T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİJİTAL DARBE İŞLEMLİ BİR NÖTRON DETEKTÖRÜNDE ZAMAN VE UZAYSAL ÇÖZÜNÜRLÜĞÜN İNCELENMESİ

Umut DÜNDAR

Fizik Anabilim Dalı

Nükleer Fizik Programı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Mehtap YALÇINKAYA

Ocak, 2025

İSTANBUL

Bu çalışma 10.01.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Dr. Öğr. Üyesi Mehtap YALÇINKAYA (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Ferhat ÖZOK
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi

20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Kıymetli danışmanım Dr. Mehtap YALÇINKAYA'ya, Dr. Ferhat ÖZOK'a destekleri ve yardımları için, yalnızca çalışmalarımda değil hayatta aldığım kararlarımda da yanımda oldukları için teşekkür ederim.

Değerli ve daimi hocam Prof. Dr. Mustafa Nizamettin ERDURAN her daima desteklerini esirgemediği ve ilham verdiği için saygı ve sevgilerimi arz ederim.

Sevgili ailem, annem, kardeşlerim, teyzeme hayattaki destekleri ve varlıkları için sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2025 Umut DÜNDAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xi**
SUMMARY ..... **xii**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1. NÖTRONLAR 3
2.1.1. Termal Nötronlar 3
2.1.2. Epitermal Nötronlar 3
2.1.3. Yavaş Nötronlar 4
2.1.4. Hızlı Nötronlar 4
2.2. NÖTRON MADDE ETKİLEŞİMLERİ 5
2.2.1. Elastik çarpışma 5
2.2.2. İnelastik Çarpışma ve Yüklü Çekirdek Yayınlanması 5
2.2.3. Radyoaktif Tutulma 6
2.2.4. Spallasyon 7
2.3. ÇOKLU NÖTRON DEDEKTÖR DİZİLERİ 7
2.3.1. Nötron Duvarları, Euroball ve Gammasphere 7
2.3.2. NEDA Tasarımı 8
2.4. SİNTİLASYON MEKANİZMASI 8
2.4.1. Sintilator 9
2.4.2. Nötron-Proton ve Gamma-Elektron Çarpışmaları ve Sintilasyon Süreci 9
2.4.3. Sintilasyonun Algılanması ve Fototüpler 9
2.4.4. Dinod Yapıları ve Darbe Oluşturulması 10

2.4.5. Darbe Genlik Analizi ve Dijital Darbe Prosesi (DDP) 10
2.4.6. Pulse-Shape Discrimination Metodu 11
3. MALZEME VE YÖNTEM 13
3.1. ROOT 13
3.1.1. ROOT Geometri Kitaplığı 13
3.1.2. Uzay Tanımı 13
3.1.3. Materyal Tanımı 14
3.1.4. Şekil Tanımı 14
3.1.5. Hacim Tanımı 14
3.1.6. Konum ve Açısal Yön Tanımı 15
3.2. DEDEKTÖR 15
3.2.1. BC-501A 15
3.2.2. ROOT'da dedektörün tanımı 16
3.2.3. Geometrik Yapı 17
3.2.4. Detektör dizisi (Nötron Duvarı) 18
3.2.5. Model Haritası 21
3.3. NÖTRON TESİR KESİTLERİ KİTAPLIĞI (ENDF) 22
3.4. SİMÜLASYON 23
3.4.1. Monte Carlo Simülasyonu 23
3.4.2. Olay Üreteci 24
3.4.3. İz Sürme (Tracking) 24
3.4.4. Ayıklama (Sorting) 27
3.4.5. Akış Diyagramı 28
3.4.6. Model Haritası 29
3.4.7. Işık Çıkışı 30
4. BULGULAR 31
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 44
KAYNAKLAR 46
EKLER 48
EK 1. Olay Üreteci Örnek Dosyası 48
EK 2. Işık Çıkışı Örnek Dosyası 49
EK 3. Işık Çıkışı Örnek Dosyası (smoothed) 50
ÖZGEÇMİŞ 51

ŞEKİL LİSTESİ

Page No

Şekil 2.1: Elastik saçılma olayının şematik gösterimi. 5

Şekil 2.2: İnelastik saçılma olayının şematik gösterimi. 6

Şekil 2.3: Radyoaktif tutulma olayının şematik gösterimi. 6

Şekil 2.4: Fototüp ve dynode yapılarının şematik gösterimi. 11

Şekil 2.5: Işık şiddetindeki sönümün zamana bağlı grafiği. 12

Şekil 3.1: BC-501A dedektörünün ışın yayınlama grafiği. 16

Şekil 3.2: Bir tek dedektör hücresi. 18

Şekil 3.3: Farklı uzaklık, derinli ve çapta örnek dedektör dizileri. 19

Şekil 3.4: 185 adet konik dedektörlü nötron wall tasarımı. 19

Şekil 3.5: Silindirik dedektörlü nötron wall tasarımı (5"x20 cm). 20

Şekil 3.6: Hexagonal dedektörlü nötron wall tasarımı. 21

Şekil 3.7: Dedektör dizisinin isimlendirme yöntemi. 22

Şekil 3.8: Çeşitli etkileşim ve reaksiyonlarda nötron tesir kesitleri. 23

Şekil 3.9: Olasılık şeması. 25

Şekil 3.10: Çalışmadaki uygulamaların ilişkisel şeması. 27

Şekil 3.11: Olay üretecinin akış diagramı. 28

Şekil 3.12: Dedektörlerin isim ve numaralarını gösteren örnek şema. 29

Şekil 3.13: Gelen nötronun enerjisine karşılık ışık çıkışının grafiği. 30

Şekil 3.14: Işık çıkışının fonksiyonu. 30

Şekil 4.1: Tepki fonksiyonu, 2"x2" dedektör için 31

Şekil 4.2: Tepki fonksiyonu, 2"x2" dedektör için. 31

Şekil 4.3: Tepki fonksiyonu (5"x2" dedektör için). 32

Şekil 4.4: Tepki fonksiyonu (5"x20 cm dedektör için). 32

Şekil 4.5: Tepki fonksiyonu, 2"x2" ve 1,5,10,15,20 MeV enerjilerinde. 33

Şekil 4.6: Tepki fonksiyonu, 5"x20 cm ve 1,2,4,8,16,20 MeV enerjilerinde. 33

Şekil 4.7: Dedektörlerdeki ilk vuruş sayıları. 34

Şekil 4.8: Dedektörlerdeki ilk vuruş hariç tüm çarpışmaların sayıları. 35

Şekil 4.9: Derinliğe bağlı ilk etkileşim sayıları ve enerjiye bağlı ortalama etkileşim derinliği. ... 36

Şekil 4.10: 2" yarıçaplı dedektörlerden oluşan bir dedektör dizisindeki ilk etkileşim oranının derinliğe bağlı değişimi. 37

Şekil 4.11: 2" yarıçaplı dedektörlerden oluşan bir dedektör dizisindeki ilk etkileşim oranının derinliğe bağlı değişimi. 37

Şekil 4.12: Tek nötronlu olaylarda dedektörler arası etkileşim (1, 2, 4 MeV)..... 38

Şekil 4.13: Tek nötronlu olaylarda dedektörler arası etkileşim (8, 16 MeV) 39

Şekil 4.14: İki nötronlu olaylarda dedektörler arası etkileşim (2 ve 4, 8, 16 MeV)..... 40

Şekil 4.15: İki nötronlu 30^o dedektörler arası etkileşim (4 ve 8, 16 MeV) 41

Şekil 4.16: İki nötronlu 30^o dedektörler arası etkileşim (2 ve 4, 8, 16 MeV)) 42

Şekil 4.17: Tek nötronlu olaylarda dedektörler arası etkileşim (2, 4, 8, 16 MeV)) 43

TABLO LİSTESİ

Page No

Tablo 3.1: BC-501A Sintilatör Özellikleri 16

Tablo 3.2: BC-501A Atomik Bileşimi 16

Tablo 3.3: Simülasyonda incelenilen etkileşim ve reaksiyonlar 25

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

$\bar{\nu}_e$	: Antinötrino
e^-	: Elektron
eV	: elektron volt
K	: Kelvin derece
n^0	: Nötron
ns	: nanosaniye
p^+	: Proton
V	: Volt (Elektriksel potansiyel)

Kısaltmalar **Açıklama**

AGATA	: Advanced GAmma Tracking Array
BC-501A	: Saint-Gobain Cyristals Model:501A Sıvı Sintilatör
BGO	: Bizmut Germanat (Bi4Ge3O12)
CSEWG	: The Cross Section Evaluation Working Group
ENDF	: Evaluated Nuclear Data File
FAIR	: Facility for Antiproton and Ion Research
GANIL	: Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
IAEA	: International Atomic Energy Agency
NEA	: Nuclear Energy Agency
NEDA	: NEutron Detector Array
SPIRAL	: Système de Production d'Ions RAdioactifs en Ligne
PAW	: Physics Analysis Workstation
PIAF	: Parallel Interactive Analysis Facility
PM	: Photo Multiplier (Foto Çoğaltıcı)
PSD	: Puls Shape Discrimination
ToF	: Time Of Flight (Uçuş Zamanı)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİJİTAL DARBE İŞLEMLİ BİR NÖTRON DETEKTÖRÜNDE ZAMAN VE UZAYSAL ÇÖZÜNÜRLÜĞÜN İNCELENMESİ

Umut DÜNDAR

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehtap YALÇINKAYA

Bu tezin amacı NEDA (NEutron Detector Array) dedektörü boyutlarında BC-501A sıvı sintilatör hücrelerinden oluşturulmuş dedektör modelinin nötronlarla etkileşimi sonucu oluşacak darbelerin simülasyonu ve analizidir. Program ve alt programlar C/C++ dili ve ROOT framework kullanılarak hazırlandı. Bir yarım küreye sıkışabilir sayıda konik, silindirik ve altıgen dedektör dizileri kullanıldı. Nötronların dedektör ile etkileşimleri Monte Carlo teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dedektörlerdeki nötron olayları izlenerek, okunabilir ham veri dosyası (raw) üzerine, yayınlanan nötron sayısı, dedektör numarası, etkileşim koordinatları, nötron enerjisi, çekirdeğin geri tepmesi ile yayınladığı ışık çıkışı ve uçuş zamanı (TOF) yazıldı.

Tez içerisinde nötron saçılması olayı simüle edildi. Enerjisi 1 MeV'den 20 MeV'e kadar olan nötron etkileşimleri, farklı dedektör şekilleri ve geometrik dizilimlerle incelendi.

Ocak 2025, 63 sayfa.

Anahtar kelimeler: Dedektör modeli, Nötron, Saçılma, ToF, Uçuş Zamanı, NEDA

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF TIMING AND SPATIAL RESOLUTION OF A NEUTRON DETECTOR USING DIGITAL PULSE PROCESSING

Umut DÜNDAR

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor: Asst. Prof. Mehtap YALÇINKAYA

The aim of this thesis is to simulate and analyze the pulses that will be generated as a result of the interaction of neutrons with the detector model formed from BC-501A liquid scintillator cells in NEDA (NEutron Detector Array) detector dimensions. The program and subroutines were prepared using C/C++ language and ROOT framework. Conical, cylindrical and hexagonal detector arrays were used in a number that can be squeezed into a hemisphere. The interaction of neutrons with the detector were simulated using Monte Carlo techniques. The neutron events at the detectors were monitored and the number of neutrons emitted, detector number, interaction coordinates, neutron energy, light output from the recoil of the nucleus and time of flight (TOF) were written on the readable raw data file.

Neutron scattering was simulated in the thesis. Neutron interactions with energies ranging from 1 MeV to 20 MeV were investigated with different detector shapes and geometrical configurations.

Ocak 2025, 63 pages.

Keywords: Detector model, Neutron, Scattering, ToF, Time of Flight, NEDA

1. GİRİŞ

Nötron dedektörleri nükleer yapı çalışmalarının yürütüldüğü araştırma merkezlerinde (EUROBALL (Skeppstedt, 1999), GAMMASPHERE (Lee, 1992)) çok yoğun olarak kullanılmaktadır ve gelecekte devreye girecek olan FAIR 5 (Facility for Antiproton and Ion Research)(Henning, 2005) ve SPIRAL2 (Lewitowicz, 2008) tesislerinde konuşlandırılacak önemli deneysel aygıtların başında yer alacaktır. Ayrıca, bu dedektörlerin günümüzdeki kullanımı, uygulamalı ve temel araştırmaların tümünü kapsayacak kadar geniş bir yelpazededir. Tüm bu önemine rağmen, bu dedektörler ve nötron dedeksiyon tekniklerindeki gelişmeler son derece mütavazi kalmıştır. Daha yakından bakıldığında 40 yıl öncesinde kullanılan dedektör malzemesi, dedeksiyon teknikleri ve elektroniğinin hala kullanıldığı görülmektedir. Bu tez ile Avrupa çapında başlatılan ve nötron dedeksiyonu konusuna yoğunlaşan kapsamlı araştırma ve geliştirme projelerinin bir parçası olarak yapılan çalışmalarımız verilecektir. Özellikle, NEDA (NEutron Detector Array) (Valiente-Dobón, 2019) projesinde yeralan ve tarafımızdan geliştirilen alternatif tasarım üzerinde durulacaktır.

NEDA, germanyum tabanlı gamma dedektörlerinin kurulumuna bağlı bir yan dedektördür. (örn: AGATA (Farnea, 2010)), EXOGAM2 (Azaiez, 2000)) Çeşitli nötron zengin veya nötron zayıf çekirdeklerin nükleer yapı çalışılmalarında kullanılacaktır. NEDA bir ve iki nötron olayı için yüksek verimlilik ve iyi bir nötron-gama ayrımı sunacaktır. Ayrıca uçuş zamanına dayalı olarak nötronların enerjisini ölçmek mümkün olacaktır.

Avrupa SPIRAL2 projesi hazırlık aşaması çerçevesinde, INFN (İtalya), Uppsala Üniversitesi (İsveç), COPIN (Polonya), CNRS (Fransa), Türkiye and İspanya'dan bir grup bilim adamı, dedektörün sintilatör malzemesinin nötronlarla etkileşimi sırasında meydana gelen tüm süreçlerinin GEANT4 koduyla simülasyonunu yaptılar. Bu, dedektörü anlama açısında kritik bir süreçtir.

Buna paralel olarak, iki tip sıvı sintilatör incelendi. NEDA dedektör kümesinin tasarımı bu sintilatörlerdeki ışık üretimini kısıtlamak için kullanılır. Ayrıca dijital cihazların kullanımı, Pulse-Shape (Darbe Biçimi) analiz kodları ve sıvı sinlatör sisteminin çıktısı hakkında bir araştırma devam etmektedir. Son tahlilde NEDA araştırma takımı convansiyonel

foto-çoğaltıcılar yerine fotodiyot kullanımını dikkate almaktadır.

ROOT CERN'de geliştirilmekte olan bir nesne tabanlı framework ve kitaplıktır (Brun & Rademakers, 1997) (ROOT Team, 2024). Fortran diliyle başlayan gelişimi bugün C++ dili ile devam etmekte, Python dilinin popülerlik kazanması sonrasında PyROOT ile Python imlementasyonları bulunmaktadır.

Çalışmada, bir yarım kürelik veya 2π katı açı içine yerleştirilmiş tam simetrik bir dedektör dizisi kullanılmıştır. Dedektör dizisi 5 inç yarıçaplı dedektörlerden kullanılarak bir yarım küre içerisine sığabilecek maksimum sayı elde edecek şekilde hazırlanmıştır. Başlangıçta test için kullanılan silindirik tek bir dedektörden sonra, dedektör dizisi silindirik, konik ve altıgen elemanlardan elemanlardan oluşmaktadır. Konik geometrinin seçimi küresel yüzey üzerindeki her nokta için tam bir simetri sağlamaktadır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. NÖTRONLAR

Nötronlar yüksüz birer nükleer parçacıktırlar. Kütleleri protonun kütlesinden bir miktar daha fazla olan nötronlar ancak çekirdek içerisinde kararlı olarak bulunurlar. m_p= $1.672621777\times10^{-27}$ kg ve m_n= $1.674927351\times10^{-27}$ kg'dır. Çekirdek dışına çıkarıldıklarında ise 10-15 dakika içinde bir beta bozunması yaparak protona dönüşürler.

$$n^0 = p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

Nötronları enerjilerine göre kabaca sınıflandırırsak; (enerjisi 0.025 eV'dan yüksek olanlar)

- Termal : 0.025 eV civarında
- Epitermal : 0.025 eV – 1 eV
- Yavaş : 100 keV'in altında
- Hızlı : 0.1 MeV - 1 MeV

2.1.1. Termal Nötronlar

Termal nötronlar enerjisi 0.025 eV olan serbest nötronlardır. Muhtemel hızları 290 K^0'de 2.2 km/s'dir. Ortamda bir dizi saçılmadan sonra nötronların ısıları yaklaşık olarak bu düzeye ulaşır ve artık soğurulmazlar. Termal nötronlar hızlı nötronlara göre, belirli bir çekirdekte, daha etkili bir nötron tesir kesitine sahiptirler ve bundan dolayı, sıklıkla çekirdek tarafından kolayca absorbe olurlar. Böylece daha ağır ve sıklıkla stabil olmayan izotop elementler üretilmiş olur.

2.1.2. Epitermal Nötronlar

Enerjileri 0.5 ile 10000 eV arasında olan nötronlardır. Epitermal nötronlar yüklü parçacık hızlandırıcıları veya nükleer reaktörlerden sağlanır.

2.1.3. Yavaş Nötronlar

Yavaş nötronlar için önemli etkileşimler, soğrucu çekirdek ve uyarılmış nötron elastik saçılmalarıdır. Yavaş nötronların küçük kinetik enerjisinden dolayı, elastik saçılmada çok küçük bir miktar enerji çekirdeğe transfer edilebilir. Ancak bu etkileşim üzerine yavaş nötron dedektörleri temellendirilemez. Farklı tipte bir etkileşim gerçekleşmediğinde, ısıl denge soğurucu ortamla birlikte sıklıkla yavaş nötronların oluşmasına yol açar. Yavaş nötron enerji aralığında yoğunluğun çoğu, oda sıcaklığında (0.0025 MeV) ısıl nötronlar arasında bulunacaktır.

2.1.4. Hızlı Nötronlar

Hızlı nötronların enerjilerinin ölçümü için en genel metod, nötron ile hafif bir hedefin ($H, {}^{2}H, {}^{4}H, {}^{4}H$) arasındaki elastik çarpışma ardından gerçekleşen geri tepme olayından yararlanmaktır.

Hızlı nötron diye isimlendirilmesinin nedeni, daha düşük enerjili termal nötronlardan ve hızlandırıcılarda üretilen yüksek enerjili nötronlardan ayırt edebilmek içindir. Hızlı nötronlar nükleer fisyon gibi nükleer süreçler tarafından üretilirler.

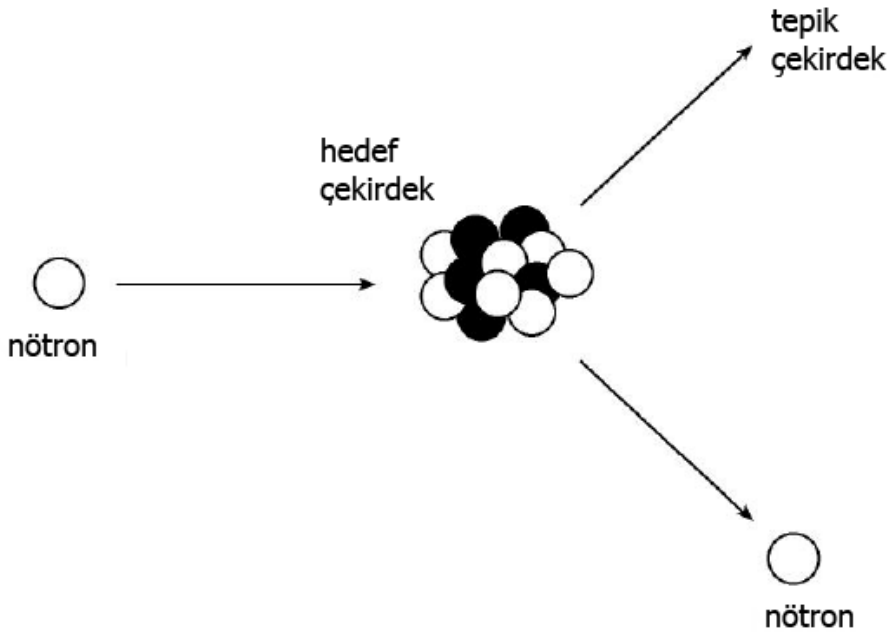
Nötronlarla etkileşimde enerji ve gerçekleşen çarpışmalar ters orantılıdır ve hızlı bir değişim gösterir. Ancak nötron herhangi bir çarpışmada önemli miktarda enerjisini transfer edebildiğinden, saçılmalar da önem arzetmektedir. Bu nötron çarpışmalarından dedekte edilebilir miktarda enerji soğuran çekirdek, geri tepme reaksiyonu ile ikincil ışımalar yapar. Anlaşılacağı üzere nötron her saçılma sonunda enerjisini kaybederek yavaşlar. Yeteri kadar yüksek enerjili bir hızlı nötron hedef çekirdek tarafından soğurulabilir. Bu durumda oluşan birleşik çekirdek, daha düşük enerjili bir nötron salarak, çarpışmadan önceki çekirdeğin uyarılmış seviyelerinden birine yerleşir. Ardından temel seviyeye dönebilmek için, bir veya birkaç gama yayınlar.

2.2. NÖTRON MADDE ETKİLEŞİMLERİ

Yüksüz parçacıklar olan nötronlar yük taşımadıklarından dolayı Coulomb engeline maruz kalmadan çekirdekle etkileşirler. Bu etkileşimde yalnızca çekirdek kuvvetleri etkindir. Buradan da anlaşılacağı üzere nötronların tesir kesiti diğer yüklü parçacıklara göre daha yüksektir.

2.2.1. Elastik çarpışma

(n,n) şeklindeki reaksiyonlardır. Böyle bir çarpışmada toplam enerji ve momentum korunmaktadır. Gelen nötron hedefteki çekirdekle çarpışır, enerjisinin bir kısmını hedef çekirdeğe aktardıktan sonra doğrultusunu değiştirerek saçılır. Esnek bir çarpışmada hedef çekirdek uyarılmaz.

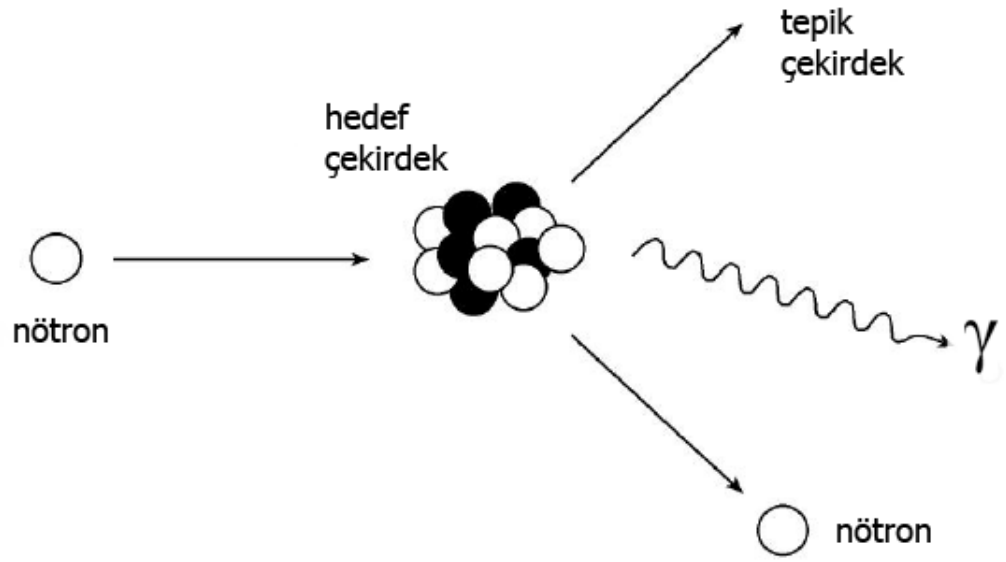


Şekil 2.1: Elastik saçılma olayının şematik gösterimi.

2.2.2. İnelastik Çarpışma ve Yüklü Çekirdek Yayınlanması

(n, nγ) şeklindeki reaksiyonlardır. Çarpışma sırasında çok kısa bir süreliğine birleşik çekirdek oluşur. (10^{-12} – 10^{-20} s) Bu çarpışmada gelen nötron enerjisinin bir kısmını hedef çekirdeğe aktardığı gibi, aynı zamanda çekirdeğin uyarılmasına da neden olur. Uyarılmış çekirdek ışınım yaparak temel seviyesine döner. İnelastik saçılmalar hızlı nötronların reaksiyonlarında gözlemlenebilir. Çekirdek içinden yüklü bir çekirdek yayınlanması da

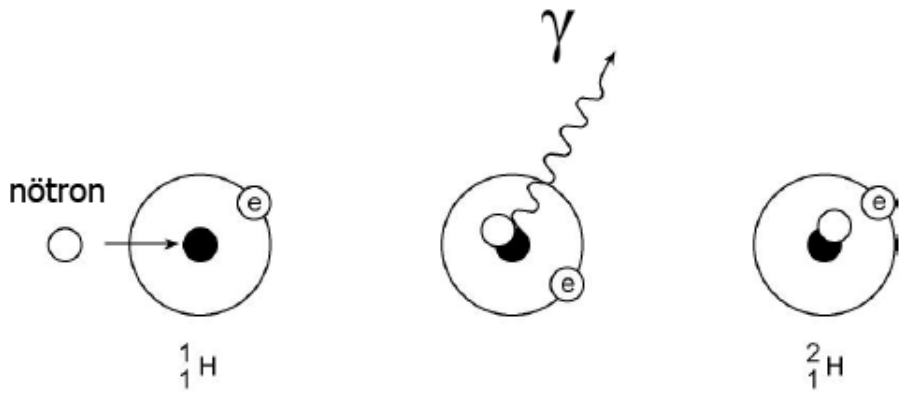
((n,α), (n,d), (n,t) reaksiyonları gibi) olasıdır.



Şekil 2.2: İnelastik saçılma olayının şematik gösterimi.

2.2.3. Radyoaktif Tutulma

(n,γ) şekilindeki reaksiyonlardır. Gelen nötron hedef çekirdek tarafından yutulur ve böylece hedef çekirdeğin bir izotopu oluşmuş olur. Yeni hedef çekirdek uyarılmış olduğundan ışıma yaparak temel seviyesine döner. Ancak inelastik saçılmadan farklı olarak yeni çekirdeği kararsız olması mümkündür. Bu durumda yeni bir radyoaktif reaksiyonla kararlı hale gelir.



Şekil 2.3: Radyoaktif tutulma olayının şematik gösterimi.

2.2.4. Spallasyon

Genellikle 500 MeV'den yüksek enerjili protonlarla bombardıman edilen metal hedefde gerçekleşen reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucunda nötron, proton ve hafif çekirdekler çıkar. Çıkan nükleonlar yüksek enerjilidirler ve çevre çekirdeklerle etkileşirler. Hem bombardıman hem de nükleon etkileşmeleriyle bazı hedef çekirdeklerde buharlaşma olur ve yeni nükleonların atıldığı görülür. Üretilen birincil nötronların enerjileri 20 MeV altındadır. Böyle bir reaksiyonda üretilen nötron sayısı proton demetinin enerjisine bağlıdır.

2.3. ÇOKLU NÖTRON DEDEKTÖR DİZİLERİ

2.3.1. Nötron Duvarları, Euroball ve Gammasphere

Zaman içinde geliştirilmesi planlanan dedektör tiplerine göre üç aşamalı olarak tasarlanmış olan bu sistem İngiltere ile Fransa arasındaki bilimsel işbirliği gereğince 1993 yılında Daresbury Laboratuvarında (Eurogam I) saf Germanyum dedektörleri kullanılarak hizmet vermiştir.

Enerji çözünürlüğü iyileştirilmiş Clover dedektörlerinin geliştirilmesiyle yine bu iki ülke arasındaki anlaşma gereği tüm dedektör topluluğu Fransa Strassburg'daki CNRS Laboratuvarına (Eurogam II) taşınmıştır. Eurogam II 1994-1997 yılları arasında kullanılıp, yapısında 24 adet Clover ve 30 adet Germanyum dedektörü bulunduruyordu.

İzleyen yıllarda başka avrupa ülkelerinin de katılımıyla İtalya Legnaro'da daha fazla enerji çözünürlüğü sunan ve 4π geometrili dedektör topluluğu olan Euroball III kuruldu. Bünyesinde 900 açıda 26 Clover, ön ve arkasında ise 15 cluster ve 30 Germanyum dedektörü bulunuyordu.

Dedektör grubu Euroball IV adıyla Fransa Strasbourg'a getirildiğinde tüm yapıyla beraber BGO (Bismuth germanate) dedektör tipi de dahil dilerek 2002'ye kadar hizmet vermiştir. Euroball dedektör topluluğu projesiyle farklı tipte dedektörler geliştirilmiş ve gözlem limitleri yüksek seviyelere taşınmıştır.

Gammasphere 1993 yılında California Berkeley Üniversitesinde Lawrance Berkeley Nükleer

Araştırma laboratuvarında kurulmuş ve 1997 yılına kadar burada hizmet vermiştir. Yapısında etrafı bizmut germanyum sintilatorü ile çevrili 110 tane büyük saf germanyum dedektörü kullanmıştır. Egzotik çekirdek üretilmesi ve yapıları ve nadir çekirdeklerin yapıları başta olmak üzere çokça araştımaların yapılmasına yüksek verimlilik ve çözünürlüğüyle katkı sağlamıştır.

1997 yılında Argonne Laboratuvarına taşınmış ve beraberinde kullanılan bir kütle analizörü kullanılarak kararlılık vadisinden uzak çekirdeklerin varlığı ve yapıları araştırılmıştır. Farklı yardımcı dedektörler kullanılarak çeşitli nükleer fizik araştırmalarının yapılması sağlanmıştır. Kullanılan yardımcı dedektörler sırasıyla, yüklü parçacık tayini için (^{1,2,3}H ve ^{3,4}He) microball, nükleer yarı ömrü pikosaniye mertebesinde ölçebilen plunger, nötron dedektörleri, silikon strip dedektörler ve x-ışını dedektörleridir. (Skeppstedt, 1999; Ertürk, Boztosun, 2004)

2.3.2. NEDA Tasarımı

NEDA bir çoklu dedektör sistemidir. Tasarımında sıvı organik sintilatör kullanılmıştır. Planlanan yapı AGATA benzeri eşkenar beşgen merkez etrafında kümelenen ön yüzü altıgen dedektörlerin bulunması şeklindeyken, daha sonraki çalışmalarda farklı geometriler denenmiştir. Sonuç çalışmasında ise altıgen dedektör dizilerinden oluşan dik eksenlerdeki birleşik bir yapı tercih edilmiştir. (Skeppstedt, 1999)

2.4. SİNTİLASYON MEKANİZMASI

Sintilasyon dedektörleri iki ana kısımdan oluşurlar. Birinci kısımda sintilatör madde olarak organik/inorganik bir kristal bulunur. Bu kristal kaynaktan gelen radyasyonu durdurur ve daha sonra aktarılan enerjiyi görünür ışık olarak yayarak sintilasyon sürecini başlatır. İkinci kısımda ise sintilatörden gelen ışıklarla elektron koparılmasını sağlayıp, daha sonra bunları çoğaltarak elektrik sinyallerine dönüştüren bir fotoçoğaltıcı tüp bulunur. Sintilatör kristalin ve fotoçoğaltıcı tüpün birbirlerine bağlı oldukları yüzey hariç diğer kısımları optik olarak yalıtılmıştır.

Bir dedektörde parçacıkları yeteri kadar elektronik pul oluşturabilmesi için, yüksek elektrik alana dayanabilecek dedektör materyaline ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda

bu materyalden gelen ışınım ile kolayca ve fazla miktarda elektron kopabilmelidir. Ancak problem şu ki, elektrik alana dayanıklı bir materyalin yalıtkan olması gerekirken, kolayca iyonlaşan materyal bir metaldir. Burada ortaya çıkan çelişki bir sintilasyon mekanizması ile çözülebilir.

2.4.1. Sintilator

Enerji soğurduktan sonra görünür ve görünür bölge civarında ışınım yapan maddelere lüminosans maddeler denir. Böyle bir olayda uyarıcı etki, ışınlama, mekanik zor, ısı ve ya bir kimyasal reaksiyonla olabilir. Etkileşmeden yayınlanan ışık, 10-8 içinde gerçekleşiyorsa, ışıma floresansdır. Bundan daha uzun süren ışıma için fosforesans denir.

Bir lüminosans madde olan sintilatör üzerine bir parçacık, x-ışını veya gama ışını çarptığında bir parıltı meydana gelir. Bu parıltılar elektrik pulslarına dönüştürülerek sayılabilir.

Bir yüzü fototüp ile optik bağlantı için saydam olan sintilatörün geri kalan tüp yüzeyi alüminyum levha ile kaplıdır. Bu levhanın iç yüzü daha iyi bir verim için optik yansıtıcı ile kaplanmıştır. Bir foton veya bir parçacığın neden olduğu ilk iyonlaşma ile ortaya çıkan serbest elektronların yeniden bağlanması sırasında görünür bölgede değişik dalga boylarında ışıklar yayınlanır.

2.4.2. Nötron-Proton ve Gamma-Elektron Çarpışmaları ve Sintilasyon Süreci

Bir yüklü parçacık veya fotonun sebep olduğu ilk iyonlaştırmadan dolayı kristalin içerisinde serbest elektronlar meydana gelir. Nötronlar ise yüksüz olduklarından elektronlarla etkileşmezler. Ancak protonlarla olan etkileşimlerinde bir serbest elektron meydana gelir. Bu elektronların, kristalin atom ve moleküllerine bağlanması ile görünür bölgede değişik dalga boylarında ışık yayınlanır. Sintilatör olarak kullanılan kristalden yayınlanan ve iç yüzeyi optik yansıtıcı olan sintilatör kabının iç yüzeyinden yansıyan bu ışınlar fotoçoğaltıcı tüpün fotokatodu üzerine düşerler.

2.4.3. Sintilasyonun Algılanması ve Fototüpler

Fotokatodun yüzeyi kolayca elektron koparılabilecek bir alaşımdan imal edilmiştir. Bu nedenle buraya gelen ışınlar elektron yayınlanmasına neden olurlar. Dedektörün sintilatörü

yoluyla oluşan ışık, fototüpte elektrik sinyaline dönüştürülür ve böylece ölçümleme yapılabilir. Bu sürecin ayrıntıları için dinod yapılarını inceleyelim.

2.4.4. Dinod Yapıları ve Darbe Oluşturulması

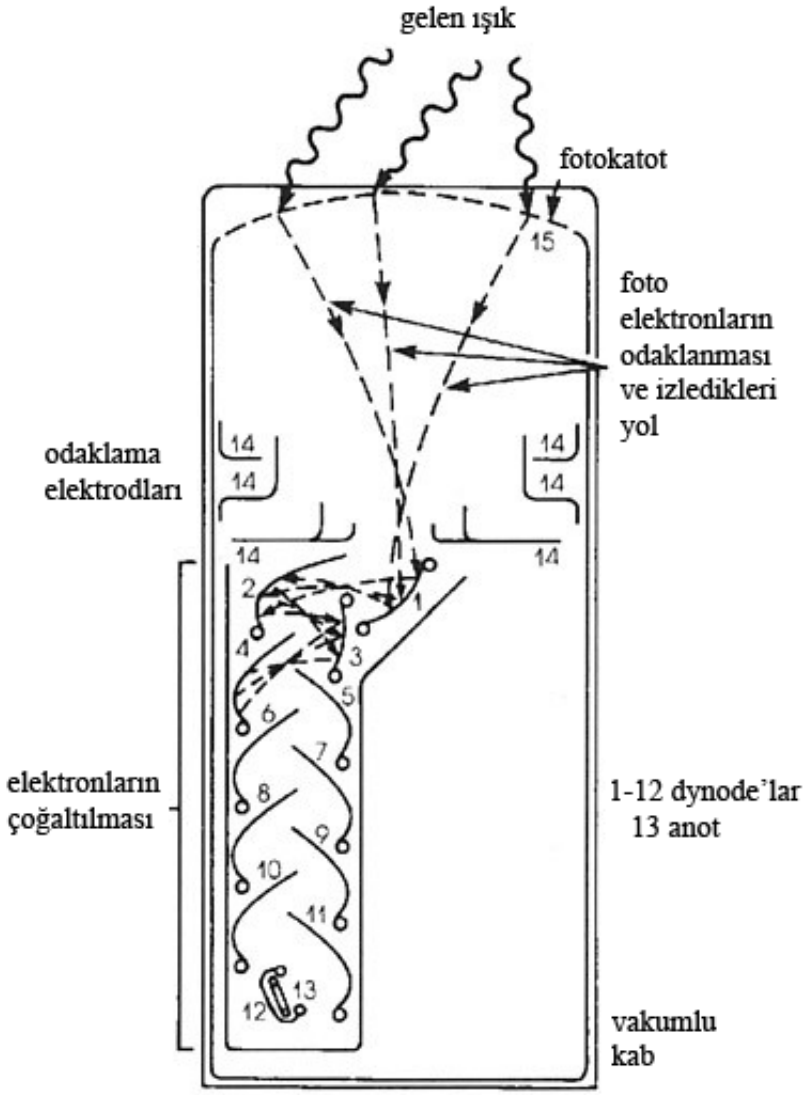
Bir fotoçoğaltıcı tüp gelen ışığın elektron kopardığı bir fotokatot ve bu elektronları sinyal oluşturabilir seviyede çoğaltılmasını sağlayan dinodlardan oluşur. Her dynode kendinden bir öncekinden daha yüksek bir elektriksel potansiyele sahiptir. İzleyen dinodlar arasındaki potansiyel farkı yaklaşık 100 V seviyesindedir. Bu elektronları dinodlara 100eV'luk bir enerjiyle çarpmasına neden olur. Dinodlar ikincil elektronların koparılmasına kolayca müsaade eden bir maddeden imal edilmişlerdir. İkinci bir elektronu koparmak için gerekli enerji yaklaşık 2-3 eV kadardır. Bu her dinodda elektron başına yaklaşık 40 kat bir çoğaltmayı sağlar. Ancak elektronların saçılması izotropik olduğundan, madde içine olan yayılmalar herhangi bir kazanca neden olmayıp, yalnız dynode yüzeyine doğru yayınlanmış elektronlar bu süreçte aktif olacaklardır. İşte bu dynode yüzeyinden yayınlanan elektronların kazancı ortalama elektron başına 5 kat civarındadır. Aşağıda bir fototüp ve dynode yapısı gösterilmektedir.

Fototüpteki oluşan bu yük pulsları bir ön yükselticide voltaj pulslarına dönüştürülürler. Burada oluşan milivolt mertebesindeki bu pulslar bir yükseltici yardımıyla volt mertebesine yükseltilirler.

Gelen ışık şiddetiyle oluşan elektron sayısı ve daha sonra foto çoğaltıcıda çoğaltılan elektronların sayısı arasında lineer bir orantı vardır. Doğru bir ölçüm için her aşamada lineerlik aranmaktadır. Dolayısıyla yükselticinin de lineer bir yükselme için son derece kararlı olması gerekmektedir.

2.4.5. Darbe Genlik Analizi ve Dijital Darbe Prosesi (DDP)

Nötronlar sintilatör madde ile etkiştiklerinde ışıma yaparlar. Bu ışma fototüp aracılığı ile eletron salınımı oluşur. Bu zayıf akım güçlendirilerek diğer donanımların da yardımıyla elektrik sinyaline dönüştürülür. Bu sinyalin genliği etkileşime giren nötronun enerjisi ile orantılıdır. Ölçümler öncesinde kalibrasyon işlemleri yapmak gerekmektedir. Kalibrasyon işleminde, değerleri iyi bilinen bir kaynak ile okunan pik değerleri arasında anlamlı bir ilişki kurulmalıdır. Bu farklı kaynaklarda da enerjiye bağlı doğru değerlerin elde edilmesini



Şekil 2.4: Fototüp ve dynode yapılarının şematik gösterimi.

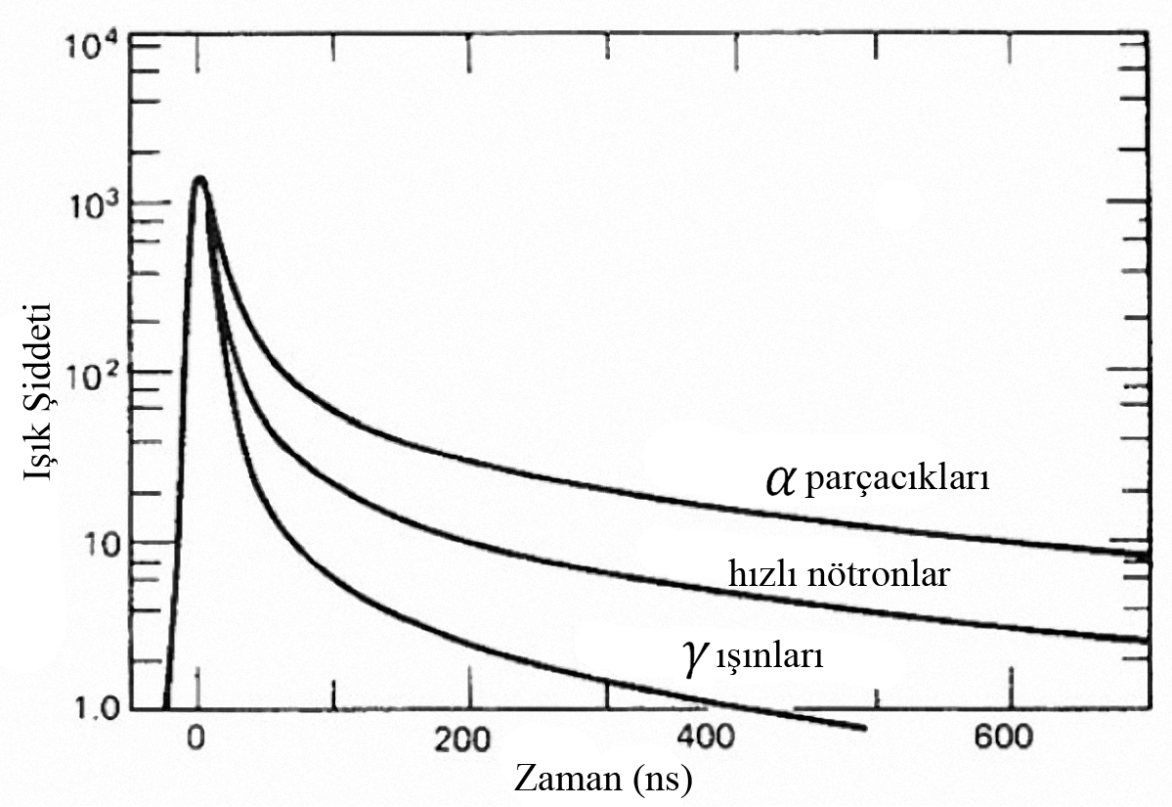
sağlayacaktır. Fototüpde analog olarak elde edilen sinyaller dijital-analog dönüştürücüler ile dijitalleştirilir. Bu darbeler kaynak maddenin özelliklerini belirlemek üzere kullanılır.

2.4.6. Pulse-Shape Discrimination Metodu

Bir organik sintilatörde gelen ışığı baskın olan bileşeni (major) nanosaniye mertebesinde sönüme uğrar. Bu özellik organik sintilatörün yüksek sayım oranlarında çalışabilmesini sağlar. Işığın zayıf bileşeni 102 ns mertebesindedir ve buna gecikmiş ışıma (delayed fluorescence) denir. Toplam ışık çıkışı bu iki bileşenin toplamıdır.

Ağır parçacık reaksiyonları yüksek iyonlaştırma oranlarına sahip olduğundan, oluşturduğu

ışıma nispeten daha gecikmiş bir ışımadır. Farklı parçacıklar aynı enerjide aynı ışık şiddetini üretmelerine rağmen, sönüm süresi adeta parçacığı temsil eder. Parçacığın kütlesi arttıkça sönüm süresinin uzadığı görülür. (Miller, 2007)



Şekil 2.5: Işık şiddetindeki sönümün zamana bağlı grafiği.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. ROOT

1990'lı yılların ortalarına gelindiğinde, René Brun ve Fons Rademakers'ın etkileşimli araçlar ve simülasyon paketleri gelişmekte olan uzun yıllardır deneyimli bulunuyorlardı. PAW (Physics Analysis Workstation) (Bock, 1987) (Brun, 1988) (Johnstad, 1989), PIAF (Parallel Interactive Analysis Facility) (Rademakers, 2004) ve GEANT (GEANT4 Collaboration, 2003 2006 2015) öncü ve başarılı projeler vardı ve yaklaşık yirmi yaşındaki Fortran kütüphanelerinin kendi sınırlarına ulaştığı biliyordu. Hala çok popüler olmasına rağmen, artık teknolojik olarak bazı yetersizlikleri de beraberinde getiriyorlardı. Bununla birlikte güncel geliştirme platformlarının sağladığı bellek yönetimi araçları ve nesne yönelimli mimariden de (C++ dışında) yoksundular. ROOT CERN'de geliştirilmekte olan bir nesne tabanlı framework ve kitaplıktır. Fortran diliyle başlayan gelişimi bugün C++ dili ile devam etmektedir. Python dilindeki PyROOT çalışmalarıda bulunmaktadır.

3.1.1. ROOT Geometri Kitaplığı

ROOT geometri kitaplığı en yalın haliyle, bir cisim, bu cisme ait bir materyal ve böylece uzay içerinde bir katıyı tanımlamayı sağlar. Paket içerisinde ön tanımlı bulunan cisimler kadar, bu cisimleri beraber kullanarak birleştirme ve fark alma yoluyla yeni cisimler üretmek de mümkündür. Bu cisimler tanımladığımız herhangi bir öteleme veya döndürme vektörüyle yeni açısal durum ve konumuna taşınabilir.

3.1.2. Uzay Tanımı

Cisimler tanımlanmadan önce bir uzay tanımlanmalıdır. Öncelikle bir sınıf "sınıf" tanımlanmalıdır. ROOT'un geometrik yapı ve etkileşimlerle ilgili görevleri yerine getirmesi için çalışılacak uzayın/kümenin sınırları belirlenmelidir.

```
TGeoVolume*top=gGeoManager->MakeBox("NEDA-VOL",Vacuum, 250, 250, 250);
```

Yukarıda kartezyen koordinat sisteminde x. y ve z doğrultularında 250 cm uzunluklara sahip "Vacuum" materyalinden oluşan dikdörtgenler prizması şeklinde bir hacim tanımlanmıştır. Önceden tanımlanmış materyal ortamları kullanmak da mümkündür.

3.1.3. Materyal Tanımı

Üretetilecek olan her hacim bir materyalden oluşmak zorundadır. Materyaller, atom ağırlığı, atom numarası ve yoğunluğu parametre olarak verilerek tanımlanır.

TGeoMaterial *matAl= new TGeoMaterial("Al", 26.98, 13.0, 2.700);

Tıpkı birleşik cisimlerin üretilebildiği gibi birleşik materyaller de üretmek mümkündür. Burada parametreler atom ağırlığı, atom numarası ve oranca yoğunluktur.

3.1.4. Şekil Tanımı

ROOT geometri paketi içerisinde hazır tanımlı dikdörtgenler prizması, tek, iki ve üç eksenli değişen üç çeşit trapezoid, yamuk prizma, tüp, eliptik tüp, hiperbolik tüp ve silindir, koni ve koni parçası, küre, küre parçası, toroid, paraboid gibi çok sayıda şekil bulunmakla beraber, çok yüzeyli poligon gibi karmaşık şekillerinde tanınmasına izin verir. Ancak daha da önemli olan cisimlerin birleşme, kesişme ve çıkarma işlemleri kullanılarak kompozit cizimlerin elde edilebilmesidir.

Aşağıda "DET" isimli bir konik tanımlanmıştır. RADIUS1 cisim herhangi bir konum vektörü uygulanmadan önce uzayda (0,0,0) noktasına yakın olan taraftır.

TGeoCone *hacim adı= new TGeoCone("şekil adı", Z, 0, RADIUS1,0,RADIUS2);

ROOT'da geometrik şekillerle ilgili olarak, herhangi bir koordinatın şekil içinde olup olmadığının sorgulamasını, şekle olan uzaklığını ve doğrultman cosinüsünü hesaplatmak mümkündür.

3.1.5. Hacim Tanımı

ROOT geometrisi içerisinde üretilecek katı nesneler için bir hacim tanımlı olmak zorundadır. Ancak tanımlanmış bir hacim geometri içesinde tekrar tekrar kullanılabilir. Hacimler bir

konum vektörü ile konumlandırıldıklarında birer katı nesne olarak tanımlanabilirler. Her bir hacim farklı bir isme sahip olmalıdır.

*TGeoVolume *DET= new TGeoVolume("DETECTOR", MODULE_DET, XTAL);*

3.1.6. Konum ve Açısal Yön Tanımı

Bir cismi öelemek için ötelemek vektöründen yaralanılabilir. X, Y ve Z kartezyen koordinat sisteminde olmak üzere VEC vektörü şöyle tanımlanır.

TVector3 VEC(X, Y, Z);

Bir cismi X, Y ve Z ekseni etrafında döndürmek için;

*TGeoRotation *ROT= new TGeoRotation(); ROT->RotateX(X); ROT->RotateY(Y); ROT->RotateZ(Z);*

Rotasyonu uygulanır. Ve nihayet cismi yukarıdaki belirlenen vektör kadar ötelemek ve rotasyon kadar döndürmek için;

*TGeoCombiTrans *TRS= new TGeoCombiTrans(VEC.X(),VEC.Y(),VEC.Z(),ROT); TRS->RegisterYourself();*

3.2. DEDEKTÖR

3.2.1. BC-501A

BC-501A, Saint-Gobain Cyristals (Katz, 1972) tarafından üretimi yapılan organik moleküllü bir sıvı sintilatördür. Nötron-gama ayrımında Puls Shape Discrimination (PSD) özellikleri çok iyi olduğundan, çok yaygın kullanım alanı bulmuştur. Aşağıdaki tablolarda bu sintilatörün temel karakteristikleri verilmiştir. Bakınız (BC-501A Specifications)

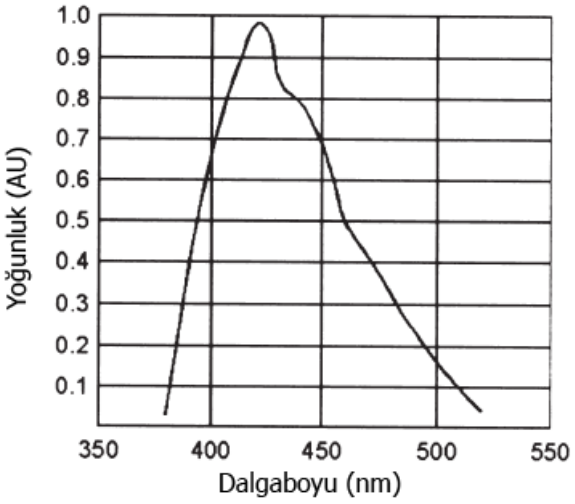
BC-501A dedektörü en yüksek verimi 400-450 nm dalgaboyu aralığında vermektedir.

Tablo 3.1: BC-501A Sintilatör Özellikleri

Light Output, $\%Antrasen(C_{14}H_{10})$	78
Maksimum ışınım dalgaboyu, (nm)	425
Bozunum zamanı (ns)	3.2

Tablo 3.2: BC-501A Atomik Bileşimi

cm^3'deki H atomu sayısı	$5,25 \times 10^{22}$
cm^3'deki C atomu sayısı	$4,08 \times 10^{22}$
H/C oranı	1,287
cm^3'deki e^- sayısı	$2,97 \times 10^{23}$



Şekil 3.1: BC-501A dedektörünün ışın yayınlama grafiği.

3.2.2. ROOT'da dedektörün tanımı

Simülasyon içerisinde bir organik sintilatör olan BC-501A dedektörünün ROOT modeli kullanılmıştır. Bunun için ilk önce bir matScint adında bir materyal tanımlanmış ardından bu materyali oluşturan elementler tanımlanmıştır. Dedektörler alüminyum muhafaza ile kaplıdırlar. Dedektörlerin bulunduğu ortam ise vakumdan oluşmaktadır.

*TGeoMixture *matScint= new TGeoMixture ("Scint", 2, 0.901)*
matScint->DefineElement(0, 1.00794, 1,0.00943313);
*matScint->DefineElement(1,12.01070, 6,0.90566900); TGeoMaterial *matVacuum= new*

*TGeoMaterial("Vacuum", 0, 0, 0); TGeoMaterial *matAl= new TGeoMaterial("Al", 26.98,13.0,2.700);*

Dedektörü oluşturacak olan ortamın tanımı matScint materyalinden oluşacak şekilde tanımlanmıştır. Aynı şekilde dedektör dış muhafazası ve boşluk tanımlanmıştır.

*TGeoMedium *XTAL= new TGeoMedium("DetMat", 3, matScint) TGeoMedium *Vacuum= new TGeoMedium("Vacuum", 0, matVacuum) TGeoMedium *ALCOVER= new TGeoMedium("CANMat", 2, matAl)*

3.2.3. Geometrik Yapı

Bir tek dedektörün geometrik yapısı bir kesik konidir. Arka yüzü foto çoğaltıcı tüpe uygun olarak 5 inç (12.7 cm) çaplı ön yüzü ise kaynağa olan uzaklık ve dedektör derinliğe bağlı bir parametre ile belirlenmiştir. 1 mm kalınlıklı alüminyum kap ile kaplı olan her bir hücre 20 cm derinliğe sahiptir. Bununla birlikte bu tez çalışmasında geliştirilen dedektör yapılandırma metoduyla 2π'lik uzaysal açıda farklı boyutlardaki dedektörler için nötron dizinlerini kolayca ve otomatik olarak oluşturmak mümkün olmaktadır. Konik tanımında TGeoCone'a ait parametreler sırasıyla "isim", yarı derinlik, -z yönündeki iç yarıçap, -z yönündeki dış yarıçap, +z yönündeki iç yarıçap, +z yönündeki dış yarıçap şeklindedir.

*TGeoCone *MODULE_DET= new TGeoCone("DET", derinlik, 0, yarıçap ,0, yarıçap)*

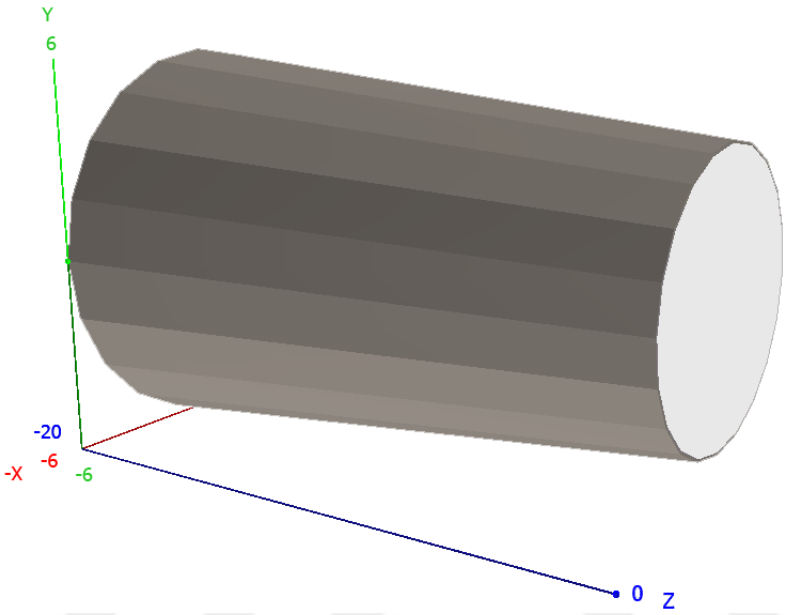
Kaynak koordinat sisteminin 0 noktasına konulup, dedektörler ise –z yönünde dizildiklerinden arka yüzün yarıçapı radius1 sabit olarak tanımlanmış, ve ön yüzün yarıçapı olan radius2 ise parametrik olarak;

radius2= kaynağa olan uzaklık x ön yüz yarıçapı / (kaynağa olan uzaklık)

hesaplanmıştır. Artık MODULE_DET olarak isimlendirdiğimiz cismi bir hacim olarak yerleştirmek mümkün.

*TGeoVolume *DET= new TGeoVolume(DETECTOR,MODULE_DET,XTAL) TGeoVolume *CAN= new TGeoVolume(AL_CAN,MODULE_CAN,ALCOVER)*
top->AddNode(DET,1,TRS)

Böylece cisim geometrik yapıya dahil olmaktadır.



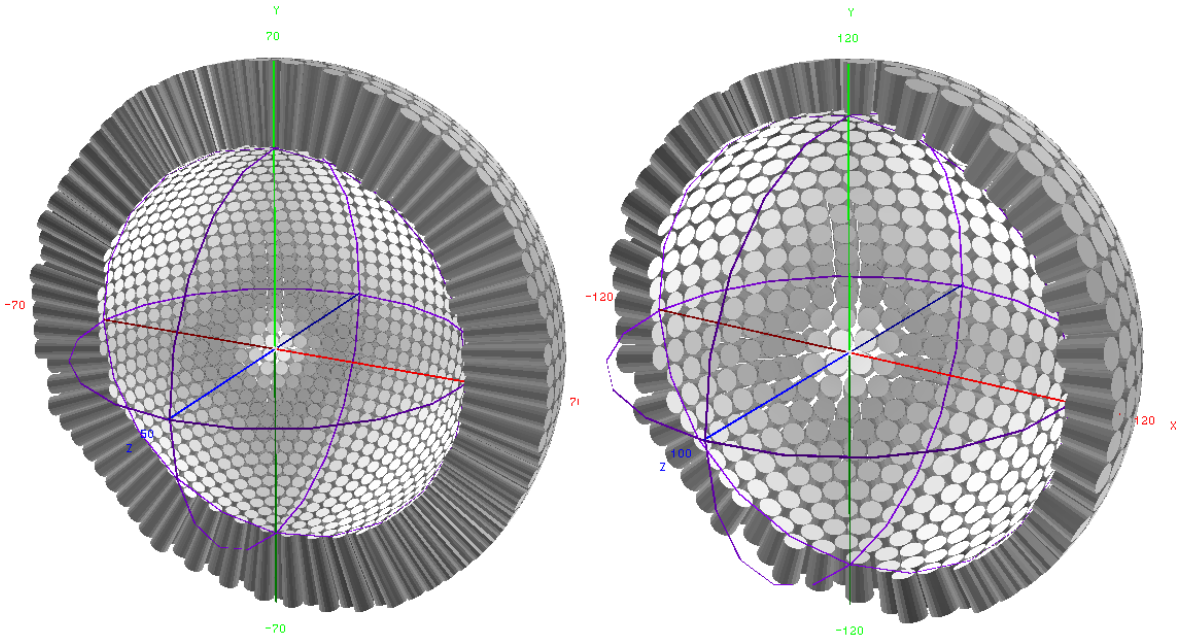
Şekil 3.2: Bir tek dedektör hücresi.

3.2.4. Detektör dizisi (Nötron Duvarı)

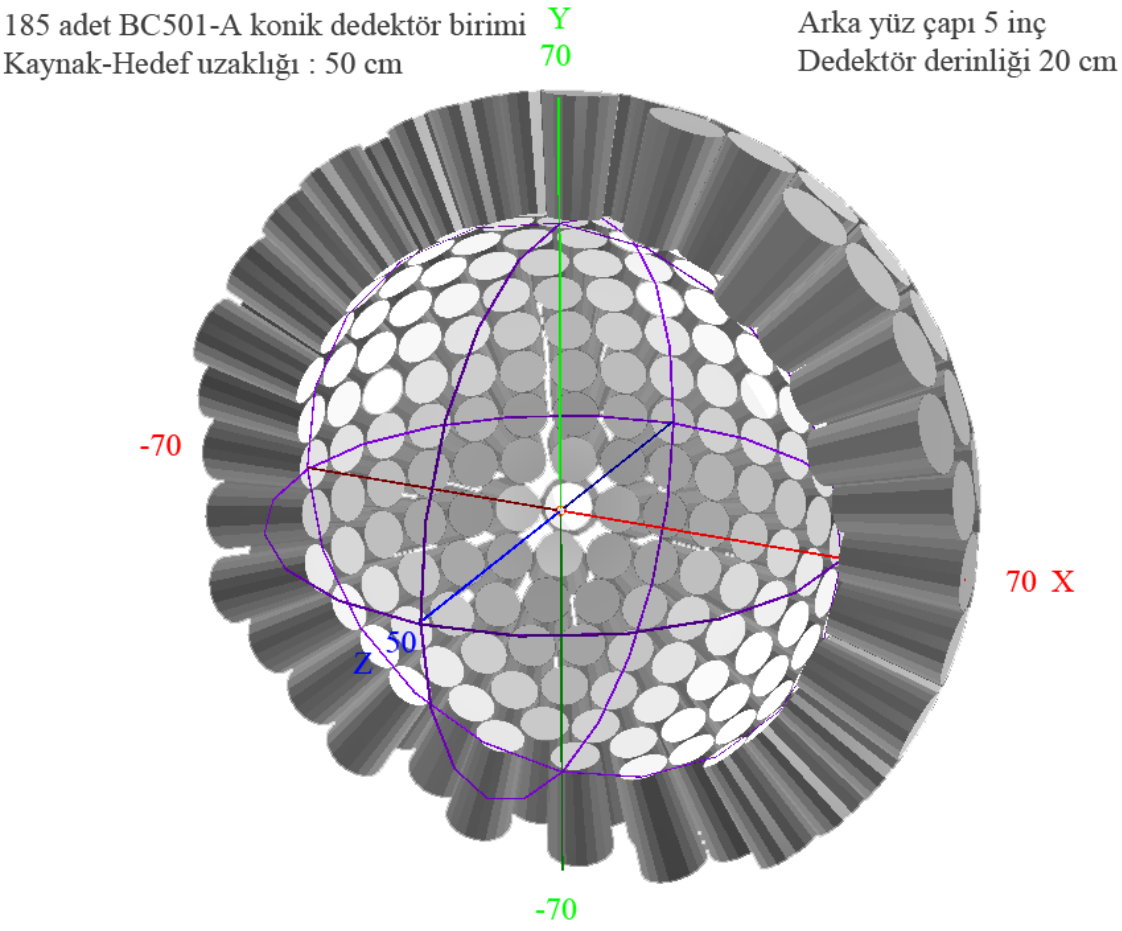
Dedektör dizisini hazırlarken temel düşüncemiz, bir yarım küre içinde maksimum sayıda fakat parametrik olarak kendi geometrisini yeniden üretebilecek bir kod yazmaktı. Bundan dolayı silindir veya koni seçimi uygun bir seçim olacaktı. Ancak silindir bir uzay açı içinde daha az bir hacmi tutacağı için konilerden oluşan bir model hazırlanmıştır.

Aşağıdaki örnekte sol tarafta 50cm kaynak uzaklığında 20 cm derinlikli 2"çaplı 1081 adet dedektör, sağ tarafta ise 100 cm kaynak uzaklığında 10cm derinlikli 5"çaplı 541 adet dedektör bulunmaktadır.

Dedektör dizisi tasarlayıcı yazılım, kaynağa olan uzaklık ve dedektör ön yüzünün çapı ile parametrize olmuştur. Bu parametrelerle maksimum sayıda dedektörün 2π siteradyanlık uzay açı içinde dizilimi gerçekleşmektedir. Dizilimde yarım küre paralellere bölünmüş ve paralelde bir dedektör boyu farkla yerleşim yapılmıştır. Her bir paralelde dedektör sayısı yeniden hesaplanarak uygun dedektör sayısı bulunmuştur.



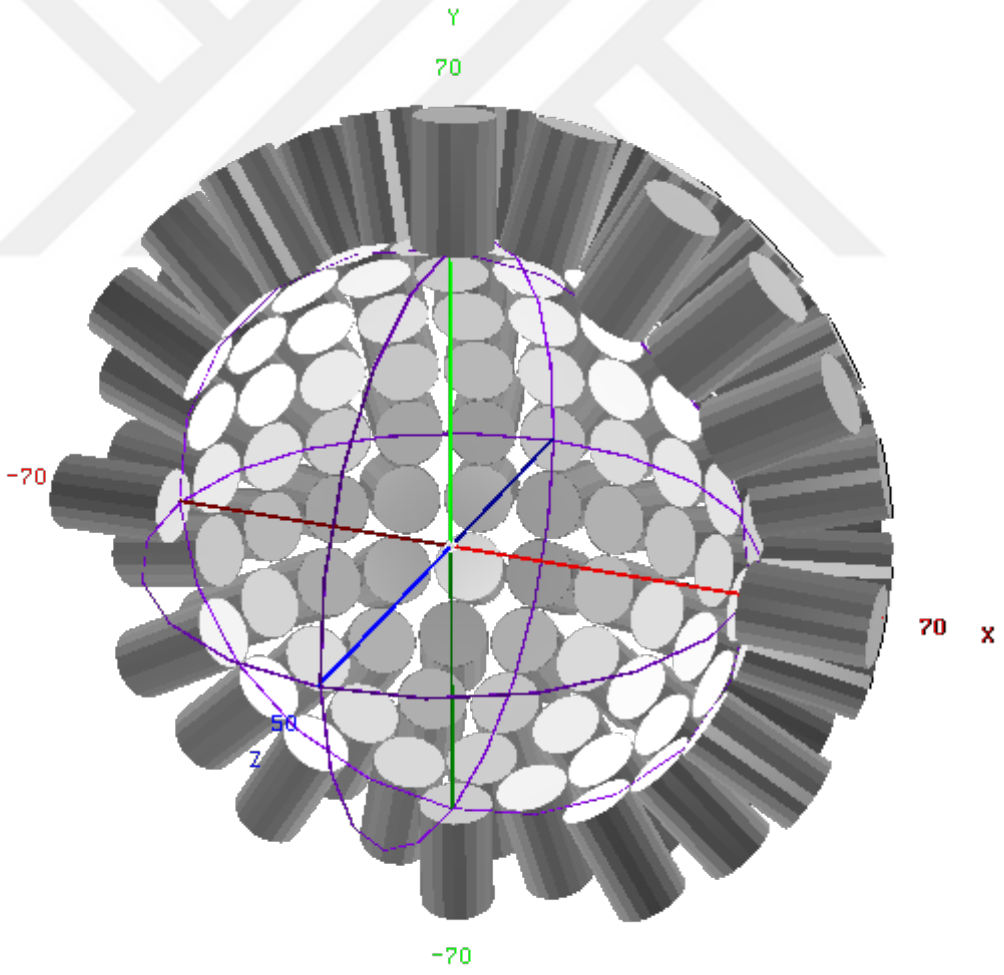
Şekil 3.3: Farklı uzaklık, derinli ve çapta örnek dedektör dizileri.



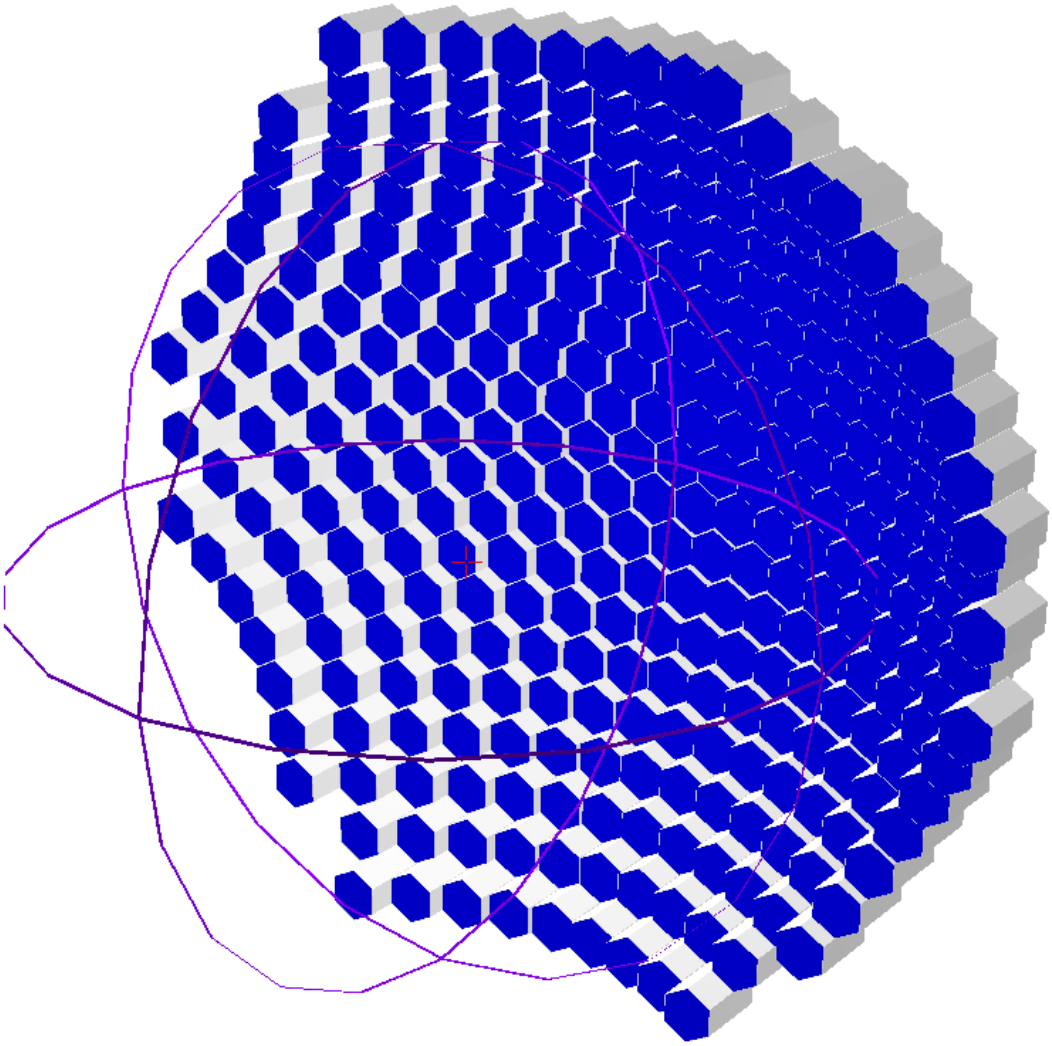
Şekil 3.4: 185 adet konik dedektörlü nötron wall tasarımı.

Bu dizilimi gerçekleştirebilmek için küre yüzeyi üzerindeki en geniş yay sıfırıncı halka kabul edilir. Daha sonra dedektörün ön yüz çapı kadar yukarı ve aşağı doğru diğer halkaların konumları hesaplanır. Bu konumlara yarıçap vektörünün rotasyonu ile diğer dedektörler yerleştirilir. Rotasyon açısı ise dedektörün kaynağa olan uzaklık ile dedektör çapı oranının tanjantı ile bulunur. Tüm hesaplamalar bir döngü içerisinde tekrar yapılarak her bir dedektör, diğer komşu dedektörlere en yakın olacak şekilde konumlandırılır. ROOT içinde her bir katı cisim farklı bir isme sahip olması gerektiğinden döngü içerisine bir isimlendirme kodu eklenmiştir. Her dedektöre isim olarak kendisine ait satır ve sütun numarası verilmiştir. Bu ise etkileşimler sırasında dedektörlerin komşuluğunu incelemeyi kolaylaştırmıştır.

Simülasyonda kıyaslamalı hesaplamalar için aşağıdaki gibi silindiril tasarımlar da kullanılmıştır.



Şekil 3.5: Silindirik dedektörlü nötron wall tasarımı (5"x20 cm).



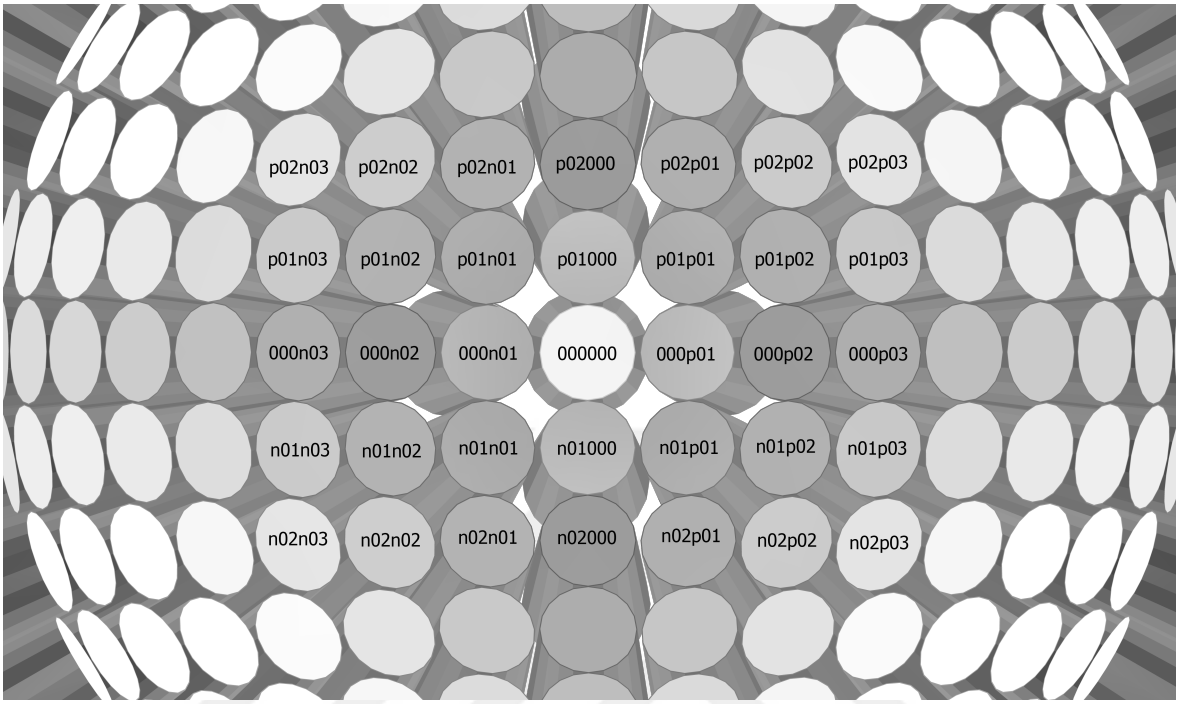
Şekil 3.6: Hexagonal dedektörlü nötron wall tasarımı.

3.2.5. Model Haritası

Modelde her bir dedektör satır ve sütun elemanları olarak isimlendirilmiştir. Bu isimlendirme yardımıyla dedektörler arasındaki komşuluk derecesi sadece isim kıyaslaması ile yapılabilmektedir.

Örneğin merkezdeki (000000) ve bir üstündeki (p01000) dedektörleri ele alalın. Mesela nötron iki dedektörden (p01n02 ve p02n02) sırasıyla saçılmış olsun. Satır numaraları arasındaki fark 1 ve sütun numaraları arasındaki fark ise 0'dır. Bunu anlamı iki dedektör aynı sütunda ve birinci derece komşu demektir. Komşuluk derecelendirmesinde 0 aynı dedektör,

1 en yakın komşu, 2 en yakın ikinci komşu demektir ve dedektörler arasındaki mesafe artıkça komşuluk derecesi de artacaktır.



Şekil 3.7: Dedektör dizisinin isimlendirme yöntemi.

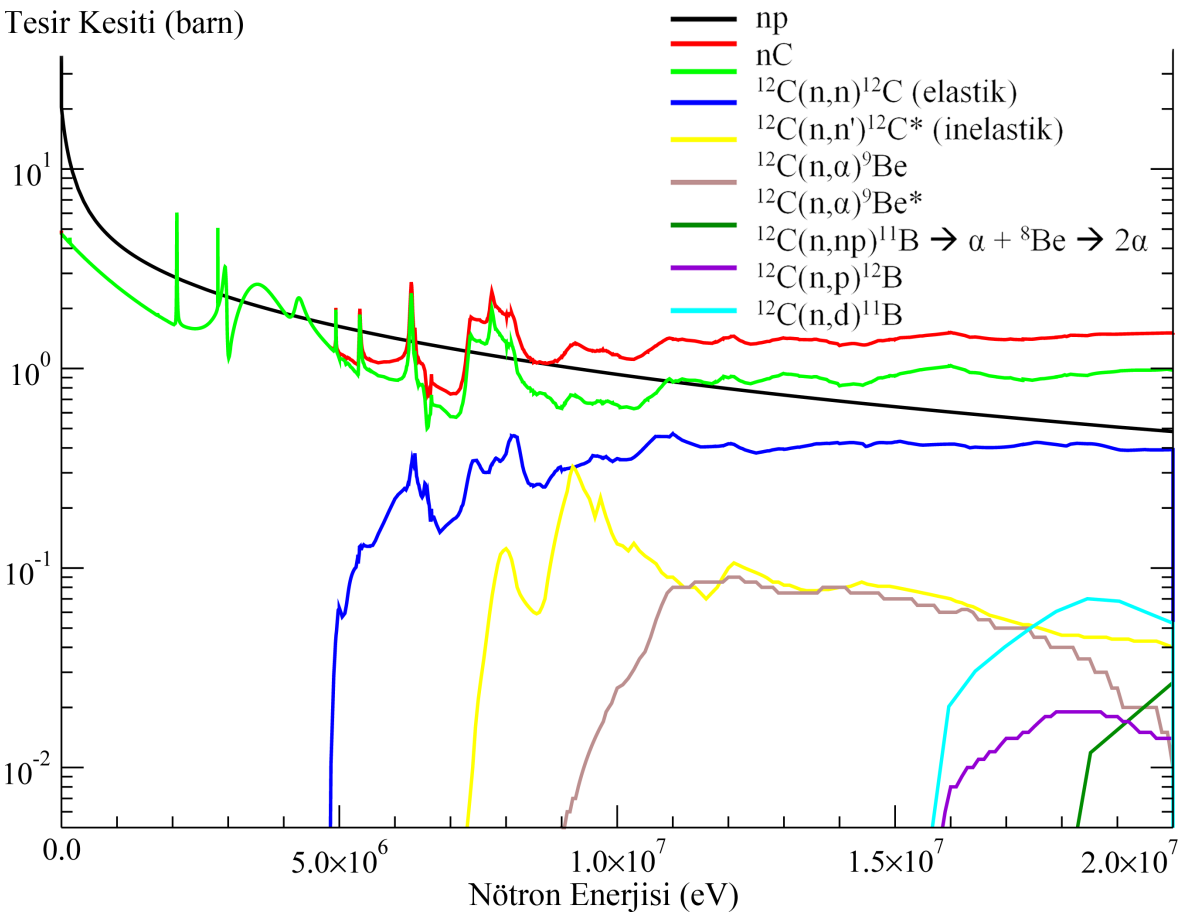
3.3. NÖTRON TESİR KESİTLERİ KİTAPLIĞI (ENDF)

Evaluated Nuclear Data File (ENDF) temel nükleer bilim çalışmaları için hazırlanmış bir veri kitaplığıdır. 1966 yılında kurulmuş olan tesir kesiti ölçümleme grubu (The Cross Section Evaluation Working Group, CSEWG) bu veri tabanında geliştirmeler yapmakla iştigal etmektedirler. Çalışmada laboratuvarlardan, üniversitelerden ve endüstriden katılımcılar bulunmaktadır. Grup ayrıca OECD Nuclear Energy Agency (NEA, Paris) ve International Atomic Energy Agency (IAEA, Vienna) toplulukları ile koordine bir ilişki içinde tesir kesiti ölçümleme projelerinden yararlanmaktadır.

Dietze ve Klein'ın çalışmalarıyla uyumlu olabilmesi için simülasyonda ENDF/B-V.2 Evaluated Nuclear Data Library documented in BNL-NCS-50496, edition 2, 1983 revision (ENDF/B-V.2, 1983) kütüphanesi kullanılmıştır.

Tüm bu tesir kesiti veri dosyaları nükleer çalışma deneyleri, nükleer teori ve öngörülen modeller, istatistik analizler, radyasyon transfer fiziği, bilgisayar kodları ve veri tabanındaki

ilerlemeler gibi çeşitli çalışmalara dayanmaktadır. Nötron saçılma tesir kesiti verileri ENDF/B-V.2 (1983) veri kitaplığından alınmıştır. Simülasyonda Şekil 3.8'de bulunan 9 reaksiyon kullanılmış, diğer reaksiyonlar düşük tesir kesiti nedeniyle ihmal edilmiştir.



Şekil 3.8: Çeşitli etkileşim ve reaksiyonlarda nötron tesir kesitleri.

3.4. SİMÜLASYON

Tüm simülasyon dedektör modeli, olay üreteci ve olayları ayıklayan üç ana aşamadan oluşmaktadır. Olay üreteci, belli enerjilerde nötron üretip bu nötronların dedektör ile etkileşimini ardı sıra süren olayların takibini yapmaktadır. Olay üretecinin verdiği çıktı ayıklayıcı kod tarafından zaman sırasına konulmaktadır.

3.4.1. Monte Carlo Simülasyonu

Monte Carlo yöntemi rastgele sayılar kullanılarak fiziksel olayların taklit edilmesi ve buradan hareketle çözüm elde etmede kullanılan bir yöntemdir. Günümüzde planlamada

sıklıkla kullanılmakta ve böylece daha sağlıklı sonuçlar elde ederek toplam maliyetin de azalmasını sağlamaktadır.

Etkileşimlerin bilinen sonuçları simülasyonlar kullanılarak çeşitli fiziksel engellere takılmaksızın tartışılabilir hale gelmektedir. Günümüzde GEANT4 ve ROOT gibi veri analiz kitleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu simülasyon içinde parçacıklar tüm uzay açı içinde herhangi bir yöne doğru ve ortalama serbest yol etrafında değişen belirli bir mesafeye kadar ilerlerler. Her çarpışmadan sonra enerjilerinde bir değişim ve saçılma gerçekleşir. Tüm enerjilerini kaybedene kadar veya dedektör sistemi dışına çıkıncaya kadar bu saçılmalar devam eder. [KAYNAK YAZ]

3.4.2. Olay Üreteci

Olay üretim sürecinde bir nükleer reaksiyon veritabanı olan Evaluated Nuclear Data File (ENDF)'dan (ENDF/B-V.2, 1983) faydalanılmıştır. Cross section verileri reaksiyonların olasılıklarını belirleyebilmek için veri sağlar. Farklı reaksiyonların oluşma olasılıkları,

Simülasyon ilk önce dedektör modelinin geometri verisini ve ENDF dosyalarını okumaktadır. Ardından olay üretimi sürecine girer. Simülasyonu çalıştırırken nötron sayısı kullanıcı tarafında girilir. Maksimum çarpışma 25 ve yoksayılabilir seviyedeki nötron enerjisi 100 KeV olarak belirlidir.

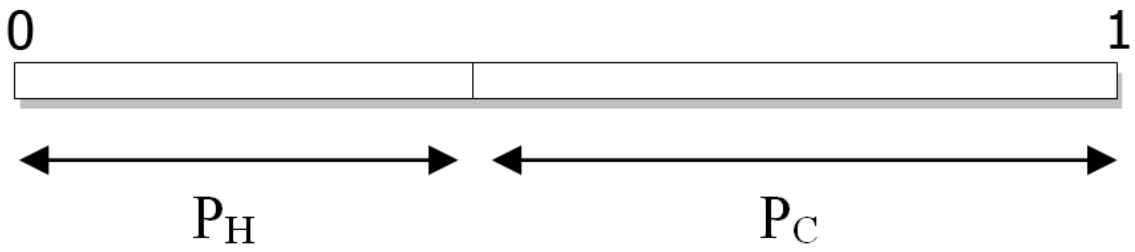
Herbir nötronun için dedektöre girdikten çıkana kadar geçen süreç bir olay olarak yazılmaktadır. Bir anda birden fazla nötron olduğunda her bir nötronun Her nötronun bir süreç içindeki her çarpışması ise bir etkileşimdir.

3.4.3. İz Sürme (Tracking)

4π siteradyanlık uzay açı içerisine rasgele bir açı ile D mesafesine bir nötron gönderilir. Eğer bu nokta dedektör içerisinde ise bir çarpışma olduğu varsayılır ve çarpışma mesafesi alınır. Dedektör içindeolup olmadığına ilişkin sorgu dedektör olarak tanımlanmış materyal kimliğinden bulunmaktadır. R 0 ile 1 arasında rasgele bir sayı ve Σ_T bir karbon veya bir hidrojen ile nötron etkileşimlerinin bir olasılık fonksiyonu olmak üzere olmak üzere,

$$S = -log\frac{R}{\Sigma_T}$$

S dedektör ön yüzünden il çarpışmanın olduğu yere kadar olan uçuş mesafesini verir. Daha sonra reaksiyon tipi belirlenir. Reaksiyon tipi de belli bir parametre etrafında belirlenmektedir. Hangi tip etkileşim olduğunu belirlemek için, PH ve PC, sırasıyle hidrojen ve karbonla etkileşim olasılığı ve toplamları 1 olmak üzere, 0 ile 1 araında üretilen rastgele bir sayı ile kıyas edilerek seçilir.



Şekil 3.9: Olasılık şeması.

Böyle bir hesaplama ile rasgele bir olay üretmek yerine, gerçek bir reaksiyonda karşılaşılacak olasılıkda olay tipi elde edilmiş olur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta protonlarla elastik çarpışmalar yapılmakta, fakat reaksiyon tipi bir karbon ile yapılan bir reaksiyon ise, hesaplanması gerek diğer parametreler ve bu reaksiyona ait değişik tipte reaksiyonların bulunması ve hesaplanması gerekecektir.

Yine aynı yöntemle (reaksiyon tipinin olasılık toplamı yoluyla belirlenmesi) reksiyonun hangi tipte olacağını (elastik/inelastik) belirlemek için kullanılır. Bu çalışma kapsamında gözönüne alınan reaksiyonlar aşağıda listelenmiştir.

Tablo 3.3: Simülasyonda incelenilen etkileşim ve reaksiyonlar

(n,p) elastik
$^{12}\mathrm{C}(n,n)^{12}\mathrm{C}$ elastik
$^{12}\mathrm{C}(n,n')^{12}\mathrm{C}$*
$^{12}\mathrm{C}(n,\alpha)^{9}\mathrm{Be}$
$^{12}\mathrm{C}(n,\alpha)^{9}\mathrm{Be}$*
$^{12}\mathrm{C}(n,np)^{11}\mathrm{B}$
$^{12}\mathrm{C}(n,p)^{12}\mathrm{B}$
$^{12}\mathrm{C}(n,d)^{11}\mathrm{B}$

Dedektör içindeki bu ilk çarpışma noktasında nötron enerjisine bağlı olarak saçılma açısının üretilmesi söz konusudur. Bunun için Get_ReactionChanAngDistID ismindeki açısal dağılım fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon 1'e normalize olup, bütün bir uzay açı içinde her noktanın açısal dağılımı eşittir.

KINEMA fonksiyonu reaksiyon kinematiğini hesaplamaktadır. Bu fonksiyonda T3LAB nötronun saçılma enerjisini ve T4LAB tepik protonun veya çekirdeğin saçılma enerjisini vermektedir. Herhangi bir çarpışmadan sonra nötron dedektör sisteminden çıkana kadar yahut enerjisini tamamen kaybedene kadar iz sürme döngüsü içinde kalmaktadır. VertexNo bir nötronun kaç saçılma yaptığını gösterir. Böylece herbir saçılmayı ayrı ayrı görmek mümkün olur.

Tepik çekirdek için ise uyarılmış durumdan taban enerji durumuna geçerken yayınladığı ışınların verisi toplanmakta, böylece dedektörce algılanacak ışın simüle edilmiş olmaktadır.

Herbir reaksiyon tipi için geçerli olan şu süreçler zinciri söyledir;

- Q değeri ReactionChanAngDistID ile hesaplanır.
- Kütle merkezi sisteminde ReactionChanAngDistID fonksiyonu yardımıyla saçılma açısının kosinüsü hesaplanır.
- KINEMA fonksiyonu yardımıyla reksiyon kinematiği hesaplanır.
- DLICHT fonksiyonu yardımıyla tepik çekirdeklerin sintilatör içindeki enerji kayıplarından, (moleküler uyarılma ve iyonizasyon) sintilasyonun ışık şiddeti hesaplanır.
- Nötronun bir sonraki saçılmasının hesaplanması için döngü tekrar başa döner.

(n,p) ve $^{12}\mathrm{C}(n,n)^{12}\mathrm{C}$ elastik saçılmasında, elastik saçılma hesaplanarak ışık çıkışı ve depozit edilen enerji elde edilmiştir.

$^{12}\mathrm{C}(n,n')^{12}\mathrm{C}*$, $^{12}\mathrm{C}(n,np)^{11}\mathrm{B}$, $^{12}\mathrm{C}(n,p)^{12}\mathrm{B}$ ve $^{12}\mathrm{C}(n,d)^{11}\mathrm{B}$ saçılmalarında inelastik saçılmaların yayınladığı ışıma hesaplanmaktadır.

Aşağıdaki reaksiyonlarda depozit edilen enerjinin dedekte edilebilmesi için reaksiyondaki bileşik çekirdek, üç cisim probleminden iki cisim problemine indirgenerek, gerçek izotropiye çok yakın olan ve bileşik çekirdeği oluşturan daha hafif çekirdekler üzerinden yapılır. Şöyle ki;

$^{12}\mathrm{C}(n,n')^{12}\mathrm{C}*$ reaksiyonu;

$$^{12}\mathrm{C}* \rightarrow \alpha + {}^{9}\mathrm{Be}*$$

$$^{9}\mathrm{Be}^{*} \rightarrow \alpha + \alpha$$

$^{12}\mathrm{C}(n,\alpha)^{9}\mathrm{Be}^{*}$ reaksiyonu;

$$^{12}\mathrm{C}^{*} \rightarrow \alpha + {}^{9}\mathrm{Be}^{*}$$

$$^{9}\mathrm{Be}^{*} \rightarrow n + {}^{8}\mathrm{Be}^{*}$$

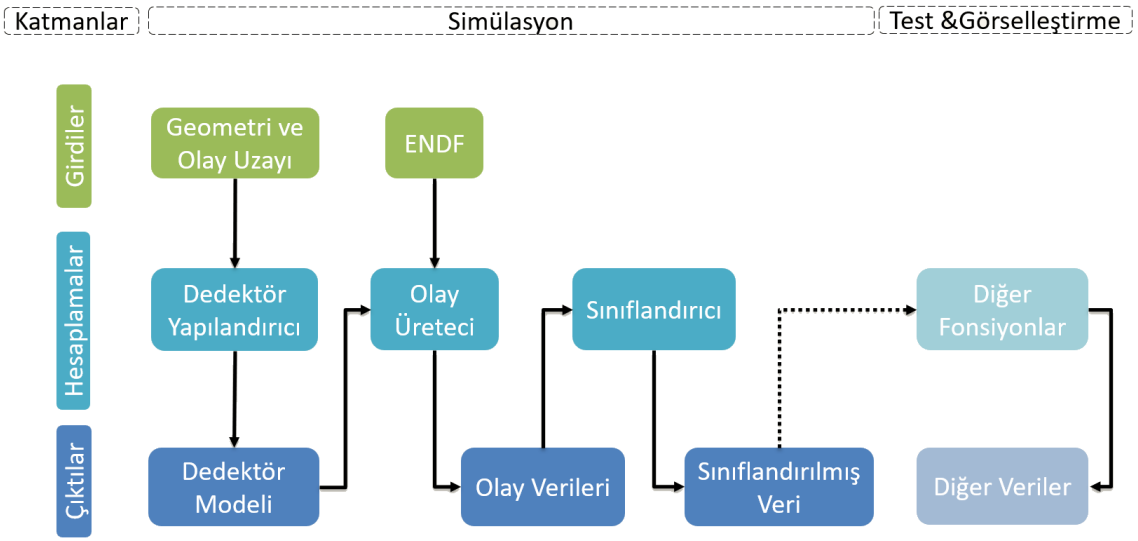
$$^{8}\mathrm{Be}^{*} \rightarrow \alpha + \alpha$$

şeklinde hesaplanır.

3.4.4. Ayıklama (Sorting)

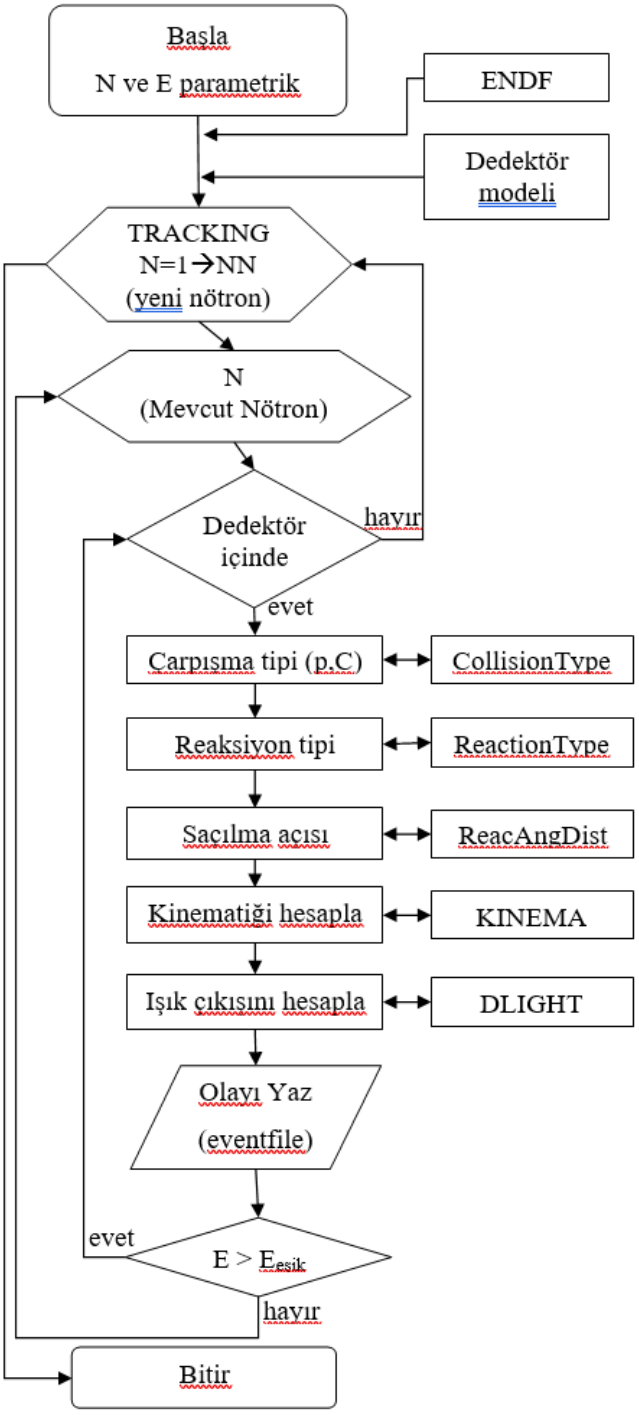
SORTER, üretilmiş olan olay dosyasından okuyarak hesaplamalar yapmaktadır.

- Hangi dedektörlerde etkileşim olduğunu saptar.
- Light Unit'lerin yeterliliğini test eder ve hesaplar.
- Olayları zamana göre sıralamaktadır.
- Nötron etkileşimlerinin kaynak veya saçılan nötron olup olmadığının ayrımının yapar.
- Dedektörlerin komşuluk derecelerini tespit eder.



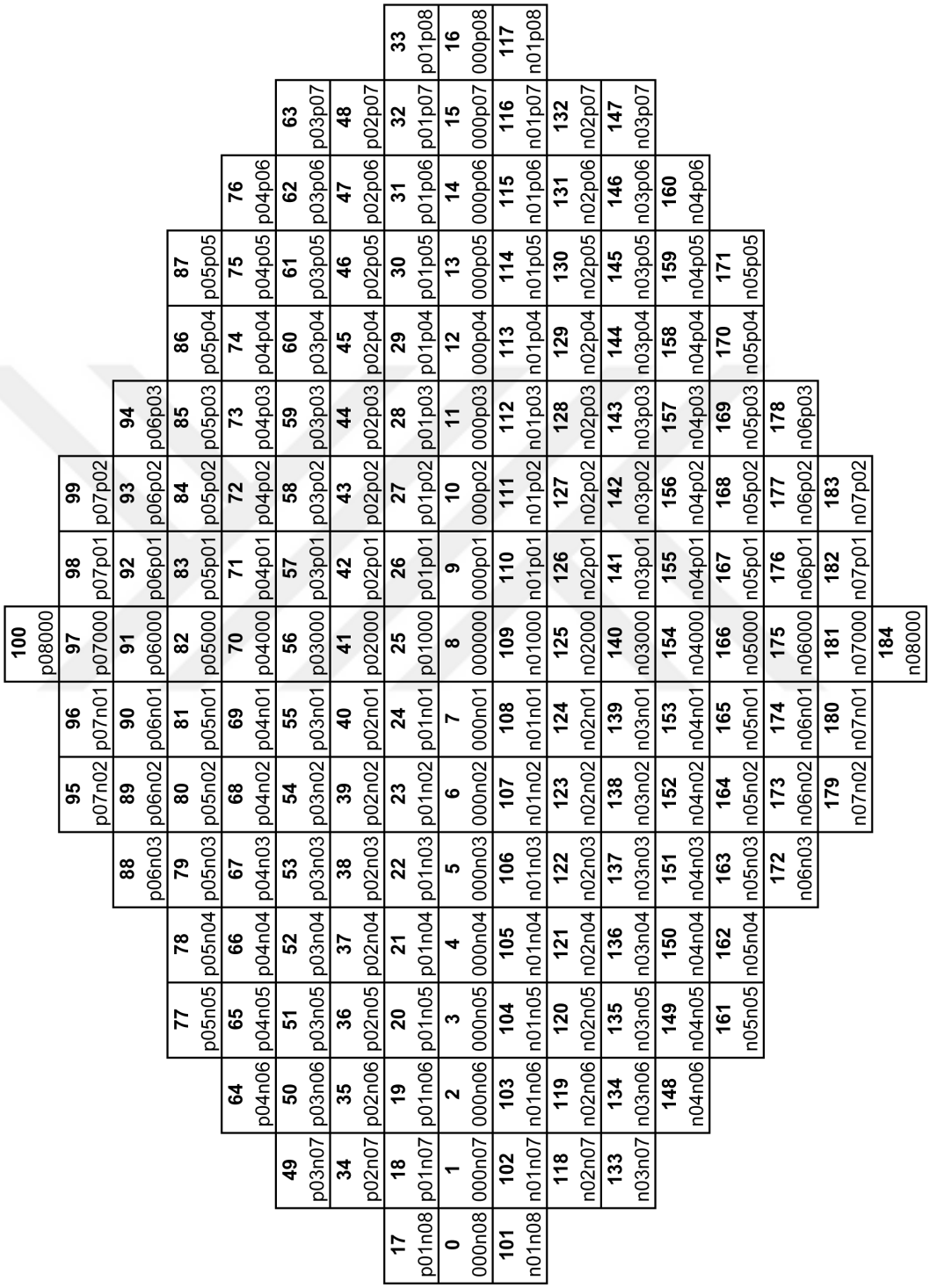
Şekil 3.10: Çalışmadaki uygulamaların ilişkisel şeması.

3.4.5. Akış Diyagramı



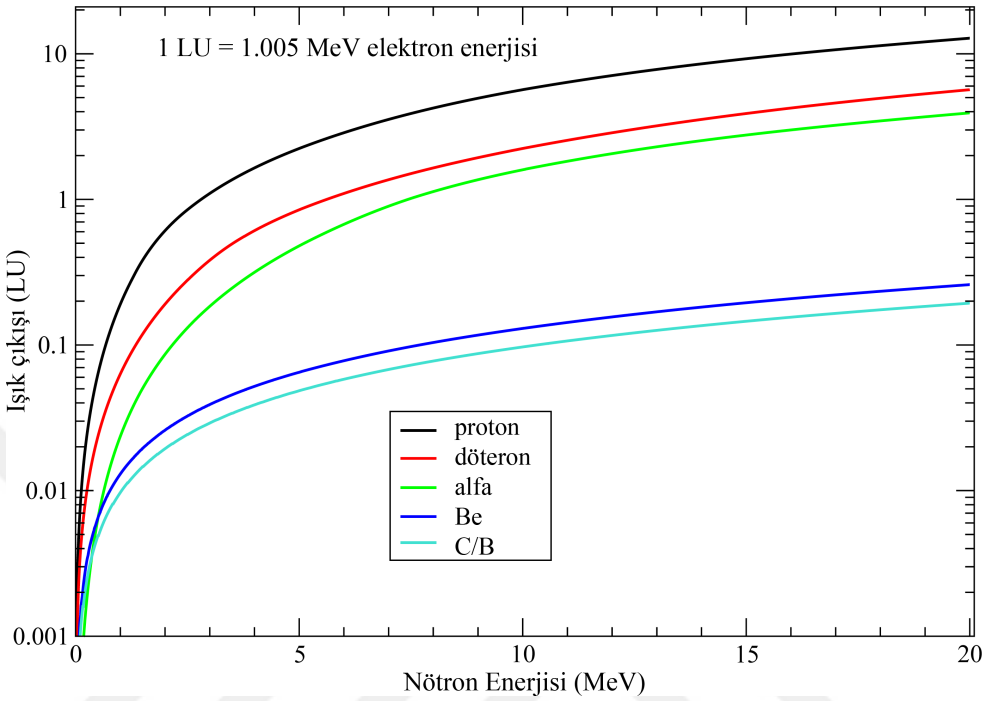
Şekil 3.11: Olay üretecinin akış diagramı.

3.4.6. Model Haritası

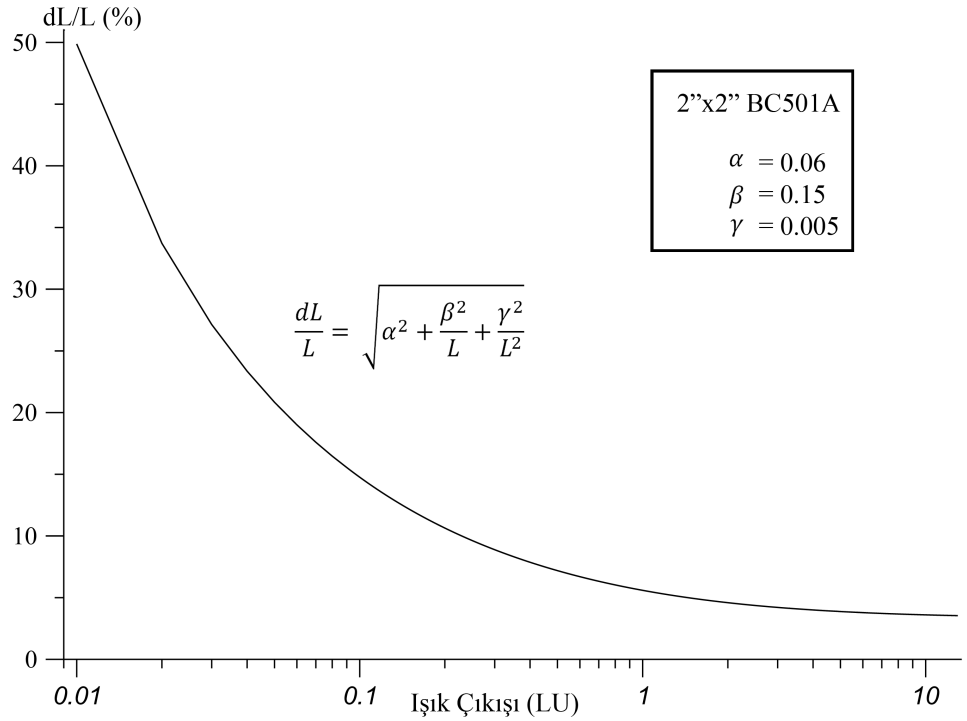


Şekil 3.12: Dedektörlerin isim ve numaralarını gösteren örnek şema.

3.4.7. Işık Çıkışı



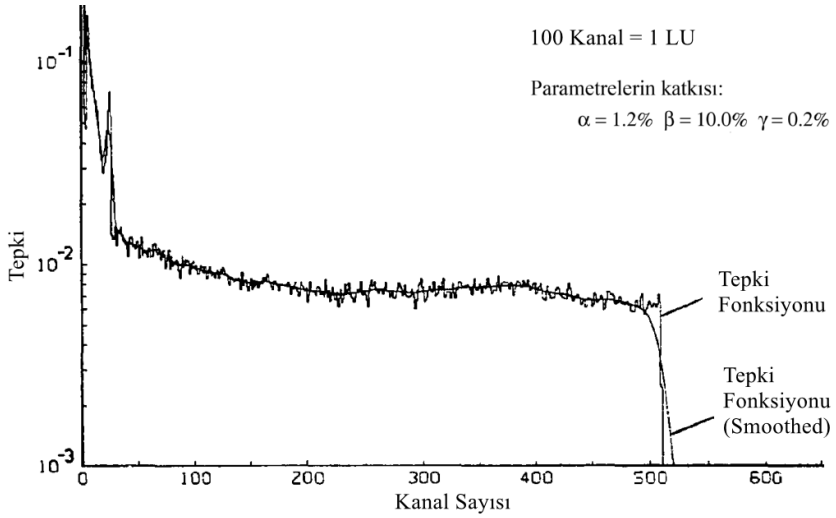
Şekil 3.13: Gelen nötronun enerjisine karşılık ışık çıkışının grafiği.



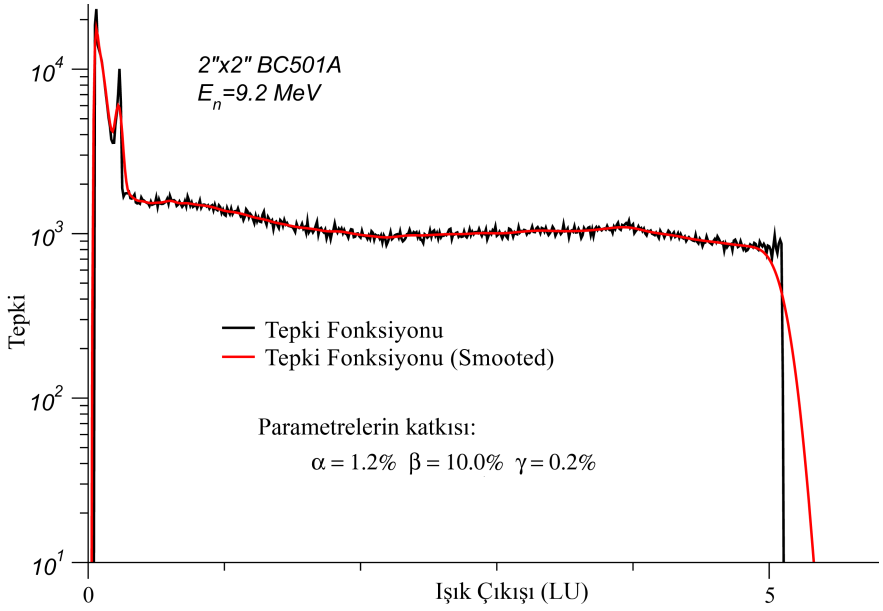
Şekil 3.14: Işık çıkışının fonksiyonu.

4. BULGULAR

G. Dietze ve H. Klein'ın 1982 yılında yapmış oldukları çalışmadaki nötron responce fonksiyonlarını, aynı dedektör boyutları ve nötron enerjilerini kullanarak kendi sonuçlarımızla karşılaştırdık. Bunun için 9,2 MeV'lik monoenerjetik nötronlarla yarıçapları 2" x 2" ölçülerinde olan dedektörlerin etkileşimini inceledik. Şekil 4.1 bu yayındaki Fig.6'dan alınarak üzerindeki açıklamalar yazılmıştır.

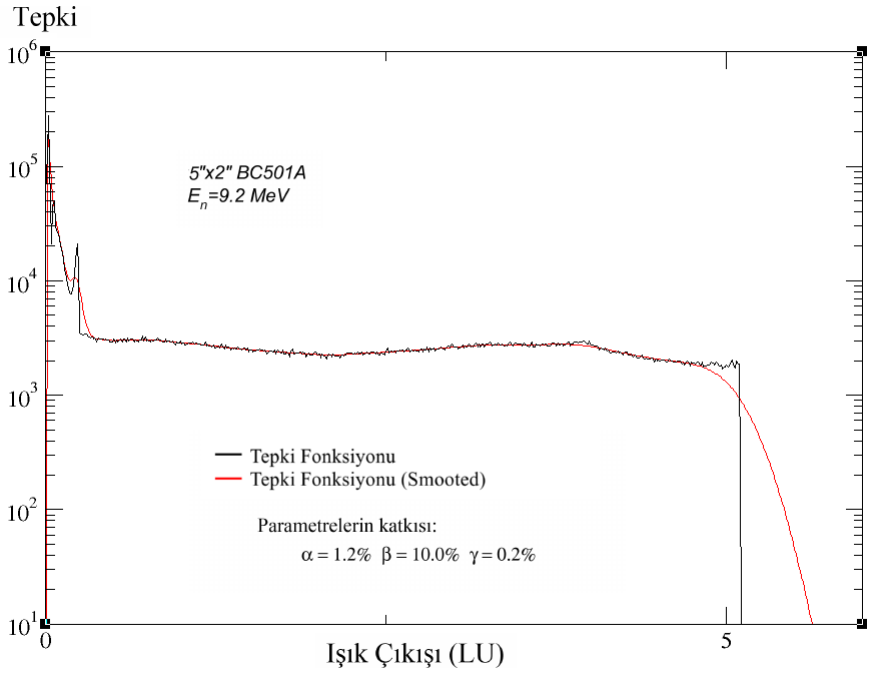


Şekil 4.1: Tepki fonksiyonu, 2"x2" dedektör için

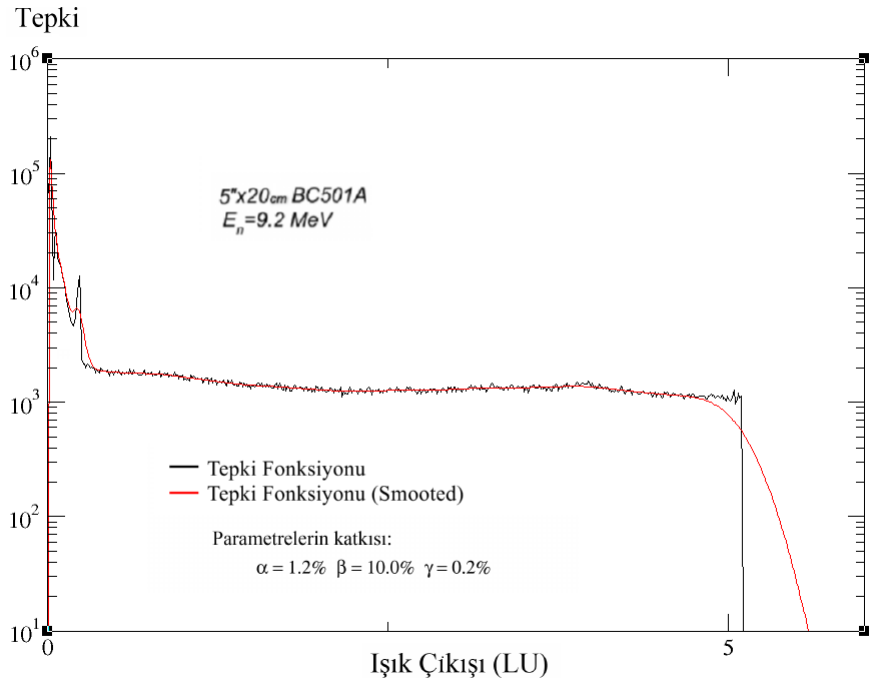


Şekil 4.2: Tepki fonksiyonu, 2"x2" dedektör için.

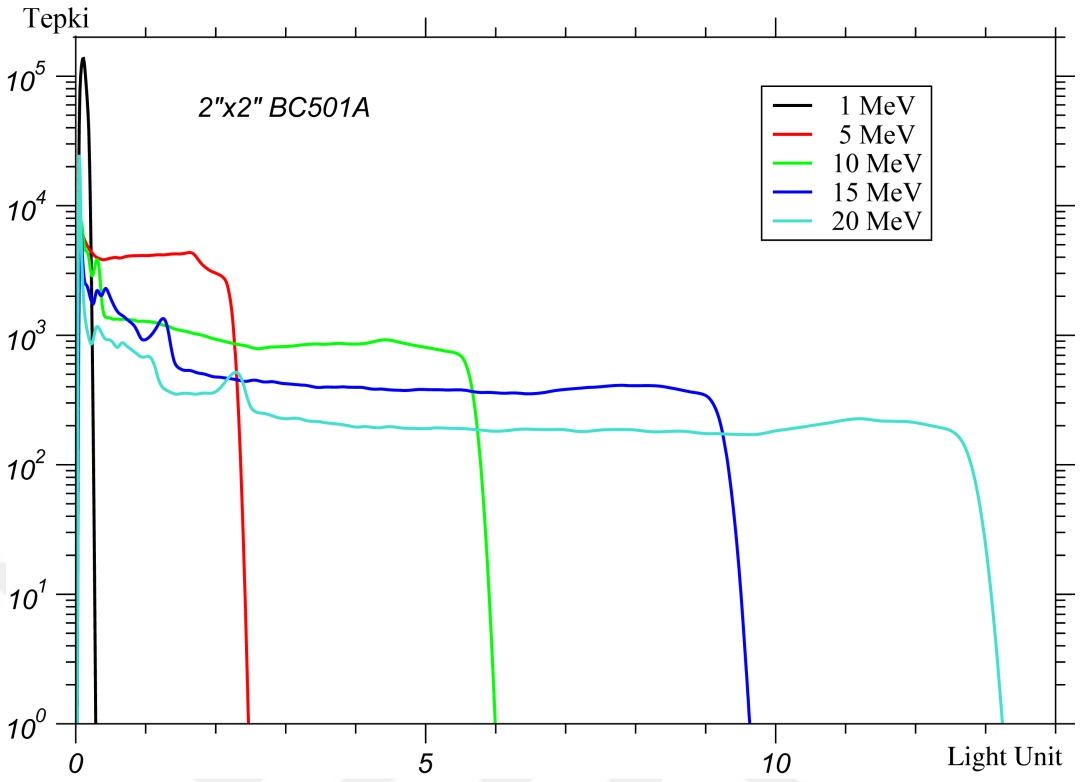
5" x 2" ve 5" x 20 cm ölçülerinde farklı dedektörler kullanıldığında da benzer değerler alındı.



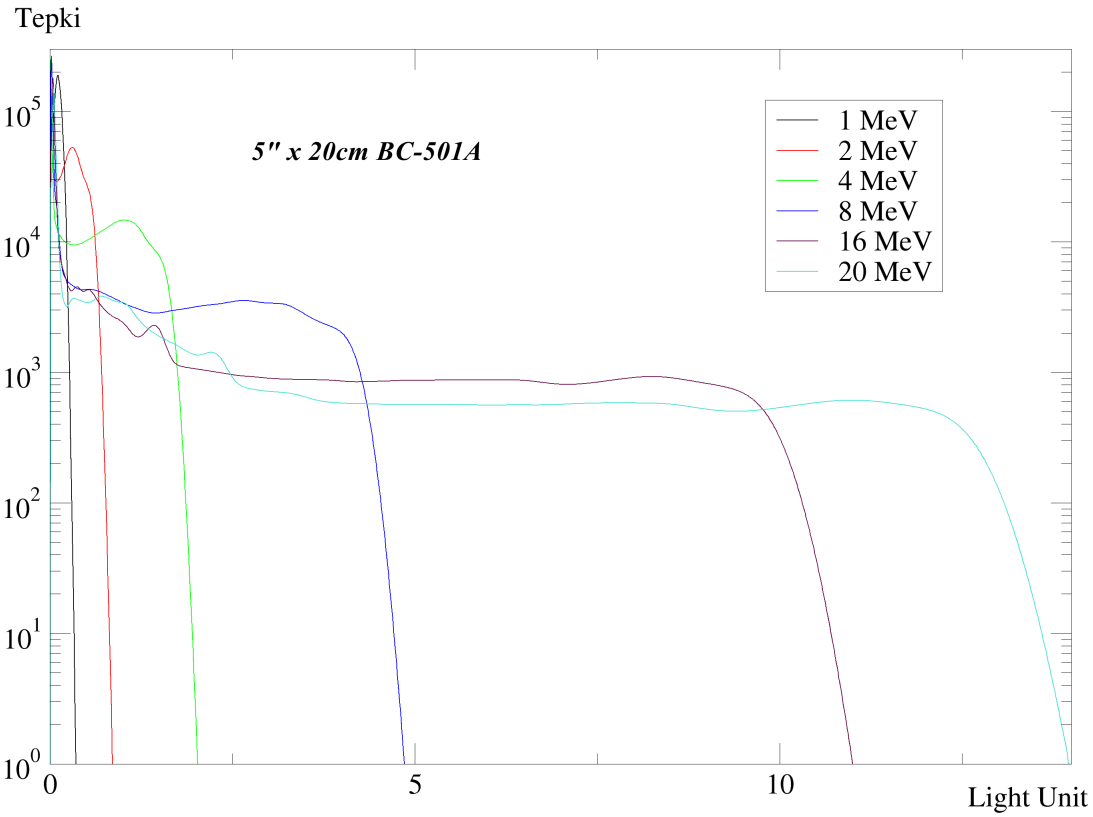
Şekil 4.3: Tepki fonksiyonu (5"x2" dedektör için).



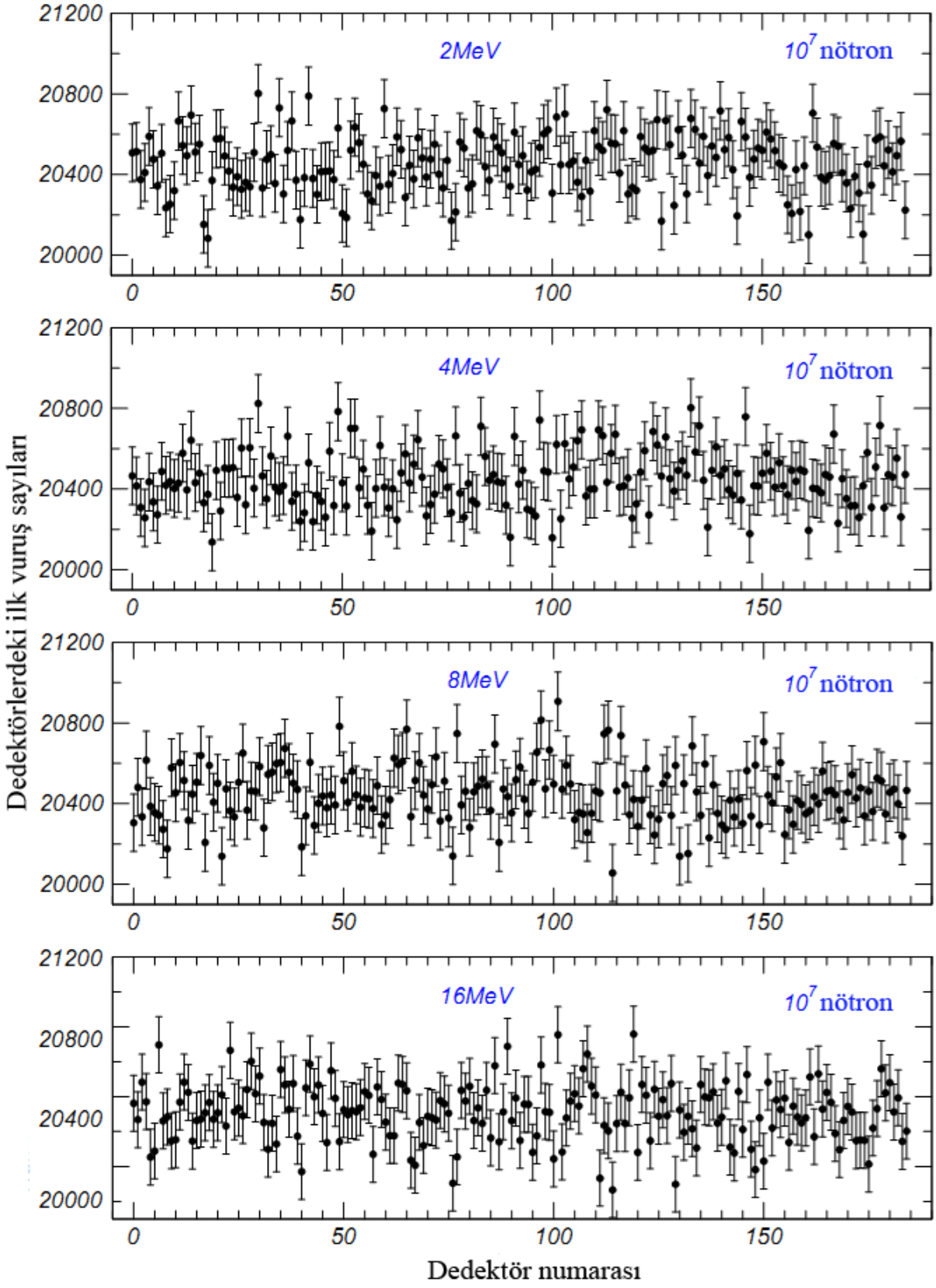
Şekil 4.4: Tepki fonksiyonu (5"x20 cm dedektör için).



Şekil 4.5: Tepki fonksiyonu, 2"x2" ve 1,5,10,15,20 MeV enerjilerinde.

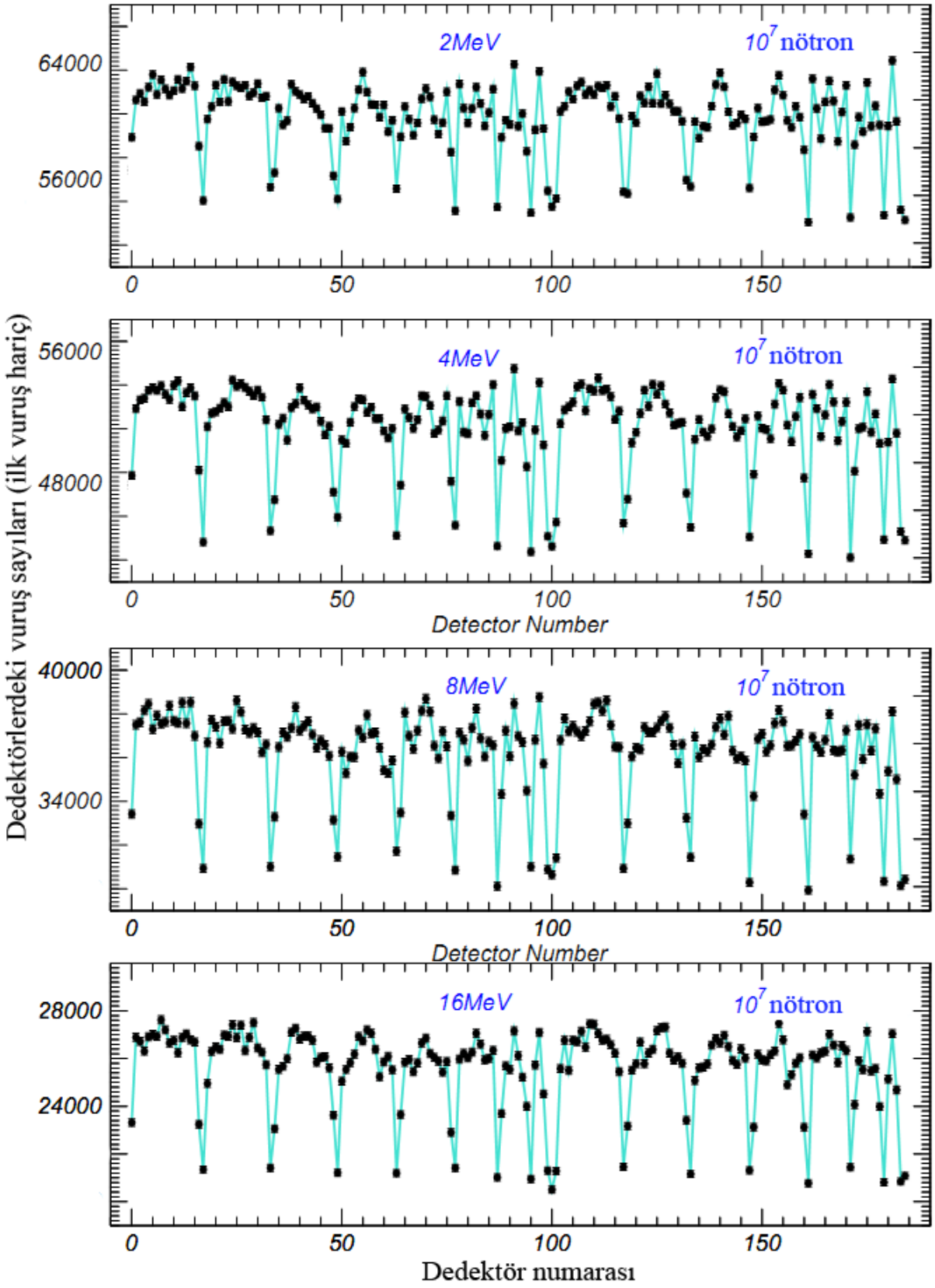


Şekil 4.6: Tepki fonksiyonu, 5"x20 cm ve 1,2,4,8,16,20 MeV enerjilerinde.



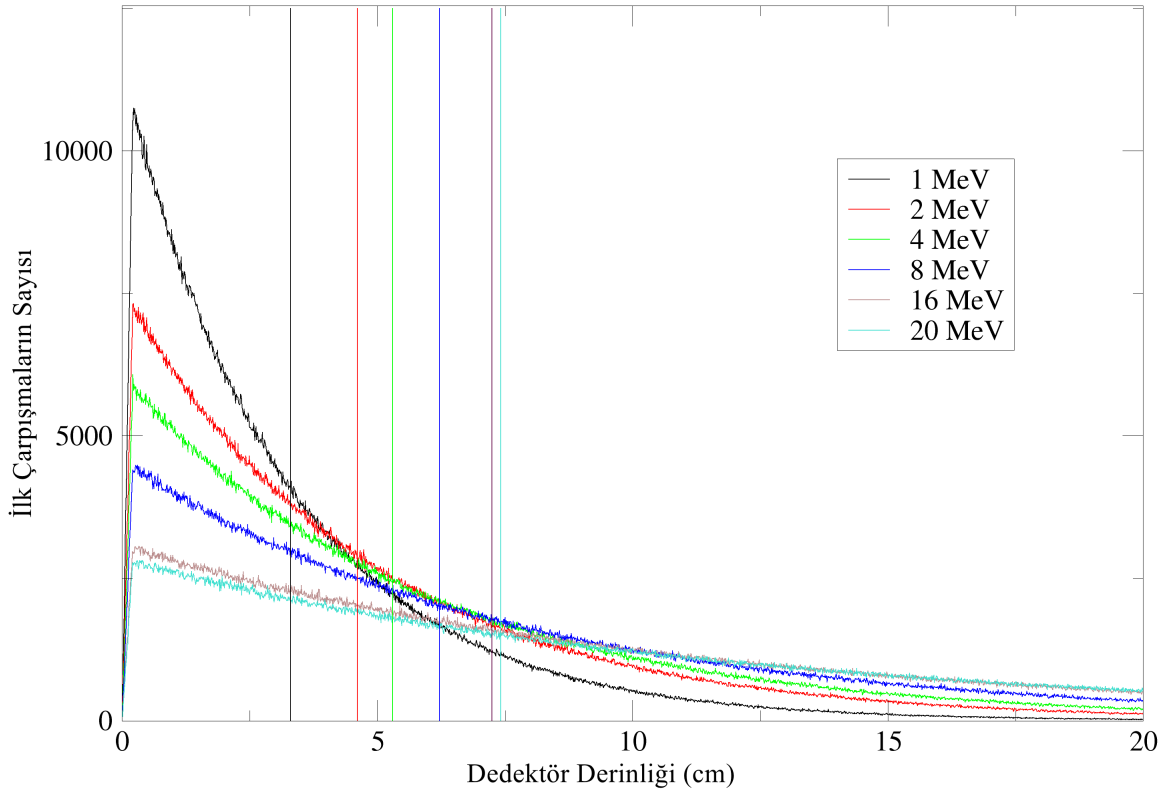
Şekil 4.7: Dedektörlerdeki ilk vuruş sayıları.

İzotropik bir dağılım gözlenmiştir.

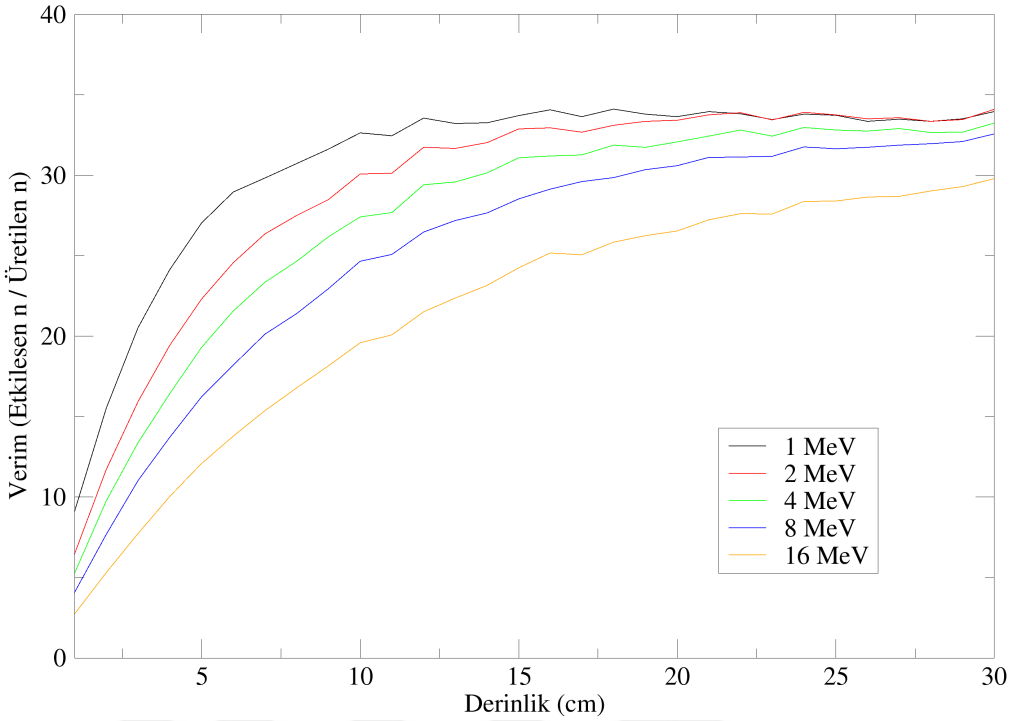


Şekil 4.8: Dedektörlerdeki ilk vuruş hariç tüm çarpışmaların sayıları.

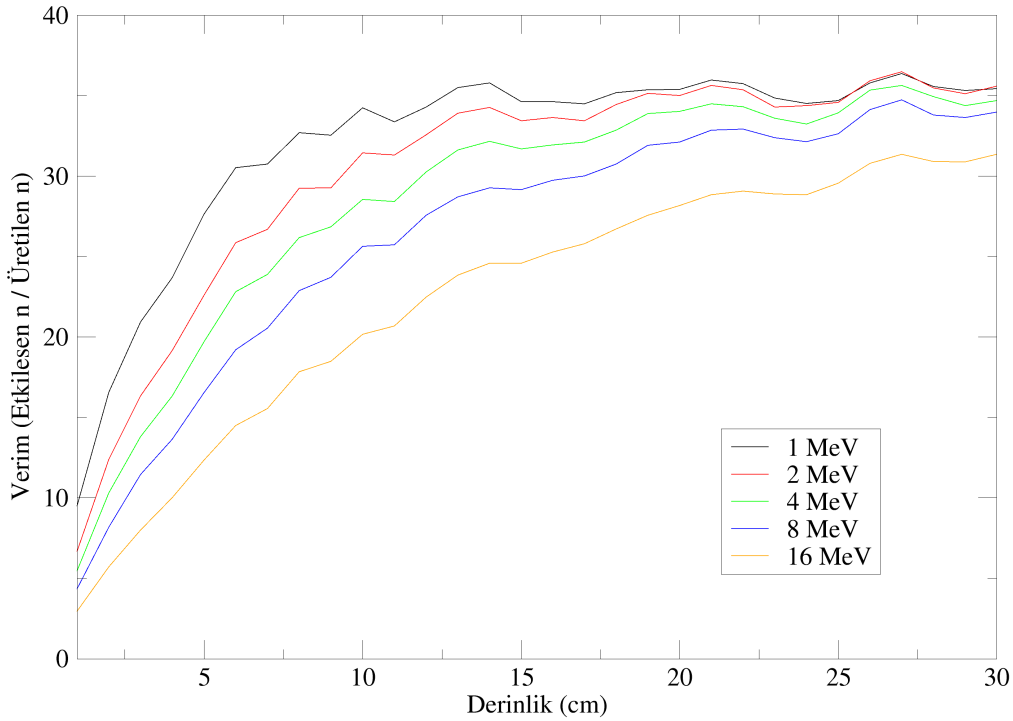
Az komşusu bulunan dedektörlerde dedektörler arası saçılma sayısının azaldığı gözlenmiştir.



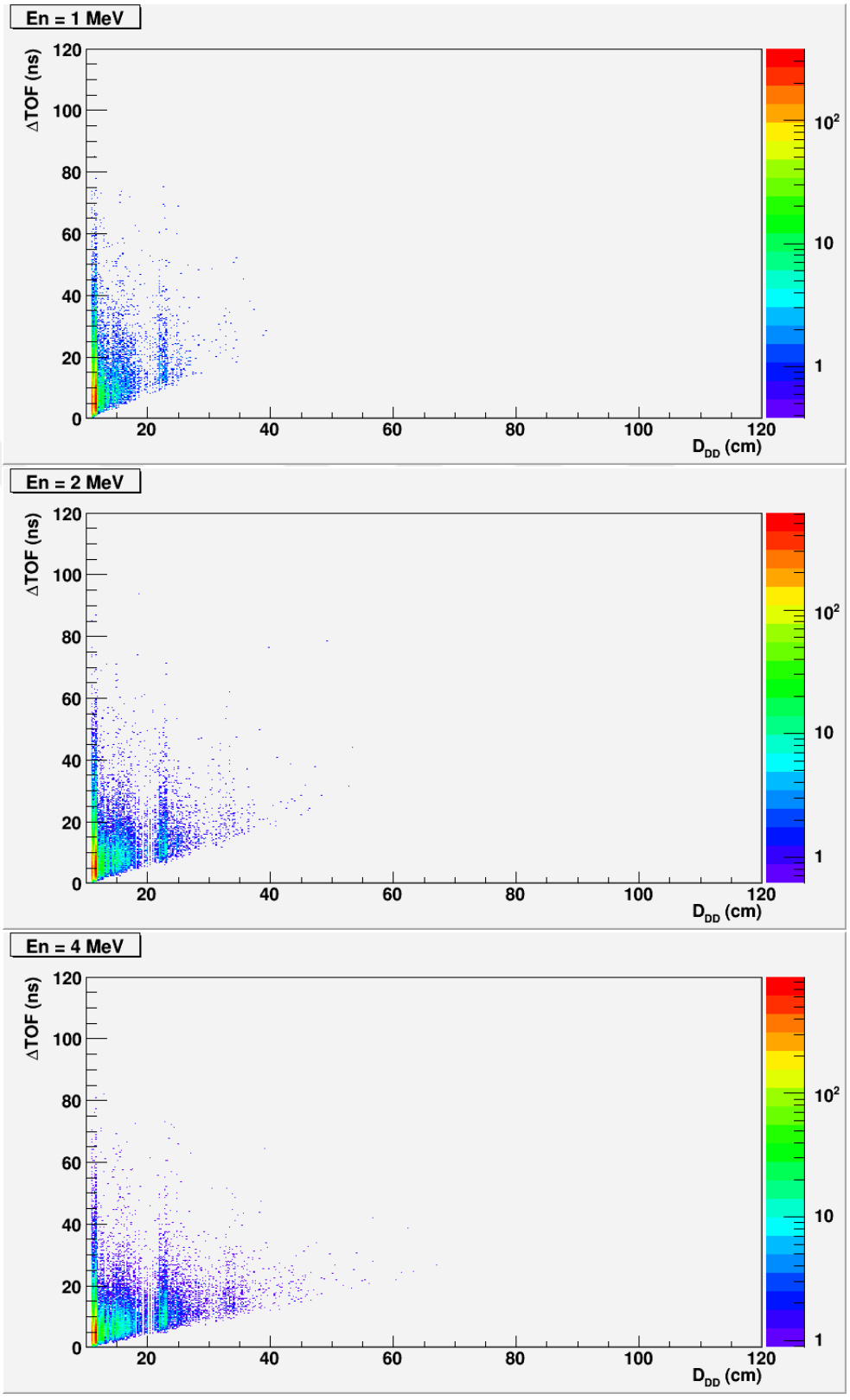
Şekil 4.9: Derinliğe bağlı ilk etkileşim sayıları ve enerjiye bağlı ortalama etkileşim derinliği. Dikey çizgiler ortalama derinliği göstermektedir.



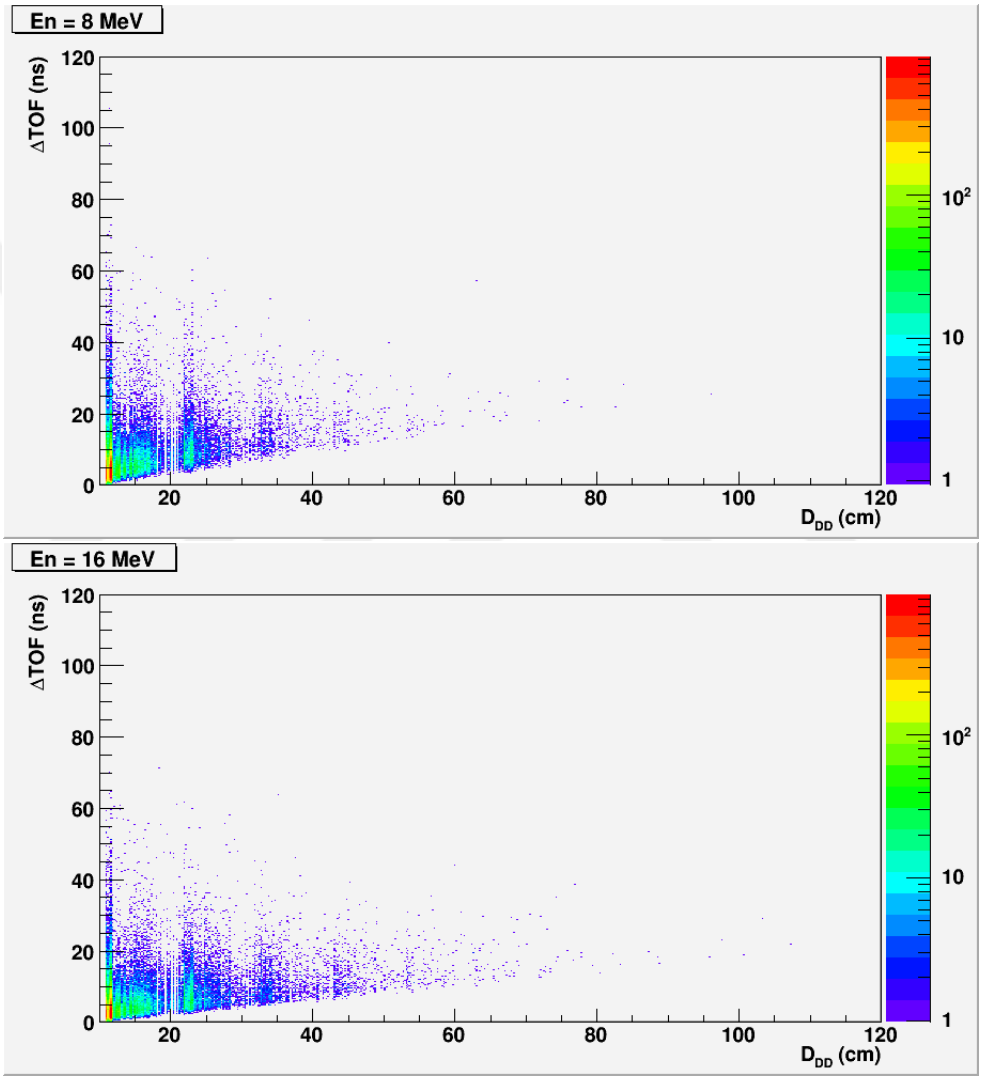
Şekil 4.10: 2" yarıçaplı dedektörlerden oluşan bir dedektör dizisindeki ilk etkileşim oranının derinliğe bağlı değişimi.



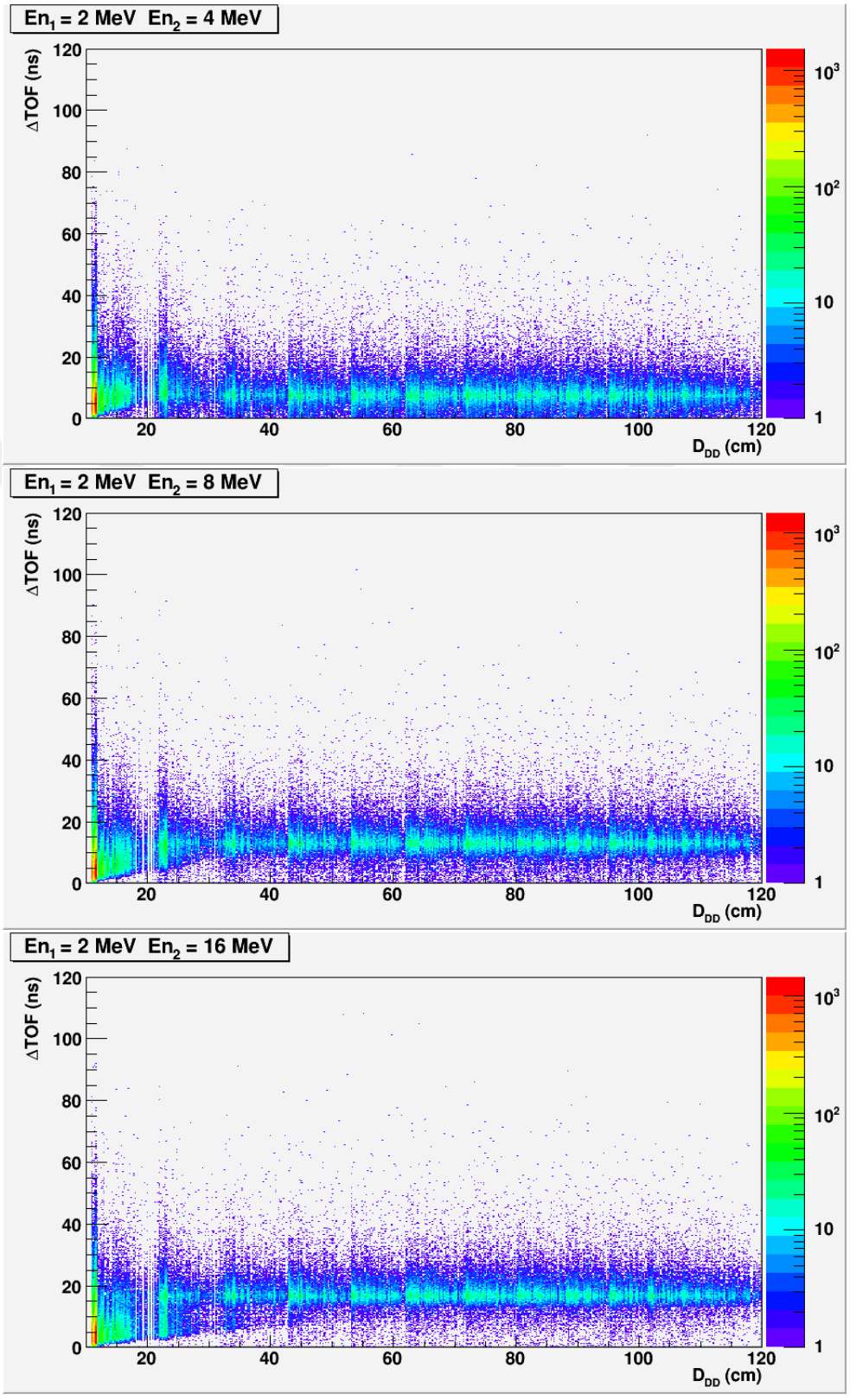
Şekil 4.11: 2" yarıçaplı dedektörlerden oluşan bir dedektör dizisindeki ilk etkileşim oranının derinliğe bağlı değişimi.



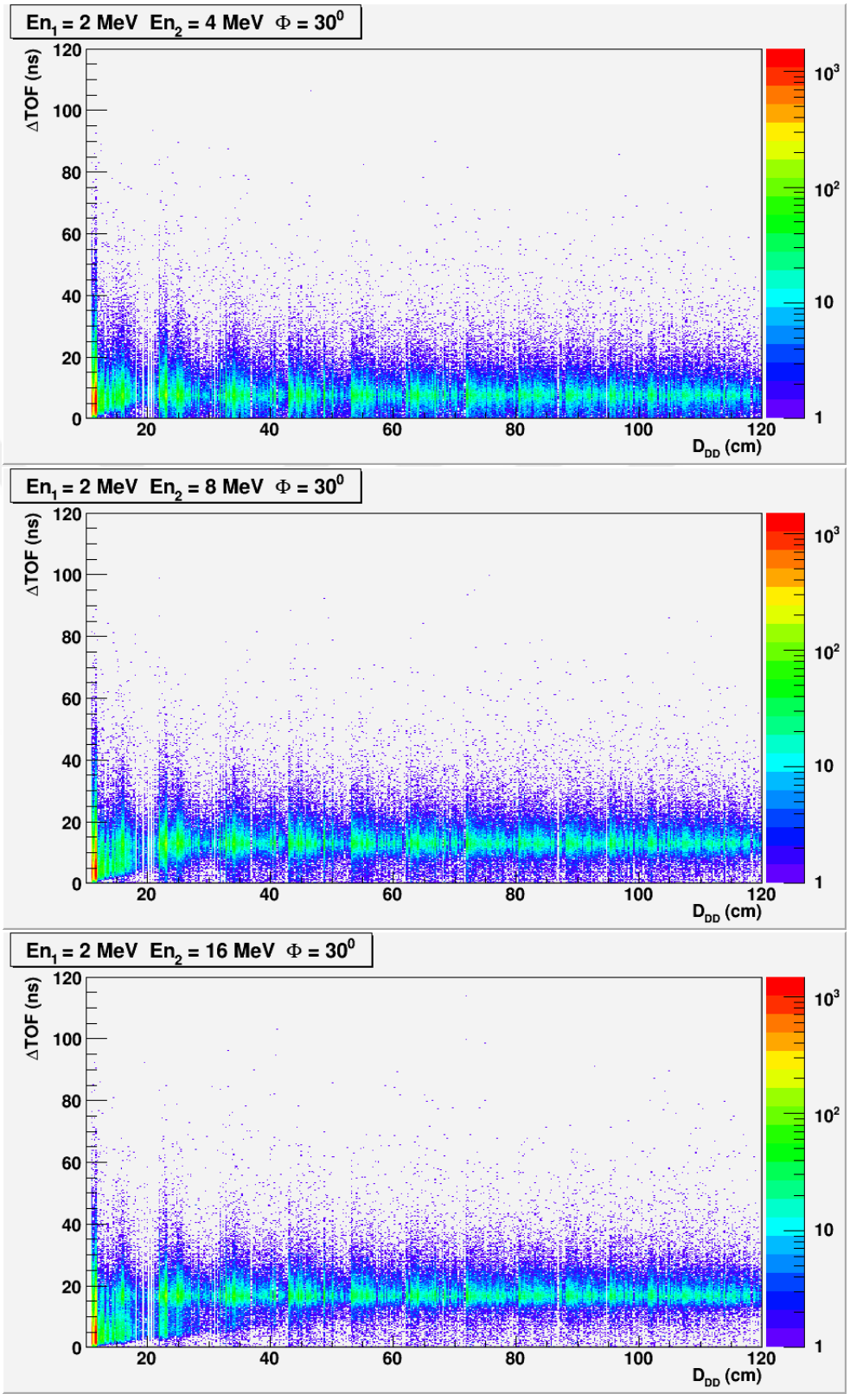
Şekil 4.12: Tek nötronlu olaylarda dedektörler arası etkileşim (1, 2, 4 MeV)



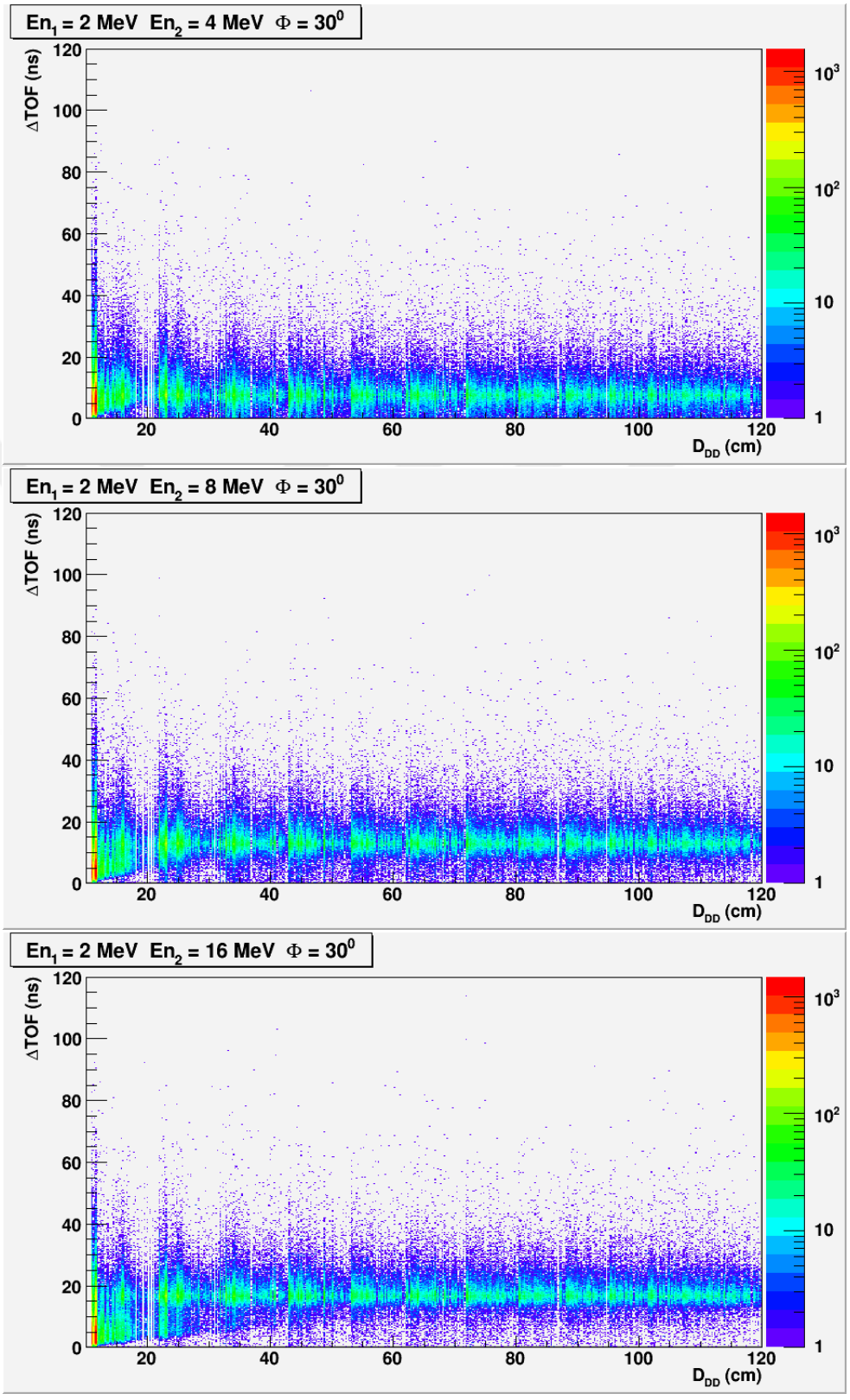
Şekil 4.13: Tek nötronlu olaylarda dedektörler arası etkileşim (8, 16 MeV)



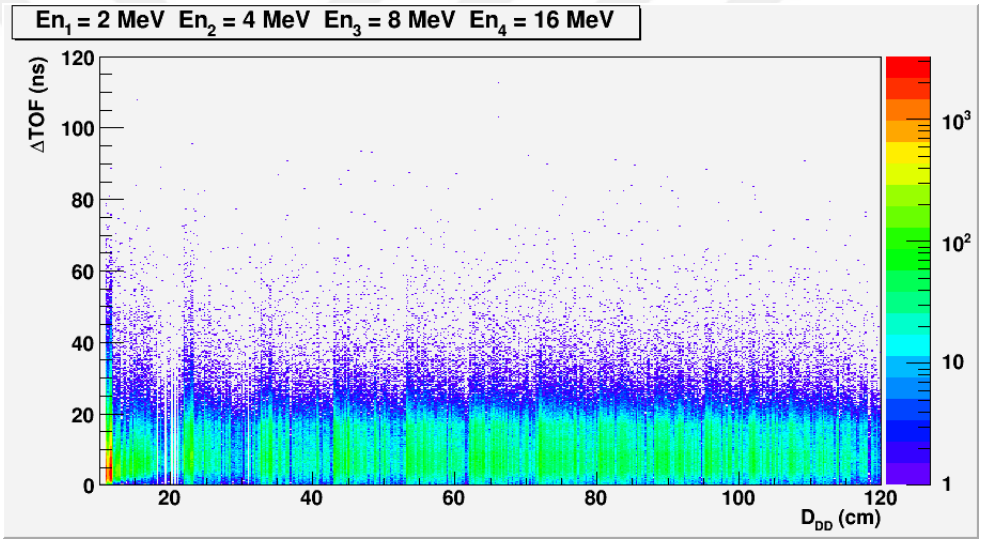
Şekil 4.14: İki nötronlu olaylarda dedektörler arası etkileşim (2 ve 4, 8, 16 MeV)



Şekil 4.15: İki nötronlu 30^o dedektörler arası etkileşim (4 ve 8, 16 MeV)



Şekil 4.16: İki nötronlu 30^o dedektörler arası etkileşim (2 ve 4, 8, 16 MeV))



Şekil 4.17: Tek nötronlu olaylarda dedektörler arası etkileşim (2, 4, 8, 16 MeV))

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında NEDA (NEutron Detector Array) dedektörü boyutlarında BC-501A sıvı sintilatör hücrelerinden oluşturulmuş dedektör modelinin nötronlarla etkileşimi sonucu oluşacak darbelerin simülasyonu ve analizi yapıldı. Simüle edilen nötron saçılması olayı, tek bir nötron için enerjisi 1 MeV'den 20 MeV'e kadar olan olaylar, etkileşimi farklı dedektör tipleri ve farklı kaynak-dedektör uzaklıkları ile incelendi.

Dedektör yapılandırıcı sayesinde silindirik, konik, hezagonal olmak üzere farklı şekil ve düz yüzeyden küresel yüzeye kadar tüm eğriliklerde gemetrik dizilimlerde dedektör dizileri oluşturuldu. Yapılandırıcıya gerçek bir dedektör tasarımında taşıyıcı aparatlardan kaynaklanacak boşluklar da girilebilmektedir. Tüm bu geometrik değerlerin parametrik olarak girilebilmesi dedektör ve dedektör dizilerinin tasarım sürecini hızlandırarak farklı dedektör modellerinin simülasyonda kullanımına imkan tanıdı. Modelin bir çıktı dosyası olarak kaydedilebilmesi sayesinde ROOT framework kullanılarak çeşitli uygulamalar tarafından da çağırılabilmektedir. Aynı model bir başka çalışmada GEANT4 simülasyonlarında da kullanıldı. (Doğangün, 2022)

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de görüldüğü üzere ilk çarpışmalar söz konusu olduğunda kenarlarda dedektör verimliliğinde bir düşüş yoktur ancak ilk çarpışma sonrasındaki etkileşimler göz önüne alındığında, komşu sayısı az olan dedektörlerde etkileşim olasılığı azaldığından verim düşmektedir.

Dedektör derinliğinin artırılması etkileşim olasılığını artırmaktadır. Ancak kaynak ile dedektör arasındaki mesafenin, dedektörün derinliğine olan oranı arttığından kaynak-dedektör merkezi doğrultusundaki konum belirsizliğini artırmaktadır.

Bu çalışmada yapılan simülasyon ile nötron enerjisine bağlı olarak, dedektör derinliği/uzunluğu arttırılsa bile etkileşime giren nötron sayısının azaldığı görülmektedir. Öte yandan Şekil 10'da görüldüğü üzere 20 cm dedektör derinliği 20 MeV'e kadar olan nötronları gözlemek için kabul edilebilir bir verimi sağlamaktadır.

Dedektör sayısındaki artış, dedektörlerle etkileşen nötron sayısının doğal olarak artmasına

neden olmakla birlikte, ikincil etkileşimlerin daha fazla yakalanabilmesini sağlamaktadır.

Dedektör çaplarını azaltmak kaynak-dedektör merkezi doğrultusuna dik koordinatlardaki ilk etkileşim noktasına ilişkin belirsizliği azaltmaktadır.

Çoklu dedektör dizilerinde, nötronların ilk etkileşmesinden sonraki etkileşmelerde, nötron enerjisi arttıkça daha uzağa saçılma oranlarının arttığı gözlendi. Aynı zamanda nötronun enerjisi arttıkça farklı dedektörler arasındaki uçuş zamanının (ΔTOF) kısaldığı gözlendi. Aynı grafiklerde dedektörler için algılanabilir zaman aralığında 2 ve 4 nötronun aynı anda geldiği durumlarda da aynı sonuç gözlendi. Bu durum Şekil 4.14'den Şekil 4.19'a kadar alınan grafiklerden görülmektedir.

Eğer sintilatörün her iki yüzeyinden de sinyal alınabilseydi, iki sinyal arası zaman farkından, kaynak-dedektör merkezi doğrultusundaki nötron etkileşim koordinatları çok daha hassas olarak gözlemlenebilirdi. Bu durumda uçuş zamanındaki (Time of Fligh) belirsizliği azaltılmış olurdu.

KAYNAKLAR

Azaiez, F. deFrance, G. Julin, R. Nolan, P.J. Nyakó, Barna Walker, P.M. Collaboration, EXOGAM Simpson, John Fouan, J. Korten, W. Sletten, G. Gerl, J.. (2000). The EXOGAM array: A radioactive beam gamma-ray spectrometer. *Acta Physica Hungarica A*. 11. 159-188.

Brun, R. Rademakers, F. (1997). ROOT — An object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 389. 81-86. 10.1016/S0168-9002(97)00048-X.

Bock, R. Brun, R. Couet, O. Marin, J. Nierhaus, R. Pape, L. Saumon, N. Vandoni, C. Zanarini, P.. (1987). PAW — Towards a physics analysis workstation. *Computer Physics Communications*. 45. 181-190. 10.1016/0010-4655(87)90154-8.

Brun R. Couet O. Cremel N. Vandoni C. Zanarini P.. (1988). PAW - Physics Analysis Workstation, *CERN Computer Centre Program Library Long Write-Up*.

CERN Root Team. (2024). https://root.cern/about/

O. Doğangün, F. Özok, U. Dündar and M.N. Erduran. (2022). A clustering algorithm based on jet algorithms for cross-talk events in neutron detector arrays. *Journal of Instrumentation* Volume 17,P11011. doi:10.1088/1748-0221/17/11/P11011

ENDF/B-V.2 Evaluated Nuclear Data Library documented in BNL-NCS-50496, edition 2, 1983 revision

GEANT4 Collaboration. (2003). Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. Volume 506, Issue 3. Pages 250-303. ISSN 0168-9002. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8. GEANT4 Collaboration. (2006). Geant4 Developments and Applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 53. 270-278. 10.1109/TNS.2006.869826. Asai, M. Dotti, A. Verderi, M. Wright, D. (2015). Recent developments in Geant4. Annals of Nuclear Energy. 82. 19-28. 10.1016/j.anucene.2014.08.021.

Dietze, G. Klein, H. (1982). Technical Report: NRESP4 and NEFF4 - Monte Carlo codes for the calculation of neutron response functions and detection efficiencies for NE 213 scintillation detectors (PTB-ND–22). Germany

Dietze, G. Klein, H.. (1982). Gamma-calibration of NE 213 scintillation counters. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 193. 549-556. 10.1016/0029-554X(82)90249-X.

Farnea, E. Recchia, F. Bazzacco, D. Kröll, T. Podolyák, Z. Quintana, B. Gadea, A.. (2010). Conceptual design and Monte Carlo simulations of the AGATA array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 621. 331-343. 10.1016/j.nima.2010.04.043.

Henning, W.. (2005). FAIR - An International Accelerator Facility for Research with Ions and Antiprotons. 10.1063/1.1949487.

Liquid Scintillator Data Sheet (BC-501 / BC-501A / BC-519) https://www.luxiumsolutions.com/sites/default/files/2021-09/BC501-501A-519-Data-Sheet.pdf

Johnstad, H. (1989). Physics Analysis Workstation. Nuclear Science, *IEEE Transactions on*. 36. 1568 - 1571. 10.1109/23.41103.

Katz R. Sharma S.C. Homayoonfar M.. (1972). Detection of energetic heavy ions. Nuclear Instruments and Methods. 100 , 13-32. DOI.10.1016/0029-554X(72)90264-9

Lee, I-Yang. I-Yang.. (1992). The Gammasphere. *Progress in Particle and Nuclear Physics*. 28. 10.1016/0146-6410(92)90049-8.

Lewitowicz, M. Boztosun, I. Balantekin, A.. (2008). The SPIRAL 2 Project. *AIP Conference Proceedings*. 1072. 148-153. 10.1063/1.3039818.

Skeppstedt, Ö. Roth, H.A. Lindström, L. Wadsworth, Robert Hibbert, I. Kelsall, N. Jenkins, D. Grawe, H. Górska, M. Moszynski, Marek Sujkowski, Z. Wolski, D. Kapusta, Maciej Hellström, M. Kalogeropoulos, S. Oner, D. Johnson, A. Cederkäll, J. Klamra, W. Eberth, J.. (1999). The EUROBALL neutron wall – design performance tests of neutron detectors. *Nuclear Instruments Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors Associated Equipment*. 421. 531-541. 10.1016/S0168-9002(98)01208-X.

Valiente-Dobón, J.J. Jaworski, G. Goasduff, A. Egea, F.J. Modamio, V. Hüyük, T. Triossi, A. Jastrzab, M. Söderström, P. Di Nitto, A. de France, G. Erduran, M.N. Gadea, A. Moszynski, M. Nyberg, J. Palacz, M. Wadsworth, R. Aliaga, R. Zanon, I.. (2019). NEDA—NEutron Detector Array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*. 927. 10.1016/j.nima.2019.02.021.

EKLER

EK 1. Olay Üreteci Örnek Dosyası

```
2                                                   1
1    -1    1    0    -2.06    0.67    -56.35    2.205E+00    3.5359E+00    1.3441E+01
1    -1    2    0    -0.77    1.43    -57.24    1.136E+00    2.1326E-01    8.4541E-01
-1
1                                                   1
1    -1    1    0    3.97    4.29    -61.44    4.013E+00    2.3529E+00    1.4711E+01
-1
1                                                   1
1    0    1    0    3.46    3.12    -50.99    6.576E+00    2.5454E-02    1.2203E+01
-1
1                                                   1
1    -1    1    0    0.53    4.71    -54.32    9.039E+00    1.3416E-02    1.2998E+01
-1
1                                                   1
1    -1    1    0    4.64    -1.30    -55.91    6.760E+00    8.1854E-01    1.3376E+01
-1
1                                                   1
1    0    1    0    -4.45    3.09    -56.92    6.610E+00    2.5127E-02    1.3628E+01
-1
3                                                   1
1    0    1    0    2.00    2.35    -65.02    6.559E+00    2.5614E-02    1.5516E+01
1    0    2    0    1.71    2.32    -59.50    4.765E+00    1.7402E-02    1.5595E+00
-1
1                                                   1
1    -1    1    0    3.08    1.99    -68.39    8.530E+00    9.9401E-02    1.6325E+01
-1
```

EK 2. Işık Çıkışı Örnek Dosyası

0.000000	61406
0.010000	89926
0.020000	209250
0.030000	76669
0.040000	11748
0.050000	27299
0.060000	29967
0.070000	18105
0.080000	16872
0.090000	15760
0.100000	14336
0.110000	12521
0.120000	10814
0.130000	9072
0.140000	7817
0.150000	6436
0.160000	5719
0.170000	4919
0.180000	4737
0.190000	4614
0.200000	5575
0.210000	7298
0.220000	9199
0.230000	12613
0.240000	7878
0.250000	2318
0.260000	2162

EK 3. Işık Çıkışı Örnek Dosyası (smoothed)

0.000	61406.0	0.0
0.010	89926.0	94982.4
0.020	209250.0	130683.6
0.030	76669.0	88838.1
0.040	11748.0	52085.6
0.050	27299.0	34531.8
0.060	29967.0	26523.7
0.070	18105.0	21914.6
0.080	16872.0	18739.7
0.090	15760.0	16345.6
0.100	14336.0	14377.5
0.110	12521.0	12636.7
0.120	10814.0	11049.2
0.130	9072.0	9616.9
0.140	7817.0	8375.6
0.150	6436.0	7373.7
0.160	5719.0	6660.6
0.170	4919.0	6268.9
0.180	4737.0	6184.7
0.190	4614.0	6323.9
0.200	5575.0	6539.0
0.210	7298.0	6663.6
0.220	9199.0	6573.7
0.230	12613.0	6228.5
0.240	7878.0	5671.2
0.250	2318.0	4996.2
0.260	2162.0	4306.9

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Umut DÜNDAR
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	[X] T.C. [ ] Diğer:
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Fakülte	Fen Edebiyat Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	2007

Makale ve Bildiriler

Makaleler

O. Doğangün, F. Özok, U. Dündar and M.N. Erduran. A clustering algorithm based on jet algorithms for cross-talk events in neutron detector arrays. Journal of Instrumentation, 2022;Volume 17,P11011. doi:10.1088/1748-0221/17/11/P11011