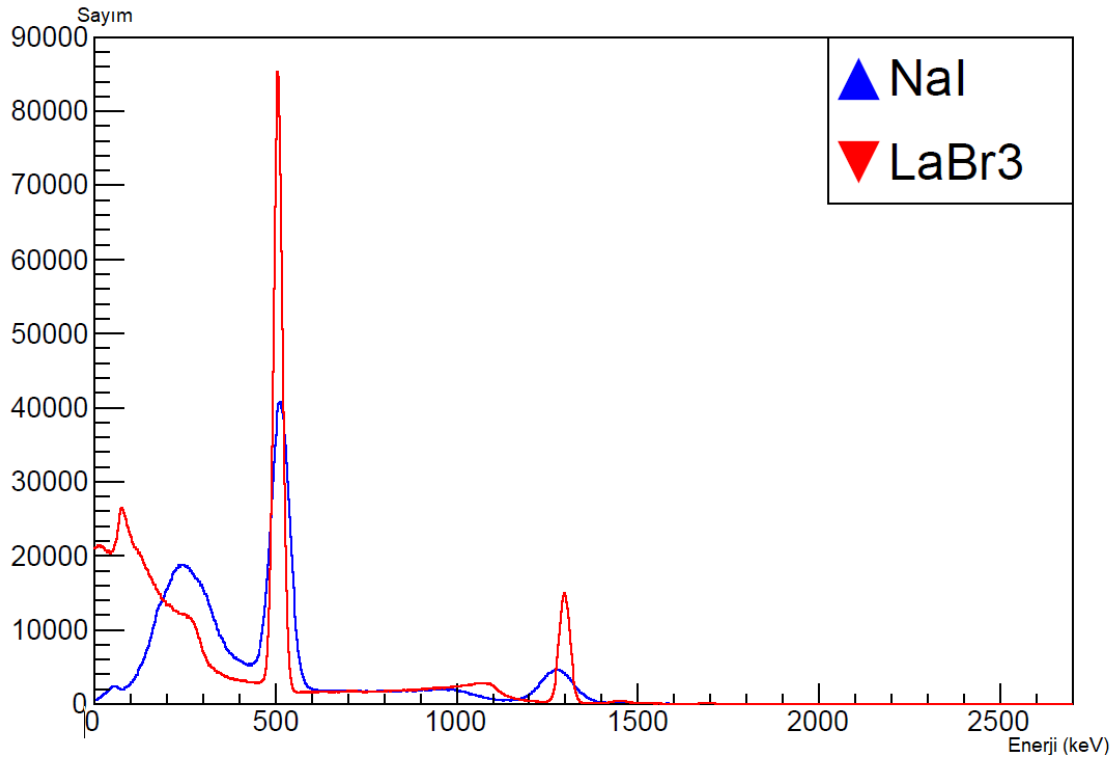


Şekil 4.40. ^{22}Na nokta kaynağının, $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü ile 950V gerilimde elde edilen kanal ve enerji spektrumları (logaritmik)

Çalışmanın bir diğer bölümünde ise Şekil 4.41’teki düzenek kurularak $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ ile elde edilen spektrum NaI:Tl spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.42’de görüldüğü gibi $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü ile elde edilen enerji spektrumun çözünürlüğü NaI:Tl ile elde edilen çözünürlükten daha yüksektir. Ayrıca çalışmanın bu aşamasında BC-408 plastik sintilatörü ile eş zamanlı ölçümler alınarak $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ ’ün zaman çözünürlüğü hesaplanmıştır.



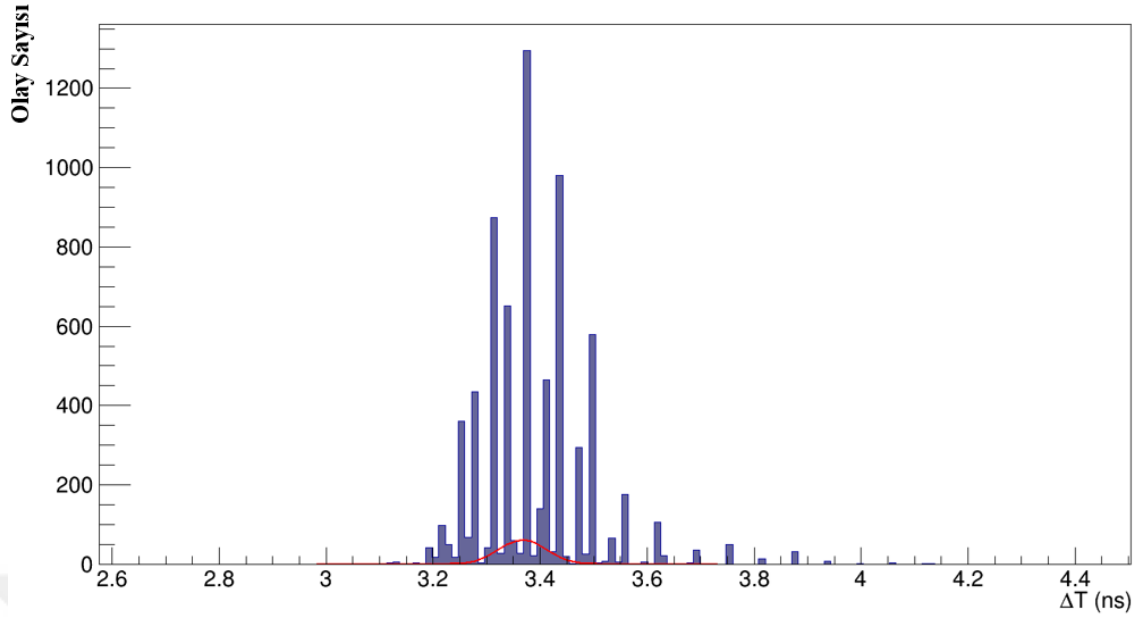
Şekil 4.41. $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ ve NaI:Tl sintilatörlerinin çözünürlüklerinin karşılaştırmak ve $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ ’ün zaman çözünürlüğünü hesaplamak için kurulan düzenek



Şekil 4.42. LaBr₃:Ce ve NaI:Tl dedektörleri ile alınmış ²²Na enerji spektrumlarının karşılaştırılması

4.3. Zaman Çözünürlüğü

LaBr₃:Ce dedektörünün zaman spektrumunu çıkarabilmek için BC-408 plastik sintilatörü ile eş zamanlı ölçümleri alınmıştır. Plastik sintilatörler, zaman çözünürlüğü bakımından diğer dedektörlere kıyasla çok iyidir (≈ 1 ns). Bölüm 3'te anlatıldığı gibi iki dedektörden analizöre giden sinyaller arasındaki zaman farkı LaBr₃:Ce dedektörünün zaman çözünürlüğünün hesaplanmasında kullanılmıştır. Çalışmanın bu aşamasındaki en büyük zorluk plastik sintilatörün ışık çıkışının düşüklüğü olmuştur. Yapılan ölçümde 8 saatlik veri alınmış ve Şekil 4.43'de gösterilen olay-zaman grafiği elde edilmiştir. Elde edilen spektruma Gaussian fit edildiğinde, fitin sigma değeri 4,41 olarak bulunmuştur. Daha sonra bu değer kullanılarak LaBr₃:Ce dedektörünün zaman çözünürlüğünü 10 ns olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.43. LaBr₃:Ce ile BC-408 dedektörleri kullanılarak alınmış zaman spektrumu

4.4. Verim Hesabı

Yapılan ilk testlerde kullanılan ²²Na radyoaktif kaynağının aktivitesi 45.7 KBq'dır. Bu değer dikkate alınarak dijital elektronikte 900, 950 ve 980 uygulama voltajları için 20'şer dakikalık ölçümler yapılmıştır. Bu da kaynak tarafından 4π katı açısı boyunca salınan 54840000 gama ışınına karşılık gelmektedir. Bu durumda kaynak ile dedektör arası mesafe 20 cm ayarlanıp dedektörün kaynağa bakan dairesel alanın çapı 3,81 cm bilinmesinden yola çıkarak Denklem 3.13 ile dedektöre gelen gama ışını sayısı 16178896 olarak hesaplanmıştır. Analog elektronik devre için de 950 ve 1250 V gerilimlerde 5'er dakikalık ölçümler alınmıştır. Katı açı hesabı ile dedektöre gelen gama ışını sayıları sırasıyla 4044723 ve 4314372 olarak hesaplanmıştır. Dedektör tarafından algılanan gama ışınlarının sayısını belirlemek için enerji spektrumları üzerindeki piklerin alanları kullanılmıştır. Verim hesabında Denklem 4.2 kullanılmış olup elde edilen veriler Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Dedektör verimi ölçüm değerleri

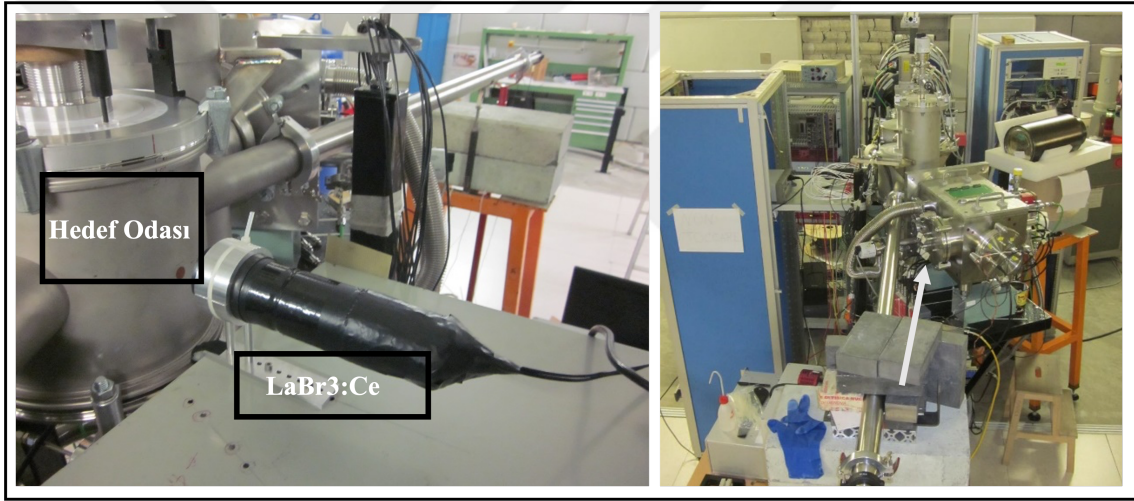
Çalışma Gerilimi (V)	511 keV Sayım	1275 keV Sayım	1470 Sayım	511 keV Verim (%)	1275 keV Verim (%)	1470 keV Verim (%)
900	68105	14337	4204	0.421	0.089	0.026
950	68199	14399	4176	0.421	0.089	0.026
980	68215	14030	4397	0.422	0.087	0.027
950	20158	4356	1040	0.498	0.108	0.026
1250	21727	4650	1233	0.504	0.108	0.029

$$\varepsilon_{\text{pik}} = \frac{\text{Enerji piki altında kalan alan}}{\text{Dedektöre gelen gama ışını sayısı}} \quad (4.2)$$

Çizelge 4.7'deki veriler dikkate alındığında farklı gerilimler altında dedektör veriminde farklılık gözlenmezken analog elektronik sistemde dedektörün nispeten daha verimli çalıştığı görülmüştür. Beklenildiği üzere verim farklılığı özellikle enerji pikinin güçlü olduğu 511 keV bölgesinde belirgin hale gelmiştir. Lantanyumun iç aktivitesinden kaynaklı 1470 keV bölgesi çizgi şiddeti açısından da zayıf kaldığı için bu bölgeden elde edilen verilerden yola çıkarak verim farkı görmek zorlaşmıştır.

4.5. DCE testleri

Dedektörün kurulumu ve ilk ölçümlerden sonra, ağır iyon çarpışma testlerindeki etkinliğini ölçmek için Şekil 4.44'te gösterilen LNS'deki deney düzeneği kurulmuştur.

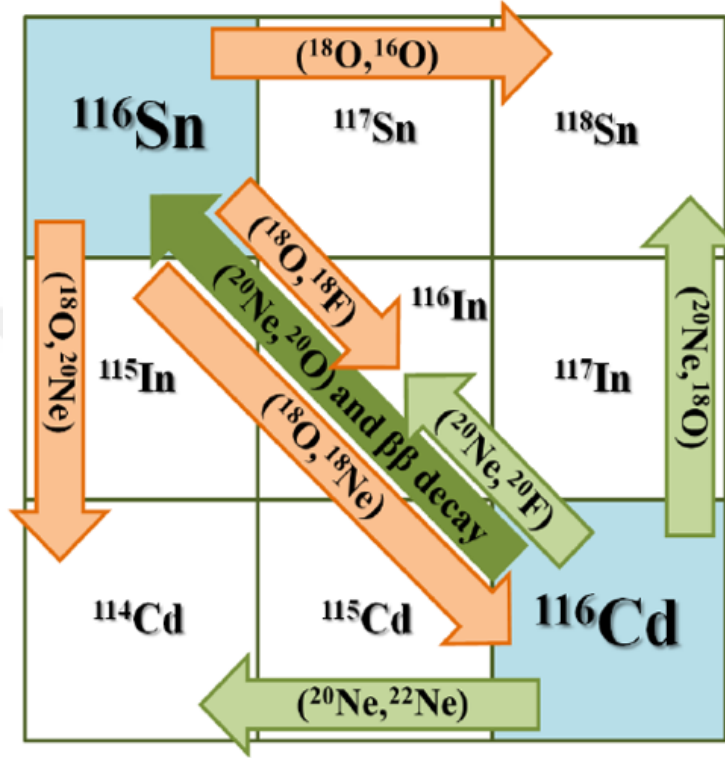


Şekil 4.44. LaBr₃:Ce dedektörünün ağır iyon çarpışmalarındaki test düzeneği

Burada düzeneğin iki farklı açıdan çekilmiş fotoğrafları gösterilmekte olup her iki açı için de beyaz ok işareti ile gösterilen doğrultu, bu çalışmanın giriş bölümünde de anlatılan Magnex düzeneğinin bulunduğu odada, Şekil 1.1'de de gösterilen iyon demetlerinin test bölümüne gelen ışın doğrultusudur. LaBr₃:Ce dedektörü burada hedef odasının hemen yanına konuşlandırılmış, bu sayede iyon demeti ile hedef çekirdeğin çarpışması sonrası saçılacak gama ışınlarının dedektasyonu amaçlanmıştır.

Çalışmanın bu bölümünde, K800 süperiletken hızlandırıcısı kullanılarak nükleon başına 16,28 MeV enerjiye hızlandırılan ²⁰Ne mermi çekirdekleri, hedef odasında bulunan, 1380 µg/cm² yüzey yoğunluğuna sahip ¹¹⁶Cd ve 2443 µg/cm² yüzey yoğunluğuna sahip yüksek oranda yönlendirilmiş pirolitik grafit (HOPG) hedeflerine çarptırılarak saçılan gama ışınları dedekte edilmiştir. Hedef olarak ¹¹⁶Cd atomunun seçilmesinin nedeni çekirdek kabuk modeline göre son yörüngesinde 2 proton ve 2 nötron barındırması olmuştur.

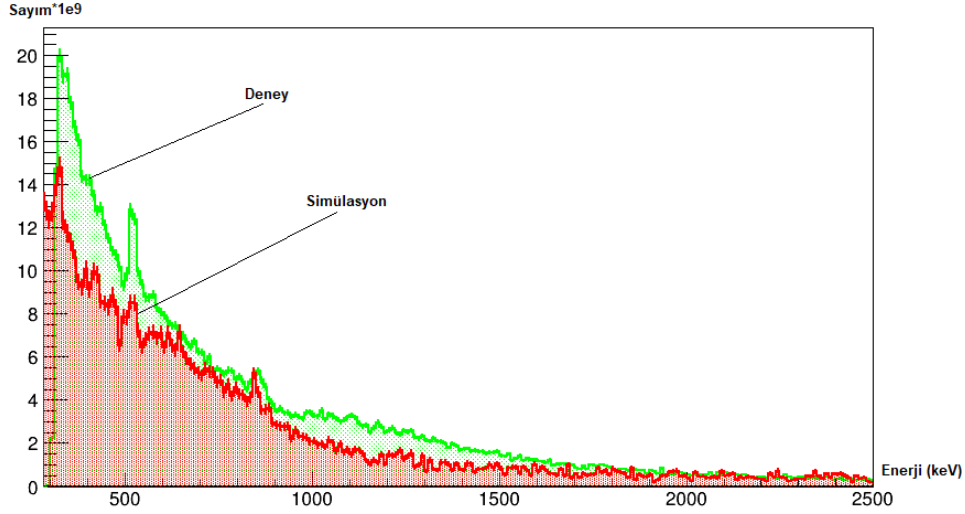
Sahip olduğu nükleon dizilimi gelen iyonla etkileşimi sonrası DCE reaksiyon gerçekleştirme olasılığını artırmakla birlikte ilgili çekirdeklerin çarpıştırılması ile gerçekleştirilen deneylerde teşvik edici ön sonuçlar bulunmuştur (Carbone vd. 2020). Bu çalışma kapsamında dedektör tarafından algılanan sinyaller kullanılarak çizilen Enerji-Sayım grafikleri Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’te gösterilmiştir.



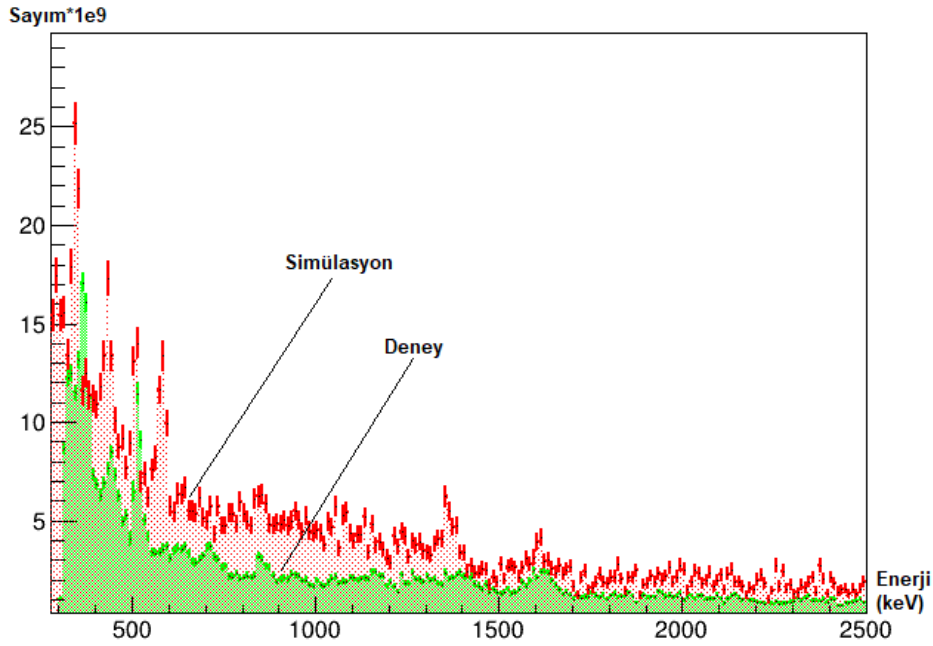
Şekil 4.45. ^{20}Ne çekirdeklerinin hızlandırılarak ^{116}Cd 'ye çarpıtılması sonucu meydana gelebilecek reaksiyonların şematik gösterimi (Cappuzzello vd. 2021)

DCE reaksiyonlarındaki en önemli unsur olan, elastik saçılma, inelastik saçılma, proton yakalama, nötron yakalama ve tek yük değişimi gibi yan reaksiyonlardan gelen sinyaller yüksek bir arka plan oluşturmaktadır. $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü test edilirken, ilk aşamada reaksiyon ayırt etmeksizin sadece dedektörün yaptığı gama ışını sayımı incelenmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde HOPG ve ^{116}Cd hedeflerinin her ikisinde de $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörünün verdiği enerji spektrumu, simülasyon ile uyumlu görülmektedir. NUMEN kapsamında yapılan deneylerde çarpışma esnasında meydana gelen yüksek sıcaklık hedefi oluşturan yüzey materyalinin delinmesine yol açmaktadır. Dolayısıyla hedef arkasına sıcaklığı yaymak için karbon kaplanmaktadır. Dolayısıyla deney sırasında karbondan saçılan çekirdekler ekstra arka plan saçılmaları meydana getirmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılmış olan $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü ile yapılan testlerde, yüksek arka plan saçılmasına rağmen simülasyon ile uyumlu enerji piklerinin görülmesi dedektörün DCE reaksiyonları için verimli çalışabileceğini göstermiştir. Ancak test aşamasında MAG-NEX spektrometresi çalıştırılmadığı için algılanan sinyallerin hangi reaksiyondan geldiği

net olarak belirlenememiştir. Ek olarak mermi-hedef etkileşiminden sonra saçılmalar her yönde olabileceği için tek bir $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü bütün süreçleri açıklamak için yetersiz kalmaktadır. NUMEN düzeneğinin bu noktada geliştirilebilmesi için hedef odası etrafını katı açılı olarak sarabilecek gama ışını dedektör dizisinin yapılması bütün açılarda saçılacak parçacıkların tanımlanması için uygun görülmüştür.



Şekil 4.46. Hızlandırılan ^{20}Ne iyonlarının ^{116}Cd hedefe çarptırılmasından sonra saçılan gama ışınlarının $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü ile tanımlanması



Şekil 4.47. Hızlandırılan iyonların HOPG hedefe çarptırılmasından sonra saçılan gama ışınlarının $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ dedektörü ile tanımlanması

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ kristalli inorganik sintilasyon dedektörü yapılmıştır. Yapılan dedektör ilk olarak Akdeniz Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarı'na ait yüksek voltaj modülleri ile V1725 sayısallaştırıcısına bağlanıp nokta kaynaklar kullanılarak ilk sinyaller osiloskopta gözlenmiştir. Dedektöre gelen sinyallerin anlamlı verilere dönüşebilmesi için yüksek voltaj modülleri yanısıra, yüksek ışık çıkışından dolayı örneklem oranı yüksek sayısallaştırıcı devreler kullanılarak bilgisayara aktarılması gerekliliği farkedilmiştir. Sistem daha sonra INFN-LNS'de NUMEN gurubunun deney ekipmanları ile test edilmiş, burada, Na-22 nokta kaynağından alınan enerji spektrumları üzerinden çözünürlük ve verimlilik parametreleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda 511 keV için ortalama çözünürlük değeri %6,84, 1275 keV için %3,22 ve ^{138}La 'nın iç aktivitesi olan 1470 keV için ise %3,62 olarak bulunmuştur. Yüksek verim için analog elektronik sistem uygun görülürken, dedektör sisteminin 950V üzerindeki çalışma gerilimlerinde lineerlikten uzaklaştığı belirlenmiştir. Bu durum, dedektör ve deney sisteminin simülasyonu yapılarak elde edilen enerji spektrumları deney spektrumları ile karşılaştırıldığında daha net görülmüştür. Ek olarak $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ dedektöründen alınan enerji spektrumu, NaI:TI 'dan alınan enerji spektrumu ile karşılaştırılmış ve her iki dedektör arasındaki çözünürlük farkı gösterilmiştir. Ayrıca bu aşamada BC-408 plastik sintilatörü ile eş zamanlı ölçümler alınarak yapılan hesaplamada dedektörün zaman çözünürlüğü 10 ns olarak bulunmuştur. Yapılan ilk testlerde karakteristiği ve verimliliği ortaya konulan $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ dedektörü ile bundan sonraki yapılacak çalışmalarda daha fazla nokta kaynak ile enerji kalibrasyonları yapılarak çizgi merkezlerinin konumlarının daha doğru belirlenmesi planlanmaktadır.

Çalışmanın bir diğer kısmı olan ağır iyon çarpışma deneyleri için kullanılacak dedektörde aranılan esas özellik, mermi ile hedefin çarpıştığı andan itibaren hedef odası etrafında saçılan gama ışınlarını tanımlamak olduğu için $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ dedektörü ilk aşamada tek olarak hedef odası civarına konumlandırılarak kullanılmıştır. Çarpışma sonrası saçılan gama ışınlarının bir katı açı şeklinde her doğrultuda dağıldığı düşünüldüğünde tek bir dedektörün sadece bir doğrultuda alabildiği gama ışınları açısından, elde edilen veriler oldukça motivasyon artırıcı olmuştur. Sadece bir dedektör tarafından yakalanan gama ışınlarında bile yoğun arka plan saçılmasına rağmen enerji spektrumunda simülasyonla uyumlu pikler görülebilmektedir. Magnex spektrometresi geliştirilirken $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ dedektörleri küme olarak katı açıyı saracak şekilde yerleştirileceği için bu çalışma kapsamında yapılan dedektörle elde edilen ilk sonuçlar sistemin geliştirilebilmesi için çok faydalı olmuştur.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bilgilerden de faydalanılarak, her biri kendi fotoçoğaltıcısına sahip 110 adet $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ inorganik sintilatör dedektöründen oluşan gama kalorimetre serisi olarak, saçılma odasının etrafına, hedeften yaklaşık 240 cm uzakta hedefe bakacak şekilde kurulacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Bessiere, A., Dorenbos, P., Van Eijk, C. W. E., Krämer, K. W., Güdel, H. U., de Mello Donega, C., & Meijerink, A. (2005). Luminescence and scintillation properties of the small band gap compound $\text{LaI}_3: \text{Ce}^{3+}$. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 537(1-2), 22-26.
- Calabrese, S., et al. 2018. First Measurement of the $\text{Cd-116}(\text{Ne-20}, \text{O-20})\text{Sn-116}$ Reaction at 15 A MeV. *Acta Physica Polonica B*, 49(3):275-280.
- Cappuzzello, F., Agodi, C., Carbone, D. and Cavallaro, M. 2016. The MAGNEX spectrometer: Results and perspectives *Eur. Phys. J. A*, 52:167.
- Cappuzzello, F., Agodi, C., Cavallaro, M., Carbone, D., et al. 2018. The NUMEN project: NUClear Matrix Elements for Neutrinoless double beta decay. *Eur. Phys. J. A*, 54:72.
- Carbone, D., Ferreira, J. L., Calabrese, S., Cappuzzello, F., Cavallaro, M., Hacisalihoglu, A. Y. L. İ. N., ... & Numen Collaboration. (2020). Analysis of two-nucleon transfer reactions in the $\text{Ne } 20+ \text{ Cd } 116$ system at 306 MeV. *Physical Review C*, 102(4), 044606.
- Chewpraditkul, W., & Moszynski, M. (2011). Scintillation properties of $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, Lu_2SiO_5 and LaBr_3 crystals activated with cerium. *Physics Procedia*, 22, 218-226.
- Derenzo, S. E., Weber, M. J., Bourret-Courchesne, E., & Klintenberg, M. K. (2003). The quest for the ideal inorganic scintillator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 505(1-2), 111-117.
- Dorenbos, P., Van Loef, E. V. D., Vink, A. P., Van der Kolk, E., Van Eijk, C. W. E., Krämer, K. W., ... & Shah, K. S. (2006). Level location and spectroscopy of Ce^{3+} , Pr^{3+} , Er^{3+} , and Eu^{2+} in LaBr_3 . *Journal of luminescence*, 117(2), 147-155.
- Duffey, D., El-Kady, A., & Senftle, F. E. (1970). Analytical sensitivities and energies of thermal-neutron-capture gamma rays. *Nuclear Instruments and Methods*, 80(1), 149-171.
- Ebran, A., Roig, O., Méot, V., & Delaune, O. (2014). Neutron efficiency of $\text{LaBr}_3: \text{Ce}$ detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 768, 124-129.
- Finocchiaro, P., Acosta, L., Agodi, C., Altana, C., Amador-Valenzuela, P., Boztosun, I., ... & Zagatto, V. A. (2020). The NUMEN heavy ion multidetector for a complementary approach to the neutrinoless double beta decay. *Universe*, 6(9), 129.

- Gilmore, G. (2008). Practical gamma-ray spectroscopy. *John Wiley & Sons.*, 20s.
- Kneissl, U., Pitz, H. H., & Zilges, A. (1996). Investigation of nuclear structure by resonance fluorescence scattering. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 37, 349-433.
- Knoll, G. F. 2010. Radiation Detection and Measurement (4th Ed.). *John Wiley and Sons Inc.*, US, 830.
- Krane, S. K. 1987. Introductory Nuclear Physics (3rd Ed.). *John Wiley and Sons Inc.*, US, 864.
- Kuhn, A., Surti, S., Karp, J. S., Muehllehner, G., Newcomer, F. M., & VanBerg, R. (2006). Performance assessment of pixelated LaBr₃/sub 3/detector modules for time-of-flight PET. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(3), 1090-1095.
- Kumar, A. G., Mazumdar, I., and Gothe, D. A. 2009. Efficiency calibration and simulation of a LaBr₃(Ce) detector in close-geometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 609:183-186.
- Li, C., Wang, B., Wang, R., Wang, H., & Zhu, Z. (2008). First-principles study of the electronic and optical properties of lanthanide bromide. *Thin solid films*, 516(21), 7894-7898.
- Majorana, E. (1937). Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone. *Il Nuovo Cimento* (1924-1942), 14(4), 171-184.
- Marcer, G., Rebai, M., Dal Molin, A., Putignano, O., Rigamonti, D., Camera, F., & Tardocchi, M. (2022). Detailed analysis of a previously uninvestigated feature in lanthanum bromide scintillation crystals intrinsic background. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 167796.
- Moszynski, M., Nassalski, A., Syntfeld-Kazuch, A., Szczesniak, T., Czarnacki, W., Wolski, D., ... & Stein, J. (2006). Temperature dependences of LaBr₃(Ce), LaCl₃ (Ce) and NaI(Tl) scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 568(2), 739-751.
- Nelson, G., & Reilly, D. (1991). Gamma-ray interactions with matter. *Passive nondestructive analysis of nuclear materials*, 2, 27-42s.
- Normand, S., Iltis, A., Bernard, F., Domenech, T., & Delacour, P. (2007). Resistance to γ irradiation of LaBr₃:Ce and LaCl₃:Ce single crystals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 572(2), 754-759.

- Oberstedt, A., Billnert, R., & Oberstedt, S. (2013). Neutron measurements with lanthanum-bromide scintillation detectors—A first approach. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 708, 7-14.
- Oliveira, J. R. B. D., Moralles, M., Flechas, D., Carbone, D., Cavallaro, M., Torresi, D., ... & Zagatto, V. A. B. (2020). First comparison of GEANT4 hadrontherapy physics model with experimental data for a NUMEN project reaction case. *The European Physical Journal A*, 56(5), 1-9.
- Pani, R., Cinti, M. N., Pellegrini, R., Bennati, P., Ridolfi, S., Scafè, R., ... & Boccaccio, P. (2011). Pulse height non-linearity in LaBr₃: Ce crystal for gamma ray spectrometry and imaging. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 215(1), 168-172.
- Prosper, E. I., Abebe, O. J., & Ogri, U. J. (2012). Characterisation of cerium-doped lanthanum bromide scintillation detector. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol, 6(1), 162
- Schaart, D. R., Seifert, S., Vinke, R., van Dam, H. T., Dendooven, P., Löhner, H., & Beekman, F. J. (2010). LaBr₃: Ce and SiPMs for time-of-flight PET: achieving 100 ps coincidence resolving time. *Physics in Medicine & Biology*, 55(7), N179.
- Shalit, A. D., & Feshbach, H. (1974). Theoretical nuclear physics. In Vol. I. Nuclear structure. Wiley. 863 s.
- Tsoufanidis, N., and Landsberger, S. 2015. Measurement and Detection of Radiation (4th Ed.). CRC Press, US, 606.
- van Eijk, C. W. E. 2001. Inorganic-scintillator development. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 460 (1): 1-14.
- Van Loef, E. V. D., Dorenbos, P., Van Eijk, C. W. E., Krämer, K., & Güdel, H. U. (2001). High-energy-resolution scintillator: Ce 3+ activated LaBr 3. *Applied physics letters*, 79(10), 1573-1575.
- van Loef, E. V. D., Dorenbos, P., van Eijk, C. W. E., Kramer, K., and Güdel, H. U. 2002. Scintillation properties of LaBr₃:Ce³⁺ crystals: fast, efficient and high-energy-resolution scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 486:254-258.
- Vogel, P. (2012). Nuclear structure and double beta decay. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 39(12), 124002.

ÖZGEÇMİŞ

Selçuk Oktay SOLAKCI

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2014 - 2022	Fakültesi, Fizik Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2011 - 2014	Fen Fakültesi, Fizik Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2006 - 20010	Fen Fakültesi, Fizik, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Öğretim Görevlisi	Akdeniz Üniversitesi
2014 - Devam	Serik Gülsün-Süleyman Süral MYO, Optisyenlik, Antalya

ESERLER:

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Burrello, S. et al. 2022. Multichannel experimental and theoretical constraints for the Cd 116 (Ne 20, F 20) In 116 charge exchange reaction at 306 MeV. *Physical Review C*, 105(2), 024616.
- 2- Ciraldo, I. et al. 2022. Analysis of the one-neutron transfer reaction in O 18+ Se 76 collisions at 275 MeV. *Physical Review C*, 105(4), 044607.

- 3- La Fauci, L. et al. 2021. O 18+ Se 76 elastic and inelastic scattering at 275 MeV. *Physical Review C*, 104(5), 054610.
- 4- Cavallaro, M. et al. 2021. A constrained analysis of the 40Ca (18O, 18F) 40K direct charge exchange reaction mechanism at 275 MeV. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8, 659815.
- 5- Carbone, D. et al. 2021. Initial state interaction for the 20Ne+ 130Te and 18O+ 116Sn systems at 15.3 A MeV from elastic and inelastic scattering measurements. *Universe*, 7(3), 58.
- 6- Calabrese, S. et al. 2021. O 18-induced single-nucleon transfer reactions on Ca 40 at 15.3 A MeV within a multichannel analysis. *Physical Review C*, 104(6), 064609.
- 7- Soukeras, V. et al. 2021. Measurement of the double charge exchange reaction for the 20Ne+ 130Te system at 306 MeV. *Results in Physics*, 28, 104691.
- 8- Yildirim, A., Solakci, S. O., Eke, C., & Boztosun, I. (2021). Gamma spectrometry measurements of natural and artificial radioactivity of Saklıkent-Antalya and its correlation to quarries. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(16), 1-11.
- 9- Cappuzzello, F. et al. 2021. The NUMEN Project: An Update of the Facility Toward the Future Experimental Campaigns. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 52.
- 10- Carbone, D et al. 2020. Analysis of two-nucleon transfer reactions in the Ne 20+ Cd 116 system at 306 MeV. *Physical Review C*, 102(4), 044606.
- 11- Finocchiaro, P. et al. 2020. The NUMEN heavy ion multidetector for a complementary approach to the neutrinoless double beta decay. *Universe*, 6(9), 129.
- 12- Spatafora, A. et al. 2019. Ne 20+ Ge 76 elastic and inelastic scattering at 306 MeV. *Physical Review C*, 100(3), 034620.
- 13- Cappuzzello, F. et al. 2018. The NUMEN project: NUClear Matrix Elements for Neutrinoless double beta decay. *The European Physical Journal A*, 54(5), 1-46.
- 14- Calabrese, S., et al. 2018. First Measurement of the Cd-116(Ne-20, O-20)Sn-116 Reaction at 15 A MeV. *Acta Physica Polononica B*, 49(3):275-280.