

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**SERYUM KATKILI $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ DEDEKTÖRÜNÜN MONTE CARLO
SİMÜLASYONLARI İLE TASARLANMASI VE GELİŞTİRİLEN
DEDEKTÖRÜN NUMEN DENEYİ ÖLÇÜMLERİNDE KULLANILMASI**

Aydın YILDIRIM

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2020

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**SERYUM KATKILI $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ DEDEKTÖRÜNÜN MONTE CARLO
SİMÜLASYONLARI İLE TASARLANMASI VE GELİŞTİRİLEN
DEDEKTÖRÜN NUMEN DENEYİ ÖLÇÜMLERİNDE KULLANILMASI**

Aydın YILDIRIM

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2020

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERYUM KATKILI $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ DEDEKTÖRÜNÜN MONTE CARLO
SİMÜLASYONLARI İLE TASARLANMASI VE GELİŞTİRİLEN
DEDEKTÖRÜN NUMEN DENEYİ ÖLÇÜMLERİNDE KULLANILMASI**

Aydın YILDIRIM

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**Bu tez T.C. Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon
Birimi tarafından FDK-2018-2936 nolu proje ile desteklenmiştir.
Bu tez Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından
1059B141700748 nolu proje ile desteklenmiştir.**

MAYIS 2020

ÖZET

SERYUM KATKILI $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ DEDEKTÖRÜNÜN MONTE CARLO SİMÜLASYONLARI İLE TASARLANMASI VE GELİŞTİRİLEN DEDEKTÖRÜN NUMEN DENEYİ ÖLÇÜMLERİNDE KULLANILMASI

Aydın YILDIRIM

Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. İsmail BOZTOSUN

İkinci Danışman: Prof. Francesco CAPPUZZELLO

Mayıs 2020; 77 sayfa

Bu tez çalışması kapsamında İtalya INFN-LNS laboratuvarlarında devam etmekte olan NUClear Matrix Elements of Neutrinoless Double Beta Decay (NUMEN) projesinin bir sonraki aşamasında kullanılmak üzere, bir gama kalorimetresinin Monte Carlo yöntemiyle çalışan Geant4 ile simülasyonları yapılmıştır.

Bu gama kalorimetresi için NUMEN deneyleri sırasında ışın-hedef etkileşimleri ile ortaya çıkan yüksek gama ve nötron akısı altında çalışabilecek hızlı inorganik sintilatörler düşünülmektedir. Hızlı inorganik sintilatörler içinde en yüksek enerji çözünürlüğüne sahip $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, bu tez çalışmasının araştırma konusudur. Literatürde verilen %2.8'lik enerji çözünürlüğü ile bu sintilatörün, ışın-hedef etkileşmelerinden kaynaklanan yüksek gama ve nötron akısı altında oluşan ürünlerin uyarılmış durumları arasındaki geçişlerde ortaya çıkan gamaları tespit etmesi beklenmektedir. Işın-hedef etkileşimleri sırasında birden fazla reaksiyon türü gerçekleşecek olsa da gözlenmek istenen ana reaksiyon çift yük değişimi (DCE) reaksiyonlarıdır. Simülasyonlar ile hem gama kalorimetresinin olası geometrileri araştırılmış hem de çift yük değişimi reaksiyonlarının sahip olması gereken minimum tesir kesitleri hesaplanmıştır. Son tasarlanan gama kalorimetresine göre DCE reaksiyonlarının en yüksek arka plan seviyesinde, sahip olması gereken minimum tesir kesitlerin 1.69 - 1.91 nb aralığında olması gerektiği bulunmuştur.

Gama kalorimetresi ile MAGNEX spektrometresinin odak düzlem dedektörünün birlikte çalışmaları durumdaki performansları NUMEN projesinin başarısı için bir ölçüt olacaktır.

ANAHTAR KELİMELE: DCE, Dedektör, Gama, Geant4, Magnex, Monte Carlo, NUMEN, Simülasyon, Sintilatör

JÜRİ: Prof.Dr. İsmail BOZTOSUN

Prof.Dr. Orhan BAYRAK

Prof. Dr. Asım SOYLU

Doç. Dr. Edip BAYRAM

Doç. Dr. Gökhan KOÇAK



ABSTRACT

DEVELOPING A CERIUM DOPED $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ DETECTOR DESIGNED WITH MONTE CARLO SIMULATIONS AND ITS APPLICATION IN NUMEN PROJECT

Aydın YILDIRIM

PhD Thesis in PHYSICS

Supervisor: Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN

Second Supervisor: Prof. Francesco CAPPUZZELLO

May 2020; 77 pages

A gamma-ray calorimeter array is studied in the context of next phase of NUClear Matrix Elements of Nuetrinoless Double Beta Decay (NUMEN) project which takes place in LNS-INFN laboratories in Italy for this thesis. The study is done with Geant4 simulation toolkit which uses Monte Carlo method.

Fast, inorganic scintillators are considered due to high flux of gamma-rays and neutrons coming from the beam-target interactions for NUMEN experiments. $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, which has the best energy resolution in fast inorganic detectors, is the subject of this thesis. It is expected that the planned calorimeter array, which has the 2.8% energy resolution, must discriminate the de-excitation gammas of ejectiles and residual nucleus from gamma and neutron flux due to beam-target reactions. Although, there are other kind of reactions, double charge exchange (DCE) reactions are the main interaction to be observed. Both, possible geometries of gamma calorimeter array and minimum cross-sections of the DCE reactions are investigated. According to the final gamma calorimeter array geometry, the minimum cross-sections must be between 1.69 - 1.91 nb for the worst case scenario.

The combined performance of Focal Plane Detector of MAGNEX spectrometer and the gamma calorimeter array will be crucial for NUMEN project.

KEYWORDS: DCE, Detector, Gamma, Geant4, Magnex, Monte Carlo, NUMEN, Simulation, Scintillator

COMMITTEE: Prof.Dr. İsmail BOZTOSUN

Prof.Dr. Orhan BAYRAK

Prof.Dr. Asım SOYLU

Assoc.Prof.Dr. Edip BAYRAM

Assoc.Prof.Dr. Gökhan KOÇAK



ÖNSÖZ

Doktora öğrenimim boyunca ve bu tez çalışmasının her aşamasındaki desteği, yardımı ve sabrı için değerli danışman hocam Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN'a teşekkürlerimi sunarım. Bu tezin İtalya'da tamamlanan kısmında bana her zaman destek olan değerli danışman hocam Prof. Francesco CAPPUZZELLO'ya ve değerli hocam Dr. Luciano PANDOLA'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca beni yalnız bırakmayan aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yine bu tez çalışmasında yanımda olup bana yardım eden tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	6
3. MATERYAL VE METOT	8
3.1. Foton - Madde Etkileşimleri	8
3.1.1. Fotoelektrik Olay	9
3.1.2. Compton Saçılması	9
3.1.3. Çift Oluşumu	10
3.2. Sintilatörler ve Gama Işınlarnın Tespiti	10
3.3. Kodların Karşılaştırılması	12
3.4. Enerji Çözünürlüğü	19
3.5. Dedektör Verimi	22
3.6. Sinyal - Arka Plan Oranı	23
3.7. Minimum Tesir Kesiti	24
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	26
4.1. Histogramlar	26
4.2. Işın-Hedef Etkileşimleri	40
4.3. Arka Plan Spektrumları	46
4.4. Çift Yük Değişimi Sinyallerinin Gözlenmesi	48
4.5. Verimler ve Sinyal/Arka Plan Oranları	53
4.6. Alternatif Geometrilere ile Bu Geometrilere Ait Verimler ve S/B Oranları	54
5. SONUÇLAR	69
6. KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Seryum Katkılı LaBr₃(Ce) Dedektörünün Monte Carlo Simülasyonları ile Tasarlanması ve Geliştirilen Dedektörün NUMEN Deneyi Ölçümlerinde Kullanılması ” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

22/05/2020
Aydın YILDIRIM
İmza



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler:

$\prime$	: İnç
c	: Işık Hızı
e	: Elektron
m_0	: Durgun Kütle
β	: Beta Parçacığı
γ	: Gama Fotonu
ν	: Nötrino
σ	: Standart Sapma
σ_{DCE}	: Çift Yük Değişimi Reaksiyonları Tesir Kesiti
$0\nu\beta\beta$	: Nötrinosuz Çift Beta Bozunumu

Kısaltmalar:

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
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
PMT	: Foto-Çoğaltıcı Tüp (Photo Multiplier Tube)
SM	: Standart Model (Standard Model)
S/B	: Sinyal-Arka plan Oranı (Signal-to-Background Ratio)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Magnex spektrometresinin görünümü	2
Şekil 1.2.	Bazı hedefler ve hedef tutucu	3
Şekil 1.3.	Saçılma odasının içeriden görünümü	4
Şekil 3.1.	Compton saçılması (Compton etkisi) (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015)	10
Şekil 3.2.	$3' \times 3'$ boyutlarında silindirik bir kristalin Fluka ile elde edilen gama spektrumu	14
Şekil 3.3.	Geant4 ile hazırlanan $3' \times 3'$ silindirik kristal - kaynak geometrisi_1 . .	14
Şekil 3.4.	Geant4 ile hazırlanan $3' \times 3'$ silindirik kristal - kaynak geometrisi_2 . .	15
Şekil 3.5.	Tek bir gama ışınının kristal içinden geçerken yaptığı etkileşmelerin simülasyonu	15
Şekil 3.6.	Elektron-pozitron oluşumu (kırmızı-mavi)	16
Şekil 3.7.	Elektronun tamamen soğurulması (kırmızı)	16
Şekil 3.8.	Pozitronun serbest elektronlardan biri tarafından yakalanarak 511 keV enerjili iki fotona dönüşmesi (mavi-yeşil)	17
Şekil 3.9.	Fotonlardan birinin tamamen soğurulması (yeşil)	17
Şekil 3.10.	İkinci fotonun dedektörden kaçması	17
Şekil 3.11.	Dedektör ile etkileşen bir tek gama fotonunun spektrumu	18
Şekil 3.12.	$3' \times 3'$ boyutlarında silindirik kristalin Geant4 ile elde edilen gama spektrumu	19
Şekil 3.13.	Enerji çözünürlüğü eklendikten sonra elde edilen spektrum	20
Şekil 3.14.	Gerçekçi enerji çözünürlüğü eklendikten sonra spektrumların karşılaştırılması	21
Şekil 3.15.	^{60}Co nokta kaynağı için arka plan çıkarılmadan önce ve sonra gama spektrumu	23
Şekil 4.1.	45 keV enerjide $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ait X-ışını kaçma pikleri	27
Şekil 4.2.	^{137}Cs 'nin dedektör üzerinde kaplama olmadığı durumdaki gama spektrumu	28
Şekil 4.3.	Alüminyum ile kaplanan dedektörün ^{137}Cs gama spektrumu	28
Şekil 4.4.	Alüminyum ile kaplanan ve kaplanmayan dedektörün ^{137}Cs gama spektrumlarının karşılaştırması	29
Şekil 4.5.	^{60}Co nokta kaynağının dedektör üzerinde kaplama olmadığı durumdaki gama spektrumu	30

Şekil 4.6. Alüminyum ile kaplanan dedektörün ^{60}Co gama spektrumu	30
Şekil 4.7. Alüminyum ile kaplanan ve kaplanmayan dedektörün ^{60}Co gama spekt- rumlarının karşılaştırması	31
Şekil 4.8. Dokuz dedektörden oluşan kristal bloğu	31
Şekil 4.9. ^{137}Cs nokta kaynağının dokuz dedektörden oluşan blok için gama spekt- rumu (dedektörler üzerinde alüminyum kaplama yok)	32
Şekil 4.10. ^{137}Cs nokta kaynağının dokuz dedektörden oluşan blok için gama spekt- rumu (alüminyum kaplama ile)	33
Şekil 4.11. Dedektör bloğu için alüminyum ile kaplanan ve kaplanmayan durum- lardaki spektrumlar (^{137}Cs)	33
Şekil 4.12. ^{60}Co nokta kaynağının dokuz dedektörden oluşan blok için gama spekt- rumu (dedektörler üzerinde alüminyum kaplama yok)	34
Şekil 4.13. ^{60}Co nokta kaynağının dokuz dedektörden oluşan blok için gama spekt- rumu (alüminyum kaplama ile)	34
Şekil 4.14. Dedektör bloğu için alüminyum ile kaplanan ve kaplanmayan durum- lardaki spektrumlar (^{60}Co)	35
Şekil 4.15. Yarı küre üzerine dağılmış dedektör blokları (2π geometri)	35
Şekil 4.16. Çelikten yapılması planlanan saçılma odasının kesiti	36
Şekil 4.17. Saçılma odası olmayan durumda 2π geometride yerleştirilen dedektörler için ^{137}Cs gama spektrumu	36
Şekil 4.18. Saçılma odası olmayan durumda 2π geometride yerleştirilen dedektörler için ^{60}Co gama spektrumu	37
Şekil 4.19. Saçılma odası eklendiği durumda 2π geometride yerleştirilen dedektör- ler için ^{137}Cs için gama spektrumu	38
Şekil 4.20. Saçılma odası eklendiği durumda 2π geometride yerleştirilen dedektör- ler için ^{60}Co için gama spektrumu	38
Şekil 4.21. ^{137}Cs için saçılma odasının bulunduğu ve bulunmadığı durumların kar- şılaştırması	39
Şekil 4.22. ^{60}Co için saçılma odasının bulunduğu ve bulunmadığı durumların kar- şılaştırması	39
Şekil 4.23. $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışıın-hedef çifti için üç farklı durumda gama kazancı (he- deften çıkan gama akısı)	41

Şekil 4.24. $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda gama kazancı (hedeften çıkan gama akısı)	41
Şekil 4.25. $^{18}\text{O} + ^{198}\text{Hg}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda gama kazancı (hedeften çıkan gama akısı)	42
Şekil 4.26. $^{20}\text{Ne} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda gama kazancı (hedeften çıkan gama akısı)	42
Şekil 4.27. $^{20}\text{Ne} + ^{116}\text{Cd}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda gama kazancı (hedeften çıkan gama akısı)	43
Şekil 4.28. $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda nötron kazancı (hedeften çıkan nötron akısı)	44
Şekil 4.29. $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda nötron kazancı (hedeften çıkan nötron akısı)	44
Şekil 4.30. $^{18}\text{O} + ^{198}\text{Hg}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda nötron kazancı (hedeften çıkan nötron akısı)	45
Şekil 4.31. $^{20}\text{Ne} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda nötron kazancı (hedeften çıkan nötron akısı)	45
Şekil 4.32. $^{20}\text{Ne} + ^{116}\text{Cd}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda nötron kazancı (hedeften çıkan nötron akısı)	46
Şekil 4.33. $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için (20 MeV/A) üç farklı S/B seviyesini gösteren spektrum	49
Şekil 4.34. $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için (70 MeV/A) üç farklı S/B seviyesini gösteren spektrum	50
Şekil 4.35. $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için (20 MeV/A) üç farklı S/B seviyesini gösteren spektrum	51
Şekil 4.36. $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için (70 MeV/A) üç farklı S/B seviyesini gösteren spektrum	51
Şekil 4.37. 0.2 MeV - 2.0 MeV aralığındaki gama piklerinin arka plan üzerinde dağılımı	54
Şekil 4.38. 4π geometride dedektör topluluğu. Dedektörler saçılma odasının içinde	55
Şekil 4.39. 4π geometride (144 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için spektrum (20 MeV/A)	56

Şekil 4.40. 4π geometride (144 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışıın-hedef çifti için spektrum (70 MeV/A)	56
Şekil 4.41. 4π geometride (144 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışıın-hedef çifti için spektrum (20 MeV/A)	57
Şekil 4.42. 4π geometride (144 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışıın-hedef çifti için spektrum (70 MeV/A)	57
Şekil 4.43. 2π ve 4π geometriler için dedektör verimleri	58
Şekil 4.44. 4π geometride dedektörler topluluğu (360 dedektör). Dedektörler saçılma odasının dışında	59
Şekil 4.45. 4π geometride (360 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışıın-hedef çifti için spektrum (20 MeV/A)	59
Şekil 4.46. 4π geometride (360 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışıın-hedef çifti için spektrum (70 MeV/A)	60
Şekil 4.47. 4π geometride (360 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışıın-hedef çifti için spektrum (20 MeV/A)	60
Şekil 4.48. 4π geometride (360 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışıın-hedef çifti için spektrum (70 MeV/A)	61
Şekil 4.49. Saçılma odasının muhtemel geometrisi ve odanın üst kısmında bulunan olan kubbe	62
Şekil 4.50. Kubbenin etrafında olması planlanan dedektörler-1	62
Şekil 4.51. Kubbenin etrafında olması planlanan dedektörler-2	63
Şekil 4.52. Üç farklı geometri için dedektörlerin verimlerinin karşılaştırması	63
Şekil 4.53. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışıın-hedef çifti için üç farklı durumdaki spektrum (20 MeV/A)	64
Şekil 4.54. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışıın-hedef çifti için üç farklı durumdaki spektrum (70 MeV/A)	65
Şekil 4.55. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışıın-hedef çifti için 0.2 MeV – 2.0 MeV aralığındaki gama piklerinin arka plan üzerinde dağılımı	65
Şekil 4.56. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışıın-hedef çifti için üç farklı durumdaki spektrum (20 MeV/A)	66
Şekil 4.57. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışıın-hedef çifti için üç farklı durumdaki spektrum (70 MeV/A)	66

Şekil 4.58. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışıın-hedef çifti için 0.2 MeV – 2.0 MeV aralığındaki gama piklerinin arka plan üzerinde dağılımı	67
Şekil 4.59. Son tasarımda dedektörlerin DCE sinyalleri haricinde göreceği arka plan (8×10^8 gelen parçacık için)	68



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. 2π geometride tasarlanan kalorimetrenin 70MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ve $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ reaksiyonları için gerekli minimum DCE tesir kesitleri. 5 ns aralığa normalize edil- memiş ve 10^{12} pps için ölçeklendirilmiştir	52
Çizelge 4.2. 70 MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın hedef çiftinin, 2π geometri için foto-pik verimleri ve S/B oranları (DCE tesir kesiti 1 nb olarak alınmıştır)	54
Çizelge 4.3. 70 MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın hedef çiftinin, 4π geometri için foto-pik verimleri ve S/B oranları (DCE tesir kesiti 1 nb olarak alınmıştır)	58
Çizelge 4.4. Planlanan son geometride 70MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ve $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ reaksiyonları için gerekli minimum DCE tesir kesitleri. 5 ns aralığa normalize edilmemiş ve 10^{12} pps için ölçeklendirilmiştir	64
Çizelge 4.5. 70 MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın hedef çiftinin, son tasarlanan 2π geometri için foto-pik verimleri ve S/B oranları (DCE tesir kesiti 1 nb olarak alınmıştır)	67

1. GİRİŞ

Çağlar boyunca bilim insanları teorilerini test etmek için basit veya karmaşık deneyler tasarlamışlardır. Tasarlanan bu deney düzenekleri eski çağlarda olabildiğince basit ve dolayısıyla yapımı ucuzken, zaman ilerledikçe karmaşık ve pahalı hale gelmiştir. Artık günümüzde fiziğin geldiği aşama düşünülecek olursa, basit tasarlanmış ve ekonomik bir deney düzeneği kurmak oldukça zordur. Bilim insanları bu pahalı deney düzeneklerini kurduklarında bile hiçbir zaman teorilerini kanıtlayabileceklerinin garantisi yoktur ya da deney düzeneklerinin istenilen sonuçları vereceğinden yüzde yüz emin değillerdir. Bu noktada ister basit ve ucuz deney düzenekleri olsun isterse de karmaşık ve pahalı deney düzenekleri olsun, kurulumlarından önce test edilebilir olmaları bilim insanlarına ciddi anlamda zaman kazandıracaktır ve bu deney düzenekleri için bulunacak olan kaynakların en verimli şekilde kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

Monte Carlo metodu veya simülasyonları istenilen bu testler için en yaygın olarak kullanılan metodlardan birisidir (Binder ve Heerman, 2010). İstatistik bilimine dayanan bu metot bir çok alanda kullanılmaktadır. Bu tezin ortaya koymak istediği simülasyon dedektörlerinin performans testleri ya da simülasyonları da Monte Carlo metoduna dayanmaktadır. Karakterizasyonu yapılacak olan dedektör ve dedektör topluluğu Geant4 simülasyon aracı ile Monte Carlo metoduna dayanarak incelenmiştir.

Geant4, parçacıkların madde içinden geçişini simüle eden ve başta nükleer fizik, yüksek enerji fiziği ve hızlandırıcı fiziği olmak üzere uzay teknolojileri ve tıp gibi alanlarda da kullanılan oldukça güçlü bir simülasyon aracıdır (Agostinelli ve ark., 2003; Allison ve ark., 2006, 2016).

Geant4, nükleer fiziğe ait birçok teoriyi sahip olduğu kütüphanelerde barındırır ve bu kütüphaneler simüle edilmek istenilen deneysel düzeneğe uygun olarak seçilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken bir özellik, simülasyonların tamamlanma sürelerinin Geant4'un çalıştırıldığı bilgisayarın özelliklerine de bağlı olduğudur. Eğer deney düzeneğine uygun kütüphanelerin seçimi yapılmazsa, Geant4 ve dolayısıyla bilgisayar deneyi ilgili olsun olmasın tanımlı kütüphanelerdeki tüm nükleer reaksiyonları gerçekleştirmeye çalışacaktır. Bu da çok fazla zaman kaybına ve hatta bilgisayarın bu kadar veriyi işleyemeyip simülasyonu tamamlayamamasına neden olabilir. Deney koşulları ve gerekli reaksiyonlar

optimal düzeyde tanımlandıktan sonra ise Geant4 gerçek deney düzeneği kurulmadan önce büyük bir başarı ile çalıştırılabilir.

Bu tez çalışmasında da Geant4 simülasyon aracı bir gama kalorimetresinin tasarlanmasında etkin bir şekilde kullanılmış ve kalorimetreyi oluşturan dedektörler bir çok yönden simülasyonlar ile test edilmiştir. Planlanan kalorimetre veya dedektör kümesi İtalya, Katanya’da bulunan INFN-Laboratori Nazionali del-Sud (LNS) laboratuvarlarında bulunan MAGNEX spektrometresinin bir parçası olacaktır. MAGNEX spektrometresi Şekil 1.1. ile görülebilir.



Şekil 1.1. Magnex spektrometresinin görünümü

Şekil 1.1.’de, 1 ile gösterilen saçılma odası, 2 ile gösterilen kuadropol mıknatıs, 3 ile gösterilen dipol mıknatıs ve 4 ile gösterilen de odak düzlem dedektörüdür (Focal Plane Detector - FPD).

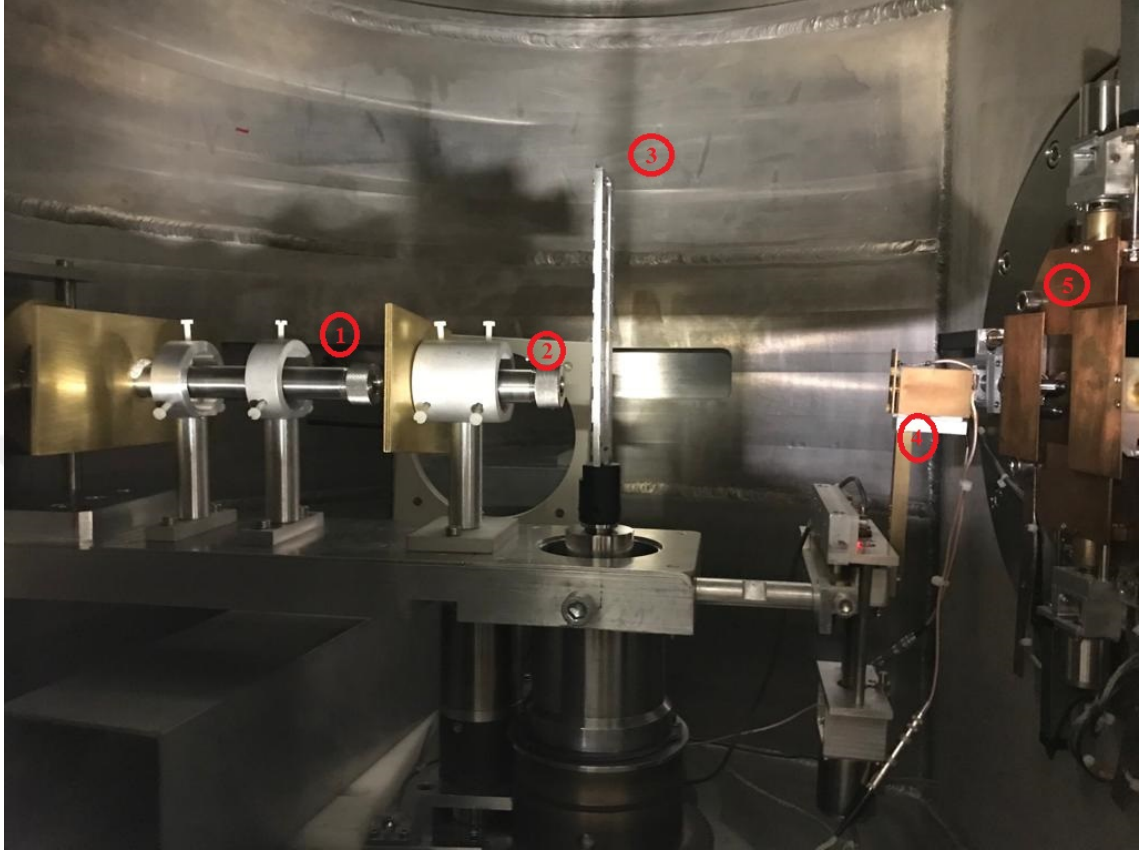
Bu tez çalışması kapsamında Şekil 1.1. gösterilen parçalardan en önemlisi ya da bu tezi en çok ilgilendiren kısım saçılma odası ve ışınlanacak olan hedeflerdir. Şekil 1.2. Bölüm 4.2.’de detaylıca incelenmiş olan hedefleri ve hedef tutucuyu göstermektedir.



Şekil 1.2. Bazı hedefler ve hedef tutucu

Hedef tutucu üzerinde birden fazla hedefin bulunması, deneyler sırasında saçılma odasına müdahale etmeden hedefin değiştirilebilmesine olanak sağlamaktadır. LNS'te bulunan her deney düzeneği yıl içinde belirli sürelerle ışını kullanabildikleri için vakit

kaybı olmaksızın hedeflerin değiştirilebilmesi deneyler için oldukça önemlidir. Şekil 1.3. hedef tutucunun da içinde yer aldığı saçılma odasının içeriden bir görünümüdür.



Şekil 1.3. Saçılma odasının içeriden görünümü

Şekil 1.3.'te 1 ile gösterilen kolimator, 2 ile gösterilen anti-saçılma aparatı, 3 ile gösterilen hedef tutucu ile hedefler, 4 ile gösterilen Faraday kabı ve 5 ile gösterilen de slitlerdir.

NUMEN (NUclear Matrix Elements for Neutrinoless double beta decay) projesi çift beta bozunumlarının ömürlerini ifade eden nükleer matris elemanlarını (NME), ağır iyonlar ile uyarılarak gerçekleştirilen çift yük değişimi reaksiyonlarının (DCE) tesir kesitlerini ölçerek elde etmeye çalışan yenilikçi bir projedir. Bu iki reaksiyon, yani nötrinosuz çift beta bozunumu ($0\nu\beta\beta$) (Denklem 1.1) ve DCE reaksiyonları (Denklem 1.2), farklı iki mekanizma ile gerçekleşse de (ilki zayıf etkileşme ve ikincisi güçlü etkileşme) aralarındaki önemli benzerlikler yardımıyla NME'leri elde etmeyi amaçlamaktadır. Buradaki temel benzerlik her iki reaksiyonunda başlangıç ve son durumlarıdır (Cappuzzello ve ark., 2018).

$${}^A_ZX_N \rightarrow {}^{A}_{Z+2}X_{N-2} + 2e^- \quad (1.1)$$

$${}^AX({}^BC, {}^BD){}^AY \quad (1.2)$$

Burada MAGNEX spektrometresinin enerji çözünürlüğü, düşük enerji reaksiyonları için yeterli olsa da ${}^{110}\text{Pd}$, ${}^{150}\text{Nd}$ ve ${}^{160}\text{Gd}$ gibi yüksek enerji (40-50 MeV/A) gerektiren çekirdeklerde, hem hedef hem de mermi çekirdekleri için taban durumu ($I^\pi = 0^+$) ile birinci uyarılmış durum ($I^\pi = 2^+$) arasındaki geçişleri ayırt etmede yetersiz kalmaktadır. Burada $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ile oluşturulacak dedektör topluluğunun (gama kalorimetresi), bu geçiş sırasında ortaya çıkacak olan gama-ışınlarını dedekte ederek MAGNEX ile çakışma ölçümü yapmasına olanak sağlaması beklenmektedir (Cappuzzello ve ark., 2018).

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde literatür taraması ile MAGNEX, NUMEN projesi, nötrinosuz çift beta bozunumu, çift yük değişimi ve Geant4 simülasyonları ile geçmiş yıllarda yapılan çalışmalara değinilmiştir. Bir sonraki bölümde ise izlenecek metot bir tek kristal durumu için anlatılmış ve verim, çözünürlük gibi parametreler değerlendirilmiştir. Bulgular ve tartışma kısmında ise adım adım istenen kalorimetre oluşturulmuş, son tasarıma kadar yapılan simülasyonlar ve bu simülasyonların sonuçlarındaki değişimler açıkça tartışılmıştır. Sonuç bölümünde yapılan simülasyonlar özetlenmiş, kalorimetrenin son tasarımı için nelerden taviz verip, neleri en uygun hale getirebileceğimiz tartışılmış ve çalışmanın NUMEN projesi ve fizik için önemi tartışılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Son yıllarda nötrinosuz çift beta bozunumu reaksiyonu ve çift yük değişimi reaksiyonu hem nükleer fiziğin hem de parçacık fiziğinin temel araştırma alanlarından biridir. Nötrinosuz çift beta bozunumu, nötrinoların Majorona veya Dirac doğasından hangisinde olup olmadığını belirlemek ve etkin kütlelerini ölçmek için potansiyel olarak en iyi kaynaktır. Dahası, eğer gözlenebilirlerse $0\nu\beta\beta$ bozunumu toplam lepton sayısının korunmadığına işaret edecektir. Bu fiziksel olay günümüzde Standart Model'in (SM) ötesinde araştırmaların en önemlisidir ve temel etkileşimleri birleştirmek için oluşturulan Büyük Birleşim Teorisine yol göstermede yardımcı olması beklenmektedir (Cappuzzello ve ark., 2018). Rodejohann (2011) yaptığı çalışmada nötrinosuz çift beta bozunumunu parçacık fiziği için değerlendirirken ve Dolinski ve ark. (2019) çalışmalarında nötrinosuz çift beta bozunumunun teorik ilerlemesini gözden geçirmiştir.

Bu tez çalışmasının da parçası olduğu NUMEN projesi INFN-LNS MAGNEX spektrometresinin bir bölümünü oluşturacaktır. MAGNEX'in kurulumu ile çalışmalar ve elde edilen veriler Cunsolo ve ark. (2002a) ve Cunsolo ve ark. (2002b) tarafından özetlenmiştir. MAGNEX'in faal duruma gelmesi ve sonrasında ilk yapılan çalışmalardan elde edilen veriler ise sırasıyla Cunsolo ve ark. (2007) ve Cunsolo ve ark. (2008) tarafından gözden geçirilmiştir. Cappuzzello ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada NUMEN'in amacına, NUMEN için yapılan araştırma-geliştirme çalışmalarına ve teorik gelişmelere değinmişlerdir. Calabrese ve ark. (2018), 15 MeV/A'da ilk kez yapılan $^{116}\text{Cd}(^{20}\text{Ne}, ^{20}\text{O})^{116}\text{Sn}$ reaksiyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini açıklamıştır. Cavallaro ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada ölçülen tesir kesitlerinin çok küçük olduğunu ve bu zorluğun üstesinden gelmek için ışın şiddetinin en az iki merteye artırılması gerektiğini ortaya koymuştur. Carbone ve ark. (2018) ise NUMEN deneylerinde karşılaşılan zorlukları açıkladıktan sonra bu zorluklara rağmen enerji spektrumlarının ölçülebildiğini ve DCE reaksiyonları için mutlak tesir kesitlerinin hesaplanabildiğini göstermiştir.

Bu tezin de araştırma konusu olan gama dedektörlerinin yapımında kullanılacak olan sintilasyon kristali $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ile ilgili çalışmalar tüm dünyada devam etmektedir. $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ile ilk çalışma van Loef ve ark. (2001) tarafından yapılmıştır. van Loef ve ark. (2001), Bridgman tekniği ile büyüttükleri ve %0.5 Ce^{3+} içeren $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ kristal ile 662

keV’de %2.85 enerji çözünürlüğü elde etmişlerdir. Aynı çalışmada MeV başına 61000 ± 5000 [foton/MeV] foton çıkışı gözlemişlerdir. van Loef ve ark. (2002), yaptıkları çalışmada Ce^{3+} oranını %0, %0.5, %2, %4 ve %10 olarak kristalin tepkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada belirtilen Ce katkısına karşılık MeV başına ışık çıkışını sırasıyla 17000 ± 2000 , 61000 ± 5000 , 48000 ± 5000 , 48000 ± 5000 ve 45000 ± 5000 [foton/MeV] olarak ölçmüşlerdir. Tüm kristaller için bozunma zamanı ise 30 ± 5 ns kaydedilmiştir. %0.5, %2, %4 ve %10 oranındaki Ce^{3+} katkılar için 662 keV’de enerji çözünürlükleri sırasıyla 2.9 ± 0.1 , 3.8 ± 0.4 , 3.5 ± 0.4 ve 3.9 ± 0.4 olarak rapor etmişlerdir. Sonraki yıllarda ise kristalin daha da büyütülmesi farklı boyutlardaki dedektörlerin incelenmesine ve diğer sintilatör ile karşılaştırılabilmelerine olanak kılmış ve bu çalışmaların sonuçları raporlanmıştır (Dhibar ve ark., 2018; Dorenbos ve ark., 2004; Kumar ve ark., 2009a,b; van Eijk, 2001). Bununla birlikte kristalin özellikleri hala geliştirilebilir olduğundan, kristal üzerindeki çalışmaların devam etmektedir (Yang ve ark., 2016). Kristal üzerindeki araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etse bile, gama spektroskopisinde oldukça başarılı olduğu için tek dedektör ve dedektörler topluluğu olarak da oldukça yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir (Blasi ve ark., 2016; Bucurescu ve ark., 2016; Lorusso ve ark., 2016; Regan ve ark., 2016; Regis ve ark., 2014).

Geant4 simülasyon aracı ile ilgili ve başarısını gösteren en temel üç çalışma Agostinelli ve ark. (2003); Allison ve ark. (2006, 2016) ile sıralanabilir. Bununla birlikte Geant4 basit deney düzeneklerinden en karmaşık deney düzeneklerine kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu kullanım alanı, basit bir zayıflama katsayısı hesabından ATLAS gibi yüksek bütçeli deneylere kadar uzanmaktadır. Farnea ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada Geant4 kullanarak AGATA adı verilen ve yüksek saflıkta germanyum dedektörlerden oluşan gama dedektörlerini simüle etmişler ve sonuçlarını raporlamışlardır. Agostini ve ark. (2018), nötrino çalışmaları için tasarlanan ve BOREXINO dedektörünün simülasyonlarını Geant4 ile yapmışlardır. Geant4 medikal fizik alanında da sıklıkla kullanılmaktadır. Petringa ve ark. (2019), farklı hücreler için Geant4’un radyobiyojik nicelikleri simüle edebildiğini göstermişlerdir. Yine Dipuglia ve ark. (2019) ile Silva ve ark. (2020) yaptıkları çalışmalar ile medikal fizik alanında Geant4’un başarıyla kullanılabildiğini rapor etmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında NUMEN deneyleri için yapılacak olan gama kalorimetresinin Monte Carlo simülasyonları belirli bir metot kullanılarak yapılmıştır. Tekip edilen metot, tek bir dedektörün deneysel verilerle uyumlu olarak çalıştığı bir simülasyonu yapıldıktan sonra, adım adım gama kalorimetresinin NUMEN deneyleri için oluşturulması şeklindedir. Çalışmanın ilerlemesi boyunca temelde kullanılacak olan Monte Carlo kodu Geant4 olsa da ilk aşamada Fluka-Flair kodu ile spektrum bazında da olsa kodların tutarlılığı kontrol edilmiştir.

Kodların karşılaştırması yapıldıktan sonra ise izlenen yöntem öncelikle bir tek $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ kristalinin gama kaynaklarına karşı tepkisinin araştırılması ya da başka bir deyişle tek kristalin karakterize edilmesi olmuştur. Tek kristal değerlendirmesinden sonra ise yapılması planlanan dedektörler topluluğuna adım adım geçilmiştir. Önce dokuz kristalden oluşan bir blok incelenmiş sonrasında ise saçılma odasını kaplayacak dedektörler topluluğu araştırılmıştır. Tasarım aşamasında dedektörlerin konumu ve dizilişleri kesin belirli olmadığı için farklı geometrilerin değerlendirilmeleri incelenmiştir. Dedektörlerin saçılma odasının içinde veya dışında olması, ne kadarlık bir katı açı kaplayacakları, saçılma odasının kalınlığının olası etkileri bu değerlendirmeler içinde yer almaktadır.

Yine bu araştırma sırasında elde edilmesi gereken ve özellikle NUMEN deneyleri için önemli olan bazı parametreler enerji çözünürlüğü, dedektör verimi, sinyal – arka plan (Signal-to-Background veya S/B) oranı ve minimum tesir kesitleri olarak sıralanabilir. Bu değerlerden özellikle S/B oranı ve istatistiksel olarak anlamlı sinyallerin elde edilmesi için gerekli minimum tesir kesitleri bu tezin en önemli kısmını oluşturmaktadır. Bugüne kadar yapılmış olan pilot deneylerden elde edilen veriler, tez çalışması sonucunda elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında yapılması planlanan kalorimetrenin beklentileri karşılayıp karşılamayacağını ortaya koyacaktır.

3.1. Foton - Madde Etkileşimleri

Gama ışınları ya da gama fotonları nükleer geçişler sırasında yayılan elektromanyetik radyasyonlardır (ışımалardır). Bir foton veya gama fotonu madde ortamı ile tipik olarak üç şekilde etkileşebilir. Bunlar sırasıyla fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşu-

mudur. Bu etkileşmelerin alt başlıklarında verilecek olsa da yine de bahsedilmesi gereken özellik, fotonun yapacağı etkileşmenin gelen fotonun enerjisine bağlı olmasıdır (Krane, 1987).

3.1.1. Fotoelektrik Olay

Fotoelektrik olay gelen foton ile etkileştiği materyaldeki bağlı bir elektron arasında gerçekleşir. Gama ve bağlı elektron etkileştiğinde gama yok olurken bağlı elektron atomdan koparak serbest duruma geçer. Bu elektrona fotoelektron adı verilir. Fotoelektronun oluşabilmesi için gelen gama ışınının enerjisinin elektronun bağlanma enerjisinden büyük olması gerekir. Bu durumda kopan elektronun kinetik enerjisi, Denklem (3.1) ile verilir.

$$T = E_{\gamma} - B_e \quad (3.1)$$

Bu denklemde T serbest elektronun kinetik enerjisi, E_{γ} gelen fotonun enerjisi ve B_e elektronun bağlanma enerjisidir (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015). Gelen fotonun enerjisine göre yaklaşık $0.01 \text{ MeV} - 0.5 \text{ MeV}$ aralığında, baskın olan etkileşme mekanizması fotoelektrik olaydır (Krane, 1987).

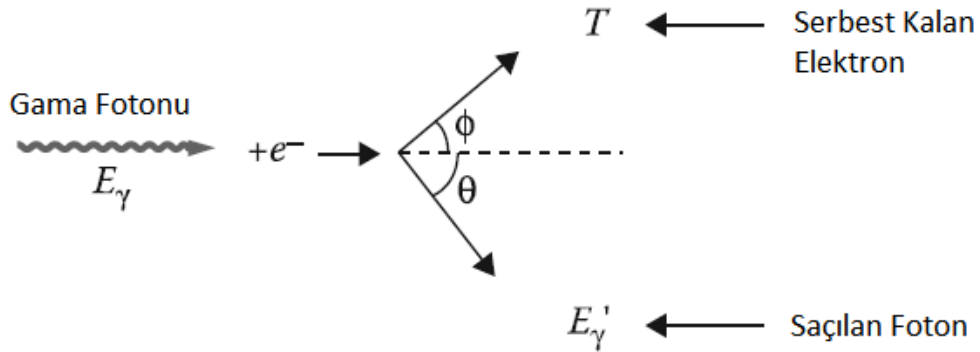
3.1.2. Compton Saçılması

Compton saçılması veya Compton etkisi foton ile serbest elektron arasında gerçekleşse de gerçekte gama fotonunun etkileştiği malzemedeki elektronlar bağlı elektronlardır. Fakat gelen fotonun enerjisi (keV mertebesinde) elektronun bağlanma enerjisinden (eV mertebesinde) çok yüksek olduğu için elektron serbest olarak kabul edilebilir. Şekil 3.1. ile gösterildiği üzere foton, elektron ile etkileştiğinde tüm enerjisini yitirmez ve enerjisi azalarak yön değiştirir. Buna göre gelen foton, saçılan foton ve serbest kalan elektronun enerjileri arasında Denklem (3.2) ile verilen bağıntı vardır (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015).

$$T = E_{\gamma} - E_{\gamma'} \quad (3.2)$$

Burada T serbest elektronun kinetik enerjisi, E_{γ} gelen fotonun enerjisi ve $E_{\gamma'}$ saçılan fotonun enerjisidir. Gelen fotonun enerjisine göre yaklaşık $0.5 \text{ MeV} - 5 \text{ MeV}$

aralığında, baskın olan etkileşme mekanizması Compton saçılmasıdır (Krane, 1987).



Şekil 3.1. Compton saçılması (Compton etkisi) (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015)

3.1.3. Çift Oluşumu

Foton - madde etkileşmesinde bahsedilmesi gereken son etkileşme mekanizması çift oluşumdur. Bu etkileşmede diğer mekanizmaların aksine foton elektronla değil çekirdek ile etkileşir, tamamen soğurulur ve bir elektron - pozitron çifti oluşur. Enerjinin korunumuna göre oluşan elektron - pozitron çiftinin kinetik enerjileri Denklem (3.3) ile verilir (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015).

$$T_{e^-} + T_{e^+} = E_\gamma - (mc^2)_{e^-} - (mc^2)_{e^+} = E_\gamma - 1.022 MeV \quad (3.3)$$

Çift oluşumu başlangıçta gelen gama fotonunu soğurarak tamamen yok etse bile, pozitron çok kısa sürede serbest elektronların biri tarafından yakalanır ve bu olayın sonunda iki adet 511 keV enerjili birbirlerine zıt yönde ilerleyen gama fotonu oluşur. Gelen fotonun enerjisine göre yaklaşık 5 MeV'den daha büyük enerjilerde baskın olan etkileşme mekanizması çift oluşumdur (Krane, 1987).

3.2. Sintilatörler ve Gama Işınlарının Tespiti

Sintilatörler, iyonize edici radyasyon içlerinden geçtiği zaman ışık sintilasyonu ya da kıvılcımı üreten katı, sıvı veya gaz materyallerdir. Bir sintilatörde elde edilen ışık miktarı oldukça azdır ve bir puls olarak kaydedilmeden önce yükseltilmesi gerekir. Sintilatörün ışığı, bir ışık çoğaltıcı (photomultiplier) ile çoğaltılır. Yani bir sintilasyon dedektörü

yapılacağı zaman araştırmacının ihtiyaç duyduğu en önemli iki malzeme ışık sintilasyonunu sağlayan materyal ve ışık çoğaltıcıdır. Dolayısıyla sintilatörün çalışması iki aşamada incelenebilir (Krane, 1987).

- Gelen ışımının enerjisinin sintilatör tarafından soğurulması ve uyarılmış durum geçişleri ile puls fotonları üretmesi
- Puls fotonlarının, ışık çoğaltıcı ile yükseltilmesi ve çıkış pulsunun alınması

İnorganik sintilatörlerin ışımları (lüminesansları), kristalin izinli ve yasaklı enerji bantları terimleri ile anlaşılabilir. Bir atomun enerji seviyeleri kuantumludur yani sadece belirli enerji seviyeleri bulunur. Bu kuantum durumu bir kristalde izinli enerji bantlarına karşılık gelir. Bu bantların varlığı sayesinde oluşan elektron, deşik (hole) ve eksitonlar sintilasyona katkıda bulunurlar. Taban durumunda kristalin elektron taşıyan izinli en üst bandı tamamen doludur. Bu bant valans bandı olarak adlandırılır. İzinli bir sonraki bant ise boştur ve iletim bandı olarak adlandırılır. Bir elektron gelen ışının enerjisini soğurarak valans bandından iletim bandına geçebilir ve iletim bandında serbest olarak hareket edebilir. Elektron valans bandından ayrıldığında arkasında bu sefer deşik adı verilen ve valans bandında serbestçe hareket eden bir boşluk bırakır. Eğer elektronun soğurduğu enerji iletim bandına geçmeye yetecek kadar olmazsa geride kalan deşik ile elektrostatik olarak bağlı kalır ve bu durumda da eksiton adı verilen elektron-deşik çiftlerini oluştururlar. Enerji düzeyleri ile ifade edilirse bir elektronun valans bandından daha yukarıda ve iletim bandından daha aşağıda bulunma durumudur. Eksitonlar iletim ve valans bandı arasında yeni bir bant oluştururlar. Bununla birlikte eksiton bantlarına ek olarak kristal kusurlarından ve safsızlığından dolayı oluşan ve valans ile iletim bandı arasında yer alan başka bantlar da bulunabilir. Fakat en önemli bantlar aktivatör atomlar tarafından oluşturulan bantlardır. Örneğin NaI(Tl) sintilatöründe Tl (Talyum) ve LaBr₃(Ce) sintilatöründe Ce(Seryum) atomları kristal içine özellikle yerleştirilen aktivatör atomlardır. Aktivatör atomların uyarılmış durumdan taban duruma geçiş süreçleri sintilasyon ile sonuçlanır. Uyarılmış duruma geçiş foton soğurma, eksiton, elektron veya deşik yakalama ile olabilir (Gilmore, 2008; Krane, 1987; Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015). Sonuç olarak sintilasyon süreci adım adım incelenecek olursa;

- İyonize edici radyasyon kristale girer,

- Elektronlar iletim bandına yükselir, valans bandında deşikler oluşur,
- Ara bölgede eksitonlar oluşur,
- Elektron, deşik ve eksiton soğurma ile aktivatör atomlar uyarılmış seviyelere geçerler,
- Foton ışıması ile taban durumlarına dönerler.

NaI(Tl) inorganik kristali, Lantanyum bazlı kristallerin yüksek enerji çözünürlükleri keşfedilene kadar oldukça yaygın olarak kullanılmıştır. Seryum ile katkılandırılmış Lantanyum' un sintilasyon sürecinde ışık kazancı, düşük bozunma zamanı gibi özelliklerinin üstünlüğü görüldükten sonra ise araştırmalar Lantanyum bazlı sintilatörlere yoğunlaşmıştır.

3.3. Kodların Karşılaştırılması

Monte Carlo simülasyonları, keyfi değişkenlerin bir sürece dahil olmasından dolayı, sonuçların tahmininin oldukça zor olduğu durumlarda, çıkabilecek farklı sonuçların gerçekleşme olasılıklarını modellemek için kullanılır. Burada ana fikir keyfi değişkenler kullanarak karmaşık bir sistemin veya sürecin olası çıktılarını bulmaktır. Bu yöntem 1940'lı yıllarda atom bombası üzerine çalışan bilim insanları tarafından geliştirilmiştir. Bilim insanları nötron difüzyonu gibi analitik çözüm için oldukça karmaşık olan bir fizik problemini modellemek için Monte Carlo simülasyonunu başarıyla kullanmışlardır. Geliştirilmesinden sonra Monte Carlo simülasyonları bilim, mühendislik, finans gibi alanlarda etkin şekilde kullanılmaktadır. Monte Carlo metodunun çalışma ilkeleri kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir (Rubinstein ve Kroese, 2017; Vassiliev, 2017);

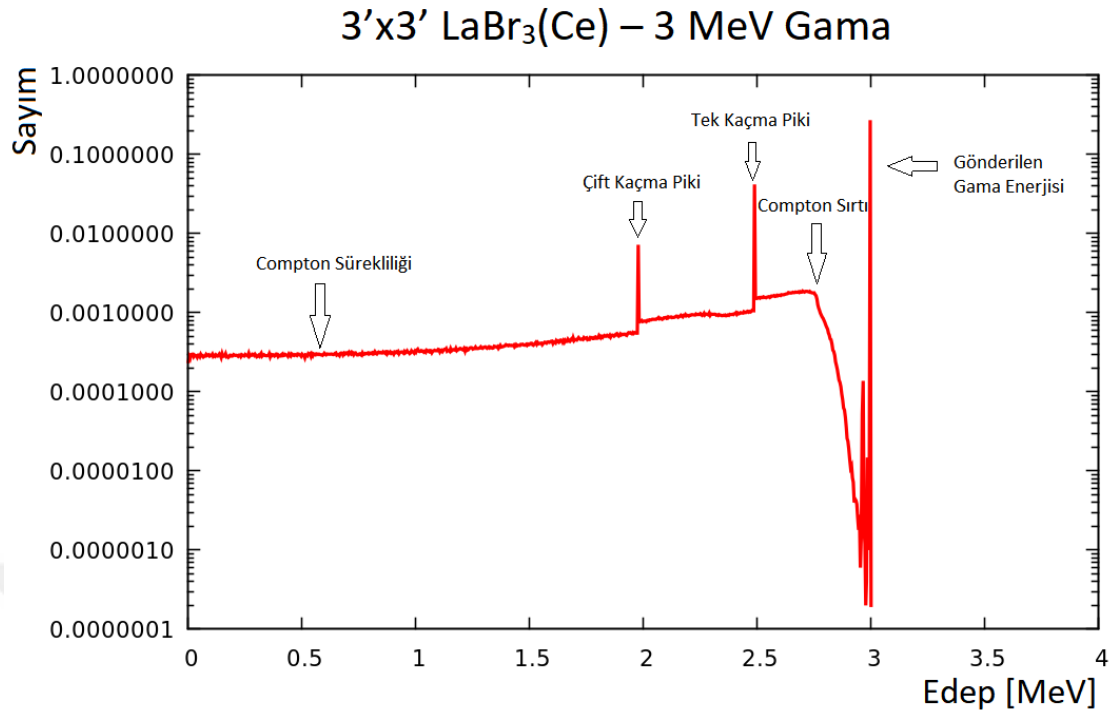
- Problem matematik terimleri ile ifade edilir.
- İncelenen problemin istatistiksel yorumu formüle edilir,
- İstatistiksel dağılımı örnekleyecek bir algoritma geliştirilir,
- Parametre için estimator (tahmin edici) ve istatistiksel belirsizlikler türetilir,
- Algoritma ve tahmin ediciler, hesaplama zamanını kısaltmak için optimize edilir,

- Parametre tahmininin istatistiksel belirsizliğinin istenilen düzeyde olduğu, yeterli derecede geniş bir örnek üretilir,
- Parametre ve parametrenin belirsizliği, üretilen örnek kullanılarak tahmin edilir.

Özellikle Monte Carlo metodunun tutarlılığının karşılaştırılması amacıyla tek kristal gama kaynağı simülasyonu Fluka programı ile yapılmıştır (Bohlen ve ark., 2014; Ferrari ve ark., 2005; Vlachoudis, 2009). Hem Fluka hem de Geant4, Monte Carlo metodunu kullanırsa da bu programlar farklı algoritmalar ve farklı kodlar kullanmaktadır. Dolayısıyla simülasyonları deneysel veriler ile karşılaştırmadan önce metodun kendi içinde değerlendirilmesi amaçlanmıştır ve Fluka burada tüm simülasyonun yapılacağı Geant4 için bir kontrol mekanizması görevini görmektedir.

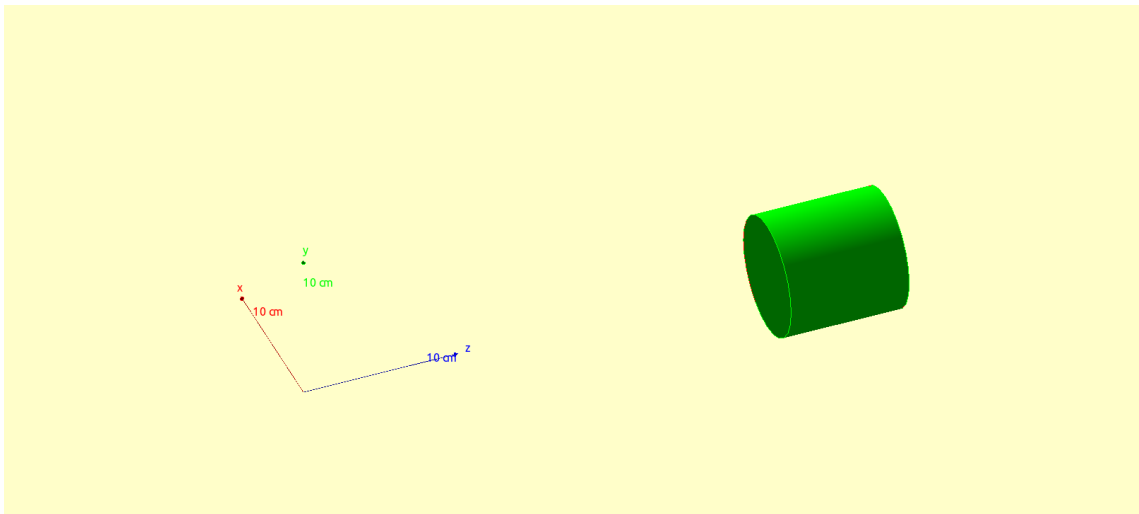
Fluka ile ilk yapılan simülasyonda $3' \times 3'$ ($7.62 \text{ cm} \times 7.62 \text{ cm}$) boyutlarında silindirik (silindirin çapı ve yüksekliği) bir $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ kristali alınmış ve orijinden 30 cm uzaklığa, tabanlarından birisi gama ışınları için giriş penceresi olacak şekilde orijine bakar bir durumda yerleştirilmiştir. Orijine bir gama ışını kaynağı konarak ışının kristale doğru $\pm 125 \text{ mrad}$ 'lık yayılma açısıyla (toplamda 250 mrad olacak şekilde) gelmesi sağlanmıştır. Toplamda 10^6 (simülasyonlardan hızlı sonuç almak istendiğinde olay sayısı 10^6 olarak seçilmiştir, diğer simülasyonlar GHz seviyesinde yapılmıştır) olay simüle edilerek gama spektrumu elde edilmiştir. Sonuçta kaynağın ve kristalin etrafı hava ile çevrili ve herhangi bir kaplama veya zırh olmadığı için elde edilen gama spektrumu ideal bir durumu yansıtmıştır. Şekil 3.2.'de Fluka ile elde edilen gama spektrumu (1'e normalize edilmiştir) görülmektedir. Şekil 3.2.'de düşey eksen sayım sayısını gösterirken yatay eksen dedektöre aktarılan enerjiyi göstermektedir (Edep - deposited energy - dedektöre aktarılan enerji).

Elde edilen spektrum ideal duruma yakın olduğu için tüm pikler maksimum enerji çözünürlüğü ile görülmektedir. Piklerin bulunduğu enerjilerde herhangi bir dağılım söz konusu değildir. Ayrıca tam soğurulma piki olan 3 MeV pikinden sonra spektrum kesilmekte ve daha büyük enerji görülmemektedir. Tam soğurulma pikinin solunda kalan ve sırasıyla tam olarak 511 keV ile 1022 keV uzaklıkta buluna iki pik çift oluşumunda ortaya çıkan pozitronun yok olması sırasında oluşan ve dedektörden kaçan fotonlara karşılık gelmektedir (tek fotonun kaçtığı pik $\sim 2.4 \text{ MeV}$ 'de ve fotonların ikisinin birden kaçtığı durumdaki pik $\sim 1.9 \text{ MeV}$ 'de bulunmaktadır).

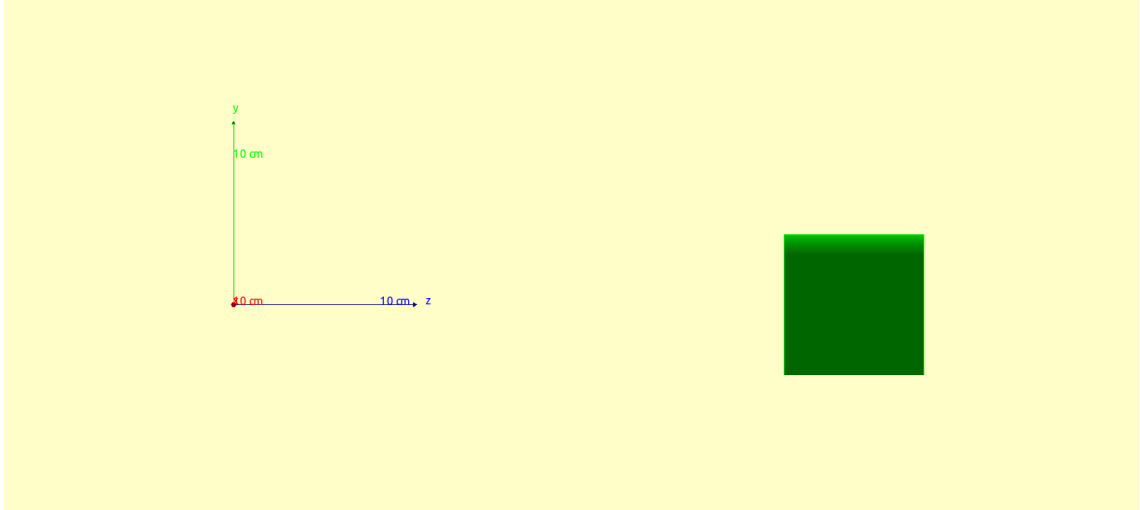


Şekil 3.2. 3' × 3' boyutlarında silindirik bir kristalin Fluka ile elde edilen gama spektrumu

Geant4 ile yapılan ilk simülasyon da tamamen aynı şartlar altında gerçekleştirilmiştir. 3' × 3' boyutlarında silindirik kristal, 3 MeV 'lik gama kaynağından 30 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Şekil 3.3. ve Şekil 3.4., Geant4 ile hazırlanan geometriyi göstermektedir. Şekillerde x, y, z eksenlerinin gösterildiği nokta orijine karşılık gelmektedir. Silindirik kristal z ekseni üzerinde yine tabanlarından biri kaynağa bakacak şekilde yerleştirilmiştir.

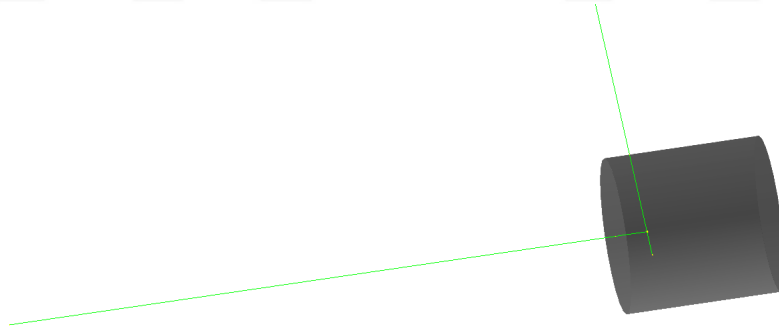


Şekil 3.3. Geant4 ile hazırlanan 3' × 3' silindirik kristal - kaynak geometrisi_1



Şekil 3.4. Geant4 ile hazırlanan 3' x 3' silindirik kristal - kaynak geometrisi_2

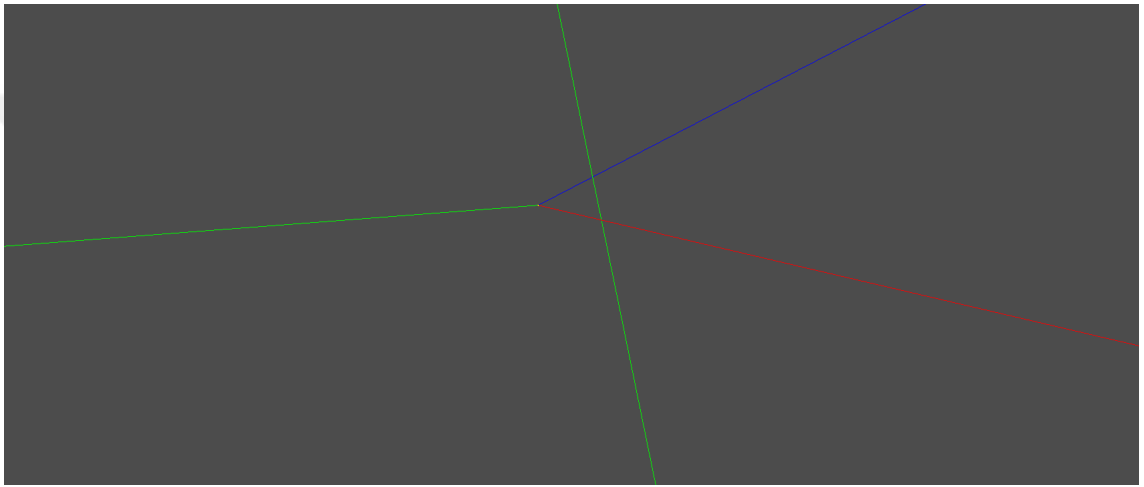
Aynı durumda (10^6 olayda) elde edilen spektruma geçmeden önce Şekil 3.5.'te tek bir gamanın dedektör kristalinin içinden geçerken yaptığı etkileşmelerin simülasyonu gösterilmiştir. Simülasyona göre, gama detektöre girmiş, yaptığı etkileşmeler sonucu enerjisinin bir kısmı soğurulmuş ve bir kısmı kaçmıştır. Şekil 3.5. dikkatlice incelendiğinde kaçan fotonun çift oluşumun sonunda ortaya çıkan fotonlardan birisi olduğu açıktır.



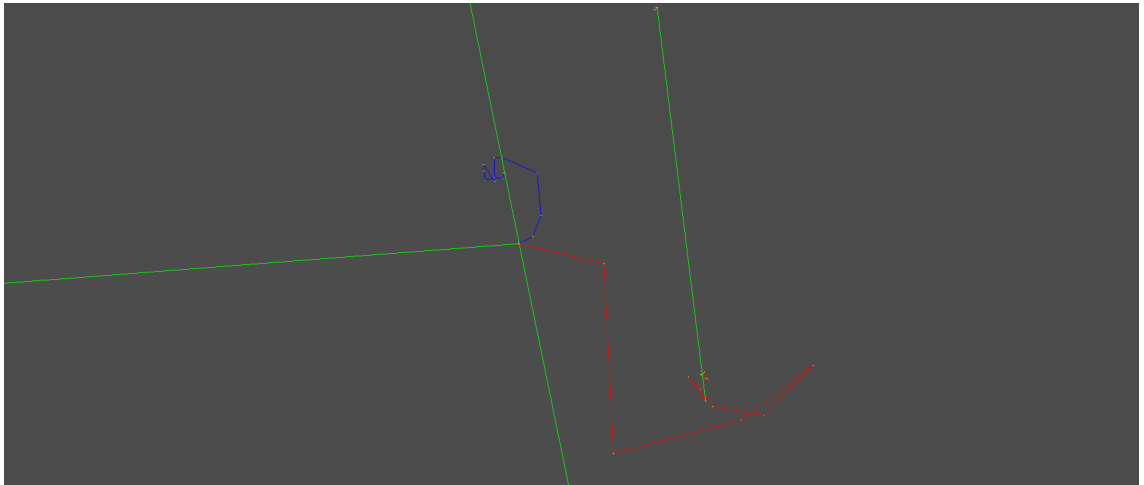
Şekil 3.5. Tek bir gama ışınının kristal içinden geçerken yaptığı etkileşmelerin simülasyonu

Gelen bu tek gamanın dedektör içinde yaptığı etkileşimler adım adım Şekil 3.6. - Şekil 3.10. ile verilmiştir. Simülasyona göre gama detektöre girdikten sonra önce çift oluşum ile elektron-pozitron çiftine dönüşmüş (Şekil 3.6.), ortaya çıkan elektron tamamen soğurulmuş (Şekil 3.7.), pozitron detektördeki elektronlardan biri tarafından yakalanarak

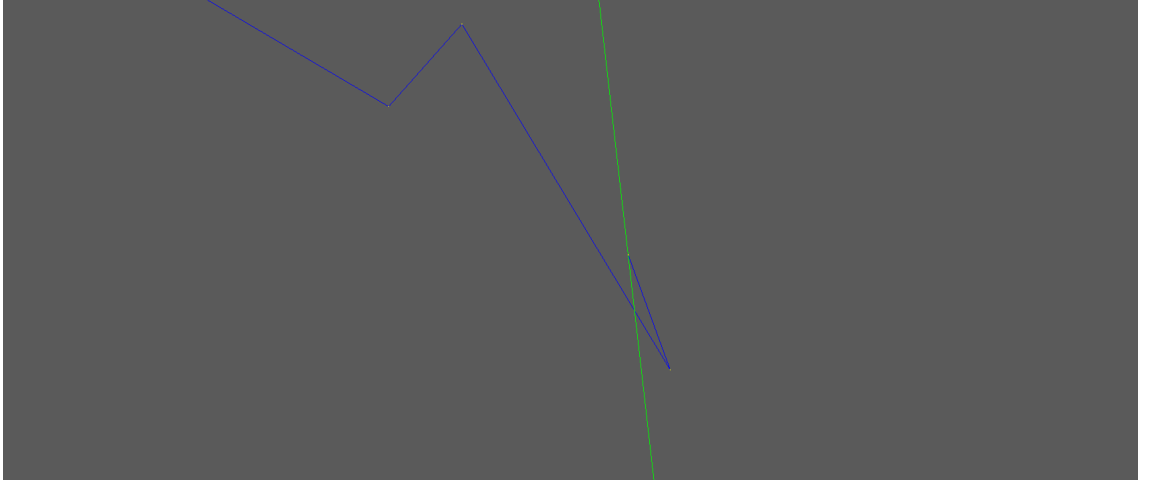
yok olmuş ve yok olma sonucunda tam zıt yönde ilerleyen iki 511 keV enerjili foton oluşmuş (Şekil 3.8.), son olarak fotonlardan birisi tamamen soğurulurken (Şekil 3.9.) diğeri dedektörden kaçmıştır (Şekil 3.10.). Adım adım takip edilen bu simülasyona göre gelen gama enerjisinden sadece 511 keV 'lık bir enerji kaybı söz konusudur. Bu durumda oluşacak olan gama spektrumunda tam olarak gelen gama enerjisinin 511 keV altında tek bir pik oluşmasını bekleyebiliriz. Sekil 3.11. ile verilen spektrum yukarıda anlatılan olayın Geant4 tarafından kaydedilen spektrumunu göstermektedir ve tüm simülasyonu doğrulamaktadır.



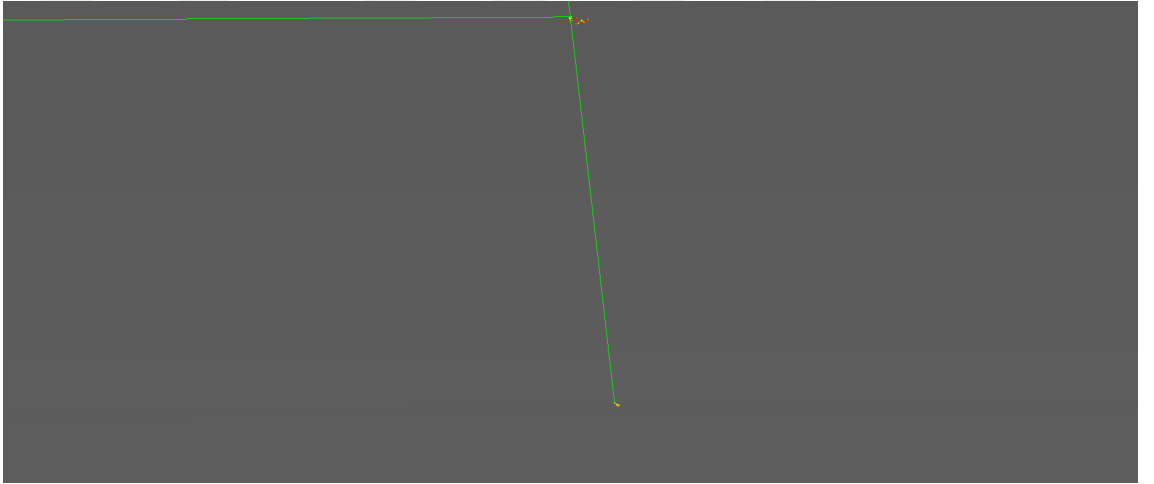
Şekil 3.6. Elektron-pozitron oluşumu (kırmızı-mavi)



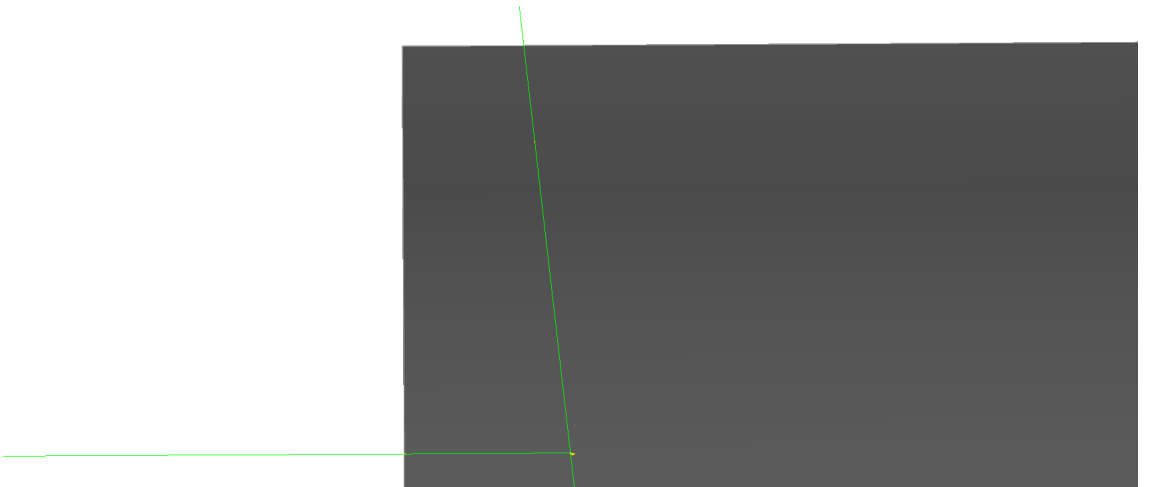
Şekil 3.7. Elektronun tamamen soğurulması (kırmızı)



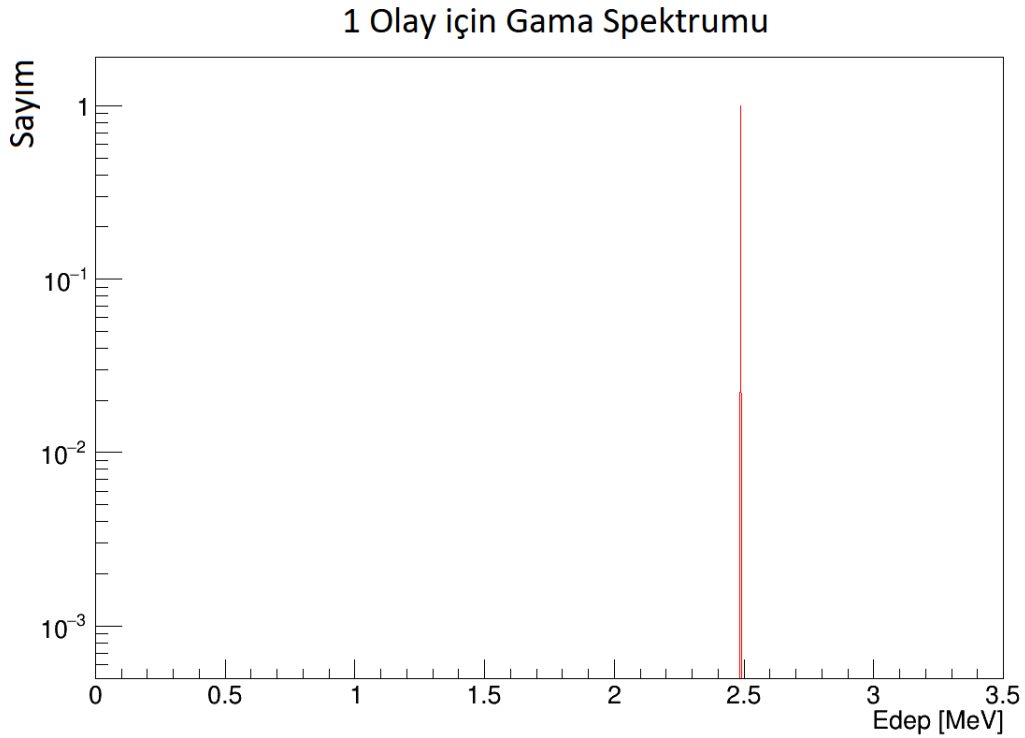
Şekil 3.8. Pozitronun serbest elektronlardan biri tarafından yakalanarak 511 keV enerjili iki fotona dönüşmesi (mavi-yeşil)



Şekil 3.9. Fotonlardan birinin tamamen soğurulması (yeşil)



Şekil 3.10. İkinci fotonun dedektörden kaçması



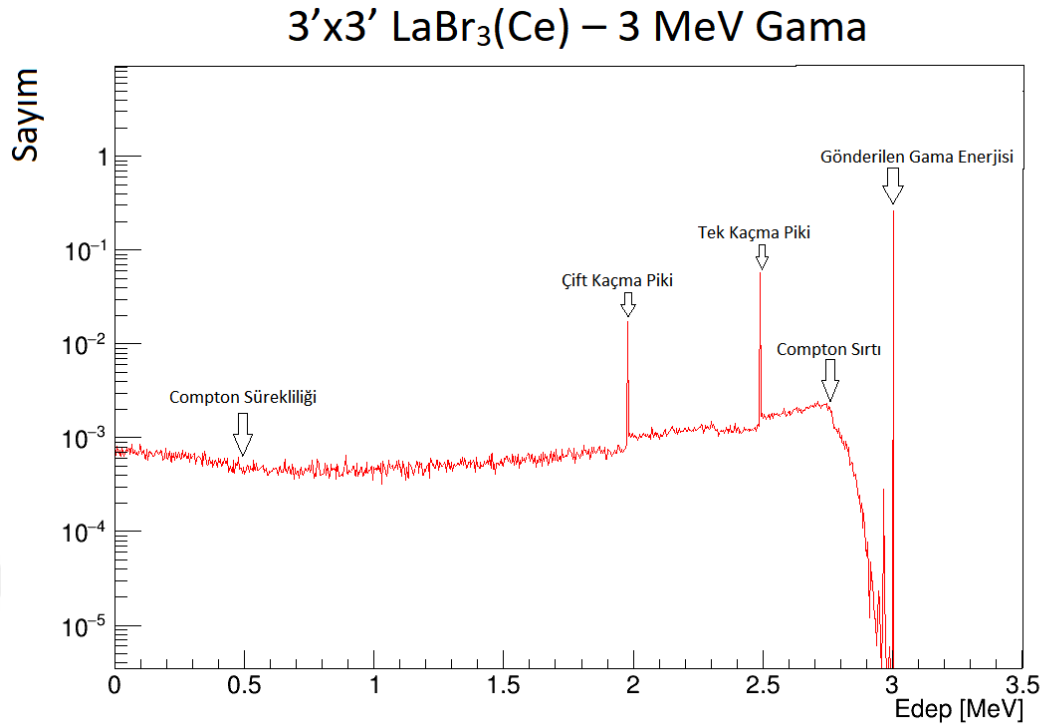
Şekil 3.11. Dedektör ile etkileşen bir tek gama fotonunun spektrumu

Bir olay için simülasyonun doğruluğundan emin olduktan sonra Fluka ile karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 3.12., yine 1'e normalize edilmiş 10^6 olayın simülasyonunu göstermektedir.

Beklendiği üzere 3 MeV enerjide tam soğurulma piki oluşmuş, tam soğurulma pikinden daha büyük enerjide hiç sayım alınmamış (ideal durumda spektrumda görülebilecek maksimum enerji, gönderilen gamanın enerjisine eşit olacaktır) ve yine tam enerji pikinin solunda tek ve çift foton kaçma pikleri olmaları gereken enerjilerde ortaya çıkmışlardır. Her iki spektrumda da tam soğurulma pikinden önce oluşan Compton sürekliliği ve Compton sırtı açıkça görülmektedir.

Denklem (3.4) incelenecek olursa Compton sürekliliğinin iki kritik açı ile belirlenen bölgede bulunacağı rahatlıkla görülebilir (Gilmore, 2008).

$$E_e = E_\gamma \left\{ 1 - \frac{1}{[1 + E_\gamma (1 - \cos(\theta)) / m_0 c^2]} \right\} \quad (3.4)$$



Şekil 3.12. 3' × 3' boyutlarında silindirik kristalin Geant4 ile elde edilen gama spektrumu

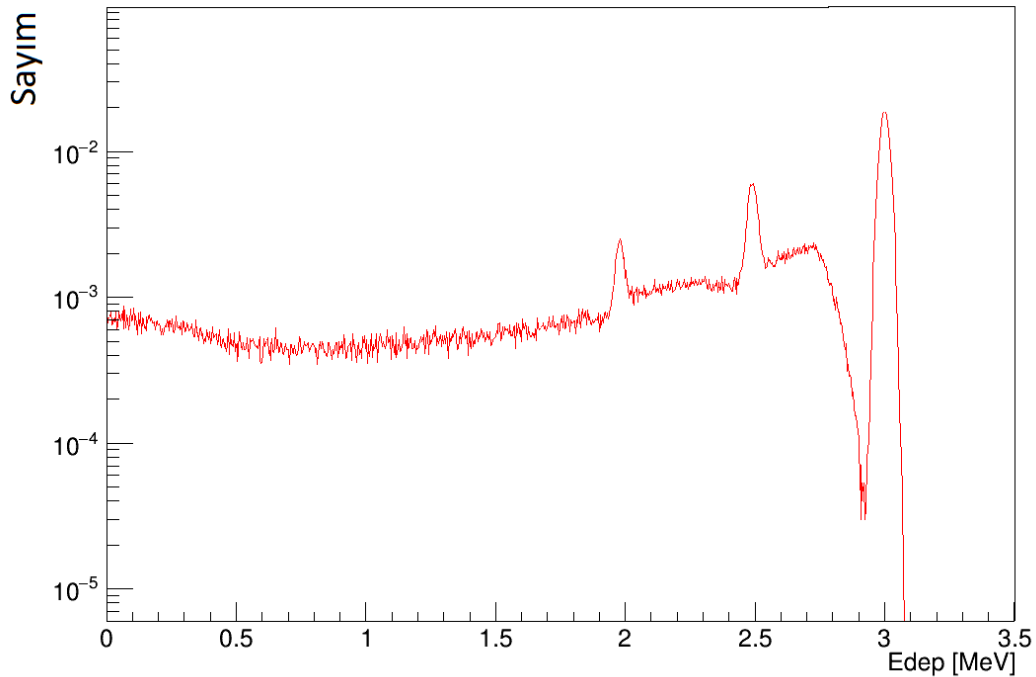
Denklem (3.4)'de E_γ gelen fotonun enerjisini, m_0 durgun elektronun kütlesini ve θ saçılma açısını göstermektedir. Sözü edilen kritik açılar, θ 'nın minimum ve maksimum olduğu 0° ve 180° 'dir. θ 'nın maksimum değeri Compton sırtının nerede olacağını belirler (gelen gama ışınının enerjisine de bağlı olarak). İdeal bir durumda Compton sırtı, Compton saçılmalarıyla dedektöre enerji aktarımının gerçekleşeceği son sınır olmalıdır. Fakat hem Fluka (Şekil 3.2.) hem de Geant4 (Şekil 3.12.) ile yapılan simülasyonlarda görüleceği üzere, Compton sırtı ile tam soğurulma piki arasında kalan bölgede dedektöre enerji aktarımı vardır. Dedektöre gelen gama ışınının, dedektörü terketmeden önce Compton sırtı civarında birden fazla Compton saçılması yaptığı böyle durumlarda, dedektöre aktarılan enerji bu ara bölgeye yerleşir. Dolayısıyla bu bölge Çoklu Compton bölgesi olarak adlandırılır (Gilmore, 2008).

3.4. Enerji Çözünürlüğü

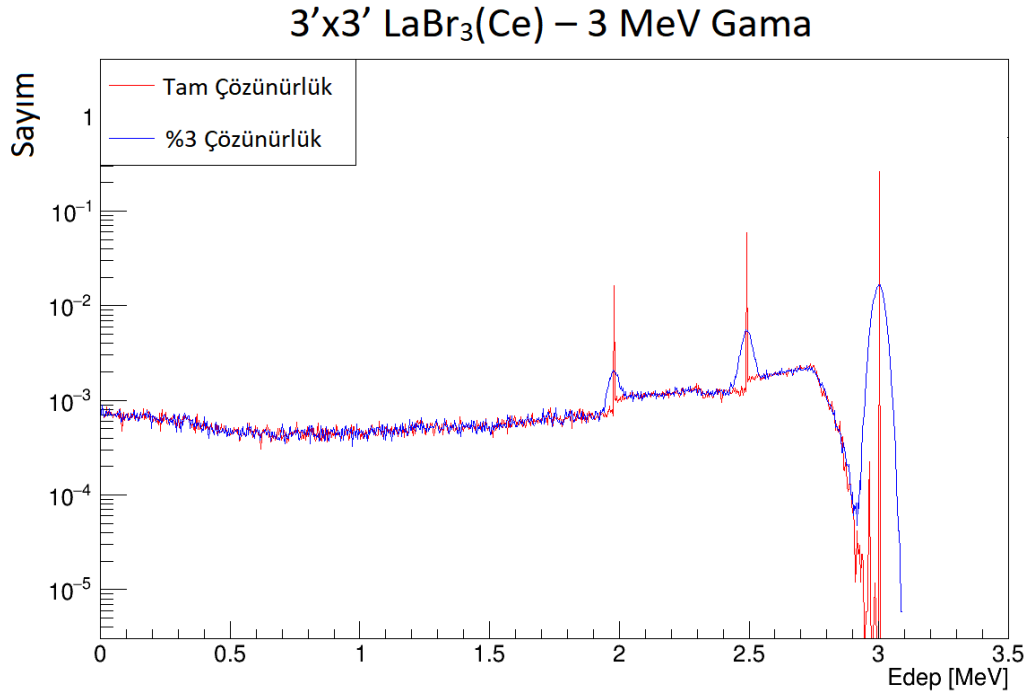
Monte Carlo simülasyonlarının uygulamalarında standart olarak kullanılan Geant4 ve Fluka gibi programlar simülasyonları nümerik olarak gerçekleştirmektedirler ve bu bakımdan benzerdirler. Ancak Geant4, tek parçacık yörüngesi, uçuş süresi, enerji bırakımı

gibi daha fiziksel konularda en iyi simülasyon programıyken, Fluka saçılma odası etrafındaki gama ve nötron akısının değişimi için en iyi simülasyon programı durumundadır (Agostinelli ve ark., 2003; Allison ve ark., 2006, 2016; Bohlen ve ark., 2014; Ferrari ve ark., 2005; Vlachoudis, 2009). Bu çalışmada sıfırdan itibaren bir dedektörler topluluğunun işlevsel bir şekilde simülasyonlarının yapılması öngörüldüğü için Fluka ile olan karşılaştırmadan sonra çalışmanın tamamına Geant4 ile devam edilmiştir. Bu noktaya kadar yapılan simülasyonlarda dedektörün ideal bir dedektör olduğu varsayılarak maksimum enerji maksimum enerji çözünürlüğü ile sonuçlar elde edilmiştir. Fakat gerçek bir dedektör için durum farklı olacaktır. Literatürde $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ için enerji çözünürlüğü, yarı yükseklikteki maksimum genişlikte (FWHM) $\sim 3\%$ olarak verilmektedir (Dhibar ve ark., 2018; Lavagno ve ark., 2013; van Loef ve ark., 2002; Weisshaar, 2008). Eğer literatürde verilen bu değer simülasyonlara eklenecek olursa Şekil 3.12. ile verilen spektrum Şekil 3.13.'deki halini almaktadır. Şekil 3.14. ile verilen spektrum karşılaştırmalarına dikkatlice bakılacak olursa $\sim 3\%$ enerji çözünürlüğü eklendikten sonra, tam enerji soğurma pikinin hemen altında görünen pik çözünürlüğün yeterli olmaması nedeniyle artık görünmemektedir. Çünkü bu pik genişleyen tam enerji soğurulma pikinin içinde kalmaktadır.

3'x3' $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ – 3 MeV Gama



Şekil 3.13. Enerji çözünürlüğü eklendikten sonra elde edilen spektrum



Şekil 3.14. Gerçekçi enerji çözünürlüğü eklendikten sonra spektrumların karşılaştırılması

Simülasyona eklenen enerji çözünürlüğü R , E pikin tepe noktasının enerjisi ve FWHM, E enerjisinin yarı yükseklikteki maksimum genişliği olmak üzere Gaussyen bir pik için Denklem (3.5) ile verilir (Knoll, 2010).

$$R = \frac{FWHM}{E} \quad (3.5)$$

Bununla birlikte deneysel çalışmalardan yola çıkılarak elde edilen bir diğer yararlı enerji çözünürlüğü de Denklem (3.6) ile verilmiştir.

$$R = a + \frac{b}{\sqrt{E}} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'de a ve b parametreleri deneysel olarak elde edilen farklı spektrumların fitlenmesiyle elde edilen ve elektronik ile istatistiksel etkilere bağlı parametrelerdir (Reilly ve ark., 1991). Yapılan simülasyonlar tamamen istatistiğe bağlı olduğu için a terimi ihmal edilirse, çözünürlük Denklem (3.7) halini alır:

$$R = \frac{b}{\sqrt{E}} \quad (3.7)$$

Maksimum çözünürlüğe sahip spektrum, enerji ve standart sapmaya (σ) bağlı olarak, gauss istatistiğine uyan keyfi bir fonksiyon ile yeniden düzenlenir. Burada;

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln(2)}\sigma \quad (3.8)$$

olup, σ 'nın değeri,

$$\sigma = \frac{1}{2.35} \times R(FWHM) \times \sqrt{E} \quad (3.9)$$

eşitliği ile hesaplanır (Knoll, 2010; Reilly ve ark., 1991).

Çalışmanın bundan sonraki kısmında elde edilen tüm spektrumlara enerji çözünürlüğü eklenecektir. Gerçek deney şartlarına ve tutarlı sonuçlara ulaşılacak isteniyorsa maksimum enerji çözünürlüğü varsayımıyla devam edilemez. Daha önce bahsedildiği gibi enerji çözünürlüğü dedektörün parçacık ayırt etme gücünün bir ölçüsü olacaktır. Çözünürlüğün eklendiği ilk örnekte bile pikin genişlediği durumda çok yakınındaki bir diğer pikin spektrumdan kaybolacağı açıkça görülebilir (bkz. Şekil 3.14.).

3.5. Dedektör Verimi

Enerji çözünürlüğünün eklenmesiyle birlikte simülasyonlar ile araştırılacak bir diğer konu da dedektör verimi olacaktır. Dedektör verimi hesaplanırken literatürde geçen iki tür verimden yararlanılabilir. Bu verimler, toplam ve foto-pik verimleri olarak adlandırılır. İsimlerinden de anlaşılabilceği gibi toplam verim, dedektöre ulaşan tüm gamaların, kaynaktan yayılan tüm gamalara oranıyla Denklem (3.10) kullanılarak ve foto-pik verimi de gama pikinin altında kalan gamaların kaynaktan yayılan tüm gamalara oranıyla Denklem (3.11) kullanılarak bulunabilir (Kumar ve ark., 2009b).

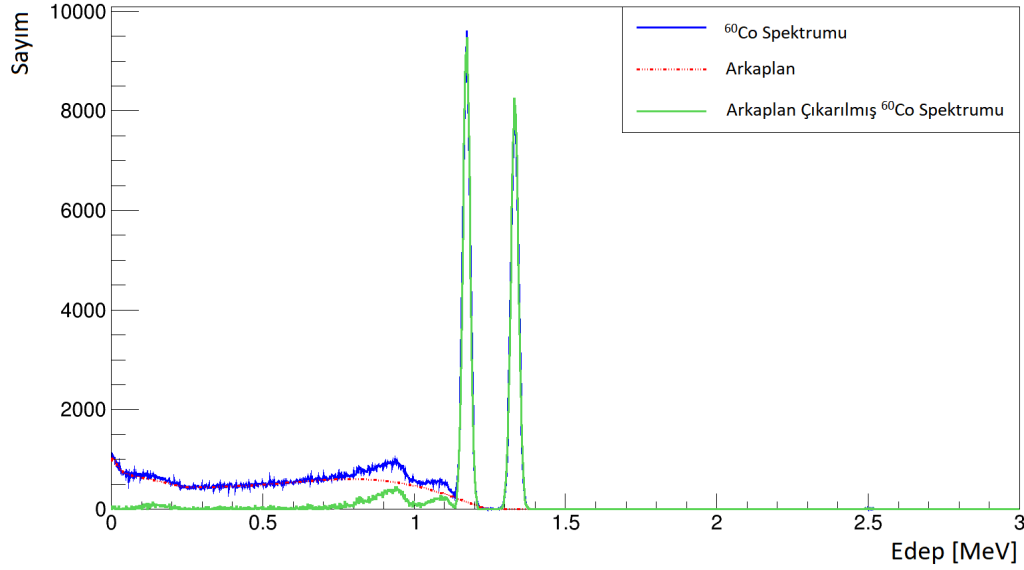
$$\varepsilon_T = \frac{\text{dedektör tarafından tespit edilen toplam gama sayısı}}{\text{kaynaktan yayılan toplam gama sayısı}} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_P = \frac{\text{fotopik altında kalan toplam sayım}}{\text{kaynaktan yayılan toplam gama sayısı}} \quad (3.11)$$

Burada dedektörlerin karakterizasyonu yapılırken kullanılacak olan verim, foto-pik verimi olup farklı geometriler için birden fazla enerji durumunda hesaplanacaktır ve

bulgular bölümü altında detaylıca tartışılacaktır.

Tüm sistemin veriminden önce sadece bir kristalin verimini hesaplamak üzere bir ^{60}Co nokta kaynağı kristalin önüne yerleştirilmiştir. Kaynağın gama spektrumu elde edildikten sonra arka plan spektrumdan çıkarılmış (bkz. Şekil 3.15.) ve hem toplam verim (Denklem (3.10)) hem de foto-pik verimi (Denklem (3.11)) hesaplanmıştır.



Şekil 3.15. ^{60}Co nokta kaynağı için arka plan çıkarılmadan önce ve sonra gama spektrumu

Şekil 3.15. ile üç ayrı spektrum bir arada gösterilmektedir. Mavi ile verilen spektrum simülasyon ile elde edilen orijinal spektrum olup, kırmızı spektrum arka planı göstermektedir. Yeşil spektrum ise arka plan çıkarıldıktan sonra elde edilen ^{60}Co spektrumunu göstermektedir. Burada toplam verim %0.31, 1.173 MeV (birinci pik) için foto-pik verimi %0.13 ve 1.332 MeV (ikinci pik) için foto-pik verimi %0.12 olarak hesaplanmıştır. Bu oran düşük gibi görünse de dedektör sayısı artırıldığında verimin artması beklenmektedir.

3.6. Sinyal - Arka Plan Oranı

Bu tez çalışmasının ve yapılacak olan gama kalorimetresinin en önemli araştırmalarından bir tanesi sinyal – arka plan oranları olacaktır. Burada bahsi geçen arka plan bir önceki örnekte verilen (bkz. Şekil 3.15.) spektrumdakinden farklı olarak sinyalin değil ışın-hedef etkileşmesinin sonucunda ortaya çıkan arka planı vurgulamaktadır. Işının

ve hedefin özellikleri düşünüldüğünde (bkz. Bölüm 4.2.) bu arka plan oldukça yüksek olacaktır ve bu arka planda sinyalin tespit edilebilmesi hayati önem taşımaktadır.

Bulgular kısmında detaylıca yer verilecek olsa da burada arka plan ve sinyalin birkaç özelliği tartışılacaktır. Öncelikle LNS'te bulunan siklotron süper-iletken hızlandırıcıdan saniyede 10^{12} mertebesinde iyon gönderildiği not edilmelidir. Dolayısıyla ister arka plan olsun ister sinyal olsun hesaplamalar yapılırken bu yüksek akı hesaba her zaman dahil edilmelidir. Buna ek olarak gama kalorimetresinin FPD ile eş zamanlı olarak çalışacağı ve bu çalışma sırasında ~ 5 ns'lik çakışma penceresine sahip olacağı da hesaplamalara dahil edilecektir. Son olarak hedefin özellikleri, özellikle yüzey yoğunluğu ve kalınlığı sinyal – arka plan oranını önemli derecede etkileyecektir.

3.7. Minimum Tesir Kesiti

Bu tez çalışması kapsamında son olarak tespit edilmesi gereken özellik, DCE reaksiyonlarının sahip olması gereken minimum tesir kesitleridir. Deneyler boyunca ışın-hedef etkileşmelerinde beklenen bu reaksiyonlar aradığımız sinyalleri oluşturacaktır. İstatistiksel olarak anlamlı sinyaller elde edebilmek için sinyalin arka plandan yeterince yüksek olması gerekir. Bunu da etkileyecek en önemli parametrelerden birisi DCE reaksiyonlarının tesir kesiti olacaktır. Çalışma boyunca S/B oranlarının elde edilmesinde DCE tesir kesiti 1 nb olarak alınacaktır. Fakat bu değer sadece referans olarak seçilmiştir. Kalorimetrenin başarılı bir şekilde çalışması için gerekli olan tesir kesitini esasen arka planın seviyesi belirleyecektir. Işının akısı ve hedefin yüzey yoğunluğu da tesir kesitlerini etkileyen diğer faktörlerdir. Yine bulgular bölümünde bahsedilecek olsa da minimum tesir kesitleri için bir diğer etken deney süresidir.

Minimum tesir kesitlerinin hesaplamasında daha önce söylendiği gibi esas parametrelerden bir tanesi ışın-hedef reaksiyonlarından kaynaklanan arka plandır. Hesaplamalar sırasında örneğin 0.8 MeV'lik gama ışını için arka plan spektrumu üzerinde ilgili enerji değeri merkez noktası seçilerek Gauss dağılımı istatistiği kullanılmıştır (Gilmore, 2008; Knoll, 2010). Bu istatistiğe göre belirlenen pik altında kalan sayımların %99'u merkez enerjinin 3σ sağında ve solunda yer alır. Dolayısıyla bu 6σ 'lık alanın dışında kalan bölge (yine 3σ sağında ve solunda) arka plan seviyesini ve bu bölgede kalan sayımı belirlemektedir. Simülasyonlar sadece sayma istatistiğine bağlı olduğu için (diğer tüm etkiler bu

noktada ihmal edilebilir) pik altında kalan sayım ile arka plan sayımı arasındaki farkın 3σ kadar olması yeterlidir. Buradan yola çıkarak ve Denklem (3.12)'i kullanarak gerekli tesir kesitleri hesaplanabilir (L'Annunziata, 2016).

$$N_S = \sigma_{DCE} I N x t \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)'da N_S pik altında kalan sayımı, σ_{DCE} tesir kesitini, I gelen ışın akısını, N hedefin sayı yoğunluğunu, x hedefin kalınlığını ve t ise deney süresini göstermektedir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde önceki bölümlerde verilen metot takip edilerek ve NUMEN deneylerinin şartları oluşturularak hazırlanan simülasyon sonuçları verilecek ve sonuçlar tartışılacaktır. Öncelikle tek $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ kristalinin nokta kaynaklara olan tepkisi iki durum için araştırılmıştır. Bu durumların ilki sadece sintilasyon kristalinin olduğu durum ve ikincisi kristalin üzerinin ince bir alüminyum tabaka ile kaplı olduğu durumdur.

Diğer birçok sintilasyon kristalinde olduğu gibi $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ kristali neme karşı oldukça duyarlıdır ve hava ile teması istenmeyen bir durumdur. Bunun için kristalin foto-çoğaltıcı tüp (PMT) ile birleştiği yüzey hariç genellikle alüminyum ile kaplı olarak muhafaza edilir.

Dolayısıyla tez çalışması boyunca ışın-hedef simülasyonları yapılıncaya kadar tüm simülasyonlar bu iki durum için ayrı ayrı yapılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonunda spektrumlarda ne gibi farkların oluştuğu ve dedektörleri nasıl etkileyebileceği tartışılmıştır.

4.1. Histogramlar

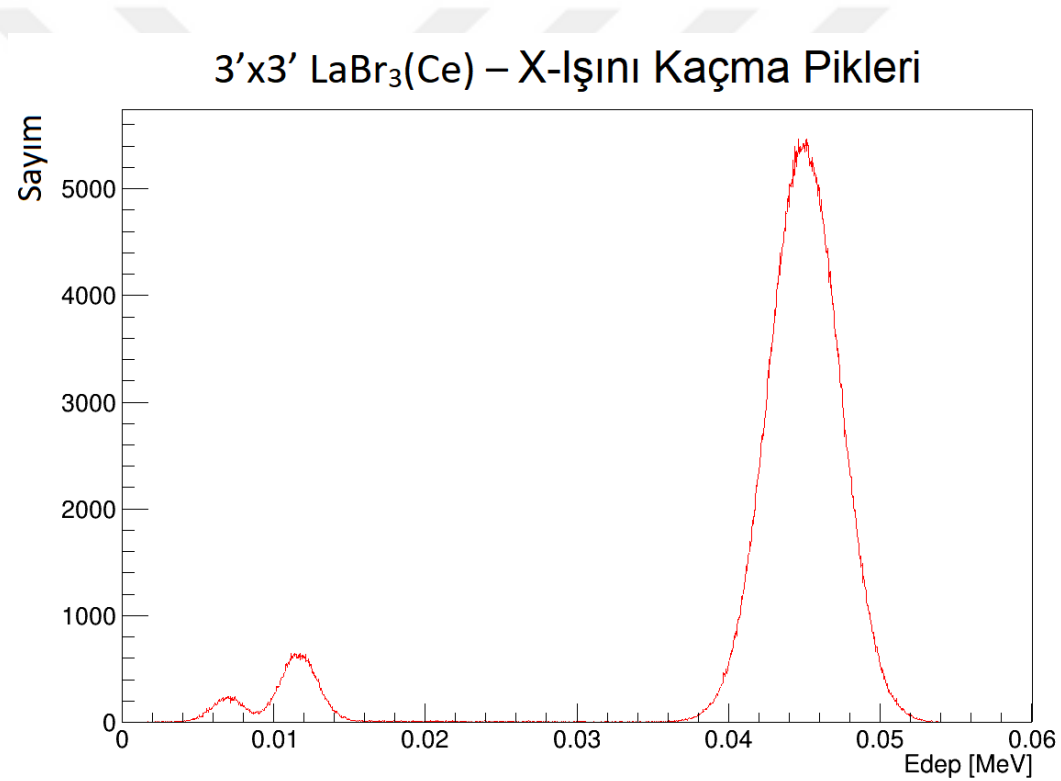
Önceki bölümlerde ifade edildiği üzere simülasyonlara enerji çözünürlüğü de dahil edildikten sonra Geant4 ile dedektörün performans testleri yapılmaya başlanmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi bu bölümde dedektör kristalinin değişik kaynaklara olan tepkisi üzerinde alüminyum koruyucu varken ve yokken ayrı ayrı incelenecektir. Burada yine bahsedilmesi gereken bir özellik de alüminyum kaplama her ne kadar kristali nemden koruma amaçlı olsa da kristal ek olarak verimin artırılması için yansıtıcı bir tabaka ile de (teflon gibi) kaplanabilmektedir (Lavagno ve ark., 2013). Bu tür kaplamalar, hatta alüminyumun kendisi bile dedektörden kaçabilecek gama fotonlarını dedektöre geri yansıtarak verimi arttırabilmektedir.

Burada öncelikle düşük enerji bölgesinin araştırılmasına öncelik verilmiştir. İlerleyen kısımlardaki gama enerjileri bu bölge için oldukça yüksek olduğundan, sözü edilmesi gereken önemli noktalar gözden kaçabilir. Düşük enerji bölgesinin önemi, bremsstrahlung kaynaklı oluşan X-ışınlarının dedektörden kaçabilmesidir (gama spektrumlarında düşük bölgede baskın olan mekanizma bremsstrahlung). Literatürde 0 - 45 keV aralığında $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ için gözlenen üç X-ışını kaçma piki (bunlardan ikisi Lantanyum'a (La) ve birisi

Bromür'e (Br) aittir) dikkat çekmektedir (Khodyuk ve Dorenbos, 2010). Yapılan simülasyonlarda bu piklerden sadece Lantanyum'a ait olanlar gözlenmiştir. Şekil 4.1 ile verilen spektrum 45 keV enerjili gama ışınlarının dedektöre gönderilmesiyle elde edilmiştir.

Şekil 4.1. ile verilen spektrumda 0 - 20 keV arasında görülen iki pik Lantanyum'a ait iki kaçma pikidir (X Ray Data Booklet, 2009; Khodyuk ve Dorenbos, 2010). Khodyuk ve Dorenbos (2010) yaptıkları çalışmada 45 keV 'lik tam soğurulma pikinden hemen önce Bromür kaçma piki gözlemiş olsalar da yapılan simülasyonlarda bu pik görülmemiştir.

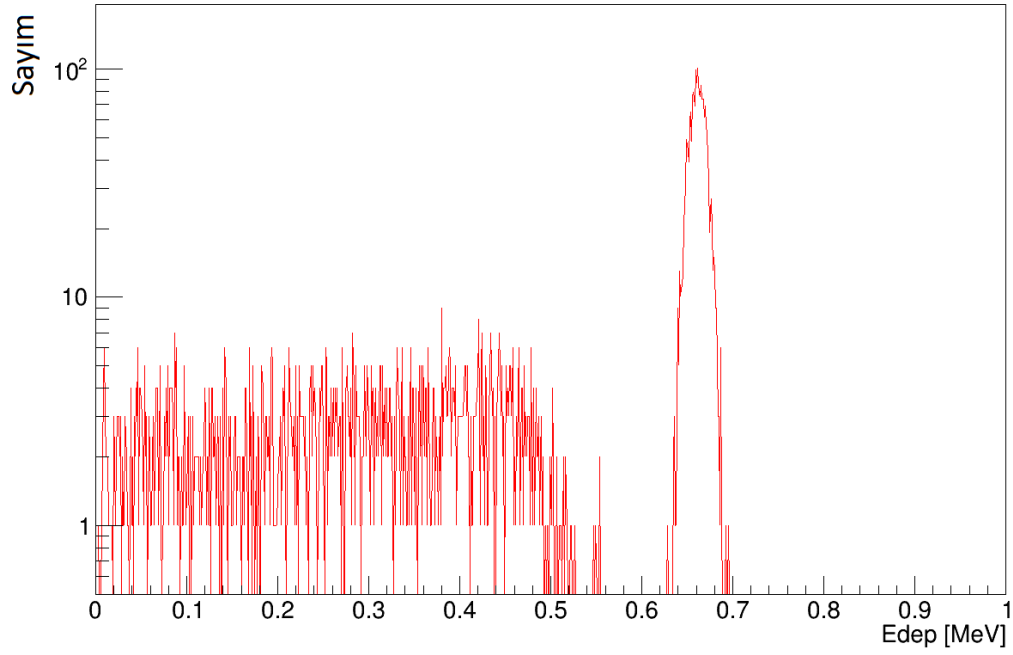
Düşük enerji bölgesindeki X-ışını kaçma pikleri araştırıldıktan sonra ilk olarak en çok kullanılan nokta kaynaklardan olan ^{137}Cs 'nin spektrumlarına bakılmıştır. Simüle edilen olay sayısı 10^6 olarak alınmış ve nokta kaynak orijine yerleştirilmiştir.



Şekil 4.1. 45 keV enerjide LaBr₃(Ce) ait X-ışını kaçma pikleri

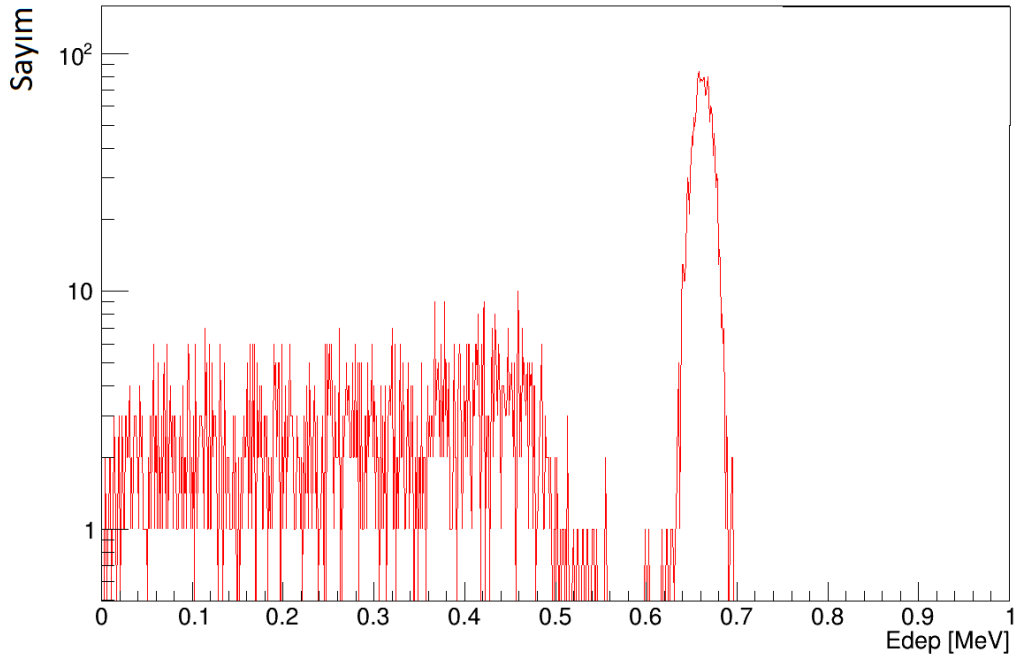
Tek kristal kullanılarak yapılan simülasyonlarda elde edilen spektrumlar sırasıyla Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'te Alüminyum kaplamanın olmadığı ve olduğu durumlarda verilmiştir.

3'x3' LaBr₃(Ce) – ¹³⁷Cs – Kaplama Yok



Şekil 4.2. ¹³⁷Cs'nin dedektör üzerinde kaplama olmadığı durumdaki gama spektrumu

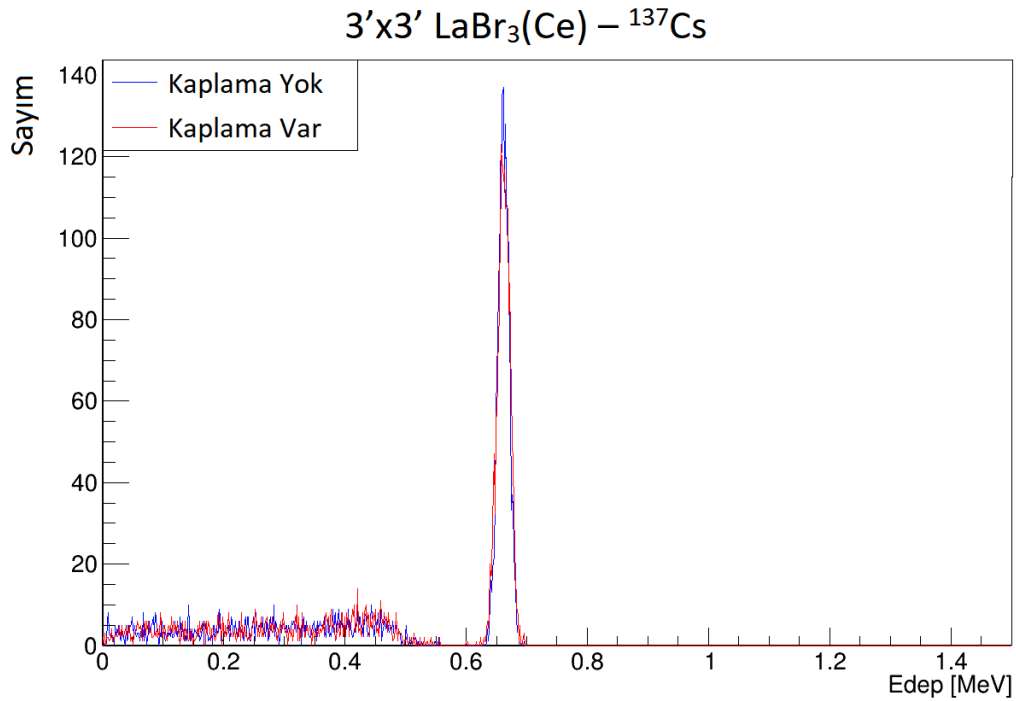
3'x3' LaBr₃(Ce) – ¹³⁷Cs – Kaplama Var



Şekil 4.3. Alüminyum ile kaplanan dedektörün ¹³⁷Cs gama spektrumu

Bu iki spektrumu üst üste bindirip farklarına bakmadan önce spektrumların bekle-

nildiği gibi çıkmamasının nedenleri tartışılmalıdır. Burada nokta kaynak tüm uzay boyunca ısıma yaptığı için ilk örneklerde olduğu gibi neredeyse tüm gama ışınlarının dedektöre ulaşması gibi bir durum söz konusu değildir. Dolayısıyla spektrumda pikler görünür durumda olsa da daha önceki spektrumlar kadar temiz değildir. Bunu aşmanın yollarından birisi olay sayısını arttırmak, bir diğeri ise kaynaktan çıkan ışınları dedektöre yönlendirmektir (örneğin bir kolimatör yardımıyla). Daha iyi bir spektrum için kullanabileceğimiz bir diğer seçenek ise 662 keV enerjili gama ışınlarını daha önce yaptığımız gibi (örneğin 250 mrad yayılma açısı ile) dedektöre göndermektir. Şekil 4.4.'te kaplama kullanıldığında oluşan fark gösterilmiştir.

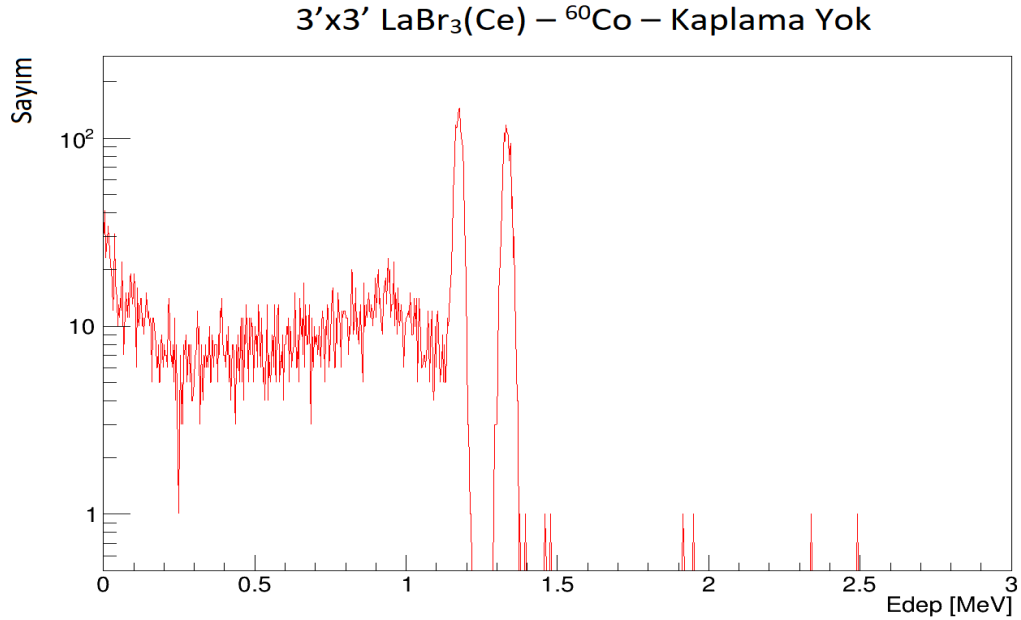


Şekil 4.4. Alüminyum ile kaplanan ve kaplanmayan dedektörün ¹³⁷Cs gama spektrumlarının karşılaştırması

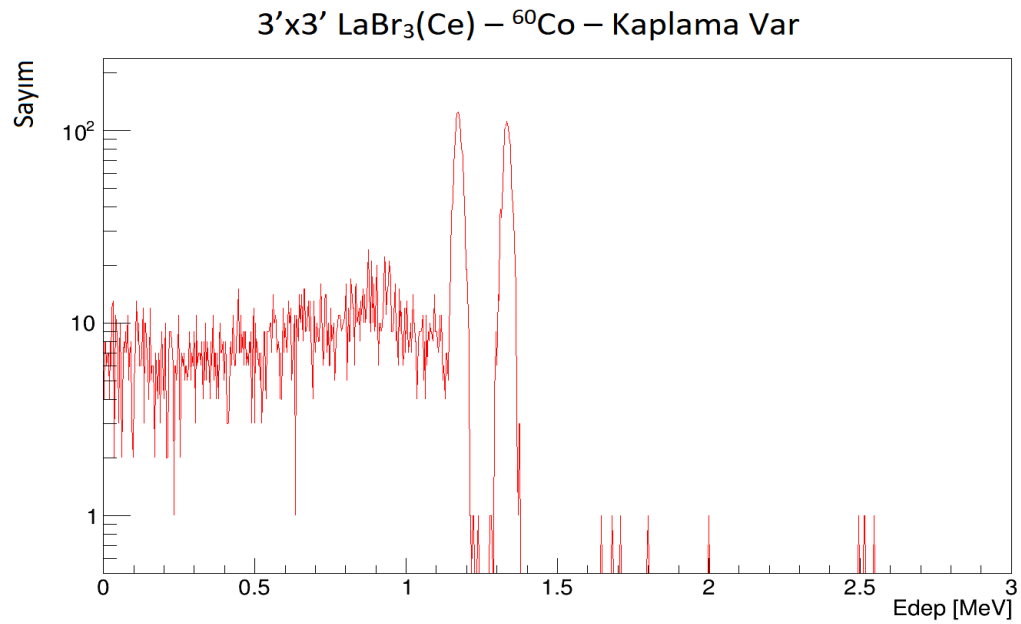
Şekil 4.4.'e göre spektrumlar arasında neredeyse hiç fark oluşmamıştır. Şimdilik görülebilir tek fark tam soğurulma pikindeki sayım sayısının bir miktar azalmasıdır (bu farkın görülebilmesi için Şekil 4.4.'te logaritmik ölçek kullanılmamıştır).

Bir sonraki simülasyon ⁶⁰Co için yapılmıştır. ⁶⁰Co'nun en güçlü yayınladığı iki gama fotonunun enerjileri sırasıyla 1173.228 keV ile 1332.492 keV'dir. Doğru çalışan bir dedektörün vereceği spektrumda sözü edilen pikler ve bu piklere ait Compton sırtlarının açıkça

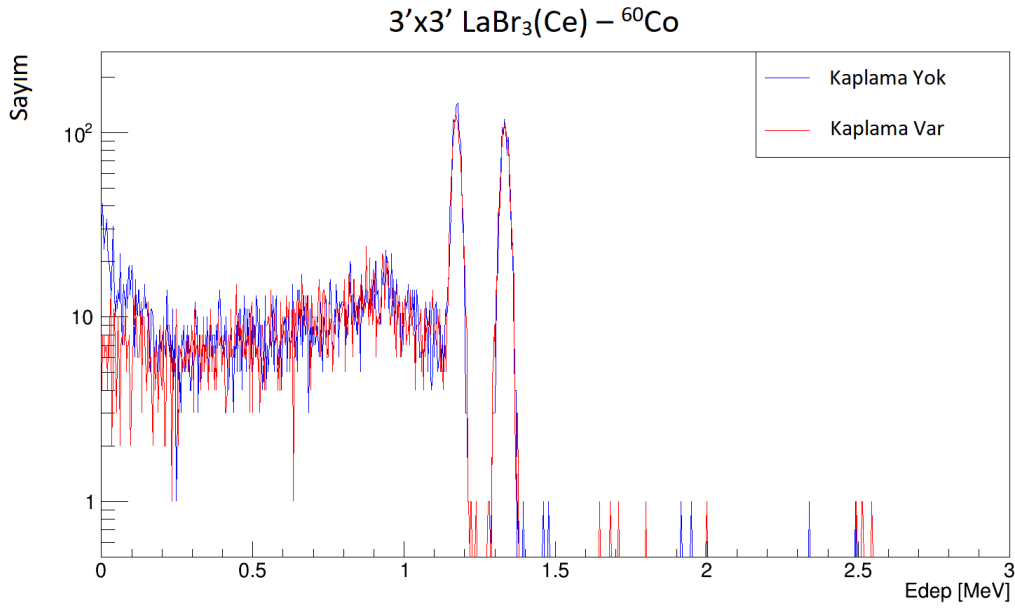
görülmesi beklenir. Yine sırasıyla Şekil 4.5. ve Şekil 4.6. alüminyum kaplamanın olduğu ve olmadığı durumları gösteren spektrumlar olup Şekil 4.7. iki spektrumun karşılaştırmasını göstermektedir. Yine spektrumlar arasında gözle görülür tek fark piklerdeki sayım sayılarının düşmesi gibi görünmektedir.



Şekil 4.5. ⁶⁰Co nokta kaynağının dedektör üzerinde kaplama olmadığı durumdaki gama spektrumu

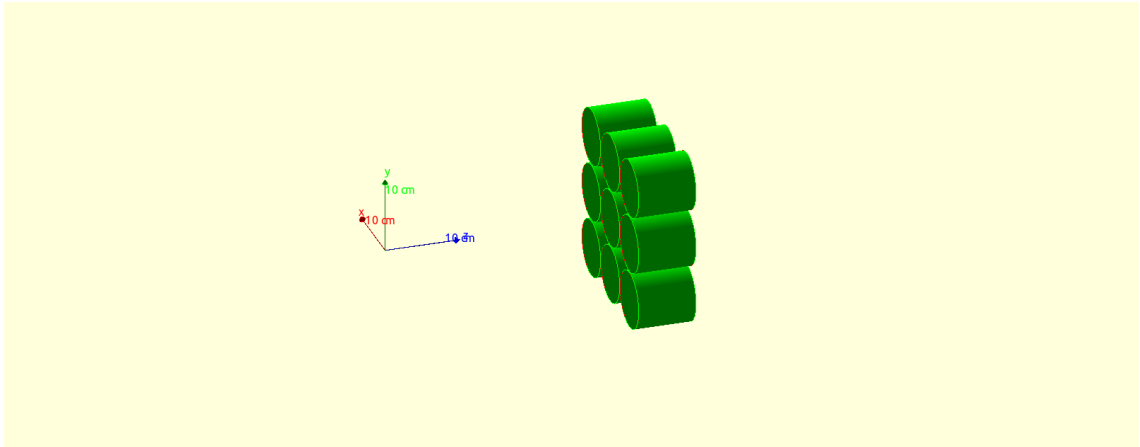


Şekil 4.6. Alüminyum ile kaplanan dedektörün ⁶⁰Co gama spektrumu



Şekil 4.7. Alüminyum ile kaplanan ve kaplanmayan dedektörün ^{60}Co gama spektrumlarının karşılaştırması

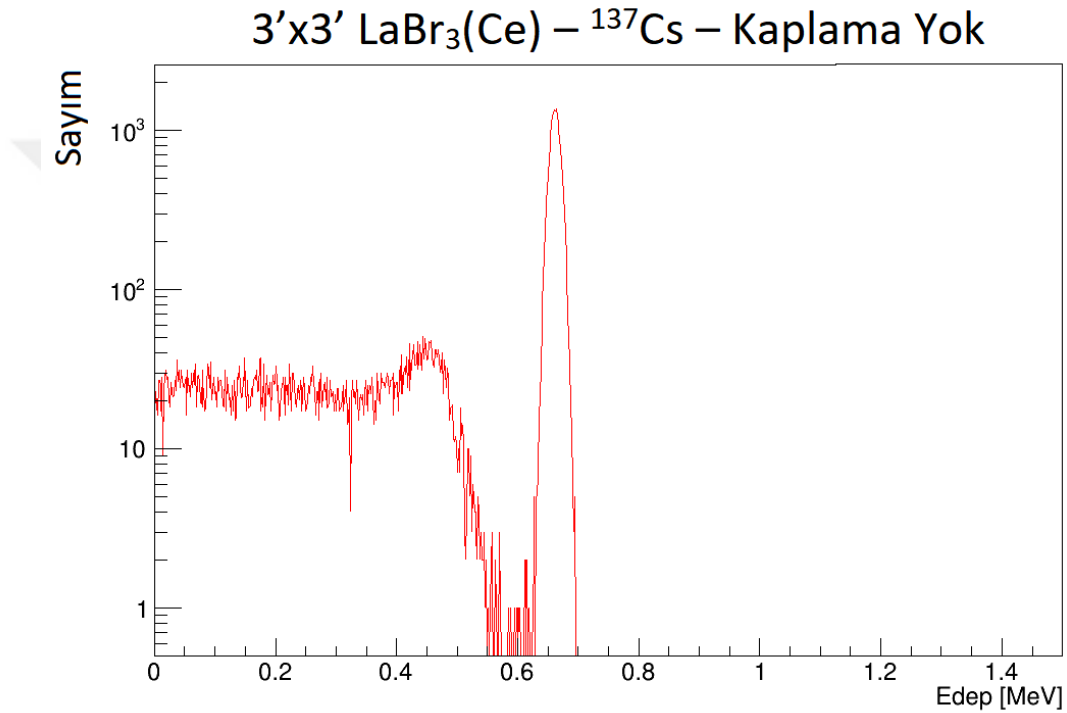
Tek kristal bulunduğu durumların değerlendirilmesinden sonra dokuz kristalden oluşan dedektör bloğu değerlendirilmiştir. Şekil 4.8.'de bu dedektör bloğunun geometrisi görülmektedir. Dedektörlerin arasındaki mesafe 2 mm olarak alınmış ve yine tabanları kaynağa bakacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Dokuz dedektörden oluşan kristal bloğu

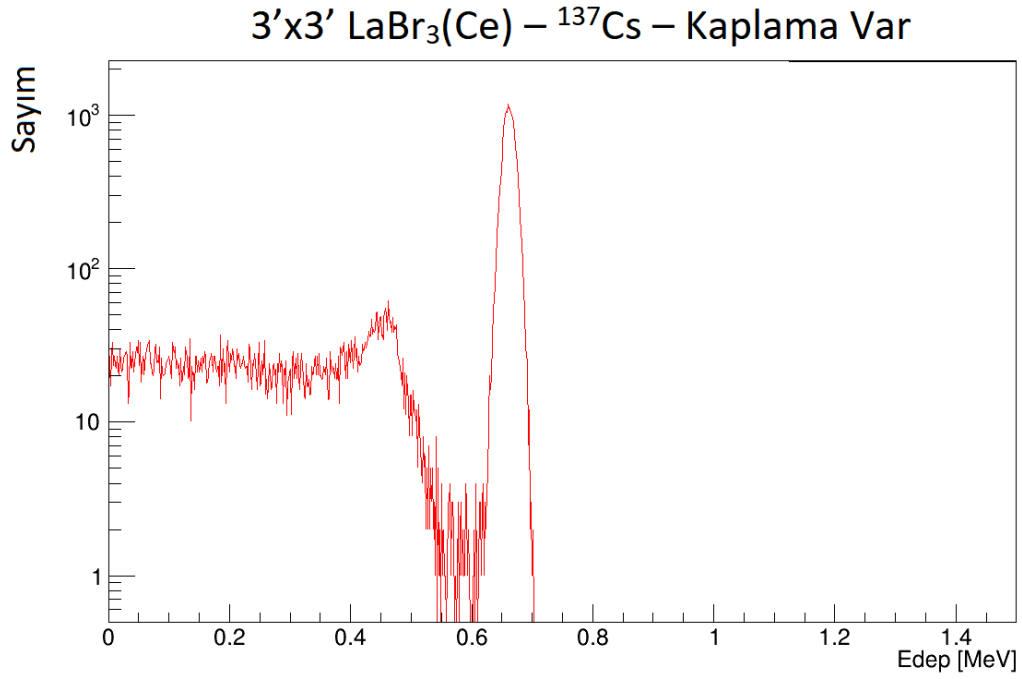
Dedektörler arası mesafenin çok kısa tutulmaya çalışılmasındaki amaç, Şekil 3.5 - Şekil 3.9 arasında gösterilen ve tek parçacığın takip edildiği durumda olduğu gibi fotonun kristallerin yanlarından sıklıkla kaçabilmesidir. Burada kristallerin arkası foto-çoğaltıcı

tüp ile kapalı olacağı için fotonun en büyük ihtimalle kristalin yanından kaçması beklenmektedir. Dolayısıyla yakın tutulan kristaller ile gelen gama ışınlarında maksimum soğurma beklenmektedir. Şekiller 4.9., 4.10. ve 4.11. dedektör bloğunun ^{137}Cs simülasyonları ile elde edilen spektrumlarını gösterirken, Şekiller 4.12., 4.13. ve 4.14. aynı bloğun ^{60}Co simülasyonları ile elde edilen spektrumlarını göstermektedir. Kristal sayısı arttığı için daha fazla sayım alan dedektörler artık çok daha net ve görünür spektrumlar vermeye başlamıştır.

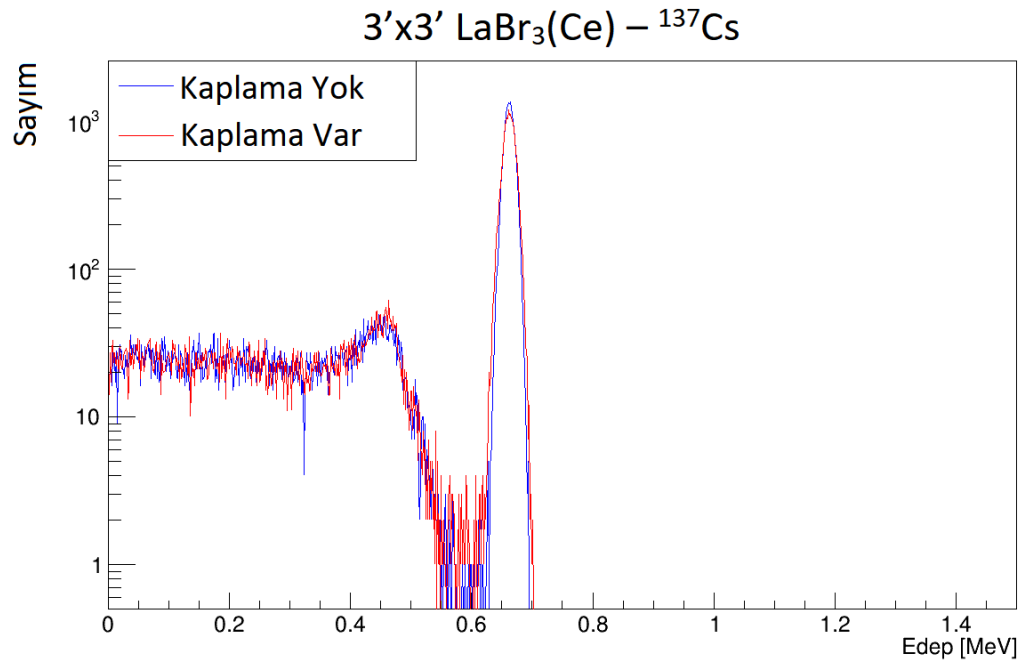


Şekil 4.9. ^{137}Cs nokta kaynağının dokuz dedektörden oluşan blok için gama spektrumu (dedektörler üzerinde alüminyum kaplama yok)

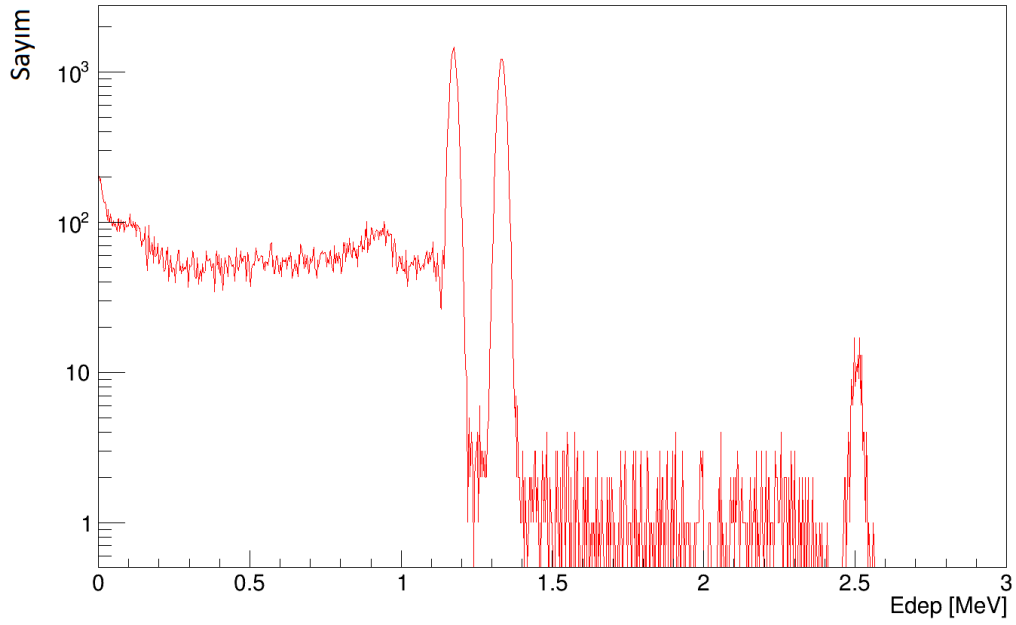
Eğer spektrumlar dikkatlice incelenecek olursa sadece sayım sayıları arasındaki fark değil ayrıca Compton sırtlarında oluşan değişiklikler de rahatlıkla görülebilmektedir. Örneğin ^{137}Cs için oluşan Compton sırtı alüminyum kaplamanın eklenmesiyle birlikte daha keskin bir hal almıştır. ^{60}Co spektrumunda ise daha önce çok iyi ayırt edilemeyen Compton sırtları her iki pik için de görünür duruma gelmiştir.



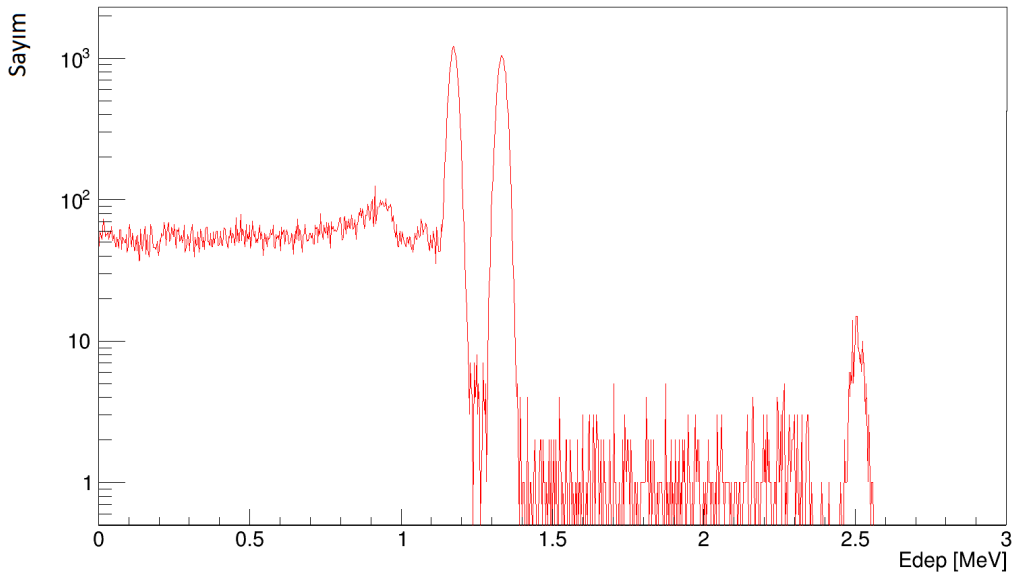
Şekil 4.10. ¹³⁷Cs nokta kaynağının dokuz dedektörden oluşan blok için gama spektrumu (alüminyum kaplama ile)



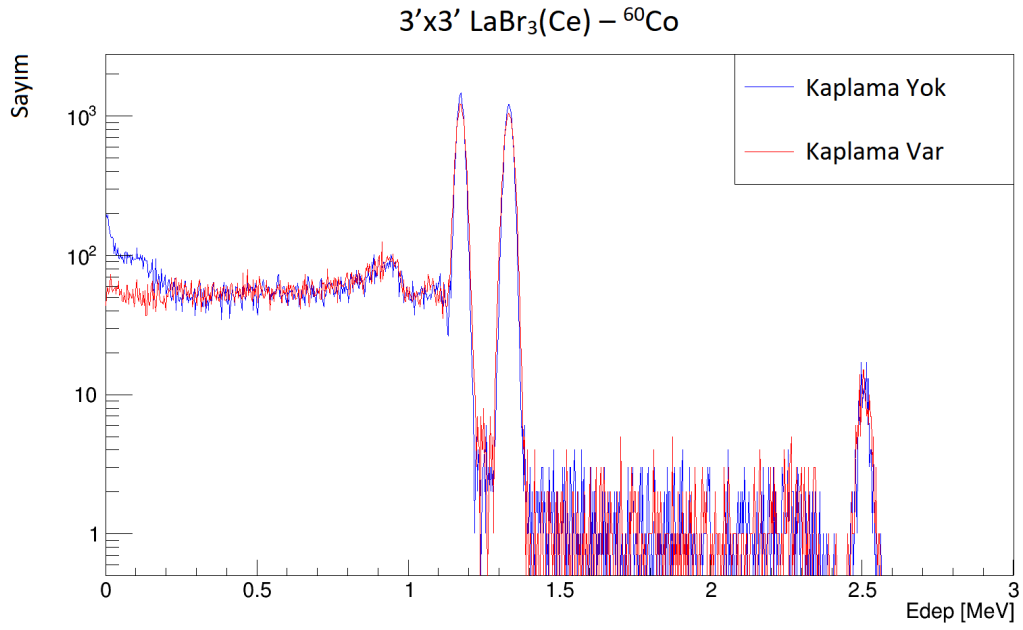
Şekil 4.11. Dedektör bloğu için alüminyum ile kaplanan ve kaplanmayan durumlardaki spektrumlar (¹³⁷Cs)

3'x3' LaBr₃(Ce) – ⁶⁰Co – Kaplama Yok

Şekil 4.12. ⁶⁰Co nokta kaynağının dokuz dedektörden oluşan blok için gama spektrumu (dedektörler üzerinde alüminyum kaplama yok)

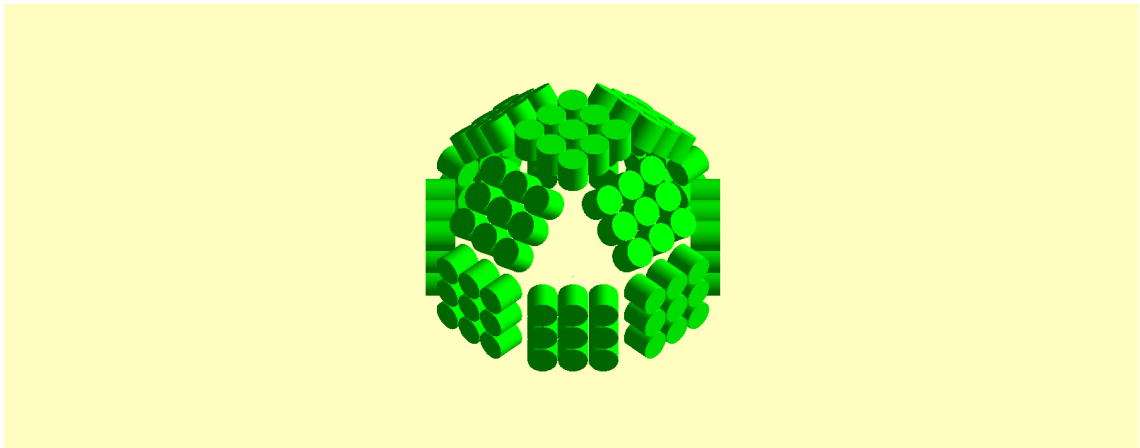
3'x3' LaBr₃(Ce) – ⁶⁰Co – Kaplama Var

Şekil 4.13. ⁶⁰Co nokta kaynağının dokuz dedektörden oluşan blok için gama spektrumu (alüminyum kaplama ile)

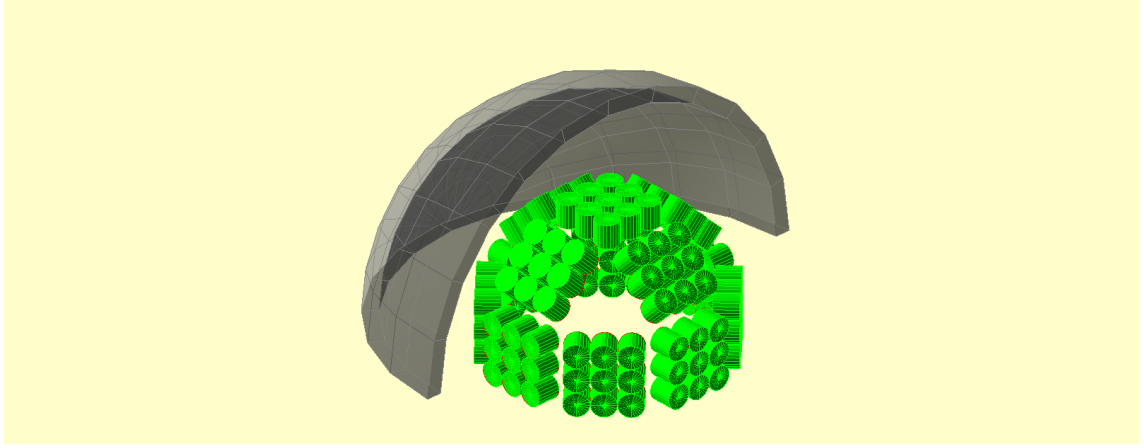


Şekil 4.14. Dedektör bloğu için alüminyum ile kaplanan ve kaplanmayan durumlardaki spektrumlar (${}^{60}\text{Co}$)

Tek dedektör bloğunun spektrumlara etkisi görüldükten sonra bu dedektör blokları saçılma odasının da geometrisi düşünülerek bir yarı küre üzerine birden fazla olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu yarı küre dedektör geometrisinin MAGNEX deney düzeneğinde ve dolayısıyla NUMEN deneylerinde, hedefin üst kısmında kalacak şekilde yerleştirilmesi düşünülmektedir. Şekil 4.15. ve Şekil 4.16. sırasıyla bu deney düzeneğini saçılma odasının olmadığı ve eklendiği durumları göstermektedir.

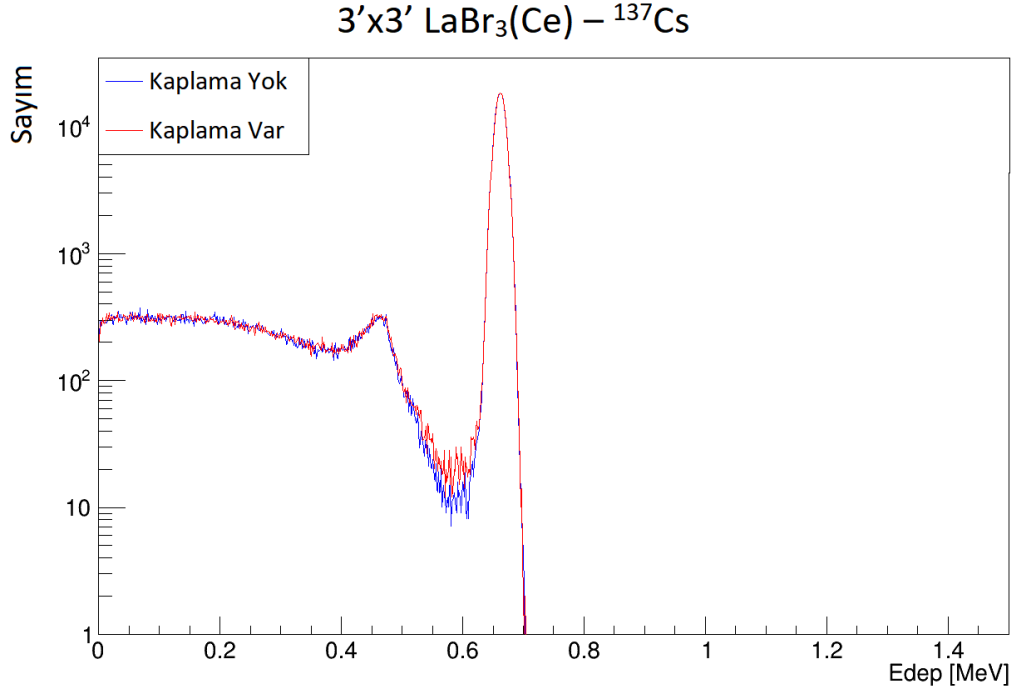


Şekil 4.15. Yarı küre üzerine dağılmış dedektör blokları (2π geometri)

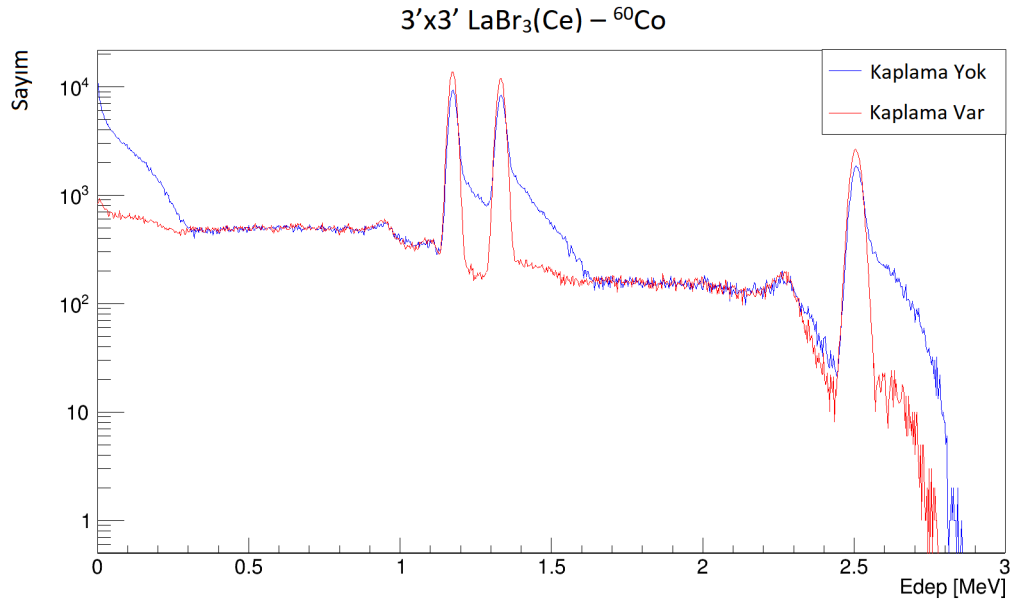


Şekil 4.16. Çelikten yapılması planlanan saçılma odasının kesiti

Öncelikle saçılma odası olmadığı durum araştırılmıştır. Yine ilk olarak ^{137}Cs ve ^{60}Co kaynak kullanılarak çalışmaya başlanmıştır. Kristallerin üzerinde bulunan kaplamaların verilen kaynaklara tepkileri sırasıyla Şekil 4.17. ve Şekil 4.18. ile verilmiştir. Her iki spektrumda da gözle görülebilir tek fark çoklu Compton saçılma bölgesinde gerçekleşmiştir.

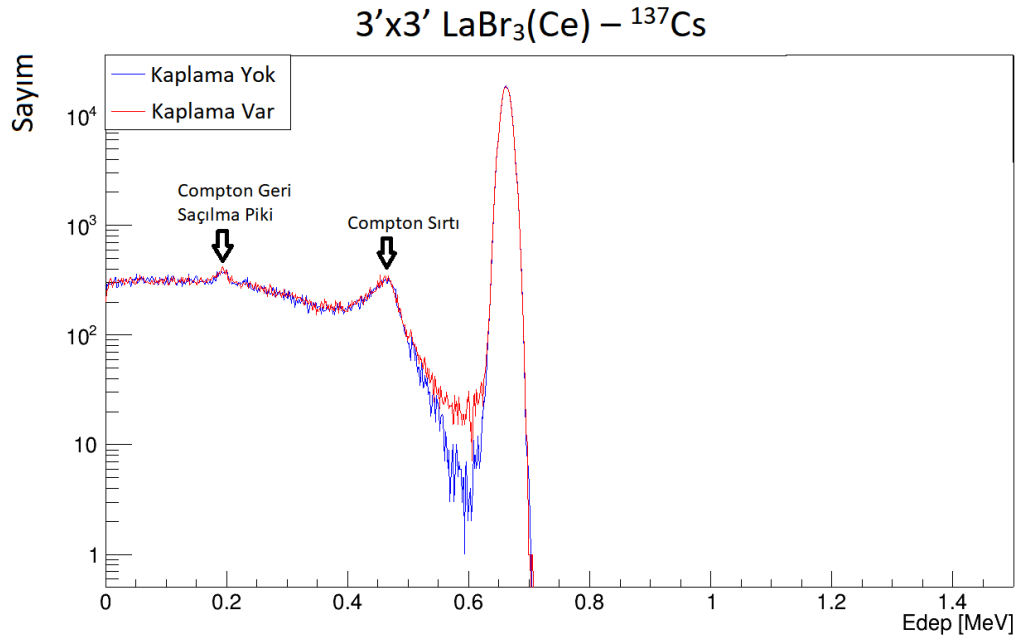


Şekil 4.17. Saçılma odası olmayan durumda 2π geometride yerleştirilen dedektörler için ^{137}Cs gama spektrumu

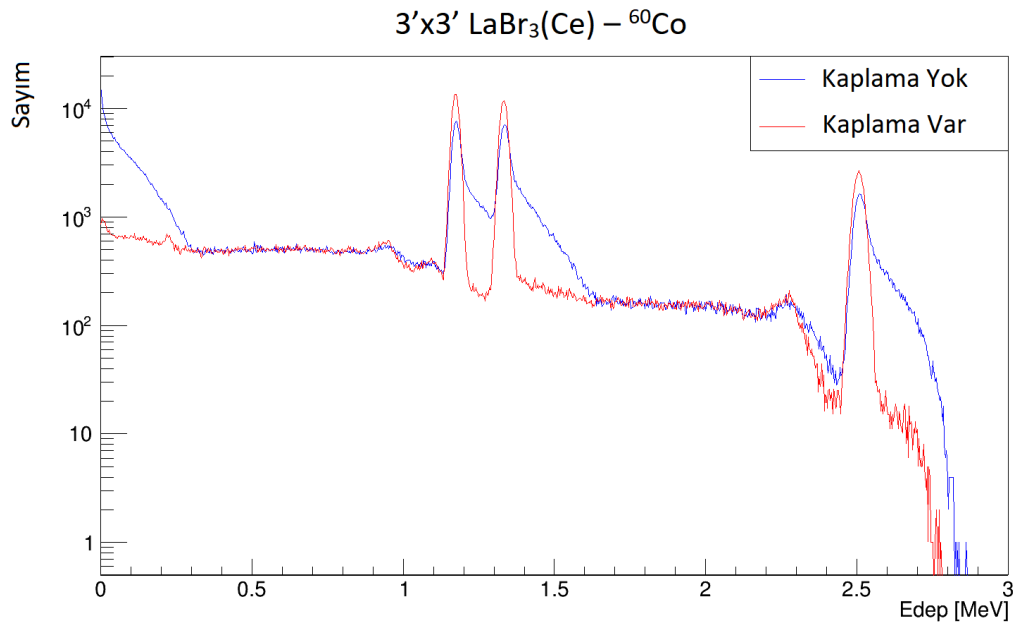


Şekil 4.18. Saçılma odası olmayan durumda 2π geometride yerleştirilen dedektörler için ^{60}Co gama spektrumu

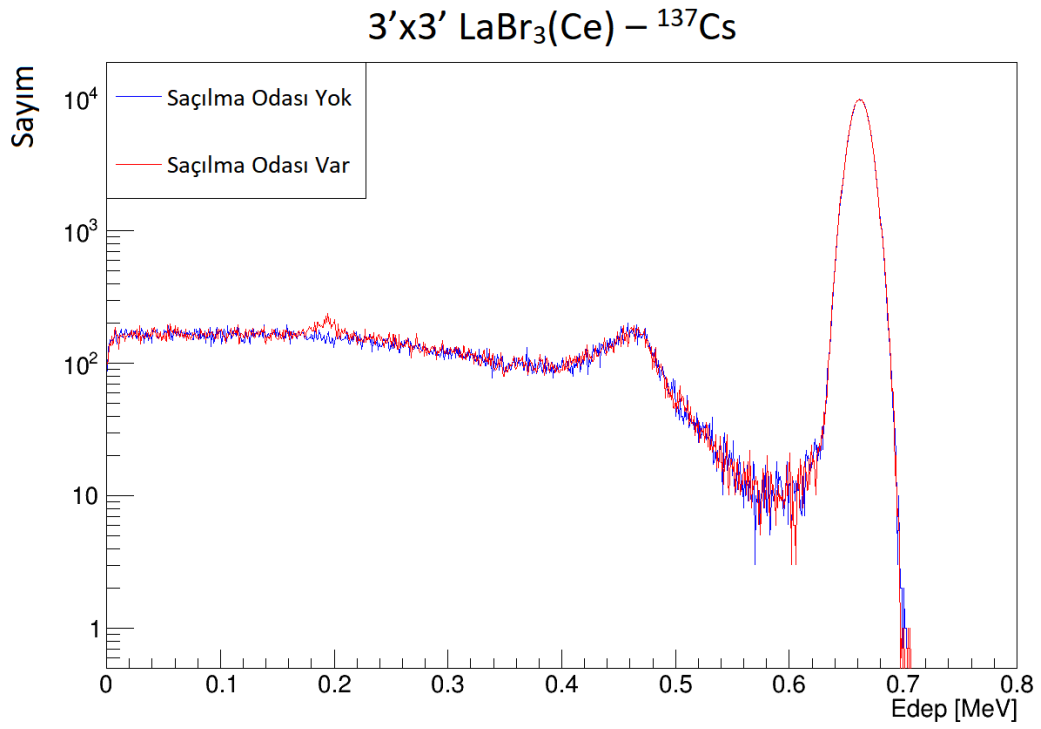
Son olarak simülasyona saçılma odasını temsil eden çelik zırh eklendikten sonra oluşan spektrumlar Şekil 4.19. ile Şekil 4.20.'de verilmiştir. Saçılma odasının varlığında oluşan spektrumlarda da alüminyum kaplamanın asıl etkisinin çoklu Compton saçılma bölgesinde olduğu görülmektedir. Fakat bu yeni spektrumlarda oluşan ve esas dikkat edilmesi gereken fark 200 - 300 keV aralığında ortaya çıkan Compton geri saçılma pikidir. Özellikle son iki şekil olan Şekil 4.21. ve Şekil 4.22.'te simülasyonun saçılma odası eklenmiş ve eklenmemiş hali gösterilmiştir. Bu iki spektrumda oluşan geri saçılma piki net olarak görülmektedir. Bunun sebebi çelik saçılma odasının eklenmesiyle birlikte, çeliğe çarpan gama ışınlarının çok geniş açıyla yaptıkları Compton saçılmalarıdır (Gilmore, 2008).



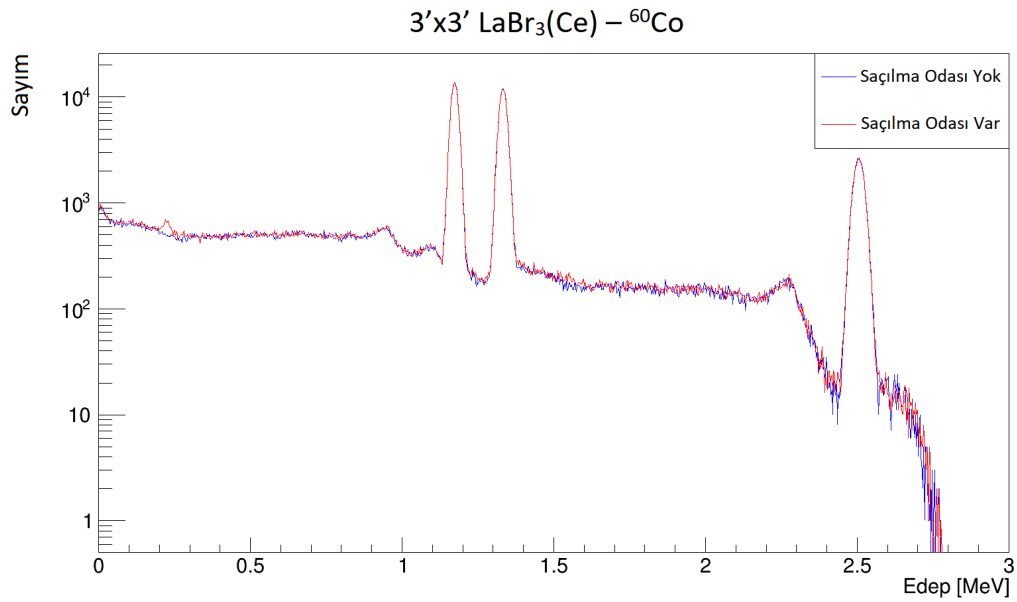
Şekil 4.19. Saçılma odası eklendiği durumda 2π geometride yerleştirilen dedektörler için ${}^{137}\text{Cs}$ için gama spektrumu



Şekil 4.20. Saçılma odası eklendiği durumda 2π geometride yerleştirilen dedektörler için ${}^{60}\text{Co}$ için gama spektrumu



Şekil 4.21. ¹³⁷Cs için saçılma odasının bulunduğu ve bulunmadığı durumların karşılaştırması



Şekil 4.22. ⁶⁰Co için saçılma odasının bulunduğu ve bulunmadığı durumların karşılaştırması

4.2. Işın-Hedef Etkileşmeleri

NUMEN projesi nötrinosuz çift beta bozunumu için Nükleer Matris Elemanlarının elde edilmesi öncü bir projedir (Cappuzzello ve ark., 2016). İlgili nükleer matris elemanlarının elde edilmesinde çift yük değişimi reaksiyonları araştırılacak ve DCE modeli nötrinosuz çift beta bozunumuna benzetilecektir (Cappuzzello ve ark., 2018). DCE reaksiyonları oldukça düşük tesir kesitine sahiptir ve bu reaksiyonların gözlenebilmesi için ışın şiddetinin oldukça yüksek olması gerekir. INFN-LNS tesislerinde bulunan K-800 Süperiletken Siklotronunun geliştirilmesi ile nükleon başına yaklaşık 15 MeV olan enerjiler, nükleon başına 70 MeV'e kadar çıkacaktır. Bununla birlikte ışın özellikleri ve şiddetinin artması ile hedef üzerindeki etkileri de değişeceği için ışın-hedef etkileşmelerinin sistematik olarak incelenmesi ve dedektörler (ve ışımadan etkilenebilecek diğer ekipmanalar) üzerinde oluşturacağı etkilerin araştırılması oldukça önemlidir.

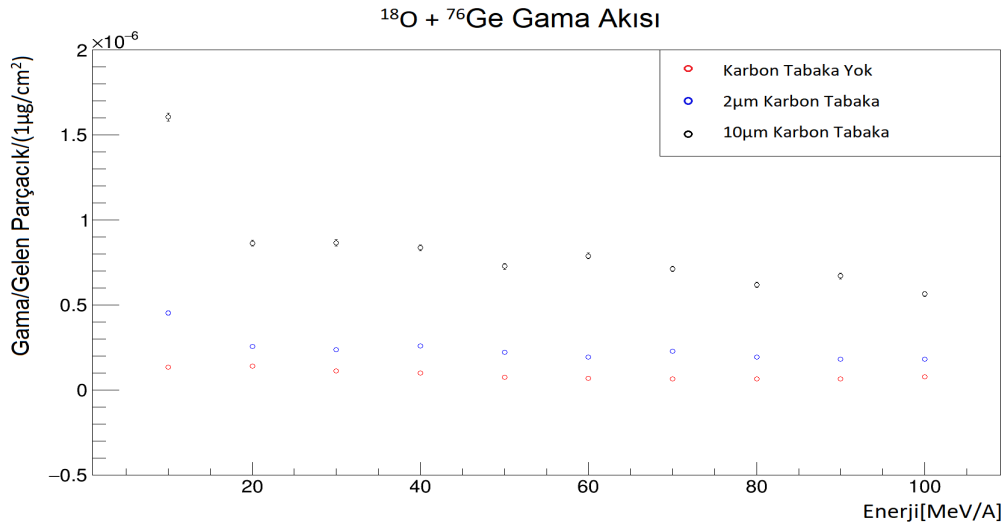
Dedektörlerin NUMEN projesi için değerlendirilmesinde, olası ışın-hedef çiftlerinin sistematik incelemesi için bu çiftler ayrı ayrı simüle edilmelidir. Buradaki önemli nokta ışının 15 MeV/A enerjiden 70 MeV/A enerjiye yükseltileceğidir. Dolayısıyla tüm ışın-hedef çiftleri için bu enerji aralığındaki değişim incelenecektir. NUMEN kapsamında araştırılması planlanan ışın-hedef çiftlerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

- $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$
- $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$
- $^{20}\text{Ne} + ^{116}\text{Cd}$
- $^{20}\text{Ne} + ^{76}\text{Ge}$
- $^{18}\text{O} + ^{198}\text{Hg}$

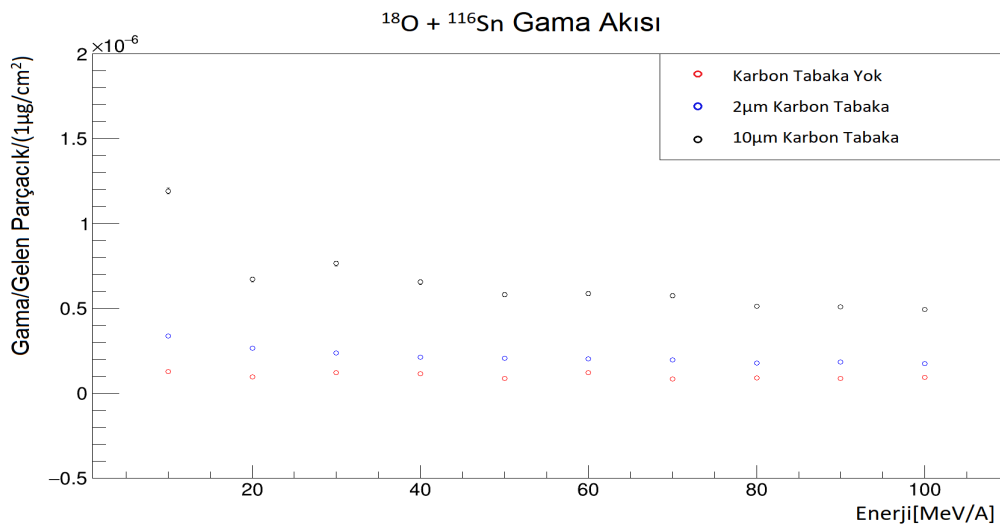
Bu simülasyonlarda kullanılan ışınların (^{18}O , ^{20}Ne , vb.) profili, 0.6 cm çapında dairesel geometri olarak seçilmiştir. Simülasyonun daha gerçekçi olabilmesi için ışının çapında ± 0.2 mm'lik bir dispersiyon söz konusudur. Yine bu bağlamda ışın, z eksenini doğrultusunda yol alsada da normalden ± 2 derecelik bir dispersiyona sahip olarak ilerlemektedir.

Hedef ise 1 cm çapında ve 500 nm kalınlığında alınmıştır. Hedefler için akılda tutulması gereken bir diğer unsur da hedeflerin sadece yukarıda verilen elementlerden

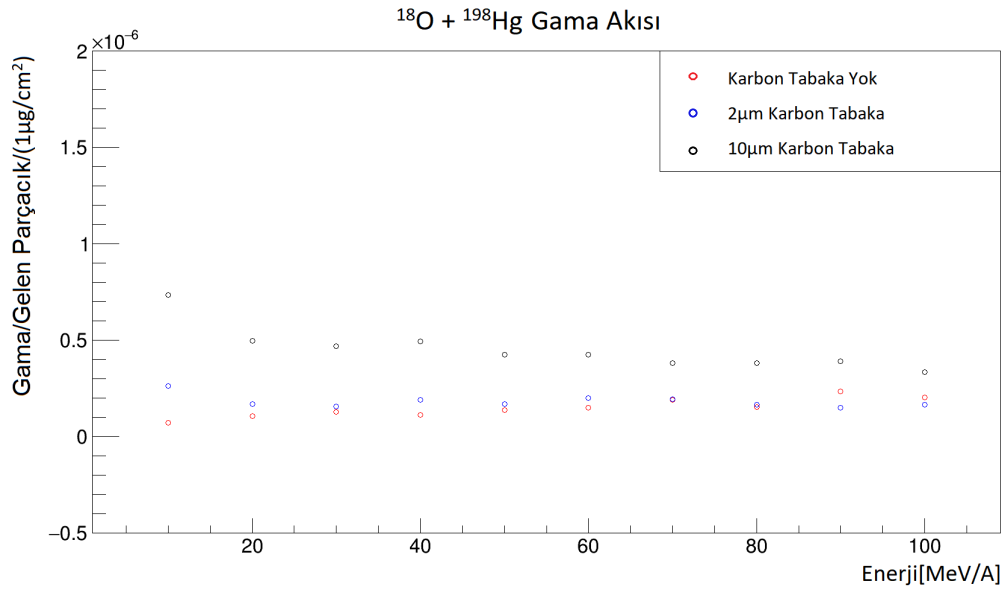
oluşmayacağıdır. Hedef yukarıda bahsedilen enerjiler (70 MeV/A) ile ışınladığında ortaya çıkacak olan yüksek ısı, hedef ve dolayısıyla deney için büyük bir problem teşkil eder. Hedefler çok ince olarak üretildiklerinden bu ısının hedef buharlaşmadan uzaklaştırılması gerekir. Bunun için hedefin arkası genellikle kendisinden daha kalın bir karbon, grafit vb. tabaka ile kaplanır. Isı dağılımı için eklenen tabakanın kalınlığı, oluşacak farkı görebilmek için ayrı ayrı 2 μm ve 10 μm olarak alınmıştır. Verilen ışın-hedef çiftleri için gama akısında oluşacak farklar Şekil 4.23. – Şekil 4.27. arasında gösterilmiştir.



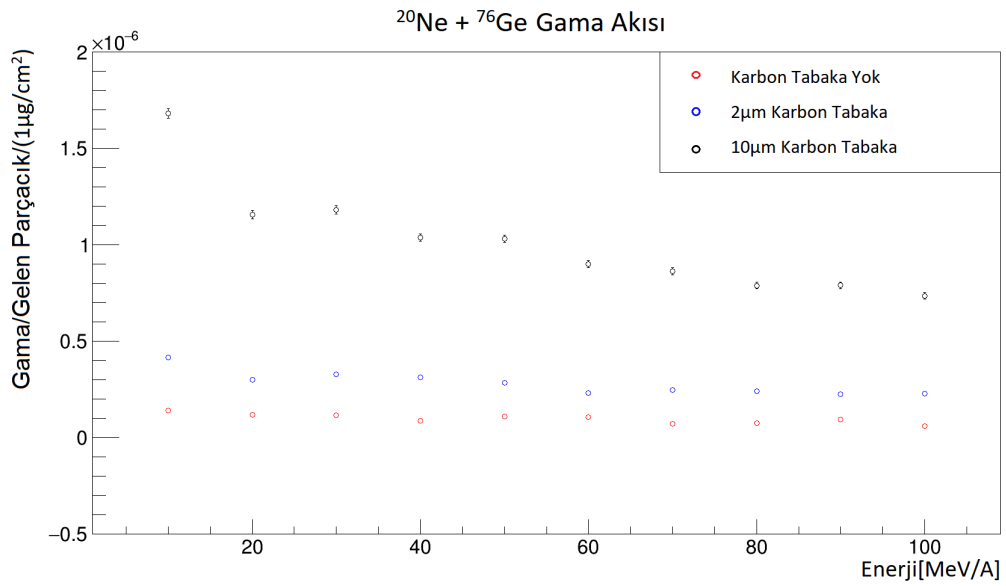
Şekil 4.23. $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda gama kazancı (hedeften çıkan gama akısı)



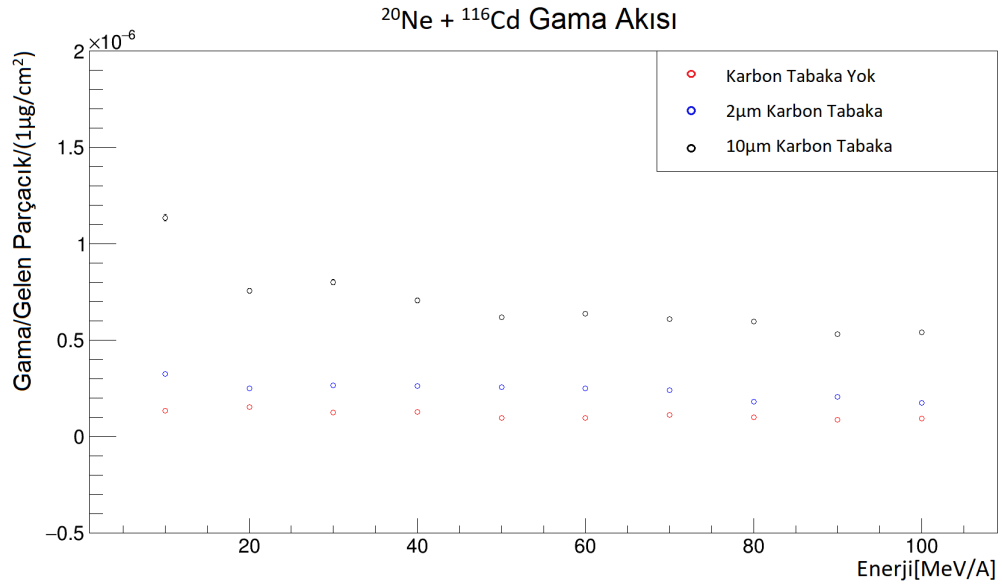
Şekil 4.24. $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda gama kazancı (hedeften çıkan gama akısı)



Şekil 4.25. $^{18}\text{O} + ^{198}\text{Hg}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda gama kazancı (hedeften çıkan gama akısı)



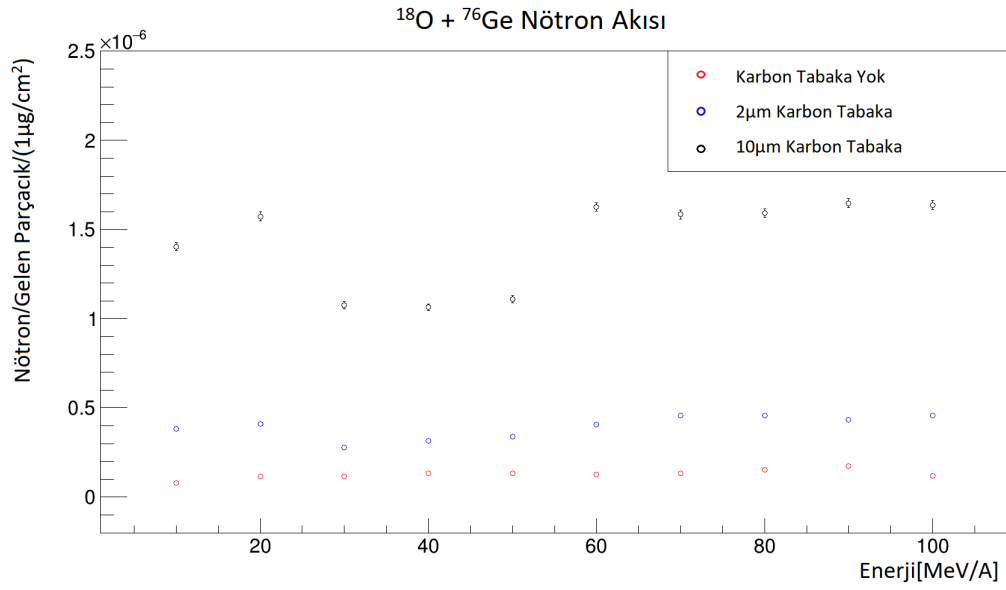
Şekil 4.26. $^{20}\text{Ne} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda gama kazancı (hedeften çıkan gama akısı)



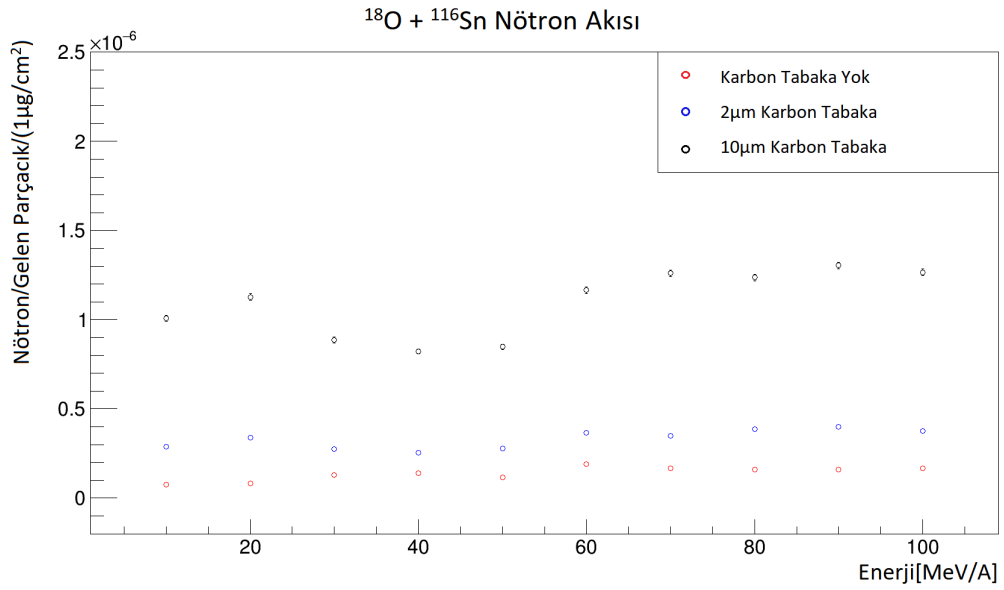
Şekil 4.27. $^{20}\text{Ne} + ^{116}\text{Cd}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda gama kazancı (hedeften çıkan gama akısı)

Grafiklerde ilk dikkat çeken özellik artan enerji ile gönderilen ışın sayısı başına çıkan gamaların sayısının azalmasıdır. Fakat, arka-plan spektrumlarında ayrıca bahsedilecek olsa da burada değinilmesi gereken asıl özellik, karbon tabaka olmadığı durumlarda tüm hedeflerde oluşan gama akısının birbirine yakın olmasıdır. Yine bu grafiklerde, dikkat çekici şekilde karbon tabakanın eklenmesiyle gama akısı kayda değer oranda artmaktadır. Grafikler karşılaştırıldığında gözlemlenen bir diğer özellik ise hedefin kütle numarasının artmasıyla karbon tabakanın etkisinin azalmasıdır.

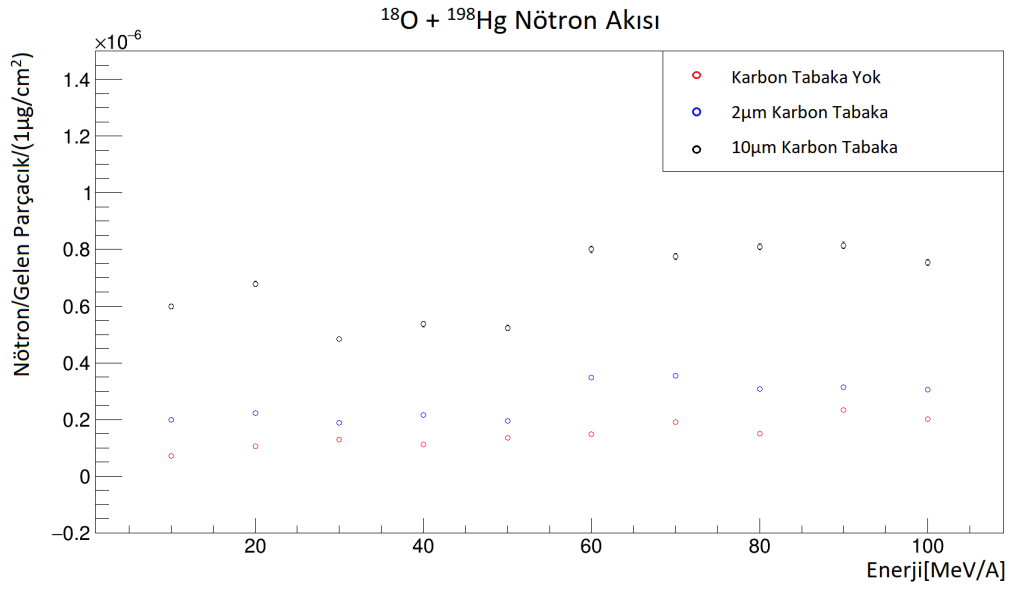
Hedefin ışınlanması ile oluşan nötron spektrumları ise Şekil 4.28 – Şekil 4.32 arasında gösterilmiştir. Bu grafiklerde görülen, nükleon başına düşen enerji arttıkça nötron akısının yavaşça arttığıdır. Yine burada da hedefin kütle numarası büyüdükçe karbon tabakanın etkisinin azaldığı görülmektedir. Karbon tabakanın etkisi $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ reaksiyonlarında maksimum iken $^{18}\text{O} + ^{198}\text{Hg}$ reaksiyonlarında en azdır.



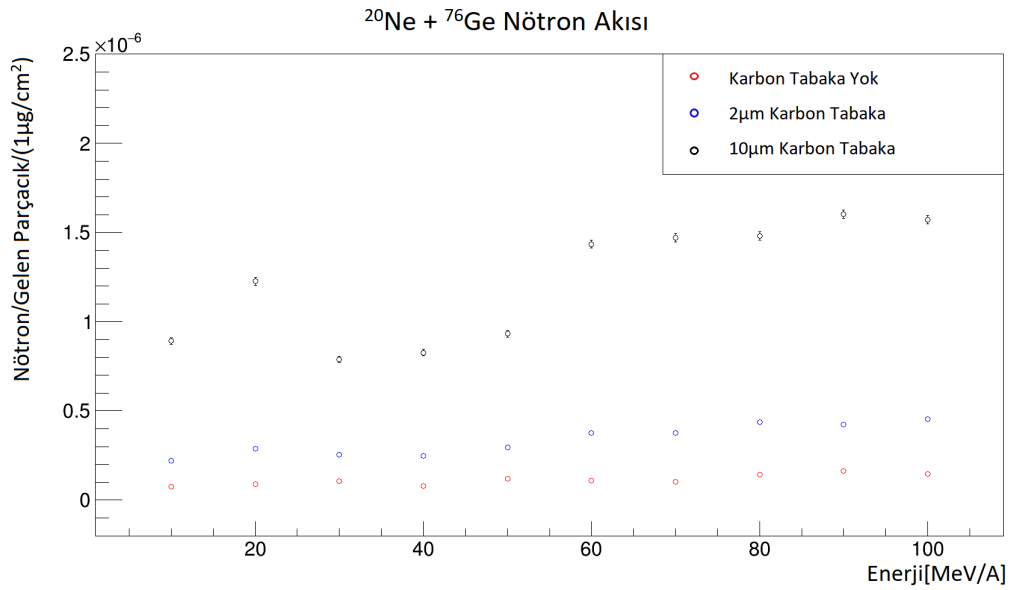
Şekil 4.28. $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışıın-hedef çifti için üç farklı durumda nötron kazancı (hedefteñ çıkan nötron akısı)



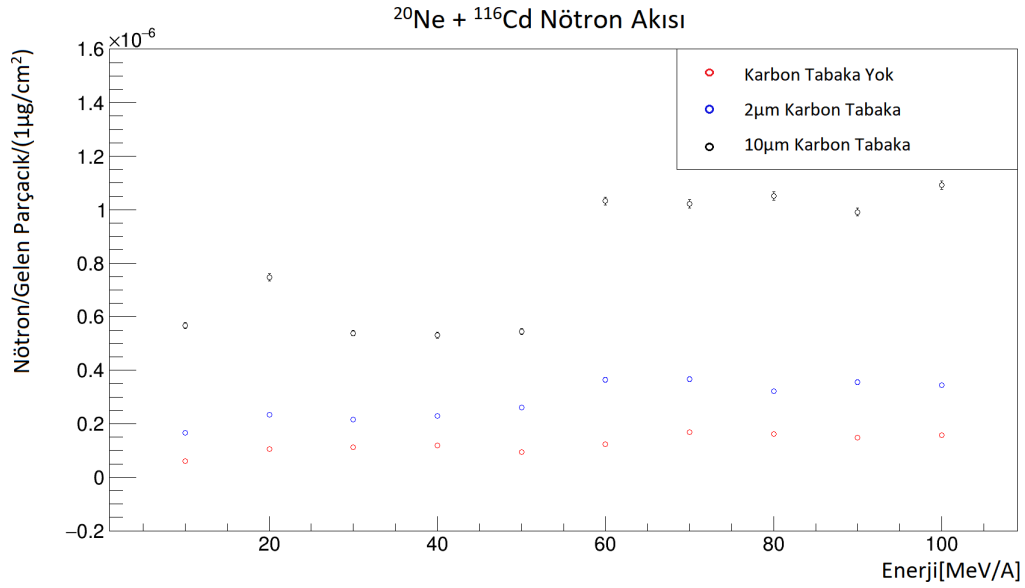
Şekil 4.29. $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışıın-hedef çifti için üç farklı durumda nötron kazancı (hedefteñ çıkan nötron akısı)



Şekil 4.30. $^{18}\text{O} + ^{198}\text{Hg}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda nötron kazancı (hedeften çıkan nötron akısı)



Şekil 4.31. $^{20}\text{Ne} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda nötron kazancı (hedeften çıkan nötron akısı)



Şekil 4.32. $^{20}\text{Ne} + ^{116}\text{Cd}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumda nötron kazancı (hedeften çıkan nötron akısı)

4.3. Arka Plan Spektrumları

NUMEN deneyi ile DCE reaksiyon kanallarının tesir kesitleri ölçülerek nükleer matris elemanlarının hesaplanması amaçlanmaktadır. Bu ölçümlerde MAGNEX spektrometresine yardımcı olması planlanan gama kalorimetresinin, çekirdeğin uyarılmış durumları arasındaki geçişleri sırasında ortaya çıkan ve 0 - 2 MeV aralığında olması beklenen gama ışınlarını tespit etmesi beklenmektedir. Bu tespit etme sırasında karşılaşılabilecek en büyük problemlerden birisi DCE reaksiyonlarından alınacak sinyalin istenmeyen ışımlar nedeniyle oluşan arka plan içerisinde kaybolmasıdır.

Bir önceki bölümde bahsedildiği üzere $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ dedektörlerde oluşacak arka plan için en büyük kaynaklardan birisi, ışın-hedef etkileşimleri sırasında oluşan gama akısıdır. Diğer reaksiyon kanalları ile oluşan bu gamalar, momentum doğrultusunda daha fazla olsalar bile izotropik olarak yayılacakları için dedektörler tarafından yakalanacak ve arka plan seviyesini yükselteceklerdir.

Burada bahsedilen bu gamalara karşı zırlama gibi bir önlem almak da söz konusu olamayacaktır. DCE kanallarından gelmesi beklenen gamaların da diğer gamalar gibi hedeften saçılacağı düşünülürse, arka planı azaltmak için en az önlem alınabilecek kaynağın bu gamalar olması beklenebilir.

Bir diğer olası kaynak da saçılma odası ve içindeki ekipmanlardır. Hedeften saçılan parçacıklar saçılma odası içerisinde bulunan ekipmanlara (Faraday kabı, slitler, kolimatör vb.) ya da doğrudan saçılma odasının duvarlarına çarptığında daha fazla gama oluşumuna da neden olabilirler. Bu oluşan gamaların bir kısmının da Compton geri-saçılmasıyla dedektörlere ulaşacağı aşikardır. Başlangıçta dedektörler tarafından yakalanmasalar bile oluşan bu ikincil gamalar arka planın yükselmesine neden olacaktır.

Saçılma odasından geri dönebilecek bu gamalar için Compton geri saçılmasını azaltacak ikinci ve üçüncü zırhlamalar mümkün olabilir. Bu tür zırhlamalar, az da olsa saçılma odası dışından gelebilecek kozmik ışın kaynaklı ışımların da dedektörlere ulaşmasını azaltacaktır. Yine tüm bu zırhlamalar neticesiyle X-ışını floresansı oluşması da beklenebilir ve bu X-ışınları arka planın düşük enerji bölgesinde önemli bir problem haline gelebilir. Oluşabilecek X-ışını floresansını engellemek için bu X-ışınlarını soğurucu hafif bir zırh tabakası kullanılabilir ve dedektörler ile zırh arası mesafe en az 10 cm olarak ayarlanabilir (Gilmore, 2008).

Herhangi bir zırh olmadan $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ dedektör temelde iki tip arka plan ışımasına maruz kalmaktadır. Bunlardan bir tanesi 100 keV ile 3 MeV arasında gama ışını yayan doğal izotoplardır. Bunlardan en baskın olanları ^{214}Bi , ^{40}K ve ^{208}Tl olarak görülmüştür. Yüksek Z'ye sahip bir materyal zırh olarak kullanılıp bu arka plan düzeyi azaltılabilir. Bir diğer ışımaysa hedeften saçılan nötronlardır. $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ içinde bulunan ^{139}La , ^{79}Br ve ^{81}Br , 10 eV ile 20 keV enerji arasında birçok nötron yakalama rezonansına ve dolayısıyla 5 MeV ile 8 MeV arasında yüksek enerjili gama ışını yayınlama olasılığına sahiptir (Tsuchiya ve ark., 2019).

Hızlandırıcı laboratuvarındaki nükleer fizik deneyleriyle gerçekleştirilen nükleer reaksiyonlarda doğal olarak nötronlar da açığa çıkar. Bu nötronlar için tesir kesitleri, gama üretimindeki tesir kesitleriyle karşılaştırılabilir mertebededir (Şekil 4.28. – Şekil 4.32.). Bu durum gama dedektörlerinde gözlenen arka planın önemli bir kısmının bu nötronlar kaynaklı olabileceğini göstermektedir. Bu da ölçülmek istenen düşük tesir kesitli gama ışınları için büyük engel oluşturur. Sonuç olarak gama dedektörünü oluşturan malzemele- rin nötron ile etkileşimlerinin bilinmesi oldukça önemli hale gelir (Kiener ve ark., 2015).

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 'ün iç aktivitesi temelde kararsız ^{138}La izotopuna ve ^{227}Ac kirlenmesinden gelir. ^{138}La , elektron yakalama ile ^{138}Ba 'ya bozunur ve 1436 keV gama ışını ile 32

keV Ba X-ışını ile sonuçlanabilir. 1500 keV ile 2750 keV arasındaki arka plan ^{227}Ac 'un ürünleri olan ^{227}Th , ^{223}Ra , ^{219}Rn , ^{215}Po ve ^{211}Bi gibi çekirdeklerden kaynaklanır.

Lu ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada bir $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ dedektörünü ^{241}Am - Be kaynağı ile ışınlamışlar ve sonuçları özetlemişlerdir. Yapılan çalışmaya göre dedektör ışınlandıktan sonra, dedektörün arka plan sayma oranında ve enerji çözünürlüğünde neredeyse değişme olmazken (662 keV için %3.8, 1173 keV için %2.9 ve 1332 keV için %2.6), ışık çıkışında %5'lik bir azalma gözlemişlerdir. Sayma oranında gözledikleri değişikliğin ise gama kaynağının farklı konumlandırılmasıyla oluştuğunu raporlamışlardır. Aynı çalışmada, yüksek nötron akısı altında yapılan deneylerde, ^{137}Cs 'nin 662 keV'lik pikindeki çözünürlük %3.8'den %4.5'e düşmüştür. Buna karşılık ışık çıkışında ise %7.6'lık bir artış gözlenmiştir. Üç haftalık bir aradan sonra dedektörün enerji çözünürlüğünün tekrar artmaya başladığı (662 keV için %4) ve kristalin uğradığı radyasyon hasarını, herhangi bir dış müdahale olmadan azalttığı görülmüştür.

4.4. Çift Yük Değişimi Sinyallerinin Gözlenmesi

Geant4 simülasyon aracı DCE reaksiyonlarını taklit edebilecek bir kütüphaneye sahip değildir. Dolayısıyla DCE reaksiyonları sonucunda gözlenmesi beklenen gamaların simülasyonu aşağıda verildiği şekliyle yapılacaktır.

Öncelikle 0.2 MeV - 2.0 MeV aralığında izotropik noktasal gama kaynakları orijine yerleştirilerek gama spektrumları elde edilecektir. Sonrasında ise elde edilen spektrum, DCE reaksiyonlarında beklenen tesir kesitleri, ışının akısı ve hedefin yoğunluğu kullanılarak normalize edilecektir. Normalizasyon faktörü ya da başka bir deyişle reaksiyon olasılığı ya da reaksiyon oranı "R" aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir (L'Annunziata, 2016);

$$R = IN\sigma x \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de I, gönderilen (mermi) ışının şiddeti, N, hedefin yoğunluğu (sayı yoğunluğu), σ , DCE tesir kesiti ve "x", hedefin kalınlığıdır.

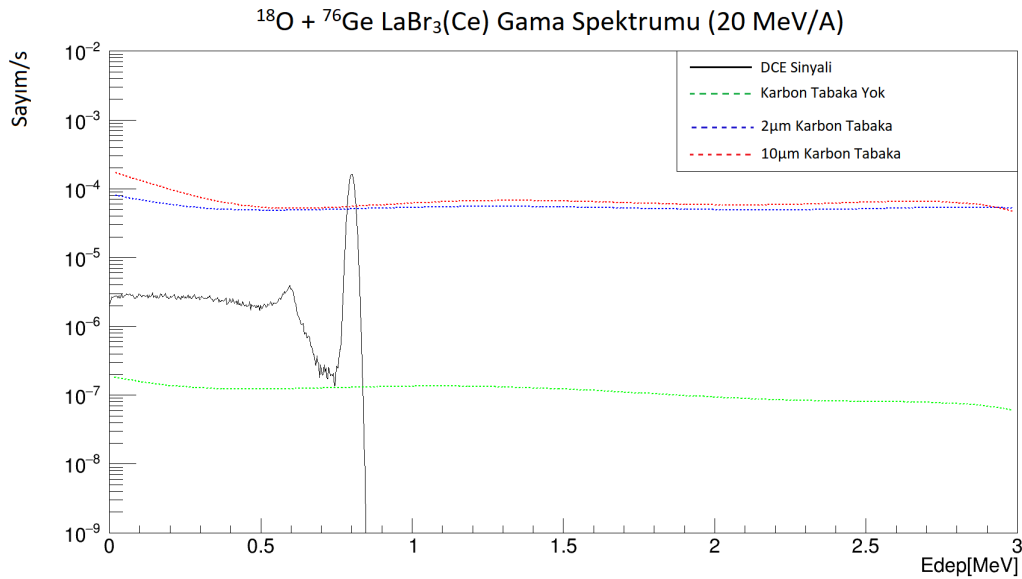
Burada arka plan için elde edilen spektrum başlangıçta 10^{12} (10^{12} pps) iyon gönderilerek oluşturulmuştur. 10^{12} pps yaklaşık olarak ($^{18}\text{O}^{8+}$ için) $1.3 \mu\text{A}$ 'lık akıma karşılık

gelmektedir. DCE reaksiyonlarının gama kalorimetresi ile ölçümünde MAGNEX spektrometresi ile 5 ns'lik çakışma penceresine sahip olacağı varsayılarak, arka plan spektrumu yeniden ölçülmüştür (Cappuzzello ve ark., 2018).

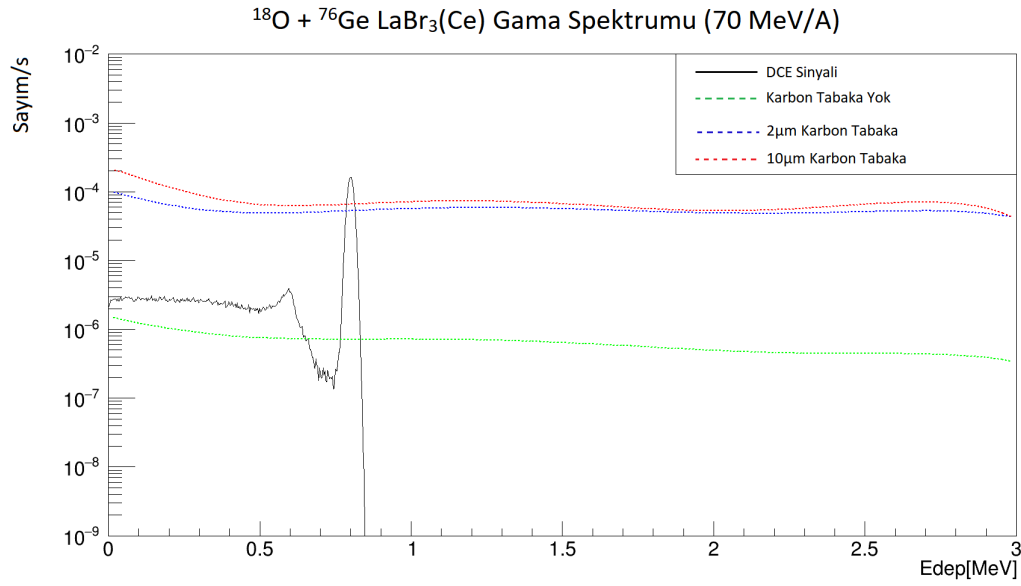
Elde edilen son spektrum ışın-hedef etkileşmesi ile gözlenen arka plan spektrumu ile birleştirilerek, DCE ile ortaya çıkan gamaların gözlenip gözlenemeyeceği tartışılacaktır.

İlk yapılan kalorimetre tasarımı dedektörler bir kürenin üst yarı yüzeyini kaplayacak şekilde (2π geometri) yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 4.15.). Toplamda 117 tane $3' \times 3'$ kristalden oluşan bu tasarımda dedektörler, saçılma odası içinde yer almaktadır. Bölüm 4.2.'de bahsedilen ışın-hedef çiftlerinden ikisi bu bölümde detaylıca ele alınmıştır.

İlk ışın-hedef çifti $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ olarak alınmıştır. Şekil 4.33. ve Şekil 4.34. sırasıyla 20 MeV/A ve 70 MeV/A durumlarını göstermektedir. Her iki durumda da üç ihtimal ele alınmıştır. Sırasıyla birinci durum sadece 500 nm germanyum hedefi (yeşil spektrum), ikinci durum 500 nm germanyum hedef ve $2\ \mu\text{m}$ karbon arka tabakayı (mavi spektrum), üçüncü durum ise yine 500 nm germanyum hedef ve $10\ \mu\text{m}$ karbon arka tabakayı (kırmızı spektrum) göstermektedir. Siyah spektrum ise gözlenmek istenen DCE sinyalini ya da başka bir deyişle DCE reaksiyonu ile ortaya çıkması beklenen gama pikini göstermektedir. DCE sinyali yukarıda bahsedilen üç farklı arka plan üzerine yerleştirilmiş ve incelenecek spektrum elde edilmiştir.



Şekil 4.33. $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için (20 MeV/A) üç farklı S/B seviyesini gösteren spektrum



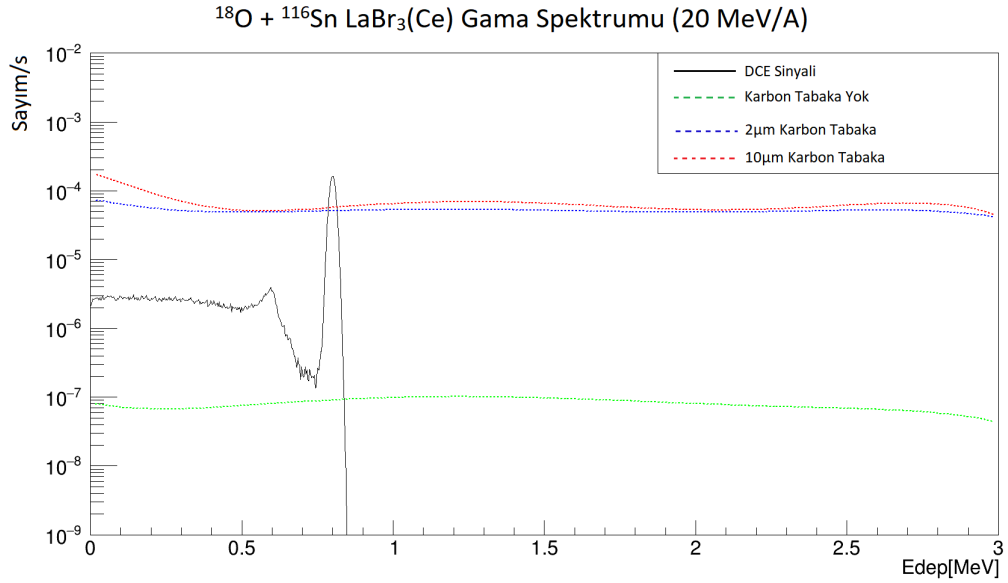
Şekil 4.34. $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için (70 MeV/A) üç farklı S/B seviyesini gösteren spektrum

Şekil 4.33. ve Şekil 4.34. ile görüleceği üzere reaksiyonlar sırasında herhangi bir arka tabaka olmaksızın sadece hedef bulunduğu durumlarda, DCE ile oluşan gama pikleri, spektrumda çok net olarak ayırt edilebilmektedir. Dikkat çeken noktalardan birisi gönderilen ışının enerjisi 20 MeV'den 70 MeV'e yükseldiğinde arka planın neredeyse 10 kat artmasıdır.

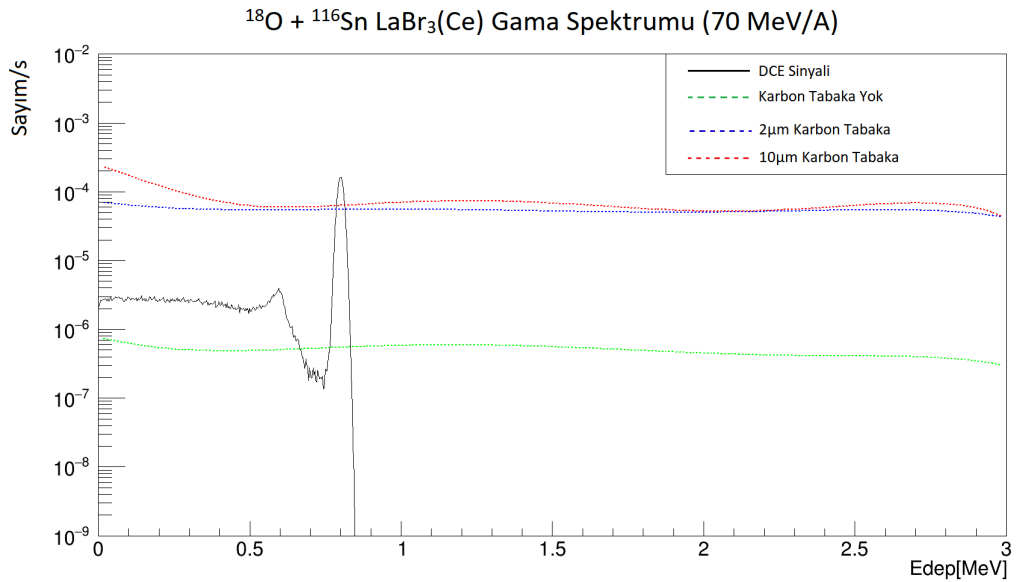
Fakat asıl dikkat edilmesi gereken ve gama kalorimetrisinin DCE reaksiyonları için uygun olup olmadığını gösterecek detay karbon tabakanın varlığında oluşan durumlardır. Karbon tabakanın bulunduğu her iki durumda da ($2\ \mu\text{m}$ ve $10\ \mu\text{m}$) arka planın DCE pikine göre oldukça yükselmesidir. Her iki şekilde de görüldüğü üzere hem enerjinin değişimi hem de karbonun kalınlığı arka planı çok fazla değiştirmemektedir. Asıl problem karbonun tabakanın ince ya da kalın olması fark etmeksizin arka planı yükseltmesidir. Daha önce bahsedildiği gibi, hedefin arkasında ısıyı hızla dağıtacak bir tabaka bulunmadığı durumda hedef yüksek akı nedeniyle buharlaşacağı için asıl değerlendirilmesi gereken durumlar, mavi ve kırmızı ile verilen spektrumlardır.

Sonraki iki spektrumda da (bkz. Şekil 4.35 ve Şekil 4.36) aynı durum gözlenmektedir. Karbon tabaka olmaksızın oluşan arka plan değişiklik gösterse de arka planı belirleyen esas etken karbonun varlığı olduğu için mavi ve kırmızı ile gösterilen spektrumlar çok fazla farklılık göstermemektedir.

Sonuç olarak Şekil 4.33. ve Şekil 4.36. ile gösterilen spektrumlarda tüm durumlar için DCE ile oluşacak gama piki gözlenmektedir. Fakat oluşabilecek diğer etkilerden dolayı arka planın daha fazla yükselmesi halinde (karbon tabakanın bulunduğu durumlarda), bu pikleri gözlemlemek oldukça zorlaşacaktır.



Şekil 4.35. $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için (20 MeV/A) üç farklı S/B seviyesini gösteren spektrum



Şekil 4.36. $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için (70 MeV/A) üç farklı S/B seviyesini gösteren spektrum

Bu spektrumlar oluşturulurken DCE reaksiyonları sonucunda ortaya çıkacak ga-

malar için (yani 0.2 MeV - 2.0 MeV aralığındaki pikler) tesir kesiti "1 nb" olarak alınmıştır. Fakat bu değer ortalama olarak seçilmiştir. Simülasyonlar sonunda oluşan arka plana göre gerçek durumu yansıtmamaktadır. Dolayısıyla sadece arka plan spektrumu ve dedektörlerin çözünürlükleri ele alınarak istatistiksel olarak anlamlı sinyallerin gözlenmesi için gerekli tesir kesitleri (DCE reaksiyon kanalları için) hesaplanabilir.

Işın-hedef çiftlerinden $^{18}\text{O}+^{76}\text{Ge}$ (2π Geometri ve 70 MeV/A durumu) incelenmiş ve Çizelge 4.1. ile verilen sonuçlar elde edilmiştir. Çizelge 4.1.'e göre belirlenen tesir kesitleri 0.84 nb ile 1.50 nb arasında değişmektedir. Deneyler sırasında bu değerlerin altında kalan tesir kesitleri için alınacak sinyaller istatistiksel olarak anlamlı olmayacaktır.

Çizelge 4.1. 2π geometride tasarlanan kalorimetrenin 70MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ve $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ reaksiyonları için gerekli minimum DCE tesir kesitleri. 5 ns aralığa normalize edilmemiş ve 10^{12} pps için ölçeklendirilmiştir

$E_\gamma [\text{MeV}]$	$\sigma_{\text{DCE}}[\text{nb}](^{76}\text{Ge})$	$\sigma_{\text{DCE}}[\text{nb}](^{116}\text{Sn})$
0.2	0.84	0.75
0.4	1.04	0.99
0.6	1.20	1.10
0.8	1.29	1.28
1.0	1.35	1.30
1.2	1.38	1.34
1.4	1.38	1.43
1.6	1.42	1.41
1.8	1.40	1.45
2.0	1.50	1.47

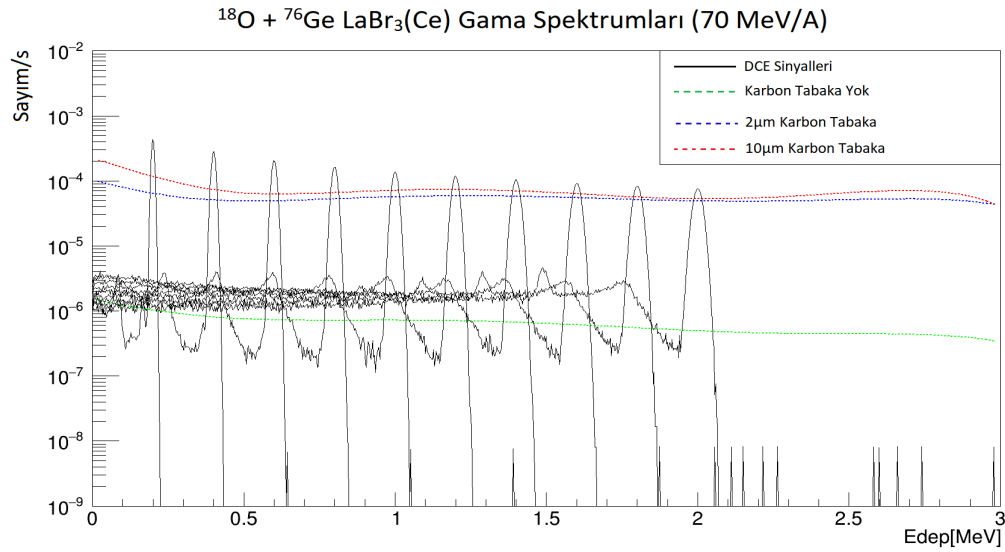
Limit tesir kesitlerini hesaplariken en yüksek arka plan $10\ \mu\text{m}$ karbon tabaka varlığında elde edildiği için $2\ \mu\text{m}$ ile $10\ \mu\text{m}$ arka-tabakalardan sadece $10\ \mu\text{m}$ olan incelenmiştir. Şekillerden görülebileceği üzere bu ikisinden $10\ \mu\text{m}$ en yüksek arka-plana sahip olduğundan en kötü durumu temsil etmektedir. $10\ \mu\text{m}$ en üst limit olarak alınırsa deneylerde kullanılacak daha ince arka-tabakalar ile gerekli olan tesir kesiti değerleri düşecektir.

Yine Çizelge 4.1.'de dikkat çeken bir diğer özellik, kullanılan ışın ve ışın enerjisi aynı olsa da hedeflerden kalay için daha düşük tesir kesitlerine ihtiyaç duyulacağıdır. $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çiftinde tesir kesiti aralığı 0.75 nb ile 1.47 nb olarak hesaplanmıştır.

4.5. Verimler ve Sinyal/Arka Plan Oranları

Yapabileceğimiz bir diğer araştırma ise 0.2 MeV ile 2.0 MeV arasında Sinyal-Arka plan spektrumunun nasıl değiştiğinin incelenmesidir.

Şekil 4.37.'de $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ çifti için (70 MeV/A enerjide) 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ve 2.0 MeV'e karşılık gelen tüm DCE sinyalleri (DCE reaksiyonlarından gelmesi beklenen gama ışınları), üç farklı arka plan spektrumu üzerine yerleştirilerek gösterilmiştir. Şekil 4.37. ile verilen spektrumda görülebileceği üzere 0.2 MeV'den 2.0 MeV'e doğru gidildikçe sinyal, arka plan seviyesine doğru azalmaktadır. Çizelge 4.2. ile 2π geometrisinde hazırlanan simülasyon için foto-pik verimleri ve arka plan bulunduğu durumda Sinyal-Arka plan oranları gösterilmiştir. Çizelgeye göre foto-pik verimleri en düşüğü %11 ve en yükseği %31 olmak üzere değişkenlik göstermektedir. Bununla birlikte çizelgede üç farklı Sinyal/Arka plan oranı verilmiştir. Birincisi, sadece hedefin bulunduğu durumu gösterirken ikincisi, hedefin arkasında 2 μm kalınlığında karbonun da bulunduğu durumu göstermektedir. Üçüncü durum ise yine 10 μm kalınlıklı karbon tabakanın oranlarını göstermektedir. Bu üç durum sırasıyla en düşükten, en yüksek arka plana doğru ilerlemektedir. Tıpkı önceki bölümde 0.8 MeV için tartışıldığı üzere birinci durumda sinyal, arka plandan yeterince yüksekken ikinci ve üçüncü durumlarda neredeyse gözlenmektedir. İlk durum için S/B oranları 54.78 - 148.17 arasında değişiklik gösterirken, ikinci durumda 3.91 ile 8.85 arasında ve üçüncü durumda ise 1.32 ile 3.36 arasında değişmektedir.



Şekil 4.37. 0.2 MeV - 2.0 MeV aralığındaki gama piklerinin arka plan üzerinde dağılımı

Çizelge 4.2. 70 MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın hedef çiftinin, 2π geometri için foto-pik verimleri ve S/B oranları (DCE tesir kesiti 1 nb olarak alınmıştır)

E_γ [MeV]	Verim(%)	S/B (Karbon Yok)	S/B (2µm Karbon)	S/B (10µm Karbon)
0.2	31	148.17	8.85	1.85
0.4	26	128.53	4.59	3.36
0.6	22	84.58	6.98	2.01
0.8	19	81.13	8.17	1.32
1.0	17	68.81	8.31	2.02
1.2	15	65.12	3.91	2.69
1.4	14	62.87	8.38	2.61
1.6	13	59.21	5.15	3.28
1.8	12	54.78	7.53	1.87
2.0	11	55.83	4.35	3.03

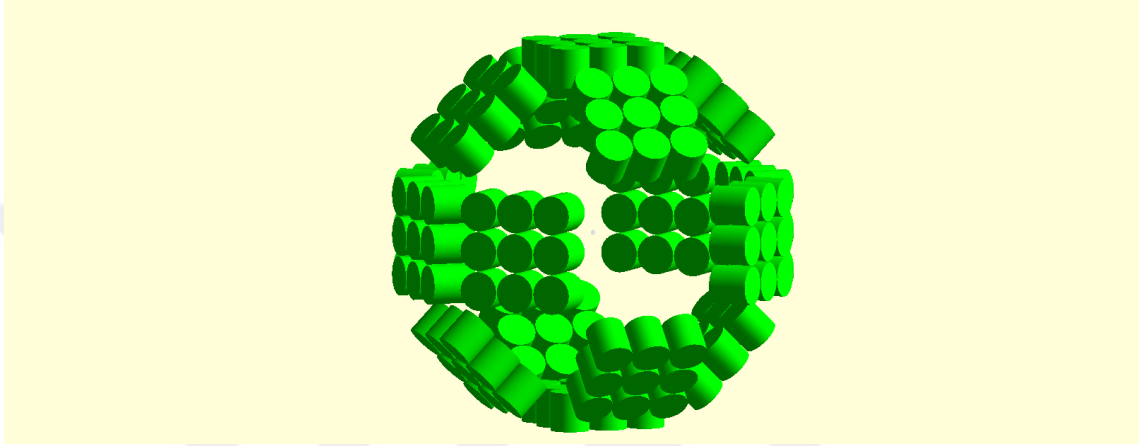
4.6. Alternatif Geometrilere Ait Verimler ve S/B Oranları

Tasarlanan yarı küre şeklindeki kalorimetre tam anlamıyla ele alınıp değerlendirildikten sonra (enerji çözünürlüğü, verim, arka plan, S/B oranları) DCE reaksiyonlarından kaynaklanan gama ışınlarını gözlemek için olası diğer tasarımlar da değerlendirilmiştir.

Bunlardan bir tanesi 4π geometride hazırlanan tasarımdır. Dedektörler yine hedeften 30 cm uzaklıkta yerleştirilmiş olup bir küre yüzeyini kapsayacak şekilde düşünülmüştür ve toplamda 144 tane dedektörden oluşmaktadır.

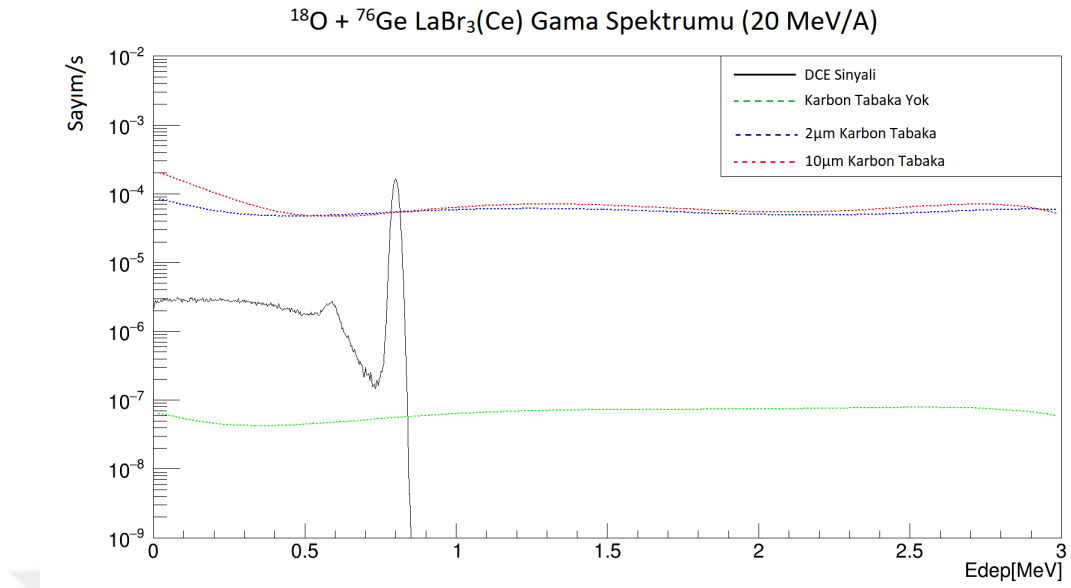
Şekil 4.38. bu tasarımı göstermektedir. Bu tasarımda hedefin tam ön ve arkası,

hiç dedektör konulmayarak boş bırakılmıştır. Buradaki amaç ışının süperiletken siklotron-dan gelişi ve MAGNEX'e doğru gidişi için açıklık bırakılmasıdır. Hedefin ön yüzünün bulunduğu kısımda saçılma haznesi ile ışın-tüpünün kesiştiği açıklık bulunurken arka tarafında Faraday kabı, slitler, kuadrapol ve dolayısıyla MAGNEX'e geçiş için gerekli açıklık bulunmaktadır. Bu alanlar boş bırakılarak ışının doğrudan dedektörlere çarpması engellenmiştir.

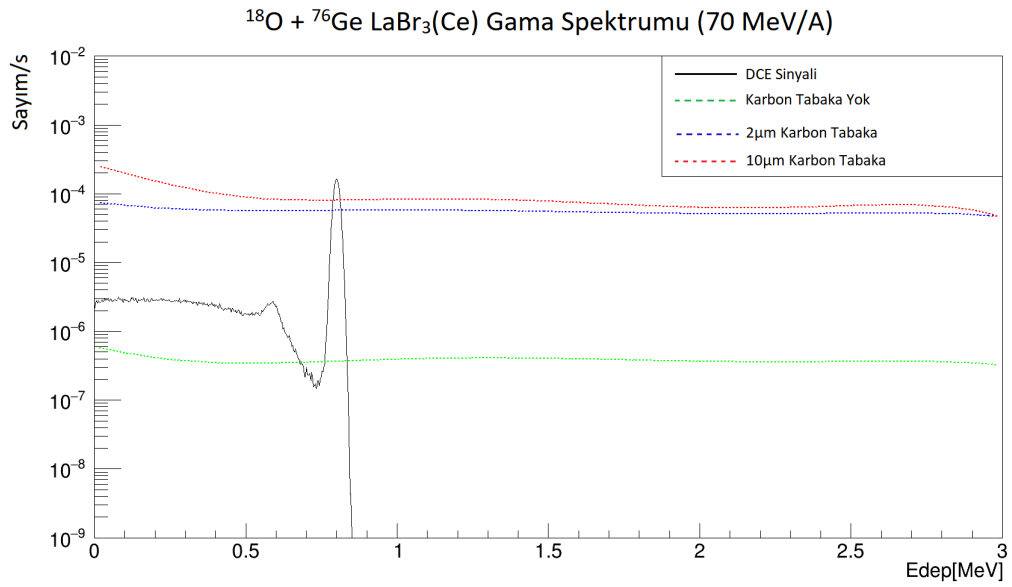


Şekil 4.38. 4π geometride dedektör topluluğu. Dedektörler saçılma odasının içinde

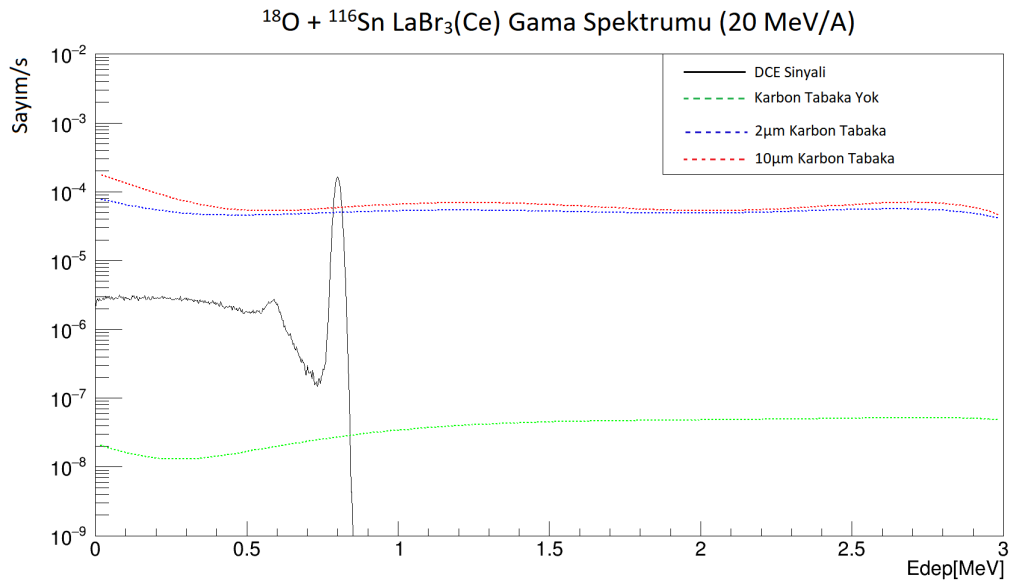
Bu tasarım için de aynı iki ışın-hedef çifti ele alınmıştır. $^{18}\text{O} + ^{18}\text{Ge}$ ve $^{18}\text{O} + ^{18}\text{Sn}$ çiftleri için yine 20 MeV/A ile 70 MeV/A enerjide gama spektrumları elde edilmiştir. Şekil 4.39. ile Şekil 4.42.'de bu spektrumlar gösterilmiştir.



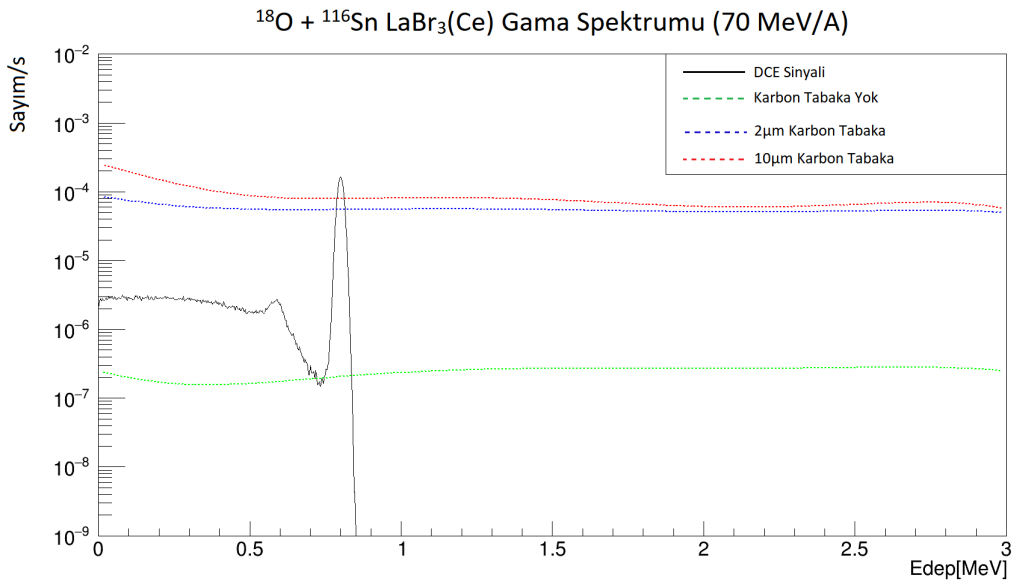
Şekil 4.39. 4π geometride (144 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için spektrum (20 MeV/A)



Şekil 4.40. 4π geometride (144 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için spektrum (70 MeV/A)



Şekil 4.41. 4π geometride (144 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için spektrum (20 MeV/A)



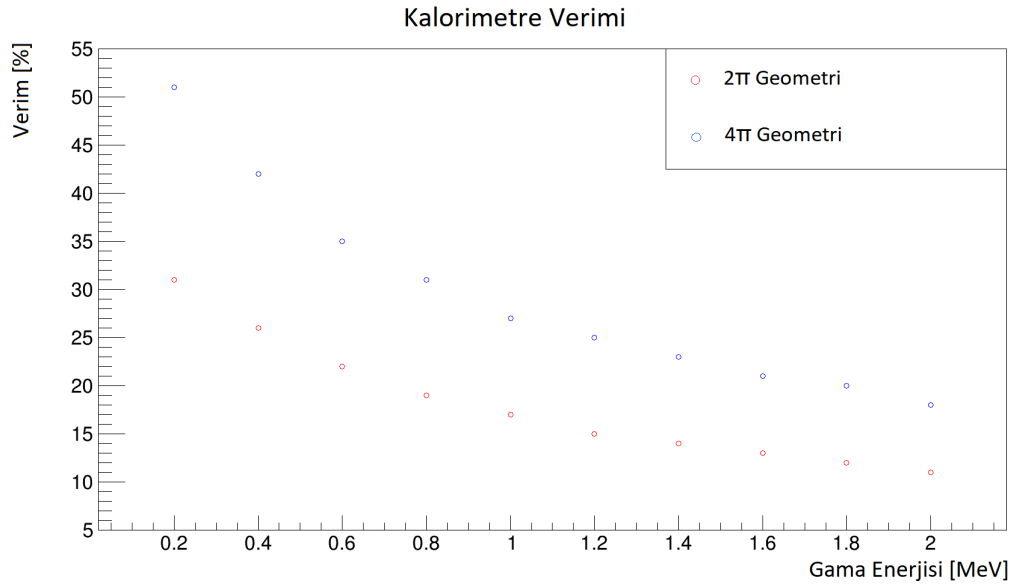
Şekil 4.42. 4π geometride (144 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için spektrum (70 MeV/A)

Çizelge 4.3'e göre karbonun olmadığı durumda bu tasarım S/B oranlarını oldukça ve verimi arttırmış görünse de karbonun varlığında ilk tasarıma göre S/B oranlarında düşüş görülmektedir.

Çizelge 4.3. 70 MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın hedef çiftinin, 4π geometri için foto-pik verimleri ve S/B oranları (DCE tesir kesiti 1 nb olarak alınmıştır)

E_γ [MeV]	Verim(%)	S/B (Karbon Yok)	S/B (2 μm Karbon)	S/B (10 μm Karbon)
0.2	51	317.60	3.56	2.47
0.4	42	266.55	4.62	2.35
0.6	35	165.72	5.51	1.26
0.8	31	141.51	2.14	1.61
1.0	27	117.49	5.23	1.22
1.2	25	108.42	3.94	2.92
1.4	23	95.02	5.63	0.73
1.6	21	86.30	2.58	1.04
1.8	20	76.20	3.80	0.98
2.0	18	74.20	3.31	1.00

Dedektörlerin saçılma odası içinde bulunduğu iki durum (2π ve 4π geometriler) için verimler, enerjinin bir fonksiyonu olarak Şekil 4.43 ile gösterilmiştir. 2π geometriden 4π geometriye geçiş verimlerde ortalama 1.6 katlık bir artış sağlamıştır.

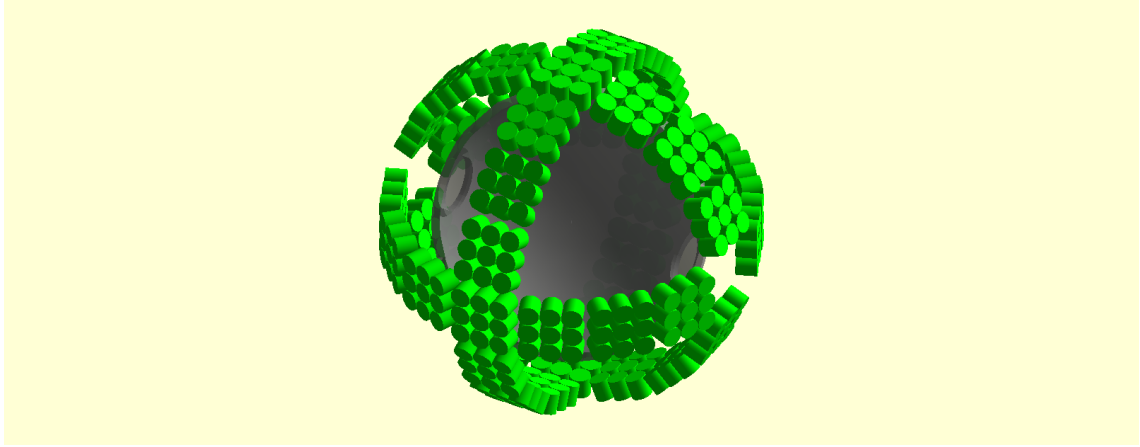


Şekil 4.43. 2π ve 4π geometriler için dedektör verimleri

Bir diğer tasarım ise 360 dedektörden oluşan ve yine 4π geometride hazırlanan tasarımıdır. Bu tasarımın farkı tüm dedektörlerin saçılma odasının dışında yer almasıdır. Simülasyonlarda saçılma odası 3 cm kalınlığında paslanmaz çelik olarak alınmıştır.

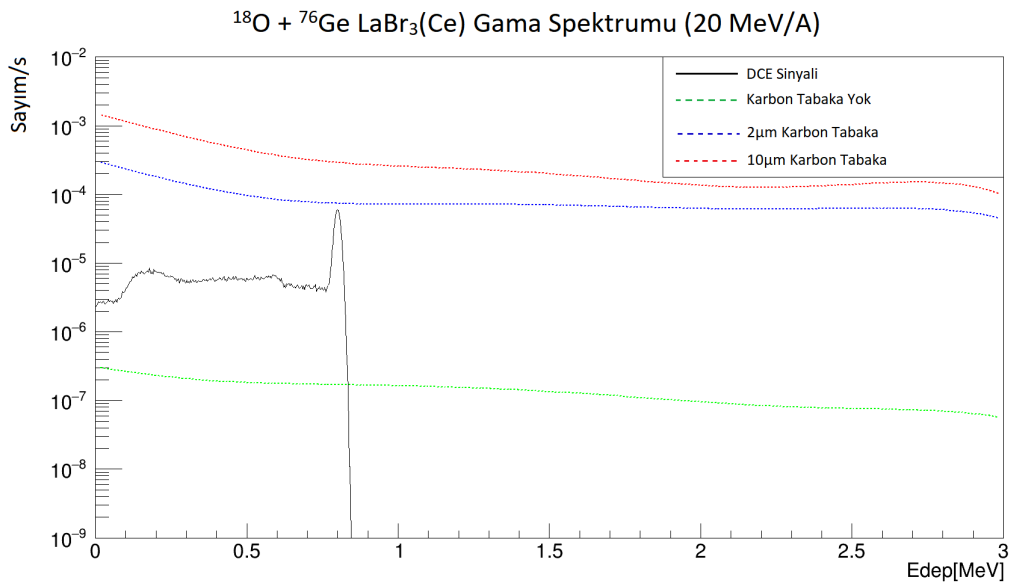
Burada bahsi geçen tasarım Şekil 4.44. ile verilmiştir. Bir önceki 4π tasarımda olduğu gibi hedefin ön ve arkası ışının geliş ve gidişi için boş bırakılmıştır. Bu boşluklar

şekilde küresel olarak verilen saçılma odasının üzerinde görülebilir.

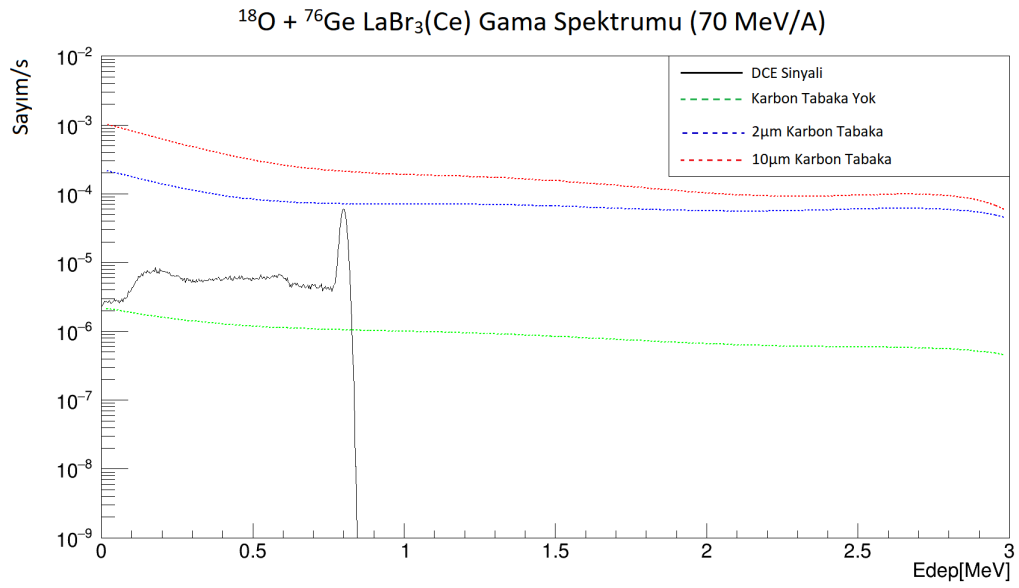


Şekil 4.44. 4π geometride dedektörler topluluğu (360 dedektör). Dedektörler saçılma odasının dışında

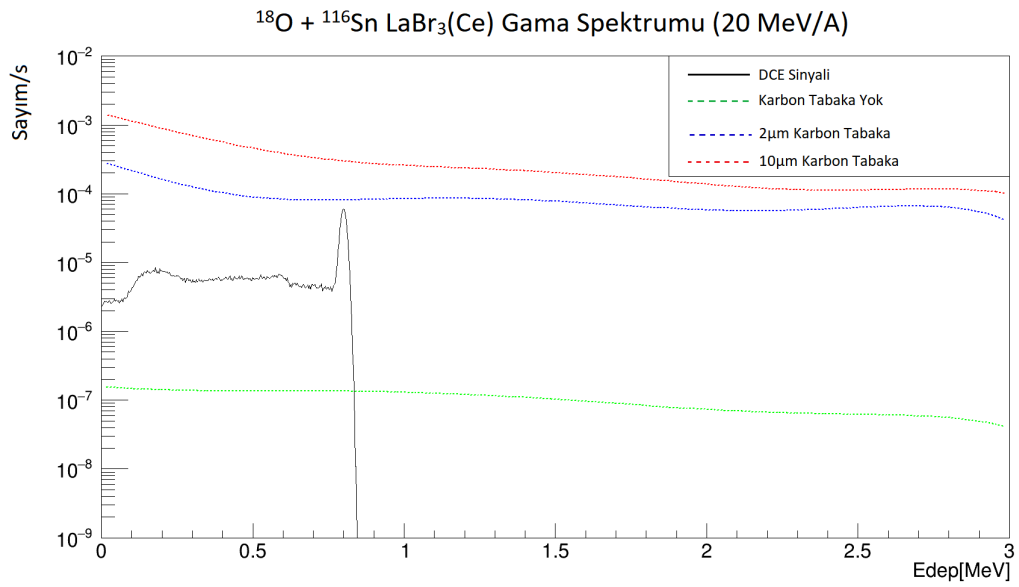
Şekil 4.45. ile Şekil 4.48. arasında görülebileceği üzere bu kez sadece karbonun olmadığı durumlarda DCE sinyallerini gözlemek mümkün olmuştur. Karbonun dahil olduğu tüm durumlarda sinyal arka planın altında kalmaktadır ve dolayısıyla dedektörlerin saçılma odası dışında bulunduğu tasarımları NUMEN projesi için kullanışsız hale getirmektedir.



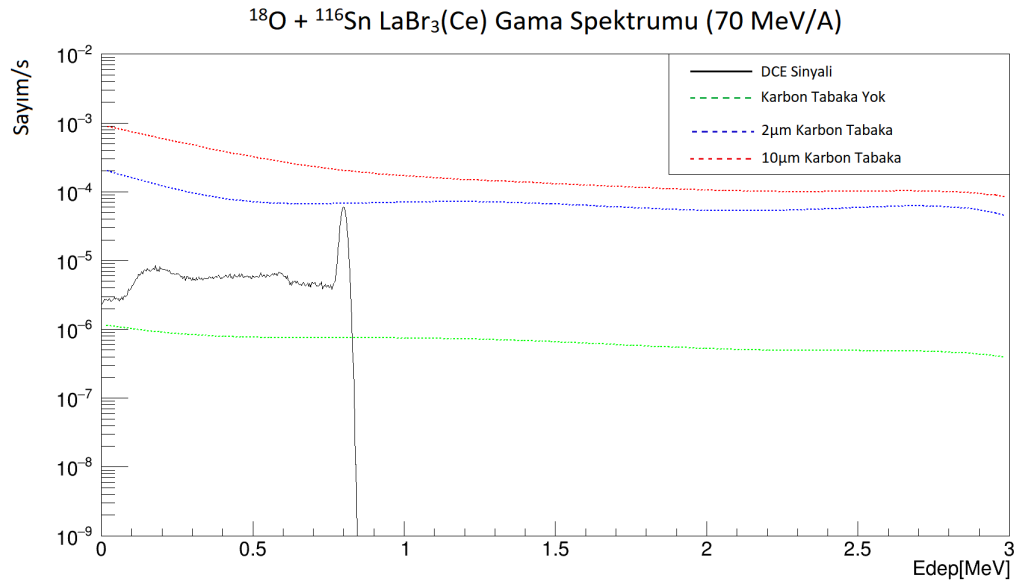
Şekil 4.45. 4π geometride (360 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için spektrum (20 MeV/A)



Şekil 4.46. 4π geometride (360 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için spektrum (70 MeV/A)

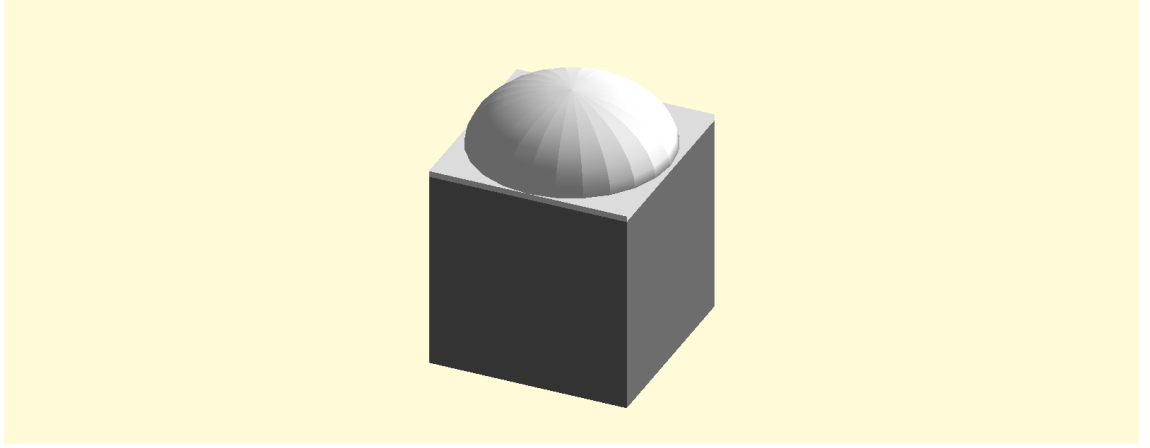


Şekil 4.47. 4π geometride (360 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için spektrum (20 MeV/A)

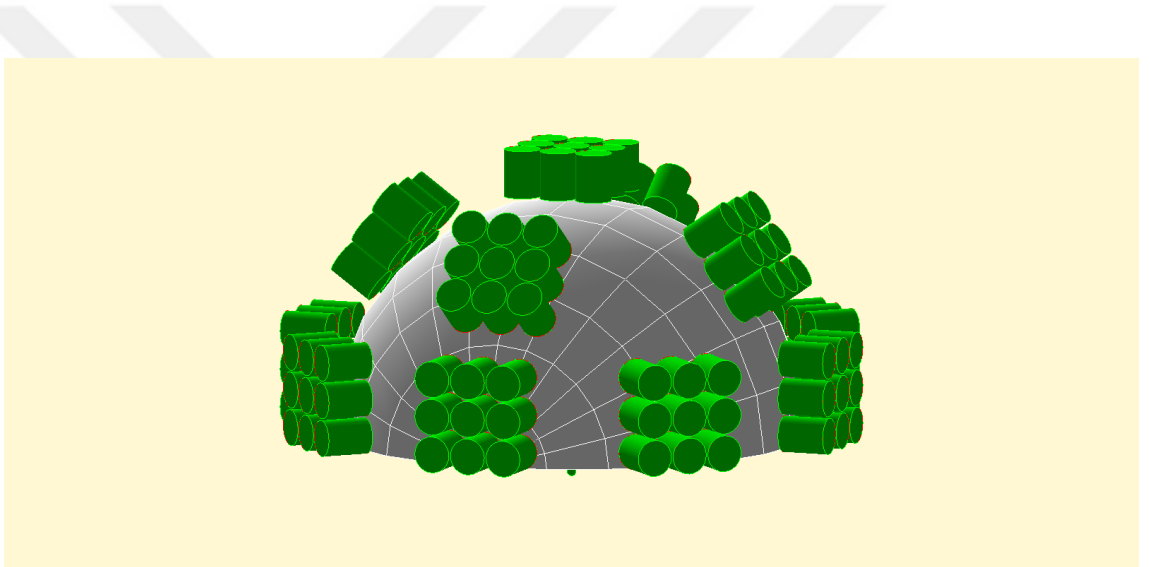


Şekil 4.48. 4 π geometride (360 dedektör) $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için spektrum (70 MeV/A)

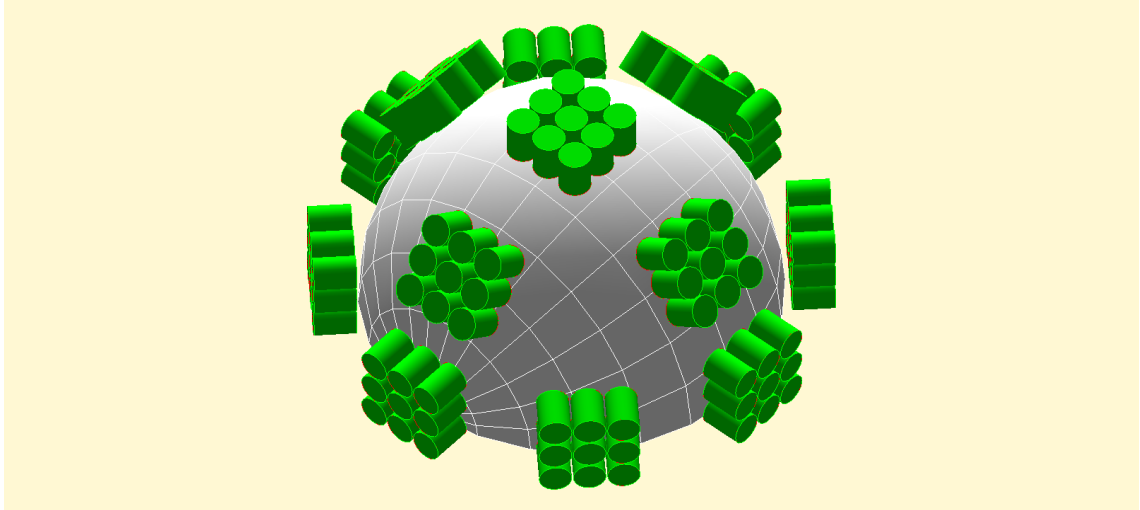
Farklı geometriler, farklı sayıdaki dedektörler ile simüle edilip NUMEN deneyleri için sonuçlar elde edildikten sonra, elde edilen sonuçlara göre son tasarıma karar verilecektir. Son tasarımda bir kristalin boyutu 38 mm $\times$ 50 mm olarak alınmıştır (çap ve yükseklik). Bu son tasarıma göre dedektörlerin saçılma odası dışına konması kararlaştırılmıştır. Saçılma odası dikdörtgenler prizması şeklinde olsa da odanın üst kısmında bir kubbe yer alacaktır. Bu kubbenin iç yarı çapı 24 cm olup ve dedektörler dış çeperden en fazla 0.5 cm uzaklıkta yerleştirilecektir (NUMEN TDR, 2019). Dolayısıyla son tasarım, daha önce yapılan simülasyonlardan 2 π geometrili olan tasarıma benzeyecek fakat saçılma odası dışında yer alacaktır. Yine önceki tasarımdan farklı olarak saçılma odasının duvarları 3 cm kalınlığında olsa da kubbe en fazla 10 mm kalınlıkta ve alüminyum olacaktır. Bu yeni verilere göre saçılma odası ve dedektörler Şekil 4.49., Şekil 4.50. ve Şekil 4.51.'de görülmektedir.



Şekil 4.49. Saçılma odasının muhtemel geometrisi ve odanın üst kısmında bulunacak olan kubbe

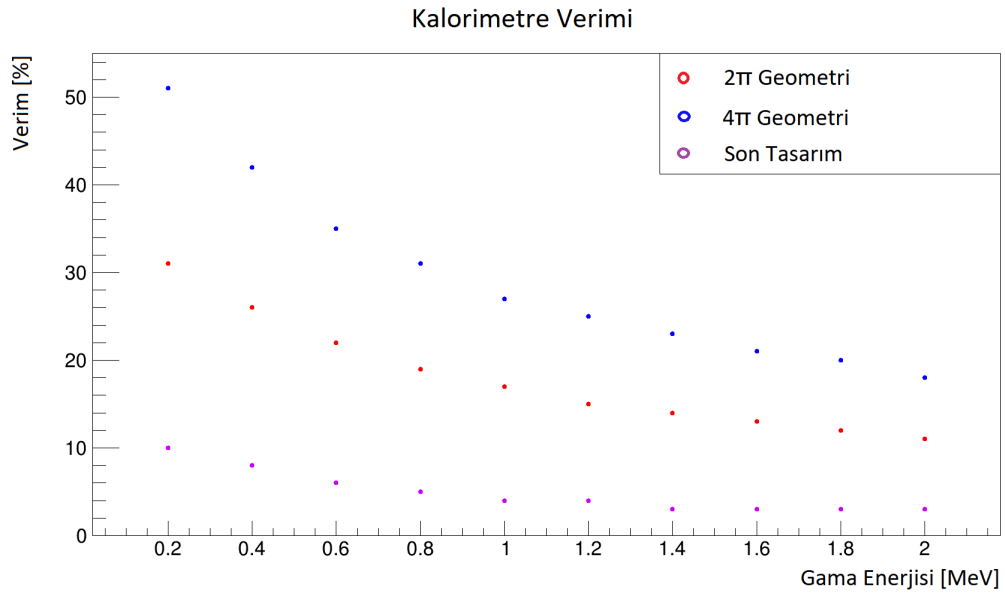


Şekil 4.50. Kubbenin etrafında olması planlanan dedektörler-1



Şekil 4.51. Kubbenin etrafında olması planlanan dedektörler-2

Bu son tasarım ile dedektörlerin önündeki alüminyum kubbenin dedektörlerin verimini azaltacağı aşikardır. Şekil 4.43. ile gösterilen verim karşılaştırmasına son tasarım da eklenirse Şekil 4.52. ile verilen durum elde edilir. Beklenildiği üzere bu üç tasarım arasında en düşük verim son tasarıma aittir.



Şekil 4.52. Üç farklı geometri için dedektörlerin verimlerinin karşılaştırması

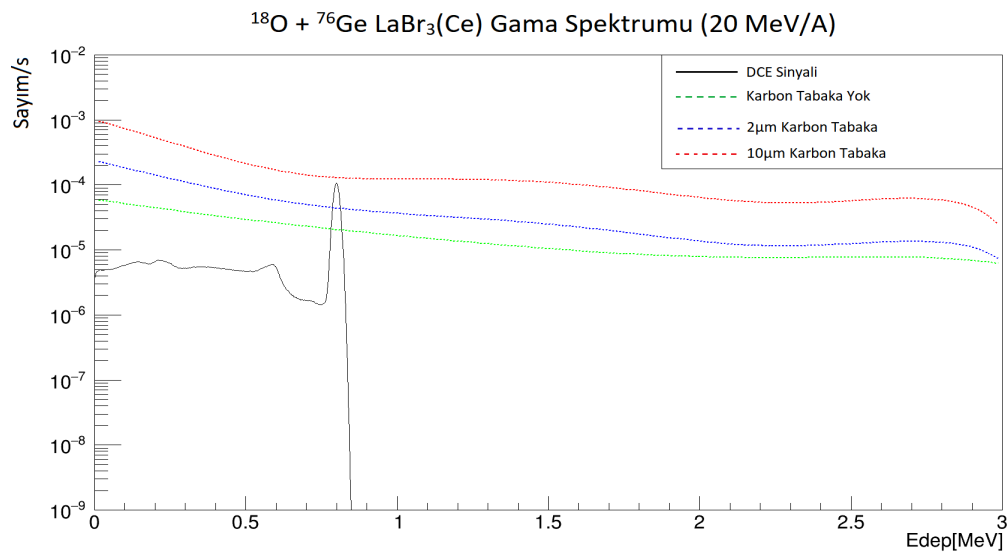
Çizelge 4.4.'e bakıldığında ise son tasarımdaki anlamlı ölçümler için gerekli minimum DCE tesir kesitleri görülebilir. Burada dikkat çeken sonuç verimler azalmış olsa dahi gerekli olan minimum tesir kesitlerinde dramatik bir artış görülmemiştir. Dedektörlerin

kubbenin dışında kalması sinyal için kötü olsa bile aynı derecede arka planı da azalttığı için tesir kesitlerinde aşırı artış yaşanmamıştır.

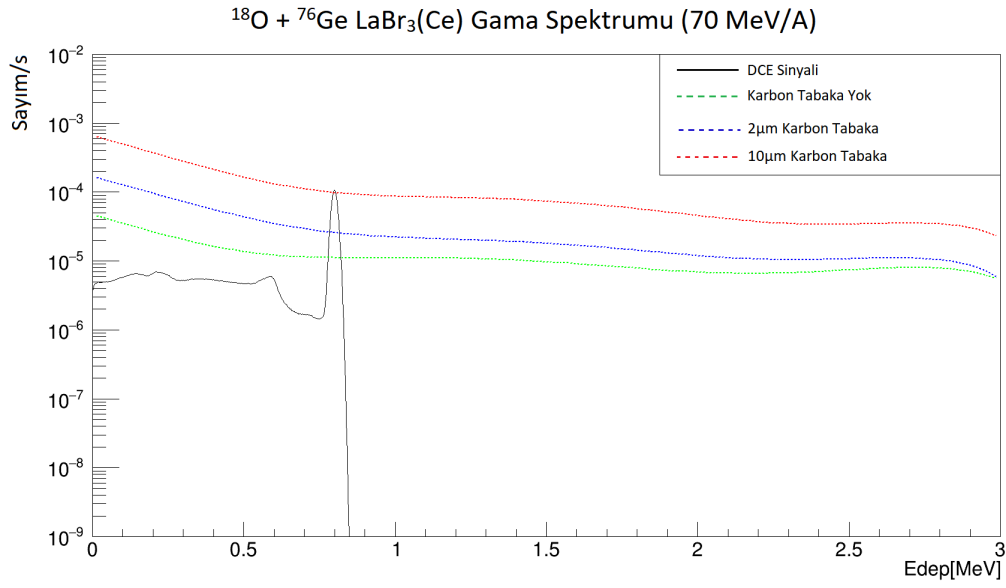
Çizelge 4.4. Planlanan son geometride 70MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ve $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ reaksiyonları için gerekli minimum DCE tesir kesitleri. 5 ns aralığa normalize edilmemiş ve 10^{12} pps için ölçeklendirilmiştir

$E_\gamma[\text{MeV}]$	$\sigma_{\text{DCE}}[\text{nb}](^{76}\text{Ge})$	$\sigma_{\text{DCE}}[\text{nb}](^{116}\text{Sn})$
0.2	1.53	1.69
0.4	1.56	1.78
0.6	1.63	1.84
0.8	1.53	1.87
1.0	1.59	1.79
1.2	1.58	1.69
1.4	1.54	1.84
1.6	1.70	1.91
1.8	1.69	1.84
2.0	1.72	1.89

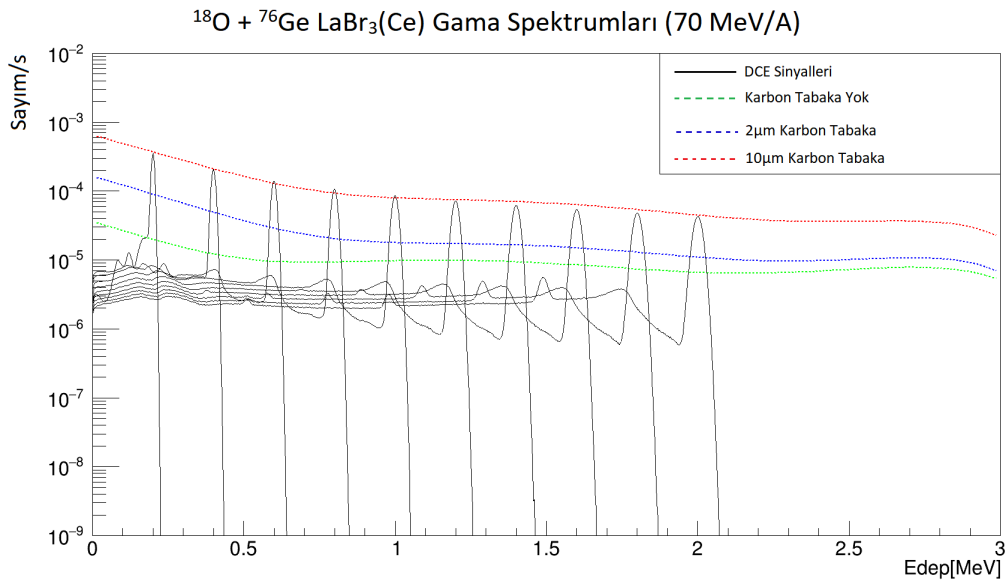
Şekil 4.53. – Şekil 4.58. bu son geometri için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ve $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çiftlerinin spektrumlarını göstermektedir. Bu spektrumlara göre artık karbon tabaka olmadığına da arka plan diğer iki duruma yaklaştırmış görünmektedir ($2\mu\text{m}$ ve $10\mu\text{m}$ karbon arka tabaka durumları). Bununla birlikte bu durum, $10\mu\text{m}$ karbon arka tabaka durumu maksimum arka plan seviyesini belirlediği için kalorimetre için bir tehlike oluşturmamaktadır.



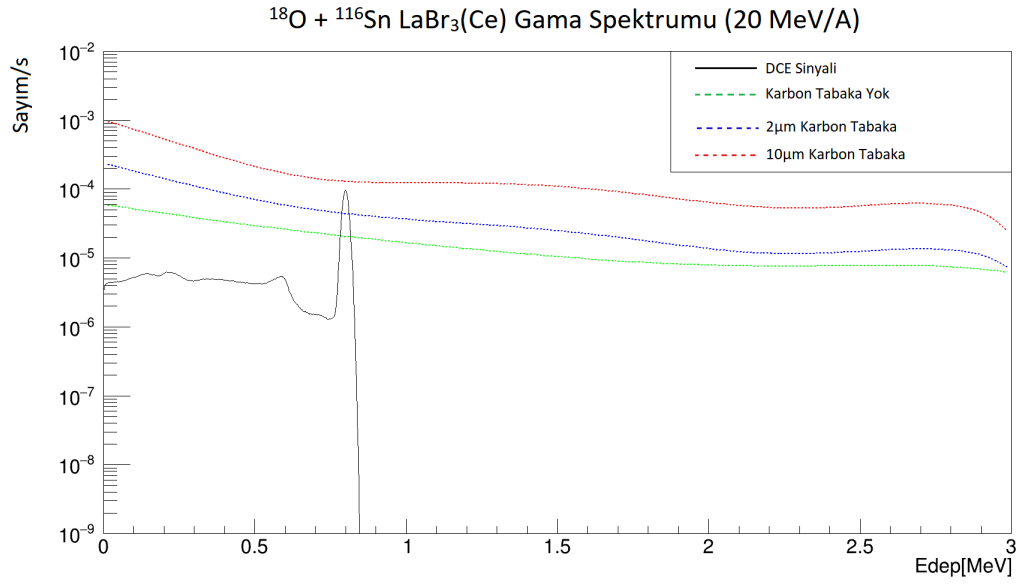
Şekil 4.53. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumdaki spektrum (20 MeV/A)



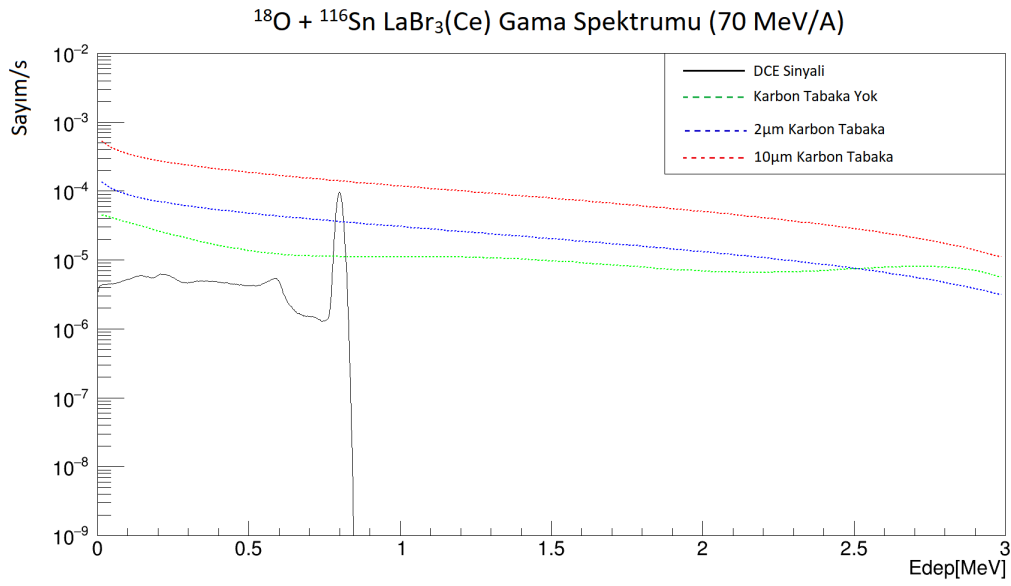
Şekil 4.54. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumdaki spektrum (70 MeV/A)



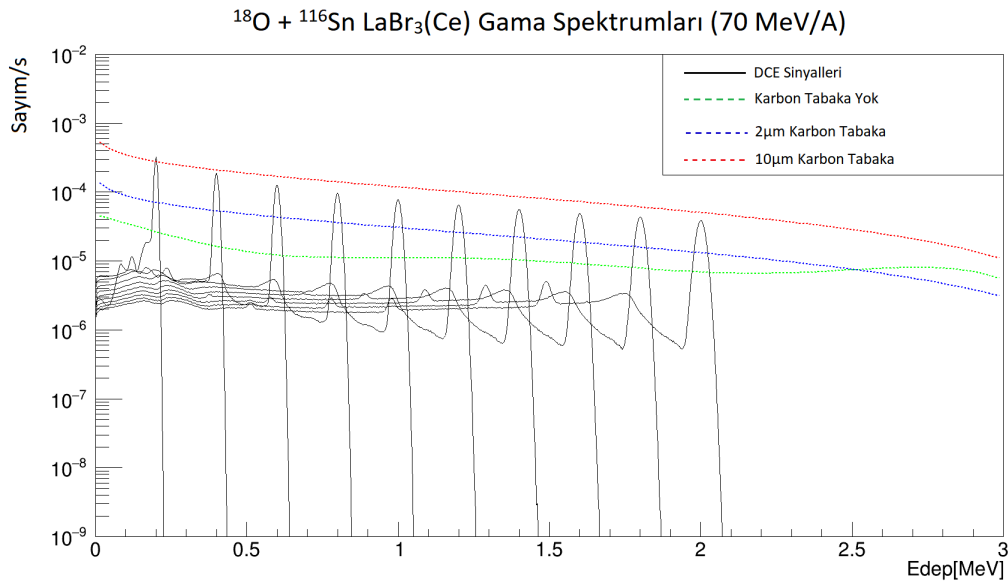
Şekil 4.55. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çifti için 0.2 MeV – 2.0 MeV aralığındaki gama piklerinin arka plan üzerinde dağılımı



Şekil 4.56. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumdaki spektrum (20 MeV/A)



Şekil 4.57. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için üç farklı durumdaki spektrum (70 MeV/A)



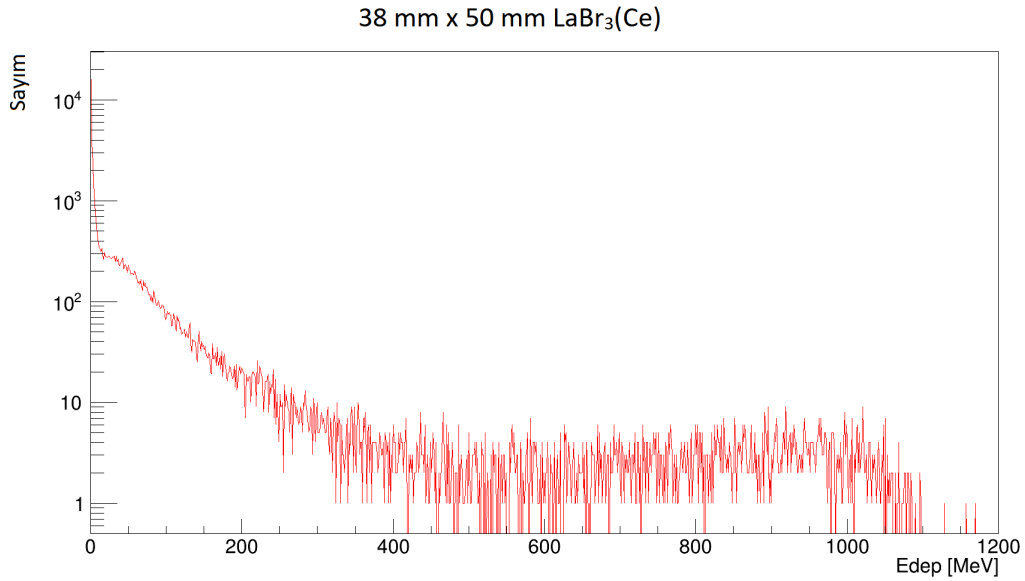
Şekil 4.58. Son tasarımda $^{18}\text{O} + ^{116}\text{Sn}$ ışın-hedef çifti için 0.2 MeV – 2.0 MeV aralığındaki gama piklerinin arka plan üzerinde dağılımı

Çizelge 4.5. yine 70MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ reaksiyonunda elde edilen bazı verileri özetlemiştir. İlk göze çarpan sonuçlar verimin ve karbon tabaka olmayan durumdaki S/B oranlarının oldukça azalmış olduğudur. Bununla birlikte 10 μm karbon arka tabaka durumunda tüm S/B oranlarının 1'in altında kalmış olduğu da hemen göze çarpmaktadır. Burada yine unutulmaması gereken nokta minimum DCE tesir kesitlerinin hesaplanması haricinde kalan diğer hesaplar 1 nb tesir kesiti için yapılmıştır. Daha önce yapılan deneylerde bu tesir kesitinden çok daha büyük sonuçlar elde edildiği için son tasarımın etkin bir şekilde çalışacağı beklenmektedir.

Çizelge 4.5. 70 MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın hedef çiftinin, son tasarlanan 2π geometri için foto-pik verimleri ve S/B oranları (DCE tesir kesiti 1 nb olarak alınmıştır)

E_γ [MeV]	Verim(%)	S/B (Karbon Yok)	S/B (2 μm Karbon)	S/B (10 μm Karbon)
0.2	10	8.37	3.20	0.75
0.4	8	7.74	1.76	0.56
0.6	6	5.51	2.10	0.61
0.8	5	5.04	1.70	0.50
1.0	4	5.56	1.17	0.35
1.2	4	3.01	1.20	0.36
1.4	3	4.21	0.99	0.29
1.6	3	2.85	1.14	0.25
1.8	3	3.43	0.90	0.27
2.0	3	2.84	0.85	0.23

Son olarak, DCE sinyallerinin asıl gözleneceği arka planı tam olarak ifade edebilmek için Şekil 4.59. incelenebilir. Şimdiye kadar verilen arka planlar 0 – 2 MeV aralığında gösterilmişti fakat Şekil 4.59, 70 MeV/A için $^{18}\text{O} + ^{76}\text{Ge}$ ışın-hedef çiftinin (10 μm karbon arka tabaka ile) dedektörler tarafından algılanan asıl spektrumunu göstermektedir ve sadece 1 s'lik deney süresine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.59. Son tasarımda dedektörlerin DCE sinyalleri haricinde göreceği arka plan (8×10^8 gelen parçacık için)

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, en basit anlamda bir sintilasyon dedektörünün simüle edilmesiyle başlanarak çok daha büyük bir deney düzeneğine birden fazla dedektörün eklenmesinin simülasyonları ile devam edilmiştir. İlk yapılan simülasyonlar ile sadece sintilatörlerde değil tüm gama ışını dedektörlerinde belirlenmesi gereken parametreler, bu parametrelerin hangisinin hangi şartlarda önemli olduğu, bir gama ölçümü sırasında, yapılan ölçüme bağlı olarak bir parametrenin en uygun olduğu koşuldan vazgeçilerek bir diğer parametreyi en iyi hale getirilebileceği görülmüştür. Bu nokta, en iyi dedektörün tüm parametrelerinin aynı anda ideal seviyelerde olması gerekmediğini göstermiştir. Aksine, yapılacak ölçümde öncelikle hangi parametrenin en uygun seviyede olmasının gerekliliğinin araştırılması, kullanılacak dedektörü o ölçüm için en iyi dedektör yapacağı görülmüştür. Yine burada dedektör kristalini korumak için kullanılan alüminyum kaplamanın spektrumları nasıl etkilediği ve istenilen verileri ne kadar değiştirdiği açıkça görülmüştür.

Sonraki simülasyonlarda ise NUMEN deneylerinin testlerini kapsayan olayların yapılması hedeflenmiştir. Bu testlerdeki en önemli kısımlardan birisi ışın-hedef etkileşmeleridir. Işın-hedef reaksiyonlarından kaynaklanan ve çift yük değişimi reaksiyonlarını kapsamayan gamalar ve nötronlar kalorimetrenin yapılmasında ve istenilen ölçümlerin alınmasındaki temel problemdir. Bu gama ve nötronların yarattığı gama spektrumunda arka plan olarak gözlenen olaylar deneyler sırasında kalorimetrenin istenilen değerlerde çalışıp çalışmayacağını belirleyen temel etkidir. Simülasyon sonuçları ve daha önce yapılan pilot deneylerden elde edilen veriler $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 'lerden yapılacak olan dedektörün başarılı bir şekilde çalışacağını ortaya koymuştur.

Bununla birlikte dedektörlerin konumları ve sayıları gibi diğer faktörler de tez boyunca araştırılmıştır. Simülasyonlar sonunda dedektörlerin sayısının dedektör verimini doğrudan etkilediği görülmüştür. Simülasyon sonuçlarına göre dedektörlerin geometrisi de sinyalin gözlenmesinden çok verimin değişmesinde rol oynamaktadır. Fakat dedektörlerin konumu bu noktada önemli olabilmektedir. Dedektörlerin saçılma odasının içinde olup olmamasına bağlı olarak sinyalin yüksekliği, kalorimetrenin performansını etkileyebilecek kadar değişmektedir. Dedektörler içerideyken sinyal yüksekliği arka plana oranla

dışarıda olduğundan daha fazladır. Fakat dedektörlerin diğer tüm ekipmanla birlikte saçılma odasının içerisine konması, saçılma odasının çok daha büyük yapılmasına ve dahası elektronik ekipmanın çok fazla radyasyona maruz kalmasına neden olacaktır. Bu da uzun vadede istenmeyen bir durumdur. Değinilmesi gereken bir diğer parametre de dedektör sayısıdır. Şimdiye kadar dedektör geometrisini ve dolayısıyla sayısını sadece verimleri hesaplarken kullanmış ve minimum tesir kesitlerini etkilemediğini belirtmiş olsak da NUMEN deneylerinde istenilen sonuçları elde etmede doğrudan etkileyebileceği bir durum daha bulunmaktadır. Şekil 4.53 deneyin sadece 1 s'lik kısmını göstermektedir. Deneylerin süresinin bir haftaya kadar uzayabileceği düşünülürse dedektör başına düşen parçacık sayısı oldukça artacaktır ve bu da dedektörlerde yığılmaya (pile-up) neden olabilir (Knoll, 2010). Dedektörlerde görülen yığılma peş peşe gelen iki sinyalin yani iki pikin kaybolarak tek pik görünmesine ya da tamamen kaybolmasına neden olabilir. Dolayısıyla dedektörlerin maliyetinin çok fazla olduğu da hesaba katılarak, kalorimetrenin mümkün olan en fazla sayıda dedektör ile oluşturulması hem kalorimetrenin başarısı hem de NUMEN deneylerinin başarısı için daha etkili olacaktır.

Son olarak saçılma odasının kubbe kalınlığı ve yapıldığı malzeme de sinyalin gözlenebilmesi için kritik rol oynamaktadır. Şekil 4.44 çelikten yapılan ve 3 cm kalınlığında olan bir kubbe gösterirken, Şekil 4.50 alüminyumdan yapılan 10 mm kalınlığındaki bir kubbeyi göstermektedir. Bu iki durum arasındaki fark karbon arka tabaka olmadığı durumdaki spektrumda açıkça görülebilir. 10 mm alüminyum, 3 cm çeliğe göre daha fazla arka plana neden olmuştur. Bu çalışma NUMEN deneyleri için yapılacak olan gama kalorimetresinin ne kadar etkili olacağını ve istenilen sonuçları elde edip edemeyeceğini göstermek adına yapılmıştır. Tüm çalışma sonunda kalorimetrenin planlandığı şekilde yapıldığı takdirde uygun değerlerde çalışacağı çift yük değişimi reaksiyonlarının araştırılmasında üstelendiği rolü başarılı bir şekilde yerine getireceğini açıkça ortaya koymuştur.

Bu tez çalışması yüksek maliyetli bir gama kalorimetresinin (dedektörler topluluğunun), henüz kurulmadan önce istenilen verimi gösterip gösteremeyeceğini belirlemek açısından oldukça önemlidir. Dedektörlerin satın alındıktan sonra olası bir çalışmama durumu veya tasarımın yani dedektörler ile oluşturulan geometrinin DCE reaksiyonlarından sinyal alamaması, projeye zaman kaybettireceği gibi proje bütçesinin de boşa harcanmasına neden olabilir. Dolayısıyla NUMEN projesi için geliştirme çalışmaları başlamadan

önce gama kalorimetresi kısmının simülasyonlar ile çalıştığını göstermek, NUMEN grubunun başarısı için kritik bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçların, dedektörlerin kurulmaya başlanmasıyla birlikte alınacak deneysel veriler ile uyumluluğunun araştırılması ve çıkan sonuçlara göre olası yeni tasarımların oluşturulması gelecek 3 - 4 yılı kapsayacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Agostinelli, S. et al. 2003. Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 506:250-303.
- Agostini, M. et al 2018. The Monte Carlo simulation of the Borexino detector *Astroparticle Physics*, 97:136-159.
- Allison, J. et al. 2006. Geant4 developments and applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53:270-278.
- Allison, J. et al. 2016. Recent developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 835:186-225.
- Binder, K., and Heermann D. W. 2010. Monte Carlo Simulation in Statistical Physics (5th Ed.) Springer, DE, 202.
- Blasi, N., Giaz, A., Boiano, C., Brambilla, S., Camera, F., Million, B., and Riboldi, S. 2016. Position sensitivity in large spectroscopic LaBr₃:Ce crystals for Doppler broadening correction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 839:23-28.
- Bohlen, T. T., Cerutti, F., Chin, M.P.W., Fasso, A., Ferrari, A., Ortega, P. G., Mairani, Sala, P.R., Smirnov, G. and Vlachoudis, V. 2014. The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications. *Nuclear Data Sheets*, 120:211-214.
- Bucurescu, D., et al. 2016. The ROSPHERE γ -ray spectroscopy array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 837:1-10.
- 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.
- Calabrese, S., et al. 2018. First Measurement of the Cd-116(Ne-20, O-20)Sn-116 Reaction at 15 A MeV. *Acta Physica Polonica B*, 49(3):275-280.

- Carbone, D., et al. 2018. Experimental challenges in the measurement of double charge exchange reactions within the NUMEN project. XLI Symposium on Nuclear Physics 2018, Jan 08-11, Cocoyoc, Mexico.
- Cavallaro, M., et al. 2018. Measuring nuclear reaction cross sections to extract information on neutrinoless double beta decay. 12th International Spring Seminar on Nuclear Physics - Current Problems and Prospects for Nuclear Structure, May 15-19, 2017, Italy.
- Cunsolo, A., Cappuzzello, F., Foti, A., Lazzaro, A., Melita, A. L., Nociforo, C., Shchepunov, V., and Winfield, J. S. 2002. Technique for 1st order design of a large-acceptance magnetic spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 481:48-56.
- Cunsolo, A., Cappuzzello, F., Foti, A., Lazzaro, A., Melita, A. L., Nociforo, C., Shchepunov, V., and Winfield, J. S. 2002. Ion optics for large-acceptance magnetic spectrometers: application to the MAGNEX spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 484:56-83.
- Cunsolo, A. et al. 2007. Commissioning of the MAGNEX large-acceptance spectrometer. *Eur. Phys. J. Special Topics*, 150:343-346.
- Cunsolo, A. et al. 2008. First Results from The MAGNEX Large Acceptance Spectrometer. Conference on Nuclear Physics and Astrophysics - From Stable Beams to Exotic Nuclei, Jun 25-30, Kapadokya, Turkey.
- Center for X-Ray Optics and Light Source. 2009. X-ray Data Book (October 2009) by the Center for X-Ray Optics and Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 174.
- Dipuglia, A., Cameron, M., Davis, J. A., Cornelius, I. M., Stevenson, A. W., Rosenfeld, A. B., Petasecca, M., Corde, S., Guatelli, S., and Lerch, M. L. F. 2019. Validation of a Monte Carlo simulation for Microbeam Radiation Therapy on the Imaging and Medical Beamline at the Australian Synchrotron. *Scientific Reports*, 9:17696.

- Dhibar, M., Mazumdar, I., Chavan P. B., Patel, S. M., and Kumar, A. G. 2018. Characterization of a 2×2 array of large square bars of $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ detectors with γ -rays up to 22.5 MeV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 883:183-190.
- Dolinski, M. J., Poon, A. W. P., and Rodejohann, W. 2019. Neutrinoless Double-Beta Decay: Status and Prospects. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 69:219-251.
- Dorenbos, P., de Haas, J. T. M., and van Eijk, C. W. E. 2004. Gamma Ray Spectroscopy With a $\phi 19 \times 19 \text{ mm}^3$ $\text{LaBr}_3 : 0.5\% \text{ Ce}^{3+}$ Scintillator *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 51(3):1289-1296.
- Farnea, E., Recchia, F., Bazzacco, D., Kröll, Th., Podolyak, Zs., Quintana, B., Gadea, A., and the AGATA Collaboration. 2010. Conceptual design and Monte Carlo simulations of the AGATA array *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 621:331-343.
- Ferrari A., Sala, P.R., Fasso', A. and Ranft, J. 2005. "FLUKA: a multi-particle transport code". CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.
- Gilmore, G. R. 2008. Practical Gamma-ray Spectrometry (2nd Ed.) John Wiley and Sons Inc., UK, 408.
- Khodyuk, I. V., and Dorenbos, P. 2010. Nonproportional response of $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ and $\text{LaCl}_3\text{:Ce}$ scintillators to synchrotron x-ray irradiation. *J. Phys.: Condens. Matter*, 22:485402.
- Kiener, J., Tatischeff, V., Deloncle, I., de Sereville, N., Laurent, P., Blondel, C., Chabot, M., Chipaux, R., Coc, A., Dubos, S., Gostojic, A., Goutev, N., Hamadache, C., Hammache, F., Horeau, B., Limousin, O., Ouichaoui, S., Prevot, G., Rodriguez-Gasen, R., and Yavahchova, M.S. 2015. Fast-neutron induced background in $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 798:152-161.
- 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.
- Kumar, A. G., Mazumdar, I., and Gothe, D. A. 2009a. Efficiency calibration and simulation of a LaBr₃(Ce) detector in close-geometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 609:183-186.
- Kumar, A. G., Mazumdar, I., and Gothe, D. A. 2009b. Experimental measurements and GEANT4 simulations for a comparative study of efficiencies of LaBr₃:Ce, NaI(Tl), and BaF₂. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 610:522-529.
- L'Annunziata, M. F. 2016. Radioactivity: Introduction and History, From the Quantum to Quarks (2nd Ed.) Elsevier, 932.
- Lavagno, A., Gervino, G., and Scarfone, A. 2013. Study of linearity and internal background for LaBr₃(Ce) γ -ray scintillation detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 718:504-505.
- Lorusso, G. et al. 2016. Development of the NPL gamma-ray spectrometer NANA for traceable nuclear decay and structure studies. *Applied Radiation and Isotopes*, 109:507-511.
- Lu, Y., Song, Z.-H., Li, G., Tan, X.-J., Zhao, X.-C., and Zhang, K. 2015. Study of neutron radiation effect in LaBr₃ scintillator. *Chinese Physics C*, 39(10):106003.
- NUMEN Grubu. 2019. NUMEN TDR (yayınlanmamış), LNS, Catania.
- Petringa, G. et al. 2019. Radiobiological quantities in proton-therapy: Estimation and validation using Geant4-based Monte Carlo simulations. *Physica Medica-European Journal of Medical Physics*, 58:72-80.
- Reilly, D., Ensslin, N., Smith, H. Jr., and Kreiner, S. 1991. Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials. USNRC, Nuclear Regulatory Commission, No:5428834, US.
- Regan, P. H. et al. 2016. Applications of LaBr₃(Ce) Gamma-ray Spectrometer Arrays for Nuclear Spectroscopy and Radionuclide Assay. Applications of Novel Scintillators

for Research and Industry (ANSRI), Article Number:UNSP 012004, 11-13 May, University College Dublin, Dublin.

Regis, J. -M. et al. 2014. Germanium-gated $\gamma - \gamma$ fast timing of excited states in fission fragments using the EXILL&FATIMA spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 763:210-210.

Rodejohann, W. 2011. Neutrino-less Double Beta Decay and Particle Physics. *International Journal of Modern Physics E*, 20(9):1833-1930.

Rubinstein, R. Y., and Kroese, D. P. 2017. Simulation and the Monte Carlo Method (3rd Ed.). John Wiley & Sons, Inc., US, 432.

Silva, R. C. L., Denyak, V., Schelin, H. R., Hoff, G., Paschuk, S. A., and Setti, J. A. P. 2020. GEANT4 simulation of exit energy in proton medical imaging *Radiation Physics and Chemistry*, 167:108338.

Tsuchiya, H., Koizumi, M., Kitatani, F., and Harada, H. 2019. Performance of large volume LaBr₃ scintillation detector equipped with specially-designed shield for neutron resonance capture analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 932:16-26.

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., Kramer, K., and Güdel, H. U. 2001. High-energy-resolution scintillator: Ce³⁺ activated LaBr₃. *Appl. Phys. Lett.*, 79:1573.

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.

- Vassiliev, O. N. 2017. Monte Carlo Methods for Radiation Transport: Fundamentals and Advanced Topics (Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering) (1st Ed.). Springer, Switzerland, 298.
- Vlachoudis, V. 2009. International Conference on Mathematics, Computational Methods & Reactor Physics (M&C 2009), May 3-7, Saratoga Springs, New York.
- Weisshaar, D., Wallace, M. S., Adrich, P., Bazin, D., Campbell, C. M., Cook, J. M., Ettenauer, S., Gade, A., Glasmacher, T., McDaniel, S., Obertelli, A., Ratkiewicz, A., Rogers, A. M., Siwek, K., and Tornga, S. R. 2008. LaBr₃:Ce scintillators for in-beam gamma-ray spectroscopy with fast beams of rare isotopes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 486:56-60.
- Yang, K., Menge, P. R., and Ouspenski, V. 2016. Enhanced alpha-gamma Discrimination in Co-doped LaBr₃:Ce. *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 63 (1): 416-421, Part 2.

ÖZGEÇMİŞ

AYDIN YILDIRIM
aydinyldrm@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2014 - 2020	Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2011 - 2014	Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi
2002 - 2008	Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Mühendisliği, İstanbul

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi	Akdeniz Üniversitesi
2013 - 2020	Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Antalya

ESERLER:

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Spatafora, A. et al. 2019. Ne-20 +Ge- 76 elastic and inelastic scattering at 306 MeV. *Physical Review C*, 100(3):034620.
- 2- Cappuzzello, F. et al. 2019. The NUMEN Project @ LNS: Status and perspectives. *Nuovo Cimento C-Colloquia and Communications in Physics*, 42(2-3):57.

- 3- Cappuzzello, F. et al. 2018. The NUMEN project: NUClear Matrix Elements for Neutrinoless double beta decay. *European Physical Journal A*, 54(5):72.
- 4- 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.
- 5- Camci, U., Yildirim, A., and Oz, I. B. 2016. New exact solutions of Bianchi I, Bianchi III and Kantowski-Sachs spacetimes in scalar-coupled gravity theories via Noether gauge symmetries. *Astroparticle Physics*, 76:29-37.
- 6- Camci, U., and Yildirim, A. 2015. Noether gauge symmetry classes for pp-wave spacetimes. *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, 12(10):1550120.
- 7- Camci, U., and Yildirim, A. 2014. Lie and Noether symmetries in some classes of pp-wave spacetimes. *Physica Scripta*, 89(8):084003.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Yildirim, A., and Camci, U. 2018. Geodesics of Some pp-Wave Spacetimes in Polar Coordinates. 14th Regional Conference on Mathematical Physics, Nov 09-14, 2015, Islamabad, Pakistan.
- 2- Cavallaro, M. et al. 2018. Measuring nuclear reaction cross sections to extract information on neutrinoless double beta decay, May 15-19, 2017, Italy.
- 3- Carbone, D. et al. 2018. Experimental challenges for the measurement of the Cd-116(Ne-20,O-20)Sn-116 double charge exchange reaction at 15 A MeV, Sep 10-16, 2017, Varna, Bulgaria.
- 4- Carbone, D. et al. 2018. Experimental challenges in the measurement of double charge exchange reactions within the NUMEN project, Jan 08-11, 2018, Cocoyoc, Mexico.
- 5- Cappuzzello, F. et al. 2017. The NUMEN Project @ LNS: Status and Perspectives, May 29 - Jun 02, 2017, Prague, Czech Republic.