

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KURŞUN ALAŞIMININ KÜTLE AZALTMA KATSAYISININ  
Co-60 RADYOAKTİF KAYNAĞI VE GEANT4 SİMÜLASYON  
PROGRAMI İLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Özgen ÖZGE**

**Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Barış Tamer TONGUÇ**

**Mayıs 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

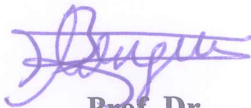
KURŞUN ALAŞIMININ KÜTLE AZALTMA KATSAYISININ  
Co-60 RADYOAKTİF KAYNAĞI VE GEANT4 SİMÜLASYON  
PROGRAMI İLE BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özgen ÖZGE

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

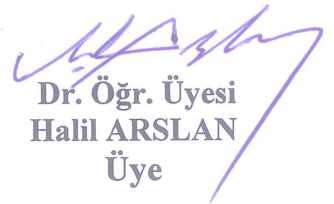
Bu tez 24.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.  
Barış Tamer TONGUÇ  
Jüri Başkanı



Prof. Dr.  
Mehmet BEKTAŞOĞLU  
Üye



Dr. Öğr. Üyesi  
Halil ARSLAN  
Üye

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Özgen ÖZGE

29.04.2019

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans eğitimin boyunca değerli deneyim ve bilgi birikiminden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen ve aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Barış Tamer TONGUÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve deneyimlerini paylaşarak çalışmama katkıda bulunan ve zaman ayırmaktan çekinmeyen Dr. Halil ARSLAN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca yardımını hiç esirgemeyen değerli arkadaşım Rumeysa KAYA'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	v
TABLOLAR LİSTESİ .....	vii
ÖZET .....	viii
SUMMARY .....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Radyasyon.....	4
2.1.1. Alfa parçacıkları.....	6
2.1.2. Beta parçacıkları.....	8
2.1.3. X ve gama ışınları.....	11
2.1.3.1. Co-60 radyoaktif kaynağı.....	17
2.2. Fotonların Madde İle Etkileşimleri.....	18
2.2.1. Fotoelektrik olay.....	20
2.2.2. Compton saçılması.....	21
2.2.3. Çift oluşumu.....	23
2.3. Kütle Azaltma Katsayısı.....	24
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE METOT.....	27

3.1. Deney Düzeneği.....	27
3.2. Geant4.....	30
3.2.1. Deney düzeneğinin modellenmesi.....	31
3.3. XCOM Programı.....	36
BÖLÜM 4.	
SONUÇLAR.....	38
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	47

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\bar{\nu}$	: Antinötrino
$\mu$	: Lineer azaltma katsayısı
$c$	: Işık hızı
$d$	: Alt (down) kuark
$e$	: Elektron
$E$	: Enerji
$h$	: Planck sabiti
$m$	: Kütle
$n$	: Nötron
$p$	: Proton
$u$	: Üst (up) kuark
$W^-$	: Zayıf etkileşime aracılık eden bir temel parçacık ( $W^-$ bozonu)
$\alpha$	: Alfa parçacığı
$\beta$	: Beta parçacığı
$\beta^-$	: Negatron
$\beta^+$	: Pozitron
$\gamma$	: Foton (X ve gama ışını)
$\varepsilon$	: Elektron yakalama
$\theta$	: Compton olayında saçılma açısı
$\lambda$	: Dalga boyu
$\nu$	: Nötrino
$\nu_e$	: Elektron nötrinosu
$\rho$	: Yoğunluk

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Radyasyonun sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum.....	6
Şekil 2.3. Ra <sup>226</sup> çekirdeğinin alfa bozunumu yaparak Rn <sup>222</sup> çekirdeğine dönüşmesi.....	7
Şekil 2.4. F <sup>18</sup> çekirdeğinin pozitron bozunumu yaparak O <sup>18</sup> çekirdeğine dönüşmesi.....	9
Şekil 2.5. β <sup>-</sup> bozunumunun Feynman diyagramı ile gösterimi.....	10
Şekil 2.6. Röntgen'in eşi Anna Bertha Ludwig'in elinin ve yüzüğünün görüntüsü.....	13
Şekil 2.7. Karakteristik X ışınının oluşumu.....	14
Şekil 2.8. X ışını tüpünün şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.9. Fotonların madde kalınlığına göre şiddetindeki azalma.....	17
Şekil 2.10. Co-60 bozunum şeması.....	18
Şekil 2.11. Fotonun madde ile etkileşmesinin foton enerjisine ve atom numarasına göre değişimi.....	20
Şekil 2.12. Compton saçılmasının Feynman diyagramı ile gösterimi.....	22
Şekil 2.13. Çift oluşumunun Feynman diyagramı ile gösterimi.....	23
Şekil 2.14. Yüksek atom numaralı maddeler için lineer azaltma katsayısının foton enerjisine göre değişimi.....	24
Şekil 2.15. Fotonların belli bir maddeden geçerken şiddetinde görülen azalma.....	25
Şekil 3.1. Geiger-Müller tüpünün şematik gösterimi.....	28
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.3 Kurşun alaşımının 1 cm kalınlık için ortam içindeki geometrisi.....	31
Şekil 3.4. Kurşun alaşımının Geant4 programında tanımlanması.....	32
Şekil 3.5. Geant4 programında 3000 fotonun 1 cm kalınlıklı kurşun alaşımı materyalinden geçerken görüntüsü.....	32
Şekil 3.6. Co-60 için gama spektrumu (Çalışma 1).....	34
Şekil 3.7. Co-60 için gama spektrumu (Çalışma 2).....	35
Şekil 3.8. XCOM ile teorik kütle azaltma katsayısının tespiti.....	37



Şekil 4.1. Saniyedeki foton sayısının kalınlığa karşı çizilen grafiği.....	39
Şekil 4.2. Geant4 programında hesaplanan $I/I_0$ değerinin kalınlığa karşı grafiği.....	41

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Co-60 radyoaktif kaynağından gelen, kurşun alaşımından geçip Geiger-Müller sayacı ile tespit edilen saniyedeki foton sayısı.....	38
Tablo 4.2. Kalınlıklara göre $I/I_0$ 1173 keV, $I/I_0$ 1332 keV ve $I/I_0$ değerleri.....	40
Tablo 4.3. Kütle azaltma katsayılarının Deney, Geant4 ve XCOM değerlerinin karşılaştırılması.....	42

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Co-60, Pb-Sn alaşımı, Geant4, Geiger-Müller sayacı, Kütle azaltma katsayısı, XCOM

Bu alışmada, Co-60 radyoaktif kaynağı kullanılarak Pb-Sn alaşımından geçen fotonlar Geiger-Müller sayacı ile tespit edilmiştir. Denedüzeneneğinin Geant4 simülasyon programında benzetimi yapılarak kullanılan materyal ve şartlar oluşturulmuştur. Ayrıca, XCOM programında Pb-Sn alaşımına ait veriler girilmiştir.

Denedüzeneneğinden elde edilen verilerle Pb-Sn alaşımına ait deneysel kütle azaltma katsayısı hesaplanmıştır. Geant4 simülasyon programında 1173 keV ve 1332 keV enerji değerini için alınan veriler alınmıştır. 1173 keV ve 1332 keV enerji düzeyinden hangi oranda foton geldiği iki farklı gama spektrumu çalışmasının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bu veriler sonucunda, Geant4 simülasyon programı için Pb-Sn alaşımına ait kütle azaltma katsayısı belirlenmiştir. Ayrıca XCOM programına Pb-Sn alaşımına ait girilen verilerle teorik kütle azaltma katsayısı 1173 keV ve 1332 keV enerji düzeyleri için elde edilmiştir.

Sonuç olarak Pb-Sn alaşımının kütle azaltma katsayısı deneysel olarak, Geant4 simülasyonu ve XCOM ile belirlenmiştir. Deneysel ve Geant4 ile hesaplanan kütle azaltma katsayısı değerleri birbiriyle uyumluluk göstermektedir. Ayrıca bu değerler, XCOM programında 1173 keV ve 1332 keV enerji düzeyleri için elde edilen kütle azaltma katsayısı değerlerinin arasında kalmaktadır.

# **DETERMINATION OF MASS ATTENUATION COEFFICIENT FOR Pb-Sn ALLOY BY Co-60 RADIOACTIVE SOURCE AND GEANT4 SIMULATION PROGRAM**

## **SUMMARY**

Anahtar kelimeler: Co-60, Pb-Sn alloy, Geant4, Geiger-Müller Detector, Mass attenuation coefficient, XCOM

In this study, using Geiger-Muller counter, photons of Co-60 that passing through Pb-Sn alloy have been measured. Experimental setup has been simulated by Geant4 simulation program. Two different photon energies at 1173 keV and 1332 keV that emitted from Co-60, passed through material and transmitted photon count have been obtained by Geant4. Also, material has been set by XCOM program.

Mass attenuation coefficient for the Pb-Sn alloy has been calculated for experimental data and by using Geant4 mass attenuation coefficients have been calculated for different photon energies: 1173 keV and 1332 keV. From two different gamma spectrum studies, count of Co-60's gammas have been compared and a coefficient have been obtained between them. As a result of this ratio, average mass attenuation coefficient of Co-60's gammas has been determined for Pb-Sn alloy. In addition, mass attenuation coefficients have been obtained by using XCOM program for 1173 keV and 1332 keV.

The results that have been determined experimentally and average result of mass attenuation coefficient that has been obtained by using Geant4 have been found compatible. Also, these Pb-Sn alloy results are in the range of XCOM's mass attenuation coefficients calculations for 1173 keV and 1132 keV.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Radyasyon birçok bilim dalının üzerinde çalıştığı bir konudur. Bir radyasyon kaynağından çıkan ışınlar, herhangi bir materyale girdiğinde enerjisinin tamamını veya bir kısmını kaybederler. Bu materyal element, bileşik veya isterse karışım olsun radyasyon tipi ve enerjisi için kütle azaltma katsayısı ( $\mu_m$ ) ayırt edici bir özellik taşımaktadır. Kütle azalma katsayısı bu nedenle yüksek enerji fiziği, nükleer fizik, biyoloji, mühendislik, genetik ve ziraat mühendisliği gibi birçok bilim dalının çalışma konusunun içinde yer alır.

Radyasyon kaynakları genellikle alfa ışınması, beta ışınması, X ışını ve gama ışını yayınlamaktadırlar. Alfa ışınları bir kâğıt parçası ile durdurulabilir, beta ışınları da ince bir alüminyum levha ile bertaraf edilebilirler. Bu sebeple bilimsel çalışmalarda daha çok X ışını ve gamalar tercih edilmektedir. X ışını ve gama ışınları ile kütle azaltma katsayısının belirlenmesi için birçok çalışma mevcuttur [1, 2, 3].

Bilimsel çalışmalarda birçok soğurucu madde kullanılmaktadır. Bilim dallarının araştırmaları ilgili alana uygun maddeler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu soğurucu maddeler element, bileşik veya karışımlardan oluşabilirler. Yüksek enerji fiziği, nükleer fizik gibi alanlarda radyasyon zırlama için genellikle kurşun, demir, alüminyum gibi materyaller ve bunlara benzer alaşımlar kullanılmaktadır. Mühendislikte mermer, beton, kalker gibi materyaller üzerinde çalışmalar vardır. Biyoloji, sağlık fiziği, ziraat mühendisliği ve genetik gibi alanlarda radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için bazı materyaller üzerinde çalışmalar yapılmıştır [4, 5, 6, 7, 8].

Kütle azaltma katsayısının tayini için yapılan çalışmalarda X ışını ve gama kaynakları yaygın olarak kullanılmaktadır. Co-60, Cs-137, Am-241 gibi radyoaktif kaynaklar yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılırlar. Bu çalışmada radyoaktif kaynak olarak Co-60 izotopu kullanılmıştır. Co-60 izotopu 5,27 yıllık yarı ömre sahiptir. 1173 keV ve 1332 keV olmak üzere iki farklı enerji düzeyinde gama yayınlar. Co-60, soğurma çalışmalarında yoğun olarak kullanılan radyoaktif bir kaynaktır. Co-60 ve diğer radyoaktif kaynaklar kullanılarak yapılan çalışmalarla ilgili birçok makaleler mevcuttur [9, 10, 11, 12, 13].

Dedektörler bilimsel çalışmalarda parçacık sayısının tespit edilmesinde kullanılırlar. Gazlı dedektörler, sintilasyon dedektörleri, yarıiletken dedektörler ve bunun gibi birçok farklı tipte dedektörler mevcuttur. Yapılan çalışmada gazlı sayaçlar sınıfında yer alan Geiger-Müller sayacı kullanılmıştır. Bu sayaç, iyonlaştırıcı radyasyonu ölçen bir parçacık dedektörüdür. Alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) ve gama ( $\gamma$ ) parçacıklarını tespit edebilir. Bilimsel araştırmalarda bu dedektör kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur [14, 15, 16].

Kütle azaltma katsayısının hesaplanabilmesi için, bu çalışmada Geant4 simülasyon programı kullanılmıştır. Geant4 yüksek enerji fiziği, tıp, biyoloji gibi çeşitli bilim dallarında kullanılabilir. Geant4 programı ile ortamın geometrik özelliği, ortamda bulunan maddeler, ortama gönderilen parçacıkların türü, parçacıkların enerjilerine göre maddeyle etkileşim türlerine kadar birçok değişken kullanıcı tarafından belirlenerek uygun simülasyon ortamı tasarlanabilmektedir. Geant4 programı kullanılarak yapılan birçok araştırma mevcuttur [17, 18, 19, 20].

XCOM programı, NİST veri tabanını kullanarak teorik kütle azaltma katsayısını hesaplanmasını sağlayabilen bir bilgisayar programıdır. Element, bileşik ve karışımlar için 1 keV-100 GeV enerji aralığında bulunan radyasyon karşısında Compton saçılması, fotoelektrik olay ve çift oluşumu tesir kesitlerini ve bunlarla bağlantılı

olarak teorik kütle azaltma katsayısı elde edilebilmektedir. XCOM programı araştırmalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır [21, 22, 23].

Yapılan alışmada, Co-60 radyoaktif kaynağı kullanılarak Pb-Sn alaşımından geçen foton sayısının Geiger-Müller sayacı vasıtasıyla tespit edilip bu alaşıma ait kütle azaltma katsayısı deneysel olarak hesaplanmıştır. Deney düzeneğinin Geant4 simulasyon programında uygun şekilde benzetimi yapılarak alınan verilerle Pb-Sn alaşımı için Geant4 kullanılarak kütle azaltma katsayısı hesaplanmıştır. Ayrıca XCOM programında Pb-Sn alaşımına ait veriler girilerek 1173 keV ve 1332 keV enerji değerleri için iki farklı kütle azaltma katsayısı elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## BÖLÜM 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Radyasyon

Bir atom çekirdeğinin kararsız durumdan daha kararlı bir duruma geçerken elektromanyetik dalga ya da parçacık şeklinde bir enerji yayması radyasyon olarak tanımlanır. Radyasyon üzerine ilk çalışmalar 19.yüzyıla dayanır. X ışını ilk kez 1895'te Wilhelm Conrad Röntgen tarafından keşfedilmiştir. X ışınları bu nedenle Röntgen ışınları olarak adlandırılmaktadır. X ışınları insan vücudundan geçebilmektedir ve vücudun farklı bölgelerinde değişime uğramaktadırlar. Bu ışınlar Röntgen tarafından fotoğraf filminde renk değişimine sebep olan yeni bir ışın türü olarak adlandırılmıştır. Aynı tarihte Röntgen karısının elinin ve yüzüğünün görüntüsünü çekmeyi başarmıştır. 1898'de Pierre Curie ve Mary Curie ilk radyoaktif madde olan radyumu bulmuştur. Aynı yıl Bequerel radyoaktivite kavramını geliştirmiştir. Günümüze kadar radyasyon konusundaki çalışmalar sürdürülmüştür.



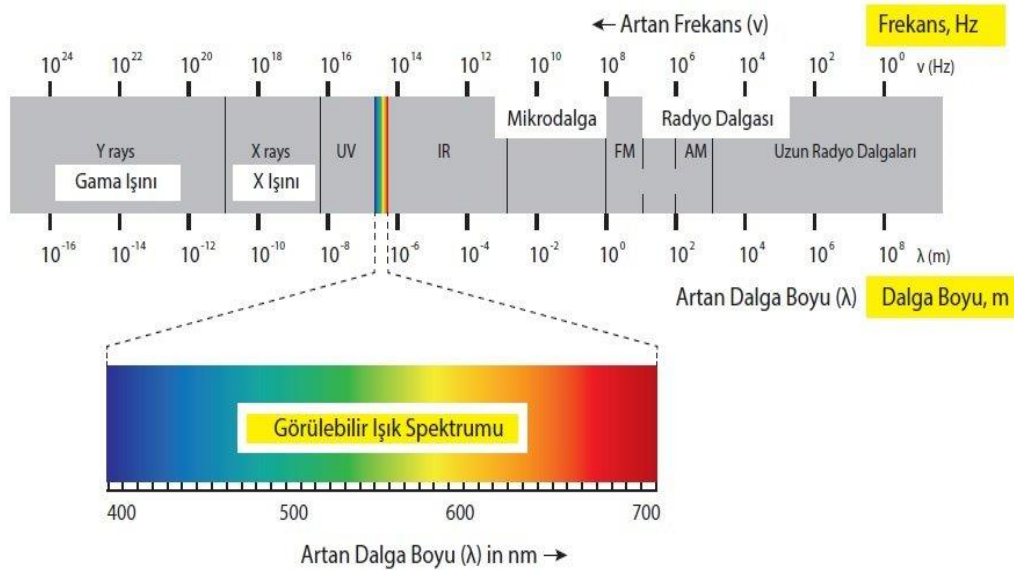
Şekil 2.1. Radyasyonun sınıflandırılması [24].



Radyasyon, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olmak üzere ikiye ayrılır. Alfa parçacıkları, beta parçacıkları, serbest nötronlar, kozmik ışınlar, X ve gama ışınları iyonlaştırıcı radyasyon türleridir (Şekil 2.1.). Ayrıca yüksek enerjili morötesi (ultraviyole) ışınları da iyonlaştırıcı enerjiye sahiptir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlara görünür ışık, kızıl ötesi ışınlar, mikrodalga ve radyo dalgaları örnek verilebilir. Bu bölümde iyonlaştırıcı radyasyon üzerinde yoğunlaşmıştır.

Atomun sahip olduğu elektron sayısı çekirdekte olan proton sayısına eşit ise atom elektriksel olarak nötr haldedir. Eğer bu atom elektron kaybederse çekirdek pozitif iyonla dönüşür. Aynı şekilde bir atoma elektron eklenirse de çekirdek negatif iyonla dönüşür. Bu olaya iyonizasyon denir. Bir atomda iyonizasyon olması için elektronları çekirdeğe bağlayan bağlanma enerjisinden daha yüksek bir enerji gerekir. Elektronun bağlanma enerjisi atomun atom numarası ve orbital tipine göre değişir. Büyük atom numarasına sahip elementler çekirdeklerinde daha çok protona sahiptirler ve bu yüzden küçük atom numaralı elementlere göre orbitallerde elektronları daha sıkı bağlarlar. Bir atomda her zaman için iç orbitaldeki elektronlar dış orbitallerdekilere oranla çekirdeğe daha sıkı bağlanırlar. Sıkı bağlı elektronları koparmak için X ışınları veya yüksek enerjili parçacıklar gerekliyken zayıf bağlı elektronlar için ise ultraviyole ışınları yeterli olur. Frekansın artmasıyla artan enerji elektromanyetik dalganın iyonlaştırma yeteneğini de arttırmaktadır (Şekil 2.2.). Kızıl ötesi ışınlar, mikrodalga ve radyo dalgaları ise bir atomu iyonlaştıracak enerjiye sahip değildirler. Bir atomu iyonlaştırmak için kaba tabirle 10 eV enerji gerekir. Fakat bu enerji değeri her atom veya molekül için farklıdır. Örnek olarak su molekülünün iyonlaştırma enerjisi için eşik değeri 33 eV'tur [25]. Alfa parçacıkları, beta parçacıkları, gama ve X ışınları, kozmik ışınlar iyonlaştırıcı enerjiye sahip radyasyon çeşitleridir. Ayrıca serbest nötronlar da iyonlaştırma yeteneğine sahiptirler. X ışını tüpleri, parçacık hızlandırıcılar, yapay radyoaktif kaynakları ve doğada bulunan çok uzun ömürlü radyoizotoplar iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarıdır. Bu tür radyasyonlar gözle veya herhangi bir duyu organıyla tespit edilemezler. Bu radyasyonların tespiti için Geiger-Müller ve bunun gibi parçacık dedektörü kullanılır. Nükleer fizik, tıp, yüksek

enerji fiziği, biyoloji, genetik, inşaat, ziraat mühendisliği gibi birçok alanda iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları ve onları tespit edebilen dedektörler kullanılmaktadır.



Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum [26].

Canlı dokuda, düşük dozlarda iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalındığında kanser, tümör ve genetik hastalıklar oluşabilir. Yüksek dozlarda ise iyonlaştırıcı radyasyon; cilt yanıkları, radyasyon hastalıkları ve hatta ölüme yol açabilir.

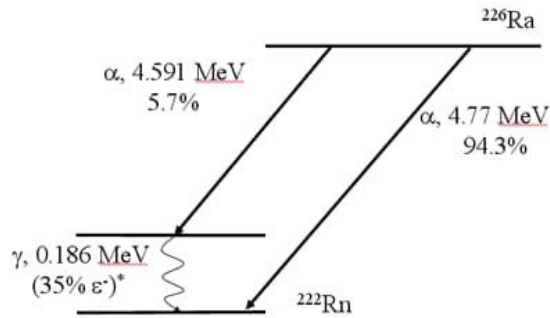
### 2.1.1. Alfa parçacıkları

Atom numarası 83'ten büyük elementler, kararlı bir çekirdek yapısına sahip olabilmek için atom ve kütle numaralarını azaltarak nötron/proton oranını 1'e yaklaştırmak isterler. Bunun için  $\alpha$  bozunumuna uğrayarak  ${}^4_2\text{He}$  çekirdeği yayımlarlar. Bu olaya  $\alpha$  bozunumu denir. Bir  $\alpha$  bozunumu yapan elementin atom numarası 2, kütle numarası ise 4 azalır. Alfa bozunumu yapan bir çekirdek 2 proton ve 2 nötron kaybeder. Alfa

bozunumu sonucunda da yeni bir çekirdek oluşur. Alfa bozunumu sembolik olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir:



Örneğin,  ${}^{226}_{88}Ra$  bozunum sonucunda  ${}^{222}_{86}Rn$  çekirdeğine dönüşür (Şekil 2.3.).



Şekil 2.3.  $Ra^{226}$  çekirdeğinin alfa bozunumu yaparak  $Rn^{222}$  çekirdeğine dönüşmesi [27].

$\alpha$  parçacıkları doğal radyoaktif maddeler tarafından yayınlanan parçacıklar içinde giriciliği en zayıf olanıdır. Alfa parçacıkları çok küçük kalınlıklardaki materyallerle örneğin ince bir kağıt tabaka ile durdurulabilirler. Bunun sebebi de büyük kütleye ve elektriksel yüke sahip olmalarıdır. Belli bir izotoptan alfa bozunumu sırasında kinetik enerjileri yaklaşık olarak aynı olan alfa parçacıkları yayınlanır. Alfa parçacıkları bir maddeden geçerken yoğun bir iyonlaşma meydana getirirler ve enerjilerini hızlı tüketirler. Bu nedenle menzilleri kısadır. Alfa parçacıkları (+) yüklü oldukları için manyetik alanda (-) kutba doğru saparlar.

Yarı ömürleri yaklaşık olarak  $10^{-3}$  s ile  $10^{10}$  yıl arasında değişiklik gösterir. Alfa taneciklerinin enerjisi yayınladıkları atomun büyüklüğüne göre değişiklik gösterse de

çoğunlukla 3 MeV ile 7 MeV arasında bulunur. Bu enerjiler yüksek olsa da alfa parçacığının kütesinin büyük olması, hızının büyük olmasını engeller. Hızları da diğer radyasyon çeşitlerinden oldukça küçüktür. Yüklerinin ve kütesinin büyük olması nedeniyle cisimler tarafından kolaylıkla soğurulurlar. Havada ise birkaç santimetre ilerleyebilir. Alfa kaynağı yutulmaz veya solunulmazsa sağlığa çok zararlı değildir. Fakat yutulma veya solunma nedeniyle vücuda girdiklerinde de diğer radyasyon kaynaklarından eşit doz alınma durumunda çok daha fazla yıkıcı etkilere sebep olurlar.

Alfa parçacıkları, fizikçi Ernest Rutherford, J.J. Thomson tarafından öne sürülen 'üzümlü kek' olarak tarif edilen atom modelinin kusurlu olduğunu göstermek amacıyla kullanılmıştır. Rutherford üzümlü kek modelinin doğru olduğunu varsayarak alfa parçacıklarını altın folyo yaprağıyla çarpıştırmıştır ve alfa parçacıklarının çok az bir açıyla yansıtacağını öngörmüştür. Fakat bazı alfa parçacıklarının çok farklı açılarda yansıdığını fark etmiştir. Bununla birlikte atomun pozitif çekirdeğinin bir yerde toplandığı ve buradaki pozitif yükün alfa parçacığını sapıtacak kadar güçlü olduğu sonucuna varmıştır [28]. Rutherford'un bu deneyi Bohr modeline ilham kaynağı olmuştur ve sonrasında da modern atom teorisinin ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır.

### 2.1.2. Beta parçacıkları

Kararlı olmayan bir çekirdekdeki nötronun protona veya protonun nötrona bozunumu sırasındaki ekstra enerji, fazladan parçacıklar yayımlanmasına neden olur. Bu parçacıklar; pozitif elektron ve elektron nötrinosu veya negatif yüklü elektron ve elektron antinötrinosudur. Pozitif yüklü elektronlar pozitron ( $\beta^+$ ), negatif yüklü elektronlarda negatron ( $\beta^-$ ) olarak adlandırılırlar. Çekirdekdeki enerji fazlalığı proton fazlalığından ileri geliyorsa pozitron, nötron fazlalığından ileri geliyorsa negatronun açığa çıktığı reaksiyon gerçekleşir.

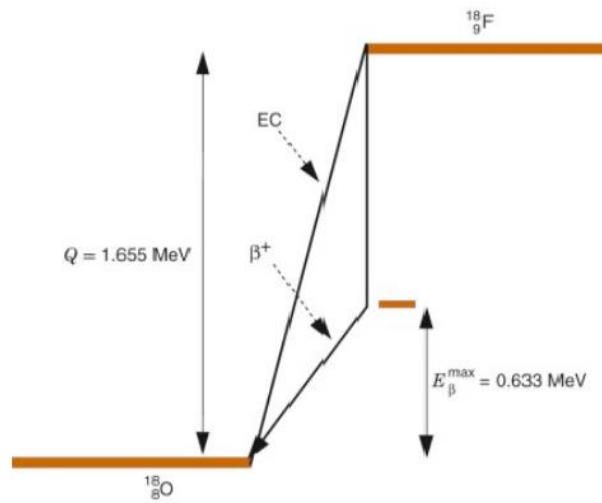
$\beta^+$  bozunumunda bir atomun kararsızlığı nötron azlığı veya proton fazlalığından ileri geliyorsa protonlardan biri nötron, pozitron ve elektron nötrinosuna dönüşür. Pozitron bozunumu sembolik olarak aşağıdaki gibi gösterilir:



Örneğin  ${}^{18}_9 F$ , bozunum sonucunda  ${}^{18}_8 O$  çekirdeğine dönüşür (Şekil 2.4.).



Burada  $\nu_{e^-}$  simgesi elektron nötrinosunu ifade eder. Nötrinolar elektriksel olarak yüksüz olan, hızları ışık hızına yakın olan, madde içinde çok çok az etkileşen leptonlardır. Bu özellikleri nedeniyle nötrinolar detektörlerce doğrudan tespit edilememektedir. Ayrıca nötrinolar teorik çalışmalar kapsamında işlem kolaylığı sağladığı için sıfır kütleyle sahipmiş gibi ele alınsalarda aslında gerçekte sıfır olmayan ama sıfıra oldukça yakın bir kütleyle sahiptirler.

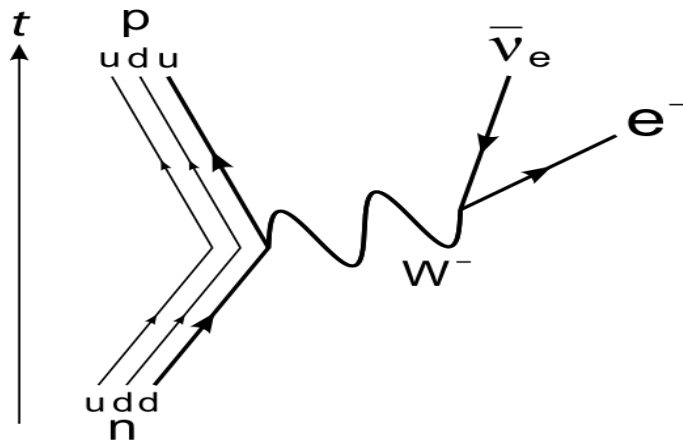


Şekil 2.4.  $F^{18}$  çekirdeğinin pozitron bozunumu yaparak  $O^{18}$  çekirdeğine dönüşmesi [29].

$\beta^-$  bozunumunda atomun kararsızlığı nötron fazlalığından dolayı ise çekirdekteki enerji fazlalığını gidermek için nötronlardan birini proton, elektron ve elektron antinötrinosuna dönüştür. Proton çekirdekte kalırken oluşan elektron çekirdeği terk eder.  $\beta^-$  bozunumu Feynman diyagramında şekildeki gibi gösterilmektedir (Şekil 2.5.). Negatron bozunumu sembolik olarak aşağıdaki gibi gösterilir:



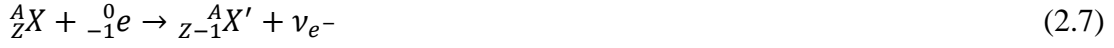
Örneğin  ${}^{228}_{88} Ra$  bozunum sonucunda  ${}^{228}_{89} Ac$  çekirdeğine dönüştür:



Şekil 2.5.  $\beta^-$  bozunumunun Feynman diyagramı ile gösterimi [30].

Elektron yakalama olayında ise çekirdek elektron fazlalığından dolayı kararsızsa atomun çekirdeğe yakın yörüngelerinde (K, L) elektronlarından biri çekirdek tarafından yakalanır. Elektron ile proton birleşerek nötron ve nötrinoya dönüştür. Elektron yakalama olayında çekirdek parçacık yayımlamaz ama bir protonu eksilir.

Kütle numarası değişmez. Elektron yakalama sembolik olarak aşağıdaki gibi gösterilir:



Örneğin  ${}^{125}_{53}I$ , bozunum sonucunda  ${}^{125}_{52}Te$  çekirdeğine dönüşür:



Beta parçacıkları  $\alpha$  parçacıklarına kıyasla madde ile daha az etkileşimde bulunurlar ve bu şekilde maddenin daha iç kısımlarına nüfuz edebilirler. Belirli bir kütle ve yükü sahip oldukları için materyal içinden geçerken iyonlaşmaya neden olurlar. Bu iyonlaşma  $\alpha$  parçacıklarının oluşturduğu iyonlaşmadan daha azdır. Alfa parçacıklarından daha hafif olmaları nedeniyle daha fazla giricidirler. Elektronun kütlesi küçük ve hızı yüksek olduğu için çarpışmalar ve elektronlarla saçılmaları sonucunda madde içinde aldığı yol zikzaklıdır. Beta parçacıkları alfa parçacıkları gibi yolları üzerindeki atomları iyonlaştırarak enerjilerini tüketirler. Belirli bir yol aldıktan sonra da dururlar. Bu parçacıklar insan vücuduna 1-2 cm kadar nüfuz edebilir. Beta parçacıkları ince alüminyum bir levha ile durdurulabilirler. Fakat ağız yoluyla alındığında tehlikeli olabilir ve doku hücrelerinde iyonlaşmaya neden olabilirler. Işınlanma yeteri kadar büyük değerdeyse ciltte radyasyon hasarı verebilir.

### 2.1.3. X ve gama ışınları

X ışınları, 0,125 keV ile 125 keV enerji aralığında ve dalga boyu 0,01 nm ile 10 nm arasında olan elektromanyetik dalgalardır. Elektromanyetik dalgaların en temel birimi fotondur. Fotonlar vakumda ışık hızında hareket ederler ve enerji paketleri şeklinde yayılarak frekansla doğru orantılı ve dalga boyu ile ters orantılı şekilde enerji

transferini sağlarlar. Fotonların enerjileri, maddeden geçerken saçılma ve absorpsiyon nedeniyle azalır. Elektromanyetik dalgaların madde ile etkileşiminde dalga boyu belirleyicidir. X ve gama ışınları atom boyutundan küçük dalga boylarına sahiptirler. Bu nedenle elektronlar ile çekirdek arasındaki boşluktan geçebilirler. Elektronlarla etkileşerek atomu iyonlaştırabilirler. X ışını ve gama ışını benzer özelliklere sahiptirler. Elektromanyetik spektrumun aynı tarafında yer alırlar (Şekil 2.2). Gama ışınlarının dalga boyları daha küçüktür ve dolayısıyla enerjileri daha yüksektir. X ışını ile gamaların aralarındaki fark, X ışınları atomun yörüngesindeki etkileşimlerden kaynaklanırken, gama ışınları çekirdekteki reaksiyonlardan kaynaklanır.

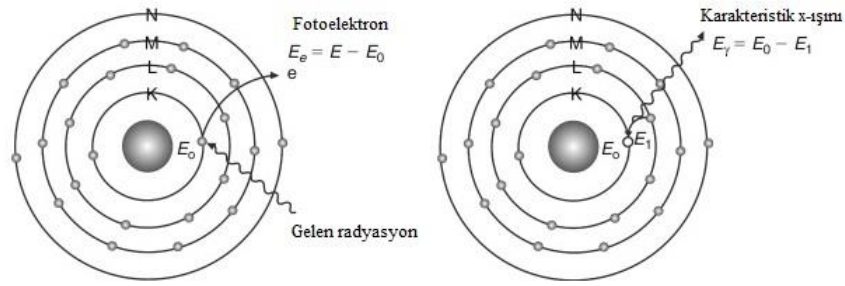
X ışınları, 1895 senesinde fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından günümüz X ışını tüplerine benzer özellikteki Crookes tüpünde elektronları boşlukta transfer etmek gayesiyle yapılan çalışmalar esnasında keşfedilmiştir [31]. X ışınları yüksek hıza sahip elektronların büyük atom numaralı metale çarptırılması vasıtasıyla elde edilmiştir. Crookes tüpünde meydana gelen X ışını, tüpte görünür olmayan ışınları görünür hale getiren materyal olan baryum platinosiyanürde parlamaya sebep olmuştur. Bu parlamaya Röntgen'in dikkatinden kaçmamıştır. Bu parlamaya şahit olduktan sonra Crookes tüpünden çıkan bir enerjinin olduğunu saptamış ve buna X ışını ismini vermiştir. Aynı yıl eşinin elinin ve yüzüğünün görüntüsünü fotoğraf filmine yansıtmayı başarmıştır (Şekil 2.6.) [32]. Günümüzde X ışınlarına Röntgen ışınları da denilmektedir. X ışınları doğal ve yapay olmak üzere iki farklı biçimde oluşurlar.





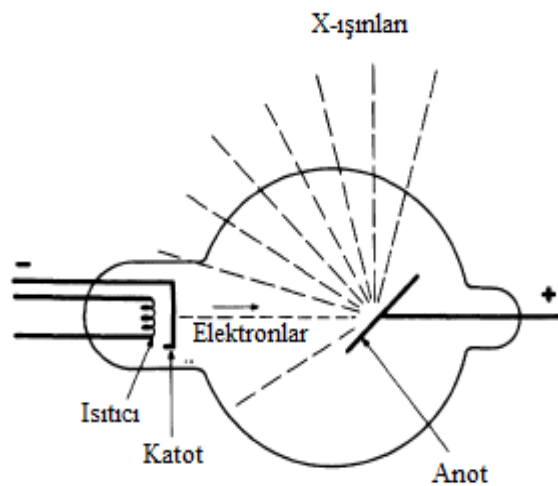
Şekil 2.6. Röntgen'in eşi Anna Bertha Ludwig'in elinin ve yüzüğünün görüntüsü [32].

Doğal X ışınları kendiliğinden doğal yollarla olur. Çekirdekteki iç dönüşüm,  $\alpha$  ve  $\beta$  bozunumu sırasında atomun ilk halkalarında olan elektronlardan biri çekirdek tarafından yakalanır. Yakalanan bu elektronun halkasında boş bıraktığı yere bir diğer halkadan bir elektron geçmesiyle X ışını ortaya çıkar. Bundan farklı olarak atomun dışından gelen yüksek enerjiye sahip elektronlar da o atomun ilk halkalarından elektron koparabilir. Atomdan kopan bu elektronun yerine daha yüksek enerji seviyelerinden elektronlar geçerek kopan elektronun yerini doldurlar. Bu esnada meydana gelen enerji X ışını olarak yayınlanır. Ayrıca çekirdek içinde bulunan proton atomun ilk halkalarından elektronun hareketi sırasında elektronu yakalar ve nötr hale gelir. Yakalanan bu elektronun halkasındaki boş bıraktığı yere diğer bir halkadan elektron atlaması ile X ışını oluşur (Şekil 2.7.). Bu biçimde oluşan X ışınları karakteristik X ışınları olarak adlandırılırlar.



Şekil 2.7. Karakteristik X ışınının oluşumu [33].

Yapay olarak X ışınları vakumlanmış bir röntgen tüpünün içinde anot ile katot arasında yüksek voltaj verildiğinde katottan hızlandırılmış şekilde gelen elektronların anot metalindeki yüksek atom numaraya sahip madde ile etkileşimi sonucunda oluşurlar. Fotonlarla maddenin etkileşiminden karakteristik X ışınları meydana gelirken, yüklü parçacıklarla maddenin etkileşiminden hem sürekli hem de karakteristik X ışını meydana gelir. Örneğin, X ışını tüpü içinde ısıtılan katottan yayılan elektronlar yüksek voltaj altında hızlandırılmasıyla karşıdaki hedef anota çarptırılması durumunda elektronların ani durdurulmaları ile X ışını oluşur (Şekil 2.8). Bu olaya Bremsstrahlung (Frenleme) olayı, çıkan ışınlara da sürekli X ışını denir.



Şekil 2.8. X ışını tüpünün şematik gösterimi [34].

Hedef atoma gönderilen elektronlar atomun elektronları ile etkileşimi sırasında kazandıkları enerji ile üst enerji seviyelerine çıkarlar. Kararsız haldeki bu enerji seviyeleri geri bozunduğu zaman foton salınır. Sahip oldukları enerji seviyeler arasındaki farka eşit olan bu fotonlar karakteristik X ışınları olarak adlandırılır.

Bir X ışını demetini oluşturan ışınlar, atomun farklı yörüngelerinde olduğu için heterojen bir yapıdır ve farklı dalga boylarında X ışınlarından oluşur. Dalga boyları küçük olduğu için gözün görebildiği görünebilir bölge dışında kalır. X ışınına maruz kalan canlı dokularda zararlı etkilere neden olur.

X ışınları, genel olarak etkileştiği malzemeyi delip geçebilir (penetrasyon) malzeme tarafından soğurulabilir (absorpsiyon) veya saçılabilirler.

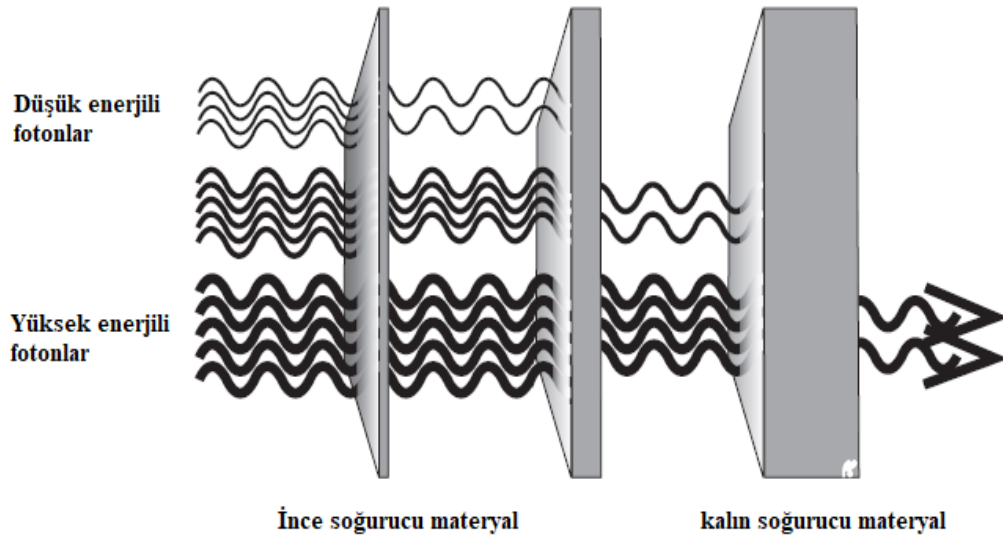
X ışınları hedef maddeyi yoğunluğu, kalınlığı ve atom numarasına bağlı olarak delip geçebilmektedir (penetrasyon). Atom numarası, yoğunluk ve kalınlığın artması ile etkileşim artacağından penetrasyon özelliği zayıflayacaktır. Dalga boyu küçüldükçe enerjisi artacağından penetrasyon yeteneği artacaktır. X ışını penetrasyon özelliği nedeniyle görünür ışığın giremediği yerlere girerek film ve floresan ekranlar üzerine görüntü düşürebilirler.

X ışınlarının etkileşeceği materyalin yoğunluğu, atom numarası ve kalınlığının artmasıyla birlikte absorpsiyon özelliği aynı şekilde artar. Dalga boyu arttıkça enerjisi azalacağından absorpsiyon artacaktır. X ışınlarının soğurulması atomik düzeyde etkileşimler sonucunda meydana gelir. X ışınları geçtiği dokulardaki elektronları koparırlar. Girdikleri atomun bağlanma enerjisini nötr hale getirerek enerjilerini tüketirler. Bu biçimde canlı dokudan geçerken soğurulurlar. Bir röntgen tetkikinde de absorpsiyon görüntünün oluşumu için istenilen bir durumdur. Görüntüleme dokular arasında olan absorpsiyon farklılıklarına dayanarak meydana getirilir. Verilen dozun düzeyi absorpsiyon için çok önemlidir. Dozun yüksek olması siyah bir görüntüye,

dozun düşük olması da beyaz bir görüntüye neden olur. Bu nedenle radyografide uygun doz seçilerek en kaliteli görüntü elde edilmesi önemlidir.

X ışınlarının madde içinde saçılması, absorpsiyona benzer biçimde meydana gelir. X ışınları geçtiği dokulardaki elektronları kopararak içine girdiği atomun bağlanma enerjisini tamamen nötralize edemediğinde oluşmaktadır. Enerjilerinin şiddeti azalmış olan ve yönleri değişime uğramış olan ışınlar saçılmaya uğramış ışınlardır. Saçılma tanı amacıyla yapılan tetkiklerde istenmeyen bir durumdur. Çünkü görüntü üzerinde istenmeyen siyahlaşmaya neden olurlar. Bu saçılma aynı zamanda radyasyondan koruyucu önlemleri almayan radyasyon çalışanına fazladan radyasyon almasına sebep olur. Ayrıca hedef canlı dokudan saçılan ışınlarda bir radyasyon kaynağıdır.

X ışınlarının yanı sıra, gama ( $\gamma$ ) ışınlarının kaynağı atomun çekirdeğidir. Bu ışınlar atom çekirdeğinin enerji düzeylerindeki farklılıktan dolayı meydana gelmektedir. Çekirdek bir  $\alpha$  veya  $\beta$  parçacığı yayınladıktan sonra çoğunlukla kararlı halde olmaz. Fazla enerjisi kalan çekirdek enerjisi elektromanyetik dalga yayınlanarak kararlı hale geçer. Gama ışınması esnasında atom numarasında ve kütle numarasında bir değişim olmamakta ve farklı bir çekirdek meydana gelmemektedir. Gama ışınları birçok şekilde açığa çıkmaktadır. Radyoaktif bozunma şeklinde çoğunlukla beta ışınmasına eşlik eden bir gama ışını vardır.



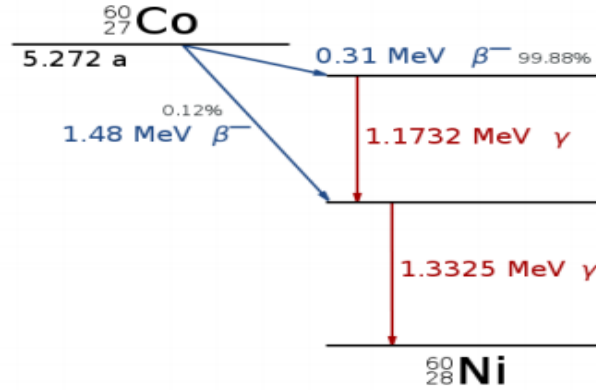
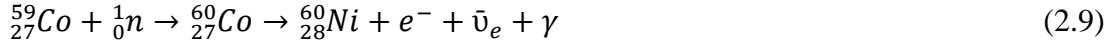
Şekil 2.9. Fotonların madde kalınlığına göre şiddetindeki azalma [35].

İlk defa Fransız kimyager-fizikçi Paul Villard radyum ile çalışırken bu ışınları fark etmiştir. Villard'ın farkettiği bu ışınları Rutherford, gama ışınları ismini vermiştir. Gama ışınları elektromanyetik spektrumda en yüksek frekansa ve en düşük dalga boyuna sahip ışınlardır. Sahip oldukları yüksek enerji nedeniyle canlı dokulara büyük zararlar verebilirler. Gama ışınları ve X ışınları,  $\alpha$  ve  $\beta$  parçacıklarına göre madde içinde penetrasyonu en fazladır fakat madde ile iyonlaşmaları da çok azdır. İyonlaştırma özelliğinin az olması kalınlığı fazla olan maddelerden kolaylıkla geçmesini sağlar. Gama ışınlarının bir bölümü birkaç santimetre kalınlığındaki kurşun tabletlerle durdurulabilir. Gama ışını madde içinden geçerken exponensiyel olarak azalmaya uğrar. İçinden geçtiği maddenin kalınlığı arttıkça fotonların şiddetinde azalma görülür (Şekil 2.9.).

### 2.1.3.1. Co-60 radyoaktif kaynağı

Co-60, kobalt elementinin radyoaktif izotopudur ve yarılanma ömrü 5,27 yıldır. Kararlı izotop olan Co-59'un nötronlarla bombardıman edilmesiyle kararsız olan Co-60 radyoaktif izotopuna dönüşür. Radyoaktif Co-60,  $\beta^-$  bozunumu yapar ardından

1,173 MeV ve 1,332 MeV enerji düzeylerinde iki farklı gama ışını yayınlayarak kararlı Ni-60 çekirdeğine dönüşür(Şekil 2.10.). Bozunum denklemi aşağıdaki gibidir:



Şekil 2.10. Co-60 bozunum şeması [36].

Co-60 izotopu birçok kullanım alanına sahiptir. Medikal araçların sterilizasyonunda, radyoterapide, laboratuvarlarda gama ışını kaynağı olarak, gıda ışınlama ve bunun gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

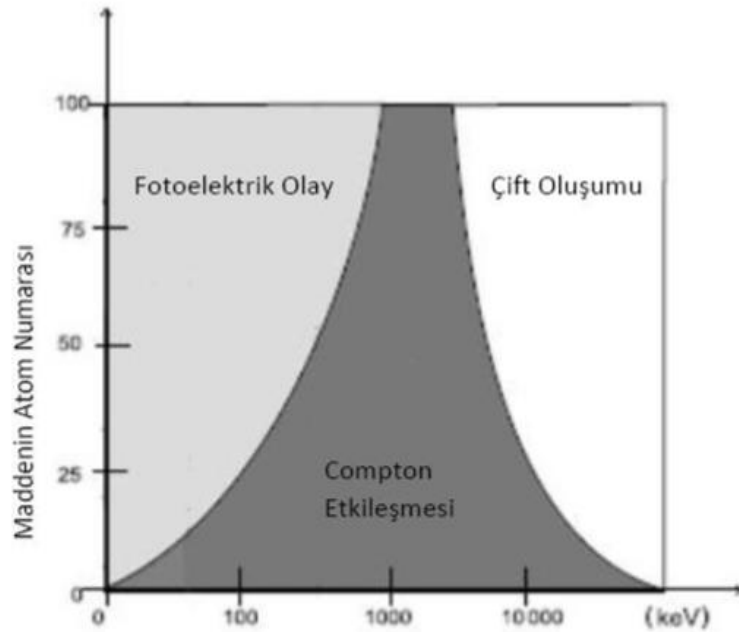
## 2.2. Fotonların Madde İle Etkileşimleri

Foton, fizikte ışığın temel birimidir. Elektromanyetik ışınların temel kalıbı olan temel parçacıktır. Fotonlar elektromanyetik kuvvetin kuvvet taşıyıcısıdır. Bu elektromanyetik kuvvetin etkileri hem mikro hem de makro ölçülerde rahatlıkla gözlemlenebilir. Çünkü fotonlar durgun bir kütleye sahip değildirler ve bu özelliğe sahip olması uzak mesafelerde etkileşime olanak vermektedir. Temel parçacıkların tümü gibi fotonlar da kuantum mekaniği ile yönetilirler ve dalga-parçacık özelliği gösterirler. Örneğin herhangi bir foton dalga özelliği göstererek bir mercekle

kırılmaya uğrayabilir veya girişime uğrayabilirken Compton olayında olduğu gibi parçacık gibi davranabilir.

19. yüzyılda bilim adamlarının en çok üzerinde tartıştığı meselelerden biri, ışığın dalga mı yoksa bir parçacık mı olduğu konusudur. James Clerk Maxwell'in elektromanyetik kuramı ve Hertz'in deneyleriyle ışığın dalga özelliği gösterdiği kabul görmeye başlanmıştı. Fakat kara cisim ışıması gibi bazı deneylerde ışığın bir dalga olduğu deneylerle uyumlu gözükmemiştir. Kara cisim ışımasında hakkında Rayleigh ve Jeans'in kurduğu teori ile bu tartışma ilerlemiştir. Rayleigh ve Jeans ışığın dalga özelliğini kullanarak belli bir sıcaklıktaki bir materyalin etrafına hangi dalga boyunda ve ne kadar ışıma yapacağı konusunda çalışma yapmıştır. Aldıkları sonuçlar yüksek dalga boylarında deneylerle uyumlu gözükmiştir fakat düşük dalga boylarında yapılan deneylerde çok büyük sapmalar meydana gelmiştir. Teorilerine göre, dalga boyu azaldıkça yapılan ışımanın sonsuza gideceğini öngörüyorlardı. Daha sonraları Max Planck, ışığın dalga değil de ışık paketçikleri olarak düşünülürse problemin çözüleceğini fark etmiştir (Bu soruna getirdiği açıklama kendisine 1918 Nobel Fizik Ödülünü getirmiştir) [37]. Daha sonra Arthur Compton tarafından bulunan Compton olayı ve Albert Einstein tarafından açıklanan fotoelektrik olay ışığın parçacık özelliğini ortaya çıkarmıştır. Ancak girişim ve kırınım gibi deneylerde ışığın dalga özelliğiyle açıklanabilecek olaylardır. 1926 yılında bu enerji paketçikleri kimyager Gilbert Lewis tarafından foton olarak adlandırılmıştır. Günümüzde kabul edilen ışığın ikili bir yapıya sahip olduğu ve hem dalga hemde parçacık özelliği gösterdiği dir.

Fotonlar elektromanyetik kuvvet taşıyıcılarıdır, iyonlaşma ve ortama enerji transferi yoluyla madde ile etkileşimde bulunurlar. Bu özellikleriyle diğer yüklü parçacıklardan ayrılırlar. Özellikle gama ışınları madde ile etkileşmesinde enerjilerinin tümünü veya büyük bir kısmını tek bir olayda kaybedebilirler. X ışını ve gama ışını madde içerisinden geçerken genellikle fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu şeklinde etkileşimde bulunurlar.



Şekil 2.11. Fotonun madde ile etkileşmesinin foton enerjisine ve atom numarasına göre değişimi [35].

Düşük enerjilerde daha çok fotoelektrik olay etkisi baskın olarak görülürken enerji arttıkça Compton olayı daha baskın hale gelmektedir. Enerji düzeyi daha da arttığında çift oluşumu etkisi daha baskın olarak görülmektedir (Şekil 2.11.).

### 2.2.1. Fotoelektrik olay

Düşük enerjiye sahip foton genel olarak içinden geçtiği ortamdaki atomların yörüngesindeki bir elektrona tamamen enerjisini aktararak kaybolur. Çarpıtığı elektrona ise (+) yüklü çekirdeğin bağlayıcı kuvvetinden kurtarır. Atomun dışarısına fırlatılan bu elektron fotoelektron olarak adlandırılır. Bu olay sonucunda meydana gelen elektron boşluğu dış yörüngedeki bir elektron tarafından doldurulur. Bu sırada X ışını yayınlanır. Fotoelektrik olay 0,5 MeV'den küçük enerjiye sahip fotonlarda sık bir şekilde görülmektedir. Fotonlar atomun K, L, M, N yörüngelerinde olan sıkı bağlı elektronlarıyla etkileşime girer. Fotoelektrik olayın gerçekleşebilmesi için fotonun enerjisi elektronun atomdan koparılması için gereken bağlanma enerjisinden fazla olması gerekir.



$$E_e = h\nu - E_b \quad (2.10)$$

Bu formülde  $E_e$  kopan elektronun enerjisi,  $h\nu$  gelen fotonun enerjisi ve  $E_b$  elektronun atomdan koparılması için gereken enerji miktarıdır. Ayrıca  $h$  Planck sabiti ve  $\nu$  ise fotonun frekans değeridir.

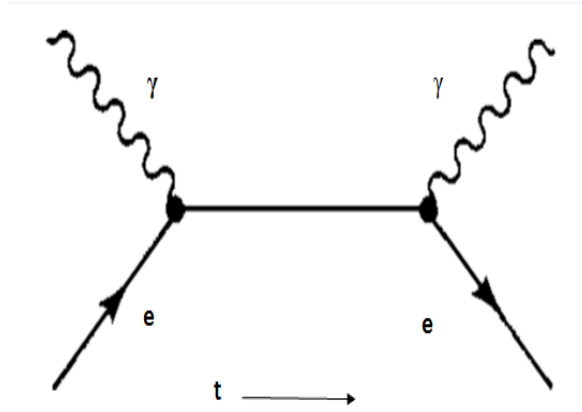
Fotonlar eşik enerjiye ulaştığı ya da aştığı zaman, elektronlar fotonların çarpması ile birlikte yerini kaybeder. Fotonun sahip olduğu enerji eşik enerji değerinin altındaysa metalden herhangi bir elektron yayılması olmaz. Bu konunun anlaşılması için, Albert Einstein ışık demetinin dalga özelliği göstermediği düşüncesini ileri sürmüştür. Bu ışık demetlerinin her birisinin  $h\nu$  enerjili ayrı dalga paketleri olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca Einstein, Planck'ın daha önceden keşfettiği enerji ve frekans arasındaki bağıntının, Planck varsayımıyla açıklanabildiğini göstermiştir [38].

Heinrich Hertz, 1887 yılında fotoelektrik etkiyi ilk kez elektromanyetik dalgalar üzerinde yaptığı deneylerde gözlemlemiştir. Albert Einstein, 1905 senesinde ışığı enerji paketlerinden oluşan bir yapı olarak değerlendirerek fotoelektrik etki konusundaki yapılan deney sonuçlarını açıklayan bir makale yazmıştır. 1905 senesinde fotoelektronların sahip olduğu enerjinin gelen ışığın frekansı ile artış gösterdiği ve fotoelektronların enerjisinin ışığın şiddetinden bağımsız olduğu bilinmektedir. Ancak artış miktarı 1914 senesine kadar deneysel çalışmalarla açıklanamamıştır. Daha sonraları deneysel fizikçi Robert Millikan yaptığı deneysel çalışmalarla Einstein'ın varsayımlarını doğrulamıştır.

### 2.2.2. Compton saçılması

Compton saçılması bir foton ile atomun zayıf bağlı elektronunun esnek çarpışması sonucunda gerçekleşir. Bu reaksiyonun gerçekleşebilmesi için, saçılacak elektronun

atomun dış yörüngelerinde, bağlanma enerjisi düşük olan yerlerde olması yani fotonun elektronla etkileşiminde elektronun bütün enerjisi absorbe edememesi gerekir. Böylece gelen foton enerjisinin bir bölümünü elektrona aktarır ve saçılarak yoluna devam eder. Compton saçılmasının Feynman diyagramı şekildeki gibidir:



Şekil 2.12. Compton saçılmasının Feynman diyagramı ile gösterimi [30].

Compton saçılmasında gelen foton serbest elektronlarla esnek çarpışır. Elektronlar atom içinde bağlı durumdadır. Lakin gelen fotonun sahip olduğu enerji elektronun bağlanma enerjisinden büyük olduğunda elektronun bağlanma enerjisi önemsenmeden serbest gibi düşünülebilir. Gelen fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinin mühim hale geldiği enerjiye sahip ise Compton saçılması meydana gelmez. Sahip oldukları enerji 0,5 MeV–2 MeV arasında olan fotonlar için hafif elementlerin ortam tarafından absorbe edilmesinde bu olay önem taşımaktadır.

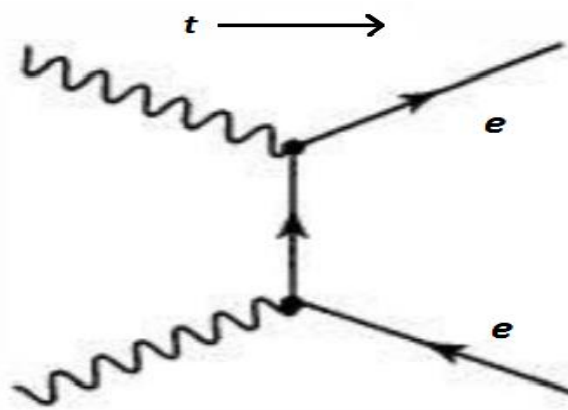
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (2.11)$$

$\lambda'$  = Saçılan fotonun dalga boyu ,  $\lambda$  = Gelen fotonun dalga boyu,  $h$  = Planck sabiti,  $m_e$  = Elektronun durgun kütlesi,  $c$  = Işık hızı ,  $\theta$  = Fotonun saçılma açısı ve  $\frac{h}{m_e c} =$  Compton dalga boyudur.

Compton saçılması atom numarasına bağılı değildir ve enerji arttıkça madde ile etkileşmesinde baskınlık azalır. Foton enerjisinin 0,1 MeV ile 10 MeV arasında bu olay baskın özellik gösterir.

### 2.2.3. Çift oluşumu

Gelen foton yeterince enerjiye sahipse ve çekirdeğin yakınından geçerse, çekirdeğin elektromanyetik alanına girdiğinde foton tamamen soğurularak elektron-pozitron çifti oluşturur ve enerjisini kütleye dönüştürür. Bu olaya çift oluşumu denir (Şekil 2.13.). Oluşan elektron tüm enerjisini ikincil iyon çiftleri oluşturarak kaybeder. Pozitron da madde içinde bir serbest elektronla çarpışarak enerjisini kaybeder ve zıt yönlü iki foton yayınlar. Kütle enerjiye dönüşmüştür. Bu olaya da çift yok oluş adı verilir.



Şekil 2.13. Çift oluşumunun Feynman diyagramıyla gösterimi [30].

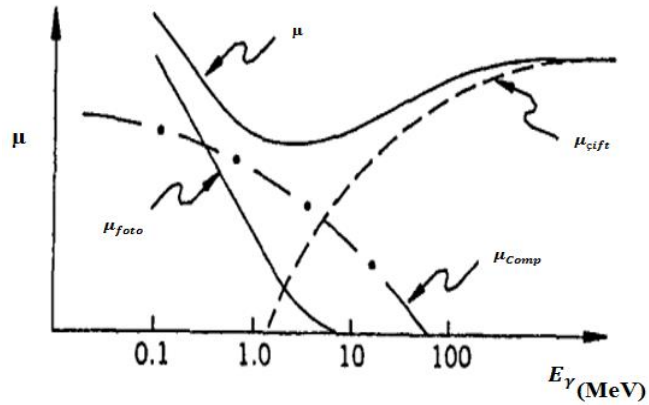
Elektron-pozitron çift oluşumu için gelen fotonun enerjisinin en az  $h\nu = 1,022 \text{ MeV}$  olması gerekir.

### 2.3. Kütle Azaltma Katsayısı

X ve gama ışınları madde içinden geçerken genellikle fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu şeklinde etkileşim yaparlar. Aşağıdaki ifadede;

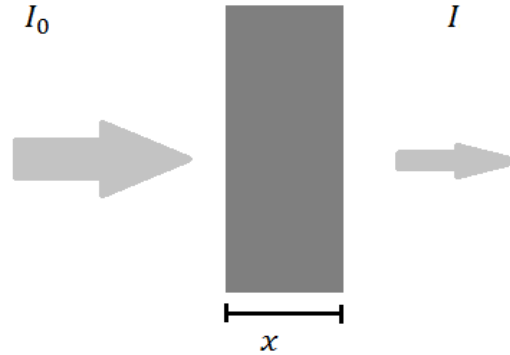
$$\mu = \mu_{foto} + \mu_{comp} + \mu_{çift} \quad (2.12)$$

$\mu$  lineer azaltma katsayısı olmak üzere her bir olayın lineer azaltma katsayısının toplamıdır. Buradaki  $\mu_{foto}$  fotoelektrik olay,  $\mu_{Comp}$  Compton saçılması ve  $\mu_{çift}$  çift oluşumunun lineer azaltma katsayılarıdır. Bu üç olaydan gelen lineer azaltma katsayılarının toplamı lineer azaltma katsayısını verir.



Şekil 2.14. Yüksek atom numaralı maddeler için lineer azaltma katsayısının foton enerjisine göre değişimi [39].

Bu etkileşimlerde fotonların diğer yüklü parçacıklara göre daha uzun mesafelere penetrasyonu öne çıkar. Ayrıca fotonlarda belli bir kalınlıkta enerjilerinde bir azalma meydana gelmezken şiddetinde azalma görülür (Şekil 2.15.). Radyoaktif kaynaktan çıkan fotonların bir kısmı absorblayıcı madde tarafından soğurulurken bir kısmı farklı açılarda saçılır ve bir kısmı da detektöre ulaşır.



Şekil 2.15. Fotonların belli bir maddeden geçerken şiddetinde görülen azalma.

Fotonlar gibi elektromanyetik radyasyonlar belli bir kalınlıktaki maddeden geçerken radyasyon şiddetinde exponansiyel bir azalma görülür. Radyasyon şiddetinde görülen bu azalma Beer-Lambert yasasına göre soğurucu maddenin  $x$  kalınlığı ile orantılıdır. Soğurucu maddeden geçmeden önceki şiddeti  $I_0$  ve soğurucu maddeden geçtikten sonraki şiddeti  $I$  olmak üzere;

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.13)$$

ifadesi ile verilir. Lineer azaltma katsayısı olan  $\mu$ 'nün birimi  $\text{cm}^{-1}$  'dir. Lineer azaltma katsayısının  $\rho$  yoğunluğuna oranı;

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.14)$$

ifadesi ile verilir. (Denklem 2.14) denklemini kütle azaltma katsayısı cinsinden yazarsak;

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x} \quad (2.15)$$

ile verilir. Kütle azaltma katsayısının birimi  $cm^2/g$ 'dır. Kütle azaltma katsayısı soğurucu maddenin fiziksel özelliğine bağlı olmadığı için lineer azaltma katsayısından daha kullanışlıdır. Kütle azaltma katsayısı direkt olarak soğurucu maddenin doğasını yansıtır. Bu sebeple lineer azaltma katsayısı yerine kütle azaltma katsayısını ölçmek daha uygundur.

## **BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOT**

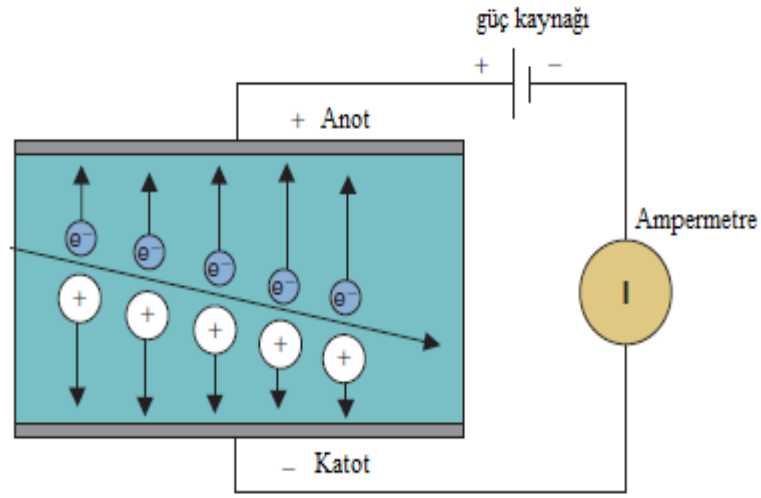
### **3.1. Deney Düzenegi**

Çalışmada numune olarak kurşun alaşımı kullanılmıştır. Numune, %90 oranında kurşun ve %10 oranında kalay içermektedir. Bu alaşımın özkütlesi  $10,75 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Numunelerin kalınlıkları 0,5 cm ve 1 cm olmak üzere iki farklı büyüklükte kurşun alaşımı levhası şeklinde mevcuttur.

Çalışmada radyoaktif kaynak olarak Co-60 kullanılmıştır. Co-60 kobalt elementinin radyoaktif bir izotopudur ve yarılanma süresi 5,27 yıldır. Bilimsel çalışmalarda gama kaynağı olarak kullanılır ve 1173 keV ve 1332 keV olmak üzere iki farklı enerji düzeyinde gama ışını yayınlar.

Çalışmada Geiger-Müller sayacı kullanılmıştır. Geiger-Müller sayacı iyonlaştırıcı radyasyonu ölçebilen bir parçacık dedektörüdür. Geiger-Müller tüpünün içindeki alçak basınçlı gazın iyonizasyonu ile alfa, beta, gama gibi radyasyonlar tespit edilebilmektedir. Geiger sayacı 1928'de Hans Gieger ile Walther Müller tarafından geliştirilmiştir [40]. 1928 yılında ve sonrasında geliştirilen Geiger-Müller sayaçları, cihazın güçlü algılaması ve bağıl olarak düşük maliyetli olmasından ötürü deneysel fizikte, nükleer endüstride, tıpta, jeolojik keşiflerde, radyasyon dozimetresinde sıkça kullanılan bir cihaz haline gelmiştir.

Geiger-Müller sayacı, temel olarak Geiger-Müller tüpü ve elektronik araçlar olmak üzere iki kısımdan oluşur. Radyasyonu algılayan araç içinde genellikle helyum, neon veya halojen katkılı argon gazı bulunan Geiger-Müller tüpüdür ve parçacık (alfa, beta) veya foton (X ve gama ışını) iyonlaşarak gazı iletken yaptığında elektrik yükünü iletir (Şekil 3.1.). Bu tüpün her iyonlaşma olayını yükseltme özelliği bulunur ve bunu Townsend çığ etkisi ile yapar. Kolaylıkla ölçülebilen ve elektrik devre elemanlarından geçirilen bir akım atması üretilir.



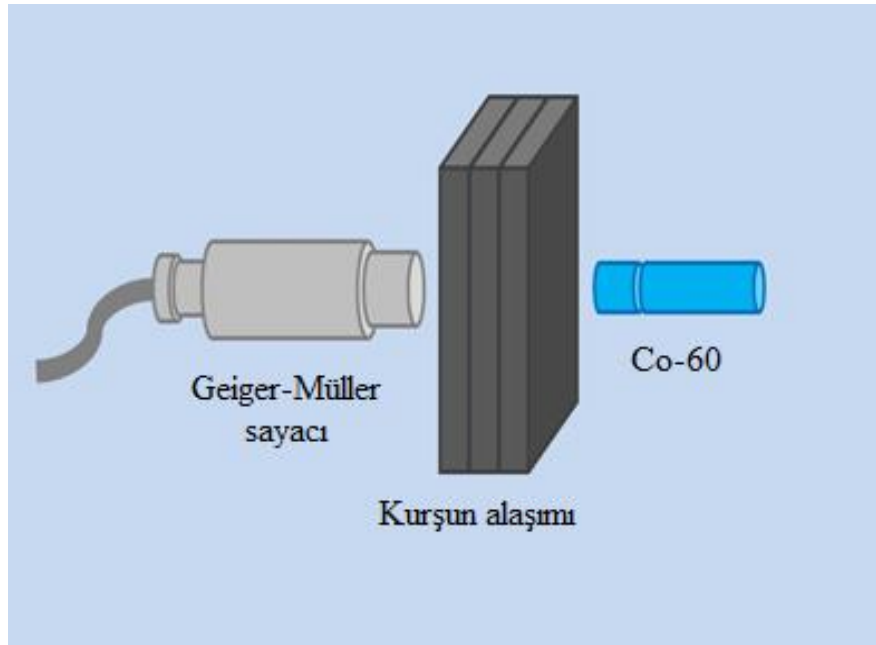
Şekil 3.1. Geiger-Müller tüpünün şematik gösterimi [33].

Sayım ve radyasyon dozu olmak üzere iki tür radyasyon okuma yöntemi vardır. Sayım yöntemi en basit olanıdır ve iyonlaşma olaylarının sayısını saniye başına veya belirli bir zaman üzerinden toplamı şeklinde gösterir. Radyasyon doz oranının ölçülmesi daha karmaşıktır ve birimi sievert cinsinden ölçülür. Okuma cihazı analog veya dijital olabilir. Günümüzde dijital tipi cihazlar daha yaygındır.

Kurşun alaşımının deneysel kütle azaltma katsayısının belirlenmesi amacıyla deney düzeneği hazırlanmıştır. Geiger-Müller sayacı, Pb-Sn alaşımı ve Co-60 radyoaktif kaynağı şeklindeki gibi konumlandırılmıştır (Şekil 3.2.). Co-60 radyoaktif kaynağı ile Geiger-Müller sayacı arasındaki mesafe ayarlanmıştır. İlk olarak 0,5 cm kalınlığındaki



kurşun alaşımı (Pb-Sn) levhası orta noktaya konulmuştur. Geiger-Müller sayacı çalıştırılarak Pb-Sn alaşımından geçen foton sayısı tespit edilip not edilmiştir. Sonrasında aynı işlem 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm ve 3 cm kalınlıklı numuneler için tekrarlanmış ve numuneden geçen Geiger-Müller sayacıyla tespit edilen foton sayısı not edilmiştir. Ayrıca ortam radyasyonundan kaynaklı parçacıkların tespit edilmesi için Co-60 radyoaktif kaynağı olmaksızın ölçüm alınmış ve Geiger-Müller sayacıyla tespit edilen parçacık sayısı not edilmiştir. Sonrasında not edilen verilerden ortam radyasyonundan kaynaklanan parçacık sayısı çıkarılarak Geiger-Müller sayacına ulaşan saniyedeki foton sayısı tabloda belirtilmiştir.



Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Sayım/s-Kalınlık grafiği çizilerek fit etme işlemi bir grafik programı aracılığıyla yapılmıştır. Bu grafiğin fit parametresi lineer azaltma katsayısını vermektedir. Böylelikle kurşun alaşımına ait lineer azaltma katsayısı deneysel olarak bulunmaktadır. Ayrıca kurşun alaşımının lineer azaltma katsayısının kurşun alaşımının özkütle değerine bölünmesiyle kütle azaltma katsayısı elde edilmektedir.

### 3.2. Geant4

Geant4, Monte Carlo metotlarının kullanımıyla parçacıkların madde ile etkileşimini ve madde içinden geçişlerini simüle eden bir yazılım paketidir. GEANT yazılım paketi 1970'li yılların sonunda kullanılmaya başlanmıştır. Geant4, 1993 yılında yüksek enerji fiziği deneylerinde kullanılması için CERN'de (Avrupa Nükleer Araştırma Laboratuvarı) GEANT yazılım paketi baz alınarak ve nesne tabanlı programlama dili (C++) yardımıyla tasarlanmıştır. Geant4 (GEometri ANd Tracking) başlangıçta yüksek enerji fiziği deneyleri için tasarlanmış olsa da günümüzde nükleer fizik, tıp, mühendislik, sağlık fiziği gibi birçok bilim dalı tarafından geniş bir alanda kullanılmaktadır.

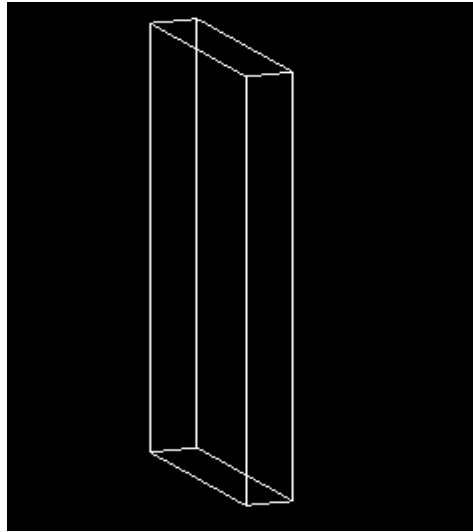
Geant4 simülasyon programı, parçacığın kinetik enerjisini tüketinceye kadar veya herhangi bir etkileşmeye girip kayboluncaya kadar madde ve dış elektromanyetik alanla etkileşimlerini göz önüne alarak adım adım parçacığın taşınımını yapabilir. Kullanıcı, parçacığın taşınımın başında, her bir adımın bitiminde, taşınımın sonunda ve parçacık dedektörün duyar hacmine ulaşması anı gibi her adımda bu sürece erişebilir ve simülasyon sonuçlarına ulaşabilir.

Geant4 simülasyon programında ortamın geometrik formu, ortamda mevcut olan maddelerin türü ve geometrisi, ortama gönderilen parçacıkların türü ve enerji düzeylerine göre etkileşimleri kullanıcı tarafından belirlenebilir. Geant4 kullanıcıların yararlanabileceği tüm fiziksel bilgi ve formüllere kütüphanesinde yer vermektedir. Parçacıkların gerçekleştirebileceği elektromanyetik, hadronik, optik foton süreçleri, bozunum süreçleri gibi birçok fizik modeli bu kütüphanede mevcuttur. Kullanıcının için farklı enerji düzeylerinde fizik modelleri geliştirilmiştir ve hangi modelden yararlanılacağı kullanıcının insiyatifine bırakılmıştır.

Çalışmanın bu kısmında, Geant4 simülasyon programının Geant4.10.03.p03 sürümü kullanılmıştır. Kurşun alaşımının kütle azaltma katsayısının belirlenmesi için Geant4 simülasyon programında yapılan modellemelerden bahsedilmektedir.

### 3.2.1. Deney düzeneğinin modellenmesi

Geant4 simülasyon programında kurşun alaşımının kütle azaltma katsayısının belirlenmesi için deney düzeneğinin benzetimi yapılmıştır. Yani böylece tanımlanan kurşun alaşımı materyalinden geçen foton sayısının Geant4 simülasyon programı vasıtasıyla tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Kullanılan kurşun alaşımı materyalinin geometrisi dikdörtgen prizması olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3 Kurşun alaşımının 1 cm kalınlık için ortam içindeki geometrisi.

Geometrisi dikdörtgen prizma olarak tasarlanan kurşun alaşımı materyali deneyde kullanıldığı şekilde %90 oranında Pb ve %10 oranında Sn olarak tanımlanmıştır. İsmi ‘‘ LeadAlloy ‘‘ olarak verilmiştir. Özkütlesi deneysel çalışmada olduğu gibi  $10,75 \text{ g/cm}^3$  olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.4.). Kurşun alaşımı materyali uygun kalınlıklara değiştirilebilmektedir.

```

G4double z,a;
G4Element* Pb = new G4Element("Lead"      ,"Pb", z=82., a=207.19*g/mole);
G4Element* Sn = new G4Element("Tin"       ,"Sn", z=50., a=118.71*g/mole);

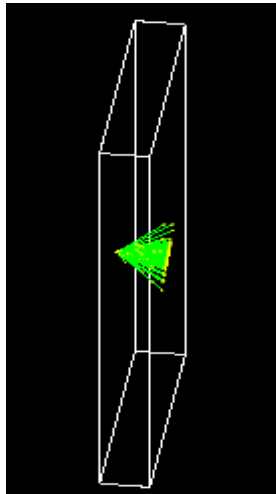
G4double density;
G4int ncomponents;
G4double fractionmass;
G4int natoms;

G4Material* LeadAlloy =
new G4Material("LeadAlloy",density=10.75*g/cm3, ncomponents=2);
LeadAlloy->AddElement(Pb, fractionmass=90*perCent);
LeadAlloy->AddElement(Sn, fractionmass=10*perCent);

```

Şekil 3.4. Kurşun alaşımının Geant4 programında tanımlanması.

Çalışmada kullanılan radyoaktif kaynak olan Co-60 bir gama kaynağıdır ve 1173 keV ve 1332 keV olmak üzere iki enerji düzeyinde gama ışını yayımlar. Geant4 simülasyon programında tasarlanan modelde parçacık türü olarak gama tanımlanmıştır. Enerji düzeyi de istenilen değerlere değiştirilebilmektedir. Bu çalışmada Co-60 radyoaktif kaynağının enerji düzeyleri olan 1173 keV ve 1332 keV olarak değiştirilerek veri alınmıştır. Tasarlanan modelde kurşun alaşımı materyaline gönderilen foton sayısı da değiştirilebilmektedir. Bu modelde örnek olarak 3000 gama ışını 1,25 MeV enerji düzeyi için 1 cm kalınlıklı kurşun alaşımı materyaline gönderdiğimizde şekildeki gibi bir görüntü ortaya çıkar (Şekil 3.5.).

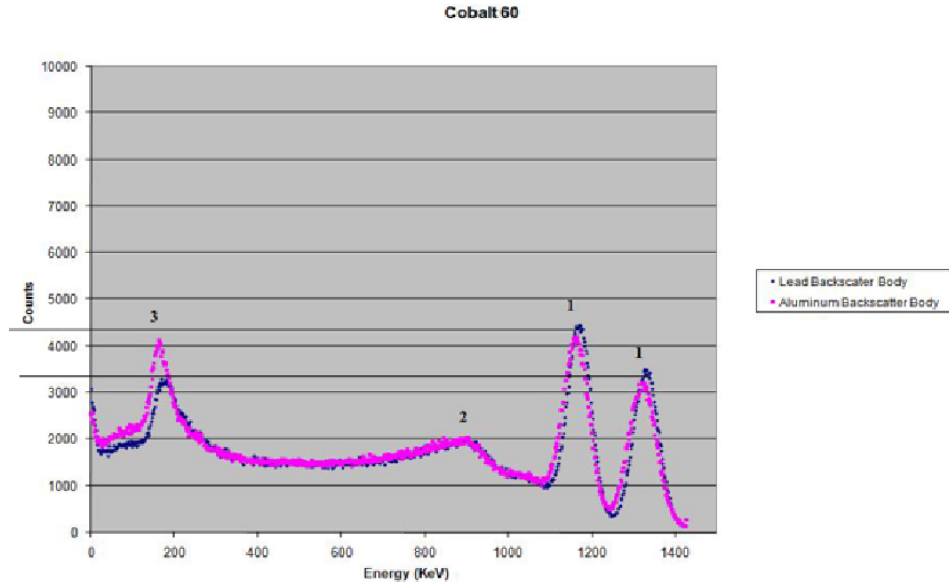


Şekil 3.5. Geant4 programında 3000 fotonun 1 cm kalınlıklı kurşun alaşımı materyalinden geçerken görüntüsü.

Önce enerji düzeyi 1173 keV seçilerek 100000 foton 0,5 cm kalınlığındaki kurşun alaşımı materyaline gönderilmiştir. Sonrasında kalınlıklar 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, 3 cm, 3,5 cm, 4 cm, 4,5 cm ve 5 cm için tekrarlanmış ve geçen fotonlar tespit edilip tabloya  $I/I_0$  oranı yazılmıştır.

Enerji düzeyi değiştirilerek 1332 keV seçilerek 100000 foton 0,5 cm kalınlığındaki kurşun alaşımı materyaline gönderilmiştir. Sonrasında kalınlıklar 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, 3 cm, 3,5 cm, 4 cm, 4,5 cm ve 5 cm için tekrarlanmış ve geçen fotonlar tespit edilip tabloya  $I/I_0$  oranı yazılmıştır.

Bu çalışmada, Co-60 radyoaktif kaynağı iki farklı gama enerjisi için ortalama enerjiyi 1,25 MeV almak yerine daha hassas bir çalışma yaparak 1173 keV ve 1332 keV'lik enerji düzeylerinden gelen fotonların hangi oranda geldiği araştırılmıştır. Bunu tespit edebilmek için farklı iki gama spektrumu çalışması incelenmiştir. 1173 keV ve 1332 keV enerji düzeyindeki tepe noktaları incelenerek gelen foton oranları bulunup iki farklı çalışmanın aritmetik ortalaması bulunmuştur. Bu oran hangi enerji düzeyinden hangi oranda foton geldiğini vermektedir. Bu oranı yüzdelik hale getirip Geant4 simulasyon programından elde edilen  $I/I_0$  değerleriyle çarpılarak ortalama  $I/I_0$  değeri hesaplanmış ve tabloya not edilmiştir.

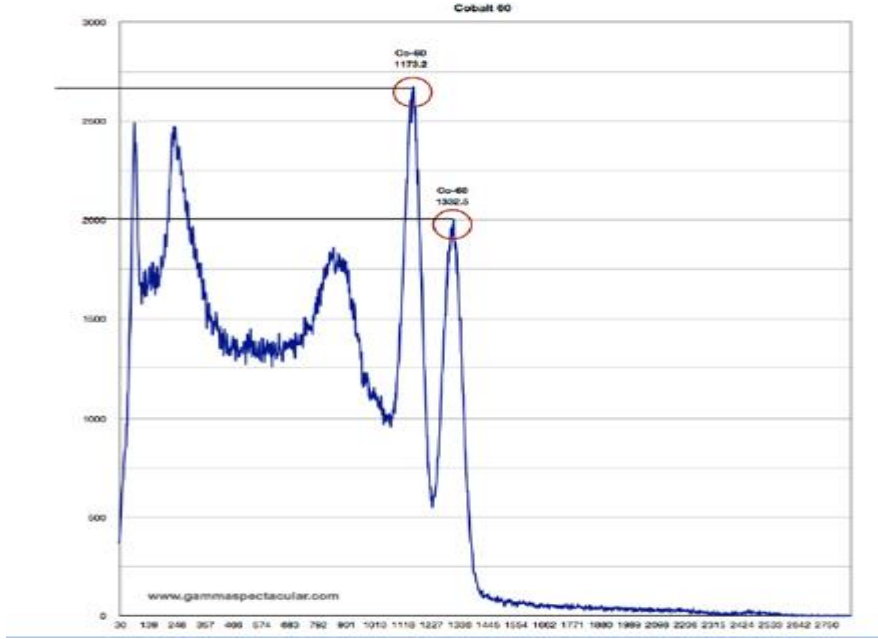


Şekil 3.6. Co-60 için gama spektrumu (Çalışma 1) [41].

Co-60 üzerinde yapılan bu çalışmada gama spektrumunun 1173 keV ve 1332 keV'lik tepe noktaları incelendiğinde 1173 keV'lik enerjiye karşılık gelen foton sayısı 4165 ve 1332 keV'lik enerjiye karşılık gelen foton sayısı 3278 'dir (Şekil 3.6.). Bu değerlerin birbirine oranı;

$$\frac{\gamma_{1173}}{\gamma_{1332}} = 1,270 \quad (3.1)$$

olarak bulunur. Bu sonuç ilk çalışma için Co-60 radyoaktif kaynağından yayınlanan 1173 keV ve 1332 keV enerji düzeylerinden gelen foton sayısının birbirine oranıdır.



Şekil 3.7. Co-60 için gama spektrumu (Çalışma 2) [42].

Co-60 üzerinde yapılan bir başka çalışmada gama spektrumunun 1173 keV ve 1332 keV'lik tepe noktaları incelendiğinde 1173 keV'lik enerji düzeyine karşılık gelen foton sayısı 2700 ve 1332 keV'lik enerji düzeyine karşılık gelen foton sayısı 2033'tür (Şekil 3.7.). Bunların birbirine oranı;

$$\frac{\gamma_{1173}}{\gamma_{1332}} = 1,328 \quad (3.2)$$

bulunmuştur. Sonrasında bu iki çalışmanın aritmetik ortalaması hesaplanmıştır.

$$Ortalama = \frac{1,270+1,328}{2} = 1,299 \quad (3.3)$$

bulunmuştur. Bu oran % hesabıyla hesaplandığında sonuç 1173 keV için %56,5 ve 1332 keV için %43,5 olarak bulunmuştur.

Başka bir deyişle Co-60 radyoaktif kaynağından yayımlanan gamalarını %56,5'i 1173 keV'lik enerji düzeyinde yayınlanırken %43,5'i 1332 keV'lik enerji düzeyinde yayınlanmaktadır. Buradan Geant4 simulasyon programından elde edilen 1173 keV enerji düzeyine ait  $I/I_0$  değerlerinin 0,565 ile çarpımı ile 1332 keV enerji düzeyine ait  $I/I_0$  değerlerinin 0,435 ile çarpımının birbiriyle toplanması ile Geant4 simulasyon programından elde edilen Co-60 için  $I/I_0$  değerleri hesaplanmış ve tabloda belirtilmiştir. Bu değer Geant4 simulasyon programında kurşun alaşımı materyalinden geçen fotonların gönderilen fotonlara oranının her iki enerji düzeyi için bir ortalamasını vermektedir.

Son olarak  $I/I_0$  – kalınlık grafiği bir grafik programı yardımıyla çizilip exponansiyel bir fonksiyona fit edilmiştir. Bu exponansiyel fit parametresinin değeri Pb-Sn alaşımı için Geant4 simulasyon programıyla elde edilen lineer azaltma katsayısını vermektedir. Pb-Sn alaşımına ait lineer azaltma katsayısının alaşımının özkütlesine bölümüyle de alaşımın kütle azaltma katsayısı tespit edilmiştir.

### 3.3. XCOM Programı

XCOM programı teorik kütle azaltma katsayısının hesaplanmasını NİST veritabanını kullanarak sağlayabilen bir bilgisayar programıdır. Element, bileşik ve karışımlar için 1 keV-100 GeV enerji aralığında bulunan radyasyon karşısında Compton saçılması, fotoelektrik olay ve çift oluşumu tesir kesitlerini ve bunlarla bağlantılı olarak teorik kütle azaltma katsayısı elde edilebilmektedir.

XCOM, literatürdeki mevcut tablolar ve tablo verilerinin grafiksel gösterimi olmak üzere iki türde çıktı sunar. Koherent saçılma, Compton saçılması, fotoelektrik absorpsiyon ve çift oluşumu için toplam kütle azaltma katsayısı ve tesir kesitlerinin yanısıra kısmi tesir kesitlerini de elde eder.

Etkileşim katsayıları ve bileşikler veya karışımlar için toplam kütle azaltma katsayıları, atomik bileşenler için karşılık gelen miktarların toplamı olarak elde



edilir. Bileşenlerin ağırlıkça payları, kullanıcı tarafından girilen kimyasal formülden XCOM tarafından hesaplanır. Bununla birlikte karışımlar için kullanıcı tarafından kesirleri bileşenlerin ağırlığına göre belirtilmelidir.

Çalışmanın bu kısmında, XCOM programında kurşun alaşımı için uygun veriler girilerek kurşun alaşımının teorik kütle azaltma katsayısının bulunması incelenmiştir. Kurşun alaşımı numune olarak kullanılmaktadır ve bu sebeple karışım seçeneği seçilerek programın bilgisine sunulmuştur. Sonrasında açılan sayfada karışım için kütlece yüzdesi, enerji düzeyi, enerji aralığı girilerek teorik kütle azaltma katsayısı elde edilebilmektedir (Şekil 3.8.). Kurşun alaşımı (Pb-Sn alaşımı) için kütlece yüzdeleri Pb 0,9 ve Sn 0,1 olarak girilmiştir. Enerji düzeyini de çalışmada kullanılan Co-60 radyoaktif kaynağının yayınladığı foton enerji düzeyleri olan 1.173 MeV ve 1.332 MeV olarak girilmiştir. Enerji aralığı 1 MeV ve 2 MeV olarak seçilmiştir. Program çalıştırıldığında 1.173 MeV ve 1.332 MeV enerji düzeyleri için kurşun alaşımının teorik kütle azaltma katsayıları tespit edilmiştir.

[Help](#)

<p>Enter the formulae and relative weights separated by a space for each compound. One compound per line. For example:</p> <p>H<sub>2</sub>O 0.9 NeCl 0.1</p> <p>Note: Weights not summing to 1 will be normalized.</p> <div style="border: 1px solid black; height: 30px; width: 100%;"></div>	
<p>Optional output title: <input type="text"/></p>	
<p><b>Graph options:</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Total Attenuation with Coherent Scattering  <input type="checkbox"/> Total Attenuation without Coherent Scattering  <input type="checkbox"/> Coherent Scattering  <input type="checkbox"/> Incoherent Scattering  <input type="checkbox"/> Photoelectric Absorption  <input type="checkbox"/> Pair Production in Nuclear Field  <input type="checkbox"/> Pair Production in Electron Field  <input type="checkbox"/> None</p>	<p><b>Additional energies in MeV: (optional)</b> (up to 100 allowed)</p> <p>Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.</p> <div style="border: 1px solid black; height: 30px; width: 100%;"></div> <p><input checked="" type="checkbox"/> Include the standard grid</p> <p><b>Energy Range:</b>  Minimum: <input type="text" value="0.001"/> MeV  Maximum: <input type="text" value="100000"/> MeV</p>
<p><input type="button" value="Submit Information"/> <input type="button" value="Reset"/></p>	

Şekil 3.8 XCOM ile teorik kütle azaltma katsayısının tespiti [43].

## BÖLÜM 4. SONUÇLAR

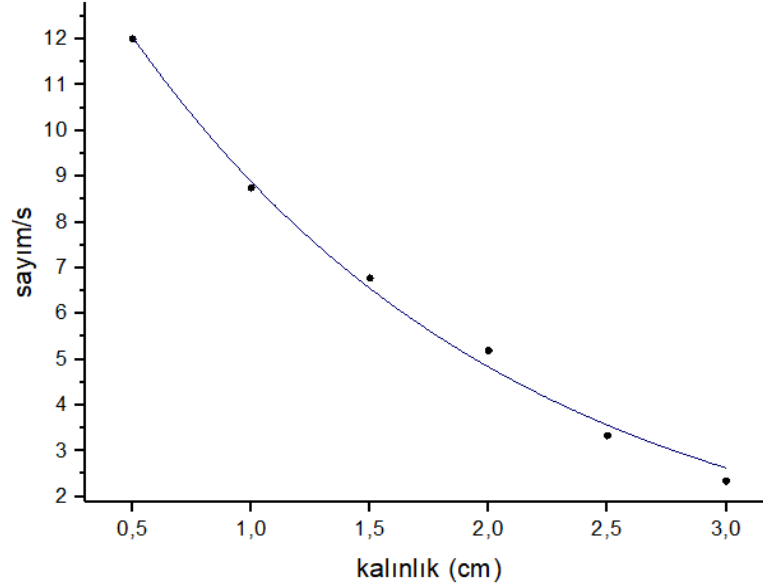
Kurşun alaşımının kütle azaltma katsayısının tespit edilmesi için deneysel, Geant4 simülasyon programında ve XCOM programında çalışma yapılmıştır. Deney düzeneğinde Co-60 radyoaktif kaynağı, kurşun alaşımı ve Geiger-Müller sayacı kullanılmıştır. Alınan verilerle deneysel kütle azaltma katsayısı belirlenmiştir. Geant4 simülasyon programında ise deney düzeneğinin simülasyon ortamında benzetimi yapılmış ve veriler toplanmıştır. Bu verilerle kurşun alaşımının Geant4 programındaki kütle azaltma katsayısı bulunmuştur. XCOM programında da kurşun alaşımına ait veriler girilerek teorik kütle azaltma katsayısı elde edilmiştir.

Deneysel çalışmada Co-60 radyoaktif kaynağının önüne konulan Pb-Sn alaşımından geçen fotonlar Geiger-Müller sayacı ile tespit edilmiştir. Ayrıca ortam radyasyonundan kaynaklanan parçacıklar çıkarılarak Co-60 radyoaktif kaynağından gelen, kurşun alaşımından geçip Geiger-Müller sayacı ile tespit edilen saniyedeki foton sayısı Tablo 4.1.'e yazılmıştır.

Tablo 4.1. Co-60 radyoaktif kaynağından gelen, kurşun alaşımından geçip Geiger-Müller sayacı ile tespit edilen saniyedeki foton sayısı.

Kalınlık (cm)	Foton sayısı (1/Saniye)
0,5	12,003
1	8,750
1,5	6,776
2	5,193
2,5	3,333
3	2,343

Tablodan yararlanarak Sayım/s-kalınlık grafiği bir grafik programı yardımı ile çizilip exponansiyel fit parametresi bulunmuştur. Bu fit parametresi lineer azaltma katsayısını verir.



Şekil 4.1 Saniyedeki foton sayısının kalınlığa karşı çizilen grafiği.

Deney düzeneğinden elde edilen verilerden çizilen grafikte kurşun alaşımına ait lineer azaltma katsayısı, grafiğin fit parametresi de olan  $\mu = 0,6089 \pm 0,0258 \text{ cm}^{-1}$  olarak bulunmuştur (Şekil 4.1.). Kurşun alaşımının kütle azaltma katsayısının bulunması için yoğunluğa ( $10,75 \text{ g/cm}^3$ ) bölünmüştür. Kurşun alaşımı materyalinin deneysel kütle azaltma katsayısı  $\mu_m = 0,0566 \pm 0,0024 \text{ cm}^2/\text{g}$  olarak elde edilmiştir.

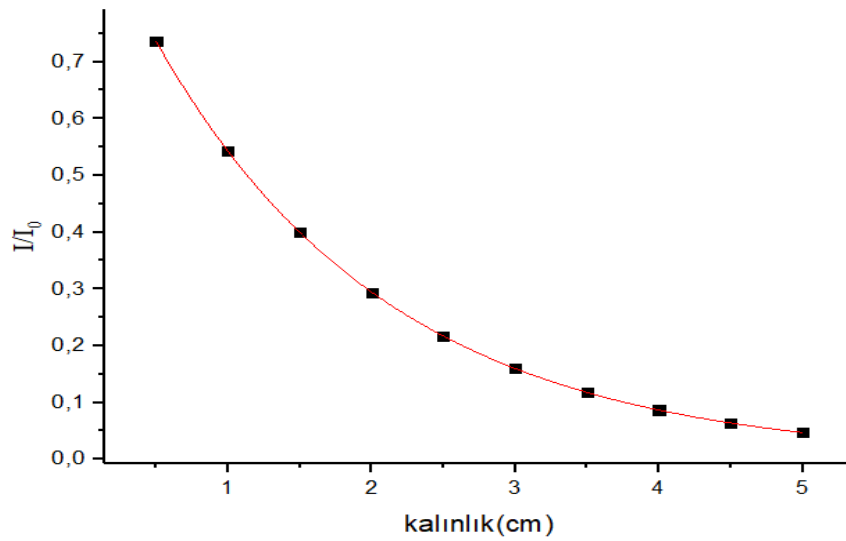
Geant4 simulasyon programında yapılan çalışmada kurşun alaşımı materyali tanımlanmıştır. 1173 keV enerji düzeyinde 100000 foton tanımlanan kurşun alaşımı numunesine 0,5 cm kalınlık için gönderilmiştir. Aynı işlem 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, 3 cm, 3,5 cm, 4 cm, 4,5 cm ve 5 cm kalınlıklarında da yapılarak numunelerden geçen foton sayısı  $I/I_{0 \text{ 1173 keV}}$  olarak tabloya not edilmiştir (Tablo 4.2.). Bu işlem

1332 keV enerji düzeyi içinde tekrar edilmiş ve  $I/I_{0\ 1332\ keV}$  olarak not edilmiştir (Tablo 4.2). Ayrıca 1173 keV enerji düzeyindeki  $I/I_{0\ 1173\ keV}$ 'ın 0,565 ile çarpımı ve 1332 keV enerji düzeyindeki  $I/I_{0\ 1332\ keV}$  'ın 0,435 çarpımı toplanarak  $I/I_0$  elde edilmiştir (Tablo 4.2.).

Tablo 4.2. Kalınlıklara göre  $I/I_{0\ 1173\ keV}$ ,  $I/I_{0\ 1332\ keV}$  ve  $I/I_0$  değerleri.

Kalınlık ( cm )	$I/I_{0\ 1173\ keV}$	$I/I_{0\ 1332\ keV}$	$I/I_0$
0,5	0,728	0,748	0,737
1	0,530	0,559	0,543
1,5	0,386	0,418	0,400
2	0,280	0,312	0,294
2,5	0,204	0,234	0,217
3	0,149	0,175	0,160
3,5	0,108	0,131	0,118
4	0,079	0,098	0,087
4,5	0,057	0,073	0,064
5	0,042	0,054	0,047

Tablodan yararlanarak  $I/I_0$  – kalınlık grafiği çizilmiştir ve fit parametresi grafik programı yardımıyla bulunmuştur (Şekil 4.2.). Grafiğin fit parametresi lineer azaltma katsayısını vermektedir.



Şekil 4.2 Geant4 programında hesaplanan  $I/I_0$  değerinin kalınlığa karşı grafiği.

Grafiğin fit parametresinden kurşun alaşımına ait lineer azaltma katsayısı  $\mu = 0,6110 \text{ cm}^{-1}$  bulunmuştur. Kurşun alaşımının kütle azaltma katsayısının bulunması için lineer azaltma katsayısı yoğunluğa bölünür. Geant4 simülasyon programı ile bulunan kütle azaltma katsayısının değeri  $\mu_m = 0,0568 \text{ cm}^2/\text{g}$  olarak hesaplanmıştır.

Kurşun (Pb-Sn) alaşımına ait teorik kütle azaltma katsayısı XCOM programında karışımın madde miktarı, enerji düzeyi ve enerji aralığı girilerek elde edilmiştir. Madde miktarı oranına Pb 0.9 ve Sn 0.1 yazılmıştır. Enerji düzeyine çalışmada kullanılan Co-60 radyoaktif kaynağının yayınladığı fotonların enerji düzeyi olan 1173 keV ve 1332 keV yazılmıştır. Enerji aralığı opsiyonel olarak en az 1 MeV ve en fazla 2 MeV olarak yazılarak program çalıştırılmıştır. Bunun sonucunda 1173 keV enerji düzeyinde  $\mu_m = 0,0609 \text{ cm}^2/\text{g}$ , 1332 keV enerji düzeyinde  $\mu_m = 0,0555 \text{ cm}^2/\text{g}$  olarak elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonunda Co-60 radyoaktif kaynağı kullanılarak kurşun alaşımı numunesinin içinden geçen fotonların Geiger-Müller sayacı ile tespit edilmesiyle alınan verilerden deneysel kütle azaltma katsayısı hesaplanmıştır. Sonrasında deney

düzenine Geant4 simülasyon programında benzetimi yapılarak elde edilen verilerden kurşun alaşımının kütle azaltma katsayısı hesaplanmıştır. Ayrıca XCOM programında kurşun alaşımına ait veriler girilerek 1173 keV ve 1332 keV enerji düzeylerinde teorik kütle azaltma katsayısı elde edilmiştir.

Tablo 4.3. Kütle azaltma katsayılarının Deney, Geant4 ve XCOM değerlerinin karşılaştırılması.

	Kütle Azaltma Katsayısı (cm <sup>2</sup> /g)
Deney	0,0566 ± 0,0024
Geant4	0,0568
XCOM (1173 keV)	0,0609
XCOM (1332 keV)	0,0555

Sonuç olarak kurşun alaşımının kütle azaltma katsayısının tayin edilmesi için yapılan çalışmalarda deneysel ve Geant4 kütle azaltma katsayısı değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu ve bu değerlerin XCOM programından elde edilen kurşun alaşımının kütle azaltma katsayısının 1173 keV ve 1332 keV değerlerinin arasında bulunduğu görülmektedir (Tablo 4.3.).

## KAYNAKLAR

- [1] Trunova, V.. Sidorina, A.. Kriventsov, V, Measurement of X-ray mass attenuation coefficients in biological and geological samples in the energy range of 7–12 keV, *Applied Radiation and Isotopes*, 95, 48-52, 2015.
- [2] Biswas, R .. Sahadath, H.. Mollah, A, S.. Huq, M, F, Calculation of gamma-ray attenuation parameters for locally developed shielding material: Polyboron, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9(1), 26-34, 2016.
- [3] Kore, P, S.. Pawar, P, P, Measurements of mass attenuation coefficient, effective atomic number and electron density of some amino acids, *Radiation Physics and Chemistry*, 98, 86-91, 2014.
- [4] Kaur, T.. Sharma, J.. Singh, T, Thickness optimization of Sn–Pb alloys for experimentally measuring mass attenuation coefficients, *Nuclear Energy and Technology*, 3(1), 1-5, 2017.
- [5] Limkitjaroenporn, P.. Kaewkhao, J.. Chewpraditku, W.. Limsuwan, P, Mass Attenuation Coefficient and Effective Atomic Number of Ag/Cu/Zn Alloy at Different Photon Energy by Compton Scattering Technique, *Procedia Engineering*, 32, 847-854, 2012.
- [6] Han, I..Demir, L, Mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers of Ti and Ni alloys, *Radiation Measurements*, 44(3), 289-294, 2009.
- [7] Un, A.. Sahin, Y, Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic numbers, effective electron numbers and kermas for Earth and Martian soils, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 288, 42-47, 2012.
- [8] İçelli, O.. Erzeneoğlu, S.. Karahan, İ, H.. Çankaya, G, Effective atomic numbers for CoCuNi alloys using transmission experiments, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 91(4), 485-491, 2005.
- [9] Pawar, P, P..Bichile, G, K, Measurement of Mass and Linear Attenuation Coefficients of Gamma-Rays of Alanine for 0.662, 1.170, 1.280 and 1.330 MeV Photons, *Journal of Applicable Chemistry*, 1(1), 53-58, 2012.

- [10] Taqi, A, H.. Khalil, H, J, Experimental and Theoretical Investigation of Gamma Attenuation of Building Materials, *Journal of Nuclear and Particle Physics*, 7(1), 6-13, 2017.
- [11] Taqi, A, H.. Khalil, H, J, An investigation on gamma attenuation of soil and oil-soil samples, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10(3), 252-261, 2017.
- [12] Costa, J, C.. Borges, J, A, R.. Pires, L, F.. Arthur, R, C, J.. Bacchi, O, S, S, Soil mass attenuation coefficient: Analysis and evaluation, *Annals of Nuclear Energy*, 64 , 206-211, 2014.
- [13] Medhat, M, E, Application of gamma-ray transmission method for study the properties of cultivated soil, *Annals of Nuclear Energy*, 40(1), 53-59, 2012.
- [14] Jundee, K, S.. Jyoti, Y.. Aghav, S, D, Study of linear absorption and mass attenuation coefficient of various materials using G. M. Counter, *Int. Res. J. of Science & Engineering*, A2, 128-131, 2018.
- [15] Adamides, E.. Koutroubas, S, K.. Moshonas, N.. Yiasemides, K, Gamma-ray attenuation measurements as a laboratory experiment: Some remarks, *Physics Education*, 46(4),398, 2011.
- [16] Jain, R.. Shekhawat, P, An investigation of the Attenuation of  $\beta$ -particle and to compare the Linear Attenuation Coefficients of Various Materials using G.M. Counter, *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(6), 2016.
- [17] Medhat, M, E.. Wang, Y, Geant4 code for simulation attenuation of gamma rays through scintillation detectors, *Annals of Nuclear Energy*, 62, 316-320, 2013.
- [18] Singh, V, P.. Medhat, M, E.. Shirmardi, S, P, Comparative studies on shielding properties of some steel alloys using Geant4, MCNP, WinXCOM and experimental results, *Radiation Physics and Chemistry*, 106, 255-260, 2015.
- [19] Medhat, M, E, Comprehensive study of photon attenuation through different construction matters by Monte Carlo Simulation, *Radiation Physics and Chemistry*, 107, 65-74, 2015.
- [20] Singh, V, P.. Medhat, M, E.. Badiger, N, M, Photon energy absorption coefficients for nuclear track detectors using Geant4 Monte Carlo simulation, *Radiation Physics and Chemistry*, 106, 83-87, 2015.
- [21] Gerward, L.. Guilbert, N.. Jensen, K, B.. Levring, H, X-ray absorption in matter. Reengineering XCOM, *Radiation Physics and Chemistry*, 60(1-2) ,23-24, 2001.



- [22] Vahabi, S, M..Bahreinipour, M.. Zafarghandi, M, S, Determining the mass attenuation coefficients for some polymers using MCNP code: A comparison study, Vacuum, 136, 73-76, 2017
- [23] Saim, A.. Tebboune, A.. Berkok, H.. Belameiri, N.. Belbachir, A, H, Linear and mass attenuation coefficient for CdTe compound of X-rays from 10 to 100 keV energy range in different phases, Journal of Alloys and Compounds, 602,261-264, 2014.
- [24] <http://hastane.ege.edu.tr/GenelUyumEgitimi/files/Radyasyon%20G%C3%BCvenli%C4%9Fi%20El%20Kitab%C4%B1.pdf>.. Erişim Tarihi: 16.04.2019.
- [25] Çimen, B.. Erdoğan, M.. Oğul, R , İyonlaştırıcı Radyasyon ve Korunma Yöntemleri, S.Ü. Fen Fakültesi Fen Dergisi, 43 (2), 139-147, 2017.
- [26] <https://www.afad.gov.tr/tr/23707/Radyasyon-Nedir> Erişim Tarihi: 16.04.2019.
- [27] L'Anunziata, M, F, Handbook of Radioactivity Analysis, Third Edition, Academic Press , CA,USA, 1305-1360, 2012.
- [28] Beiser, A, Çağdaş Fiziğin Kavramları, (Çeviri: Çetin, M.. Yıldırım, H.. Gülsün, Z), Bizim Büro Basımevi, Ankara, 1-489, 1988.
- [29] Cherry, S, R.. Sorenson, J, A.. Phelps, M, E, Physics in Nuclear Medicine, 4th Edition, Saunders, CA,USA, 19-30, 2012.
- [30] Griffiths, D, Introduction to Elementary Particles, Wiley, 2nd Revised Edition, , 56-71, 2008.
- [31] Attwood, D, T, Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications, Cambridge university Press, NY, 1-470, 2000.
- [32] L'Anunziata, M, F, Radioactivity-Introduction and History, from the Quantum to Quarks, 2nd Edition, Elsevier, 79-122, 2016.
- [33] Preedy, V.. Burrow, G.. Watson, R, Comprehensive Handbook of Iodine Nutritional, Biochemical, Pathological and Therapeutic Aspects, Academic Press, 1-1334, 2009.
- [34] Haken, H.. Wolf, H, C, Atom ve Kuantum Fiziği, ( Çeviri: Okur, İ ), Değişim Yayınları, 317-320, 2000.
- [35] Powsner, R, A.. Powsner, E, R, Essential Nuclear Medicine Physics, Blackwell Publishing, 2nd ED, Massachusetts,1-214, 2006

- [36] Preoteasa, E, A.. Preoteasa, E.. Suci, I, Atomic and Nuclear Surface Analysis Methods: A Novel Perspective for the Characterization of Dental Composites, Nova Science Publishers, NY, 1-208, 2012.
- [37] Compton, A, A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements, Physical Review, 21 (5), 483–502, 1923.
- [38] Morrison, J, C, Modern Physics for Scientists and Engineers, Academic Press, 1-488, 2010.
- [39] Das, A..Ferbel, T, Introduction to nuclear and particle physics, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd ,Singapore, 146-151, 2005.
- [40] Geiger, H.. W. Müller, Elektronenzählrohr zur Messung schwächster Aktivitäten (Electron counting tube for the measurement of the weakest radioactivities), Die Naturwissenschaften (The Sciences), 16(31), 617–618, 1928.
- [41] [http://www.pas.rochester.edu/~advlab/reports/pelcher\\_rapach\\_gammaspec.pdf](http://www.pas.rochester.edu/~advlab/reports/pelcher_rapach_gammaspec.pdf) f.. Erişim Tarihi: 16.04.2019.
- [42] <http://www.gammaspectacular.com/Co-60-gamma-spectrum..> Erişim Tarihi: 16.04.2019.
- [43] <https://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom2..> Erişim Tarihi:16.04.2019.

## ÖZGEÇMİŞ

Özgen Özge, 18.06.1985'te Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2003 yılında Hendek Atike Hanım Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2004 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nü 2009 yılında bitirdi. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik fakültelerinin fizik laboratuvarlarında çalışmak üzere öğrenci asistan olarak çalışmaya başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında eğitimine devam etmektedir ve öğrenci asistanlık görevini sürdürmektedir.