



T.C
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

YENİ TİP NÖTRON DEDEKTÖRLERİN GEANT SİMULASYON PROGRAMIYLA
ENERJİ ÇÖZÜNÜRLÜĞÜNÜN HESAPLANMASI

ZELİHA SEDA KETENCİ

Şubat 2012

T.C
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

YENİ TİP NÖTRON DEDEKTÖRLERİN GEANT SİMULASYON PROGRAMIYLA
ENERJİ ÇÖZÜNÜRLÜĞÜNÜN HESAPLANMASI

ZELİHA SEDA KETENCİ


Yüksek Lisans Tezi


Danışman


Prof. Dr. Sefa ERTÜRK

Şubat 2012

Zeliha Seda KETENCİ tarafından **Prof. Dr. Sefa ERTÜRK** danışmanlığında hazırlanan “**Yeni Tip Nötron Dedektörlerin GEANT Simülasyon Programıyla Enerji Çözünürlüğünün Hesaplanması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **FİZİK** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : 
Prof. Dr. Sefa ERTÜRK, Niğde Üniversitesi

Üye : 
Doç. Dr. Kenan SÖĞÜT, Mersin Üniversitesi

Üye : 
Yrd. Doç. Dr. Hüsnü AKSAKAL, Niğde Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA
MÜDÜR

ÖZET

YENİ TİP NÖTRON DEDEKTÖRLERİN GEANT SİMULASYON PROGRAMIYLA ENERJİ ÇÖZÜNÜRLÜĞÜNÜN HESAPLANMASI

KETENCİ, Zeliha Seda

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sefa ERTÜRK

Şubat 2012, 69 Sayfa

Bu çalışmada yeni tip nötron dedektörlerinin enerji, zaman ve ışık üretimi çözünürlüklerinin verimleri incelenmiştir. Bunlar dedektörün boyutlarına bakılarak analiz edilmiştir. Yeni tip nötron dedektör topluluğu NEDA (NEutron Detector Array) Fransa'nın GANIL laboratuvarında SPIRAL2 hızlandırıcı kompleksi içerisinde kullanılmak üzere tasarlanmaktadır.

Geant4 simülasyon kodu ve GSort analiz programları kullanılarak, NEDA topluluğunun geometrisi ve dedektör materyallerine karar verilmiştir. Farklı hacimlerde ve farklı materyaller için dedektör verimleri ve bir parçacığın birden fazla dedektördeki çoklu ölçümleri incelenmiştir. Dedektör geometrisi altıgen prizma olarak belirlenmiş ve materyal olarak ta BC501A sıvı sintilatörü seçilmiştir. Tabi bu çalışma daha sonra BC537 sıvı sintilatörü içinde test edilmiştir. Bunun sonucunda dedektörlerin verimleri ve parçacıkların sırasındaki saçılması ve geometri ile birlikte materyalin etkisi de gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler :Nötron dedektörleri, Verim , GEANT ,NEDA

ABSTRACT

ESTIMATION OF ENERGY RESOLUTION FOR NEW GENERATION NEUTRON DETECTOR VIA GEANT SIMULATION TOOL

KETENCI, Zeliha Seda

Nigde University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Advisor: Prof. Dr. Sefa ERTURK

February 2012, 69 Pages

In this study, the efficiency of energy, time and light production resolutions of new generation neutron detectors are investigated considering the detector properties. New generation NEDA (NEutron Detector Array) is designed to be used in SPIRAL2 accelerator complex at GANIL laboratory in France.

The geometry and materials for NEDA are determined by Geant4 simulation tool and Gsort analysis program. The efficiencies of the detector for various size and material are investigated together with multiple detections of a particle at more than one detector. Hexagonal prism and BC501A liquid scintillator are chosen as the detector geometry and detector material, respectively. The detector is also tested for BC537 liquid scintillator. In addition to detector efficiency, detector geometry and sputtering of particles, the effect of detector material is also observed.

Keywords: Neutron detectors, efficiency, GEANT, NEDA

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bana her konuda öncülük eden ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan değerli hocam Prof. Dr. Sefa ERTÜRK'e, tez dönemi boyunca yardımını, desteğini ve paylaşımını hiçbir zaman esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Birgül EREN'e ve Bora TİMURKUTLUK'a, yüksek lisans eğitimim boyunca yanımda her türlü desteği veren eniőtem Yrd. Doç. Dr. M.Suat DELİBALTA ve ablam E.Sinem DELİBALTA'ya, son olarak tüm hayatım boyunca beni esirgeyen, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili anneciğime ve babacığıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
SUMMARY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 NÖTRON FİZİĞİ	3
2.1 Nötron Fizığının Özellikleri.....	3
2.2 Nötronun Kütlesi ve Yüğü	5
2.3 Nötronlar ve Dalga Boyu.....	6
2.4 Nötronun İstatistığı ve Spini	8
2.5 Serbest Nötronun Bozunması	8
2.6 Nötronun Manyetik Momenti	8
2.7 Nötronların Enerjilerine Göre Sınıflandırılması	9
2.8 Nötron Kaynakları	9
2.9 Nötron Tabanlı Teknikler	11
2.9.1 Termal nötron analizi	11
2.9.2 Hızlı nötron analizi	11
2.9.3 Darbeli hızlı nötron analizi.....	12
2.9.4 Darbeli hızlı nötron iletim spektroskopisi	12
2.9.5 Bileşik parçacık görüntüleme	12
2.9.6 Darbeli hızlı nötron termal analizi.....	12
2.9.7 Hızlı nötron saçılma analizi.....	13
BÖLÜM 3 NÖTRONLARLA MADDE ARASINDAKİ REAKSİYONLAR	14
3.1 Nötron Reaksiyonları ve Özellikleri	14
3.2 Nötron Reaksiyonlarının Sınıflandırılması.....	15
3.3 Elastik Çarpışma (n,n)	15
3.4 İnelastik Çarpışma (n,n), (n,n γ) veya (n,2n).....	15
3.5 Yavaş ve Hızlı Nötronların Etkisi.....	16
BÖLÜM 4 DETEKTÖRLER	17
4.1 Detektör Çeşitleri.....	17
4.1.1 Gaz dolu detektörler	17

4.1.2 İyon odalı detektörler	20
4.1.3 Orantılı sayaçlar	21
4.1.4 Geiger Muller detektörü	22
4.1.5 Yarı-iletken detektörler	24
4.1.6 Sintilasyon detektörleri.....	25
4.2. Nötron Detektörleri	27
4.2.1 Nötron detektörlerinin çalışma prensibi	27
4.2.2 Nötron deteksiyonunun prensipleri	28
4.2.3 Düşük enerjili nötron detektörleri	30
4.2.4 Orta enerjili nötron detektörleri.....	31
4.2.5 Yüksek enerjili nötron detektörleri.....	31
4.2.6 Organik sintilatör detektörlerin özellikleri	32
BÖLÜM 5 GEANT4 VE UYGULAMALARI	34
5.1 GEANT4.....	34
5.2 GEANT4 ile Yapılan Yeni Tip Nötron Detektörü(NEDA).....	35
5.2.1 Neutron Wall geometrisi	35
5.2.2 NEDA tasarımı ve geometrisi	37
5.2.3 Simülasyon çeşidi.....	38
5.2.4 Performans parametreleri	39
5.2.5 Simülasyonlar için giriş dataları.....	40
5.2.6 Detektör boyut çalışmaları	41
5.2.7 Cross – Talk.....	43
5.2.8 Nötron etkileşim zamanları	46
5.2.9 NEDA geometrisi için dedektör boyut etkisi ve sonuçları.....	51
BÖLÜM 6 YAPILAN ÇALIŞMALAR	56
6.1 Enerji İçin Simulasyon Sonuçları	56
6.2 Zaman İçin Simulasyon Sonuçları	59
BÖLÜM 7 TARTIŞMA VE SONUÇ.....	67
BÖLÜM 8 KAYNAKLAR.....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Nötronun varlığını ispat etmek için Chadwick'in kullandığı alet	4
Şekil 2.2 Serbest bir nötronun beta bozunumuna uğraması	8
Şekil 3.1 Nötronun bir çekirdekten elastik saçılması	15
Şekil 3.2 Nötronun elastik saçılması	16
Şekil 4.1 Silindirik orantılı sayaç	18
Şekil 4.2 Farklı gazlarla doldurulmuş sayaçlar tarafından meydana getirilen puls yükseklikleri	20
Şekil 4.3 İyonizasyon odası detektör	21
Şekil 4.4 Bir orantılı sayıcı sistemi blok diyagramı	22
Şekil 4.5 Geiger–Müller sayacı	23
Şekil 4.6 Yarıiletken detektör şeması	24
Şekil 4.7 Sintilasyon detektör şeması	26
Şekil 4.8 Tipik gazlı nötron detektörü	27
Şekil5.1 Neutron Wall detektörlerinin yerleri ve numaraları (http://nsg.tsl.uu.se/nwall/geometry/nwall-detector-numbering.png)	36
Şekil 5.2 NEDA için tasarlanan, Neutron Wall'a benzetilerek yapılan yeni basit dizayn	37
Şekil5.3 ^{252}Cf kaynağından salınan nötronların enerji dağılımı	40
Şekil5.4 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Cr}$ reaksiyonundan nötronların enerji dağılımı	41
Şekil5.5 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Cr}$ reaksiyonundan nötronların açısal dağılımı	41
Şekil 5.6 $^{32}\text{S} + ^{28}\text{S}$ reaksiyonundan nötronların enerji dağılımı	42
Şekil5.7 $^{32}\text{S} + ^{28}\text{S}$ reaksiyonundan nötronun açısal dağılımı	42
Şekil 5.8 Sintilatör silindir detektör uzunluğunun bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir.....	42
Şekil5.9 Nötron deteksiyon olasılıkları iki sintilatör ve 1, 2, 4 ve 8 MeV enerji aralığındaki nötronlar için silindir detektörlerinin bir fonksiyonu	43
Şekil 5.10 İki sintilatörün nötron enerjisine bağlı olarak dedekleme olasılığının karşılaştırılması	44
Şekil 5.11 Simülasyonda kullanılan detektör	44
Şekil 5.12 2–4 MeV enerjilerindeki nötronlar için simülasyon sonuçları	45
Şekil 5.13 1 MeV enerjisindeki nötronlar için simülasyon sonuçları.....	45

Şekil 5.14 TOF dağılımının genişliği	46
Şekil 5.15 BC501A için TOF dağılımları	47
Şekil 5.16 İki sintilatör için nötron enerjisinin bir fonksiyonun etkileşim derinliği.....	48
Şekil 5.17 BC501A sintilatörü için ışık üretim zamanı	49
Şekil 5.18 BC537 sintilatörü için ışık üretim zamanı	49
Şekil 5.19 Detektör zaman limitinin karşılaştırılması	50
Şekil 5.20 1 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumu	50
Şekil 5.21 Küresel geometri.....	52
Şekil 5.22 Düzgün geometri	53
Şekil 5.23 Zigzag geometri.....	54
Şekil 6.1 NEDA başlangıç geometrisinin simulasyonları için kullanılan şema	56
Şekil 6.2 90 ⁰ derecelik açıda 5 MeV nötron enerjisindeki nötronların enerji simulasyonları sonuçları	56
Şekil 6.3 90 ⁰ derecelik açıda 10 MeV enerjisine sahip nötronların enerji spektrumları	57
Şekil 6.4 180 ⁰ lik açıda 5 MeV enerjisine sahip nötronların enerji spektrumları.....	58
Şekil 6.5 180 ⁰ lik açıda 10MeV enerjisindeki nötronların enerji spektrumları	59
Şekil 6.6 90 ⁰ lik 3 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumları	60
Şekil 6.7 90 ⁰ lik 6 MeV enerjideki nötronların zaman spektrumları	61
Şekil 6.8 180 ⁰ lik açıda 3 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumları	62
Şekil 6.9 180 ⁰ lik açıda 6 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumları	63
Şekil 6.10 1 MeV lik nötron enerjisi için zaman spektrumları.....	64
Şekil 6.11 2 MeV, 3 MeV ve 4 MeV lik enerjiler için zaman spektrumları.....	64
Şekil 6.12 Nötronun enerjisinin 1 – 4 MeV aralığındaki ışık üretimi	65
Şekil 6.13 Nötronun enerjisi 5 – 6 MeV aralığındaki ışık üretimi	66

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1 Çeşitli nötron enerjilerine karşılık gelen dalga boyları	7
Tablo 2.2 Hafif çekirdeklere son nötronun bağlanma enerjisi	10
Tablo 4.1 Gaz dolu detektörlerde sık kullanılan gazlar	19
Tablo 4.2 $E_n = 1-300$ keV için sintilasyon detektörleri.....	30
Tablo 4.3 $E_n = 0.1-20$ MeV için sintilasyon detektörleri	31
Tablo 4.4 $E_n > 20$ MeV için sintilasyon detektörleri	32
Tablo 5.1 Simülasyondaki farklı detektör konfigürasyonları	51
Tablo 5.2 Farklı detektörler için verim ve cross-talk değerleri.....	55

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bazı doğal radyoaktif maddeler kendiliğinden α , β ve γ ışınları yanında az da olsa nötron adı verilen, elektrikçe yüksüz parçacıklar yayınlarlar. Nötronlar çekirdek reaksiyonları sonucu veya çekirdek bölünmeleri sonucu ortaya çıkarlar. Son yıllarda farklı bombardıman parçacıkları kullanılarak yüksek enerjili nötronlar elde edilmiştir. Nötronlar yüksüz parçacıklar oldukları için çok giricidir, demir, beton gibi maddelerden geçerler. Nötronlar ancak hidrojen ve hidrojen içeren maddeler kullanılarak yavaşlatılabilirler. Nötronları yavaşlatmak için kullanılan maddelere *moderatör* veya yavaşlatıcı denir. Ayrıca nötronlar çarpışma yoluyla da enerjileri azaltılarak da yavaşlatılabilirler.

Nötronlar yüksüz oldukları için bir maddeden geçerken meydana getirdikleri ikincil yüklü parçacıklar aracılığı ile veya iyonlaştırıcı radyasyonlar meydana getiren ikincil olaylar aracılığı ile kaydedilebilirler. İkincil parçacıkların, kaydedebilecek derecede bir iyonizasyon meydana getirmeleri için yeterli derecede bir enerjide meydana gelmeleri gerekir. İkincil yüklü parçacıklar nötronların hidrojen çekirdekleri ile çarpışmasından meydana gelen protonlar olabilir; nötronlar tarafından meydana getirilen nükleer bozunmanın sonucu olabilirler. Örneğin $^{10}\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha$ reaksiyonundan çıkan α parçacıkları gibi; veya nötronun çekirdek tarafından yakalanması ile meydana gelen radyoaktif çekirdeklerden çıkan radyoaktif radyasyonlar olabilir (β^+ , β^- veya γ ışınları gibi).

Nötronlar, kaydedilecek nötronun enerjisine bağlı olarak sınıflandırılabilir. Farklı enerji bölgelerindeki nötronları ölçmek için çeşitli metotlar vardır. Bu metotlar Bölüm 4'de ele alınacaktır.

Nötron dedektörleri, duyularla algılanamayan olayları belirlemeye yarar. Belirli nükleer malzemeye özgü hassasiyeti arttırırlar. Bu dedektörler, gama yayılımını saklamak için ağır metallerle zırlama kullanıldığında bile nötron izini tespit ederek, diğer radyasyonların ölçüldüğü sistemlerle (n, α), (n, β), (n,p) ve (n, γ) reaksiyonları sonucunda oluşan ikincil iyonlayıcı ışınları ölçerler. Nötron etkileşmesinden doğan izotopun kendisi

radioaktif olabileceğinden bu yöntem çoğunlukla indiyum, tantal ve altın plakaları bir araya getirerek dozimetre ölçümlerinde kullanılır.

Nötronları dedekte edebilmek için genellikle sintilatör dedektörleri kullanılır ve nötronun belirli karakteristik özellikleri incelenir. Bu çalışmalar bazı analiz programları ışığı altında olabilmektedir. Biz bu çalışmada yeni tip nötron dedektörü için; bu dedektörün enerji çözünürlüğünün nasıl hesaplanabildiğini Geant4 simülasyon programı kullanarak değerlendirdik. Yapılan simülasyon sonuçları ile yapılmış olan çalışmalar karşılaştırıldı ve sonuçlar Bölüm 6' de yorumlandı.

BÖLÜM 2

NÖTRON FİZİĞİ

2.1 Nötron Fizığının Özellikleri

1930 yılında Bothe ve Becker bir berilyum tabakasını poloniumun alfa ışınları ile bombardıman ettiklerinde bu elementten çok girici bir ışınımın çıktığını gözlediler. Bu reaksiyonu, çıkan ışınımın γ -fotonu olduğunu sanarak;



şeklinde yorumladılar [3].

1931 yılında Curie ve Joliot yaptıkları deneyleri iyonizasyon odası ile tekrarladıklarında Berilyum ile iyonizasyon odası arasına bir parafin tabakası konduğu zaman iyonizasyon akımının arttığını, fakat parafin yerine karbon, alüminyum, bakır, gümüş, kurşun gibi levhalar konduğu zaman akımda bir değişiklik olmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca çıkan ışınımın parafinden 5,7 MeV enerjili proton fırlattığını bulmuşlardır. Bu olayı bir Compton olayı şeklinde yorumlamışlardır. Eğer çıkan bu ışınlar γ -ışınları ise ve Compton olayı ile protonları fırlatıyorsa, bu olayda geri tepen protonun maksimum enerjisi;

$$E_{max} = \frac{2}{2 + \frac{Mc^2}{h\nu}} h\nu \quad (2.2)$$

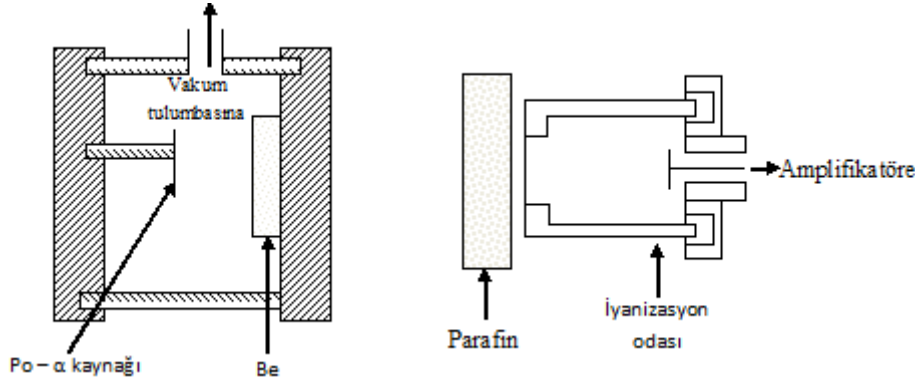
bağıntısı ile verildiği için 5,7 MeV maksimum enerjili proton fırlatılması için gelen foton enerjisinin 55 MeV olması gerektiğini ortaya koydular.

Diğer yandan, eğer bu ışın γ -ışını ise;



Denklemine göre enerjisi ancak 15,6 MeV olabilirdi [1, 3].

1932 yılında Chadwick benzer deneyleri tekrarladı ve giriciliği bu kadar yüksek olan bir radyasyonun gama ışınlarından değil, elektrik yükü olmayan parçacıklardan ibaret olduğunu varsayarak bu parçacıklara nötron adını vermiştir. Chadwick'in kullandığı alet Şekil 2.1'de gösterilmiştir [1].



Şekil 2.1 Nötronun varlığını ispat etmek için Chadwick'in kullandığı düzenek

Nötronun, 1932 de keşfinden beri, nötron fiziğinin amacı ve önemi git gide artmıştır. Şimdi bu sahada geliştirilmiş fikirlere, metotlara ve uygulamalara karşı geniş bir ilgi mevcuttur.

Nötronlar, yüksüz ve ağır parçacık olduğu için modern bilim ve teknolojiye önemli bir yere sahiptirler. Nötronlar tarafından indüklenen pek çok nükleer reaksiyonlar çekirdek hakkında değerli bir bilgi kaynağı oluşturur [2].

Nötronun keşfinden sonra, hafif elementleri α -parçacıklarıyla bombardıman etmek suretiyle birçok α -n reaksiyonları keşfedilmiştir. Bu reaksiyonların çoğunda, geri kalan çekirdekler uyarılmış durumda bulunur ve γ -ışınları yayarlar. Örneğin Be reaksiyonunda 2,7; 4,47 ve 6,7 MeV enerjili üç farklı γ - fotonu gözlenmektedir [3].

Nükleon ailesinin yüksüz bir üyesi olan nötron nükleer kuvvetlerle ilgili çalışmalarda temel rol oynar. Yüksüz oldukları için nötronlar Coloumb kuvvetlerinin etkisinde kalmazlar ve bunun sonucu olarak da elektronlarla elektriksel olarak etkileşmezler.

Diğer taraftan nötronlar yüksüz oldukları için nükleer araştırmacılar için bazı deneysel zorluklar çıkarmaktadırlar. Çünkü belirli bir enerjiye sahip bir nötron demetinin seçilip yönlendirilmesi ve odaklanması zordur.

2.2 Nötronun Kütlesi ve Yükü

Bütün atomların çekirdeğini meydana getiren iki temel tanecikten biri olan nötron yüksüz iken iki temel tanecikten biri olan proton artı yüklüdür. Hidrojenin dışında, bütün elementlerin çekirdeğinde nötron ve proton bulunur. Bir elementin kararlı çekirdeğinin nötron sayısı, ya protona eşit ya da proton sayısından fazladır. 1920 yılında Rutherford ve 1931'de Heisenberg nötrondan bahsetmişlerdir.

1932 yılında Sir James Chadwick nötronu keşfettikten sonra elastik çarpışma kanunlarından yararlanarak nötronun kütlesini ilk defa yaklaşık bir şekilde tayin etmiştir. Daha sonra nötronun kütlesini çekirdek reaksiyonlarıyla tayin etmiştir. Bu reaksiyon içinde bor ile Po- α parçacıkları ile bombardımanını göz önüne almıştır.



Bu reaksiyon için enerji denklemi aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$m_{{}_5\text{B}^{11}} + m_{{}_2\text{He}^4} + E_{k{{}_2\text{He}^4}} = m_{{}_7\text{N}^{14}} + E_{k{{}_7\text{N}^{14}}} + m_{{}_0\text{n}^1} + E_{k{{}_0\text{n}^1}} \quad (2.6)$$

Bütün bu değerler atomik kütle birimi cinsinden yerine konulursa;

$$11,00825 + 4,00106 + 0,00565 = 14,0042 + 0,00061 + m_{{}_0\text{n}^1} + 0,0035 \quad (2.7)$$

ise;

$$m_{{}_0\text{n}^1} = 1.0067 \quad (2.8)$$

olarak elde edilir.

Daha sonra nötronun gerçek kütlesi tayin edilmiştir. Bunun için ${}_1\text{H}^1$ ' in değeri doğru olarak bilindiğinden;



reaksiyonundan yararlanarak ($n\text{-}^1\text{H}$) farkı bulunur ve buradan nötronun kütlesi doğru olarak tayin edilir.

Sonuç olarak nötronun kütlesi yaklaşık olarak protonun kütlesi kadardır. Yapılan deneysel ölçümler sonucu proton kütlesi $1,6726 \times 10^{-24} \text{g}$, nötron kütlesi $1,6748 \times 10^{-24} \text{g}$ olarak bulunmuştur.

2.3 Nötronlar ve Dalga Boyu

Dalga mekaniği kanunlarına göre nötron bazı uygun hallerde dalga özelliğini gösterir. Nötronun kinetik enerjisi E , hızı v ve momentumu p olursa, dalga boyu;

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{(2mE)^{1/2}} \quad (v \ll c \text{ için}) \quad (2.10)$$

Nötronun dalga karakterini göstermesi için hızının küçük olması gerekir. Hızı büyük olan nötronlar için, dalga boyu çok küçüktür ve nötron daha çok bir parçacık gibi hareket eder. Gerçekte nötronlar çok küçük hıza kadar yavaşlatılabilirler ve bundan dolayı parçacık özelliklerinin neredeyse tamamını kaybederler. Nötronun 10^{-8}cm 'lik bir dalga boyuna sahip olması için enerjisinin $0,1 \text{ eV}$ olması gerekmektedir.

Çekirdeğin içerisinde bulunan nötronlar çok hızlı hareket ederler. Bundan dolayı çok küçük dalga boyuna sahiptirler ve çekirdek içerisinde bulunan bir nötronun enerjisi yaklaşık olarak 50 MeV 'dir. Bu enerji değerine karşılık gelen dalga boyu 10^{-13} cm 'ye karşılık gelir.

Çeşitli nötron enerjilerine karşılık gelen dalga boyları Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Çeşitli nötron enerjilerine karşılık gelen dalga boyları

E(eV)	v(cm/sn)	λ (m)	$\lambda/2\pi$ (cm)
0.001	4.37×10^4	9.04×10^{-8}	1.44×10^{-8}
0.025	2.19×10^5	1.81×10^{-8}	2.88×10^{-9}
1.0	1.38×10^6	2.86×10^{-9}	4.55×10^{-10}
10^2	1.38×10^7	2.86×10^{-10}	4.55×10^{-11}
10^4	1.38×10^8	2.86×10^{-11}	4.55×10^{-12}
10^6	1.38×10^9	2.86×10^{-12}	4.55×10^{-13}
10^8	1.28×10^{10}	2.79×10^{-13}	4.43×10^{-14}
10^{10}	2.99×10^{10}	1.14×10^{-14}	1.81×10^{-15}

$$\text{Dirac dalga boyu} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.11)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. v, λ ve $\lambda/2\pi$ ise,

$$v(\text{cm/sn}) = 1.38 \times 10^6 E^{1/2} \quad (2.12)$$

$$\lambda(\text{cm}) = 2.86 \times 10^{-9} E^{-1/2} \quad (2.13)$$

$$\frac{\lambda}{2\pi}(\text{cm}) = 4.55 \times 10^{-10} E^{-1/2} \quad (2.14)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Burada E enerjii ifade eder ve eV cinsinden verilir;

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-12} \text{ erg} \quad (2.15)$$

Termik nötronların dalga boyu, katı madde içinde atomlar arası uzaklıklar büyüklüğündedir. Bu enerjideki nötronlar maddeden geçerken ve madde tarafından difüzenirken girişim ve kırınım olayı gösterirler. Her ne kadar dalga özelliği hızlı nötronlar için önemli değilse de, enerjileri 50 MeV den büyük olan nötronlar için yine önemli olmaya başlar.

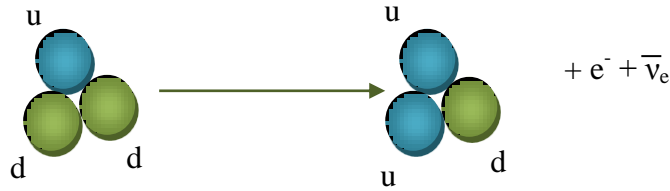
2.4 Nötronun İstatistiği ve Spini

Nötronun deneysel olarak tayin edilen diğer bir özelliği de istatistiğidir. İki çeşit istatistik vardır. Fermi - Dirac istatistiği ve Bose - Einstein istatistiğidir. Fermi-Dirac istatistiğine uyar.

2.5 Serbest Nötronun Bozunması

Serbest nötronlar radyasyonla oluşan yüksüz parçacıklardır. Bu nedenle her maddeye kolayca girebilirler. Bunların doğrudan iyonlaştırıcı özellikleri yoktur. Ancak bu serbest nötronların, girdikleri maddelerin nötronları ile etkileşimi sonucu α , β , γ ve x-ışınları gibi ışınımlar oluştururlar. Bu ışınlar ise etkileşme sonucu girdiği maddenin atomundan koparak iyonlaşmayı geciktirir.

Bir serbest nötron, yani çekirdeğin dışında bulunan bir nötron yaklaşık olarak 10 dakikalık bir yarı ömürle beta bozunumuna uğrar. Bu olay Şekil 2.2’de gösterilmiştir ve



Şekil 2.2 Serbest bir nötronun beta bozunumuna uğraması



reaksiyonuna göre bozunur. Nötron bir elektron vererek ve bir hidrojen atomu çekirdeğine yani bir protona dönüşür.

2.6 Nötronun Manyetik Momenti

Nötron yüksüz olduğu için bir manyetik momente sahip olmaması gerekirken yapılan deneysel araştırmalar sonucunda nötron, spini ile ilgili bir manyetik dipol momente sahiptir. Bu değeri 1940 yılında Alvarez ve Bloch elde etmiştir. $\mu_n = -1.935$ nükleer magneton değerini bulmuşlardır. Bu değer bugünkü kabul edilen değerden biraz daha

büyüktür. μ_n işaretinin negatif olması S ve μ_n yönleri zıt olmasından kaynaklanmaktadır [1].

2.7 Nötronların Enerjilerine Göre Sınıflandırılması

Nötronlar yük taşımadıkları için madde ile yalnızca çekirdek kuvvetleri yoluyla etkileşirler. Çekirdeğe ulaştıklarında yüklü parçacıklarda olduğu gibi Coulomb engeline maruz kalmazlar. Sonuç olarak nötronlar için nükleer etkileşim olasılığı (tesir kesiti) yüklü parçacıklarınkinden daha yüksektir [4]. Nötronlar enerjilerine göre;

1. Yavaş nötronlar ($0 < E < 1000$ eV) bunlarda kendi içinde dört gruba ayrılırlar;
 - a. Soğuk nötronlar $0,01 < E < 0,3$ eV
 - b. Termik nötronlar $0,01$ eV $< E < 0,3$ eV
 - c. Epitermik nötronlar $0,3$ eV $< E < 10$ keV
 - d. Rezonans nötronlar 1 eV $< E < 100$ eV
2. Orta hızdaki nötronlar 1 keV $< E < 500$ keV
3. Hızlı nötronlar 10 keV $< E < 10$ MeV
4. Çok hızlı nötronlar 10 MeV $< E$

sınıflandırılabilirler [5].

2.8 Nötron Kaynakları

Nötronun özelliklerinin ve madde ile etkileşmelerinin incelenmesinde nötron dedektörleri kadar nötron kaynaklarına da ihtiyaç duyulmaktadır. Nötronlar ömürlerinin kısa olması nedeniyle doğada bulunmazlar. Bundan dolayı nötronları elde etmek için birçok farklı reaksiyon kullanılır. Bu reaksiyonlardaki hedef çekirdek α parçacığı, proton, döteron veya gama ışınları ile bombardıman edilince uyarılmış halde olan bileşik çekirdek oluşur. Uyarma enerjisi bileşik çekirdek içindeki son nötronun bağlanma enerjisinden büyükse bir nötronun yayınlanması beklenir. Geri kalan uyarma enerjisi nötronla sonuncu çekirdek arasında kinetik enerji olarak dağılır. Sonuncu çekirdek uyarılmış halde kalabilir ve sonradan gama ışınları yayınlarak temel seviyeye geçer.

Çeşitli hafif çekirdekler için son nötronun bağlanma enerjisi yani bir nötronun ayrılma enerjisi, α parçacıklarının birleşmesinden meydana geldiği düşünülen (^4He , ^8Be , ^{12}C , ^{16}O) çekirdekleri için daha büyüktür. Bu çekirdekler, ^8Be hariç, çok kararlılırlar. Bunun aksine böyle bir çekirdeğe ilave edilen bir nötron gevşek olarak bağlıdır. Orta ağırlıktaki çekirdekler için ayrılma enerjisi 7-10 MeV ve ağır çekirdekler için 6-7 MeV civarındadır. Hafif çekirdeklerde son nötronun bağlanma enerjisi Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

Nötron elde etmede hafif çekirdekler en büyük rolü oynar. Çünkü kuvvetli potansiyel duvarından dolayı ağır çekirdeklerle yüklü parçacıkların çok yüksek enerjilerde olması mümkün olur.

Tablo 2.2 Hafif çekirdeklerde son nötronun bağlanma enerjisi

Çekirdek	Bağlanma enerjisi(MeV)	Çekirdek	Bağlanma enerjisi(MeV)
^2H	2.225	C^{11}	13.092
^3H	6.258	C^{12}	18.720
^3He	7.719	C^{13}	4.937
^4He	20.577	C^{14}	8.176
^5He	-0.956	N^{13}	20.326
^6Li	5.663	N^{14}	10.553
^7Li	7.253	N^{15}	10.834
^8Li	2.033	N^{16}	2.500
^8Be	18.896	O^{15}	13.222
^9Be	1.665	O^{16}	15.669
^{10}Be	6.814	O^{17}	4.142
^9B	18.575	O^{18}	8.047
^{10}B	8.440	F^{18}	9.141
^{11}B	11.456	F^{19}	10.442
		F^{20}	6.599

Nötron kaynakları dört gruba ayrılır:

- I. Radyoaktif nötron kaynakları
- II. Monoenerjistik nötron kaynakları (Hafif çekirdeklerle olan reaksiyonlar)

- III. Monoenerjitik nötron kaynakları (Orta ağırlıktaki çekirdeklerle olan reaksiyonlar)
- IV. $\text{Li}^7 (p, n) \text{Be}^7$ reaksiyonu

2.9 Nötron Tabanlı Teknikler

Günümüzde kaçak malzemeler x-ışını, buhar dedeksiyonu ve köpekler yardımıyla tespit edilmektedir. Bunlar arasında x-ışını genelde kaba malzemelerin dedeksiyonunda kullanılır. Bu cihazların üretimi ve dedeksiyon teknolojisi ileri seviyede gelişmiş olup halka açık yerlerde rahatlıkla kullanılabilir. Fakat birçok patlayıcı madde ve uyuşturucuları da içinde bulunan elektron yoğunluğu düşük organik malzemelere karşı düşük hassasiyet göstermektedir. Bu yüzden bu tip malzemeler x-ışını ile dedekte edilememektedir. Aynı zamanda x-ışını cihazları şekil algılama tekniğinde kullanılmaktadırlar. Fakat özellikle patlayıcı maddeler ve uyuşturucular farklı şekilde olabilirler. Bu yüzden algılamak zordur ve bundan dolayı x-ışını kullanılmamaktadır ve nükleer fizik tabanlı alternatif tekniklere ihtiyaç vardır [20].

2.9.1 Termal nötron analizi

^{252}Cf gibi bir radyoizotopik kaynaktan üretilen hızlı nötronlar veya izole edilmiş tüp nötron jeneratörü $<0,025$ eV civarında düşük enerjilere ayarlanıp incelenmek istenen maddeye yönlendirilir. Bu termal nötronların belli bir kısmı madde içindeki çekirdek ile reaksiyona girer ve sonra geri dönen γ -ışınlarını dedekte eder. Patlayıcıların dedekte edilebilmesi için kullanılan teknikte 2,22 MeV Hidrojen ve 10,83 MeV azot arasındaki γ ışınları patlayıcıların içinde yaygın olarak bulunan Hidrojen ve Azot için γ ışınları yakalanır [20].

2.9.2 Hızlı nötron analizi

Tipik olarak izole edilmiş tüp nötron jeneratöründen sağlanan sürekli hızlı nötron hüzmesi incelenmek istenen maddeyle bombardıman edilir. Daha sonra hızlı nötronlar madde içindeki çekirdeği aktive edip γ ışınları yayınlar ve cihazın etrafındaki dedektörler bu gama ışınlarını algılar. Objenin içindeki her bir hacimsel elemanın içindeki çok özel elementler her bir dedektörün ölçtüğü gama ışını spektrasının

kıvrılması ile belirlenir. Hızlı nötronlar termal nötronlara göre malzeme içinde daha az kaybolur. Fakat hızlı nötron görüntüleme geometrik tanımlamadaki eksiklikten dolayı küçük objelerle sınırlıdır [20].

2.9.3 Darbeli hızlı nötron analizi

Hızlı nötron analizinin eksiklikleri yüksek arkaplan (fon) ve büyük objelerdeki algı problemi bu teknik ile aşılmıştır. Teknikte bir hızlandırıcı kullanılmıştır. Malzeme içerisine gönderilen paralel nötronlar elastik olmayan saçılma sonunda gama ışınları üretilmesine sebep olur ve bu ışınlar NaI(Tl) kristal dizisi sayesinde dedekte edilir [20].

2.9.4 Darbeli hızlı nötron iletim spektroskopisi

Hızlı nötronlar için toplam taranan kesit alanları taranan çekirdeğe özgü rezonans yapısı gösterir. Darbeli hızlı nötron iletim spektroskopisi tekniği ns – darbeli hızlandırıcısına ihtiyaç duyar. Kalın Be veya Li hedef üzerinde bu hızlandırıcı $\alpha(p,n)$ veya (d,n) reaksiyonları sonucunda yoğun beyaz bir nötron spektrumu oluşturur. 0,5 – 10 MeV arasında değişen enerjiye sahip nötronlar incelenmek istenen maddeye gönderilir. İletilen nötronlar hızlı nötron dedektörleri ile dedekte edilir [20].

2.9.5 Bileşik parçacık görüntüleme

Hızlandırıcı içeren sistemler yüksek üretim maliyetinin yanı sıra bakım problemi de göstermektedir. Bu teknik ile nötron jeneratörleri geliştirilmektedir. Bu jeneratörlerde aynı anda karşı yönde serbest bırakılan (açığa çıkan) α parçacıklarının dedeksiyonu ile nötronlar zaman ve yöne göre etiketlenir. Bu teknikte elastik olmayan saçılma sonucu ortaya çıkan γ -ışınları hızlı nötron analizi ve darbeli nötron analizi tekniklerindeki gibi algılanır [20].

2.9.6 Darbeli hızlı nötron termal analizi

Bu teknikte ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ reaksiyonu sonucu birkaç mikro saniye süresinde 14,1 MeV'lik nötron darbeleri üreten nötron jeneratörleri kullanılır. Maddenin içine gönderilen hızlı nötronlar karbon ve oksijen içeren maddelerdeki elastik saçılmayı başlatır. Ortaya çıkan

gama ışınları dedekte edilir. Daha sonra nötron hüzmesi kapatılır (100 µs boyunca kapatılır). Bu zaman zarfında geri kalan hızlı nötronlar termalize edilir ve H, Azot, Klor ve Demir gibi elementlerle yakalanır. Yakalanan gama ışınları aynı dedektör tarafından dedekte edilir ve olay elastik olmayan saçılmadan farklı olarak kaydedilir. Bu süreç yaklaşık olarak 100 khz frekansta tekrar edilir. Her birkaç yüz sinyalde bir nötron hüzmesi örneğin 3 milisaniye gibi daha uzun zamanlarda kapalı tutulur. Sonra O, Si ve P gibi elementlerin deaktivasyonu sonucunda ortaya çıkan gecikmiş gama ışınları ADC'ler tarafından toplanır. Bu sayede hızlı elastik olmayan saçılma, termal nötron yakalama ve gecikmiş aktivasyon analizi ile madde içerisindeki büyük sayıda elementler sürekli bir modda ölçülür [20].

2.9.7 Hızlı nötron saçılma analizi

Şimdiye kadar anlatılan nötron teknikleri incelenen maddenin içerisinde geçen darbeli hızlı nötron huzmelerinin zayıflaması veya termal nötron yakalama veya elastik olmayan nötron saçılma ile gama ışınlarının karakteristiklerinin ölçülmesi temeline dayanır. Bu alternatif teknikte incelenen malzemenin dışındaki nötronlar dedekte edilir. Saçılmadan sorumlu çekirdeklerin tipi, miktarı ve pozisyonu saçılan nötron yoğunluğu ve saçılma açısı enerjisi ve nötron enerjisi ölçümlerinden belirlenir. Bu teknikte incelenen malzemenin üzerine tek enerjili nötronlar bombardıman edilir, ileri ve geri açılarda elastik ve elastik olmayan saçılan nötron dedektörler yardımıyla belirlenir. H, C, O ve Azot'a karşı yüksek hassasiyetlidir [20].

BÖLÜM 3

NÖTRONLARLA MADDE ARASINDAKİ REAKSIYONLAR

3.1 Nötron Reaksiyonları ve Özellikleri

Nötronların yükleri olmadığı için, atomun elektronları ile etkileşmeleri çok zayıftır. Coulomb bariyeriyle karşılaşmadıkları için yüklü parçacıklara kıyasla avantajlıdır ve çekirdeklere daha rahat girerler.

Nötronların neden olduğu çeşitli reaksiyonlar vardır. Belli bir reaksiyonun başlayabilmesi büyük ölçüde nötron enerjisine ve hedef çekirdeğin kütle numarasına bağlıdır. Nötronun madde ile etkileşmesi saçılma ve yutulma olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Saçılma reaksiyonları da esnek ve esnek olmayan saçılma olmak üzere iki alt gruba ayrılır [6].

Bir nötronun bir ${}_Z X^A$ çekirdeği ile etkileşmesi şu şekilde gösterilebilir.



$({}_Z X^{A+1})^*$ uyarılma bir seviyede bulunan bileşik çekirdeği gösterir. Bileşik çekirdek kısa bir süre uyarılma seviyesinde $10^{-12} - 10^{-20}$ sn kalır. Enerjisinin fazlası bir veya daha fazla parçacığın yayınlanması ile atılabilir. Tekrar bir nötronun yayınlanma olayı bir difüzyon olayı olarak adlandırılır. Çekirdeğin uyarılma veya temel seviyede kalması halinde difüzyon esnek veya esnek olmayandır. Her iki halde nötronun enerjisi azalır. Azalma miktarı inelastik difüzyon için daha büyüktür.

Uyarılma seviyesinde bulunan herhangi bir çekirdek için enerjitik açıdan çeşitli tipte çekirdek reaksiyonları mümkündür. Çeşitli reaksiyonlar için olasılık, uyarılma enerjisinin büyüklüğüne ve son çekirdeğin enerji seviyelerinin durumuna bağlıdır. Sonuç olarak her bir absorpsiyon olayı için olasılık gelen nötronun enerjisine ve absorplananların bileşimine bağlıdır. Olasılık aynı bir elementin çeşitli izotopları için bile geniş miktarda değişir. Çünkü her bir çekirdek tipinin nükleer özellikleri farklıdır [1].

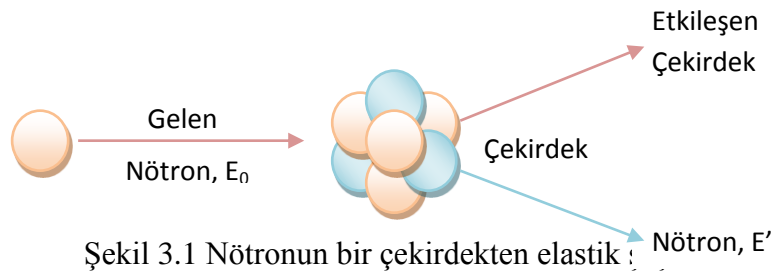
3.2 Nötron Reaksiyonlarının Sınıflandırılması

Nötronun madde ile etkileşmesi altı şekilde olur.

1. Esnek çarpışma
2. Esnek olmayan çarpışma
3. Nötronların tutulması
4. Yüklü parçacıkların yayınlanması (n,p), (n,d), (n,t), (n, α), (n, α p) reaksiyonları
5. Fisyon
6. Yarımlama

3.3 Esnek Çarpışma (n,n)

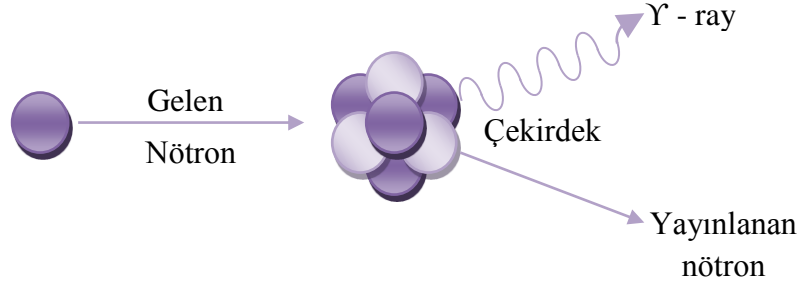
Bu etkileşme türünde, nötron bir atom çekirdeğine çarpar ve kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktardıktan sonra, kendi geliş doğrultusundan farklı bir doğrultuyla çekirdekten uzaklaşır. Esnek çarpışmada çekirdeğin fiziksel yapısı değişmez. Nötronların atom çekirdekleri tarafından esnek çarpışmaya uğramaları, mekanikteki enerji ve momentumun korunumu yasalarına uygun bir biçimde meydana gelir (Şekil3.1). Esnek çarpışmada çekirdek temel enerji seviyesinde kalır, uyarılmaz.



Şekil 3.1 Nötronun bir çekirdekten elastik çarpışması

3.4 Elastik olmayan Çarpışma (n,n), (n,n γ) veya (n,2n)

$A(n,n')A^*$, $A(n,2n')B^*$ gibi reaksiyonlardır. Bu çeşit reaksiyonlarda, çekirdek uyarılmış durumda bırakılır ve bu çekirdek daha sonra gama veya radyasyonun diğer çeşit formları ile bozunur. Nötronun çekirdeği uyarması için yeterince enerjiye (1 MeV veya fazla) sahip olması gerekir. Bu eşik enerjisinin altında, sadece elastik saçılma olur.



Şekil 3.2 Nötronun elastik saçılması

3.5 Yavaş ve Hızlı Nötronların Etkisi

Nötronlarla gerçekleşen reaksiyonların olasılığı artan nötron enerjisi ile hızlı bir şekilde azalır. Yine de, bir çarpışma olayında, nötrona fark edilir miktarda enerji transfer edebildiği için, saçılmanın önemi çok büyüktür. Bu durumda ikincil radyasyonlar, nötron reaksiyonlarından dedekte edilebilir miktarda enerji kazanmış olan geri tepme çekirdeklerdir. Her saçılma bölgesinde, nötron enerji kaybeder ve bu nedenle daha düşük enerjiye yavaşlatılır.

Hızlı nötronun enerjisi yeterince yüksek olduğunda, nötron hedef çekirdek tarafından soğurulur. Oluşan bileşik çekirdek orijinal çekirdeği uyarılmış seviyelerinden birinde bırakarak daha düşük kinetik enerjili nötron salar. Bu çekirdek bir veya daha fazla gama ışını salarak temel seviyeye döner. Bu olayda, salınan gama ışını enerjisi, saçılan nötron enerjisi ve geri tepen çekirdeğin enerjisinin toplamı nötronun geliş enerjisine eşittir [5].

BÖLÜM 4

DEDEKTÖRLER

4.1 Dedektör Çeşitleri

Radyasyonlar maddeye çarpınca kimyasal, iyonizasyon, fosforesans ve fluoresans gibi çeşitli olaylara neden olurlar ve enerjilerini kaybederler. Bundan dolayı radyasyonları dedekte etmek için cihazlar yapılmıştır. Bu cihazların bir kısmı parçacıkların kendi yüklerinden bir kısmı ise yüklerin toplanmasından yararlanılarak tasarlanmıştır.

Dedektör çeşitleri aşağıdaki başlıklar altında ele alınabilir.

1. Gaz Dolu Dedektörler
2. İyon Odalı Dedektörler
3. Orantılı Sayaçlar
4. Geiger Müller Dedektörü
5. Yarı-iletken Dedektörler
6. Sintilasyon Dedektörleri
7. Nötron Dedektörleri

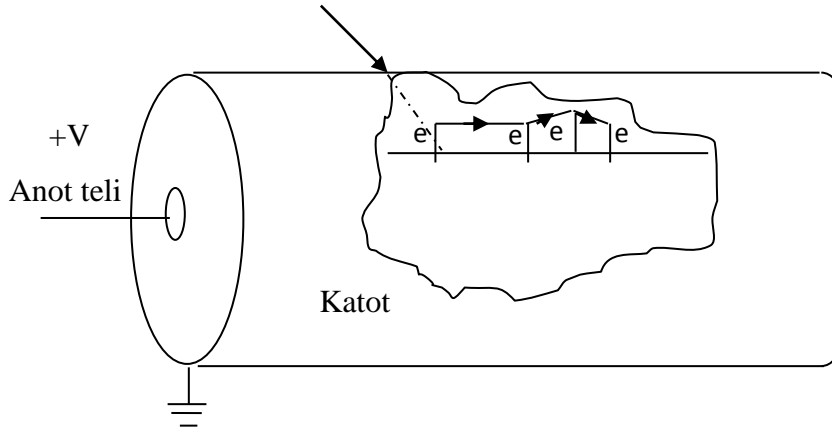
4.1.1 Gaz dolu dedektörler

Nükleer radyasyon dedektörlerinin çoğu, dedektöre gelen radyasyonun oluşturduğu iyonlaşma sonucu oluşan, iyon veya elektronların sayımı için Elektrik alanı gereklidir. En basit olan dedektör iyonlaşma odasıdır. İyonlaşma odasında plakaların arasına gaz (genellikle hava) doldurulmuş paralel düzlem kondansatörlerdir. Plakalar arasındaki elektrik alan, iyonların elektronlarla tekrar bileşmesini engeller. Pozitif potansiyeldeki plakaya elektron bulutu ilerlerken, ikinci plakaya pozitif yüklü iyonlar ilerler [5].

İyon yaratmak için gerekli enerji 34 eV. (1 MeV lik radyasyon 3×10^4 iyon veya elektron üretir). Bu üretilen enerji 0,5 eV civarındadır. Oluşan sinyalin ölçülmesi için 10^4 çarpanı kadar yükseltilmesi lazım. Bunun içinde yükseltici lazım.

Sinyalin genliği, oluşan iyonların sayısı ile ve taneciğin enerjisi ile doğru orantılıdır ve plakalar arasındaki voltajdan bağımsızdır. Uygulanan V (voltaj), e^- nun ve X^+ 'nın hızlarını belirler. $V \uparrow 100$ V olur. Radyasyon şiddeti, sayacın cevap süresi esnasında pek çok radyasyonun etkileşmesini gösteren akım olarak kaydedilir. Çıkış akımı hem kaynağın aktifliği hem de radyasyonun enerjisi ile orantılıdır. Bir gaz dolu dedektörde pulsları gözlemek için, pulsları yükseltmek gerekir. Bunun için voltajı yaklaşık 1000V kadar arttırmak gerekmektedir, böylelikle daha büyük elektrik alan iyonlaşma sonucunda çıkan elektronları hızlandıracak ve gaz atomları ile elastik çarpışma yaparak sürüklenen elektronlar bu kez elastik olmayan çarpışma yapmak için yeterli enerjiyi kazanabilir ve hatta yeni iyonlaşmış atomlar üretebilirler.

Bir orantılı sayacın geometrisi şekil 4.1'de gösterildiği gibi silindiriktir. Elektronlar, anot telinin yakınına ulaşıncaya kadar yavaşça sürüklenirler. Anot telinin yakınında hızlı bir şekilde ivmelenirler ve pek çok ikincil iyonlaşma meydana gelir.



şekil 4.1 Silindirik orantılı sayaç

Bu geometride bir r yarıçapındaki elektrik alan;

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)} \quad (3.2)$$

dır. Burada b katotun iç yarıçapı ve a anot telinin dış yarıçapıdır.

Gaz dolu dedektörlerde kullanılan bazı gazlar ve özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Gaz dolu dedektörlerde sık kullanılan gazlar

Gaz	$\rho(\text{g/cm}^3)(\text{STP})$	$I_0(\text{eV})$	$W_i(\text{eV})$	$dE/dx(\text{MeVg}^{-1}\text{cm}^2)$	$n_p(\text{cm}^{-1})$	$n_t(\text{cm}^{-1})$
H ₂	$8,38 \times 10^{-5}$	15,4	37	4,03	5,2	9,2
He	$1,66 \times 10^{-4}$	24,6	41	1,94	5,9	7,8
N ₂	$1,17 \times 10^{-3}$	15,5	35	1,68	10	56
Ne	$8,39 \times 10^{-4}$	21,6	36	1,68	12	39
Ar	$1,66 \times 10^{-3}$	15,8	26	1,47	29,4	94
Kr	$3,49 \times 10^{-3}$	14,0	24	1,32	22	192
Xe	$5,49 \times 10^{-3}$	12,1	22	1,23	44	307
CO ₂	$1,86 \times 10^{-3}$	13,7	33	1,62	34	91
CH ₄	$6,70 \times 10^{-4}$	13,1	28	2,21	16	53
C ₄ H ₁₀	$2,42 \times 10^{-3}$	10,8	23	1,86	46	195

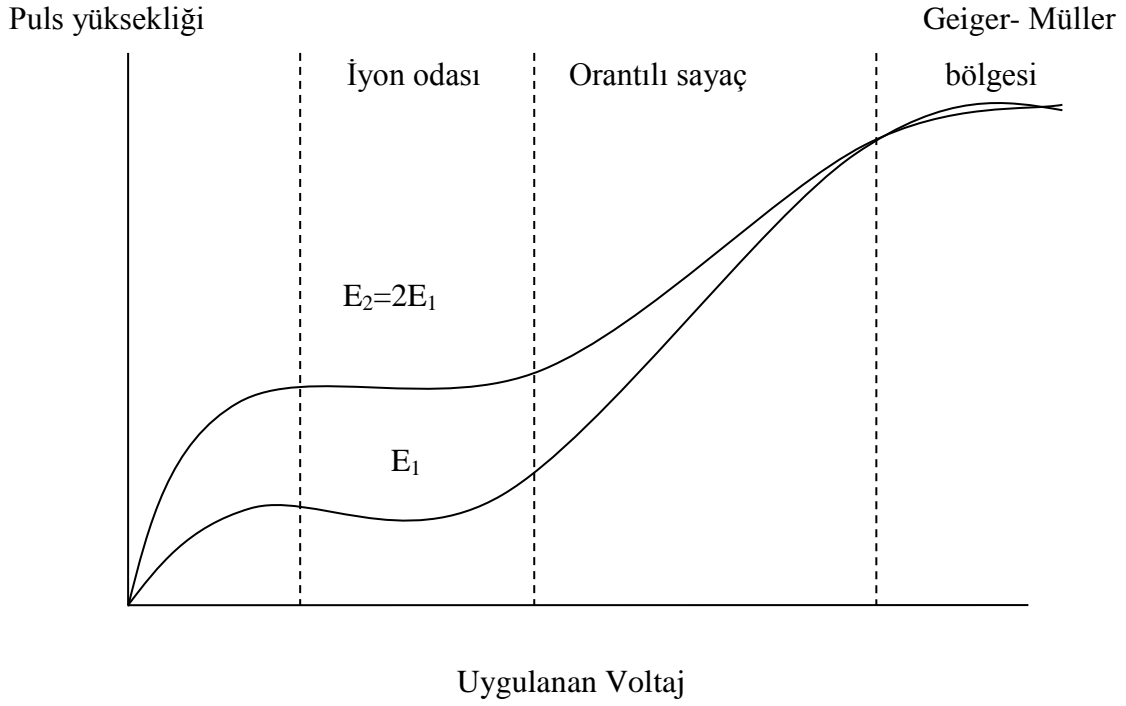
I_0 = İyonizasyon potansiyeli

$W_i = e^-$ ve X^+ çifti oluşurken gerekli olan enerji

dE/dx = enerji kaybı

n_p, n_t = İkincil ve toplam X^+ ve e^- sayısı

Gazlı sayaçların çalışma bölgeleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Uygulanan düşük voltajlarda birincil elektron ve iyonlar tekrar birleşebilirler. V artırdıkça iyon odası bölgesine ulaşır. Buradaki çıkış pulsları radyasyon tarafından üretilen birincil iyonlaşma ve radyasyon enerjisi ile orantılıdır, ancak V'den bağımsızdır. Orantılı bölgede, analizi daha kolay hale getirmek için, puls genliği V ile artar, fakat çıkış pulsları yine, iyonlaşma ile oluşan radyasyon enerjisi ile orantılıdır. Son olarak, Geiger platosuna ulaşır. Burada tüm radyasyonlar aynı çıkış pulslarını verirler, başlangıçtaki iyonlaşmanın miktarına veya ışınım enerjisine bağlı değildir.



Şekil 4.2 Farklı gazlarla doldurulmuş sayaçlar tarafından meydana getirilen puls yükseklikleri

Burada E_2 'nin enerjisi E_1 'in enerjisinin iki katı kadar farklıdır. Bölgede düşük voltajlarda birincil e^- ve X^+ tekrar birleşebilirler. Orantılı bölgede puls genliği V ile orantılıdır. Çıkış pulsları radyasyonla orantılıdır. Geiger – Müller bölgesinde puls yükseklikleri iki radyasyon için aynı çıkışı verirler. Küçük enerjilerde bu tip dedektörler kullanılır.

4.1.2 İyon odalı dedektörler

İyonizasyon odaları, radyasyon tarafından meydana gelen iyonizasyonu gaz amplifikasyonu olmadan ölçen en basit cihazlardır. Başlıca üç kısımdan meydana gelir. Bunlar iyonizasyon odası, elektronik devre ve ölçme sistemidir.

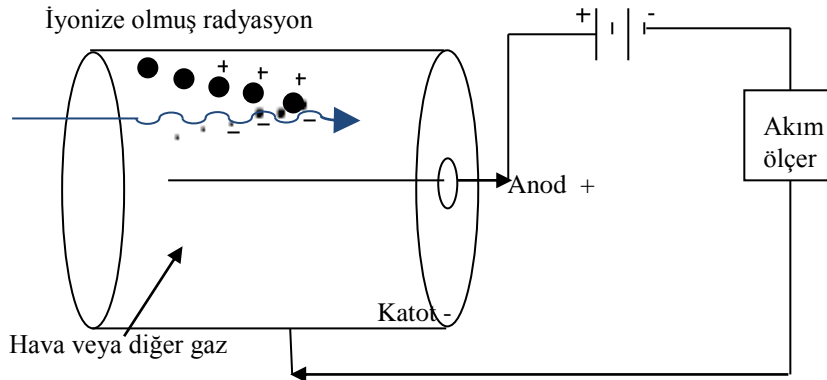
İyonizasyon odaları metalik oda ve birbirinden yalıtılmış iki plakadan meydana gelmektedir. Hava, helyum veya argon gibi gazlar içermektedir. Kullanılan madde oda içerisine veya odanın yakınına konarak birkaç yüz voltluk potansiyel uygulanır.

İyonizasyon odaları radyasyonları tek tek ölçmek yerine, bunların dedektör içindeki toplam iyonizasyonunu ölçerler. Odanın içerisindeki gaz basıncı genellikle atmosfer basıncına eşittir.

İçindeki gaz ortamı genellikle atmosfer basıncında hava ile doludur. Hava dolu yüksek basınçlı iyon odaları en çok gama ışınlarının ölçülmesinde kullanılır. Röntgen birimi ile ölçülen ışınlanma şiddeti; hava içinde X ve gama ışınlarının açığa çıkardığı iyonların yük miktarını içermektedir. Uygun koşullar sağlandığında iyon odalarında iyonizasyon yükü, ışınlanma şiddetini (R-röntgen, C/kg, vb.) ve dedektörden geçen iyon akımı da ışınlanma hızını (R/saat) vermektedir. Radyasyon monitörü olarak geniş bir kullanım alanı vardır ve pek çok ticari radyasyon monitörleri gerçekte iyon odalarıdır [8].

İyon odası Şekil 4.3’de de gösterildiği gibidir;

- X ışınları, gama ışınları ve beta parçacıkları ölçümünde kullanılırlar.
- Alçak radyasyon şiddetine duyarlı olmamakla beraber yüksek doz şiddetlerini ölçmede son derece yararlıdır.
- Çeşitli radyasyonları ayırt etme özelliği yoktur.
- 60-300 volt’luk çalışma aralığında etkindir.
- Gaz olarak genellikle atmosfer basıncında hava kullanılır.
- Göstergeleri, genellikle C/kg. sn , (x)R/h veya (x)Sv/h



Şekil 4.3 İyonizasyon odası dedektör

4.1.3 Orantılı Sayaçlar

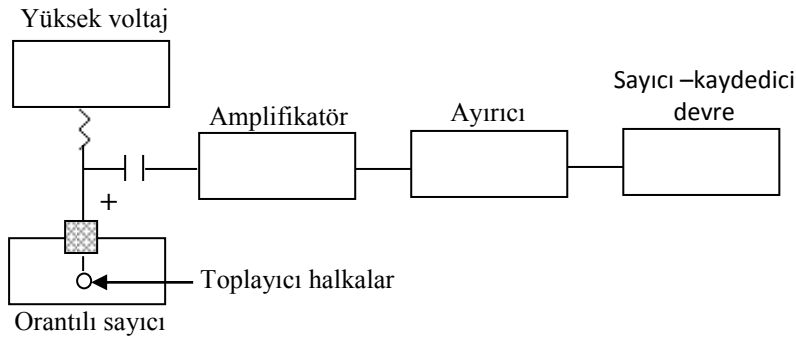
En çok kullanılan orantılı sayaçlar, 0,2-25 keV enerji aralığında bulunan X-ışınlarına duyarlı dedektörlerdir. Bu alet X-ışın astronomisinde, radyoaktif maddenin yaydığı gamma ışınlarının ve yüklerinin belirlenmesi için özel olarak geliştirilmiştir.

Aynı zamanda bu sayaçlar da bir tür gaz iyonlaştırma sayacıdır. Fakat anot çubuk ve katot arasına uygulanan elektrik alan, gaz iyonlaştırma sayaçlarına göre çok daha büyüktür (~600V-900 V). Üretilen foto elektronlar çok yüksek voltaj farkı altında anoda doğru hızlandırıldıkları için fazladan enerji kazanırlar ve başka gaz atomlarını da iyonlaştırabilirler. Böylece çoklu iyonizasyon (meydana gelir ve daha kolay ölçülebilen akım oluşturulur. Buna gaz yükseltmesi de denir [9].

Orantılı sayaçlarda genellikle soygaz ve organik gazların karışımları kullanılmaktadır. (%90 Ar, %10 CH₄ veya %95 Xe, %5 CH₄ vb.). Orantılı sayaçlar α ve β ışınları ile birlikte daha çok düşük enerjili X ve gama ışınlarının spektroskopisinde kullanılmaktadır [8].

Bir orantılı sayacı devresi başlıca şu kısımları içerir ve Şekil 4.4'te şematik olarak gösterilmiştir [1].

- 1) Orantılı sayıcı
- 2) Elektronik devre
- 3) Sayıcı – kaydedici devre



Şekil 4.4 Bir orantılı sayıcı sistemi blok diyagramı

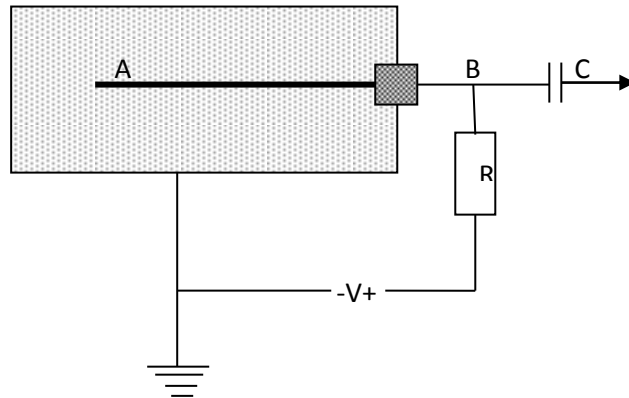
4.1.4 Geiger Müller dedektörü

Radyasyonun dedeksiyonunda düşük enerjili beta ve gamalar için kullanılan sistemlerden birisidir. Nükleer tıpta özellikle radyasyonun varlığını ve şiddetini ölçmek amacıyla kullanılır ve yüksek duyarlılığa sahiptir. Herhangi bir bölgede radyasyon sızıntısı ya da kirliliği varsa bunun kaynağının nerede olduğunun belirlenmesinde kullanılacak olan ilk dedektör tipi Geiger Müller dedektörüdür.

Bir Geiger Müller sayıcısının işleyişi iyonizasyon odasına benzer. Ancak iyonizasyon odasında gaz amplifikasyonu olmadan radyasyonun meydana getirdiği birincil iyonizasyon ölçülür. Geiger Müller sayıcısında ise birincil iyonların meydana getirdiği ikincil iyonlar, dolayısıyla gaz – amplifikasyonu ile ölçüm yapılır.

G – M dedektörlerinin enerji ayrımı yapmaması ve düşük enerjili X ve gamma ışınlarına hassas olmamasına rağmen düşük şiddetteki radyasyona da duyarlıdır. Dış etkilere dayanıklı olması ve düşük maliyetleri nedeniyle sağlık fiziği alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [10].

Radyoaktif maddelerin yaydıklarını saymak üzere Geiger ve Müller tarafından geliştirilen Geiger – Müller sayaçları, genellikle içi 10 – 12 cm – Hg basıncında sovgaz – alkol buharı karışımı ile doldurulmuş madeni bir silindir ve bu silindirin eksenini boyunca yerleştirilmiş ince bir A elektrotundan ibarettir. Şekil 4.5'te gösterilen Geiger – Müller sayacı, silindir gövdesi katot (K) ve silindir gövdesinden yalıtılmış bulunan A elektrodu anot görevi görür.



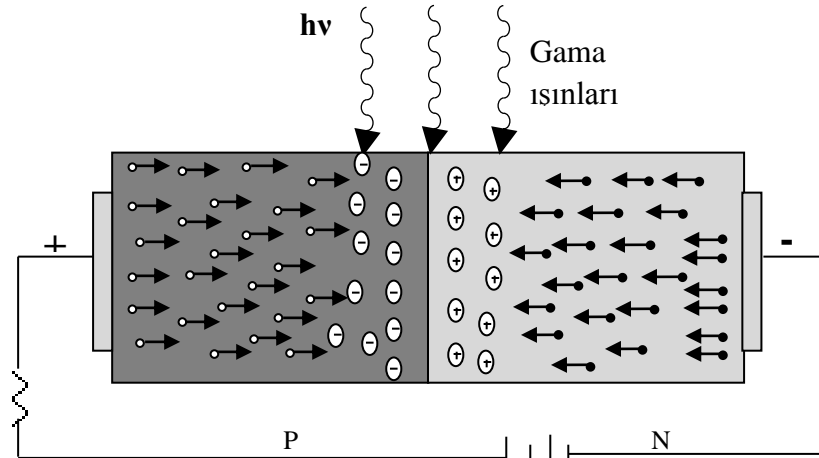
Şekil 4.5 Geiger – Müller sayacı

Elektronlar arasına yaklaşık 10 MΩ değerinde bir R direnci üzerinden uygulanan V gerilimi, kıvılcım atlama geriliminden biraz küçük seçilir. GM sayacı içine giren yüksek enerjili herhangi bir tanecik veya foton çarptığı gaz moleküllerini iyonlaştırır. Elektronlar anoda, pozitif iyonlar katoda doğru harekete geçerler. Kütleleri pozitif iyonlara kıyasla çok küçük olan elektronlar kısa zamanda büyük hız kazanırlar ve yolları üzerindeki gaz moleküllerine çarparak yeni iyon çiftleri oluştururlar. Böylece anoda doğru ilerleyen bir elektron çığı olur ve devreden kısa süreli bir akım geçer. Bu kısa süreli akım R direncinin uçları arasında büyük potansiyel düşmesine ve dolayısıyla

B noktasında ani bir potansiyel değişimine neden olur. Bu potansiyel değişim C kondansatörü ve bir amplifikatör üzerinden bir hoparlöre, bir mekanik sayıcıya veya bir katot ışınlı osilograf perdesinde ise bir elektriksel puls görülür [11].

4.1.5 Yarı-iletken dedektörler

Yarı iletken dedektörler, negatif yük (elektron) veya pozitif yük (deşik) taşıyıcıları fazla olan n ve p tipi materyaller temas ettirilerek elde edilir. Ters besleme altında dedektörde, elektron vedeşikten arınmış bir hassas bölge oluşur. Dedektör veriminin yüksek olması için derin bir hassas bölge, derin hassas bölge elde etmek için de oldukça saf madde gerekir. Bir foton, eklem içinden geçtikçe, bir elektron, valans bandından iletim bandına yükseltilir ve elektron-deşik çifti üretilmiş olur. İçerdeki elektrik alan, elektronları eklemin pozitif,deşikleri de negatif tarafa doğru sürükler. Bu da bir sayıcı ile sayılabilen bir puls meydana getirir. Şekil 4.6'da yarıiletken dedektörlerin basit şematik gösterimi görülmektedir. Yarıiletken dedektörlerin en yaygın kullanılanları, Ge(Li), Si(Li) dedektörleridir.



Şekil 4.6 Yarıiletken dedektör şeması

Katı yarı iletken materyaller; örneğin Ge ve Si kristalleri radyasyon dedektörleri için sintilatörlere alternatif oluşturur. Bu kristaller içerisinde 4 değerlikli atomlar komşu atomlarla dört kovalent bağ oluşturan kök kristaller şeklindedirler. Bunlardaki iletim bandı boştur. Bandlar arası enerji farkı yaklaşık 1 eV civarındadır. Az sayıda elektron değerlik – bandında bir boşluk bırakarak iletim bandına doğru, oda sıcaklığında bile uyarılabilir. Ayrılan e- yerine başka bir komşu e- düşer ve bu durum böylece devam

eder. Deşikler, kristal içerisinde hareket ediyorlarmış gibi görünürler ancak pozitif yüklü atomlar hareket edemezler.

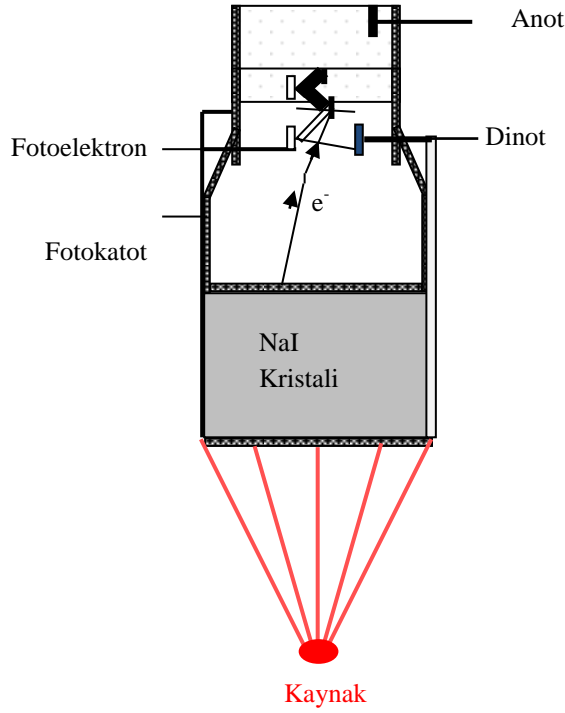
Gelen radyasyon e- ve pozitif boşluk oluşturur. Rekombinasyon olmadan E alanı yardımı bile çekilen kutba doğru gider ve burada yük taşıyıcıları olan elektronların sayısı, gelen ışının enerjisi ile doğru orantılıdır. Eğer madde de yük taşıyıcısı e- fazla ise bunlara n – tipi, eğer pozitif boşluklar çoğunluktaysa bunlara da p – tipi yarıiletken denir. n – tipi ve p – tipi yarıiletkenler birbirleriyle temas ettirilirse, n–tipi materyalden çıkan elektronlar p – tipi materyale giderler ve pozitif boşluklarla birleşirler.

4.1.6 Sintilasyon dedektörleri

Gama ışınlarının algılanması için popüler bir yöntem kristal sintilatörler kullanmaktır. Genel anlamda sintilatörler, yüksek enerjili yüklü parçacıklar töre çarptığında düşük enerjili (görülebilir dalga boylarında) fotonlar yayınlayan kristallerdir. Sintilasyon dedektörleri çok hassas ışın dedektörleridir.

Bir gama ışın dedektörü olarak kullanılırken de, sintilatörler, gama ışınının kendisini algılamaz. Bunun yerine gama ışınları yüklü parçacıklar üretirler ve bu parçacıklar sintilatör ile etkileşirler. Kristalin ürettiği düşük enerjili fotonlar ise daha sonra fotoçoğaltıcı tüpler tarafından toplanır. Sintilasyon dedektörlerinin çalışma şekillerini kısaca özetlersek;

Şekil 4.7’de görünen bir sintilasyon dedektör kristaline gelen gama ışınları, kristal tarafından birçok görünür ışık fotonuna dönüştürülür. Bu dönüşüm, fotoelektrik soğurum, Compton saçılması ve çift üretim yolları ile meydana gelir. Bu üç yöntem de yüksek enerjili elektron pozitron çiftleri yaratırlar bu parçacıklar da sintilatör ile etkileşir.



Şekil 4.7 Sintilasyon dedektör şeması

Görünür fotonlar, fotoçoğaltıcı tüp adı verilen aygıta girerler. Bu tüp, görünür fotonlar topluluğunu voltaj puslarına dönüştürür. Katota çarpan görünür bölge fotonları, katottan fotoelektrik olay yolu ile fotoelektron salınmasına neden olur. Elektronlar, elektrik alan sayesinde Dinot (dynode) adı verilen metal bir plakaya doğru hızlandırılır. Dinot'a çarpan elektronlar, birçok yeni elektronun serbest bırakılmasını sağlarlar. İlk dinottan fırlatılan elektronlar, elektrik alan sayesinde ikinci dinota hareket eder ve bu böylece devam eder. Her dinot, bir öncekinden daha yüksek potansiyeldedir. Ortalama olarak bir fotoçoğaltıcı tüpte 10- 12 dinot bulunur. Yani elektronlar, 10- 12 kez bir dinottan diğerine hareket eder. Elektronlar, dinotlara her çarpışta çoğaltılır, hızlandırılır. Son dinottaki yük miktarı, tüpe giren foton sayısı ile orantılıdır. Foton sayısı ile kristale gelen gama ışınlarının sayısı da orantılı olduğundan dolayı, çıkış voltajı direk olarak gelen gama ışını ile orantılıdır.

Sintilatörler organik ve inorganik olabilirler. Gama ışın dedektörlerinde çoğunlukla kullanılan dedektörler inorganik maddeler olan sodyum iyot (NaI) veya sezyum iyot (CsI) gibi alkali hali de (herhangi bir halojen asit) tuzlardır. Bu maddelere foton yayınlama olasılığını arttırmak ve ışığın kendisinin soğurulmasını azaltmak amacıyla bir miktar katkı eklenir. Bu maddeye, aktivatör (aktifleyici) denir. Talyum ve sodyum

genellikle en çok kullanılan aktivatörlerdir. Genellikle pek çok dedektör, NaI(Tl) yani talyum aktifleyici ile sodyum iyot kristali, ya da CsI(Na) yani sodyum aktifleyici ile sezyum iyot şeklinde ifadelerle açıklanır. İnorganik sintilatörler pek çok uzay projesinde gözlem aracı olarak kullanılmaktadır.

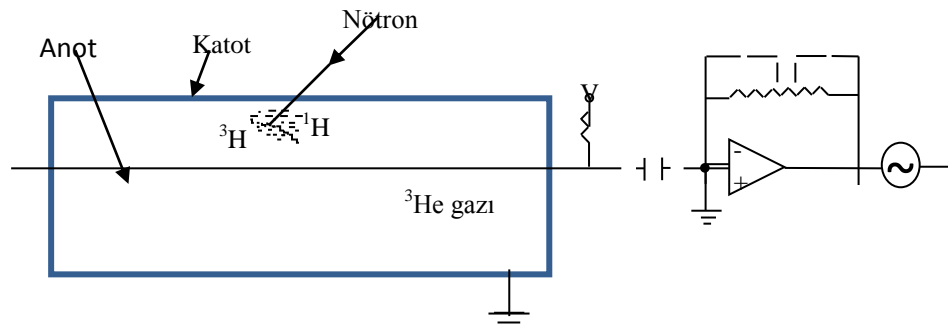
4.2 Nötron Dedektörleri

4.2.1 Nötron dedektörlerinin çalışma prensibi

Nötronlar yüksüz olduğu için, nötron dedektöründe bir nötron – iyonizasyon tanecik dönüştürücüsü bulunur. Gelen nötronlar tarafından dönüştürücü malzeme yakalanır ve burada nükleer bir reaksiyonla algılanabilecek iyon tanecikler meydana gelir.

Nötron dedektörler orantılı sayıcılardır. Nötron ölçerlerde dedektör olarak orantılı iyon odası kullanılır. İyon odasının içi B – 10 izotopu ile zenginleştirilmiş veya 20 cm Hg basıncında BF₃ gazı ile doldurulmuştur. Çünkü yaratılan yükün toplam miktarı, orijinal nötronlardan çıkarılması gereken yük miktarıyla orantılıdır.

Gazlı dedektörler hem nükleer reaksiyonla çıkarılan termal nötronları, hem de geri tepme etkisiyle oluşan hızlı nötronları algılar. İyon odası etrafı 2,5 cm kalınlığında parafin ve 0,5 mm kalınlığında kadmiyum ile kaplıdır. Böylece hızlı nötronlar yavaşlatılarak termal nötron olarak dedekte edilirler. Şekil 4.8’de tipik bir gazlı nötron dedektörü gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Tipik gazlı nötron dedektörü

Nötron dedektörlerinde yaygın olarak meydana gelen etkileşmeler şunlardır:

- i. Boron – 10 etkileşmesi sonucu alfa parçacıklarının oluşması
- ii. Helyum – 3 ile etkileşmesi sonucu proton oluşması

iii. Hidrojen çekirdeği ile yapılan esnek saçılma

İlk iki reaksiyon 0,5 eV'luk enerjiye sahip nötronlar tarafından meydana gelen reaksiyonlardır. Bu nötronlar orta enerjili nötron bölgesinin en altında ve termal bölgede (0,025 eV) olan nötronlardır. Esnek saçılmalar hızlı nötronların dedekte edilmesinde kullanılırlar.

Nötron dedektörleri, infrared radyasyon geçiren pencereler, termoelektrik tipindeki elektrik jeneratörleri vb, cam, boya, tekstil, matbaacılık, fotoğrafçılık, metalürji, deterjan, ilaç, kozmetik vb endüstri alanları ile kompoze gübre yapımında da kullanılır. Uygun nötron dedektörü tasarlanırken birçok faktörün göz önüne alınması gerekir. Bunlar:

1. Hızlı nötronların dedekte edilebilmesi için nötronların yavaşlatıcı moderatör malzemelerin kullanılması.
2. Dedektörün fiziksel boyutlarını dikkate alabilmek için dedektör malzemesinin belirli bir reaksiyon için etki kesrinin yüksek olması.
3. Dedektörün aktif hacminin, nötronun dedektör malzemesi ile etkileşmesi sonucunda meydana gelen ağır yüklü parçacıkları durduracak kadar büyük olmasıdır.

Bu koşulları sağlayan dört tip nötron dedektörü vardır. BC501A (C_8H_{10}) ve BC537 (C_6D_6) dedektörleri orantılı sayaçlara örnek verilebilir.

- I. Boron üçflor (BF_3) orantılı sayaçları
- II. Helyum orantılı sayaçları
- III. Gaz çarpışma orantılı sayaçları
- IV. Kabarcık dedektörleri

4.2.2. Nötron dedeksiyonun prensipleri

Nötronlar yüksüz oldukları için madde içinden geçerken ihmal edilebilir miktarda bir iyonlaşma ortaya çıkarırlar. Madde içerisine giren zerrelerin sebep olduğu iyonlaşmaya dayanan her hangi bir alet, örneğin; Geiger – Müller sayıcısı, sis odası gibi, aracılığı ile doğrudan doğruya dedekte edilmeleri mümkün değildir. Nötronların dedeksiyonu,

çekirdeklerle karşılıklı tesirleri neticesinde oluşan ikincil tesirlere dayanır [12]. Bu reaksiyonlardan bazıları şunlardır.

- a. Bir nötronun bir çekirdek tarafından absorpsiyonu ve hemen hızlı bir şarjlı zerreinin emisyonu
- b. Bir nötronun absorpsiyonu ve ortaya çıkan çekirdeğin fisyonu
- c. Bir nötronun absorpsiyonu ve aktivitesi ölçülebilen bir radyoaktif çekirdek oluşumu
- d. Bir nötronun, bir proton gibi, hafif bir çekirdek tarafından difüzyonu ve bunun neticesinde geri tepen hafif çekirdeğin bir iyonlaşma ortaya çıkarması.

Bu tesirlerden birinci tipe dayanan bir iyonlaşma odası, nötron dedektörü ve orantılı sayaç olabilir.

Üçüncü metot, nötronlar tarafından indüklenen birçok nükleer reaksiyonlar neticesinde radyoaktif ürün çekirdekler ve nötronlar oluşturmasına dayanır. Kendilerine arz edilmiş olan bir cismin aktivitesi vasıtasıyla dedekte edilirler. İndüklenen radyoaktifliği dedekte edebilme imkânı onun ömrüne bağlıdır ve bu ömrün nötronlara arz edilme ile indüklenen reaktifliğin ölçülmesi arasında geçecek zamandan fazla kısa olmaması lazımdır. Bu şartlara uygun birçok cisimler bulunmuştur ve bunlar arasında indiyum, altın, manganez ve disprosyum vardır. Bu elementler dedektör olarak kullanılabilirler. Dedektör malzemenin yapraklar, nötron kaynağına, genellikle verilen bir müddet boyunca arz edilirler. Daha sonra bunlar alınıp indüklenen aktivitenin derecesi, yayılan radyasyonları uygun bir Geiger sayacı, iyonlaşma odası, sintilasyon sayacı veya başka radyasyon dedektörü vasıtasıyla sayarak tayin edilir. Bu aktivasyon metodu, çeşitli enerji menzillerindeki nötronlar için kullanılabilir, yeter ki dedektör malzemeler itina ile seçilmiş olsunlar.

Hızlı nötronların dedeksiyonu için en çok kullanılan metot, nötronların hidrojenli malzemeler tarafından difüzyonunda geri tepen protonlar tarafından oluşan iyonlaşmanın gözlenmesine dayanır. Hidrojen içeren bir gazla doldurulmuş veya katı bir hidrojenli malzemenin yapılmış bir pencereye sahip olan, bir iyonlaşma odası veya sayaç kullanılabilir. Gelen bir nötron bir hidrojen çekirdeğine yeterli bir enerji verebilir

ve hareketli protonun sebep olduğu iyonlaşma dedektörü çalıştırılabilir. Hidrojenli malzeme bir sis odası veya bir nükleer emisyon içerisine konabilir [2].

4.2.3 Düşük enerjili nötron dedektörleri

Düşük enerji bölgeleri için seçilen nötron dedektörlerinin özellikleri (1 – 300 keV) tablo 4.2’de sunulmuştur. Bu enerji bölgesindeki nötronların incelenmesi 1979’a kadar daha aktifti [13-14]. 1979’dan sonraki yıllarda dikkate değer yeni ilerlemeler boron dolu plastik sintilatör, [15] (tabloda gösterilen 3.dedektör) ve lityum dolu sintilatördür [16-17]. (tabloda gösterilen 6.dedektör). Lityum dolu cam sintilatör (tabloda gösterilen 5. dedektör) bu enerji bölgesinin tüm uygulamaları için çok iyidir. Bu organik sintilatörler (tabloda gösterilen 7. ve 9. dedektörler) 0.1 MeV bölgesinin bittiği yüksek enerjide kullanmak için en uygun olanlarıdır.

Tablo 4.2 $E_n = 1 - 300$ keV için sintilasyon dedektörleri

No	Type	Mode	PHS	$\Delta t(ns)$	PSD
1	^{10}B -plug+NaI	(n, α)	Hayır	10	Hayır
2	^{10}B -CH sıvı	(n, α)	Hayır	400	Evet
3	^{10}B -CH plastik	(n, α)	Hayır	400	Hayır
4	6Li (Eu) kristal	(n, α)	Hayır	200	Hayır
5	6Li -cam	(n, α)	Hayır	5	Hayır
6	6Li -CH sıvı	(n, α)	Hayır	400	Evet
7	CH(D) kristal	(n,n)	Evet	2	Evet
8	CH(D) sıvı	(n,n)	Evet	2	Evet
9	CH(D) sıvı	(n,n)	Evet	1	Hayır

Lityum ve boron dolu organik sintilatörler (tabloda gösterilen 2., 3. ve 6. dedektörleri) için kaydedilen zaman çözünürlükleri < 100 keV’den düşük enerjili nötronların dedeksiyonu için uygulanmaktadır. Bu değerler enerji azaltma sürecinden dolayı oldukça zayıftır. Bu süreçte düşük enerjili nötronlar tarafından proton geri tepme üretilir ve sinyaller oluşur. Bu sinyal genellikle dedeksiyon eşiğinin altındadır. Geri tepen proton sinyali daha yüksek gelen nötronlar durumunda dedekte edilebilir. Buna ek olarak ileri nötron yakalama sinyalleri de dedekte edilebilir. Eğer olaylar bu şekilde gerçekleşirse daha sonra geri tepen proton sinyaline dayalı olarak iyi bir zaman

çözünürlüğü elde edilebilir. Bu durumda özellik çift – sinyal işareti nötron olayı ayırt etmek içinde aynı zamanda kullanışlıdır. Bugün boron ve lityum dolu organik sintilatörlerin temel uygulamaları çiftli sinyalin yapımında kullanılır [18-19].

4.2.4 Orta enerjili nötron dedektörleri

Orta enerji düzeyinde kullanılan dedektörlerin özellikleri (0,1 – 20 MeV) tablo 4.3’de sunulmuştur. Bu gruptaki dedektörler organik kristaller, sıvılar ve plastiklerdir. (Tabloda gösterilen 3. ve 5. dedektörler) Son zamanlarda üzerinde çalışılan organik jel sintilatörlerin (tabloda gösterilen 6. dedektör) 2 önemli özelliğinden dolayı ön plana çıkmaktadır. İlk olarak bu sintilatörler mevcut sintilatörlerin (NE213, BC501A ve EJ305) performansına yakın bir performans sergilemektedir. İkinci olarak, sıvı sintilatörlerde olan yangın tehlikesi bu dedektörler için söz konusu değildir. Sıvı helyum ve sıvı ksenon dedektörleri (tabloda gösterilen 7. ve 9. dedektörler) nötron analizörü başta olmak üzere özel uygulamalar için geliştirilmiştir [19].

Tablo 4.3 $E_n = 0,1 - 20$ MeV için sintilasyon dedektörleri

No	Type	Mode	PHS	$\Delta t(ns)$	PSD
1	${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ kristal	(n, α)	Evet	200	Hayır
2	${}^6\text{Li}$ -cam	(n, α)	Hayır	5	Hayır
3	CH(D) kristal	(n,n), (n,x)	Evet	2	Evet
4	CH(D) sıvı	(n,n), (n,x)	Evet	2	Evet
5	CH(D) plastik	(n,n), (n,x)	Evet	1	Hayır
6	CH(D) jel	(n,n), (n,x)	Evet	2	Evet
7	Sıvı ${}^3\text{He}$	(n,n), (n,x)	Evet	2	Hayır
8	Sıvı ${}^4\text{He}$	(n,n)	Evet	2	Hayır
9	Sıvı Xe	(n,x)	Evet	?	?
10	Cs(Tl) kristal	(n,x)	Evet	?	Evet

4.2.5 Yüksek enerjili nötron dedektörleri

Yüksek enerji bölgeleri için seçilen nötron dedektörlerinin özellikleri (> 20 MeV) tablo 4.4’de sunulmuştur. Organik sintilatörler (tabloda gösterilen 1. ve 3. dedektörler) ve baryum floride kristalleri (tabloda gösterilen 5. dedektör) ile bu grubun ileri gelen parçacıklarıdır. Daha yüksek nötron enerjileri önemli üç faktör halinde dikkate

alınmalıdır. İlk olarak, organik sintilatörlerin içinde bile, hidrojen üzerine (n,n) elastik saçılmanın rolü, dedeksiyon süreci içindeki karbon üzerine (n,x) reaksiyonlarından daha önemsiz hale gelir. (Artan nötron enerjisiyle bu iki süreç için tesir kesitlerindeki değişikliklerden dolayı) İkinci olarak BaF₂' ye benzeyen inorganik sintilasyonların çekirdek üzerinde (n,x) reaksiyonları için kesitleri yüksek enerjide ¹²C üzerinde (n,x) reaksiyonları ile karşılaştırılabilir. Üçüncü olarak inorganik kristal materyalleri tipik olarak organik sintilatör materyallerinden daha yüksek Z'li ve daha yoğundur ve böylece, nötron dedeksiyon sürecinde yükü nükleer reaksiyon ürünleri için gelen nötron huzmesiyle birlikte daha yüksek bir durdurma potansiyeliyle hacim başına daha fazla çekirdek sunar. Bu düşüncelerle tabloda gösterile 6. ve 8. dedektörlerin diğer inorganik sintilatörler gibi olacağı muhtemel görünüyor. Ve gelecekte yüksek enerjili nötron dedektörü için daha popüler hale gelebilir [19].

Tablo 4.4 E_n > 20 MeV için sintilasyon dedektörleri

No	Type	Mode	PHS	Δt(ns)	PSD
1	CH(D) sıvı	(n,n), (n,x)	Evet	2	Evet
2	CH(D) plastik	(n,n), (n,x)	Evet	1	Hayır
3	CH(D) jel	(n,n), (n,x)	Evet	2	Evet
4	Sıvı ³ He	(n,n), (n,x)	Evet	2	Hayır
5	BaF ₂ kristal	(n,x)	Evet	1	Evet
6	BGO kristal	(n,x)	?	?	?
7	CsI(Tl) kristal	(n,x)	Evet	?	Evet
8	PbWO ₄ kristal	(n,x)	?	?	?

4.2.6 Organik sintilatör dedektörlerin özellikleri

Hızlı nötron ölçümleri için kullanılan tüm sintilatör dedektörleri arasında organik sintilatör dedektörleri, hem uçuş zamanı metoduyla hem de eğer uygun sinyallenmiş veya işaretlenmiş nötron kaynakları kullanılabilirse sinyal yüksekliği spektrumunun açılması yoluyla, sayım ve spektrometre içinde öncelikli olarak kullanılır. Tüm teknikler iyi karakterize edilmiş dedektör sistemleri gerektirir.

Bu özellikler hakkında elde edilen bilgiler, deneysel araştırma ve hesaplamalara dayanmaktadır. Hesaplamalar, sırasıyla dedektör montajının bileşenleri ile nötronların

etkileşimi için tesir kesit güvenilirliği ve özel dedektör sistemi için spesifikliği, parametrenin güvenilirliği Monte Carlo simülasyonuna dayanmaktadır.

Organik sintilasyon dedektörlerinin en önemli özellikleri düşünüldüğünde;

- ◆ Elektronların ve iyonların ışık çıkış fonksiyonları
- ◆ Sintilatörden fototüpe ışık toplama
- ◆ Sinyal yüksek çözünürlüğü fonksiyonu
- ◆ Sinyal yüksekliği cevap fonksiyonları ve nötron gama ışınları için dedeksiyon verimlilikleri (gelen radyasyon enerjisinin fonksiyonu olarak)
- ◆ Zaman cevabı ve çözünürlüğü
- ◆ Sinyal şekil ayırım kapasitesi
- ◆ TOF spektrometresi ve bilinmeyen metotlar içindeki enerji çözünürlüğü

BÖLÜM 5

GEANT4 VE UYGULAMALARI

5.1 GEANT4

GEANT ismi, “GEometry ANd Tracking (Geometri ve İz sürme)” kelimeleri kullanılarak oluşturulmuştur. İlk tasarım Yüksek Enerji Fizik deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Fakat bugün, bu alana ek olarak, Nükleer fizik, medikal ve biyoloji bilimleri, astrofizik, hızlandırıcı fiziği gibi alanlarda da kullanılmaktadır. GEANT programı (Agostinelli 2003) [25], CERN tarafından geliştirilmiş ve halen desteklenen bir programdır. Kullanıcılar herhangi bir sorunla karşılaştıkları zaman, tüm kullanıcılara açık olan internet tabanlı problem bildirme sistemini kullanarak sorunlarına kolaylıkla çözüm bulabilmektedirler. GEANT, C++ veya Fortran program dilini kullanır. Bu program dillerini bilmeyen bir kullanıcı bile GEANT programını kullanabilir. Kullanıcı, örnek programlardan belirli yerleri sayısal olarak değiştirerek, çalıştığı örneği kendine uyarlayabilir. GEANT, kullanıcıların ihtiyacını karşılayacak tüm fiziksel bilgileri, formülleri kendi içerisinde ve kendine ait kütüphanesinde barındıran ve bunları kullanan bir programdır.

GEANT programı, madde içinden geçen ve madde ile etkileşen parçacıklar için, çok geniş ve çeşitli kullanım alanları olan modern bir Monte Carlo simülasyon programıdır. Monte Carlo yöntemi, istatistik teknikler kullanarak bir deneyi veya olayı sayısal olarak taklit etmektir. Bu yöntem, özellikle 1930'lardan sonra hızla gelişmeye başlamış bir tekniktir. Los Alamos Laboratuvarında nükleer silah geliştirilmesi projesinde çalışan bilim adamları tarafından ortaya atılmıştır. Bu metotlar olasılık teorisine tabidir. Metodun bir probleme uygulanması, problemin tesadüfî sayıları kullanarak defalarca simüle edilip hesap edilmek istenen parametrenin bu simülasyonlarının sonuçlarına bakılarak yaklaşık hesaplanması fikrine dayanır. Günümüzde Monte Carlo metotları nümerik integrasyon, sistem analizi, kısmi differansiyel denklemler, integral denklemler, ekonomik modelleme, matematiksel finans, kuantum mekaniği, istatistiksel fizik, nükleer ve katı hal fiziği ve sosyal bilimler dallarında kullanılmaktadır.

Örneğin, γ etkileşimleri için önemli olan fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşum tesir kesitlerini ve diferansiyel tesir kesitlerini hesaplamak için kullanılan formüller, GEANT programının PHYS paketi altında bulunabilir.

Program çalışırken ihtiyaç duyduğu herhangi bir dosyayı bu kütüphaneden alarak kullanabilir. Çok karmaşık geometriler, kolay ve hızlı bir şekilde GEANT ile oluşturulabilir. Kullanıcılar herhangi bir simülasyon yaptıkları zaman, deney sonuçlarının verilerini hesaplamak için ya da elde ettikleri veriler ile bir grafik çizmek için, kendilerinin herhangi bir hesap yapmalarına gerek olmadan direk programdan istediklerini elde edebilmektedirler.

5.2 GEANT4 ile Yapılan Yeni Tip Nötron Dedektörü (NEDA)

NEDA (NEutron Detector Array) yeni tip nötron dedektörleri, aralarında Türk araştırmacıların bulunduğu, SPIRAL2 projesi çerçevesinde, yaklaşık yirmi fizikçi tarafından incelenmekte ve geliştirilmektedir. NEDA'nın amacı bundan önceki dedektörlere göre yüksek nötron dedekleme verimi, çok iyi nötron ve gama ışınlarının ayrımı ve çok küçük nötron saçma olasılığını barındıran bir dizi işlemi yeni bir yöntemle çalışmaktır. Bundan dolayı daha verimli olması ve daha az çoklu ölçüm algılaması yapması göz önünde bulundurulmalıdır. NEDA 0,1 – 20 MeV aralığındaki nötronların dedekte edilmesinde kullanılacaktır. Çok sayıda sıkıca paketlenmiş sıvı sintilatör dedektörlerinden oluşacaktır. AGATA, EXOGAM2 VE GALILEO'daki gibi gama ışını dedektör topluluklarıyla birlikte kullanılacaktır.

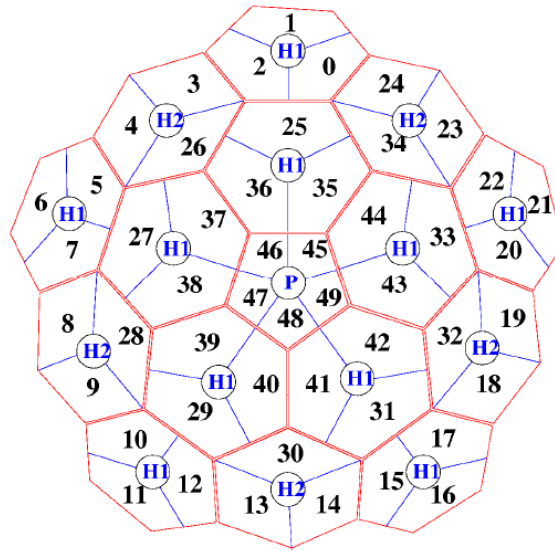
SPIRAL2'de yaratılacak egzotik çekirdekler çoğunlukla nötronca zengin olacaklar ve bozunurken çok sayıda nötron yayınlacaklardır. Bu nötronların yüksek verimde ölçülmesi, zayıfta olsa oluşabilecek reaksiyon kanallarının tanımlanabilmesi ve reaksiyon zincirlerinin takip edilebilmesi sağlanacaktır.

5.2.1 Neutron Wall geometrisi

Neutron Wall likit sintilatör tabanlı bir nötron dedektörleri dizilimidir. Neutron Wall bir gama ışınları spektrometresi ile birlikte kullanılabilir (<http://nsg.tsl.uu.se/nwall/>).

Neutron Wall dizilimi 1 tane beşgen ve 15 tane altıgen dedektörden oluşmaktadır. H_1 ve H_2 olmak üzere iki farklı türde bulunan altıgen dedektörler üç bölmeden oluşurken, beşgen dedektör (P) ise beş bölmeden oluşmaktadır (Şekil 5.1). Bu şekilde tüm dizilim 50 bölmeden meydana gelmektedir. Her bir bölme BC501A(C_8H_{10}) sıvı sintilatörü ile doldurulmuştur (altıgen bölmelerinde 3,2 litre, beşgen bölmelerinde 1,1 litre) ve her bölmenin kendi PMT'si vardır. Dizilimde yer alan toplam likit sintilatör miktarı 150 litredir. Dedektörler birbirine çok yakın ve 1π 'lik katı açığı kaplayan küresele benzer kabuk şeklinde yerleştirilmişlerdir. Hedeften dedektörlerin yüzeyine olan mesafe 51 cm'dir. Dedektör bölmeleri içinde yer alan likit sintilatörün, dedektörün ön yüzeyinden arka yüzeyine kadar uzunluğu ise 15 cm'dir.

Neutron Wall'da her bir altıgen dedektörün bir kenar uzunluğu 140 mm ve dedektörün toplam derinliği 156,12 mm. (Şekil5.2). NEDA dedektörlerinin altıgen şekili 26 olmasından ötürü sadece altıgen dedektörlerin çizimleri verilmiştir. NEDA dedektörleri Neutron Wall dedektörlerine benzetme yapılarak tasarlanmıştır. Bu sayede iki dedektör sisteminin daha kolay karşılaştırılması mümkün olacaktır.



Şekil5.1 Neutron Wall dedektörlerinin yerleri ve numaraları
(<http://nsg.tsl.uu.se/nwall/geometry/nwall-detector-numbering.png>)

H_1 ve H_2 olmak üzere iki tür altıgen dedektör 3 bölmeye ve bir beşgen dedektör ise 5 bölmeye ayrılmıştır. Dizilimdeki toplam bölme sayısı 50'dir.

5.2.2 NEDA tasarımı ve geometrisi

NEDA'nın tasarımında GEANT4 ve GSort programları kullanılmaktadır. Bu programlamalardan GEANT4 bölüm 5.1'de açıklanmıştır.

Uygun nötron dedektörü tasarlanırken birçok faktörün göz önüne alınması gerekir. Bunlar;

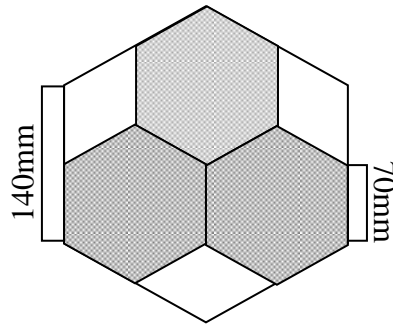
- ◆ Hızlı nötronların dedekte edilebilmesi için nötronları yavaşlatıcı moderatör malzemelerinin kullanılması,
- ◆ Dedektörün fiziksel boyutlarını dikkate alabilmek için dedektör malzemesinin belirli bir reaksiyon için tesir kesitinin yüksek olması,
- ◆ Dedektörün aktif hacminin, nötronun dedektör malzemesi ile etkileşmesi sonucunda meydana gelen ağır yüklü parçacıkları durduracak kadar büyük olmasıdır.
- ◆

NEDA çalışmalarında öngörülen geometriler, simülasyon aracılığı ile en çok verim ve en az çoklu ölçüm verecek şekilde belirlenmiştir.

NEDA'nın başlangıçtaki geometrisi "Neutron Wall" dedektörlerine benzetilmiştir ve başlangıç noktası olarak benimsenmiştir.

Neutron Wall'daki dedektörler iki çeşit altıgen ve bir çeşit beşgenen oluşmaktadır. Her bir beşgen ve altıgen 3 ve 5 fotoçoğaltıcıdan oluşmaktadır.

Neutron Wall'u simüle etmek için yeni bir dizayn yapılmıştır. Dedektörler için beşgen şekil kullanılmıştır. 3 küçük altıgen dedektör Şekil 5.2'de gösterildiği gibi Neutron Wall'un altıgeni içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.2 NEDA için tasarlanan, Neutron Wall'a benzetilerek yapılan yeni basit dizayn

Dedektörlerin üç bölmeden oluşması ve her bölmenin birinin aynı uzunlukta altı kenara sahip olması başlangıç noktası olarak önerilirken, dedektörlerin boyutları ise Neutron Wall dedektörlerine benzetilmiştir. Şekil 5.2’de taralı alanlar dedektörün bölmelerini, açık alanlar ise boşlukları göstermektedir. Her bir boşluk komsu dedektörün bir bölmesinin bir kösesine denk gelmektedir. Dedektörlerin düz bir geometriye sahip olması, ayrı ayrı her bir dedektörün kaynaktan istenilen uzaklığa konulmasını sağlamaktadır. Bu özellik ile dedektörlerin tasarlanması sırasında ön planda tutulan çoklu ölçüm olasılığı daha serbest bir şekilde incelenmektedir.

Bu geometri için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Dedektörler kaynaktan 51cm. uzağa yerleştirilmiştir. Enerji 1 MeV ile 10 MeV arasında değiştirilmiştir. 32°’lik katı açıda nötronlar emilmektedir.

5.2.3 Simülasyon çeşidi

GEANT4 ve buna ek olarak AGATA simülasyon kodu kullanılmıştır. Bu kod (ASC) giriş ve çıkış datalarının kontrol edilmesinin yanı sıra farklı dedektör geometrileri içinde uygundur [21]. İki farklı sintilatör göz önüne alınmıştır. Biri standart BC501A ve döteryum BC537. Bunlar sırasıyla C₈H₁₀ (Xylene) ve C₆H₆ (Benzene) kimyasal içeriğine sahiptirler. Olası nötron etkileşimleri aşağıda sıralanmıştır.

- ◆ Esnek saçılma (p, d ve ¹²C)
- ◆ Endotermik ¹²C(n, α)⁹Be (Q = -5,701 MeV)
- ◆ Gama ışınımı emisyonu yoluyla p, d ve ¹²C da ekzotermik nötron yakalama
- ◆ Sintilatördeki nadir izotopları içeren benzer reaksiyonlar: BC501A durumundaki döteron ve ¹³C içeren, aynı zamanda BC537 durumundaki proton ve ¹³C içeren

Bu reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan ürünler (veya etkileşmeler sırasında üretilen ikincil parçacıklar) sintilatöre enerjilerini bırakırlar ve bu enerji E.Dekempeneer ve arkadaşlarının [24] çalışmasında kullandıkları parametrisasyon işlemi yardımıyla ışığa dönüştürülmektedir. Işık protonlar, döteronlar, ⁹Be, ¹²C, α parçacıkları, elektronlar ve gama ışınları ile üretilebilir.

0 – 10 MeV enerji aralığında GEANT4 mantıklı sonuçlar çıkarmaktadır. Fakat esnek olmayan etkileşimler tam olarak doğrulanmamaktadır. Şu ana kadar bilinen $^{12}\text{C}(n,n)3\alpha$ kayıp reaksiyonu veya $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ işleminin yanlış kinematiği, tespit edilen elastik olmayan etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Bunun dışındaki eksiklikler NEDA için önemli değildir. Çünkü bunlar ilgilenilen nötron enerji aralığında değildir.

5.2.4 Performans parametreleri

Nötron dedektörünün verimi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\epsilon_n = N_{d \geq 1}^{1n} / N_{emitted}^{1n} \quad (5.1)$$

Bu denklemde $N_{emitted}^{1n}$ tam olarak 1 nötronun salındığı olay sayısını gösterirken $N_{d \geq 1}^{1n}$ en az bir dedektörün çalıştığı olay sayısını göstermektedir.

NEDA için ikinci önemli parametre sadece bir nötronun tespit edildiği olaylardaki füzyon buharlaşma reaksiyonları sonucunda dedekte edilen 2 nötronun birbirinden ayrılmasıdır ve bu durum iki veya daha fazla dedektör tarafından tespit edilir. Farklı dedektörler arasından saçtırlan nötronlar tespit edilen nötronlardaki artışın ana kaynağıdır, ve bu durum nükleer tablonun protonca zengin olan kısımlardaki çalışmalarda kullanılan dedektör ayarlarını önemli seviyede sınırlamaktadır.

Tam olarak bir nötronun salındığı olaylardaki birden fazla nötron dedektörünün algılama olasılığı;

$$P_{1n \rightarrow 2n} = N_{d \geq 2}^{1n} / N_{d \geq 1}^{1n} \quad (5.2)$$

ile verilmiştir.

Bu denklemde $N_{d \geq 2}^{1n}$ en az iki dedektörün algılama yaptığı ve bir nötronun salındığı olayların sayısını göstermektedir. $P_{1n \rightarrow 2n}$ ise gürültü olarak ele alınmıştır.

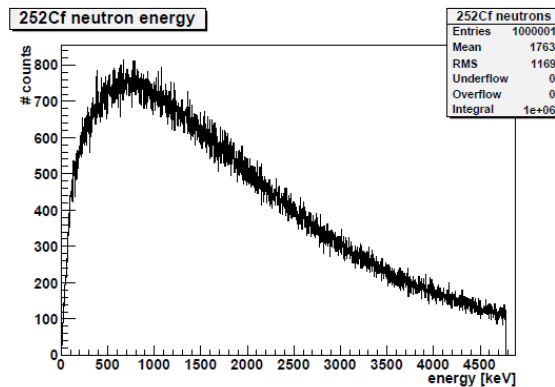
Burada kullanılan gürültü parametresi saçılan nötronların değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Fakat farklı dedektör ayarlarının karşılaştırılması için uygun değildir. Çünkü deneysel olarak iki nötronun salınması çok nadir bir olaydır ve gerçek iki nötron olaylarıyla bir nötron saçılması olaylarının ayırt edilmesi için ekstra koşullar kullanılmalıdır.

Bu durumlar iki dedektörden gelen sinyal zaman farkının ve iki dedektör arası mesafenin azaltılması ile sağlanır. Bu azaltmaları tanımlamak ve her bir dedektör için gerekli optimizasyon yapılmak zorundadırlar [22]. Ama NEDA geometrileri için bu tip değerlendirmeler yapılmamıştır.

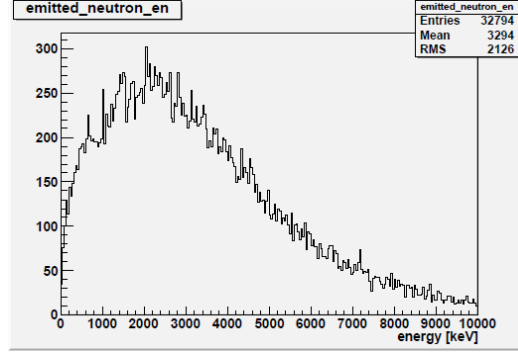
5.2.5 Simülasyonlar için giriş dataları

Simülasyonlarda nötronlar için kullanılan enerji ve açılal dağılımlar aşağıda verilmiştir.

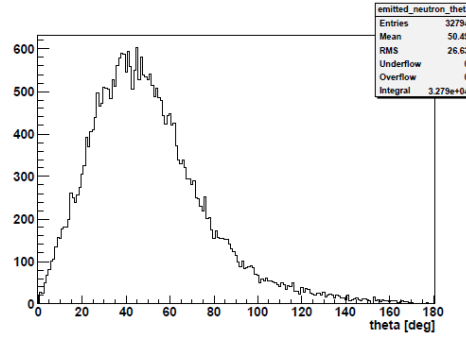
- ◆ Tek renkli, 1 – 8 MeV enerji aralığında, izotopik veya ince huzme
- ◆ ^{252}Cf nötron enerji dağılımından örnek, Şekil 5.3’de verilmiştir.
- ◆ Takip eden reaksiyonlar için evapOR kullanılarak üretilmiştir
 - ✓ Hedefte 55,9MeV lik huzme enerji kaybı kaydedilmiştir. Bu kayıp Coulomb bariyer enerji seviyesine kadar yavaşlatmaya karşılık gelmektedir ve bu durum Şekil5.4 ve Şekil5.5’de verilmiştir.
 - ✓ $^{32}\text{S}(80\text{MeV}) + ^{28}\text{Si}$ (Şekil5.6 ve şekil5.7)



Şekil5.3 ^{252}Cf kaynağından salınan nötronların enerji dağılımı



Şekil5.4 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Cr}$ reaksiyonundan nötronların enerji dağılımı



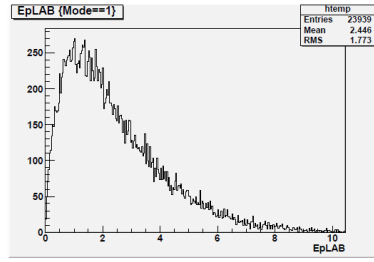
Şekil5.5 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Cr}$ reaksiyonundan nötronların açısal dağılımı

5.2.6 Dedektör boyut çalışmaları

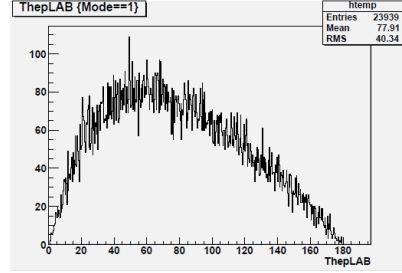
Verim dedektör uzunluğu

Etkileşmelerin meydana gelmesi için gerekli olan sintilatör tabakanın kalınlığı üzerinde optimum dedektör boyutunun belirlenmesi için sistematik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Tek renkli nötronlardan oluşan ince hüzme Şekil 5.8’de verilen sintilatör içerisine dedektör duvarı olmadan kapatılmış ve nötron dedekleme olasılığı silindir uzunluğun bir fonksiyonu olarak analiz edilmiştir. Silindirin yarıçapı dedekleme olasılığının sadece silindir uzunluğuna bağlı olması ve çaptan önemli ölçüde etkileşmemesi adına kasıtlı olarak 25cm. seçilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları Şekil 5.9’da verilmiştir.

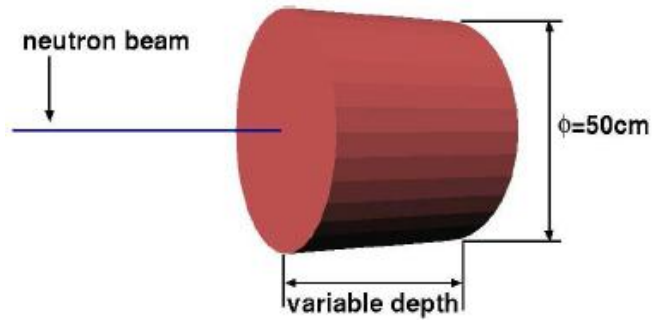


Şekil 5.6 $^{32}\text{S} + ^{28}\text{S}$ reaksiyonundan nötronların enerji dağılımı

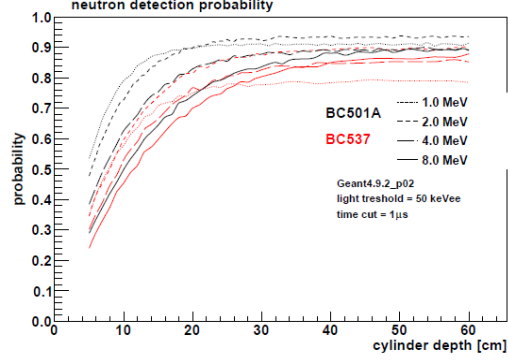


Şekil 5.7 $^{32}\text{S} + ^{28}\text{S}$ reaksiyonundan nötronun açısıl dağılımı

Farklı nötron enerjileri ve sintilatör tipine bağlı olarak 20 – 30 cm. silindir uzunluğunda %85 – %95 arasında nötron dedekleme olasılığı görülmektedir. Dedektör boyunun ekstra uzatılması dedekleme olasılığı önemli bir artışa sebep olmamaktadır. BC537 sintilatörü BC501A'ya göre daha düşük bir dedekleme olasılığı ortaya koymuştur. Bu iki sintilatörün nötron enerjisine bağlı olarak dedekleme olasılığının karşılaştırılması ise Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.8 Sintilatör silindiri dedektör uzunluğunun bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir



Şekil 5.9 Nötron deteksiyon olasılıkları iki sintilatör ve 1, 2, 4 ve 8 MeV enerji aralığındaki nötronlar için silindir dedektörlerinin bir fonksiyonu

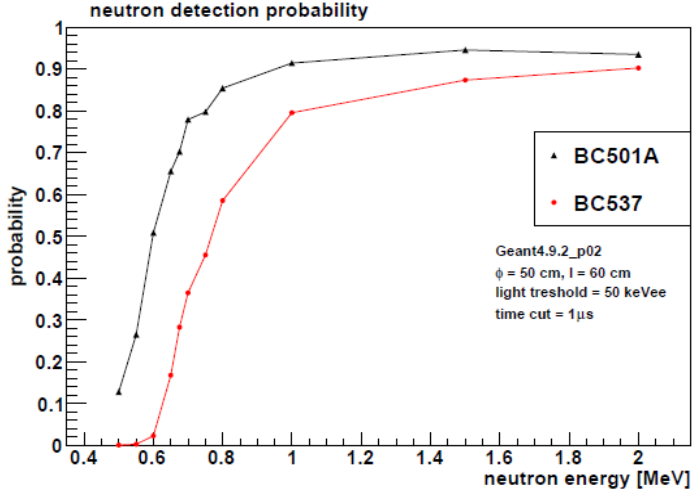
BC537'nin BC501A'ya göre dedekleme olasılığının daha düşük olmasının sebepleri aşağıda sıralanmıştır.

- ◆ Döteronlar üzerindeki etkileşimlerin protonlar üzerindeki göre daha düşük kesite sahip olması
- ◆ H, C oranının daha düşük olması
- ◆ Sintilatör içerisinde hareket eden döteronların aynı enerji seviyesinde protonlara göre daha az ışık üretmesi

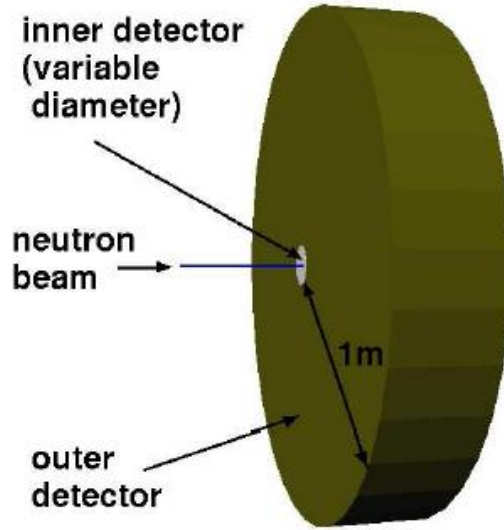
Özellikle 1 MeV'den daha düşük nötron enerjilerinde bu iki dedektör arasındaki fark önemli boyuttadır.

5.2.7 Cross – Talk

Tek renkli nötronlar sintilatör silindiri içerisine kapatılmış ve silindir üzerindeki ikincil önemli etkileşim olasılığı silindir çapının bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. 20 cm ve 40 cm. uzunluğundaki silindirler kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan dedektör Şekil 5.11'da, sonuçlar ise Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de verilmiştir.

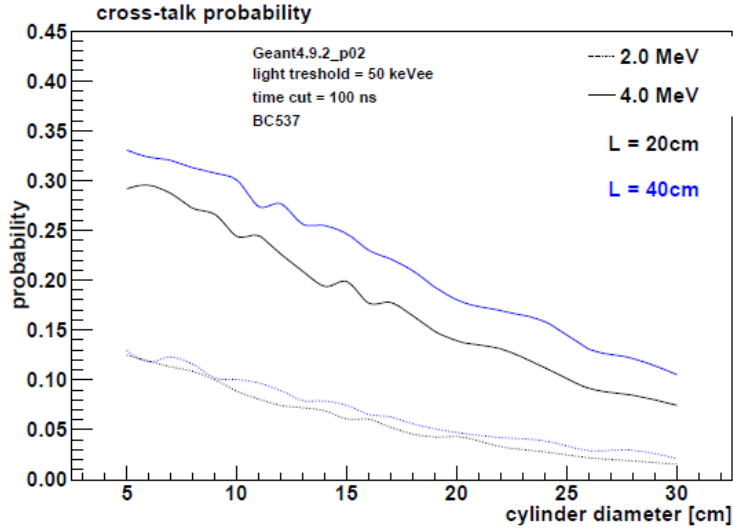
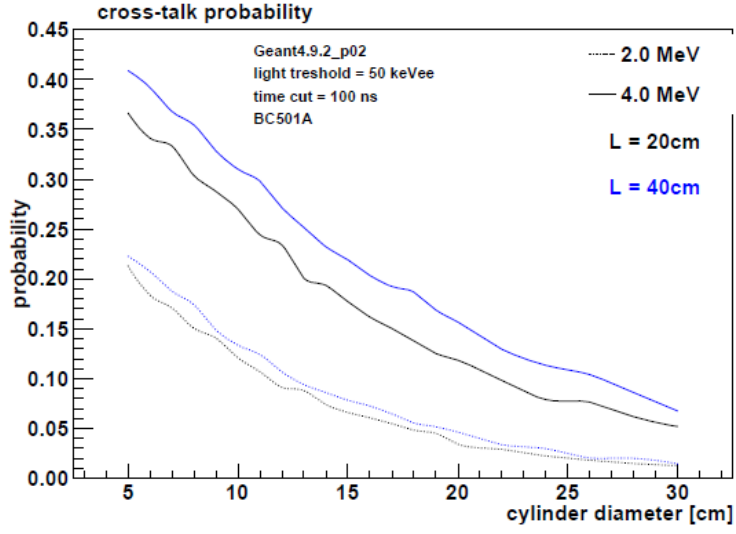


Şekil 5.10 İki sintilatörün nötron enerjisine bağlı olarak dedekleme olasılığının karşılaştırılması

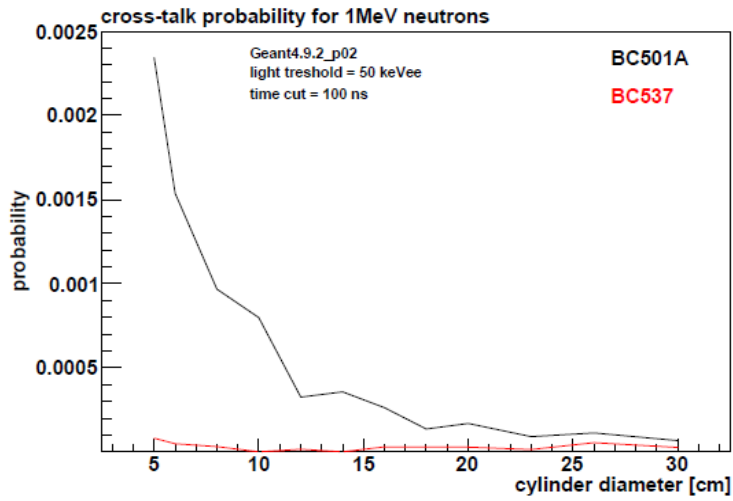


Şekil 5.11 Simülasyonda kullanılan dedektör

Bu iki sintilatörün gürültü olasılığının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Fakat çalışılan en düşük nötron enerji seviyesi olan 1 MeV’de BC537’de iç gürültü tespit edilmemiştir. Bu durum BC537’nin düşük enerjilerdeki düşük veriminin bir sonucudur. 1 MeV’de BC537’de üretilen ışık bir dedektör hacminde üretilmesi gereken sinyal için yeterlidir.



Şekil 5.12 2 – 4 MeV enerjilerindeki nötronlar için simülasyon sonuçları



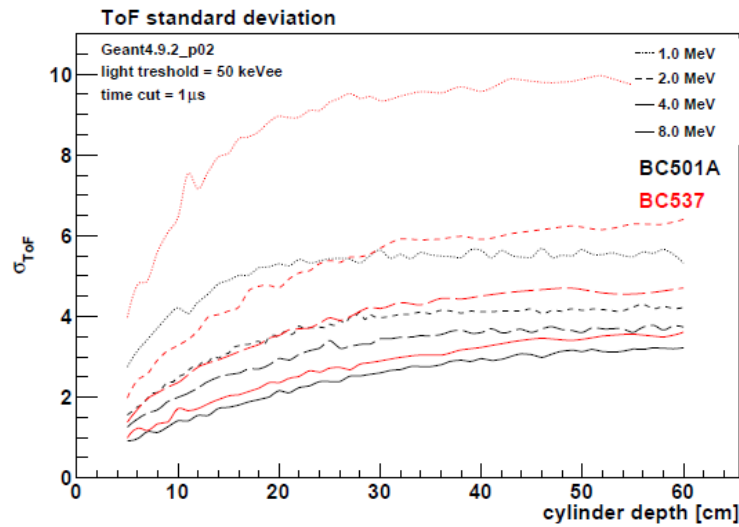
Şekil 5.13 1 MeV enerjisindeki nötronlar için simülasyon sonuçları

5.2.8 Nötron etkileşim zamanları

Prensip olarak büyük dedektör kötü zaman çözünürlüğüne sahiptir. Bu durum dedektör boyutunda sınırlamalar getirir. Nötron dedektörünün zaman çözünürlüğü aşağıdaki iki elemandan oluşmaktadır.

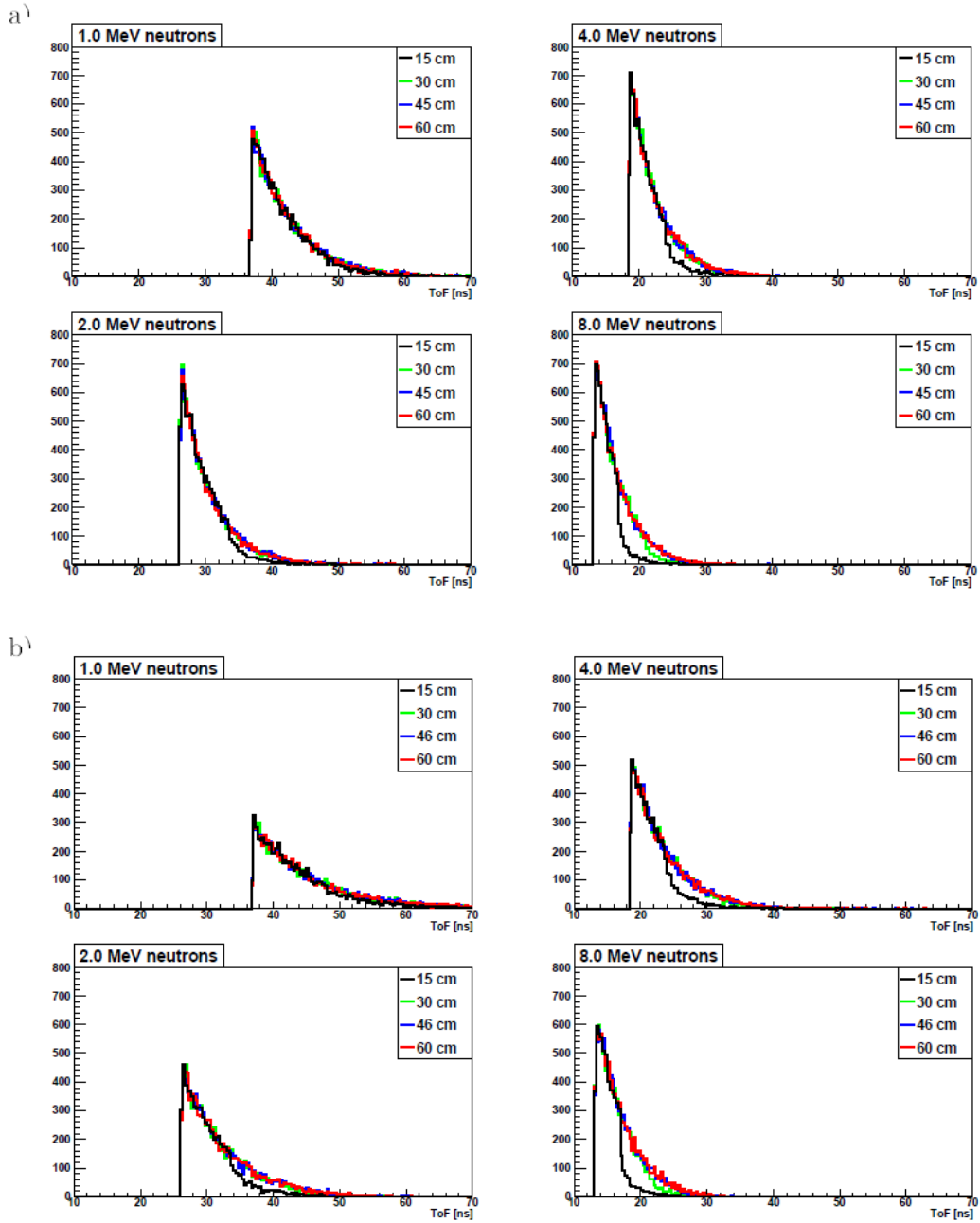
1. İçsel zaman çözünürlüğü, sintilatör içerisindeki ışık sinyalinin üretilmesi ve toplanması için gerekli olan zaman ve elektronik titreşme ile ilişkilidir.
2. Tek renkli nötronların önemli etkileşim derinliğindeki istatistiksel değişiminden kaynaklanan zaman çözünürlüğüdür. Örneğin TOF'un değerlerindeki değişiklik.

Bu modelde ışık üretim işlemi ve ışığın iletimi göz önüne alınmadığı için, içsel zaman çözünürlüğü bu simülasyonda değerlendirilmemektedir. Fakat K.Benerjee ve arkadaşları [23] BC501A dedektörleri için yaptıkları deneysel çalışmadan içsel zaman çözünürlüğünün dedektör uzunluğundan önemli seviyede etkilenmediğini ve bu çözünürlüğün yaklaşık olarak 1,5 ns olduğunu göstermiştir. Bu değer Joa Ljingvall ve arkadaşlarının [24] çalışmasında ölçülen içsel zaman çözünürlüğü ile uyuşmaktadır. Bölüm 5.2.6'da verilen silindir dedektörün TOF çözünürlüğü silindir uzunluğunun bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. TOF dağılımının genişliği Şekil 5.14'te, dağılımların gerçek boyutları ise Şekil 5.15'te verilmiştir [23].



Şekil 5.14 TOF dağılımının genişliği

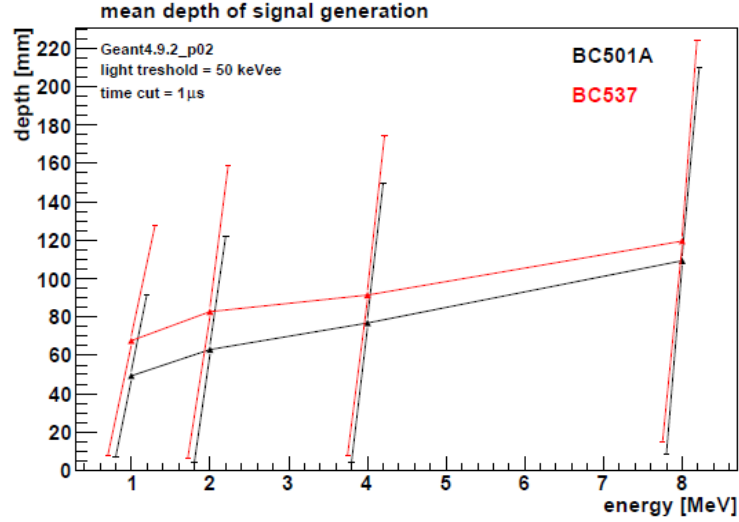
Dedektör uzunluğunun bir fonksiyonu olarak TOF dağılım genişliği başlangıçta hızla artarken uzun silindirler için belli bir değere ulaşarak sabitlendiği görülmektedir.



Şekil 5.15 BC501A için TOF dağılımları

Yüksek nötron enerjilerinin düşük TOF değişimine sebep olduğu görülmektedir. Bu durum hızlı bir parçacık için etkileşim derinliğinin değişiminin TOF açısından daha az bir öneme sahip olmasıyla açıklanmıştır. Etkileşimin ortalama derinliği nötron enerjisinin bir fonksiyonu olarak Şekil 5.16’te verilmiştir. Dedektörün BC537 sintilatör

ile doldurulması zaman çözünürlüğünde önemli derecede kötüleştirme meydana getirmiştir.



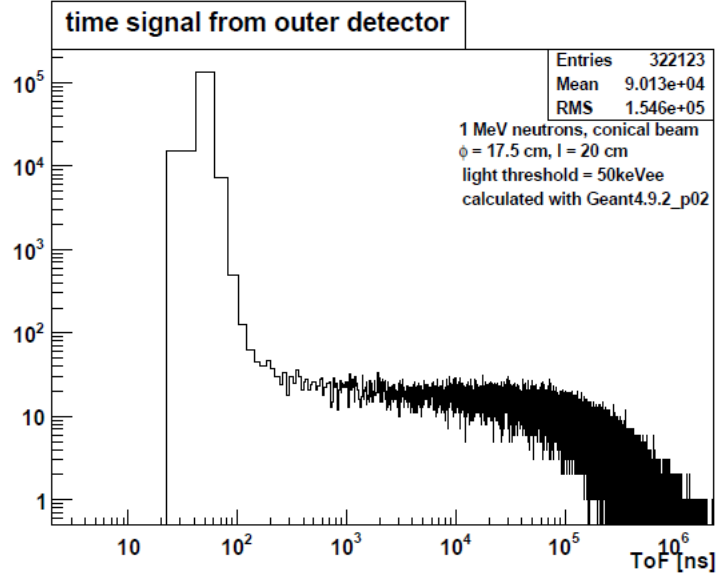
Şekil 5.16 İki sintilatör için nötron enerjisinin bir fonksiyonun etkileşim derinliği

Sintilatörün gürültü özelliklerinin analizinde zamanlama etkileri önemlidir. Sintilatörde etkileşime giren nötronlar genel olarak ortamdaki çekirdekle bir dizi esnek etkileşimden geçerler ve daha sonra termalize olurlar, ya da dedektörden kaçarlar. Bu yüzden ışık, nötronun dedektöre girmesinden sonraki birkaç ns içerisinde üretilmektedir.

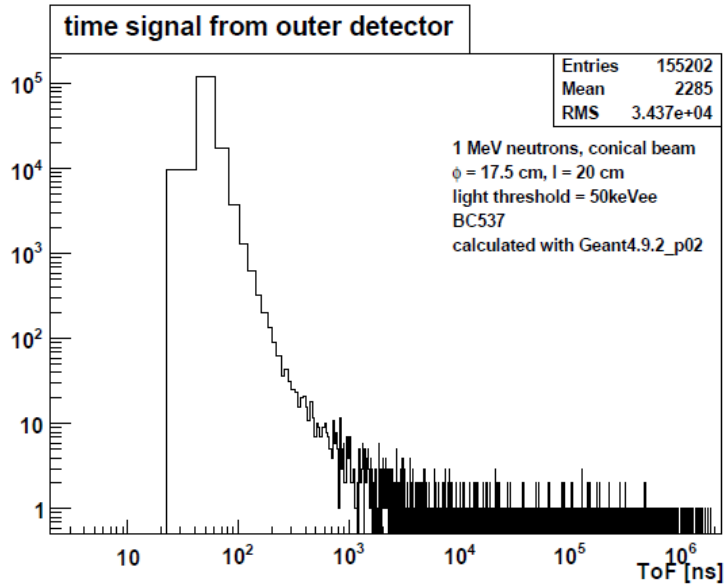
Sintilatördeki termalize olmuş nötronların saçılması daha uzun sürede devam eder (mili saniyeler seviyesinde). Eğer termalize olmuş nötron bir proton tarafından yakalanırsa bu işlemde açığa çıkan gama ışınlarının tayin edilmesinden dolayı ışık üretimi uzun sürer. $p(n,\gamma)d$ etkileşiminin $d(n,\gamma)t$ etkileşmesine göre daha büyük kesitinden dolayı bu tip etkiler sadece BC501A sintilatörü için önemli olmaktadır. Bu durum Şekil 5.17'da gösterilmiştir. BC501A'daki uzun light flash etkisi Şekil 5.18'de verilen BC537 sintilatöründe görülmemektedir.

Eğer ışığın toplanması zamanla sınırlandırılmazsa BC501A sintilatörü BC537'ye göre daha yüksek gürültü ortaya koyar. Bu durum gecikmiş light flashın başlangıç nötron etki noktasından daha uzak bir yerde üretilmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.19'de iki sintilatör için 1 μs zaman limitinin olması ve olmaması durumlarında karşılaştırılmıştır.

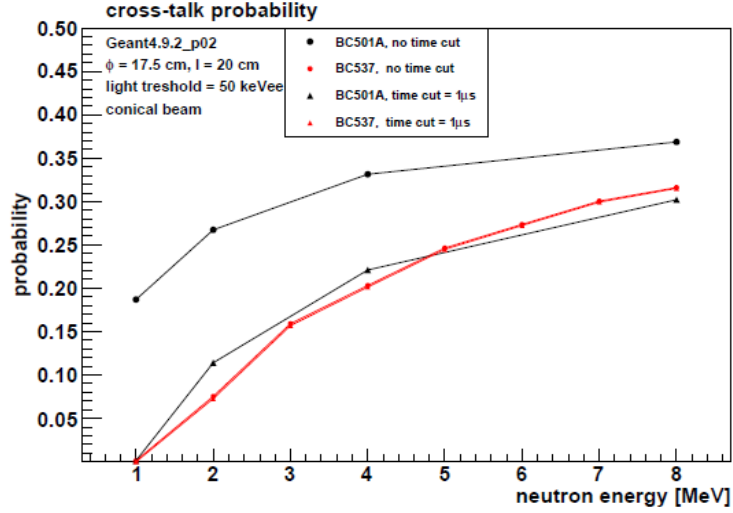
Deneysel olarak nötron dedekleme süresi her zaman sınırlıdır. Nötron dedekleme ve ışın toplama süreleri birkaç yüz ns olmalıdır. Nötron Wall'ın yer aldığı durumlarda nötron dedekleme ve ışık toplama yaklaşık olarak 100 – 400 ns'dir. Bu gate 1µs boyunca uygulandığında sonuçlarda önemli bir değişiklik gözlenmemiştir [23].



Şekil 5.17 BC501A sintilatörü için ışık üretim zamanı



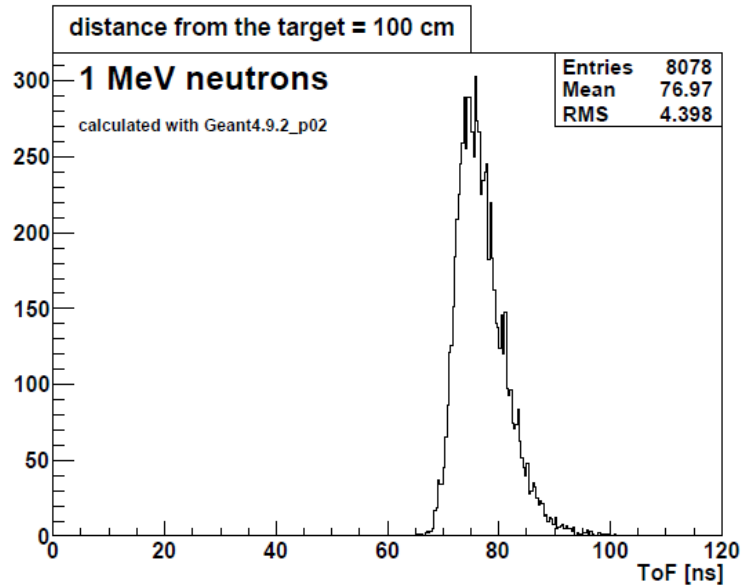
Şekil 5.18 BC537 sintilatörü için ışık üretim zamanı



Şekil 5.19 Dedektör zaman limitinin karşılaştırılması

Nötronların hedef noktasından dedektöre olan uçuş süreleri dedekte edilen nötronlarla gama ışınlarının ayırımını sağlamaktadır. Bu yüzden nötronlar ve gama ışınları arasında mümkün olan en uzun mesafenin saptanması gerekmektedir.

Hedeften 1 m uzağa yerleştirilmiş 20 cm uzunluğunda ve 5” çapındaki silindir dedektörde dedekte edilen 1 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumu Şekil 5.20’de verilmiştir. Bu durumda en az 100 ns puls uzaklığına sahip hüzmelerin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır [23].



Şekil 5.20 1 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumu

5.2.9 NEDA geometrisi için dedektör boyut etkisi ve sonuçları

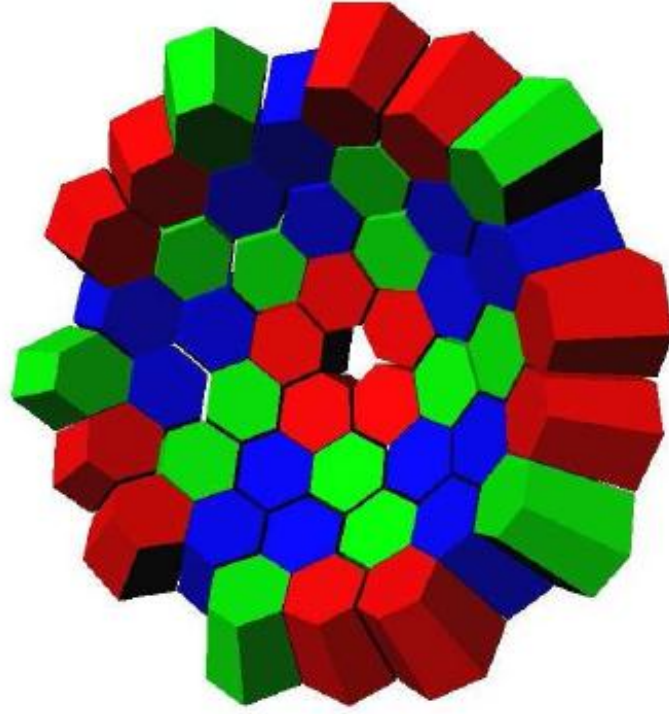
Bu zamana kadar çalışılan farklı dedektör konfigürasyonları Tablo 5.1’de özetlenmiştir. Karşılaştırma amaçlı mevcut nötron wall bilgileri de tabloda verilmiştir. Bölüm 5.2.6’da verilen dedektör boyut çalışmaları 20 cm dedektör uzunluğunun kabul edilebilir bir nötron dedekleme verimi için yeterli olduğunu ortaya koymuştur.

Tablo 5.1 Simülasyondaki farklı dedektör konfigürasyonları

Name	n	r(cm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	l(mm)	V(dm ³)
Neutron Wall	50	51		127 veya 76	148	3,2 veya 1,1
Spherical small	45	50	76.5	106	180	
Flat	169	50	76	76	176	2,14
Zigzag	169	50	76	76	176	2,14
Staircase	190	100	76	76	200	
Spherical large	≥200	100		~76	200	

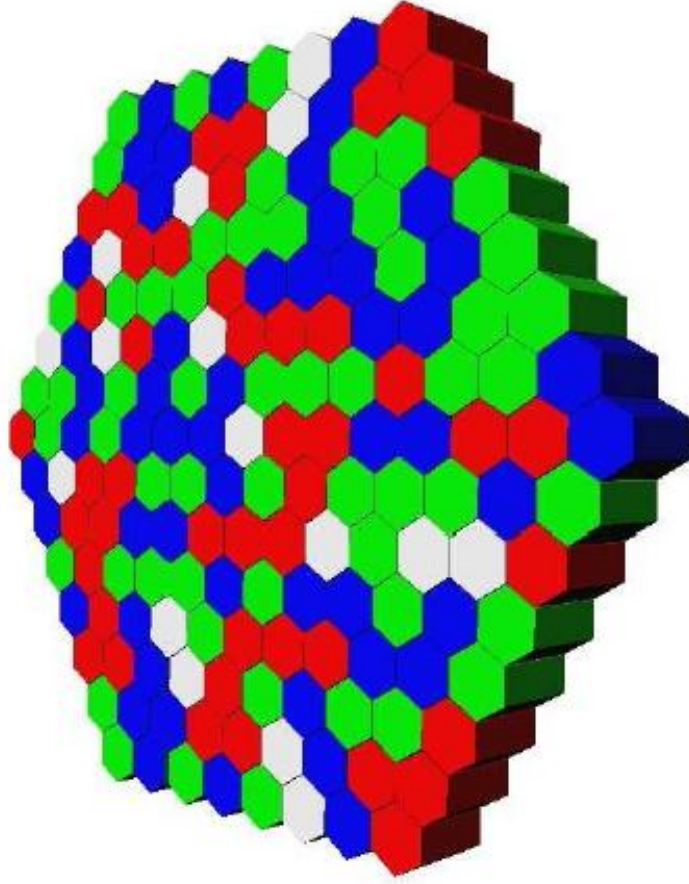
NEDA’daki deney düzeneğinin boyutları sınırlıdır. Bu durum aynı zamanda nötronların maksimum uçuş süresini de sınırlamaktadır. Test düzeneğinin boyut ve uçuş süresindeki bu sınırlamalar göz önüne alındığında NEDA dedektörünün pratik olarak maksimum iç çapının 1 m olması gerektiği tespit edilmiştir [23].

Dedektörün çapraz (enine) uzunluğu mevcut PM tüplerinin maksimum çapı olan 5” ile sınırlıdır. Eğer küresel geometri kullanılırsa 1 π ’lik katı açısı 200 adet bu tip dedektörü kapsamaktadır. Bu sayı büyük olmasının yanı sıra enine küçük dedektörlerden oluşan bir düzenek kullanmak pratik değildir. 5 inç’lik dedektörlerde bile cross - talk olasılığının yüksek olacağı göz önüne alınmalıdır. Bu tip küresel dedektör konfigürasyon çalışmaları devam etmektedir (Şekil5.21).



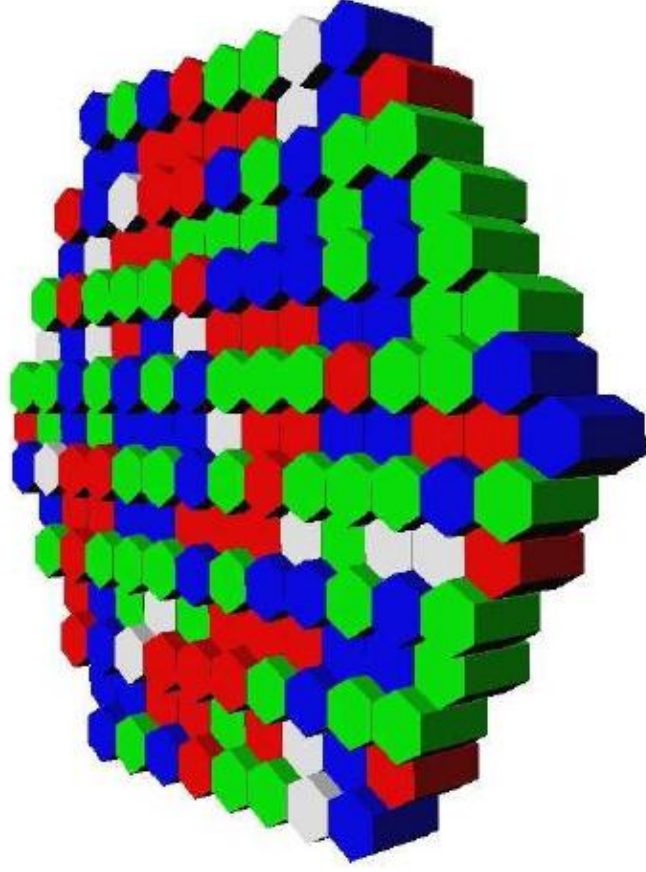
Şekil 5.21 Küresel geometri

Küresel dedektöre ek olarak Şekil 5.22’de verilen düzgün geometri üzerinde çalışılmaktadır. Bu tip bir konfigürasyonun amacı gerek geometri gerekse de mekanik açıdan basit olmasıdır. Fakat küresel geometride olduğu gibi bu geometri için çok fazla sınırlatıcı kullanılması gerekmektedir. Öte yandan bu tip bir dizaynın dezavantajı farklı dedektörler için farklı nötron uçuş sürelerinin meydana gelmesidir. Bu durum $2n$ ayırımının küresel geometriye göre daha problemlidir ve kaynak darbeleri frekansının daha etkili olmasına sebep olmaktadır.



Şekil 5.22 Düzgün geometri

Şekil 5.23'de verilen zigzag geometrisiyle, saçılan nötronun komşu dedektörler tarafından dedekte edilme olasılığının azaltılması amaçlanmıştır.



Şekil 5.23 Zigzag geometri

Düzgün geometrideki problemin yanı sıra zigzag geometrisinde hedef dedektör uzaklığının değişimi de daha büyük zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için düzgün geometrinin basitliği ve küresel geometrinin avantajları belirtilen basamak geometrisi ortaya atılmıştır. Bazı dedektör tipleri için tespit edilen verim ve gürültü değerleri Tablo5.2’de özetlenmiştir.

Tablo 5.2 Farklı dedektörler için verim ve cross – talk değerleri

Geometri	252Cf		58Ni + 50Cr		32S + 28Si		32S + 28Si	
	ϵ_n	$P_{1n \rightarrow 2n}$	ϵ_n	$P_{1n \rightarrow 2n}$	ϵ_n	$P_{1n \rightarrow 2n}$	ϵ_n	$P_{1n \rightarrow 2n}$
Neutron Wall	0,155	0,090	0,45	0,18	0,40	0,17	0,161	0,136
Spherical small	0,157	0,087						
Flat	0,176	0,119						
Zigzag	0,162	0,142						

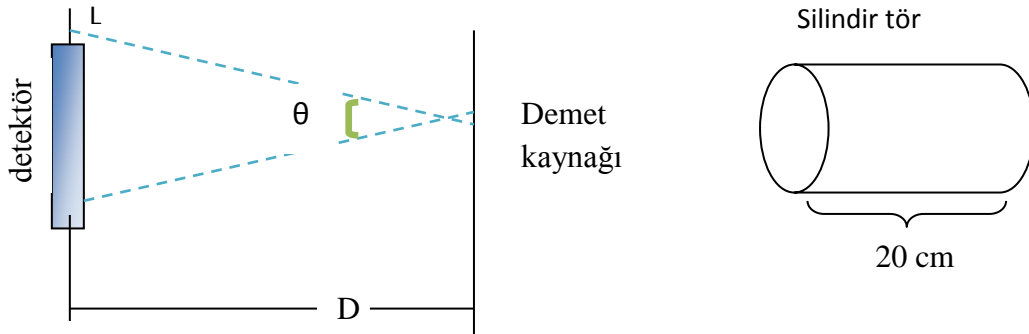
Nötron Wall durumu için simülasyondan elde edilen verim değeri deneysel değerden oldukça yüksektir. Bu durumun nedeni tam olarak anlaşılamamakla birlikte evapOR tarafından üretilen enerji ve açılal dağılımların deneyler sırasında tam olarak tekrarlanamamasından kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak iki sintilatör arasında yapılan karşılaştırmalarda BC501A'nın veriminin BC537'den önemli ölçüde büyük olduğu belirlenmiştir. Her iki sintilatörde yakın gürültü özellikleri sergilese de BC537 daha kötü bir zaman çözünürlüğü ortaya koymuştur. Bu zamana kadar ki elde edilen sonuçlar BC501A sintilatörü ile doldurulmuş bir dizinin BC537'ye göre daha iyi özellikler göstereceğini ortaya koymuştur.

BÖLÜM 6

YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada farklı mesafelerde, farklı enerjilerde farklı açılar kullanılarak enerji, zaman ve TOF ölçümleri incelenmiştir. NEDA geometrisinin simülasyonlarını yapmak için aşağıdaki şekil göz önüne alınmıştır.

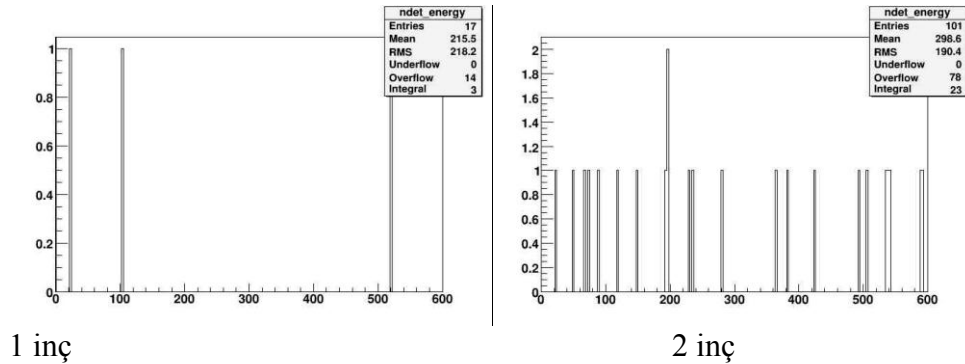


Şekil 6.1 NEDA başlangıç geometrisinin simülasyonları için kullanılan şema

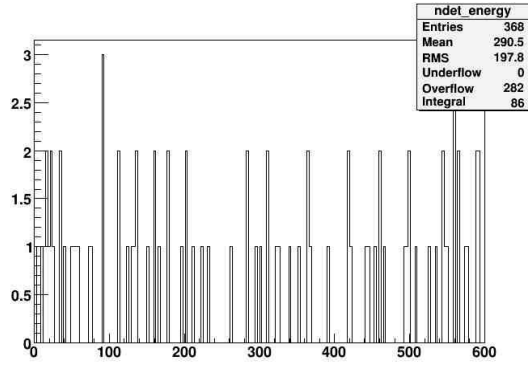
Şekilde de görüldüğü gibi D uzaklığı dedektör ile kaynak arasındaki mesafe, θ açısı kaynaktan çıkan tüm dedektör yüzeyini kaplaması için gerekli olan açığı göstermektedir.

6.1 Enerji İçin Simülasyon Sonuçları

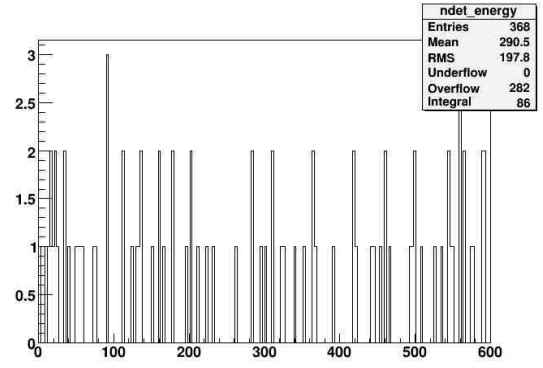
Hedeften 1m uzağa yerleştirilmiş 20cm uzunluğundaki ve 1", 2", 3", 4" ve 5" çapındaki silindir dedektörde te edilen 5 MeV enerjisindeki nötronların enerji spektrumu 90° lik açıda Şekil 6.2 de verilmiştir.



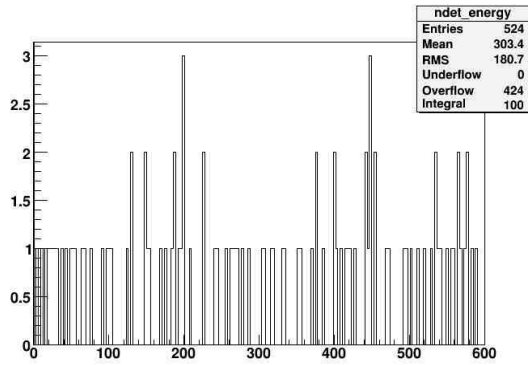
Şekil 6.2 90⁰ derecelik açıda 5 MeV nötron enerjisindeki nötronların enerji simülasyonları sonuçları



3 inç



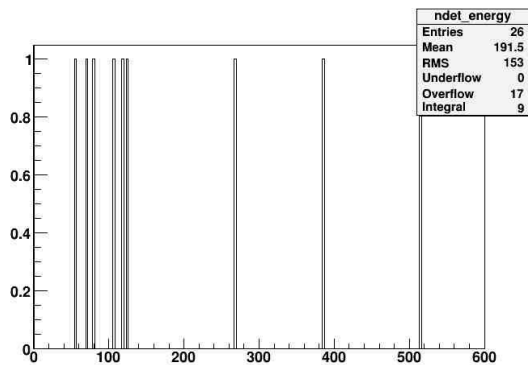
4inç



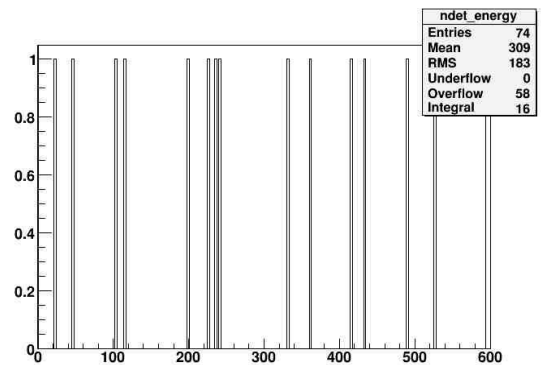
5 inç

Şekil 6.2 Devamı 90⁰ derecelik açıda 5 MeV nötron enerjisindeki nötronların enerji simülasyonları sonuçları

Hedeften 1m uzağa yerleştirilmiş 20 cm uzunluğundaki 1", 2", 3", 4" ve 5" çapındaki silindir dedektörde dedekte edilen 10 MeV enerjisindeki nötronların enerji spektrumu 90⁰ lik açıda Şekil 6.3 de verilmiştir.

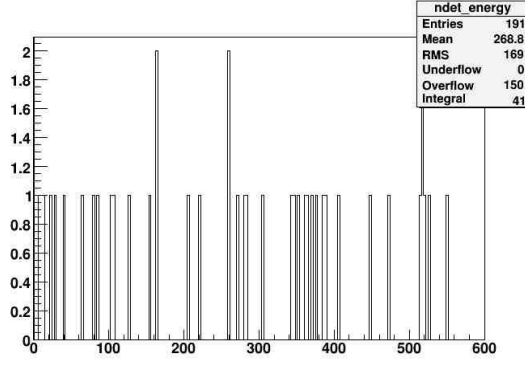


1inç

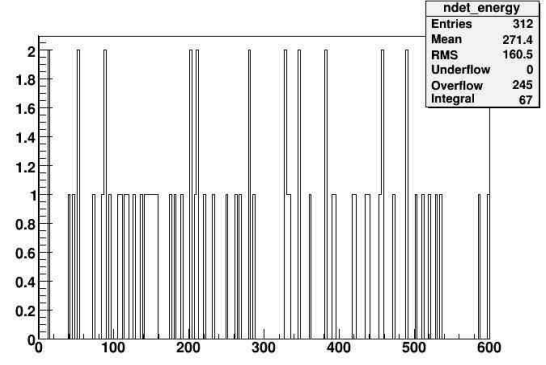


2inç

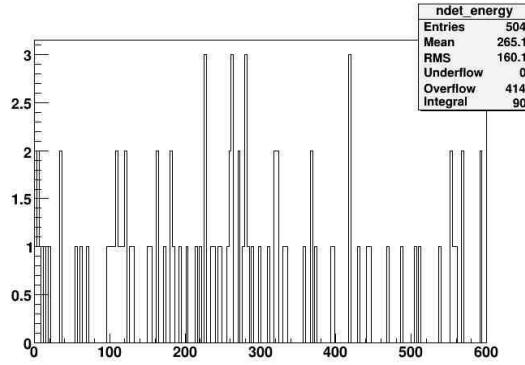
Şekil 6.3 90⁰ derecelik açıda 10 MeV enerjisine sahip nötronları enerji spektrumları



3 inç



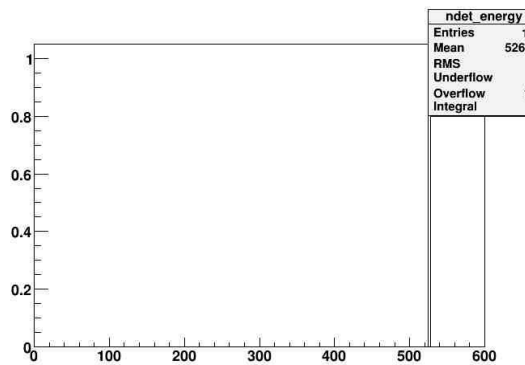
4inç



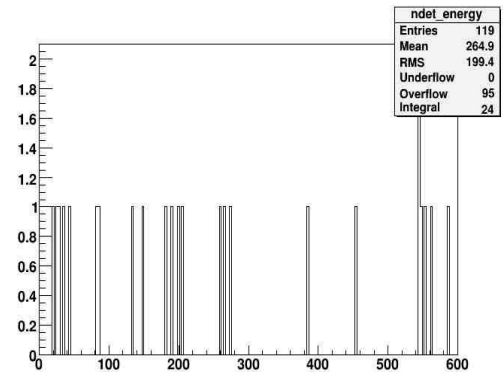
5 inç

Şekil 6.3 Devamı 90^0 derecelik açıda 10 MeV enerjisine sahip nötronları enerji spektrumları

Hedefte 1m uzağa yerleştirilmiş 20 cm uzunluğundaki 1", 2", 3", 4" ve 5" çapındaki silindirik dedektörde dedekte edilen 5 MeV enerjisindeki nötronların enerji spektrumları 180^0 lik açıda incelenmiş ve bunlardan bazıları Şekil 6.4'de verilmiştir.

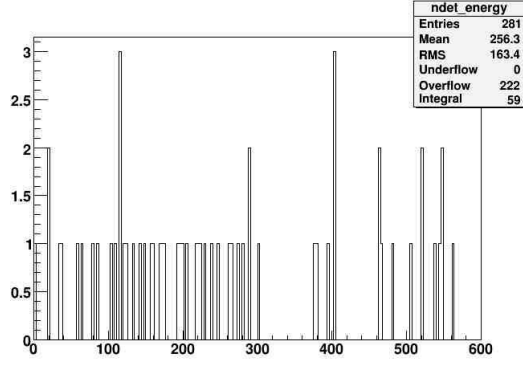


1 inç



2 inç

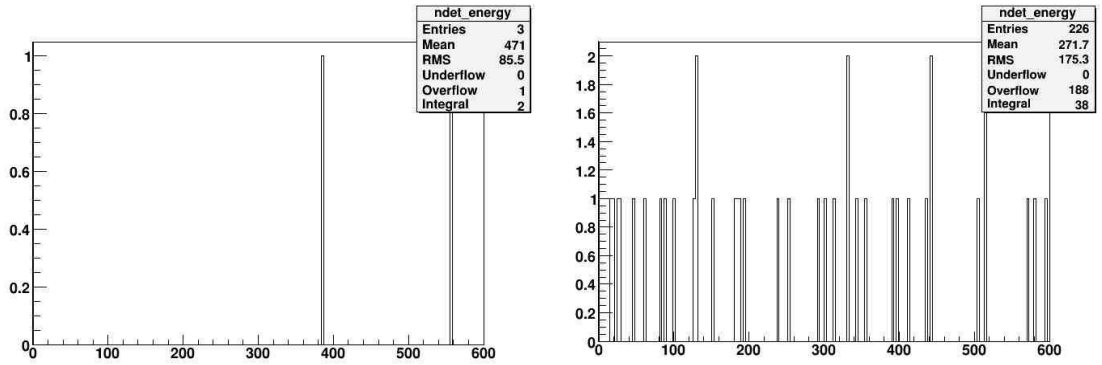
Şekil 6.4 180^0 lik açıda 5 MeV enerjisine sahip nötronların enerji spektrumları



5 inç

Şekil 6.4 Devamı 180° lik açıda 5 MeV enerjisine sahip nötronların enerji spektrumları

Hedeften 1m uzağa yerleştirilmiş 20cm uzunluğundaki 1", 2", 3", 4" ve 5" çapındaki silindir dedektörde dedekte edilen 10 MeV enerjisindeki nötronların enerji spektrumu 180° lik açıda incelenerek bu simülasyonlar karşılaştırılmıştır ve bu sonuçların bazıları Şekil 6.5 de verilmiştir.



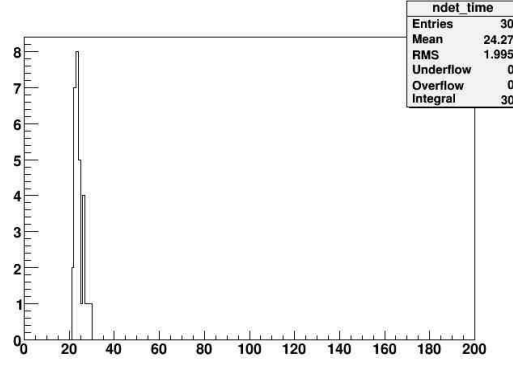
1 inç

5 inç

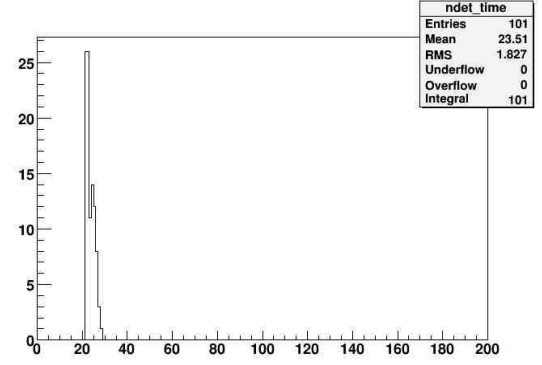
Şekil 6.5 180° lik açıda 10MeV enerjisindeki nötronların enerji spektrumları

6.2 Zaman İçin Simülasyon Sonuçları

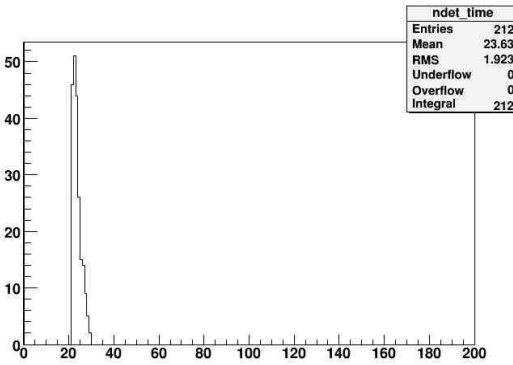
Hedeften 1m uzağa yerleştirilmiş 20 cm uzunluğundaki 1", 2", 3", 4" ve 5" çapındaki silindir dedektörde dedekte edilen 3 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumu 90° lik açıda Şekil 6.6'da verilmiştir.



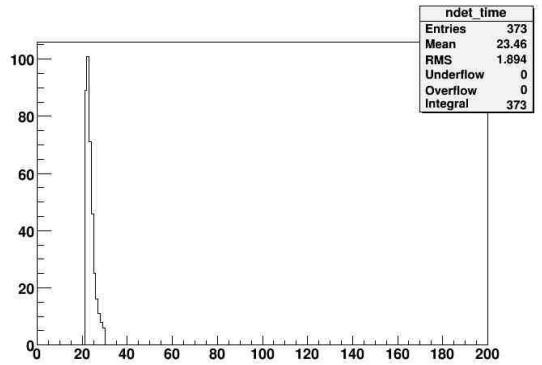
1 inç



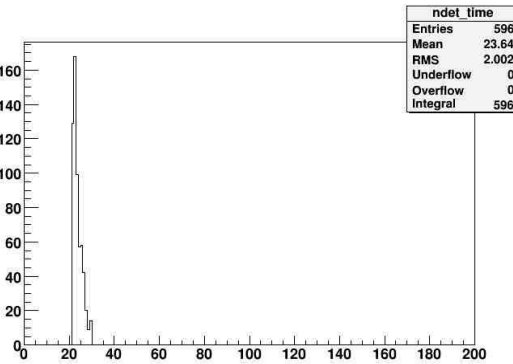
2 inç



3 inç



4 inç



5 inç

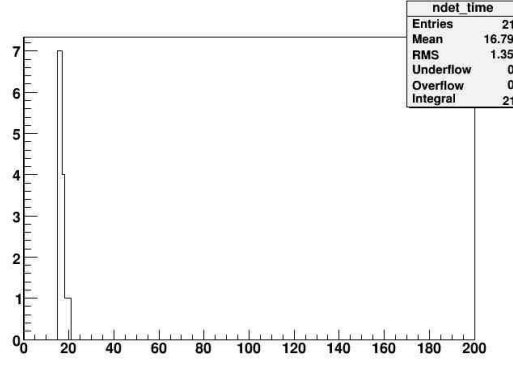
Şekil 6.6 90°'de 3 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumları

Yapılan simulasyon çalışmalarında da görüldüğü gibi silindir çapına bağlı olarak sonuçlar bir değişim göstermemektedir.

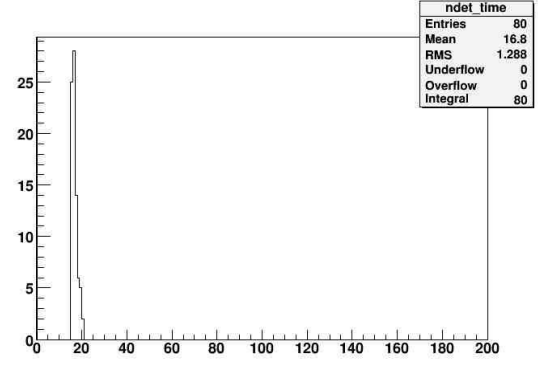
Hedeften 1m uzağa yerleştirilmiş 20 cm uzunluğundaki 1", 2", 3", 4" ve 5" çapındaki silindir dedektörde dedekte edilen 6 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumu Şekil 6.7'de verilmiştir.

Nötron Enerjisi = 6 MeV

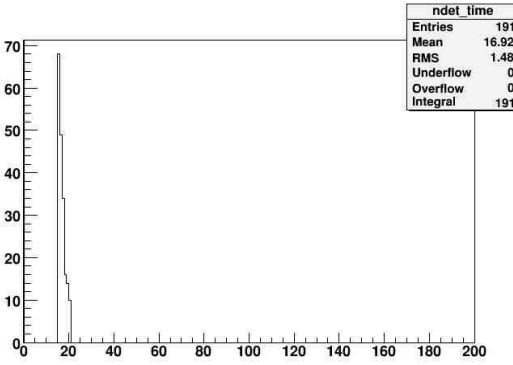
$\theta = 90^0$



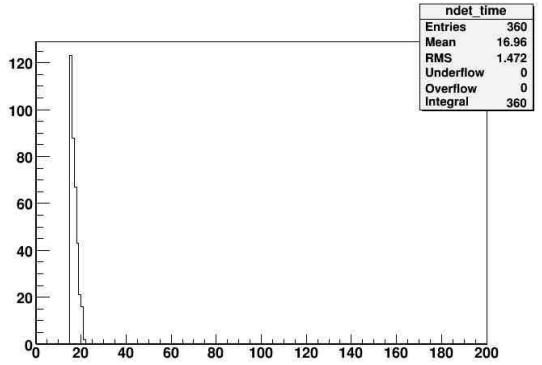
1 inç



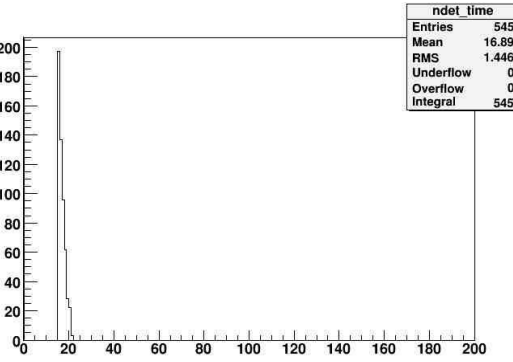
2 inç



3 inç



4 inç



5 inç

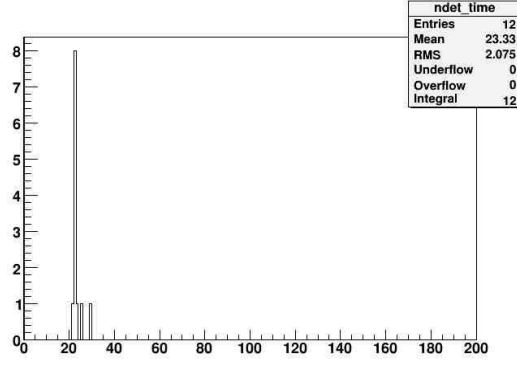
Şekil 6.7 90°'de 6 MeV enerjideki nötronların zaman spektrumları

Bu şartlar altındaki enerji artırılarak simülasyon çalışmaları yapıldı ve bu çalışma sonucu aradaki açının da zaman spektrumunu etkilemediği sonucuna ulaşıldı.

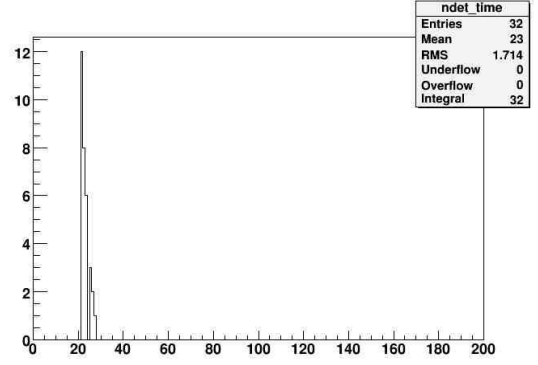
Hedeften 1 m uzağa yerleştirilmiş 20 cm uzunluğundaki ve 1", 2", 3", 4" ve 5" çapındaki silindir dedektörde dedekte edilen 3 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumu Şekil 6.8'de verilmiştir.

Nötron Enerjisi = 3 MeV

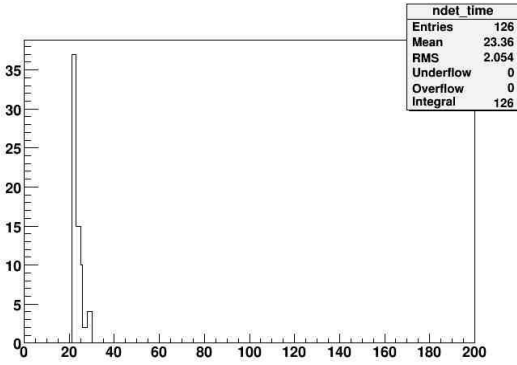
$\theta = 180^\circ$



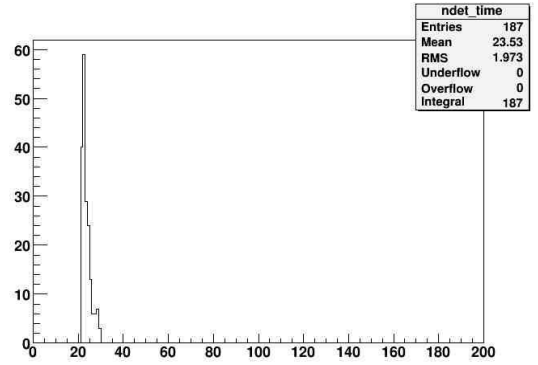
1 inç



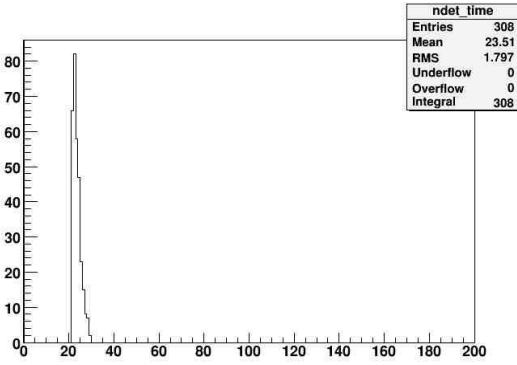
2 inç



3 inç



4 inç



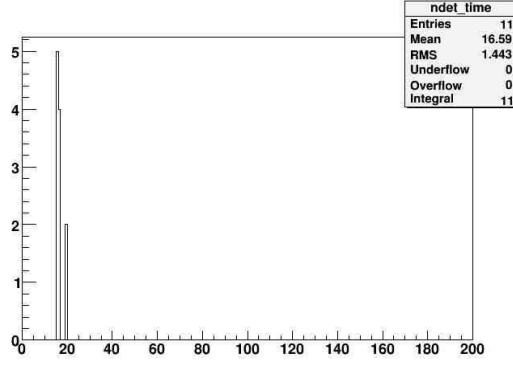
5 inç

Şekil 6.8 180⁰'de açıda 3 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumları

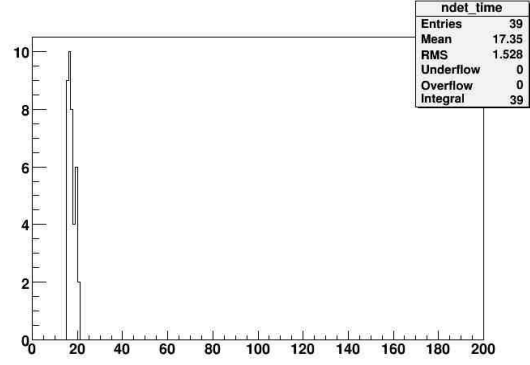
Hedefte 1 m uzağa yerleştirilmiş 20 cm uzunluğundaki 1", 2", 3", 4" ve 5" çapındaki silindirik dedektörde dedekte edilen 6 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumu Şekil 6.9'de verilmiştir.

Nötron Enerjisi = 6 MeV

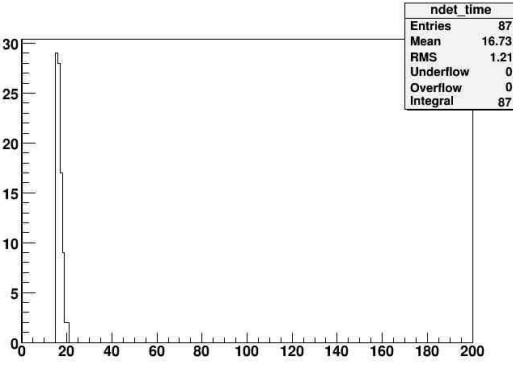
$\theta = 180^0$



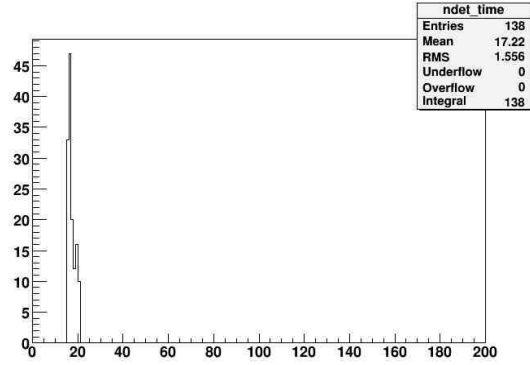
1 inç



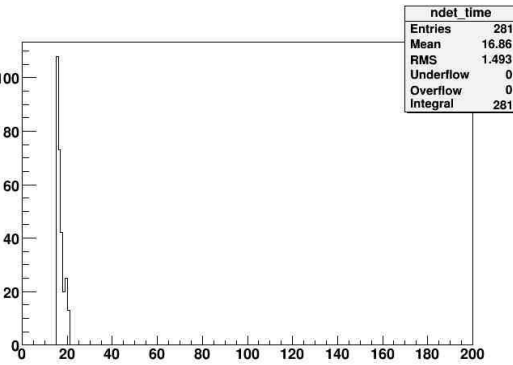
2 inç



3 inç



4 inç



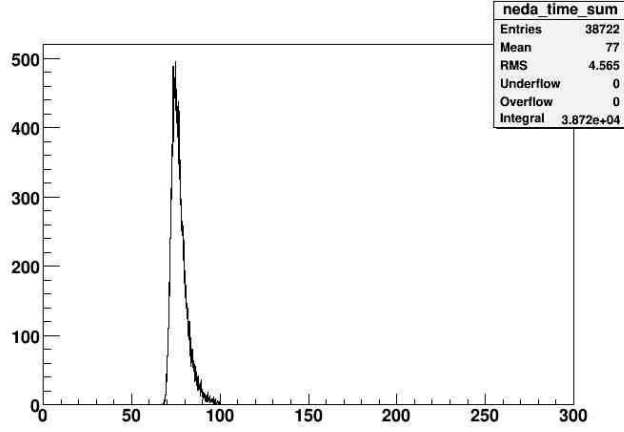
5 inç

Şekil 6.9 180° de 6 MeV enerjisindeki nötronların zaman spektrumları

Daha sonra dedektör ile kaynak arasındaki açı dikkate alındı. Farklı enerji ve silindir çapındaki simülasyonlara bakılarak bu simülasyonlarında nötronların zaman spektrumlarının benzerlik gösterildiği anlaşıldı.

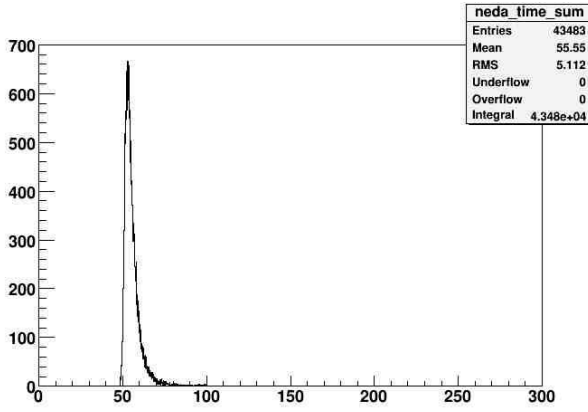
Başka bir çalışma yapılarak 1 MeV'lik enerji için nötronun zaman spektrumu elde edildi, Şekil 6.10. Yapılan bu çalışmada 1 MeV ile 10 MeV'lik enerjilerde zaman spektrumları incelenmiştir. 4 MeV'den daha büyük enerjilerde hiçbir farklılık söz

konusu olmadığı, bu da zaman spektrumlarının enerjinin artmasıyla değişmediği sonucuna varıldığını ortaya koymuştur.

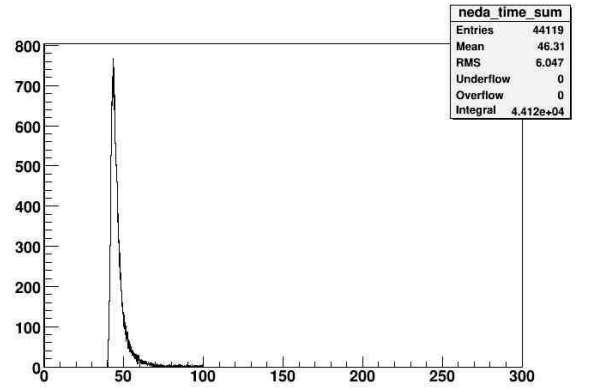


Şekil 6.10 1 MeV'lik nötron enerjisi için zaman spektrumları

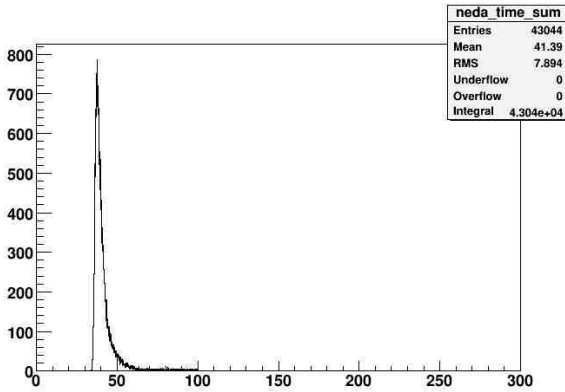
2 MeV ile 4 MeV enerji aralığındaki nötronların zaman spektrumuna bakacak olursak,



a) 2 MeV enerji



b) 3 MeV enerji

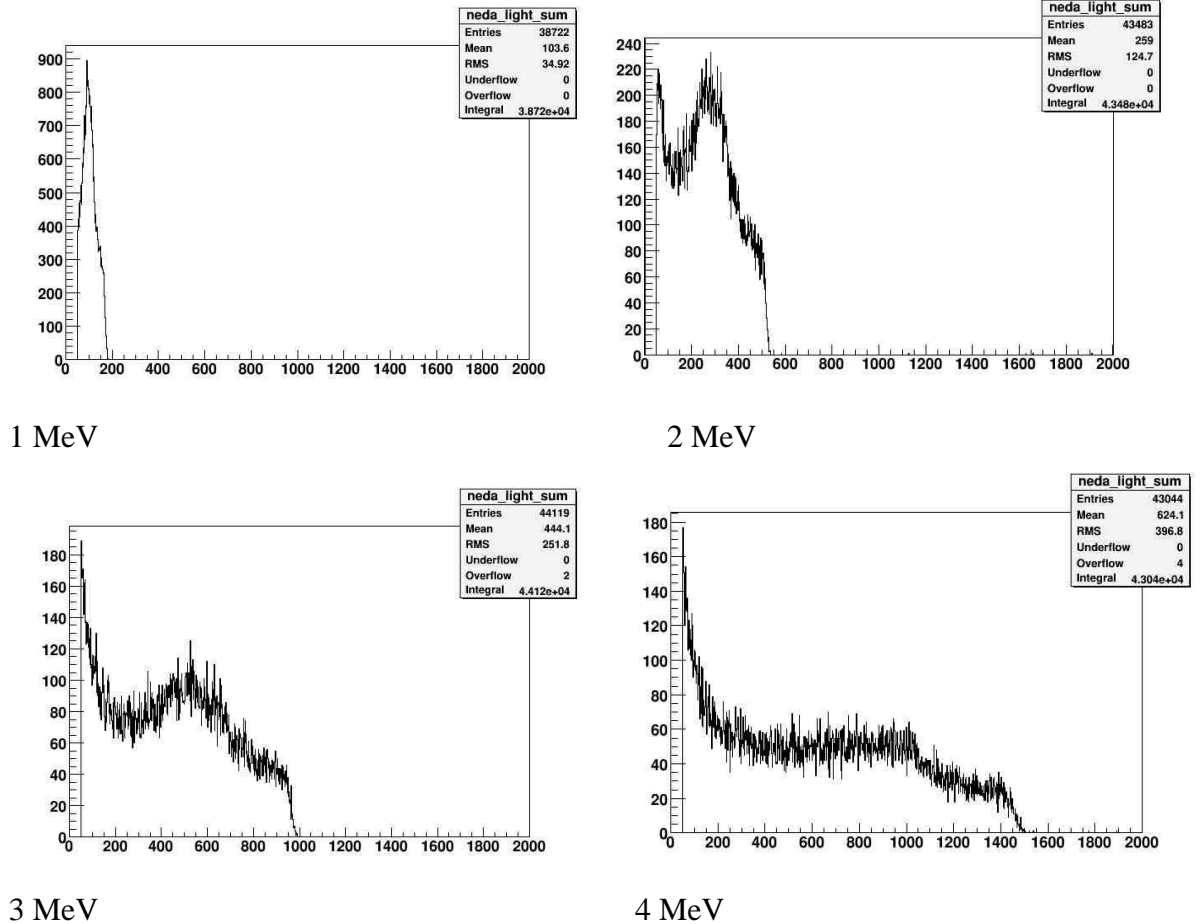


c) 4 MeV enerji

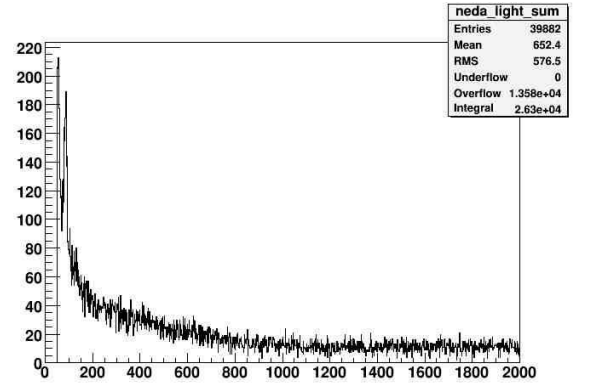
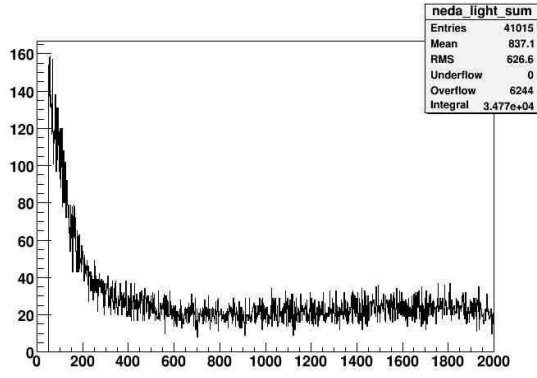
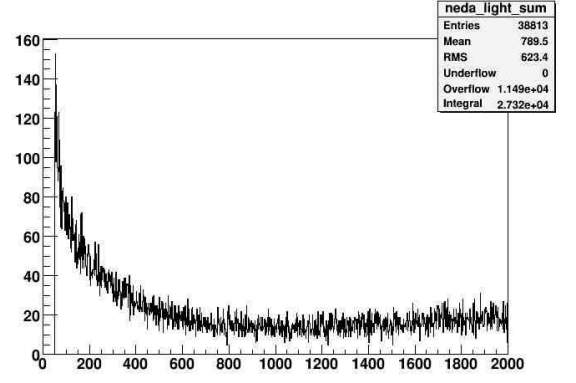
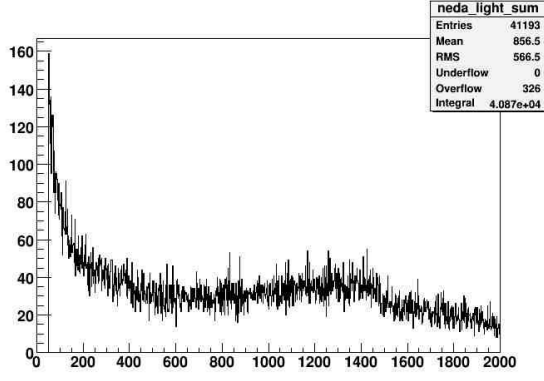
Şekil 6.11 2 MeV, 3 MeV ve 4 MeV'lik enerjiler için zaman spektrumları

Hepsininde aynı sonuçları görmemiz mümkün. Pikler enerji artıkça sıfıra yaklaşırsa da aralarındaki genişlik hemen hemen hepsinde aynı kalmıştır. Sıfıra yaklaşmasının sebebi ölçümlerin daha kısa sürede veri olarak aktarılmasından kaynaklanmaktadır. Bu simülasyonlar için dedektörümüz hedeften 10 m uzağa yerleştirilmiştir. Bu sonuçlara göre 1 MeV enerji için en az 100 ns puls uzaklığı, 2 MeV lik enerji için yaklaşık 90 ns puls 4 MeV lik enerji için yaklaşık 70 ns puls uzaklığı sahip huzmenin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Işık üretimi için ayrıca enerji aralıkları 1 MeV ile 10 MeV arasında incelenmiştir. Bu inceleme sonuçları yapılan deneysel çalışmalarla kıyaslanmış ve burada da enerjinin artmasıyla bir değişikliğin söz konusu olmadığı görülmüştür. 1 MeV ile 4 MeV enerjilerinde ışık üretimi ile ilgili simülasyonlarda çok küçük değişikliklerin olduğu 4 MeV den daha yüksek enerjilerde belli bir değere ulaşarak sabitlendiği görülmektedir. Bunun için yüksek enerjiler nötronun ışık üretimini etkilememektedir. Bu simülasyon sonuçları şekil 6.12’de ve 4 MeV enerjisinden yüksek enerjiler için olan sonuçlar şekil 6.13’de verilmiştir.



Şekil 6.12 Nötronun enerjisinin 1 – 4 MeV aralığındaki ışık üretimi



Şekil 6.13 Nötronun enerjisi 5 – 6 MeV aralığındaki ışık üretimi

BÖLÜM 7

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu yüksek lisans tez çalışması yeni tip nötron törü olan NEDA projesi kapsamında nötron dedektörlerinin tasarımını, simülasyonlarını ve boyutlarını içermektedir.

Simülasyonlar farklı geometrilere ve farklı enerjilere bağlı olarak GEANT4 simülasyon programı kullanılarak elde edilmiştir. Tez çalışması sonucunda, dedektörlerin verimleri, dedektör ile kaynak arasındaki açı, enerji ve dedektör boyutları değiştirilerek kıyaslamalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda farklı nötron enerjileri, açıları ve sintilatör çapına bağlı olarak nötronun zaman, enerji ve ışık üretimi olasılıkları gösterilmiştir.

Dedektör ile nötron kaynağı arasındaki mesafenin artması durumunda, dedekleme olasılığında hiçbir değişiklik gözlenmemektedir. Bununla birlikte dedektör hacminin artması durumunda verimin değişimi gözlenmektedir. Belli bir hacimde verimin azaldığı da görülmüştür. Bu yüzden kullanılan dedektörün boyutunun önemi dikkate alınmalı ve NEDA projesi için üzerinde çalışmalar yürütülen BC501A ve BC537 dedektörleri birçok kriter göz önüne alınarak kıyaslandığında, BC501A'nın BC537'den daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle NEDA için BC501A ile oluşturulacak bir prototip dedektör yapımına yakın zamanda başlanılacaktır. Niğde Üniversitesi de NEDA için yapılacak prototip çalışmalarında aktif olarak yer alacaktır.

BÖLÜM 8

KAYNAKLAR

- [1] Yaramış, B. 1974. Nötron Fiziği. İstanbul Üniversitesi Yayınları, No: 1920, 127s. İstanbul.
- [2] IRVING Kaplan, Nükleer Fizik, Bölüm 18, Sayfa 595-614
- [3] Prof. Dr. Beşim Tanyel, Nükleer Fizik, Ege Üni. Fen Fak. Fizik Bölümü Ders Kitapları Serisi, No: 139
- [4]-TSOULFANIDIS, N. 1983, *Measurement and Detection Of Radiation*, Hemisphere Publishing Co., U.S.A., 0-07-065397-6.
- [5] KRANE, S. Kenneth, 1988, *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley&Sons, New York, 0-471-80553-X.
- [6] KAPLAN I. 1963.Nuclear physics.Department of Nuclear Engineering Massachusetts Institute of Technology. Addison Wesley Publishing Company, inc
- [7] BÜYÜKUSLU, H., 2008. Nükleer Reaksiyon Modelleri Kullanılarak Bazı Deformeli Çekirdeklerin Nötron Yayınlanma Spektrumlarının İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Semineri,42, Isparta, Türkiye.
- [8] AKSU, L.(1992) Radyasyon Ölçme Sistemleri, Taek Yayınları, Ankara, s. 21 – 45
- [9] AKDOĞAN, N. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü
- [10] BÜGET, N. (1992) Genel Radyoaktivite, TAEK Yayınları, Ankara, s.1 – 16
- [11] KARADAĞ, M. Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü
- [12] B.T. FELD, The Neutron, s. 404 – 426
- [13] J.A. Harvey, N.W. Hill, *Scintillation detectors for fast neutron physics*, Nucl. Instr. Meth. 162 (1979) 507-530
- [14] J.B. Marion, J.L. Fowler Eds., *Fast Neutron Physics; Part 1: Techniques; Part 2: Experiments and Theory*, Interscience, New York, 1960
- [15] G.I. Britvich et al, *A neutron detector on the basis of a boron-containing plastic scintillator*, Nucl. Instr. Meth. A550 (2005) 343-358
- [16] S. Ait-Boubker, M. Avenir, G. Bagieu et al, *Thermal neutron detection and identification in a large volume with a new lithium-6 loaded liquid scintillator*, Nucl. Instr. Meth. A277 (1989) 461-466
- [17] M. Abbes, B. Achkar, S. Ait-Boubker et al, *The Bugey 3 neutrino detector*, Nucl. Instr. Meth. A374 (1996) 164-187

- [18] K. Gunzert-Marx, D. Schardt, R.S. Simon, F. Gutermuth, T. Radon, V. Dangendorf, R. Nolte, *Response of a BaF2 scintillation detector to quasi-monoenergetic fast neutrons in the range of 45 to 198 MeV*, Nucl. Instr. Meth. A536 (2005) 146-153
- [19] Horst Klein, Frank D. Brooks. Scintillation detectors for fast neutrons, PoS (FNDA2006)097
- [20] Andy Buffler, Radiation Physics and Chemistry 71 (2004) 853 – 861
- [21] E.Farnea. Agata simulation code.http://agata.pd.infn.it/agata_simul.htm.
- [22] O. Skeppstedt, H. A. Roth, L. Lindstrom, R. Wadsworth, I. Hibbert, N. Kel-sall, D. Jenkins, H. Grawe, M. Gorska, M. Moszynski, Z. Sujkowski, D. Wol-ski, M. Kapusta, M. Hellstrom, S. Kalogeropoulos, D. Oner, A. Johnson, J. Cederkall, W. Klamra, J. Nyberg, M. Weisz_og, J. Kay, R. Gri_ths, J. Gares Narro, C. Pearson, and J. Eberth. The euroball neutron wall -design and performane tests of neutron detetors. Nul.Instrum.Methods Phys.Res., A421:531, 1999.
- [23] NEDA simulations _ progress report Marcin in Palacz, Grzegorz Jaworski, Tayfun Hüyük, Andrea Gottardo, Johan Nyberg, Brian Roeder, Jose Javier Valiente Dobon January 19, 2010
- [24]] E. Dekempeneer, H. Liskien, L. Mewissen, and F. Poortmans. A spetrometer for double-differential, neutron-emission cross setion measurements in the energy range 1.6 to 16 MeV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A256:489-498, 1987.
- [25]https://webh09.cern.ch/teachers/archiv/HST2007/bubble_chambers/BC%20History/BubbleChamber-Steinberger.pdf