

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOZMİK NÖTRONLARIN PLASTİK
SİNTİLATÖRLERLE ALGILANMASI

Doğancan ARSLAN

YÜKSEK LISANS TEZİ
Fizik Anabilim Dalı
Fizik Programı

Danışman
Prof. Dr. Taylan YETKİN

Temmuz, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOZMİK NÖTRONLARIN PLASTİK SİNTİLATÖRLERLE
ALGILANMASI

Doğancan ARSLAN tarafından hazırlanan tez çalışması 16.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Fizik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Taylan YETKİN
İstinye Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Taylan YETKİN, Danışman
İstinye Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan TATLIPINAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ferhat ÖZOK, Üye
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Taylan YETKİN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan KOZMİK NÖTRONLARIN PLASTİK SİNTİLATÖRLERLE ALGILANMASI başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Doğancan ARSLAN

İmza



Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)
ARDEB 1001 Proje No 123F253 tarafından desteklenmiştir.

Aileme



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanma sürecinde katkı veren, destek sunan ve yanımda olan herkese teşekkürlerimi iletmek isterim.

Öncelikle, bu süreçte sahip olduğu bilgi, birikim ve tecrübeleriyle bu çalışmanın her aşamasında bana rehberlik eden sayın Prof. Dr. Taylan Yetkin'e göstermiş olduğu sabır, destekleyici yaklaşımı ve vermiş olduğu emek için en içten teşekkürlerimi sunarım. Çok değerli bilimsel yaklaşımı ve teşvik edici tutumu, bu tezin şekillenmesi ve ortaya çıkışında büyük rol oynamış; aynı zamanda bilimsel bakış açımı geliştirmemde ve akademik olgunluğa ulaşma yolculuğum da önemli katkılar sağlamıştır.

Hayatımın her döneminde desteklerini ve koşulsuz sevgilerini hissettiren her zaman yanımda olan teyzem Selma Şengül ve dedem Cemal Şengül'e sonsuz teşekkür ederim. Bugün hayatta olmasalar da varlıklarını ve sevgilerini her daim hissettiğim ve evlatları olmaktan her zaman gurur duyduğum sevgili annem Hülya Arslan, babam Efraim Arslan ve anneannem Belgüzar Şengül'e minnet ve özlemle teşekkür ediyorum ve bu tezi, tüm aileme ve onların anılarına ithaf ediyorum.

Doğancan ARSLAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Kozmik Işınlr ve Sınıflandırılması	1
1.1.1 Galaktik Kozmik Işınlr (GKI)	2
1.1.2 Güneş Kaynaklı Kozmik Işınlr	2
1.1.3 Ekstragalaktik Kozmik Işınlr (EKI)	2
1.2 İkincil Kozmik Işınlr	3
1.3 Kozmik Nötronların Oluşum Mekanizması	4
1.3.1 Birincil Kozmik Işın Etkileşimleri	4
1.3.2 Parçalanma Süreçleri	5
1.3.3 Nöronların Enerji Kayıpları ve Yer Seviyesine Ulaşması . .	5
2 NÖTRON FİZİĞİ	6
2.1 Termal ve Yüksek Enerjili Nötronlar	6
2.1.1 Termal Nötronlar	7
2.1.2 Yüksek Enerjili Nötronlar	7
2.1.3 Nötron Kaynakları	8
2.2 Nötronların Etkileşim Mekanizmaları	10
2.2.1 Nötron Saçılma Etkileşimleri	10
2.2.2 Nükleer Nötron Reaksiyonları	12
2.3 Kozmik Nötronların Spektral Dağılımları	15
2.3.1 Kozmik Nötron Spektrumuna Ait Deneysel Ölçümler	15
2.3.2 Yer Seviyesindeki Kozmik Nötron Ölçümleri	15

3 KOZMİK NÖTRON ALGILANMASI	19
3.1 Yavaş Nötronların Algılanması	19
3.1.1 Yöntemler	19
3.1.2 Dedektör Sistemleri	23
3.2 Hızlı Nötronların Algılanması	30
3.2.1 Bonner Küreleri	31
3.2.2 Küresel Nötron Dozimetreleri	31
3.2.3 Uzun Sayaçlar	31
3.2.4 Moderasyon Tabanlı Dedektörler	32
3.3 Kozmik Nötronların Algılanması	32
4 DEDEKTÖR TASARIMI VE SİMÜLASYONU	34
4.1 Kullanılan Program ve Metodlar	34
4.2 Dedektör Tasarımı ve Geometrisi	35
4.3 Malzemeler	39
4.3.1 Üreteç (Kurşun)	39
4.3.2 Moderatör (Polietilen)	41
4.3.3 Sintilatör	41
4.3.4 Yansıtıcı	42
4.4 Dedektör Boyutları	42
4.5 Fiziksel Süreçler	42
4.6 Dedektör Geometrisi için Simülasyonlar	43
4.6.1 Üreteçteki Nötron Etkileşimlerinin Simülasyonu	44
4.6.2 Dedektör Tasarımının Simülasyonu	45
5 SONUÇ	47
KAYNAKÇA	48
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	55

SİMGE LİSTESİ

E	Nötronun ortalama kinetik enerjisi
k	Boltzmann sabiti
T	Mutlak sıcaklık
v	Nötron hızı
R	Sertlik (manyetik rijitlik)
p	Parçacık momentumu
c	Işık hızı
Z	Parçacığın atom numarası (yük sayısı)
e	Temel elektrik yükü
I_0	Başlangıçtaki nötron akısı
$I(x)$	x kalınlığındaki malzemedeki geçen nötron akısı
σ	Tesir kesiti (çarpışma kesiti)
N	Atom yoğunluğu
x	Malzeme kalınlığı
λ	Ortalama serbest yol

KISALTMA LİSTESİ

BF ₃	Bor Triflorür (orantılı gaz dedektörü)
BERT	Bertini Ara-Çarpışma Modeli
EKİ	Ekstragalaktik Kozmik Işınlr
Geant4	Geometry and Tracking Version 4 (Monte Carlo simülasyon kütüphanesi)
GeV	Giga Elektron-Volt (enerji birimi)
GEP	Güneş Enerjili Parçacıklar
GLE	Ground Level Enhancement (Yer Seviyesinde Artma olayı)
GKI	Galaktik Kozmik Işınlr
GüKI	Güneş Kaynaklı Kozmik Işınlr
GV	Giga-Volt (sertlik birimi)
HP	High Precision (yüksek hassasiyetli veri seti)
KI	Kozmik Işınlr
KKA	Koronal Kütle Atımı
MeV	Mega Elektron-Volt
NM	Nötron Monitörü
Pb	Kurşun (üreteç katmanı)
QGSP	Quark-Gluon String + Pre-Compound Modeli
ROOT	ROOT Veri-Analiz Çatısı
YSA	Yer Seviyesinde Artma
ZnS(Ag)	Çinko Sülfür (Gümüş katkılı) sintilatör

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Birincil kozmik ışınların parçacık türlerine göre bileşenleri grafiği	1
Şekil 1.2	Kozmik ışınların algılanma yöntemleri, atmosfer içinde ve dışında gerçekleştirdikleri etkileşimler [12]	3
Şekil 1.3	a) Hava sağanağının bileşenlerinin basit bir şeması. (b) İkincil parçacıkların atmosferin alt tabakaları, yer üstü ve yer altında oluşturduğu etkiler [15].	4
Şekil 2.1	^{252}Cf kaynağından üretilen nötronlara ait spektrumu. Kaynak [23]'ten alıntılanmıştır.	9
Şekil 2.2	Esnek saçılma reaksiyonu	10
Şekil 2.3	Esnek olmayan saçılma reaksiyonu	11
Şekil 2.4	Fisyon reaksiyonu şematik gösterimi.	12
Şekil 2.5	Nötron yakalama reaksiyonu	13
Şekil 2.6	Bor için nötron enerjilerine göre yakalama tesir kesiti grafiği [25]	13
Şekil 2.7	Yüklü parçacık reaksiyonlarının genel şeması	14
Şekil 2.8	Nötron üretim reaksiyonlarının genel şeması	14
Şekil 2.9	Güneş aktivitesinin minimum olduğu dönemde yükseklik ve jeomanyetik enleme bağlı kozmik nötron üretimi. Kaynak [16]'dan alıntılanmıştır.	16
Şekil 2.10	Güneşin maksimum aktivite döneminde Şekil 2.9 ile yapılan ölçümler. Kaynak [16]'dan alıntılanmıştır.	16
Şekil 2.11	Atmosfer farklı derinliklerinde $0-10^\circ$ (a) $80-90^\circ$ (b) enlem bölgelerinde nötron ve protonların (1 MeV ile 1000 GeV kinetik enerji aralığında) diferansiyel enerji aralığı [16, 28].	17
Şekil 2.12	Kozmik ışınların ölçüm yöntemleri [29].	17
Şekil 3.1	$^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonu için nötron enerji seviyelerine göre tesit kesiti grafiği [37].	20
Şekil 3.2	$^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonunun şematik gösterimi.	21
Şekil 3.3	$^6\text{Li}(n, \alpha)$ reaksiyonu için nötron enerji seviyelerine göre tesit kesiti grafiği [37].	22
Şekil 3.4	$^3\text{He}(n, p)$ reaksiyonu için nötron enerji seviyelerine göre tesit kesiti grafiği [37].	22
Şekil 3.5	$^{157}\text{Gd}(n, \gamma)$ reaksiyonuna ait enerjiye göre tesir kesiti grafiği[38]	23

Şekil 3.6	BF ₃ orantılı gaz sayacının temel yapısı şematik gösterimi [40].	24
Şekil 3.7	Termal nötronların dedektör içerisinde gerçekleştirdiği ¹⁰ B(<i>n</i> , α) reaksiyon ürünlerinin tüm enerjilerini BF ₃ gazının içerisinde tükettiği durumda oluşan karakteristik pikler [23, 41].	25
Şekil 3.8	BF ₃ tüpü içerisinde gerçekleşen (<i>n</i> , α) reaksiyonu tüpün iç duvarı tarafından absorbe edilmesinin He çekirdeğinin erimi ile ilişkisi [40, 41].	25
Şekil 3.9	Termal nötronların dedektör içerisinde gerçekleştirdiği ¹⁰ B(<i>n</i> , α) reaksiyon ürünlerinin tüm enerjilerini BF ₃ gazının içerisinde tüketemediği durumda oluşan karakteristik pikler ve sürekli dağılım ile oluşan duvar etkisi [23, 40].	26
Şekil 3.10	α(He) eriminin reaksiyonun dedektör duvarından kısa kaldığı durumlarda α(He)'un dedektör duvarı tarafından emildiği durumlarda üretilen sinyal [40].	26
Şekil 3.11	⁷ Li çekirdeğin gaz içerisindeki eriminin reaksiyonun gerçekleştirdiği noktanın dedektör duvarına olan uzaklığından düşük olduğu durumlarda oluşan sinyal [40].	27
Şekil 3.12	Bor kaplamalı orantılı gaz sayaçlarının temel yapısı [40].	27
Şekil 3.13	UO ₂ için (a) 0,0286 μm ve (b) 0,714 μm kalınlıklarındaki enerji spektrumları [47].	30
Şekil 3.14	³ He uzun sayacının genel tasarım şeması [52].	32
Şekil 4.1	NM64 Dedektörünün şematik yanal kesit [51]	36
Şekil 4.2	Dedektör tasarımının yanal kesiti şeması	37
Şekil 4.3	Geant4 simülasyonunda oluşturulmuş üreteç katmanının görseli	37
Şekil 4.4	Geant4 simülasyonunda oluşturulmuş üreteç ve moderatör katmanının görseli	38
Şekil 4.5	Geant4 simülasyonunda oluşturulmuş üreteç, moderatör ve plastik sintilatör katmanının görseli	38
Şekil 4.6	Geant4 simülasyonunda oluşturulmuş üreteç, moderatör, plastik sintilatör ve yansıtıcı katmanının görseli	39
Şekil 4.7	Kurşun (Pb) için nötron tesir kesiti grafiği [64]	40
Şekil 4.8	Kullanılan materyallerin ölçeklerinin simülasyon üzerinde gösterilmesi	43
Şekil 4.9	700 MeV nötronlar için olay başına üreteçte üretilen ikincil nötron sayısı	44
Şekil 4.10	700 MeV nötronlar için sayım başına üreteçte üretilen ikincil nötron enerjileri	44
Şekil 4.11	700 MeV nötronlar için olay başına üreteçte üretilen ikincil nötronların görselleştirilmesi	45

Şekil 4.12 Geant4 GUI arayüzünde kozmik nötron etkileşimlerinin görselleştirilmesi	45
Şekil 4.13 Geant4 GUI arayüzünde alfa etkileşimlerinden sintilasyon fotonlarının üretilmesinin görselleştirilmesi	46



TABLO LİSTESİ

- Tablo 4.1** Geant4'ün NIST (National Institute of Standards and Technology) veri tabanından kurşun blok ile ilgili aldığı bilgiler [65]. 39
- Tablo 4.2** Geant4'ün veri tabanındaki elementler ile polietilen malzemenin özellikleri. 41



KOZMİK NÖTRONLARIN PLASTİK SİNTİLATÖRLERLE ALGILANMASI

Doğancan ARSLAN

Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Taylan YETKİN

Bu çalışma, yüksek enerjili kozmik nötronların yer seviyesinde plastik sintilatörler aracılığıyla tespit edilmesini amaçlamaktadır. Plastik sintilatörlerde oluşan optik fotonlara dayalı bir algılama yönteminin, mevcut gazlı dedektörlere kıyasla avantaj sunabilecek bir alternatif oluşturup oluşturamayacağının araştırılmasını hedeflemektedir. Kozmik nötronlara dayalı ölçümler, düşük enerjili protonlara kıyasla yer seviyesindeki akı artışlarını daha erken saptayabilme potansiyeli taşıdığından, bu nötronlar özellikle Güneş kaynaklı radyasyon fırtınaları için erken uyarı sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Ancak günümüzde, bu yüksek enerjili nötronları doğrudan tespit edebilecek sadece gazlı dedektörler kullanılmaktadır. Mevcut dedektör sistemlerin büyük çoğunluğu, yüksek enerjili nötronları polietilen gibi hidrojen içeriği yüksek malzemeler aracılığıyla termalize ederek, algılanabilir enerji seviyelerine indirgeme prensibiyle çalışmaktadır. ${}^3\text{He}$ gazı ile çalışan orantılı sayaçlar, hâli hazırda nötron algılanmasında en güvenilir sonuçları veren sistemler olarak kabul edilmektedir. Ancak, ${}^3\text{He}$ gazının küresel düzeyde temininde yaşanan sıkıntılar, bu sistemlerin yerini genellikle BF_3 gazı kullanılan alternatiflere bırakmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, BF_3 gazının patlayıcı, toksik ve korozif özellikleri nedeniyle, daha güvenli ve çevresel açıdan sürdürülebilir dedektör sistemlerine duyulan ihtiyaç artmıştır. Bu çerçevede, geleneksel gazlı dedektörlerin sahip olduğu sınırlamaları taşımayan ve benzer dedeksiyon verimliliği sunan alternatif sistemlerin araştırılması önem kazanmıştır. Son yıllarda, ${}^{10}\text{B}$ ve ${}^6\text{Li}$ gibi izotoplar aracılığıyla gerçekleşen esnek olmayan saçılma reaksiyonlarına dayalı nötron dedektörleri umut verici sonuçlar

ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, çalışmada (ZnS:Ag) gibi gümüşle aktive edilmiş çinko sülfür ve ^{10}B reaksiyonlarından ortaya çıkan ikincil parçacıkları tespit etme kapasitesine sahip plastik sintilatörler kullanılarak kozmik nötronların algılanabilirliği incelenmiştir. Geant4 tabanlı Monte Carlo simülasyonları ile yürütülen bu çalışmada elde edilen veriler, ROOT veri analiz kütüphanesi kullanılarak değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, plastik sintilatörlerin kozmik nötronları etkin biçimde tespit edebildiğini göstermekte olup, bu yöntemin yüksek enerjili nötron algılanmasında uygulanabilir ve pratik bir alternatif oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulguların deneysel olarak doğrulanmasına yönelik ileri düzeyde çalışmalar planlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kozmik Işınlr, Kozmik Nötron Monitörü, Sintilatör, ^{10}B .



ABSTRACT

DETECTION OF COSMIC NEUTRONS WITH PLASTIC SCINTILLATORS

Doğancan ARSLAN

Department of Physics
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Taylan YETKIN

This study aims to detect high-energy cosmic neutrons at ground level using plastic scintillators. It investigates whether a detection method based on the optical photons generated in these scintillators can offer an advantageous alternative to the gas-filled detectors currently in use. Because measurements based on cosmic neutrons can detect flux increases at ground level earlier than those based on low-energy protons, neutrons play a critical role in early-warning systems for solar radiation storms. Today, however, only gas-filled detectors are used to register these high-energy neutrons directly. Most existing systems operate on the principle of moderating high-energy neutrons—typically with hydrogen-rich materials such as polyethylene—until they reach energies that can be detected. Most existing systems operate on the principle of moderating high-energy neutrons—typically with hydrogen-rich materials such as polyethylene—until they reach energies that can be detected. Proportional counters filled with ^3He gas are currently regarded as the most reliable systems for neutron detection. However, shortages in the global supply of ^3He have led laboratories to adopt alternatives that employ BF_3 gas instead. Because BF_3 is explosive, toxic, and corrosive, the need for safer and more environmentally sustainable detector systems has grown. Consequently, it has become important to explore alternative technologies that avoid the limitations of conventional gas detectors while delivering comparable detection efficiency. In recent years, neutron detectors that exploit inelastic scattering reactions on isotopes such as ^{10}B and ^6Li have delivered promising results. In this study, the detectability of cosmic neutrons was assessed with plastic scintillators — e.g., silver-activated

zinc sulfide (ZnS:Ag) — that can register the secondary charged particles produced in ^{10}B reactions. Monte Carlo simulations were performed with the Geant4 toolkit, and the output data were analyzed using the ROOT framework. The results show that plastic scintillators can efficiently detect cosmic neutrons, indicating that this technique could serve as a practical and viable alternative for high-energy neutron detection. Advanced experimental work is planned to validate these findings.

Keywords: Cosmic Rays, Cosmic Neutron Monitor, Scintillator, ^{10}B .



1.1 Kozmik Işımlar ve Sınıflandırılması

Dünya atmosferi dışındaki çeşitli kaynaklar tarafından çok yüksek hızlara ivmelendirilen yüklü parçacıklardan oluşan kozmik ışınlar (KI), ilk kez 1912 yılında Victor Hess'in gerçekleştirdiği balon deneyleri ile keşfedilmiştir. Bu deneylerde elektrometreler 5 km'nin üzerindeki irtifalara çıkarılmış ve atmosferdeki iyonlaştırıcı radyasyonun arttığı gözlemlenmiştir [1]. Günümüzde KI'ların yaklaşık %89'unun protonlardan, %10'unun alfa parçacıklarından ve %1'inin ise ağır iyonize çekirdeklerden oluştuğu bilinmektedir [2, 3]. Kozmik ışınların bileşimleri Şekil 1.1 de grafik olarak gösterilmiştir. KI'ların enerjileri ise 10^6 eV ile 10^{20} eV arasında olduğu bilinmektedir [4, 5].



Şekil 1.1 Birincil kozmik ışınların parçacık türlerine göre bileşimleri grafiği

KI'lar, oluştukları kaynaklara göre temel olarak, galaktik, güneş kaynaklı ve ekstragalaktik ışınlar olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir.

1.1.1 Galaktik Kozmik Işımlar (GKI)

Yapılan ölçümler, özellikle yüksek enerjili kozmik ışınların oluşum mekanizmalarına ilişkin çeşitli spekülatif yorumların ortaya atılmasına neden olsa da, bu parçacıkların büyük ölçüde galaktik etkileşimler sonucu üretildiği düşünülmektedir [4]. Galaksiler arası bölgelerde gerçekleşen etkileşimlerle uzay boşluğunda hızlandırılan kozmik ışınların, Dünya atmosferine saniyede ortalama 1000 parçacık ulaşacak şekilde girdikleri bilinmektedir [6].

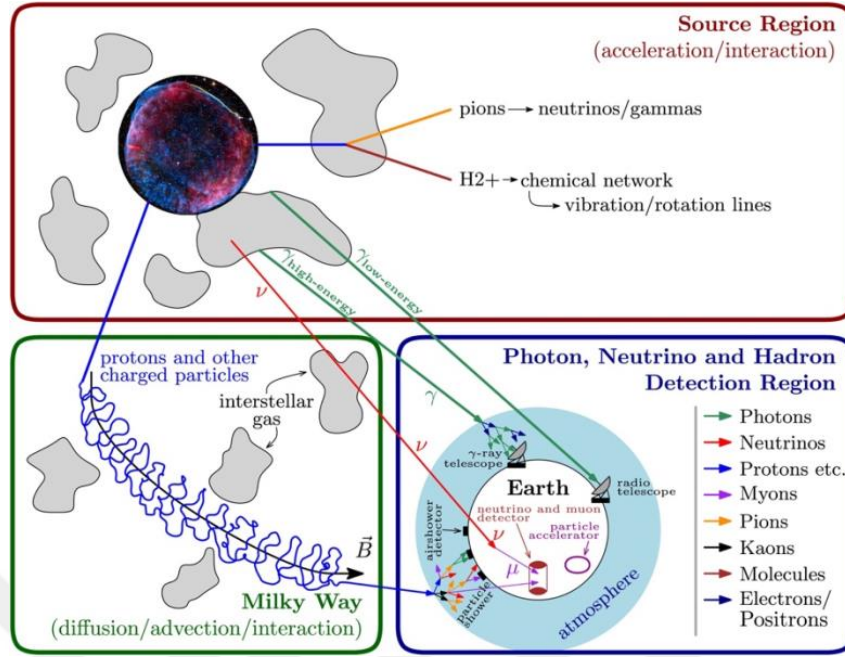
1.1.2 Güneş Kaynaklı Kozmik Işımlar

Güneş'te meydana gelen reaksiyonlar sonucunda da yüksek enerjili parçacıklar oluşmakta ve bu parçacıklar Dünya atmosferine ulaşabilmektedir. Özellikle Güneş'te gerçekleşen koronal kütle atımları (KKA) veya ani patlamalar gibi olaylar sırasında, atmosferimize ulaşan Güneş kaynaklı kozmik ışın akılarında belirgin artışlar gözlemlenmektedir [7, 8]. Enerji değerleri 1-100 MeV aralığında ve görece olarak düşük olması sebebiyle Dünya'nın manyetik alanı tarafından saptırılırlar [9]. Ancak bu parçacıklar, Van Allen kuşağı içerisinde görev yapan uzay araçları üzerinde ve Dünya'nın kutup bölgelerinde etkili olabilmektedir. Kutup bölgelerinde ise, aurora borealis (kuzey ışıkları) olarak bilinen ve görünür dalga boyunda gerçekleşen ışımalara yol açmaktadırlar [9]. Galaktik kozmik ışınların (GKI) büyük bir kısmını oluşturan protonlar, Güneş tarafından yüksek enerjilere kadar hızlandırılabilir. Bu tür Güneş kaynaklı akı ve enerji değişimlerine sahip parçacıklar, Güneş enerjili parçacıklar (GEP) olarak adlandırılmaktadır. Yapılan gözlemler, Güneş enerjili parçacıkların enerjilerinin gigaelektronvolt (GeV) mertebelerine kadar ulaşabildiğini göstermektedir. Ayrıca Güneş'in yaklaşık 11 yıllık periyotlarla yön değiştiren manyetik alanı, solar maksimum dönemlerinde Güneş lekeleri ile plazma atımı (Güneş rüzgârı) olaylarının daha sık meydana gelmesine neden olmaktadır. Elektron ve proton plazması şeklinde gerçekleşen Güneş rüzgârları, güçlü manyetik alanları nedeniyle galaktik kozmik ışınlarla etkileşime girerek, atmosferimize ve yer seviyesine ulaşan kozmik ışın akılarının yoğunluğunu ve enerji spektrumunu etkileyebilmektedir [10].

1.1.3 Ekstragalaktik Kozmik Işımlar (EKI)

Enerji değerleri 10^{18} eV ve üzerinde olan enerjilere sahip kozmik ışınların Samanyolu Galaksi'sinin dışındaki ekstragalaktik bölgeden geldiği düşünülmektedir [11]. Ekstragalaktik kozmik ışınların kaynağı tam olarak belirlenememiştir fakat aktif galaksi çekirdekleri, gama ışını patlamaları ya da kuasarlar tarafından üretildikleri tahmin edilmektedir. Kozmik ışınların galaktik

bölgelerdeki oluşumları ve algılama yöntemleri Şekil 1.2 de şematize edilmiştir.

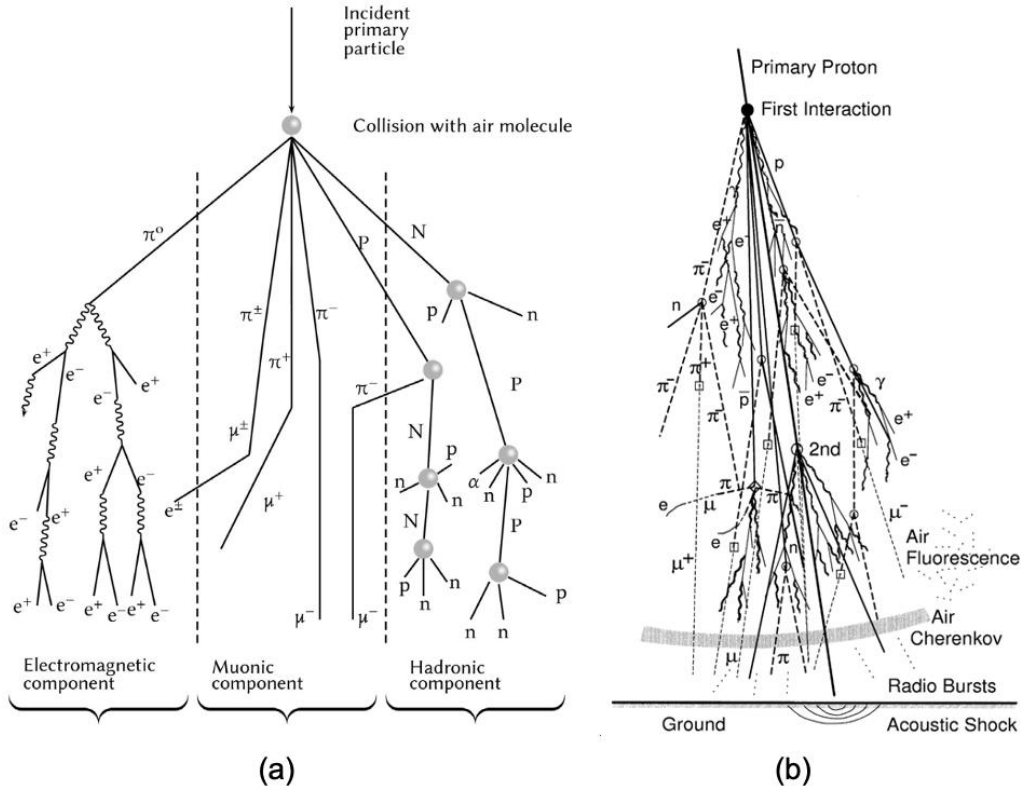


Şekil 1.2 Kozmik ışınların algılama yöntemleri, atmosfer içinde ve dışında gerçekleştirdikleri etkileşimler [12]

1.2 İkincil Kozmik Işınlr

1938 yılında, önce dağlık bölgelerde yüksek irtifalarda, ardından deniz seviyesinde Geiger sayacı kullanılarak yapılan tesadüf (koinsidans) ölçümleri sonucunda Pierre Auger, “geniş hava duşları” (extensive air showers) fenomenini keşfetmiştir [13]. Bu çalışmalarla, çeşitli kaynaklarda üretilen birincil kozmik ışınların Dünya atmosferine girdiklerinde gerçekleştirdikleri etkileşimler sonucunda bozunarak ikincil temel parçacıklara dönüştüğü ve bu süreçte yoğun bir ikincil parçacık akısı oluştuğu anlaşılmıştır. Hava sağanakları hadronlar (proton ve diğer çekirdekler), gamalar, elektronlar veya nötrinolar başlatabilirler fakat büyük çoğunlukla yüksek enerjili ($E > 10^{13}$ eV) kozmik hadronlar tarafından başlatılabilirler. Atmosferdeki çekirdekler ile etkileşime giren birincil parçacıklar çok sayıda ikincil parçacık üretebilir. Yaklaşık 10^{15} eV mertebesinde enerjiye sahip tek bir birincil yüksek enerjili parçacığın atmosferde başlattığı reaksiyonlar sonucunda, yaklaşık 10^6 adet ikincil parçacığın üretildiği tahmin edilmektedir [14]. Şekil 1.3 hava sağanaklarının basitleştirilmiş bir şemasını göstermektedir. Atmosfere dik yönde giren kozmik protonların, yer seviyesine ulaşmadan önce atmosfer içinde ortalama olarak 12 nükleer etkileşim geçirdiği bilinmektedir. Oluşan ikincil parçacıklar atmosferdeki çekirdekler ile çarparak daha fazla ikincil parçacık üretir. Bu ikincil parçacık üretim zinciri atmosferik çağlayan (cascade) olarak adlandırılır. Üretilen

ikincil parçacıkların, deniz seviyesinde yaklaşık 10.000 m²'lik bir alana yayıldığı ve bu parçacıkların çoğunluğunu fotonlar, elektronlar, müonlar ve hadronların oluşturduğu öngörülmektedir [15]. Atmosferde meydana gelen bu parçacık seli, yani hava sağanağı (air shower), bileşenleri bakımından üç ana grupta incelenebilir: elektromanyetik, müonik ve hadronik bileşenler.



Şekil 1.3 a) Hava sağanağının bileşenlerinin basit bir şeması. (b) İkincil parçacıkların atmosferin alt tabakaları, yer üstü ve yer altında oluşturduğu etkiler [15].

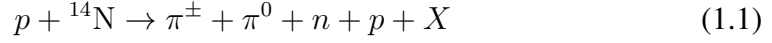
1.3 Kozmik Nötronların Oluşum Mekanizması

Kozmik nötronlar, birincil kozmik ışınların atmosferde gerçekleştirdiği nükleer reaksiyon zinciri sonucunda oluşan kozmik sağanakların bir parçası olarak meydana gelir. Yüksek enerjili galaktik kozmik ışınları Dünya atmosferine nüfuz etmesiyle oluşurlar ve yeryüzünde dedekte edilebilen nötron akısının temel kaynağını oluştururlar [16].

1.3.1 Birincil Kozmik Işın Etkileşimleri

Yüksek enerji değerlerinde atmosfere giren parçacıklar, atmosferin üst katmanlarında azot ¹⁴N, oksijen ¹⁶O ve argon ⁴⁰Ar olmak üzere atmosferdeki

moleküllerle çarpışarak nükleer reaksiyonları başlatırlar. Bu reaksiyonlar çeşitli mezonlar, baryonlar ve serbest nötronların üretildiği etkileşimler zincirini meydana getirir [15]. Azot ile etkileşen bir protonun birincil nötron reaksiyonlarına bir örnek



reaksiyonudur. Bu reaksiyon sonucunda bir dizi parçacık ve serbest bir nötron oluşumu görülmektedir.

1.3.2 Parçalanma Süreçleri

Kozmik nötronlar hadronik reaksiyonlar sonucunda üretilmesinin yanı sıra birincil kozmik parçacıkların atmosferde bulunan atom çekirdeklerini spallasyona uğratması (parçalaması) ile de üretilir. Spallasyon sonucu orta çıkan nötron sayısı, gelen yüksek enerjili parçacığın enerjisine, hedef çekirdeğin cinsine ve çarpışmanın türüne bağlı olarak farklılık göstermektedir [11].

1.3.3 Nötronların Enerji Kayıpları ve Yer Seviyesine Ulaşması

Atmosferde nötronlar üretildiği andan itibaren çeşitli soğurulma ve saçılma süreçlerinden geçmeye başlar. Hidrojen içeren moleküller ile esnek saçılma yaparak ya da inelastik saçılma ile enerjilerinin bir kısmını atmosferde bulunan moleküllere aktararak yavaşlar ve enerji kaybederler.

Bunu yanı sıra etkileşime girdiği çekirdek tarafından soğurularak tamamen ortadan kaybolabilirler. Bu etkileşim süreçlerini başlatan birincil kozmik parçacık yeterli enerji değerine sahipse (kutuplarda 0,2 gigavolt (GV)'den veya ekvator da ~ 15 GV'den fazla sertliğe sahipse) oluşturacağı ikincil parçacıklar yer seviyesine ulaşabilir [17]. Burada sertlik (R) bir parçacığın manyetik alanların oluşturduğu saptırma etkisine karşı gösterdiği direnci ifade eder.

$$R = \frac{pc}{Ze} \quad (1.2)$$

Burada, p parçacığın momentumu, c ışık hızı, Z parçacığın atom numarası (yük sayısı), e temel yük olarak verilir. Yalnızca yeterli sertliğe sahip olan parçacıkların yer seviyesine ulaşması sonucunda gözlenen en enerjik olaylar Yer Seviyesinde Artma (Ground Level Enhancement -GLE) olarak isimlendirilirler.

2 NÖTRON FİZİĞİ

Rutherford'un 1920'lerde atom modelinde öngördüğü nötr parçacık 1932 yılında James Chadwick tarafından keşfedilmiştir. Chadwick, hafif elementlerin (örneğin berilyum) alfa parçacıkları ile bombalanması sonucu yüksek nüfuza sahip fakat yüksüz bir parçacıkların yayınlandığını keşfetti. Proton ile yakın kütleyle sahip olan parçacıkları elektriksel yüke sahip olmaması sebebiyle nötr ön ekinden yola çıkarak "nötron" olarak adlandırdı [18]. Günümüzde nötronlar, atom çekirdeğinde yer aldıkları için protonlarla birlikte "nükleon" olarak sınıflandırılmaktadır. Nötronlar yarım ($1/2$) spin değerine sahip olmaları ve Pauli dışarlama ilkesine uyması sebebiyle fermion olarak sınıflandırılırlar. Ayrıca bir yukarı kuark ($u = 2e/3$) ve iki aşağı kuark ($d = -e/3$) olmak üzere toplamda üç kuarktan (udd) oluşmaları sebebiyle hadron ailesine ait yüksüz bir baryondur [19].

Kütlesi $1,675 \times 10^{-27}$ kg olan nötronlar atom çekirdeğinin kütesini büyük ölçüde belirlemektedir. Nötron sayısının değişmesi ile aynı elemente ait farklı izotoplar oluşmaktadır (Örneğin; ^{12}C , ^{13}C ve ^{14}C izotoplarında sırasıyla 6, 7 ve 8 nötron vardır) [20]. Atom çekirdeğinde kararlı yapıda olmalarına karşın serbest halde $\sim 878,6$ s ömre sahiptir [21]. Serbest haldeki nötronlar Denklem 2.1 ile gösterilen β bozunmasına uğrayarak bir proton, bir nötron ve bir antinötrino açığa çıkarırlar [22]:

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e \quad (2.1)$$

2.1 Termal ve Yüksek Enerjili Nötronlar

Nötronlar enerji seviyelerine göre yüksek enerjili ve termal nötronlar olmak üzere iki ayrı başlık altında incelenebilir [20]. Yüksek enerjili ve termal nötronların yanı sıra 0,025 eV ile ~ 1 eV arasında enerjiye sahip nötronlar epitermal nötron, ~ 1 eV ile ~ 1 keV enerji aralığındaki nötronlar ise yavaş nötron olarak adlandırılmaktadır [20].

2.1.1 Termal Nötronlar

Bulunduğu ortam sıcaklığı ile termodinamik dengede olan serbest nötronlar termal nötron olarak adlandırılmaktadır. Klasik kinetik teoriye göre;

$$E = \frac{3}{2}kT \quad (2.2)$$

E : Nötronun ortalama kinetik enerjisi

k : Boltzmann sabiti, $\approx 1,380649 \times 10^{-23}$ J/K

T : Mutlak sıcaklık

olarak verilen ifadede ortalama çevre sıcaklığı 300 K kabul edildiğinde kinetik enerjileri yaklaşık olarak 0,025 eV olarak elde edilir [23]. Bu değer kullanılarak nötronun hızı $v = \sqrt{2E/m}$ bağıntısı ile yaklaşık olarak 2200 m/s olarak hesaplanmaktadır. Bu enerji ve hız değerlerindeki nötronlar genellikle daha yüksek enerji değerlerindeki nötronların çeşitli nükleer etkileşimlere uğraması sonucunda enerji kaybetmeleri sonucunda ortaya çıkmaktadır. Moderatör olarak adlandırılan maddesel ortamlar ile saçılmalar yaparak enerji kaybeder ve termal nötronlara dönüşürler. Bu olay termalizasyon olarak adlandırılmaktadır. Nötronları termalize etmek için kullanılan moderatör malzemeler genellikle hidrojen yoğunluğu yüksek maddelerdir (H_2O , D_2O , polietilen vb.) [20].

Enerjisi düşük olan nötronların yakalama tesir kesiti (σ) bir çok izotop için çok büyük olduğu için nükleer yakalama ve fisyon gibi reaksiyonlara girme olasılığı yüksektir. Bu özelliklerinden dolayı nötronlar fisyon reaksiyonlarını başlatmak için kritik bir önem arz etmektedirler [20].

2.1.2 Yüksek Enerjili Nötronlar

Bir nötronun yüksek enerjili olarak tanımlanabilmesi için genellikle 20 eV kinetik enerjinin üzerinde serbest bir nötron olma koşulunu sağlıyor olması gerekmektedir. Literatürde yer alan bazı kaynaklara göre bu enerji değeri daha yüksek (~ 100 eV) kabul edilmektedir [20].

Yüksek enerjili nötronlar madde ile girdikleri etkileşimlerde taşıdıkları yüksek kinetik enerji sebebiyle çekirdek parçalanmalarına sebep olabilirler. Bu özelliklerinden kaynaklı olarak nükleer fizik açısından kritik bir öneme sahiptirler. Elektriksel yük taşımadıkları için yüksek nüfuz özelliğine sahiptirler ve madde içerisinde uzun mesafeler kat edebilirler. Etkileşimleri sırasında geniş spektrumda

ikincil parçacık üretirler. Bunların yanı sıra yüksüz oldukları için doğrudan iz bırakmazlar. Bu sebeple doğrudan algılanmaları mümkün değildir [24].

2.1.3 Nötron Kaynakları

Nötronlar doğal kaynaklardan üretildiği gibi yapay kaynaklardan da üretilir. Genel anlamda;

- Kendiliğinden Fisyon
- Radyoizotop (α , n) Kaynakları
- Fotonötron Kaynakları
- Hızlandırılmış Yüklü Parçacıkların Tepkimeleri

nötron kaynakları olarak ele alınabilir [23].

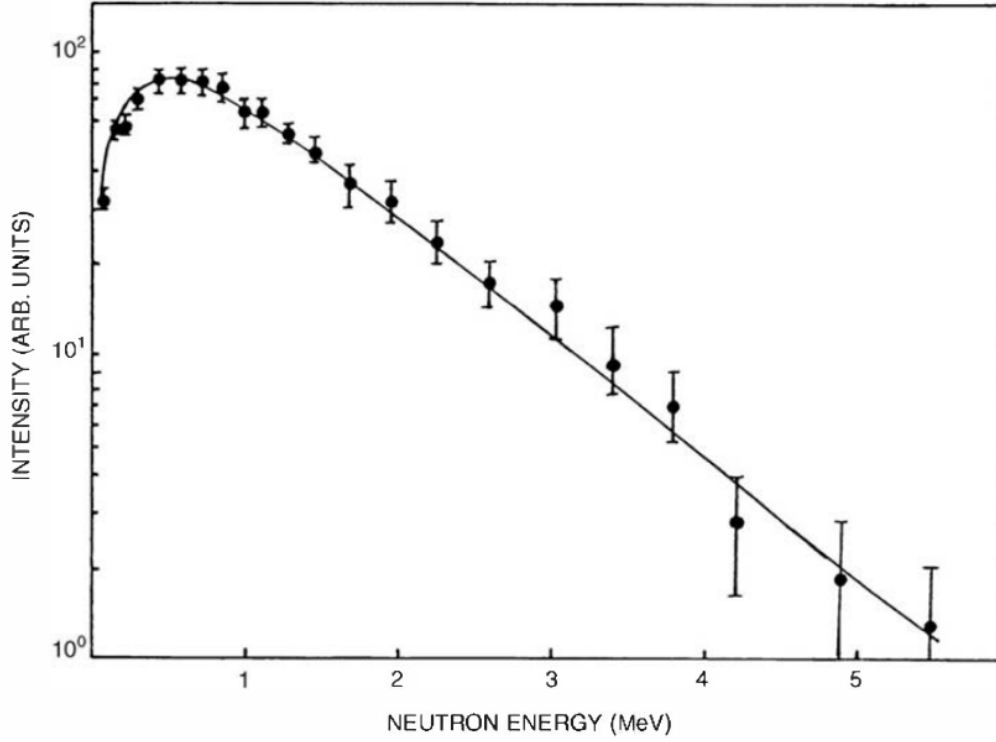
Kendiliğinden Fisyon atom çekirdeğinin kendiliğinden parçalanarak daha küçük bir çekirdeğe bölünmesi durumudur. Transuranik ağır nükleitlerin birçoğunun kendiliğinden bozunma olasılığı vardır. Üretimi fazla olduğu ve verimi nedeniyle en yaygın kullanılan kendiliğinden fisyon nötron kaynağı ^{252}Cf 'dir. Bu kaynaktan üretilen nötronların enerji spektrumu genelde 0,5 ile 1 MeV arasında tepe noktasına ulaşmıştır. Ancak 8 ile 10 MeV'ye kadar uzanan bir nötron enerjisi dağılımı söz konusudur (Şekil 2.1) [23].

Radyoizotop (α , n) Kaynakları radyonüklidlerin yüksek enerjiye sahip alfa parçacıkları ile vurulması yoluyla küçük bir nötron kaynağı üretilir. Maksimum nötron verimi sağlamak adına genellikle berilyum hedef kullanılır.



reaksiyonunda görüldüğü gibi reaksiyon sonrasında ürün olarak bir ^{12}C ve bir nötron oluşmaktadır. Oluşan nötronun spektrumu 13 MeV'e kadar ulaşmaktadır [23, 25].

Fotonötron Kaynakları uygun hedef malzemeye, yeterli enerji, gama ışını gönderildiğinde nötron üretilmesi mümkündür. Bu nötronlara foto-nötron denir. Sadece ${}^9\text{Be}$ ve ${}^2\text{H}$ hedefleri pratikte gama ile vurularak nötron üretmeye



Şekil 2.1 ^{252}Cf kaynağından üretilen nötronlara ait spektrumu. Kaynak [23]'ten alıntılanmıştır.

uygundur [23]:

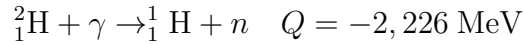
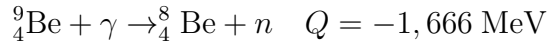
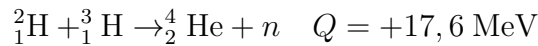
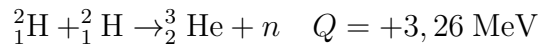


Foto-nötronlar neredeyse tek enerjiye sahiptir ve yaklaşık 24 keV gibi düşük enerjilere sahiptir [20].

Hızlandırılmış yüklü parçacık tepkimeleri nötron üretmek için kullanılan etkili yöntemlerden biridir. Bu yöntemle nötron üretimi yaparken kullanılan iki reaksiyon;



şeklinde. Bu reaksiyonlarda kullanılan döteryum iyonları yaklaşık 100-300 kV'luk bir potansiyel farkı ile hızlandırılırlar ve bu tür cihazlara nötron üreteçleri ismi verilmektedir [23].

2.2 Nötronların Etkileşim Mekanizmaları

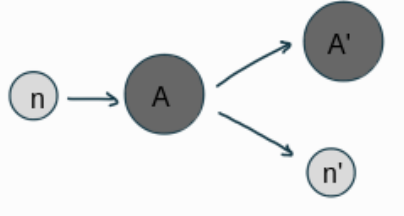
Nötronların yüksüz parçacıklar olduklarından elektromanyetik etkileşime girmezler. Bu sebeple nötronlar fotonlardan veya yüklü parçacıklardan farklı davranış sergilerler. Madde içerisinde sadece atom çekirdekleri ile nükleer etkileşimlere girebilirler. Gerçekleştirdikleri nükleer etkileşim türleri taşıdıkları kinetik enerji, atom çekirdeğinin türüne ve ortam sıcaklığı gibi dış etkenlere bağlı olarak çeşitlilikler göstermektedir [20, 26]. Temelde nötron etkileşimleri saçılmalar ve nükleer reaksiyonlar olmak üzere iki başlık altında incelenebilir.

2.2.1 Nötron Saçılma Etkileşimleri

Saçılma reaksiyonları genel anlamda hedefteki çekirdek ile çarpışmalar sonucunda esnek veya esnek olmayan saçılma olarak iki farklı şekilde gerçekleşebilir.

2.2.1.1 Esnek Saçılma

Esnek saçılmalarda hedefte yer alan çekirdek ile nötronun çarpışması sonucunda toplam kinetik enerji ve çekirdek yapısı korunur. Esnek saçılma reaksiyonu için açıklayıcı bir çizim Şekil 2.2 ile verilmiştir. Çarpışmanın ardından hedef çekirdek ve nötron yön ve hız değiştirebilir, fakat toplam kinetik enerji korunur. Nötron termalizasyon süreçlerinde saçılmalar önemli bir yer tutmaktadır.



Şekil 2.2 Esnek saçılma reaksiyonu



n : nötron

A : Atom Çekirdeği (Temel Enerji Seviyesinde)

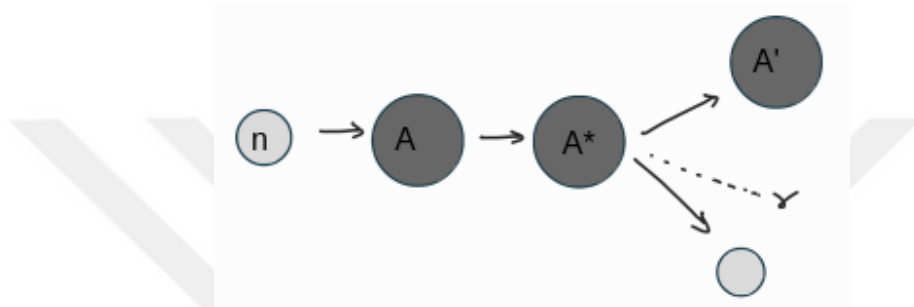
n' : Saçılan daha düşük enerjili nötron

A' : Saçılan Çekirdek (Temel Enerji Seviyesinde)

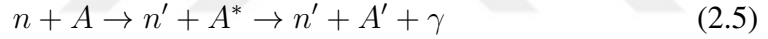
Hafif çekirdeklerle gerçekleştirilen saçılmalar sonucunda (hidrojen, karbon vb.) nötronlar enerjilerinin bir kısmını çekirdeğe aktararak yavaşlarlar. Bu nedenle nötron dedektör sisteminde moderatör katmanında hafif çekirdeklerin yoğunlukta olduğu malzemeler tercih edilmektedir.

2.2.1.2 Esnek Olmayan Saçılma

Esnek olmayan saçılma türünde çarpışma sonucunda kinetik enerji korunmaz ve Şekil 2.3 ile gösterildiği gibi nötronun hedef çekirdeğe aktardığı kinetik enerjinin bir kısmı çekirdeğin uyarılması ile iç enerjiye dönüşür.



Şekil 2.3 Esnek olmayan saçılma reaksiyonu



n : nötron

A : Atom Çekirdeği (Temel Enerji Seviyesinde)

n' : Saçılan daha düşük enerjili nötron

A^* : Saçılan Çekirdek (Uyarılmış)

A' : Saçılan Çekirdek (Temel Enerji Seviyesinde)

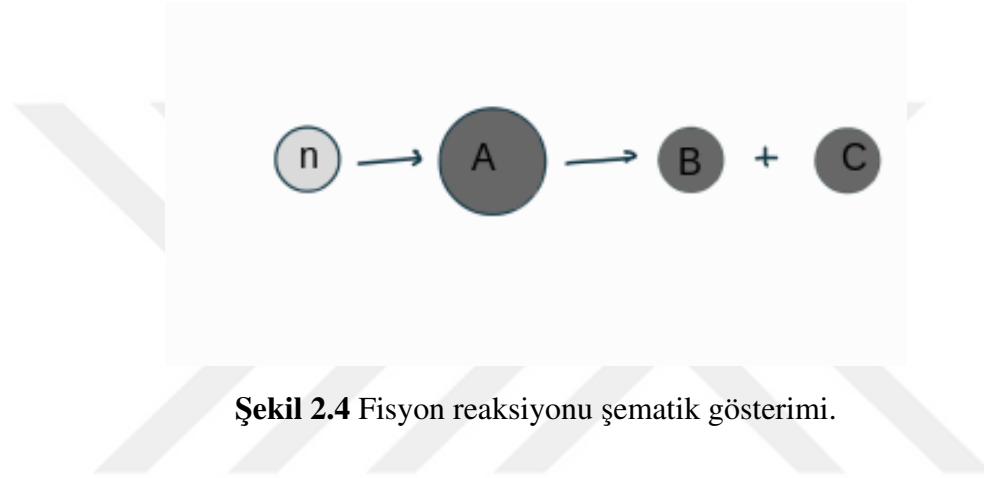
γ : Uyarılmış çekirdekten salınan foton

Esnek olmayan saçılma olayı genellikle yüksek enerjili nötronlar tarafından gerçekleşir. Nötron tarafından uyarılmış duruma geçen çekirdek gama yayınlamaya başlayarak temel enerji düzeyine geri döner.

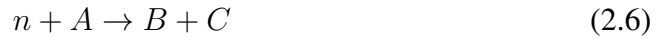
2.2.2 Nükleer Nötron Reaksiyonları

2.2.2.1 Filyon Reaksiyonları

Filyon reaksiyonları çok büyük kütle numarasına sahip atom çekirdeklerinin parçalanarak Şekil 2.4 ile şematize edildiği gibi daha küçük kütle numarasına sahip olan en az iki ayrı çekirdeğe dönüşmesi olayıdır. Filyon reaksiyonlarının sonucunda çok yüksek değerlerde enerji ortaya çıkmaktadır (200 MeV) ve bu enerjinin yaklaşık 160 MeV'lik kısmı reaksiyon sonucu ortaya çıkan parçacıkların enerjisi olarak ölçümlenir [23]. Nötronlar tarafından indüklenen filyon olayları yapısal olarak ağır bir atom çekirdeğinin nötron soğurması ile iki hafif çekirdek ve birkaç nötrona bozunması sürecidir [20, 26].



Şekil 2.4 Filyon reaksiyonu şematik gösterimi.



n: nötron

A: Atom Çekirdeği (Temel Enerji Seviyesinde)

B: Daha hafif bir çekirdek

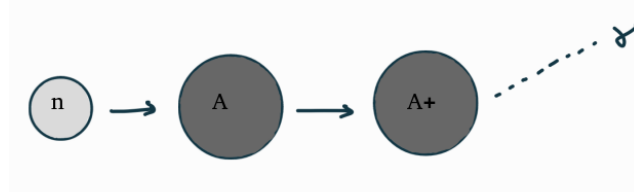
C: Daha hafif bir çekirdek

2.2.2.2 Nötron Yakalama Reaksiyonları

Nötronların atom çekirdeği tarafından yakalanması olayı nötron yakalama reaksiyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda Şekil 2.5 şematize edildiği gibi çekirdek bir veya daha fazla yayımlar [26].



n: nötron



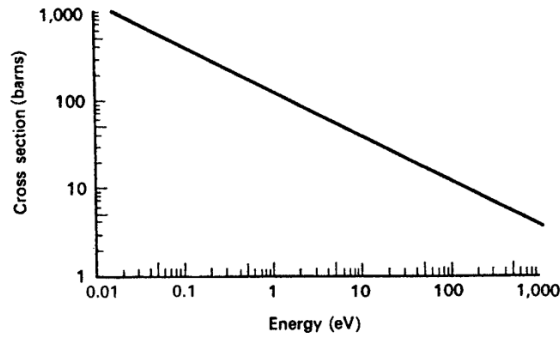
Şekil 2.5 Nötron yakalama reaksiyonu

A: Atom Çekirdeği (Temel Enerji Seviyesinde)

A⁺: Bileşik çekirdek

γ: Gama

Termal nötronların nötron yakalama reaksiyonuna katılma olasılığı sahip oldukları enerji değerleri nedeniyle daha büyüktür [25, 26].



Şekil 2.6 Bor için nötron enerjilerine göre yakalama tesir kesiti grafiği [25]

Bu durum, Şekil 2.6 ile gösterildiği gibi nötron enerjisi azaldıkça yakalama tesir kesitlerinin, enerjinin kareköküyle ters orantılı olarak artmasından kaynaklanmaktadır.

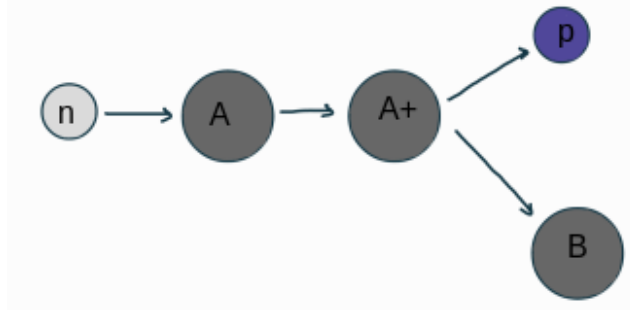
$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \propto \frac{1}{v} \quad (2.8)$$

Şekil 2.6 bu ilişkiyi doğrulamaktadır.

2.2.2.3 Yüklü Parçacık Reaksiyonları

Nötronlar yüklü parçacıklar ile yaptıkları (n, α) ve (n, p) gibi endotermik ya da egzotermik etkileşimler sonucunda soğularak kaybolabilirler [26].





Şekil 2.7 Yüklü parçacık reaksiyonlarının genel şeması

n : nötron

A : Atom Çekirdeği (Temel Enerji Seviyesinde)

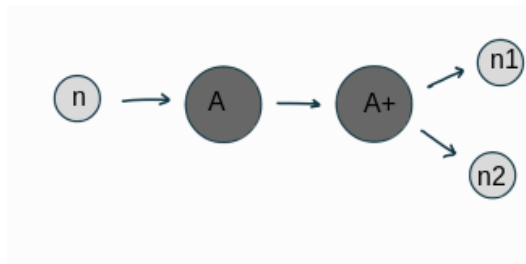
A^+ : Bileşik çekirdek

B : Daha hafif bir çekirdek

p : proton yada da α gibi yüklü bir parçacık

2.2.2.4 Nötron Üretim Reaksiyonları

Yüksek enerjili nötronlar $(n,2n)$ ve $(n,3n)$ gibi reaksiyonlar ile Şekil 2.8 ile gösterildiği gibi yeni nötronların üretildiği endotermik reaksiyonlar gerçekleştirebilir. Bu tür reaksiyonlarda ^2H ve ^9Be kolayca salınabilen nötronları sebebiyle büyük öneme sahiptir [26]. Dedektör sistemlerinde bu reaksiyon referans alınarak yüksek enerjiye sahip nötronlar için üreteç katmanları bulunmaktadır [23, 24].



Şekil 2.8 Nötron üretim reaksiyonlarının genel şeması



n : nötron

A : Atom Çekirdeği (Temel Enerji Seviyesinde)

A^+ : Bileşik çekirdek

n_1 : Üretilen birinci nötron

n_2 : Üretilen ikinci nötron

2.3 Kozmik Nötronların Spektral Dağılımları

Kozmik nötronlar oldukça geniş bir enerji spektrumunda dağılım gösterirler. Oluşum mekanizmalarının çeşitliliği ve atmosferde gerçekleştirdikleri etkileşimler (soğurulma, saçılma vb.) sebebiyle karmaşık bir enerji spektrumu oluştururlar. Bu enerji spektrumunun incelenmesi dedektör tasarımlarının ölçeklendirilmesi ve kalibrasyonu için büyük önem taşımaktadır. Kozmik nötronların enerji aralığının termal ($\sim 0,025$ eV) seviyelerden GeV seviyelerine kadar uzandığı bilinmektedir [16]. Bu durumda kozmik nötron spektrumunu termal, epitermal, hızlı ve yüksek hızlı bölgelerde incelemek mümkündür.

2.3.1 Kozmik Nötron Spektrumuna Ait Deneysel Ölçümler

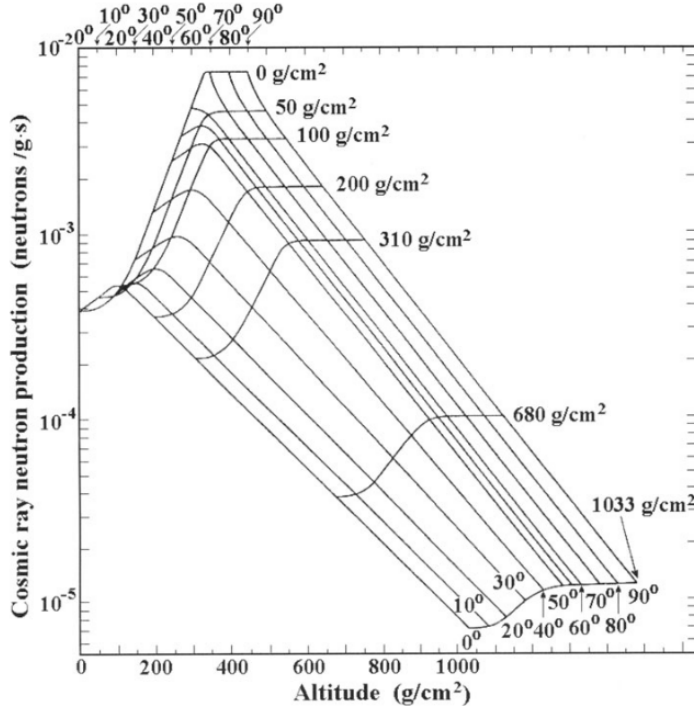
Kozmik nötron spektrumu gerçekleştirilen deneyler ve Monte Carlo simülasyonları sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bahsi geçen simülasyon ve deneyler sonucunda oluşan istatistiksel veriler atmosferik çağlayan gibi nötron oluşum mekanizmaları sonucunda elde edilmektedir. Atmosferik çağlayan sırasında birincil ve ikincil KI'lar tarafından atmosfer boyunca kozmik nötron üretilmektedir. Lingenfelter tarafından 1963 yılında yapılan deneylerde atmosferin çeşitli yüksekliklerinde üretilen kozmik nötronların grafiği Şekil 2.9 ve Şekil 2.10 güneşin farklı aktivite seviyelerine göre verilmiştir [27].

Kozmik nötronların atmosfer içerisinde ilerledikçe gerçekleştirdikleri etkileşimler sonucunda farklı derinliklerde farklı spektrum özellikleri gözlemlenmiştir. Masarik and Beer (1999) tarafından gerçekleştirilen deney sonucunda elde edilen verilere ait grafik Şekil 2.11 ile gösterilmektedir [28].

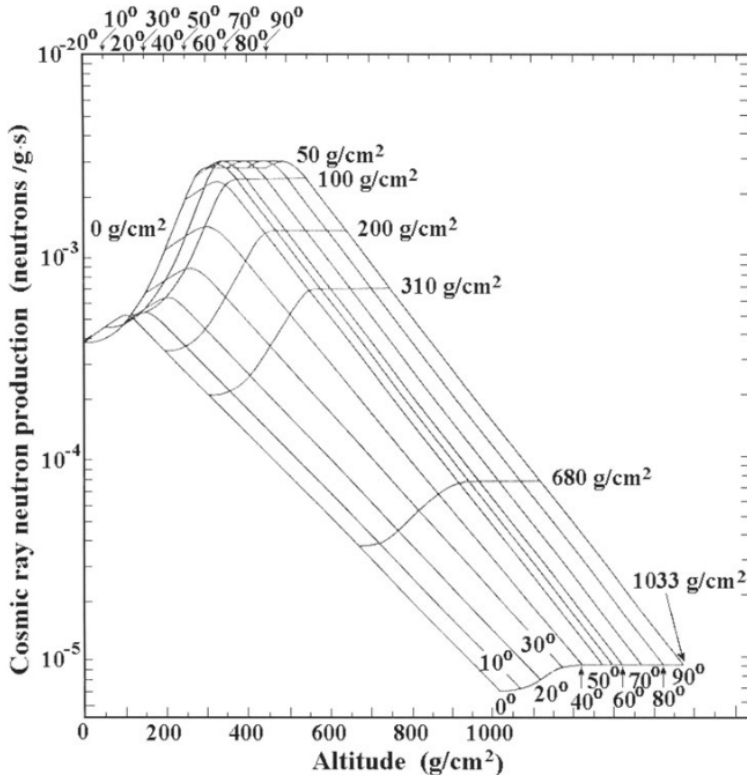
2.3.2 Yer Seviyesindeki Kozmik Nötron Ölçümleri

KI'lar günümüzde Geiger-Müller sayaçları, teleskoplar, kozmik ışın izleme sayaçları, ince zırlama, sintilasyon sayaçları, radyo dalgaları ölçümleri ve Fly's Eye gibi bir çok yöntem ile yer seviyesinde ölçülebilmektedir (Şekil 2.12) [29].

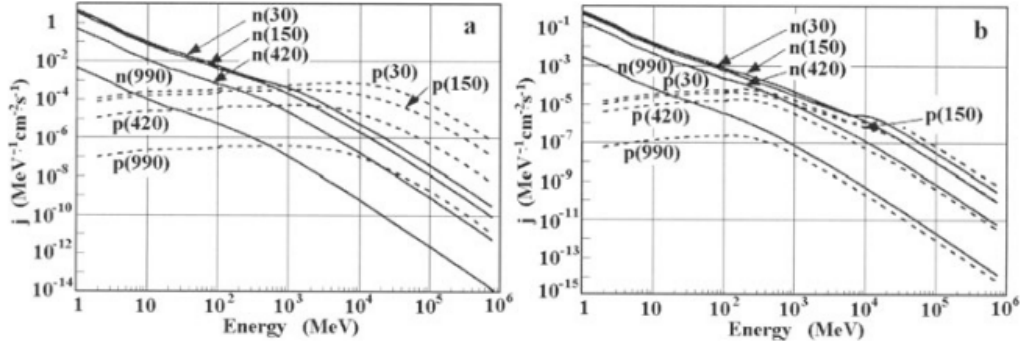
Güneş kaynaklı kozmik ışınların (GüKI) Yer Seviyesinde Artmaları'nı (YSA) ölçümlemek bu ışınların gezegenler arasındaki yayılımı ve ivmelenmeleri hakkında



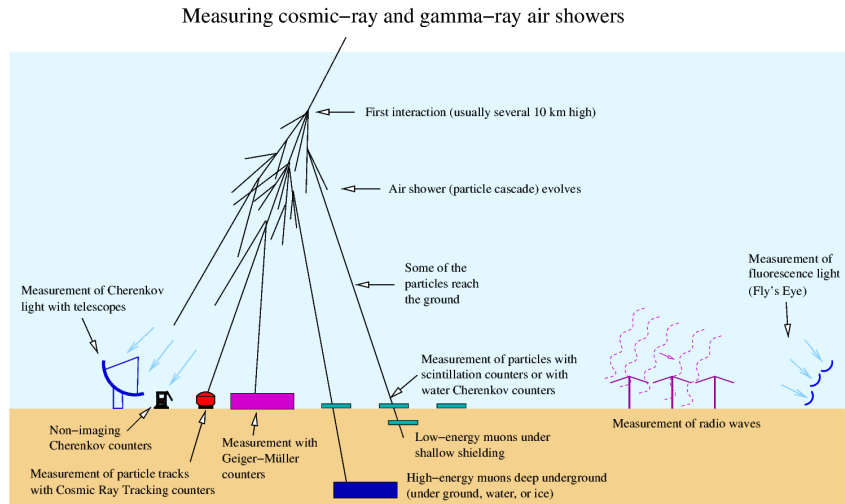
Şekil 2.9 Güneş aktivitesinin minimum olduğu dönemde yükseklik ve jeomanyetik enleme bağlı kozmik nötron üretimi. Kaynak [16]'dan alıntılanmıştır.



Şekil 2.10 Güneşin maksimum aktivite döneminde Şekil 2.9 ile yapılan ölçümler. Kaynak [16]'dan alıntılanmıştır.



Şekil 2.11 Atmosfer farklı derinliklerinde 0-10° (a) 80-90° (b) enlem bölgelerinde nötron ve protonların (1 MeV ile 1000 GeV kinetik enerji aralığında) diferansiyel enerji aralığı [16, 28].



Şekil 2.12 Kozmik ışınların ölçüm yöntemleri [29].

önemli bilgiler elde etmemizi sağlar. YSA'ların GüKI'lardan kaynaklandığı ilk kez 1946 yılında Forbush tarafından önerilmiş ve çalışmalara başlanmıştır [30].

YSA ile ilgili çalışmaları kozmik nötronları görüntüleyerek (sürekli ölçümleyerek) çalışma fikri ise Simpson tarafından 1940 yılında önerilmişti [31]. Yapılan uçak deneyleri ile hava sağanaklarının enlem değişimlerine göre mezon ve nükleon (proton ve nötron) bileşenleri karşılaştırıldı. Daha sonraki yıllarda yapılan deneyler göz önünde bulundurularak 1957-1958 Uluslararası Jeofizik yılında Simpson tarafından tasarlanan BF₃ iyonlaştırıcı gaz dedektörü yer yüzü ölçümleri için standart olarak belirlendi. Günümüze kadar kaydedilen en büyük ikinci YSA 20 Ocak 2005'te GLE69 nötron monitörü tarafından kaydedilmiştir [32]. Günümüzde 50 nötron monitörü (NM) aktif bir şekilde çalışmakta ve bunlardan elde edilen veriler Dünya Veri Merkezi [33], Nötron Monitör Veri Tabanı [34] ve IZMIRAN Veri Tabanında [35] kaydedilmeye devam etmektedir.

Nötronların yüksüz parçacıklar oldukları doğrudan tespit edilemezler. Genellikle gerçekleştirdikleri etkileşimler sonucunda ortaya çıkan proton veya alfa parçacıkları gibi yüklü parçacıkların tespit edilmesi yoluyla algılanırlar. Günümüzde kullanılan nötron dedektörlerinin neredeyse tamamı bu tür reaksiyonları gerçekleştirmeye yönelik kısımlar içermektedir. Bu bölümde yavaş ($\sim 0,5$ eV) ve hızlı ($> 0,5$ eV) nötronların tespiti için kullanılan yöntemler ve dedektör çeşitleri incelenecektir. Yavaş nötron enerjilerini ölçebilen cihazlar ve yöntemler burada ele alınmamaktadır.

3.1 Yavaş Nötronların Algılanması

Enerjisi yaklaşık 0,5 eV olan nötronlar yavaş nötron olarak tanımlanmaktadır (kadmiyum kesme noktasının altında olan nötronlar). Yavaş nötronları tespit etmek için kullanılan dedektörlerin çoğunluğu nükleer reaktörlerde nötron akısını ölçmek için kullanılmaktadır.

3.1.1 Yöntemler

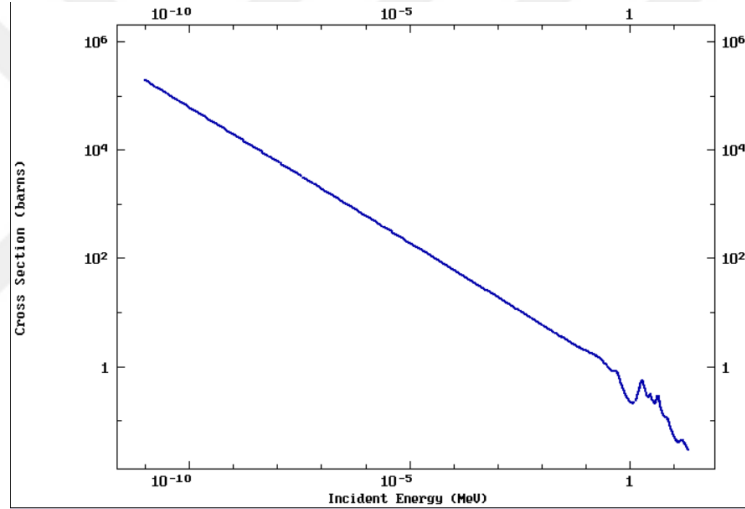
Bir önceki bölümde kısaca bahsedilmiş olan yüklü parçacık üretim reaksiyonları yavaş nötron tespiti için kullanılan yöntemin temelini oluşturmaktadır. Ancak reaksiyon için seçilmesi gereken çekirdeğin etkin sonuçlar vermesi ve maliyetinin düşük olması için göz önünde bulundurulması gereken faktörler vardır [23]. Bunlar;

- tesir kesiti büyük olmalı
- doğal izotopik bolluğa sahip olmalı
- yapay olarak ekonomik zenginleştirme imkanları sağlamalı
- reaksiyon sonucu ortaya çıkan serbest enerji (Q) değeri yüksek olmalı

şeklinde sıralanabilir. Burada tesir kesitinin yüksek olması daha küçük boyutlarda dedektörlerin yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Doğal izotop bolluğu ve ekonomik zenginleştirme imkanları maliyetin düşürülmesi için önem arz etmektedir. Reaksiyon sonucunda ortaya çıkan gama ışınlarının ayırt edilebilir olması için (Q değerinin büyüklük olması oluşturulacak dedektör sisteminin efektif sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Bu etkenleri göz önünde bulundurduğumuzda ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^3\text{He}$ ve p 'nin hedef çekirdek olarak kullanıldığı dedektör sistemlerinin anlamlı sonuçlar verdiği söylenebilir [24].

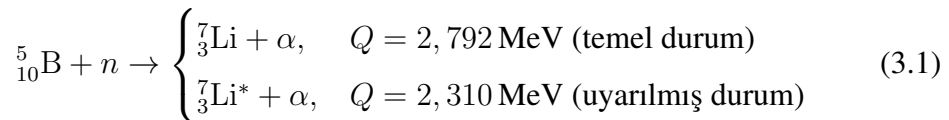
${}^{10}\text{B}$ Reaksiyonu

Yavaş nötron tespitinde kullanılan reaksiyonlar içerisinde en popüler olanlarından biri ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonudur. Zenginleştirilmiş borun kolayca bulunabilmesi ve doğal izotopik bolluğunun %19,9 [36]. olması nötron tespiti için elverişli bir durum yaratmaktadır. Bu reaksiyona ait tesir kesiti grafiği Şekil 3.1 ile verilmiştir [37].



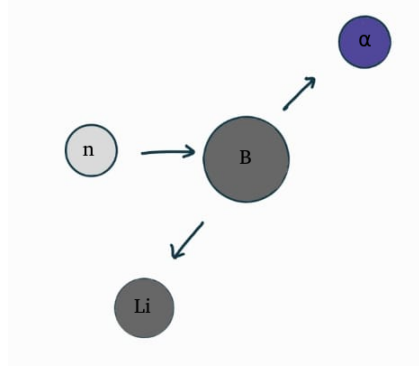
Şekil 3.1 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonu için nötron enerji seviyelerine göre tesir kesiti grafiği [37].

Bu reaksiyon bor çekirdeğinin nötronlar tarafından vurulması sonucunda çıkan ikincil çekirdek (${}^6\text{Li}$) ve alfa parçacığının oluşması şeklindedir. Ancak oluşan ${}^6\text{Li}$ yaklaşık %94 olasılıkla uyarılmış durumda oluşmaktadır.



Denklem 3.1 ile gösterilen Q değeri reaksiyonda salınan net enerjiyi ifade etmektedir. Reaksiyonu başlatan nötron termal seviyede (0,025 eV) olduğu takdirde salınan enerji ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu görülmektedir. Bu durumda reaksiyon sonucu oluşan ürünlere aktarılan

enerjinin tamamının Q değerinden gelmektedir. Bu nedenle tespit edilmeye çalışılan nötronların enerjisi hakkında bilgi edinmek $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonu ile mümkün değildir. Düşük hızda gelen nötronun momentum değeri de sıfıra yakın olduğu için oluşan reaksiyon ürünlerinin zıt yönde eşit momentumlarda saçılırlar [23, 24].



Şekil 3.2 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonunun şematik gösterimi.

Bu durumda oluşan ürünlerin enerjilerini hesaplamak mümkün hale gelmektedir.

$$E_{\text{Li}} + E_{\alpha} = Q = 2,310 \text{ MeV} \quad (3.2)$$

Momentum korunumu ve çekirdek durgun ve neredeyse sıfır kinetik enerjili kabul edildiğinde;

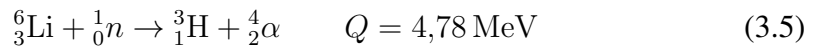
$$m_{\text{Li}}v_{\text{Li}} = m_{\alpha}v_{\alpha} \quad (3.3)$$

$$\sqrt{2m_{\text{Li}}E_{\text{Li}}} = \sqrt{2m_{\alpha}E_{\alpha}} \quad (3.4)$$

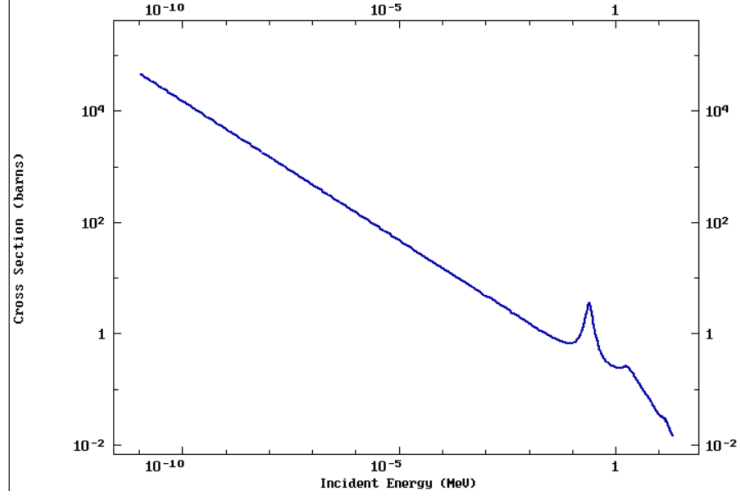
denklemleri elde edilir. Bu ifadeler Denklem 3.4 kullanılarak yazıldığında uyarılmış durumdaki lityumun kinetik enerjisi 0,84 MeV ve alfanın enerjisi 1,47 MeV olarak elde edilir [23].

^6Li Reaksiyonu

$^6\text{Li}(n, \alpha)$ reaksiyonları yavaş nötron tespiti için ^6Li izotopunun doğal olarak %7,59 bollukta [36] olması ve reaksiyon Q değerinin yüksek olması (4,78 MeV) sebebiyle sıkça tercih edilen reaksiyonlar arasında yer almaktadır. Şekil 3.3 ile gösterildiği gibi tesir kesiti olarak, ^{10}B ile kıyaslandığında daha düşük değerlerdedir ancak salınan enerji değerinin yüksek olmasının sağladığı avantajlar nedeniyle popüler bir nötron tespit reaksiyonudur [23].

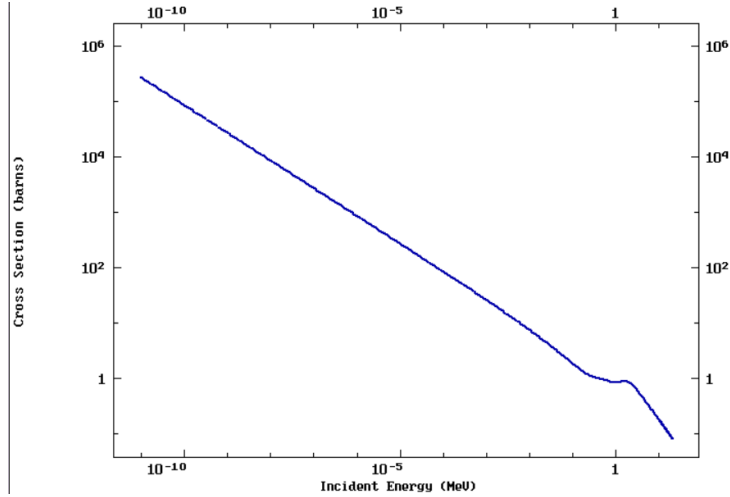
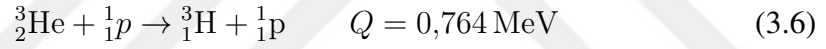


^3He Reaksiyonu $^3\text{He}(n, p)$ reaksiyonu diğer reaksiyonlara göre çok daha yüksek



Şekil 3.3 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ reaksiyonu için nötron enerji seviyelerine göre tesit kesiti grafiği [37].

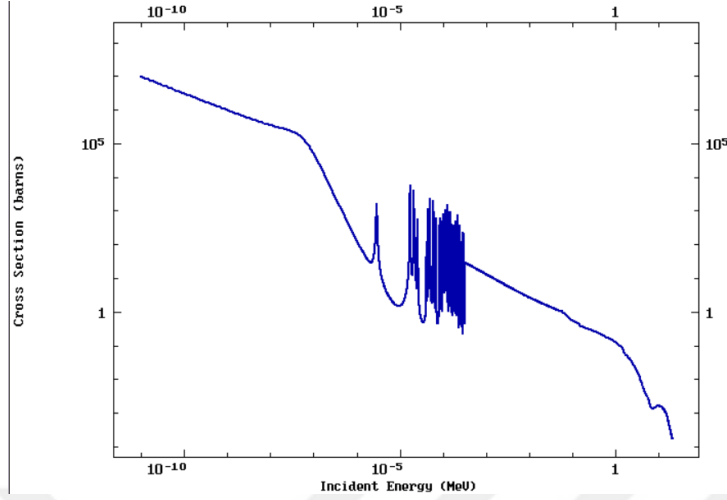
bir nötron tesir kesitine sahiptir. Bu durum nötron tespiti için önemlidir. Ancak reaksiyon Q değeri bakımından diğerlerinden çok daha düşük (0,764 MeV) olması ve doğal izotopik bolluğunun $\%1 \times 10^{-3}$ seviyesinde olması tedarik sorunları yaşanmasına sebep olmakta ve dezavantajlı bir konumda bulunmasına neden olmaktadır [23, 24, 36].



Şekil 3.4 ${}^3\text{He}(n, p)$ reaksiyonu için nötron enerji seviyelerine göre tesit kesiti grafiği [37].

${}^{157}\text{Gd}$ Reaksiyonu ${}^{157}\text{Gd}(n, \gamma)$ yavaş nötron tespiti için kullanılan malzemeler arasında önemli bir yere sahiptir. Termal enerji seviyesindeki nötronlar için en yüksek tesit kesitine (255,000 barn) sahip olan izotoptur. Tesir kesitine ait grafik 3.5 ile gösterilmektedir. Doğal izotopik bolluğu $\%15,65$ 'dir [38]. ${}^{157}\text{Gd}$ nötron

yakalama reaksiyonu sırasında bir nötron yakalanır ve ürün olarak yüksek hızlı elektronlar ve gama yayınlanır.



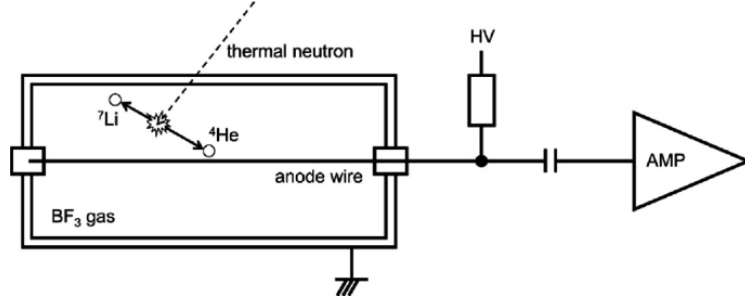
Şekil 3.5 $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)$ reaksiyonuna ait enerjiye göre tesir kesiti grafiği[38]

Nötron Tetiklemeli Fiyon Reaksiyonları Fiyon reaksiyonları bundan önceki reaksiyonlarla karşılaştırıldığında çok daha yüksek Q değerine sahiptir (^{233}U için 202 MeV ve ^{239}Pu için 207 MeV) [39]. Yavaş nötron tespitinde kullanıldığında daha Q değerinin yüksek olması fiyon reaksiyonu sonucunda oluşan alfaların oluşturduğu düşük seviyeli sinyal ile daha keskin bir ayırım yapmayı mümkün hale getirmektedir [23].

3.1.2 Dedektör Sistemleri

Dedektör sistemleri arasında en yaygın olarak kullanılanlardan biri BF_3 orantılı gaz sayaçlarıdır. “Orantılı gaz”, gelen radyasyonun enerjisiyle orantılı büyüklükte elektrik sinyali üreten gazları ifade eder. Bu özellik sayesinde enerji tayini de yapılabilir. BF_3 gazı, hem yüksek bor yoğunluğu ile yavaş nötronların ikincil parçacıklara dönüştürülmesinde hedef olarak kullanılabilmesi hem de orantılı bir gaz olması sebebiyle, en çok tercih edilen sayaçlar arasında yer almaktadır [23]. BF_3 orantılı gaz sayacının temel yapısına yönelik görsel Şekil 3.6 ile verilmiştir.

Temel olarak çalışma prensibi $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonuna dayanmaktadır. Gelen termal nötronların ^{10}B çekirdekleri ile gerçekleştirdiği reaksiyon sonucu oluşan ürünler birbirine zıt yönlerde harekete başlar ve hareket sürecinde iyonizasyon meydana gelir. Anot ve katot arasında uygulanan yüksek gerilim nedeniyle oluşan pozitif ve negatif iyonlar anot ve katota doğru hızlanır. İyonlar hızlandıkça yeni ikincil iyonlar oluşur. Bu durum, sinyal büyüklüğünün oluşturulan birincil iyon çiftlerinin sayısı ile orantılı olmasına neden olur [40]. BF_3 orantılı gaz sayaçları için sayım



Şekil 3.6 BF₃ orantılı gaz sayacının temel yapısı şematik gösterimi [40].

hızı ve nötron akısı arasındaki ilişki şu şekilde üretilir;

$$n(E)dE = E \text{ ve } E + dE \text{ enerji değeri arasındaki nötron sayısı/m}^3 \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \phi(E)dE &= v(E)n(E)dE \\ &= E \text{ ve } E + dE \text{ arasında kinetik enerjiye sahip nötron akısı} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$R \text{ (reaksiyon/sn)} = VN \int_0^{E_n} \sigma(E) \phi(E) dE \quad (3.9)$$

$v(E)$: E enerjili nötronun hızı

E_m : Nötron enerjisi üst limiti

N : Birim hacime düşen ¹⁰B atomu

V : Sayaç hacmi

$\sigma(E)$: Tesir kesiti

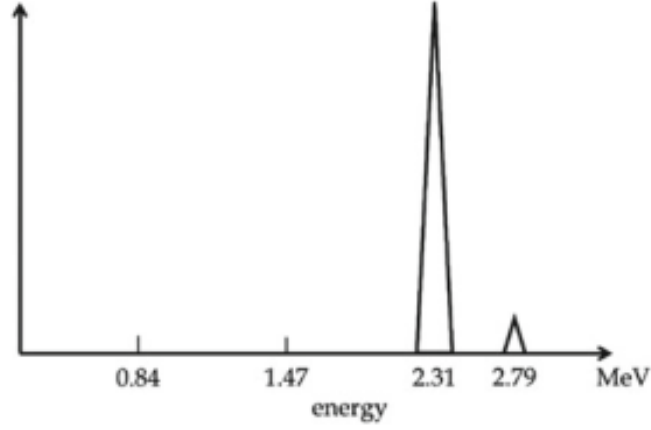
BF₃ dedektörlerinin algılama verimliliği ise Denklem 3.10 ile hesaplanabilir [23].

$$\epsilon(E) = 1 - \exp \left[- \sum_a \Sigma(E) L \right] \quad (3.10)$$

$v(E)$: Nötronların ¹⁰B için E enerjisindeki makroskopik tesir kesiti

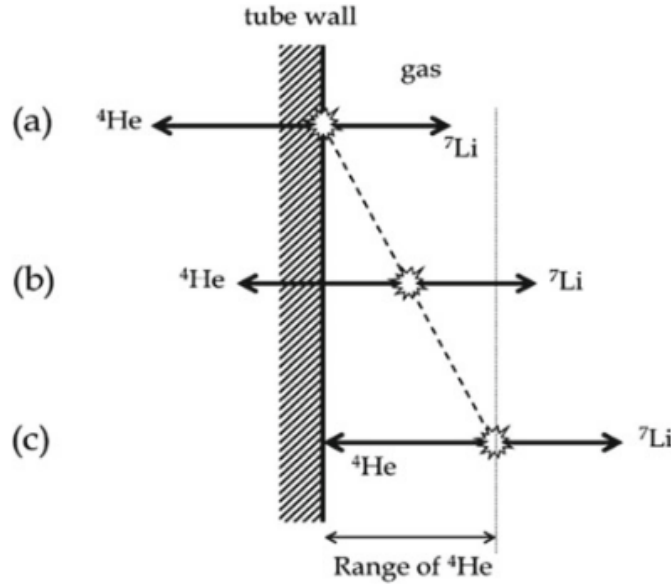
E_m : BF₃ tüpünün uzunluğu

Dedektör çıkışında elde edilen sinyaller analiz edildiğinde yaklaşık 2,31 MeV ve 2,79 MeV enerjilerinde iki farklı tepe değeri gözlemlenebilir. Denklem 3.1 ile gösterilen enerji değerleri ile kıyaslandığında bunların uyarılmış ve uyarılmamış durumdaki lityum için reaksiyon Q değerine karşılık geldiği görülmektedir [23, 41].



Şekil 3.7 Termal nötronların dedektör içerisinde gerçekleştirdiği $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyon ürünlerinin tüm enerjilerini BF_3 gazının içerisinde tükettiği durumda oluşan karakteristik pikler [23, 41].

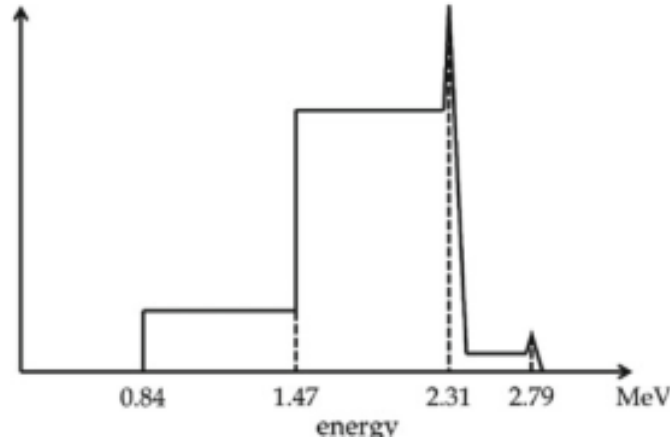
Bu pik çifti termal nötronların tespit edildiğinin ayırt edici bir özelliğidir. Ancak oluşan reaksiyon ürünleri her zaman gaz içerisinde tüm enerjilerini kaybetmezler ve bu durum sinyal üzerinde sürekli bir dağılıma sebep olabilir. Bu duruma duvar etkisi (wall effect) adı verilir. Duvar etkisinin oluşması için gelen termal nötronların gerçekleştirdiği reaksiyonun dedektör duvarına olan mesafesi.



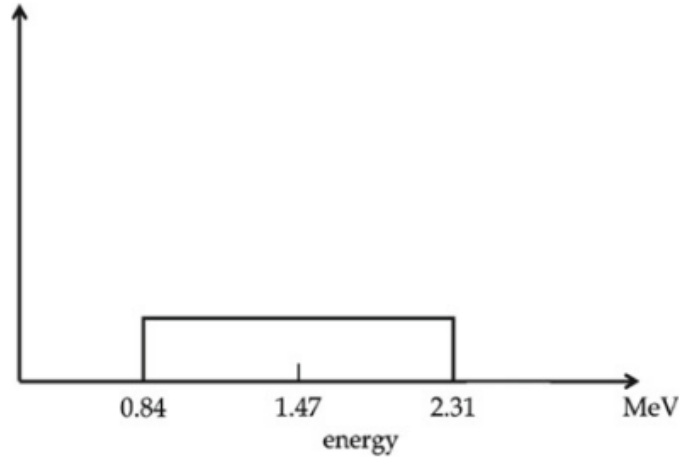
Şekil 3.8 BF_3 tüpü içerisinde gerçekleşen (n, α) reaksiyonu tüpün iç duvarı tarafından absorbe edilmesinin He çekirdeğinin erimi ile ilişkisi [40, 41].

Dedektör duvarına yakın mesafede gerçekleşen nötron reaksiyonları ürünler gaz içerisinde enerjilerini tamamen kaybetmeden dışarıya çıkarlar. Yüksek verimlilik sağlamak için daha büyük hacimlerde tüpler kullanılması önemlidir. Duvar

etkisinin alınan sinyaller üzerinde görünümü Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11 ile gösterilmiştir.

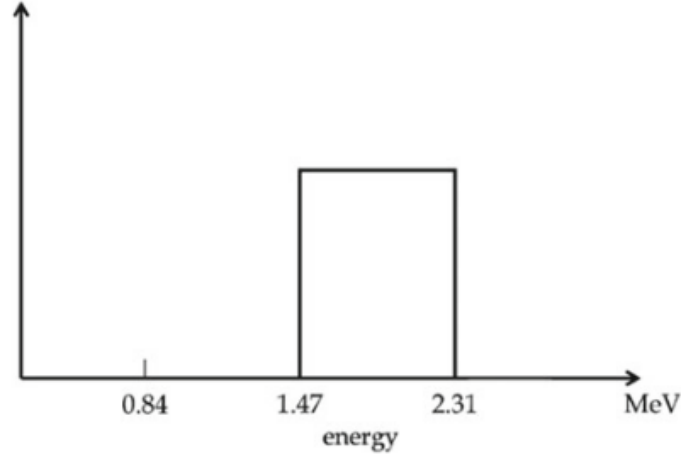


Şekil 3.9 Termal nötronların dedektör içerisinde gerçekleştirdiği $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyon ürünlerinin tüm enerjilerini BF_3 gazının içerisinde tüketemediği durumda oluşan karakteristik pikler ve sürekli dağılım ile oluşan duvar etkisi [23, 40].



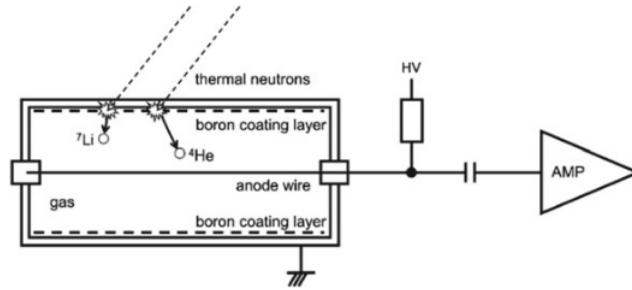
Şekil 3.10 $\alpha(\text{He})$ eriminin reaksiyonun dedektör duvarından kısa kaldığı durumlarda $\alpha(\text{He})$ 'un dedektör duvarı tarafından emildiği durumlarda üretilen sinyal [40].

Bor reaksiyonlarını temel olarak edinen bir diğer yavaş nötron algılama sisteminden biri de Bor kaplamalı orantılı gaz sayaçlarıdır [23, 42]. Şekil 3.12 ile gösterildiği gibi bu dedektör tipinde dedektör duvarı zenginleştirilmiş ^{10}B ile kaplanmış durumdadır. Bu tür sayaçlar BF_3 tüplerinde olduğu gibi (n, α) reaksiyonlarına dayanmaktadır ancak BF_3 tüplerinden farklı olarak reaksiyon ürünlerinden biri kesinlikle dedektör duvarı tarafından soğurulur. Bu sebeple bor kaplamasının kalınlığı arttırıldıkça daha verimli sistemler üretmek mümkün hale gelir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus bor kalınlığının reaksiyon ürünlerinin hareket



Şekil 3.11 ${}^7\text{Li}$ çekirdeğin gaz içerisindeki eriminin reaksiyonun gerçekleştirdiği noktanın dedektör duvarına olan uzaklığından düşük olduğu durumlarda oluşan sinyal [40].

aralığından daha büyük olmamasıdır. Aksi halde elde edilen ürünler gaz içerisine ulaşamaz ve ölçüm için gerekli iyonizasyon gerçekleşmez. Bu durumda reaksiyon ürünleri içerisinde menzili en kısa olan parçacık (He)'un menzili kritik sınırlayıcı faktör olarak kullanılır [23, 43].



Şekil 3.12 Bor kaplamalı orantılı gaz sayaçlarının temel yapısı [40].

Kaplamanın maksimum kalınlığı pratik koşullarda alfa parçacıklarının gaz hacmine ulaşabileceği düzenli sınır olarak 1 mg/cm^2 olarak belirlenmelidir. Bor kaplamalı orantılı gaz sayaçlarının avantajlı olmasının sebebi orantılı seçiminde argon, metan ve karbondioksit gibi daha ekonomik ve zehirli olmayan gazların kullanılabilir olmasıdır.

Bunların yanı sıra bor bazlı sintilatör dedektörler de alternatif olarak kullanılmaktadır. BF_3 tüpleri ve diğer orantılı gaz sayaçlarının çalışma prensibi rastgele konum ve yönlerde etkileşen reaksiyon ürünlerine dayandığı için kısa süreli darbe yüksekliği, etkileşim noktasının kesin olarak belirlenememesi ve nötron uçuş süresi (NUS) ölçümleri için yol belirsizliklerine yol açabilmektedir.

Bu sınırlamaların karşısına geçebilmek için sintilatör filmler geliştirilmiştir (4. bölümde sintilatörler hakkında gerekli bilgilere değinilmiştir). Sintilatör filmler sayesinde daha hassas konum bilgilerine ulaşılabilmektedir. Doğrudan bor katkılanmış plastik sintilatörler de mevcuttur (örnek: BC-454). Tipik olarak 1-2 mm kalınlığında ince sintilatör filmler kullanılır. Ancak bazı organik sintilatör filmlerin kullanılması gamalar tarafından üretilen elektronları sebep olduğu sintilasyon nedeniyle gama ve nötron sayımını birbirinden ayırt etmeyi zorlaştırmaktadır [23, 44].

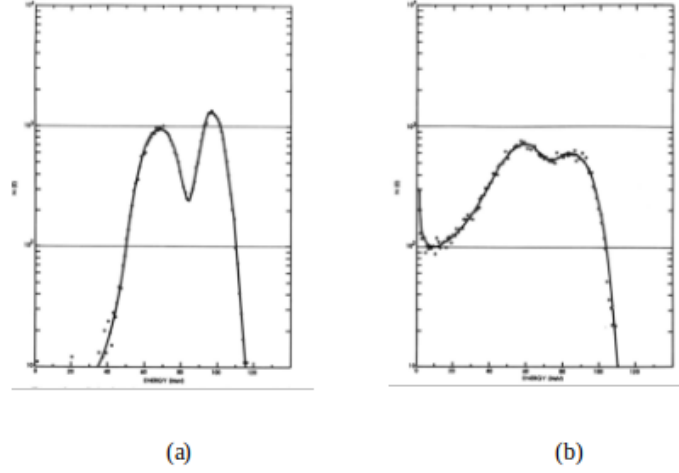
Nötronları tespit edebilmek için $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonlarını kullanıldığı bir diğer yöntem nötron film dönüştürücüleridir [45]. Bu tür dedektörler geleneksel yüklü parçacık dedektörlerinin yanına bor veya diğer nötron dönüştürücü malzemelerin (^6Li , ^{235}U) yerleştirilmesi ile oluşturulur. Nötron dönüştürücüde oluşan ikincil alfa gibi yüklü parçacıklar veya iyonların yüklü parçacık dedektörleri ile etkileşime girerek sinyal oluşturması prensibi ile çalışırlar. Reaksiyon ürünlerinin dedektör ile etkileşmeden önce enerji kayıplarını en aza indirmek dedektör verimliliği için büyük önem arz etmektedir. Kullanılacak nötron dönüştürücünün tesir kesitinin büyük olması da benzer şekilde dedektör sisteminin verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Katı maddeler içerisinde oluşacak reaksiyon ürünlerinin menzili düşük olacağı için kullanılacak dönüştürücü hacminin ince tutulması gerekmektedir. $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonundan oluşan ürünler momentum korunumu nedeniyle zıt yönlere hareket edeceği için α ve Li çekirdeklerinden sadece biri nötron dönüştürücü katmanından çıkarak dedektöre ulaşabilir. İki katman arasında hava veya başka bir katman bulunmaması ikincil çekirdeklerin dedektörün etkileşim noktasına ulaşma olasılığını arttırmaktadır. Dedektörün etkileşim noktası ile katmanlar arasındaki mesafenin ise alfa çekirdeklerinin menzilinden ($3,6 \mu\text{m}$) daha düşük tutulması sinyal elde edilebilmesi için elzemdir [23, 24]. $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonlarının haricinde $^6\text{Li}(n, \alpha)$ reaksiyonları da nötron tespitinde kullanılan dedektörlerin yapısında sıkça kullanılmaktadır. Lityum çekirdeğinin termal nötronlara karşı yüksek tesir kesiti Şekil 3.3 ile gösterilmiştir. Yüksek tesir kesiti bu reaksiyonu nötron tespiti için elverişli bir konuma getirmektedir. Ayrıca $^6\text{Li}(n, \alpha)$ reaksiyonu sonucunda oluşan ürünlerin tamamı temel enerji düzeyinde oluşmaktadır ve bu durum tek enerji değerinde sinyal üretilmesi avantajını sağlamaktadır. Lityum içeren bir orantılı gaz bulunmaması nedeniyle lityum içeren bir gazlı nötron dedektör bulunmamakla birlikte lityumun nötron dönüştürücü olarak kullanıldığı gazlı dedektörlere rastlanmaktadır. Ancak genellikle lityum kaplamalı yarıiletken dedektörler, lityum cam ve plastik sintilatörler tercih edilmektedir. Lityum bazlı sintilatörlerin, yüksek saflıktaki lityumun pahalı olması, cam sintilatörlerin kırılabilirliği ve gama ayırımının kısıtlı olması gibi dezavantajlı

yönleri bulunmaktadır.

Yavaş nötronların tespit edilmesinde kullanılan yüksek verimli dedektörlerden bir diğeri de ^3He orantılı gaz sayaçlarıdır. Termal nötronlar için ^3He 'nin yüksek kesir sebebiyle nötron tespiti için avantajlı bir alternatif durumundadır. Soy gaz sınıfında olduğu için helyum ile katı bir bileşik oluşturulamaması nedeniyle helyum reaksiyonları gazlı dedektörlerde kullanılarak değerlendirilir. Çalışma prensibi diğer orantılı gaz sayaçları ile benzer şekildedir. $^3\text{He}(n, p)$ reaksiyonu sonucu oluşan ürünlerin gaz içerisinde enerjisi tüketmesi sonucunda elde edilen sinyaller analiz edilerek nötron tespiti yapılabilmektedir. Temel yapıları BF_3 tüpünde olduğu gibi silindirik ve daha önceki bahsi geçen duvar etkisi ^3He orantılı gaz sayaçları içinde önem arz etmektedir [23, 46]. Fakat dünya çapında oluşan helyum tedarik problemleri ve saf helyumun yüksek maliyeti bu dedektörün yüksek verimliliğine rağmen dezavantajlı bir duruma getirmektedir.

Fisyon reaksiyonlarını temel edinen dedektör sistemleri de mevcuttur. Bu tür dedektör sistemleri nötronların fisyon yapabilen çekirdekler ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan fisyon parçacıklarının tespiti ile nötronların varlığını tespit edilmesi prensibi ile çalışmaktadır. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan yüksek enerji (~ 200 MeV) fisyon reaksiyonlarını nötron tespitinde öne çıkaran en büyük etkidir. Dedektör yapısı genelde dört temel bileşenden oluşur. Fisyon malzemesi (fisil) katmanı genellikle ince bir film kaplama şeklindedir. Fisil kaplamanın kalınlığı ile elde edilecek enerji spektrumu arasında doğrudan bir bağlantı söz konusudur. İki farklı fisil kalınlığı sonucu ortaya çıkan iki farklı enerji spektrumu Şekil 3.13 ile yer almaktadır. Dedeksiyon ortamı, iyonlaşmanın sağlanacağı ortam olarak nitelendirilebilir ve genellikle orantılı gaz, katı sintilatör ya da yarıiletken algılama yöntemleri bu katmanda tercih edilir. Bir diğer katman elektriksel okuma sistemidir ve arka plan radyasyonunu engellemek için zırhlama katmanı olarak yoğun zırhlayıcı materyaller zırhlama katmanı kullanılır [23, 24, 47].

Yüksek sıcaklık, yüksek radyasyon dozu ve kimyasal reaktif ortamlar gibi koşullarda çalışılması gerektiği durumlarda silisyum karbür (SiC) tabanlı nötron dedektörleri oldukça işlevseldir. Çok geniş bir bant aralığına ($\sim 3,36$ eV) sahip olan SiC genellikle bor veya lityum gibi nötron dönüştürücü tabakalar ile birlikte kullanılarak yüklü parçacıklar yoluyla nötron tespitini prensip edinir [23, 48]. Yakın tarihlerde tasarlanan nötron dedektör sistemlerine bakıldığında ise kuantum yapılarına dayalı, organik hibrit ve nano malzeme tabanlı yeni nesil dedektör sistemleri ile ilgili çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Yeni nesil sistemler arasında kuantum nokta tabanlı dedektörler ön plana çıkan sistemler arasında yer almaktadır. Kuantum noktalar birkaç nanometre çapında kuantum



Şekil 3.13 UO₂ için (a) 0,0286 μm ve (b) 0,714 μm kalınlıklarındaki enerji spektrumları [47].

hapsi etkisi gösteren yapılarıdır. Fotonlar veya bazı parçacıklarla etkileşime girebilen kuantum noktalar etkileşim sonucunda foto-lüminesans ya da elektriksel sinyaller üretebilirler. Ancak kuantum noktalar doğrudan nötronlar ile etkileşime giremedikleri için dedektör sistemlerine mutlaka nötron dönüştürücü bir katman eklenmektedir. Literatürde ¹⁰B katkılı kuantum noktalarının nötronlar ile etkileşime girdiği ve ışık sinyallerinin elde edildiği görülmektedir. Bu tür dedektörlerin avantajları yüksek spektral hassasiyet, düşük enerji eşiği, minyatürleştirilebilirlik, fotonik sistemlerle uyumluluk ve düşük maliyet olanaklarıdır [49].

3.2 Hızlı Nötronların Algılanması

Hızlı nötronlar doğrudan iyonlaştırıcı etkiye sahip olmadıkları için yavaş nötronlara kıyasla tespit edilmeleri çok daha zordur. Şekil 3.1, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 ile görülebildiği üzere nötron kinetik enerjilerindeki artış tüm malzemelerde tesir kesitlerinde hızlı bir düşüşe sebep olmaktadır. Bu durum hızlı nötronların doğrudan tespit edilebilme olasılıklarını yüksek oranda düşürdüğü için yavaş nötron tespitinde kullanılan dedektör sistemleri hızlı nötronlar için çok düşük verimlilik sağlayabilmektedir.

Hızlı nötronların düşük tesir kesitlerinden kaynaklanan sorunlar esnek saçılma süreçleri ile büyük oranda aşılabilmektedir. Esnek saçılma ile nötronlar enerjilerinin bir bölümünü hedef çekirdeğe aktarır ve ikincil geri tepme çekirdeklerinin oluşmasına yol açar. Bu süreçte oluşan ikincil çekirdekler sinyal üretemeyecek kadar düşük enerjilere sahipken enerjilerin büyük bir kısmını kaybeden nötronlar için algılama verimliliği kayda değer şekilde artar [23].

Hızlı nötron dedektör sistemlerinde yavaş nötron dedektörlerine ek olarak esnek saçılma, etkin olmayan çekirdeklerle nükleer reaksiyonlar, moderasyon gibi etkileşimlere tabi tutacak sistemler ya da katmanlar kullanılması gerekmektedir. Bu şekilde bakıldığında tipik bir yavaş nötron dedektörünün etrafını birkaç santimetre kalınlığında esnek saçılma sağlayan malzeme ile kaplanması hızlı nötron tespitinde verimliliği oldukça yükseltecektir. Ancak kalınlığın ince tutulması enerji kaybını yeterli seviyeye indirmek konusunda problem oluştururken, kalınlığın fazla artırılması nötronların sinyal oluşturan bölgeye ulaşmadan sönmelerine sebep olabileceği için bu katmanı optimize edilmesi önemlidir [23].

3.2.1 Bonner Küreleri

Bonner küreleri 1960 yılında T.W. Bonner, Richard L. Bramblett ve Ronald I. Ewing tarafından geliştirilen bir nötron spektrometresidir [50]. Termal nötronlardan birkaç yüz MeV enerji değerlerine kadar nötronları algılamak için kullanılabilir [50]. Bu sistem temelde hidrojen içeren moderatör kürelerin içerisine yerleştirilmiş lityum iyodür sintilatörleri ya da farklı termal nötron dedektörlerinden oluşmaktadır. Moderatör dış katmanlarda yavaşlatılan nötronlar merkezdeki dedektörde sinyal oluşturur. Her küre, nötronların enerjisini farklı şekilde yavaşlatarak dedektöre ulaşan termal nötron sayısını değiştirir. Bu sayede küresel sistem, nötron spektrumuna duyarlı hale gelmektedir [23, 50].

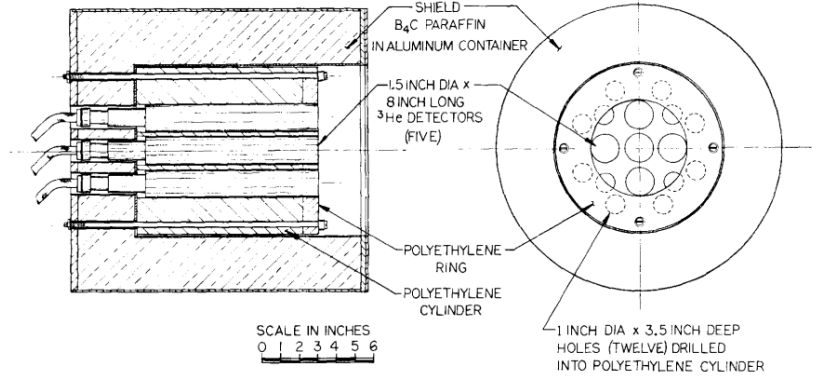
3.2.2 Küresel Nötron Dozimetreleri

Temel olarak küresel nötron dozimetreleri, ortasında bir termal nötron dedektörü barındıran ve çevresi farklı kalınlıklarda moderatör malzeme ile kaplanmış kürelerden oluşur. Çalışmaları Bonner kürelerinin çalışma prensibi ile çalışmakta fakat doz ölçümleri üzerine odaklanmaktadır [23].

3.2.3 Uzun Sayaçlar

Geniş enerji aralıklarındaki nötron akılarına yanıt verebilecek şekilde tasarlanmış bir dedektör sistemidir. Temelde uzun nötron sayaçları Şekil 3.14 ile gösterildiği gibi silindirik bir geometriye sahiptir ve merkez eksenine boyunca yerleştirilmiş bir gazlı orantılı sayaç ve sayaç etrafını çevreleyen bir moderatör katman bulunur. Burada kullanılan moderatör genellikle polietilen ya da parafin gibi hidrojen yoğunluğu yüksek malzemeden yapıldığı görülmektedir. Bu tasarımda da diğerlerinde olduğu gibi moderatör katmanı gelen hızlı nötronları termalize eder. En dış katmanda ise yüksek atom numaralı (Z) genellikle kurşundan yapılmış yansıtıcı bir dış katman bulunmaktadır [23]. Yansıtıcı katman nötronların moderatör dışına

kaçmasını engelleyerek dedektör verimini arttırmaktadır [51]. Bu tür dedektör sistemlerinde nötron enerjilerinin verimliliğe göre grafiği yatay bir çizgi şeklinde olduğu için nötron enerjilerinden bağımsız bir verimlilik söz konusudur [52].



Şekil 3.14 ^3He uzun sayacının genel tasarım şeması [52].

3.2.4 Moderasyon Tabanlı Dedektörler

Tipik olarak moderasyona dayalı dedektörler bir moderatör katmanına birden fazla ^3He ya da BF_3 orantılı gaz sayacı yerleştirilerek oluşturulmuş sistemlerdir. Yaklaşık 30 keV ile 5 MeV arasındaki enerjilere sahip nötronlar için %1 mertebelerinde sayım verimliliği sağlamaktadır [52].

Moderasyon esasına dayalı çalışma prensibine sahip başka hızlı nötron dedektörler sistemleri de mevcuttur. Bunlardan biri 1968 yılında tasarlanmış gri nötron dedektörü olarak bilinen küresel moderatörlerin ürettiği 2,2 MeV enerjili gamaları algılamak üzere kullanılan sintilatör nötron dedektörüdür [53]. Ayrıca daha düşük yanıt süresi ile 1969 yılında tasarlanmış siyah nötron dedektörü de doğrudan sintilatöre katkılanmış olan moderatör malzeme ile sinyal üretebilmektedir [54].

3.3 Kozmik Nötronların Algılanması

Kozmik nötronlar GeV mertebelerine kadar uzanan yüksek enerji spektrumlarında atmosferde ve yer seviyesinde tespit edilebilmektedir. Bu sebeple kozmik nötron dedektörlerinin en kritik uygulamalarından biri havacılıktır. Atmosferik çağlayan olayında oluşan ikincil parçacıkların dünya atmosferinde hava yolu uçuş irtifalarındaki (~11 km) ikincil parçacıkların %55'lik kısmını nötronlar oluşturmaktadır. Yer seviyesinde ise kozmik radyasyon kaynaklı parçacıkların büyük bölümünü müonlar oluştururken atmosferdeki etkileşimler nötronları baskın hale getirmektedir [55]. Atmosferdeki etkileşimler sonucunda oluşan atmosferik çağlayan olayında oluşan KI'lar yer yüzüne kurulu kozmik nötron monitörleri ile

tespit edilebilmektedir.

Kozmik nötronlar yüksek enerjiler ile hızlandıkları için hızlı nötron dedektörlerinde kullanılan yöntemler ve dedektörler ile tespit edilebilmektedir. Genellikle uzun sayaçlar, Bonner küreleri, sintilatör dedektörleri ve ^{10}B veya ^3He orantılı gazlı dedektörlerinin moderatör, yansıtıcı ve üreteç gibi katmanlar eklenerek tespit edilmektedir. Kozmik kökenli nötronların geniş bir yüzey alanına yayılmış akısı, kalibrasyonu yapılmış çok sayıda dedektörün birlikte çalıştığı nötron monitör sistemleri ile yüksek duyarlılıkla ölçülebilmektedir.



DEDEKTÖR TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Bu bölümde plastik sintilatörler kullanılarak kozmik nötronların tespit edilmesine yönelik bir dedektör sisteminin simülasyon çalışması sırasında kullanılan simülasyon programları, dedektör geometrisi, dedektörde kullanılan materyallerin özellikleri ve simülasyon verileri anlatılmıştır.

4.1 Kullanılan Program ve Metodlar

Bu yüksek lisans tezinde C++ yazılım dili tabanlı Geant4 [56, 57] simülasyon programı ve ROOT [58, 59] veri analiz programı kullanılarak plastik sintilatör kullanılarak oluşturulan dedektör sisteminin Monte Carlo yöntemi ile analiz yapılmıştır. C++ nesne yönelimli bir yazılım dilidir. 1979 yılında Bell Laboratuvarında Bjarne Stroustrup tarafından C programlama dilini kapsayacak şekilde geliştirilmeye başlanmıştır ve 1983 yılında C++ adını almıştır [60]. Geant4 ve ROOT programları C++ tabanlı simülasyon ve veri analiz programlarıdır.

Geant4 CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire – Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi) tarafından geliştirilmiş parçacık ve radyasyonun madde ile etkileşim süreçlerini ve fiziksel süreçleri Monte Carlo yöntemi ile simüle eden bir araç takımudur. Bu program yardımıyla herhangi bir malzeme veya sistemin kimyasal, optik ve fiziksel özellikleri belirlenerek programa kaydedilebilir ve gönderilen parçacıklar ve oluşan ikincil parçacıkların belirlenen fiziksel süreçler sonucunda sistem ile etkileşimleri simüle edilebilir. Temel olarak;

- Malzemeler ve şekiller kullanılarak geometrik bir model oluşturulabilme
- Fiziksel etkileşimlerin uygulanabilirliği
- İkincil ve sonrası parçacıklar üretebilme
- Seçili bilgileri kaydedilebilme

- Geometri içerisinde geçen parçacıkların izleri görselleştirebilme
- Çeşitli uygulamalar ile etkileşim halinde çalışabilme

gibi yetkinlikler ile çalışmalar yürütülebilmesini sağlamaktadır. Açık kaynak kodlu bir araçtır [56]. Dedektör tasarımlarını yaparken malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri ile etkileşim türlerini incelemek için ücretsiz bir simülasyon ortamı oluşturması sebebiyle prototip geliştirme çalışmalarda kullanılacak malzeme miktarını ve israfını azaltmaktadır. Geant4'ün fiziksel süreçler için kullandığı Monte Carlo metodu çözülmesi zor olan problemlerde rastgele örnekleme teknikleri ile çözüm elde etmeyi amaçlayan bir metottür. Olasılıksal bir hesaplama prensibine dayanmaktadır. Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda (Los Alamos National Laboratory) yürütülen Manhattan Projesi kapsamında atom bombasının patlaması sonucunda ortaya çıkan nötron akısına karşı kalkan modeli oluşturmak için Ulam ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve 1949 yılında ilk kez yayınlanmıştır [61].

ROOT ise, yine CERN tarafından geliştirilmiş özellikle yüksek enerji fiziği verilerini analiz etmek için kullanılmakta olan açık kaynak kodlu ve nesne yönelimli bir veri analiz programıdır. C++ tabanlı bir yazılım olmasının yanı sıra Python, R ve Julia (PyROOT, ROOT.jl) gibi programlama dili seçenekleri de mevcuttur. Büyük veri setlerinin analiz edilmesi, görselleştirilmesi ve işlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Geant4 ile birlikte kullanılabilir [62].

4.2 Dedektör Tasarımı ve Geometrisi

Bu tez kapsamında, Geant4 simülasyon programı kullanılarak plastik sintilatörler aracılığıyla kozmik nötronların algılanmasına yönelik bir kozmik nötron dedektörü tasarlanmış ve gazlı dedektörlerin dezavantajlarını gidermeyi amaçlayan bir alternatif ortaya konulmuştur. Günümüzde kullanılmakta olan sistemler göz önünde bulundurularak plastik sintilatörlerin kozmik nötron algılamadaki kullanılabilirliği analiz edilmiştir.

Dedektör tasarım sürecinde Stowell ve arkadaşlarının [63] 2022 yılı tasarlamış olduğu Gd katkılı su Cherenkov çalışmasından esinlenilmiştir. Çalışma sırasında Gd yerine ^{10}B kullanılarak $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan alfa parçacıklarının algılanmasına dayalı bir yöntem geliştirilmiştir.

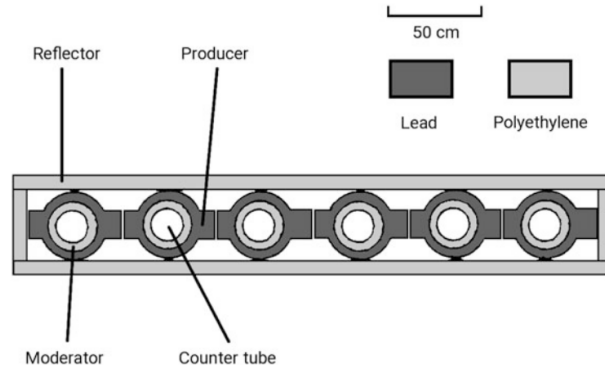
Kozmik nötron dedektörleri için standart olarak kabul edilen NM64 dedektörünün yapısı incelendiğinde dıştan içe doğru;

- yansıtıcı

- üreteç
- moderatör
- sayaç

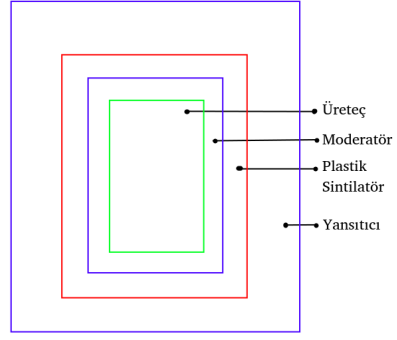
katmanlarını olduğu görülmektedir (Şekil 4.1). Üreteç katmanı yüksek enerjili proton ya da nötron gibi parçacıkların ilk olarak etkileştiği, ve ardından daha düşük enerjili nötronların üretilebilmesi için yüksek atom kütesine (A) sahip hedef malzemelerin (örneğin, kurşun(^{208}Pb)) kullanıldığı dış katmandır. Yansıtıcı katman ise temel işlevi, üreteç katmanında oluşan buharlaşma nötronlarının dedektör dışına çıkmasını önlemek amacıyla bu nötronları yansıtmak ve enerjilerini düşürerek yumuşatmak olan katmandır. Bu katmanda genellikle yüksek hidrojen yoğunluğu nedeniyle polietilen malzeme tercih edilmektedir. Böylece, hidrojen çekirdekleriyle gerçekleşen esnek saçılmalar aracılığıyla nötronların enerji kaybetmesi sağlanmaktadır.

Moderatör katmanında ise, üreteçte oluşan ikincil nötronların termal enerji seviyelerine indirgenmesi amacıyla yüksek hidrojen yoğunluklu malzemelerden yararlanılmaktadır. Sayaç ise nötronların etkileşim süreçlerinin gerçekleşmesi ve sinyal üretilmesi için orantılı gazlar ya da sintilatörler kullanılmaktadır [51].

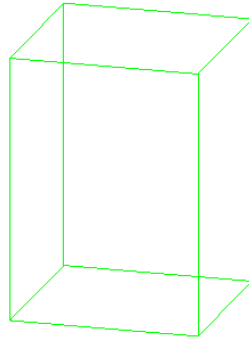


Şekil 4.1 NM64 Dedektörünün şematik yanal kesit [51]

Bu tez çalışmasında bir kozmik nötron dedektörü yapısı verilen bu işlevsel standartlar ışığında oluşturuldu. Dedektör geometrisinde katmanlı yapı NM64 dedektöründeki katmanlarla benzer özellikler taşımasına rağmen katman sıralamasında değişiklikler yapılmıştır. Dedektöre ait katman şeması Şekil 4.2 ile gösterilmiştir. Kozmik nötronlar yüksek enerji spektrumunda yer seviyesine ulaşması sebebiyle ve malzemelerin bu enerjilerdeki nötron tesir kesiti değerleri nedeni ile doğrudan sintilatör, yansıtıcı ve moderatör ile etkileşime geçemezler. Bu sebeple üreteç katmanı en iç katmanda konumlandırılmıştır.

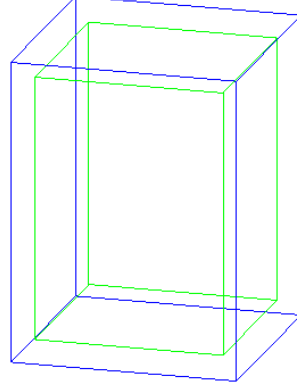


Şekil 4.2 Dedektör tasarımının yanal kesiti şeması



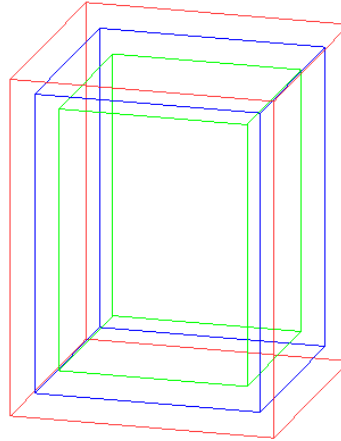
Şekil 4.3 Geant4 simülasyonunda oluşturulmuş üreteç katmanının görseli

Kozmik nötronların üreteç ile etkileşimi sonucunda ortaya çıkacak ikincil ve daha düşük enerjili buharlaşma nötronlarının termal seviyelere indirgenmesi amaçlanarak üreteç etrafı moderatör malzeme ile çevrelenmiştir (Şekil 4.4).



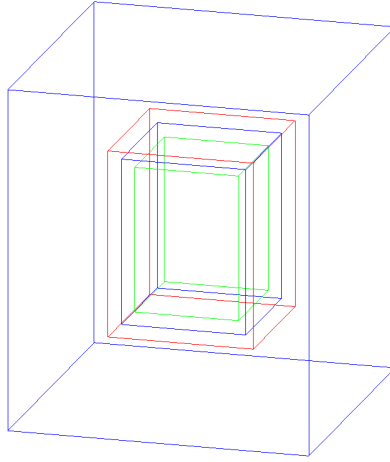
Şekil 4.4 Geant4 simülasyonunda oluşturulmuş üreteç ve moderatör katmanın görseli

Reaksiyon malzemesi plastik sintilatör içerisine katılanmış ve termalize edilen nötronların gerçekleştireceği reaksiyon sonucunda oluşacak alfa parçacıklarının sintilatör içerisinde ışıdamaya sebep olarak optik dalga boyunda sintilasyon fotonları oluşturması amaçlanmıştır.



Şekil 4.5 Geant4 simülasyonunda oluşturulmuş üreteç, moderatör ve plastik sintilatör katmanın görseli

Yansıtıcı katman, dış ortamdan gelebilecek termal nötronlar ile sintilasyona yol açabilecek alfa parçacıkları gibi ardalanları engellemek amacıyla dedektörün en dış kısmında konumlandırılmıştır. Ayrıca, üreteç katmanında oluşan buharlaşma nötronlarının dedektör dışına çıkmasını önleyerek yansıtıcılık özelliğiyle dedektörün genel verimliliğini artırması beklenmektedir.



Şekil 4.6 Geant4 simülasyonunda oluşturulmuş üreteç, moderatör, plastik sintilatör ve yansıtıcı katmanın görseli

Geliştirilen dedektör sisteminde, tesir kesitleri ve malzeme özellikleri dikkate alınarak bir tasarım gerçekleştirilmiş; ölçeklendirme işlemi ise literatürde yer alan çalışmalar temel alınarak yapılmıştır. Malzeme özelliklerine ve ölçeklendirme yaklaşımına ilişkin ayrıntılı bilgiler ilerleyen bölümlerde sunulacaktır.

4.3 Malzemeler

Bu bölümde, dedektör geometrisinde kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilişkin bilgiler sunulacak ve dedektör sisteminin ölçeklendirme parametreleri ele alınacaktır.

4.3.1 Üreteç (Kurşun)

Dedektör geometrisinde üreteç olarak yüksek atom numarasına (Z) ve nötron tesir kesitine sahip olması nedeniyle Kurşun (Pb) kullanıldı. Pb'ye ait nötron tesir kesiti grafiği Şekil 4.7 ile gösterilmiştir.

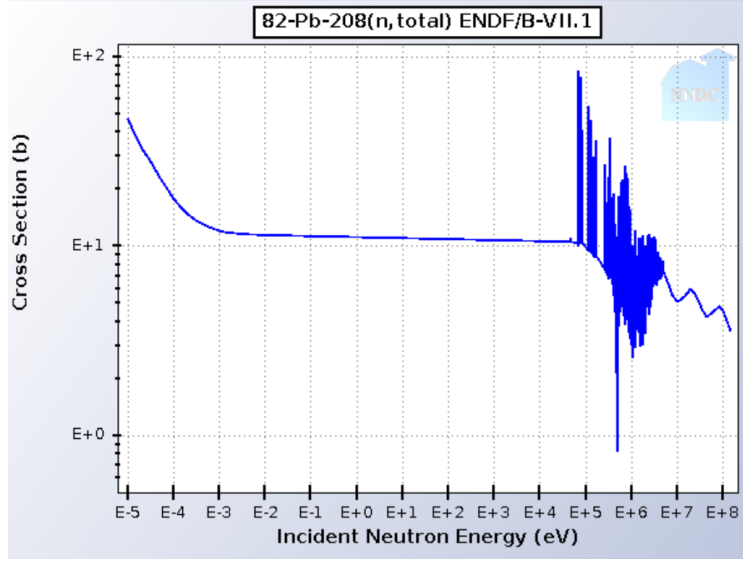
Tablo 4.1 Geant4'ün NIST (National Institute of Standards and Technology) veri tabanından kurşun blok ile ilgili aldığı bilgiler [65].

Malzeme Adı	Kütle Numarası (A)	Atom Numarası (Z)	Yoğunluk (g/cm ³)	I (eV)
Kurşun (Pb)	208	82	11,35	823

Nötronların madde içerisindeki etkileşme olasılığı hesaplanırken temel formül;

$$I(x) = I_0 e^{-N\sigma x} \quad (4.1)$$

I_0 : Girişteki nötron akısı (başlangıç)



Şekil 4.7 Kurşun (Pb) için nötron tesir kesiti grafiği [64]

$I(x)$: x kalınlığında bloktan geçen nötron akısı

σ : Tesir kesiti [cm^2]

N : Atom yoğunluğu [$1/\text{cm}^3$]

x : Malzeme kalınlığı [cm]

şeklinde dir. Burada etkileşen nötronların oranı;

$$\frac{I_0 - I(x)}{I_0} = 1 - e^{-N\sigma x} \quad (4.2)$$

olarak elde edilir. Kurşun içinde ortalama serbest yol

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma} \quad (4.3)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Bu bağıntı Denklem 4.1 ifadesinde kullanıldığında ortalama 13,8 cm kalınlıktaki kurşun bir plaka için nötronların esnek olmayan saçılma ortalama serbest yolun %75'ine karşılık geldiği bulunur. Bu sonuç diğer katmanları geçerek üretece ulaşan nötronların %50'si kurşun blok içinde en az bir nükleer etkileşim gerçekleştireceğini gösterir [51]. Ortalama olarak her Esnek olmayan etkileşimde yaklaşık 15 buharlaşma nötronu üretilir. Üretilen buharlaşma nötronlarının enerjileri yaklaşık 2,5 MeV'dir [66]. Bu bilgiler ışığında dedektör geometrisi tasarımında 14 cm kenar uzunluğuna sahip kurşun blok üreteç olarak kullanılmıştır.

4.3.2 Moderatör (Polietilen)

Bu çalışmada tasarlanan dedektör sisteminde, nötronların enerjisini düşürerek termalize olmalarını sağlamak amacıyla polietilen esaslı bir moderatör malzeme kullanılmıştır. Moderatör olarak seçilen polietilen, %14,37 oranında hidrojen ve %85,63 oranında karbon elementi içerecek şekilde yapılandırılmıştır. Malzemenin yoğunluğu $0,94 \text{ g/cm}^3$ olup oda sıcaklığında (293,15 K) katı fazda modellenmiştir. Hidrojen içeriği, nötron-hidrojen esnek saçılma tesir kesitinin yüksek olması nedeniyle nötron moderasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Aynı malzeme, dedektör geometrisinde hem iç hem de dış moderatör katmanlarında kullanılarak sistemin genel nötron yavaşlatma kapasitesi artırılmıştır. Bu malzeme tanımı, Geant4 simülasyon ortamında hassas malzeme-etkileşim modellemesi yapabilmek adına özel element tanımlamalarıyla gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.2 Geant4'ün veri tabanındaki elementler ile polietilen malzemenin özellikleri.

Malzeme Adı	Sıcaklığı (K)	Yoğunluk (g/cm^3)	Kompozisyonu
Polietilen	293,15	0,94	H (%14,3711), C (%85,6289)

Polietilen içerisindeki hidrojen atomlarıyla gerçekleşen esnek saçılmalar, 1 MeV enerjili nötronlar için ortalama 1 cm'lik bir etkileşim yolu uzunluğuna sahiptir. Her bir çarpışma sonucunda nötronun kinetik enerjisi yaklaşık yarı yarıya azaldığından, buharlaşma nötronları moderatör malzeme içerisinde oldukça verimli bir biçimde yavaşlatabilmektedir.

4.3.3 Sintilatör

Bu çalışmada geliştirilen dedektör sisteminde, iyonlaştırıcı radyasyonun tespiti amacıyla yüksek sintilasyon verimine sahip plastik esaslı ZnS(Ag) sintilatör malzemesi kullanılmıştır. Söz konusu sintilatör, çinko sülfür (ZnS) bileşiğine %3 oranında gümüş (Ag) katılarak elde edilmiştir. Malzemenin yoğunluğu $4,09 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiş olup, çinko elementi doğal izotop dağılımına uygun şekilde (^{64}Zn , ^{66}Zn ve ^{68}Zn) tanımlanmıştır.

Dedektör sisteminde yalnızca ZnS(Ag) sintilatör fazı kullanılmakla kalmamış; ayrıca nötron duyarlılığını artırmak ve mekanik dayanımı iyileştirmek amacıyla bor katkılı bir kompozit yapı geliştirilmiştir. Bu kapsamda hazırlanan malzeme, %60,6 oranında ZnS(Ag), %30,3 oranında bor içeren nötron soğurucu bileşen ve %9,1 oranında sodyum silikat esaslı bir bağlayıcı materyalden oluşturulmuştur.

Bu kompozit yapıda yer alan bor katkısı, özellikle termal nötronların ^{10}B çekirdeği ile reaksiyona girerek yüksek tesir kesitiyle tespit edilmesini sağlar. ZnS(Ag)

bileşeni, bu etkileşim sonucu ortaya çıkan yüklü parçacıkların enerji kaybı aracılığıyla sintilasyon ışığı üreten aktif faz olarak görev yapar. Bağlayıcı malzeme ise fiziksel bütünlüğün korunması ve granüler yapının homojen dağılımı açısından kullanılmıştır.

Kompozit malzemenin optik özellikleri ZnS(Ag) fazının karakteristiklerine uygun olarak modellenmiştir. Bu kapsamda, kırılma indisi 2,36 olarak sabit kabul edilmiş, foton soğurma uzunluğu 0,15 mm olarak atanmıştır [64]. Sintilasyon spektrumu 2,10–3,52 eV enerji aralığında tanımlanmış olup, bu aralıktaki foton enerjilerine karşılık gelen görelî emisyon yoğunlukları deneysel verilere dayalı olarak modellenmiştir. Sintilasyon verimi 4700 foton/MeV olarak belirlenmiş ve sintilasyon zaman sabiti 200 ns olarak atanmıştır [67, 68].

Bu özellikleri sayesinde BNZnSAg kompozit sintilatörü, dedektör sisteminde hem nötron etkileşimlerine karşı yüksek duyarlılık sağlar hem de sintilasyon ışığını etkin şekilde üreterek dedektörün ışık algılayıcı bileşenlerine yönlendirebilir; böylece yüksek hassasiyetli bir ışık sinyali üretimi gerçekleştirilmiş olur.

4.3.4 Yansıtıcı

Yansıtıcı katmanda moderatör katmanında kullanılan polietilen ile aynı özellikleri taşıyan polietilen kullanılmıştır.

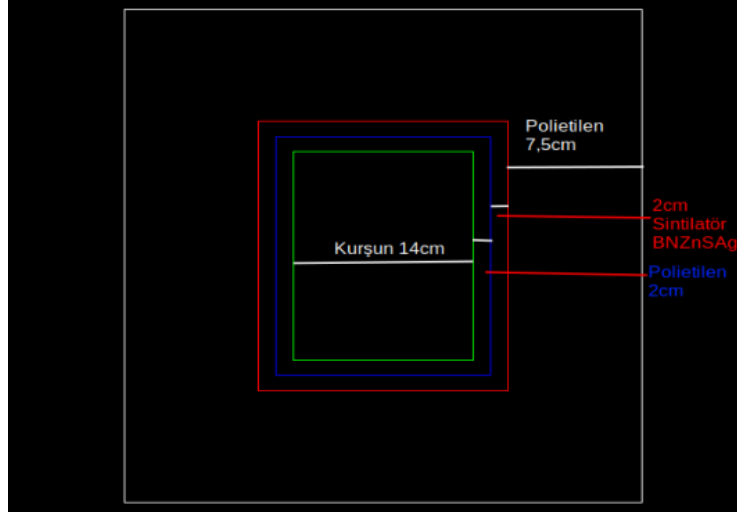
4.4 Dedektör Boyutları

Dedektör sisteminin geometrik tasarımı, nötronların hedef malzemelerle olan etkileşimlerini en verimli şekilde gözlemleyebilmek amacıyla optimize edilmiştir. Şekil 4.8 ile malzeme isimleri ve boyutları detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

4.5 Fiziksel Süreçler

Geant4 programı çalışma süresince meydana gelecek etkileşimleri simüle edebilmek için fizik listeleri içermektedir. QGSP_BERT_HP fizik listesi özellikle nötron etkileşimlerini yüksek hassasiyetli (HP-High Precision) hesaplamaların önemli olduğu uygulamalarda tercih edilen kapsamlı bir fizik listesidir [57]. Geniş bir enerji spektrumunda parçacık etkileşimini modellemeyi amaçlayan bu listenin önemli parçaları şu şekildedir:

QGSP (Quark–Gluon String Model with Precompound): 10 GeV'den yüksek enerji değerlerindeki etkileşimler için kuark-gluon sicim modelini kullanır. Oluşan



Şekil 4.8 Kullanılan materyallerin ölçüklerinin simülasyon üzerinde gösterilmesi

parçacıklar, precompound modeli ile düşük enerjilere taşınmaktadır.

BERT (Bertini Cascade Model): Orta enerjili hadronların (~ 10 GeV) etkileşimlerini modellemek için Bertini intranükleer kaskad modeli kullanılmaktadır.

HP (High Precision Neutron Data): 20 MeV'in altındaki nötron etkileşimlerini ENDF/B ve JENDL gibi veri tabanlarındaki verileri kullanarak yüksek hassasiyetli sonuçlar sağlamaktadır. Bu özellik nötron moderasyonu ve doz hesaplamada büyük önem taşımaktadır.

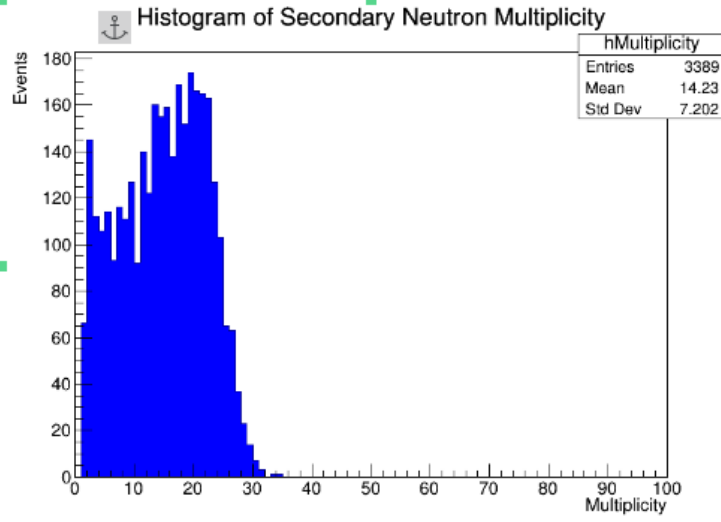
Tez süresince geliştirilen kozmik nötron dedektörü geometrisi Geant4 kodu ile simüle edilirken QGSP_BERT_HP fizik listesi kullanılmıştır [57].

4.6 Dedektör Geometrisi için Simülasyonlar

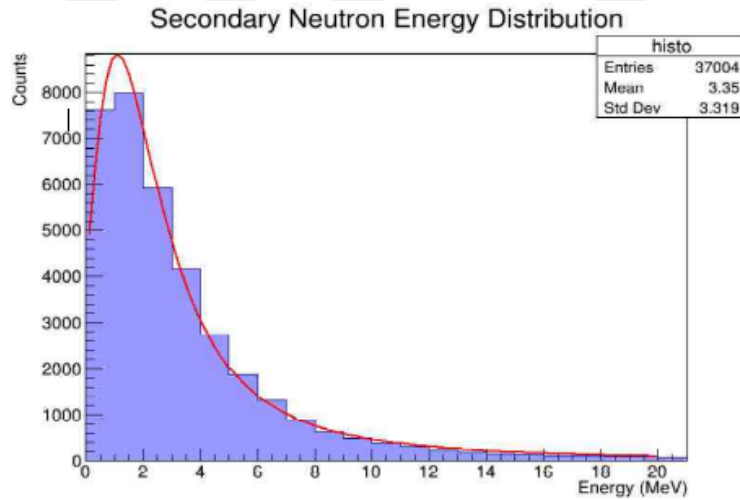
Bu bölümde, yüksek enerjili nötronların tespitine yönelik olarak tasarlanmış dedektör sisteminin genel yapısı, kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin fiziksel işlevleri ayrıntılı bir biçimde sunulacaktır. Bu kapsamda, dedektörün yapısal tasarımı, kullanılan materyallerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, sistemin etkileşim fiziğine dayalı olarak ölçeklendirilme gerekçeleri ile birlikte detaylı olarak ele alınacaktır. Ayrıca, sistemin nötronlara karşı verdiği yanıtın değerlendirilmesine yönelik simülasyon ve deneysel bulgulara dayalı analizlere ilgili alt başlıklarda yer verilecektir.

4.6.1 Üreteçteki Nötron Etkileşimlerinin Simülasyonu

Bu simülasyon çalışmasında 700 MeV enerjide 10000 nötron 14 cm kalınlığındaki kurşun bloğa gönderilmiştir. Yapılan çalışmalar, 100–700 MeV aralığında enerjiye sahip nötronların, atmosferik etkileşimler sonucunda her bir nötron başına ortalama 15 ikincil nötron ürettiğini göstermektedir. Bu ikincil nötronların ortalama enerjisi ise yaklaşık 2,5 MeV olarak belirlenmiştir [51, 66, 69].

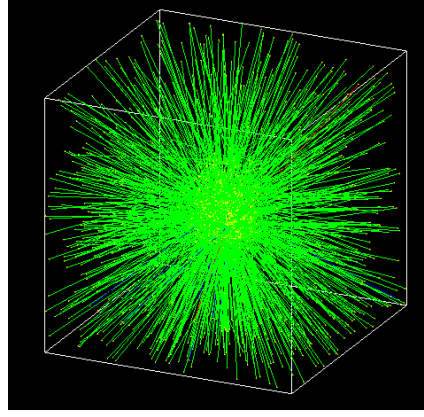


Şekil 4.9 700 MeV nötronlar için olay başına üreteçte üretilen ikincil nötron sayısı



Şekil 4.10 700 MeV nötronlar için sayım başına üreteçte üretilen ikincil nötron enerjileri

Simülasyon verilerinin ROOT ile işlenmesi sonucunda Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 ile verilen sonuçlar ortaya çıkmıştır. Şekil 4.8 ile gösterilen dağılıma ROOT paketi ile Landau fit uygulandığı takdirde MPV (Most Probable Value): 1,28 MeV olarak bulunmaktadır. Yaklaşık 2 GeV üzerindeki birincil nötron enerjilerinden itibaren MPV değeri 2 MeV değerlerine ulaştığı gözlenmiştir. Şekil 4.7 incelendiğinde ise

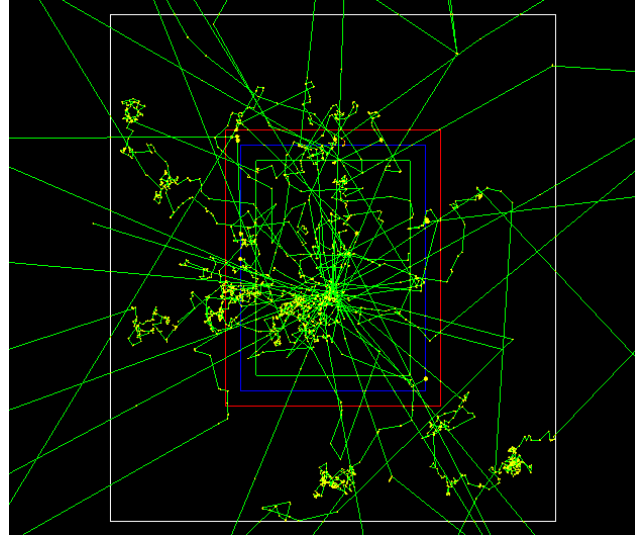


Şekil 4.11 700 MeV nötronlar için olay başına üretilen ikincil nötronların görselleştirilmesi

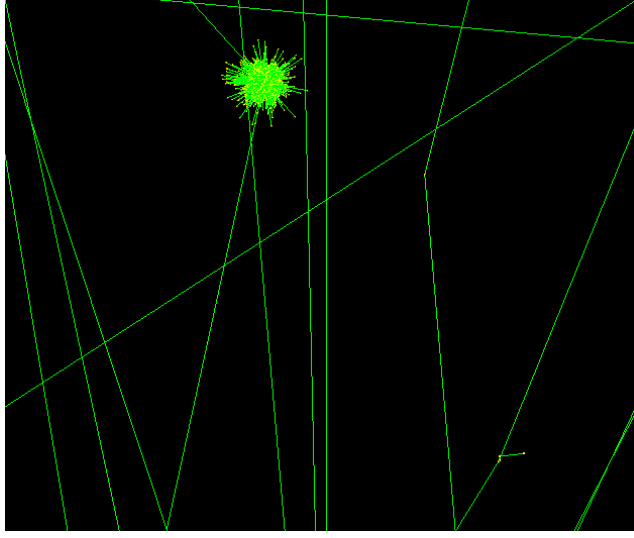
olay başına düşen ikincil nötron sayısının ortalama değerinin 14,23 olduğu ve bu değer literatür ile yaklaşık olarak uyum sağladığı görülmüştür.

4.6.2 Dedektör Tasarımının Simülasyonu

Üreteç, moderatör, plastik sintilatör ve yansıtıcı katmanlarının tamamı simülasyona eklendiğinde üretilen ikincil nötronların moderatör tarafından yavaşlatıldığı, sintilatör ve dönüştürücü karışımı ile etkileşime girerek Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 ile gösterildiği gibi alfa parçacıklarından optik foton ürettiği gözlemlendi.



Şekil 4.12 Geant4 GUI arayüzünde kozmik nötron etkileşimlerinin görselleştirilmesi



Şekil 4.13 Geant4 GUI arayüzünde alfa etkileşimlerinden sintilasyon fotonlarının üretilmesinin görselleştirilmesi

5

SONUÇ

Bu çalışmada, nötron reaksiyonları ve bu reaksiyonlara dayalı plastik sintilatör tabanlı dedektör sistemleri incelenmiş; avantaj ve dezavantajları değerlendirilerek kozmik nötronların enerji spektrumunda algılanabilirliğine yönelik karşılaştırmalar yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizler doğrultusunda, plastik sintilatörlerin kozmik nötronların algılanmasındaki potansiyeli Monte Carlo yöntemine dayalı simülasyonlarla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, Geant4 programı kullanılarak yeni bir dedektör sistemi tasarlanmış ve simülasyonlar sonucunda elde edilen veriler ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir.

Tasarlanan dedektörde kullanılacak olan kurşun üreteç katmanının kalınlığı, 700 MeV enerjili nötronlar ile test edilmiştir. Bu testler sonucunda, olay başına üreteçte üretilen ikincil nötron sayısı (multiplicity) ve bu nötronlara ait enerji dağılımları ROOT programı ile analiz edilerek elde edilmiştir. 14 cm kalınlığındaki kurşun tabakasının, 700 MeV nötronlar için literatürle uyumlu sonuçlar verdiği; ancak üretilen ikincil nötronların enerji değerlerinin, bazı çalışmalarla yaklaşık %50 oranında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Dedektör sisteminin tamamı 700 MeV enerjili nötronlarla test edilmiş ve tüm katmanların öngörülen etkileşimleri başarıyla gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca sistemde kullanılan ZnS(Ag) sintilatörüne katılan ^{10}B nötron dönüştürücü ile üretilen alfa parçacıklarının, sintilasyon fotonlarının üretimini sağladığı belirlenmiştir.

İlerleyen çalışmalarda, literatürle çelişen enerji değerlerinin nedenleri araştırılarak gerekli düzeltmeler yapılacak; ayrıca sisteme akrilik bir ışık iletim katmanı ile SiPM (Silicon Photomultiplier) eklenecek ve optik foton sayımı gerçekleştirilerek doğrudan sinyal üretimi sağlanacaktır. Elde edilen bu sinyaller aracılığıyla dedektörün genel verimi nicel olarak değerlendirilecektir.

KAYNAKÇA

- [1] *Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten - CERN Document Server.* erişim adresi: <https://cds.cern.ch/record/262750> (erişim tarihi 28/05/2025).
- [2] *Cosmic Rays at Earth | ScienceDirect.* erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/book/9780444507105/cosmic-rays-at-earth> (erişim tarihi 28/05/2025).
- [3] Particle Data Group ve diğ., “Review of Particle Physics,” en, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, c. 2022, no. 8, Ağus. 2022, Publisher: Oxford University Press (OUP), issn: 2050-3911. doi: 10.1093/ptep/ptac097. erişim adresi: <https://academic.oup.com/ptep/article/doi/10.1093/ptep/ptac097/6651666> (erişim tarihi 23/05/2025).
- [4] T. K. Gaisser, R. Engel E. Resconi, *Cosmic rays and particle physics*, Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2016, isbn: 978-0-521-01646-9.
- [5] L. ANCHORDOQUI, T. PAUL, S. REUCROFT J. SWAIN, “ULTRAHIGH ENERGY COSMIC RAYS: THE STATE OF THE ART BEFORE THE AUGER OBSERVATORY,” en, *International Journal of Modern Physics A*, May. 2012, Publisher: World Scientific Publishing Company. doi: 10.1142/S0217751X03013879. erişim adresi: <https://www.worldscientific.com/worldscinet/ijmpa> (erişim tarihi 21/06/2025).
- [6] V. Grebenyuk ve diğ., “Secondary cosmic rays in the NUCLEON space experiment,” *Advances in Space Research, Advances in Cosmic-Ray Astrophysics and Related Areas*, c. 64, no. 12, ss. 2559–2563, Ara. 2019, issn: 0273-1177. doi: 10.1016/j.asr.2019.06.030. erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027311771930479X> (erişim tarihi 28/05/2025).
- [7] D. J. Bombardieri, K. J. Michael, M. L. Duldig J. E. Humble, “Relativistic Proton Production during the 2001 April 15 Solar Event,” en, *The Astrophysical Journal*, c. 665, no. 1, s. 813, Ağus. 2007, Publisher: IOP Publishing, issn: 0004-637X. doi: 10.1086/519514. erişim adresi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/519514/meta> (erişim tarihi 29/05/2025).

- [8] M. Desai J. Giacalone, “Large gradual solar energetic particle events,” en, *Living Reviews in Solar Physics*, c. 13, no. 1, s. 3, Eyl. 2016, issn: 1614-4961. doi: 10.1007/s41116-016-0002-5. erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/s41116-016-0002-5> (erişim tarihi 29/05/2025).
- [9] G. Bazilevskaya ve diğ., “Cosmic Ray Induced Ion Production in the Atmosphere,” *Space Science Reviews*, c. 137, ss. 149–173, Haz. 2008, issn: 978-0-387-87663-4. doi: 10.1007/s11214-008-9339-y.
- [10] J. M. Ryan, J. A. Lockwood H. Debrunner, “Solar Energetic Particles,” en, *Space Science Reviews*, c. 93, no. 1, ss. 35–53, Tem. 2000, issn: 1572-9672. doi: 10.1023/A:1026580008909. erişim adresi: <https://doi.org/10.1023/A:1026580008909> (erişim tarihi 01/06/2025).
- [11] M. Nagano A. Watson, “Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays,” *Reviews of Modern Physics - REV MOD PHYS*, c. 72, ss. 689–732, Tem. 2000. doi: 10.1103/RevModPhys.72.689.
- [12] J. Becker Tjus L. Merten, “Closing in on the origin of Galactic cosmic rays using multimessenger information,” *Physics Reports*, Closing in on the origin of Galactic cosmic rays using multimessenger information, c. 872, ss. 1–98, Ağus. 2020, issn: 0370-1573. doi: 10.1016/j.physrep.2020.05.002. erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157320301927> (erişim tarihi 28/05/2025).
- [13] P. Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin R. A. Fréon, “Extensive Cosmic-Ray Showers,” *Reviews of Modern Physics*, c. 11, no. 3-4, ss. 288–291, Tem. 1939, Publisher: American Physical Society. doi: 10.1103/RevModPhys.11.288. erişim adresi: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.11.288> (erişim tarihi 21/06/2025).
- [14] K.-H. Kampert, “Cosmic rays and particle physics,” en, *Acta Physica Hungarica Series A, Heavy Ion Physics*, c. 14, no. 1, ss. 203–215, Ocak 2001, issn: 1588-2675. doi: 10.1556/APH.14.2001.1-4.20. erişim adresi: <https://doi.org/10.1556/APH.14.2001.1-4.20> (erişim tarihi 28/05/2025).
- [15] P. K. Grieder, “Shower Detection Methods and Basic Event Reconstruction,” en, içinde *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects A Tutorial, Reference Manual and Data Book*, P. K. Grieder, ed., Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, ss. 33–76, isbn: 978-3-540-76941-5. doi: 10.1007/978-3-540-76941-5_2. erişim adresi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-76941-5_2 (erişim tarihi 01/06/2025).
- [16] L. I. Dorman, “Secondary Cosmic Rays Underground and in the Atmosphere,” en, içinde *Cosmic Rays in the Earth’s Atmosphere and Underground*, L. I. Dorman, ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 2004, ss. 39–88, isbn: 978-1-4020-2113-8. doi: 10.1007/978-1-4020-2113-8_2. erişim adresi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2113-8_2 (erişim tarihi 07/06/2025).

- [17] “Fifty Years of Ground Level Solar Particle Event Observations,” en, içinde *Solar Eruptions and Energetic Particles*, John Wiley & Sons, Inc., Ocak 2006, isbn: 978-1-118-66620-3. doi: 10.1029/165GM27. erişim adresi: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/165GM27> (erişim tarihi 01/06/2025).
- [18] J. Chadwick, “Possible Existence of a Neutron,” en, *Nature*, c. 129, no. 3252, ss. 312–312, Şub. 1932, Number: 3252 Publisher: Nature Publishing Group, issn: 1476-4687. doi: 10.1038/129312a0. erişim adresi: <https://www.nature.com/articles/129312a0> (erişim tarihi 03/06/2025).
- [19] D. J. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, English, 2nd. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2008, isbn: 978-3-527-40601-2.
- [20] K. S. Krane, *Introductory nuclear physics*, eng, Rev. ed., [Nachdr.] Hoboken, NJ: Wiley, 1988, isbn: 978-0-471-80553-3.
- [21] P. D. Group, *Review of Particle Physics – Neutron*, English, 2024. erişim adresi: <https://pdg.lbl.gov/2024/listings/rpp2024-list-n.pdf> (erişim tarihi 06/03/2025).
- [22] B. Povh, K. Rith, C. Scholz F. Zetsche, *Particles and Nuclei: An Introduction to the Physical Concepts*, en, 6. 6th ed. 2008, çev. M. Lavelle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, isbn: 978-3-540-79367-0 978-3-540-79368-7. doi: 10.1007/978-3-540-79368-7.
- [23] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, en, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2010, isbn: 978-0-470-13148-0.
- [24] C. Grupen, B. A. Shwartz H. Spieler, *Particle detectors* (Cambridge monographs on particle physics, nuclear physics, and cosmology 26), eng, 2nd ed. Cambridge, UK New York: Cambridge University Press, 2008, isbn: 978-0-521-84006-4 978-0-511-38866-8.
- [25] H. Cember T. E. Johnson, *Introduction to health physics*, en, 4th ed. New York: McGraw-Hill Medical, 2009, isbn: 978-0-07-164323-8.
- [26] J. R. Lamarsh, “Introduction to nuclear engineering,” English, Ocak 1975, Publisher: Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA. erişim adresi: <https://www.osti.gov/biblio/5272097> (erişim tarihi 04/06/2025).
- [27] R. E. Lingenfelter, “Production of carbon 14 by cosmic-ray neutrons,” en, *Reviews of Geophysics*, c. 1, no. 1, ss. 35–55, 1963, _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/RG001i001p00035>, issn: 1944-9208. doi: 10.1029/RG001i001p00035. erişim adresi: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RG001i001p00035> (erişim tarihi 07/06/2025).
- [28] J. Masarik J. Beer, “Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth’s atmosphere,” en, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, c. 104, no. D10, ss. 12 099–12 111, 1999, _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/1998JD200091>, issn: 2156-2202. doi: 10.1029/1998JD200091. erişim adresi: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1998JD200091> (erişim tarihi 07/06/2025).

- [29] *Detection of cosmic-ray or gamma-ray air showers*. erişim adresi: <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/ShowerDetection.html> (erişim tarihi 07/06/2025).
- [30] S. E. Forbush, “Three Unusual Cosmic-Ray Increases Possibly Due to Charged Particles from the Sun,” *Physical Review*, c. 70, no. 9-10, ss. 771–772, Kas. 1946, Publisher: American Physical Society. doi: 10.1103/PhysRev.70.771. erişim adresi: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.70.771> (erişim tarihi 07/06/2025).
- [31] J. A. Simpson, “The Latitude Dependence of Neutron Densities in the Atmosphere as a Function of Altitude,” *Physical Review*, c. 73, no. 11, ss. 1389–1391, 1948. doi: 10.1103/PhysRev.73.1389.
- [32] *29th International Cosmic Ray Conference. 29th International Cosmic Ray Conference*, Backup Publisher: Tata Institute of Fundamental Research Place: Mumbai, 2005. erişim adresi: <https://cds.cern.ch/record/710300> (erişim tarihi 07/06/2025).
- [33] *WDC-CR: World Data Center for Cosmic Rays, Geospace Research Center, Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University*. erişim adresi: <https://cidas.isee.nagoya-u.ac.jp/WDCR/> (erişim tarihi 07/06/2025).
- [34] *NMDB*, en-us. erişim adresi: <https://www.nmdb.eu/> (erişim tarihi 07/06/2025).
- [35] *Links to Cosmic ray DATA*. erişim adresi: <http://cr0.izmiran.ru/common/links.htm> (erişim tarihi 07/06/2025).
- [36] “Atomic Weights and Isotopic Compositions with Relative Atomic Masses,” en, *NIST*, Ağus. 2009, Last Modified: 2024-05-14T14:10-04:00. erişim adresi: <https://www.nist.gov/pml/atomic-weights-and-isotopic-compositions-relative-atomic-masses> (erişim tarihi 09/06/2025).
- [37] *E4/Servlet: Output*. erişim adresi: <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/E4sMakeE4> (erişim tarihi 09/06/2025).
- [38] *Atomic Weights and Isotopic Compositions for Gadolinium*. erişim adresi: https://physics.nist.gov/cgi-bin/Compositions/stand_alone.pl?ele=gd&ascii=html&isotype=some (erişim tarihi 09/06/2025).
- [39] M. Montoya, “Pair breaking and Coulomb effects in cold fission from thermal neutron induced fission of U 233, U 235 and Pu 239,” Nis. 2013.
- [40] G. Wakabayashi, T. Yamada, T. Endo C. H. Pyeon, “Nuclear Instrumentation,” en, içinde *Introduction to Nuclear Reactor Experiments*, G. Wakabayashi, T. Yamada, T. Endo C. H. Pyeon, ed., Singapore: Springer Nature, 2023, ss. 137–152, isbn: 978-981-19-6589-0. doi: 10.1007/978-981-19-6589-0_5. erişim adresi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-6589-0_5 (erişim tarihi 16/06/2025).

- [41] N. Tsoulfanidis, N. Tsoulfanidis S. Landsberger, *Measurement and Detection of Radiation*, 4. bs. Boca Raton: CRC Press, Nis. 2015, isbn: 978-0-429-19441-2. doi: 10.1201/b18203.
- [42] P. M. Dighe, “New cathode design boron lined proportional counters for neutron area monitoring application,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, c. 575, no. 3, ss. 461–465, Haz. 2007, issn: 0168-9002. doi: 10.1016/j.nima.2007.03.013. erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900207004718> (erişim tarihi 22/06/2025).
- [43] T. Wilpert, “Boron trifluoride detectors,” *Neutron News*, c. 23, no. 4, ss. 14–19, Kas. 2012, Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1080/10448632.2012.725326>, issn: 1044-8632. doi: 10.1080/10448632.2012.725326. erişim adresi: <https://doi.org/10.1080/10448632.2012.725326> (erişim tarihi 22/06/2025).
- [44] I. Pawełczak, A. Glenn, H. Martinez, M. Carman, N. Zaitseva S. Payne, “Boron-loaded plastic scintillator with neutron-?? pulse shape discrimination capability,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, c. 751, ss. 62–69, Tem. 2014. doi: 10.1016/j.nima.2014.03.027.
- [45] D. S. McGregor, M. D. Hammig, Y. .-. Yang, H. K. Gersch R. T. Klann, “Design considerations for thin film coated semiconductor thermal neutron detectors—I: basics regarding alpha particle emitting neutron reactive films,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, NIMA Vol 500, c. 500, no. 1, ss. 272–308, Mar. 2003, issn: 0168-9002. doi: 10.1016/S0168-9002(02)02078-8. erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900202020788> (erişim tarihi 22/06/2025).
- [46] W. R. Mills, R. L. Caldwell I. L. Morgan, “Low Voltage He3-Filled Proportional Counter for Efficient Detection of Thermal and Epithermal Neutrons,” English, *Review of Scientific Instruments*, c. 33, no. 8, Ocak 1962, Institution: Socony Mobil Oil Co., Inc., Dallas, Tex. Publisher: American Institute of Physics (AIP), issn: 0034-6748. doi: 10.1063/1.1717994. erişim adresi: <https://www.osti.gov/biblio/4805473> (erişim tarihi 17/06/2025).
- [47] S. Kahn, R. Harman V. Forgue, “Energy Distributions of Fission Fragments from Uranium Dioxide Films,” *Nuclear Science and Engineering*, c. 23, no. 1, ss. 8–20, Eyl. 1965, Publisher: American Nuclear Society. doi: 10.13182/NSE65-A19254. erişim adresi: <http://epubs.ans.org/?a=19254> (erişim tarihi 17/06/2025).
- [48] R. E. Tressler, “Structural and Thermostructural Ceramics,” içinde *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. H. J. Buschow ve diğ., ed., Oxford: Elsevier, Ocak 2001, ss. 8913–8921, isbn: 978-0-08-043152-9. doi: 10.1016/B0-08-043152-6/01604-1. erişim adresi:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080431526016041> (erişim tarihi 17/06/2025).

- [49] C. Wang, L. Gou, J. Zaleski D. Friesel, “ZnS quantum dot based nanocomposite scintillators for thermal neutron detection,” *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment - NUCL INSTRUM METH PHYS RES A*, c. 622, ss. 186–190, Ekim 2010. doi: 10.1016/j.nima.2010.07.032.
- [50] R. L. Bramblett, R. I. Ewing T. W. Bonner, “A new type of neutron spectrometer,” *Nuclear Instruments and Methods*, c. 9, no. 1, ss. 1–12, Ekim 1960, issn: 0029-554X. doi: 10.1016/0029-554X(60)90043-4. erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X60900434> (erişim tarihi 19/06/2025).
- [51] O. E. Malandraki N. B. Crosby, ed., *Solar Particle Radiation Storms Forecasting and Analysis* (Astrophysics and Space Science Library), en. Cham: Springer International Publishing, 2018, c. 444, isbn: 978-3-319-60050-5 978-3-319-60051-2. doi: 10.1007/978-3-319-60051-2. erişim adresi: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-60051-2> (erişim tarihi 20/06/2025).
- [52] L. V. East R. B. Walton, “Polyethylene moderated ^3He neutron detectors,” *Nuclear Instruments and Methods*, c. 72, no. 2, ss. 161–166, Tem. 1969, issn: 0029-554X. doi: 10.1016/0029-554X(69)90152-9. erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X69901529> (erişim tarihi 20/06/2025).
- [53] W. P. Pönitz, “A “grey” neutron detector for the intermediate energy region,” *Nuclear Instruments and Methods*, c. 58, no. 1, ss. 39–44, Ocak 1968, issn: 0029-554X. doi: 10.1016/0029-554X(68)90026-8. erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X68900268> (erişim tarihi 20/06/2025).
- [54] W. P. Poenitz, “Experimental determination of the efficiency of the grey neutron detector,” *Nuclear Instruments and Methods*, c. 72, no. 1, ss. 120–122, Tem. 1969, issn: 0029-554X. doi: 10.1016/0029-554X(69)90277-8. erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X69902778> (erişim tarihi 20/06/2025).
- [55] B. Vuković, I. Lisjak, V. Radolić, B. Vekić J. Planinić, “Measurements of the dose due to cosmic rays in aircraft,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, c. 562, no. 1, ss. 517–520, Haz. 2006, issn: 0168-9002. doi: 10.1016/j.nima.2006.01.132. erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900206002373> (erişim tarihi 20/06/2025).
- [56] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis H. Araujo, *GEANT4-a simulation toolkit* *NIM A506* 250–303, 2003.
- [57] J. Allison ve diğ., “Geant4 developments and applications,” *IEEE Transactions on nuclear science*, c. 53, no. 1, ss. 270–278, 2006.

- [58] R. Brun F. Rademakers, “ROOT—An object oriented data analysis framework,” *Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, c. 389, no. 1-2, ss. 81–86, 1997.
- [59] I. Antcheva ve diğ., “ROOT—A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization,” *Computer Physics Communications*, c. 180, no. 12, ss. 2499–2512, 2009.
- [60] B. Stroustrup, “An overview of the C++ programming language,” *Handbook of object technology*, c. 72, 1999.
- [61] N. Metropolis S. Ulam, “The monte carlo method,” *Journal of the American statistical association*, c. 44, no. 247, ss. 335–341, 1949.
- [62] R. team, *About ROOT*, en. erişim adresi: <https://root.cern/about/> (erişim tarihi 18/06/2025).
- [63] P. Stowell, S. Fargher, L. Thompson, A. Brown P. Chadwick, “Gadolinium loaded Cherenkov detectors for neutron monitoring in high energy air showers,” en, *Journal of Instrumentation*, c. 17, no. 02, T02005, Şub. 2022, Publisher: IOP Publishing, issn: 1748-0221. doi: 10.1088/1748-0221/17/02/T02005. erişim adresi: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/T02005> (erişim tarihi 20/06/2025).
- [64] *Sigma Plots*. erişim adresi: <https://www.nndc.bnl.gov/sigma/getPlot.jsp?evalid=15294&mf=3&mt=1&nsub=10> (erişim tarihi 20/06/2025).
- [65] *G4 Nist Materials*. erişim adresi: https://www.fe.infn.it/u/paterno/Geant4_tutorial/slides_further/Geometry/G4_Nist_Materials.pdf (erişim tarihi 21/06/2025).
- [66] C. J. Hatton, *The Neutron Monitor* (Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics). New York: American Elsevier Publishing Company, 1971, c. 10.
- [67] J. P. Stowell, S. J. Fargher, C. A. Steer L. F. Thompson, “Optimising Scintillating Neutron Detectors for Cosmic Ray Soil Moisture Monitoring,” *Journal of Instrumentation*, c. 16, no. 11, P11039, Kas. 2021, arXiv:2106.06757 [physics], issn: 1748-0221. doi: 10.1088/1748-0221/16/11/P11039. erişim adresi: <http://arxiv.org/abs/2106.06757> (erişim tarihi 21/06/2025).
- [68] “COATED MICRO-PARTICLES FOR IMPROVED NEUTRON DETECTION WITH 6LiF:ZnS(Ag) - Blacklight,” en, erişim adresi: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/16479ful51> (erişim tarihi 21/06/2025).
- [69] M. Shen, “NEUTRON PRODUCTION IN LEAD AND ENERGY RESPONSE OF A NEUTRON MONITOR.,” English, *Nuovo Cim., Suppl.*, 6: 1177-1224(1968)., Ocak 1968, Institution: Franklin Inst., Swarthmore, Pa. erişim adresi: <https://www.osti.gov/biblio/4780065> (erişim tarihi 21/06/2025).

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. Arslan D., Yetkin A. (2025). *Plastik Sintilatörler Kullanılarak Yüksek Enerjili Nötronların Dedekte Edilmesi*, 14th International Conference on Applied Sciences, Kyrenia, KKTC.

