

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**FOTOAKTİVASYON ANALİZİ YÖNTEMİ İLE DİŞ NUMUNELERİNDEKİ  
ELEMENT ÇEŞİTLİLİĞİN TESPİT EDİLMESİ**

**Ahmet ÜNLÜ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MART 2018  
ANTALYA**

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



**FOTOAKTİVASYON ANALİZİ YÖNTEMİ İLE DİŞ NUMUNELERİNDEKİ  
ELEMENT ÇEŞİTLİLİĞİN TESPİT EDİLMESİ**

**Ahmet ÜNLÜ**

**FİZİK  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MART 2018  
ANTALYA**

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

**FOTOAKTİVASYON ANALİZİ YÖNTEMİ İLE DİŞ NUMUNELERİNDEKİ  
ELEMENT ÇEŞİTLİLİĞİN TESPİT EDİLMESİ**

**Ahmet ÜNLÜ**

**FİZİK  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MART 2018  
ANTALYA**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOAKTİVASYON METODU İLE DİŞ NUMUNESİNDEKİ ELEMENT  
DERİŞİMİNİN TESPİT EDİLMESİ

Ahmet ÜNLÜ

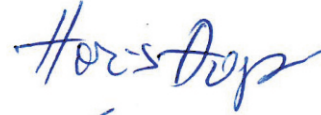
FİZİK  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 29/03/2018 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mesut KARAKOÇ (Danışman)



Dr.Öğr. Ü. Haris DJAPO



Dr.Öğr. Ü. Mehmet Ertan KÜRKCÜOĞLU



## ÖZET

### FOTOAKTİVASYON ANALİZİ YÖNTEMİ İLE DİŞ NUMUNELERİNDEKİ ELEMENT ÇEŞİTLİLİĞİNİN TESPİT EDİLMESİ

Ahmet ÜNLÜ  
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç.Dr. Mesut KARAKOÇ  
Fizik Anabilim Dalı

Mart 2018 – 65 sayfa

Fotoaktivasyon yönteminin birçok disiplinde uygulamalarına rastlamak mümkündür. Bu yöntem de, öncelikle bir malzemenin içeriğindeki element çeşitliliği belirlenebilir. Daha sonra derişimleri bilinen benzeri yapıda referans bir materyal hazırlanarak ilgilenilen malzemenin derişimleri de tespit edilebilir. Böylece, örneğin, arkeolojide tarihi eserlerin yaş tayinleri veya element içeriklerinin tespiti gerçekleştirilebilir. Arkeolojideki uygulamasına benzer şekilde meteor ve gök taşlarının element yapısı hakkında da bilgi sahibi olunmasını sağlayabilir. Bu tezin konusu olan diş numunelerinde de element çeşitliliğinin tespitine imkan verir. Diğer element analiz yöntemlerinden, XRD (X-ray diffraction) ve XRF (X-ray fluorescence) yöntemlerinde, ilgilenilen malzemenin kimyasal yapısı ortaya çıkarılabilir.

Fotoaktivasyonu gerçekleştirmek için gerekli X ışınları, 18 MeV'lik, uç enerjisinden klinik lineer hızlandırıcıdan elde edilen, elektronların, bremsstrahlung ışınması yapması sonucu oluşurlar. Bu X ışınları kullanım amacı ise, başlangıçta kararlı halde bulunan diş numunesini, kararsız hale getirmektir. Kararsız hale gelen diş numuneleri, tekrar kararlı hale geçerken karakteristik gama ışınları yayarlar. Gama ışınları HPGe dedektörleriyle ölçülürler.

Daha sonra analizi yapılarak diş numunesindeki elementler tespit edilir. Oluşan reaksiyonlar gözlemlenir. Bu tezde 15 adet diş numunesi incelenmiştir. İncelenen numunelerde gerçekleşmesi muhtemel fotonükleer reaksiyonlar, ( $\gamma, n$ ), ( $n, \gamma$ ), ( $\gamma, p$ ) ve ( $\gamma, \gamma'$ ) şeklinde özetlenebilir.

Diş numunelerindeki, fotonükleer reaksiyonlar sonucu kararsız hale gelen, elementlerin çekirdeklerinin bozunumları sırasında elde edilen karakteristik gama ışınımı enerji spektrumları analiz edilmiştir. Bu analiz sırasında olası fotonükleer reaksiyonlar ve NUDAT bozunum şemaları göz önünde bulundurulmuştur. Analizler sonucunda: Cu, Fe, Ca, Ga, Cl, Zn, Sc, Na, Rb, K, Mn, Ni, Sr, Mg elementlerinin diş numunelerinde varlığı tespit edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Nükleer Fizik, c-LINAC, Element analizi, Fotoaktivasyon

**JÜRİ:** Doç. Dr. Mesut KARAKOÇ

Dr.Öğr.Üyesi Haris DJAPO

Dr.Öğr.Üyesi Mehmet Ertan KÜRKÇÜOĞLU

## ABSTRACT

### DETERMINATION OF ELEMENT DIVERSITY INTO TOOTH SAMPLES BY PHOTOACTIVATION ANALYSIS METHOD

Ahmet ÜNLÜ

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mesut KARAKOÇ  
Physics Department

March 2018 – pages 65

Photoactivation analysis (PAA) has many applications in various disciplines. For example, archeology is a method that is used in the sense of having knowledge about the ages of historical artifacts, examination of components of an element whose element concentration is unknown, and determining the elements of its content. In addition, photoactivation analysis, a method used in space sciences, has knowledge about the element structure of meteor and celestial stones. The reason for using this method in tooth samples is to allow detailed and sensitive element analysis. In XRD and XRF methods, which are one of the other element analysis methods, the chemical formula of the element is determined and the active element is found. In the photoactivation, the daughter core, the main core and the isotopes of the element can be reached. Photoactivation analysis is a preferred method because it is both qualitative and quantitative.

The X-rays necessary to perform photoactivation are obtained from bremsstrahlung created by electrons produced by a 18 MeV clinical linear accelerator. If these X-rays are intended to be used, it is used to make the initially stable sample of the tooth unstable. the unstable tooth samples emit characteristic gamma rays as they become stable again. Gamma rays are measured with HPGe detectors.

Trough the analysis the elements of the teeth samples are identified. The identification allows for observation of actual reactions. Reactions observed in this sample are  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$ ,  $(n, \gamma)$ ,  $(\gamma, p)$  and  $(\gamma, \gamma')$  isomeric transitions.

As a result of analysis of the tooth sample: Cu, Fe, Ca, Ga, Cl, Zn, Sc, Na, Rb, K, Mn, Ni, Sr, Mg elements have been identified. From these, the elements in our sample were assigned.

**KEYWORDS:** Nuclear physics, c-Linac, Element Analysis, Photoactivation

**COMMITTEE:** Assoc. Prof. Dr. Mesut KARAKOÇ

Asst. Prof. Dr. Haris DJAPO

Asst. Prof. Dr. Mehmet Ertan KÜRKÇÜOĞLU

## ÖNSÖZ

Üniversitemiz bünyesindeki NUBA (nükleer bilimler araştırma ve uygulama merkezi)'nin 2014'te başlamış olduğu foto nükleer deneyler kapsamında gerçekleştirilen yeni deneylerle devam etmektedir. Şu ana kadar gerçekleştirilen deneylerin devamı niteliğinde olan bu tez foto aktivasyon metodunun disiplinler arası gerçekleştirilmesine örnek teşkil etmektedir.

Foto aktivasyon yöntemi ile yapılan NUBA bünyesinde ki araştırmalar sikkelerin element derişimler inin tespiti, çeşitli tarihi eserlerin tahribatsız şekilde element içerikleri ve derişimler inin tespiti ve bu tez de incelenen insan dışındaki elementlerin tespiti yapılmıştır. Fotoaktivasyon deney yöntemiyle elde edilen veriler sonucu dış numunesinde var olan element ler, analizleri yapılarak tespit edilmiştir.

Bu tezde yapılan ve yapılacak olan çalışmalarla fotoaktivasyon analizi yöntemi, gerek ülkemizde gerekse evrensel olarak disiplinler arası etkileşimlere katkı sağlayacağından ötürü ayrı bir motivasyon kağınağı ve gurur kaynağı oluşturur.

Bu tezi hazırlarken çok değerli katkılarından dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Mesut KARAKOÇ' a (Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü), her türlü bilgi birikim ve kaynak imkanı sağladığı için Yrd. Doç. Dr. Haris DJAPO' ya (Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü). Deney'in her aşamasında teknik bilgi ve birikimiyle yanımda olan Dr. Yusuf KAVUN' a tezin analiz aşamasındaki yardımlarından dolayı Alp CESUR (Akdeniz Üniversitesi Fizik Bölümü), Can ERTUĞAY (Akdeniz Üniversitesi Fizik Bölümü ), gerek bilgi birikim ve donanımıyla, gerekse iyi niyetli, samimi ve yol gösterici katkılarından dolayı Prof. Dr. Orhan BAYRAK'a (Akdeniz Üniversitesi Fizik Bölümü Bölüm Başkanı) teşekkürü bir borç bilirim.

Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN (Akdeniz Üniversitesi Fizik Bölümü) Ülkemizde Nükleer fizik adına gerçekleştirdiği projeler ve genç bilim insanlarına sağladığı destek ve katkılarından dolayı özel olarak teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tüm tez süreci boyunca desteğini esirgemeyen canım aileme ve annem Nebahat ÜNLÜ'ye çok teşekkür ederim

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
AKADEMİK BEYAN .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Tarihçe.....	1
1.2. Radyoaktivite .....	2
1.3. Foto Aktivasyon Analizi ve Temel Prensipleri .....	3
2. KAYNAK TARAMALARI .....	5
2.1. Çekirdeğin Özellikleri .....	5
2.1.1. Çekirdeğin yapısı .....	5
2.1.2. Nükleer kuvvet .....	6
2.1.3. Bağlanma enerjisi.....	6
2.1.4. Nükleer uyarılmış durumlar.....	7
2.2. Radyoaktivite ve Bozunum Yasası .....	8
2.2.1. Radyoaktif bozunum .....	8
2.3. Bozunum Türleri .....	11
2.3.1. Alfa bozunumu .....	11
2.3.2. Beta bozunumu .....	12



2.3.3. Elektron yakalama .....	12
2.3.4. Pozitron bozunumu .....	13
2.3.5. $\beta^-$ bozunumu.....	13
2.3.6. Gama bozunumu .....	14
2.4. Radyasyon Madde Etkileşimi .....	15
2.4.1. Ağır yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi .....	15
2.4.2. Elektronların madde ile etkileşimi .....	16
2.4.3. Foton madde etkileşim .....	17
2.4.3.1. Fotoelektrik olay .....	17
2.4.3.2. Compton saçılması .....	18
2.4.3.3. Çift oluşum .....	20
2.5. Dedektörler .....	20
2.5.1. Gazlı sayaçlar .....	20
2.5.2. Yarı iletken dedektörler .....	22
2.5.3. Sintilasyon dedektörler .....	23
2.6. Gama Spektrometresi .....	24
2.6.1. HPGe(yüksek saflıkta germanyum) dedektörü .....	24
2.7. Aktive Edici Radyasyon Kaynakları .....	25
2.7.1. Radyonüklit kaynaklar .....	25
2.7.2. Elektron hızlandırıcılar .....	26
2.7.3. Lineer Hızlandırıcılar .....	27
2.7.3.1. Bremsstrahlung spektrumu .....	29
2.8. Foton Aktivasyon Analizi ve Gelişim Süreci.....	31
2.8.1. Foton ile aktive etme işlemi .....	31

2.9. Nötron Aktivasyon .....	32
2.10. Fotonükleer Reaksiyonlar.....	33
2.10.1. Fotonların çekirdek tarafından soğurulması.....	33
2.10.2. Nükleer seviyelerin uyarılması.....	33
2.10.3. Dev dipol rezonans .....	34
2.10.4. İzomerik geçişler .....	35
2.11. Yüklü Parçacıkların Reaksiyonları .....	36
2.11.1. Fotonötron reaksiyonları .....	37
2.12. Fotoaktivasyon Analizinin Teorik Değerleri ve Formülleri .....	40
3. MATERYAL VE METOT .....	42
3.1. Element Analizinde Kullanılan Farklı Metodlar.....	42
3.1.1. XRD metodu.....	42
3.1.2. XRD yöntemi ile Fotoaktivasyon analizi yöntemi arasındaki farklar.....	42
3.1.3. XRF metodu .....	43
3.1.4. XRF yöntemi ile Fotoaktivasyon analizi yöntemi arasındaki farklar .....	43
3.2. Kullanılan Materyaller .....	44
3.2.1. Klinik lineer hızlandırıcı.....	44
3.2.2. Gama spektrometresi .....	44
3.2.3. İncelenen numune ve referans materyali .....	46
3.2.4. Diş numunesinin hazırlanışı .....	46
3.3. Bakır Monitörler .....	48
3.4. Numuneyi Aktive Etme .....	49
3.5. Ölçüm ve Analiz Süreci .....	49
3.6. Sayım İstatistiği .....	50

3.6.1. Gausyen dağılımı .....	50
3.6.2. Pik alan hesabı .....	50
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	52
4.1. Enerji Spektrumu .....	54
5. SONUÇ.....	56
6. KAYNAKLAR .....	58
7. EKLER .....	63
Ek 1.a.....	63
Ek 1.b.....	64
ÖZGEÇMİŞ	

## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans tezi olarak hazırlayıp sunduğum ‘Fotoaktivasyon analizi yöntemi ile dış numunesindeki element çeşitliliğinin tespit edilmesi’ adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../.....

Öğrencinin Adı, Soyadı İmzası

**Ahmet ÜNLÜ**

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$\gamma$	: Gama ışını
$\alpha$	: Alfa parçacığı
$\beta$	: Beta parçacığı
n	: Nötron parçacığı
p	: Proton parçacığı
e	: Elektronun yükü
Z	: Atom numarası
A	: Kütle numarası
eV	: Elektron Volt
MeV	: Mega Elektron Volt
GeV	: Giga Elektron Volt
W	: Watt
Hz	: Hertz
fm	: Femtometre
Bq	: Bekerel
C	: Karbon
H	: Hidrojen
O	: Oksijen
Mg	: Magnezyum
Si	: Silisyum
Ca	: Kalsiyum
Ni	: Nikel
Y	: İtriyum
Zr	: Zirkonyum
Nb	: Niobyum
Tl	: Talyum
Pb	: Kurşun
Co	: Kobalt
Cu	: Bakır
As	: Arsenik
Ge	: Germanyum
Li	: Lityum
I	: İyot
Cs	: Sezyum
U	: Uranyum
Cd	: Kadmiyum
Sr	: Stronsiyum
Lu	: Lutetyum
Cr	: Krom
Ag	: Gümüş
Mn	: Mangan
Zn	: Çinko
Hg	: Civa
Na	: Sodyum

Cl : Klor  
K : Potasyum  
Sc : Skandiyum  
Fe : Demir  
Rb : Rubidyum  
Th : Toryum

### **kısaltmalar**

PAA : Foto-aktivasyon Analizi  
NAA : Nötron Aktivasyon Analizi  
RNAA : Radyokimyasal Nötron Aktivasyon Analizi  
c-LINAC : Klinik Lineer Hızlandırıcı  
LINAC : Lineer Hızlandırıcı  
TAEK : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu  
HPGe : Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörü  
XRD : X Işını difaktrometresi  
XRF : X Işınları floresans spektrometresi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Nükleon başına düşen ortalama bağlanma enerjisi (MeV) .....	7
Şekil 2.2. Nükleer uyarılmış durumlar temel gösterimi .....	7
Şekil 2.3. Radyoaktif bozunum bölgeleri .....	8
Şekil 2.4. Uranyum serisi .....	9
Şekil 2.5. Toryum serisi .....	9
Şekil 2.6. Bozunum türleri .....	11
Şekil 2.7. Alfa bozunumu .....	12
Şekil 2.8. Elektron yakalama .....	13
Şekil 2.9. Pozitron bozunumu .....	13
Şekil 2.10. Beta bozunumu .....	14
Şekil 2.11. Gama bozunumu .....	14
Şekil 2.12. Co bozunum şeması .....	15
Şekil 2.13. Elektronların madde içerisindeki enerji kaybı .....	16
Şekil 2.14. Gözlemlenen etkileşim bölgeleri .....	17
Şekil 2.15. Fotoelektrik olay .....	18
Şekil 2.16. Compton saçılması. ....	19
Şekil 2.17. Çift oluşum .....	20
Şekil 2.18. Gazlı sayaç şeması .....	21
Şekil 2.19. Sayaçların bölgesel dağılımı .....	21
Şekil 2.20. Yarı iletken dedektörlerin çalışması şeması.....	22
Şekil 2.21. Sintilasyon dedektörünün çalışma şeması .....	23
Şekil 2.22. HPGe dedektörü p tipi .....	25
Şekil 2.23. Lineer hızlandırıcıların çalışma prensibi .....	28
Şekil 2.24. Bremsstrahlung spektrumu .....	29

Şekil 2.25. Bremsstrahlung etkin enerji bölgesi (30 MeV).....	30
Şekil 2.26. Bremsstrahlung etkin enerji bölgesi (60 MeV).....	30
Şekil 2.27. Dev dipol rezonans .....	34
Şekil 2.28. İzomerik geçişler.....	35
Şekil 2.29. Bremsstrahlung fotonu ile uyarılmış geçiş reaksiyonları .....	36
Şekil 2.30. Düşük enerjili soğurma tesir kesiti .....	36
Şekil 2.31. $^{16}\text{O}$ için foto nötron tesir kesiti .....	38
Şekil 2.32. $^{65}\text{Cu}$ için foto nötron tesir kesiti .....	39
Şekil 3.1. Klinik lineer hızlandırıcı Philips SLI-25' den elde edilen Bremsstrahlung foton dağılımı .....	44
Şekil 3.2. Gama spektrometre donanımı .....	45
Şekil 3.3. Gama spektrometresinin şematik gösterimi .....	45
Şekil 3.4. Dış numunelerindeki nemi almak için fırınlanırken .....	46
Şekil 3.5. Dış numunesinin toz hali .....	47
Şekil 3.6. Aktive edilmeye hazır paket .....	48
Şekil 3.7. Klinik lineer hızlandırıcı .....	49
Şekil 3.8. $n = 25$ için binom ( $\bullet$ ), poisson ( $\times$ ) ve gauss ( $-$ ) dağılımlarının karşılaştırılması .....	50
Şekil 3.9. Arkaplan (Background) hesaplama detayları .....	51
Şekil 4.1. 36 Numaralı numune için enerji spektrumu .....	54



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1.</b> Radyonüklitlerin yarılanma ömrü tablosu .....	26
<b>Çizelge 4.1.</b> 24, 30, 37 Numaralı 12, 23 ve 37 yaşındaki erkek, 4, 10 numaralı 25 ve 52 yaşındaki kadın, numunleri için verilen enerji değerleri .....	52
<b>Çizelge 4.2.</b> Fotonükleer reaksiyon sonucu dış numunelerinde oluşabilecek radyoaktif ürün çekirdeklervebuçekirdeklerinmümkünbozunumları.....	53
<b>Çizelge 5.1.</b> Dış numunesinde gözlemlenen kararsız elementler, gerçekleştirdiği reaksiyonlar ve ana çekirdek. Tabloda gözlemlenen reaksiyonlar için; ( $\gamma,n$ ) reaksiyonu 1, ( $n, \gamma$ ) reaksiyonu 2, ( $\gamma,p$ ) reaksiyonu 3 ile numaralandırılmıştır.....	57

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Tarihçe

Henri Becquerel 1896 yılında, uranyum tuzlarıyla yapmış olduğu X-ışını ile floresans ve fosforesans arasındaki bağıntıyı araştırırken, radyoaktivitenin keşfine yol açmıştır. J. J. Thomson ise yaptığı deneylerle atom çekirdeğinin iç yapısının anlaşılmasına önemli katkılarda bulunmuştur. 19. yy sonu 20. yüzyıl başındaki bu ve benzeri deneylerle çekirdek fiziği üzerine araştırmaların önemli bir ivme kazandığı söylenebilir. Bu ilk deneylerle yakın zamanlarda fizikçiler radyoaktivitenin temel belirtilerinden olan alfa, beta ve gama ışınlarını keşfettiler.

J.J. Thomson 20.yy başlarında geliştirdiği üzümlü kek modeli ile atom modellemesinin başlamasını sağladı. Thomson' nın fikrine göre; yükü pozitif olan parçacıklar, yükü negatif olan diğer parçacıkların içinde yer almıştır, şeklinde atom modelini geliştirmiştir.

Daha sonra Otto Hahn ve James Chadwick aracılığıyla 1911 senesinde, gerçekleştirilen deneyler neticesinde 1914 yılında beta bozunum spektrumunun, devamlı bir spektrum olduğu gözlemlenmiştir. Kıyaslanan bozulmalara göre (alfa ve gama) bozunumlarına oranla daha fazla enerji ortaya çıkmıştır.

Madam Curie ve Becquerel'in yapmış olduğu radyoaktivite çalışmaları, enerji kaynağı ile ilgili çekirdeğin küçük bileşenleri, yani nükleonlardan oluştuğunun anlaşılmasına ve 1915 yılında Albert Einstein'ın kütle enerji denkliğine kadar anlaşılammamıştı.

“Radyumun yayımladığı Alfa ışınım radyasyonunun madde içerisinden geçmesi”, isimli çalışma 1907 senesinde Ernest Rutherford tarafından yayımlandı. Bu çalışmadan etkilenen Hans Geiger ise, Royal Society destekli çalışarak, çalışmayı ilerletti ve alfa parçacıklarının, metalden yapılmış ince yapraklardan saçılma durumunu gözlemlledi. Geiger, bu çalışmayı daha ileri seviyeye taşıyarak, 1909 senesinde Marsden ile birlikte, daha sonra Geiger çalışmayı bir adım ileriye taşıyarak 1910 senesinde, genişletilmiş halini yayımladı.

Modern atom çekirdeği teorisinden bir önceki aşama olan atomlar için gezegen modeli Rutherford tarafından ortaya atılmıştır. Daha sonra, nötronların çekirdekte olan varlığını, 1932 senesinde Frederic Joliot Cruie, Walter Bothe, Herbert, Becker ve Irene gözlemlemiş, varlığının tespitini Chadwick gerçekleştirmiştir. Ayrıca 1932 senesinde nötronların  $\frac{1}{2}$  spine sahip olduğunu, Dmitri Ivanenko keşfetmiştir, ayrıca çekirdeğin yapısında elektron bulunmadığını, sadece nötron ve protondan oluştuğunu söylemiştir.

Nötronlarda tespit edilen  $\frac{1}{2}$  spinin ardından, bu durum Nitrojen-14 probleminin çözümüne katkı sağladı. Buna göre eşlenmemiş halde 1 tane proton ve eşlenmemiş halde bir tane nötron vardır. Proton ve nötron  $\frac{1}{2}$  spine katkıda bulunarak, toplam da spin sayısının 1 olmasını sağladı (Anonim 1).

“Nükleer kütleler arasındaki farkın hesaplanması, nötronun keşif edilmesi ile, atom bilimciler bağlanma enerjisinin sürtünmesinin atom içerisindeki tüm çekirdekler için, çekirdek başına düşen nükleer kütlenin içerisindeki, tüm proton ve tüm nötronu kıyaslama hesabını yapmayı başardılar. Nükleer kütleler arasındaki değişikliğin hesaplanması bu yolla gerçekleşmiştir ve Einstein’ın kütle-enerji için yapmış olduğu hesaplarla da desteklenmiştir” (Anonim 1).

Çekirdeğin nasıl bir arada tutulduğu ile ilgili fikir, 1935 senesinde Yukawa’nın güçlü kuvvetler kuramı ile ilgili fikrini ortaya atmıştır.

“Nükleonlar arasındaki kuvvetlerin anlaşılması Yukawa’nın meso olarak isimlendirilecek olan parçacık etkileşimi aracılığıyla gerçekleşmiştir. Yukawa’nın keşfi sayesinde, kuvvetlerin çekirdeğin proton itmesi altındaki parçalanması ve aynı zamanda güçlü ve etkili kuvvetlerin protonlar içindeki Sınır aralığının, elektro manyetik itmeye oranla daha sınırlı olduğunu söyledi. Yukawa pi mezonunun keşfetmesiyle taneciklerin özelliğini kanıtlamış oldu”(Anonim 1).

## 1.2. Radyoaktivite

Doğal radyasyonun oluşum sürecinde, uranyum gibi doğal radyoaktif elementler ile uzaydaki yıldızlar ve diğer bazı nesnelere tarafından üretilmektedir. Radyoaktif maddelerin yarı ömürleri bazen saniye mertebesinde iken bazıları ise bin yıllarca radyoaktif özelliğini koruyabilmektedir.

Radyasyon üretimi, özel makineler aracılığıyla üretilebilir. Bu makinelere Siklotron yani ivme makinesi adı verilmektedir. Yaygın kullanılan adıyla doğrusal hızlandırıcı veya parçacık hızlandırıcısı da denmektedir. Burada üretilen radyasyon sayesinde, bilim adamları araştırma yapma imkanı buldular. Günlük hayatta aşına olunan haliyle radyasyon X ışınları sayesinde insan vücudu, röntgen cihazları aracılığıyla görüntülenir.

Radyoaktivite nin tanımını yapacak olursak; kararsız halde bulunan çekirdeklerin, alfa, beta, gama yayımlama eğilimi olarak tanımlayabiliriz. Doğal radyoaktivite diğer adıyla, doğal radyoaktiflik, ağır elementlerde görülür, örneğin uranyum gibi.

Henri Becquerel, yapmış olduğu deneyde, karanlıkta uranyum tuzunun fotoğrafik levhada bıraktığı izleri gözlemlemesi nedeniyle SI sisteminde, Becquerel radyoaktivite birimi olarak isimlendirilmiştir.

Uranyumun, doğal radyoaktivite'ye sahip olduğunun anlaşılması bir tesadüf üzerine gerçekleşmiştir. 1 mart günü Henri Becquerel, havanın kapalı olmasından dolayı bir gece önceden, uranyum sarılı filmi çekmecesine bıraktı. Ertesi gün filmi banyo ettiğinde ise ışımaya olduğunu farketti, böylece doğal radyoaktivite tesadüfen keşfedilmiş oldu.

Madam Curie uranyumun yaydığı ışınlar üzerine yaptığı çalışmalarda, sonradan Radyoaktivite olarak isimlendirilecek, sonuçlara ulaştığı sıralarda Becquerel aynı dalda çalışmalarına devam etmekteydi. Farklı elementler üzerinde çalışmalar yapan Madam Curie sadece Uranyumun değil, Toryumunda bu ışımayı yaptığını keşfetti. Aynı zamanda Uranyumun ışımamasından meydana gelen elementin Polonyumu keşfettiklerini duyurdular. Madam Curie bu çalışmalarını neticesinde 1903 yılında Nobel fizik ödülü ve 1911 yılında Nobel kimya ödülünün sahibi olmuştur.

Daha detaylı incelersek, kararsız halde bulunan atom çekirdeği, bozunarak kararlı bir çekirdek haline alır. Ağır elementlerin kararsız durumda bulunan çekirdeklerinin bozunmasına radyoaktivite denir. Bozunmaya uğrayan çekirdekten, alfa, beta, gama gibi ışınlar yayımlar ve ayrıca enerji açığa çıkar. Ayrıca çekirdek kararsız durumdan kararlı duruma geçmek için bozunmaya uğrar.

Kararlı hale geçerken radyasyon kaynaklı enerji yayımlaması gerçekleşir. Ayrıca radyoaktivite üretmek için, nükleer fisyon da kullanılabilir. Fisyon'nun tanımını yaparsak, genel olarak ağır çekirdeklerin bozunumuna denir(Anonim 2).

Kararlı bir duruma geçmek için bozunup, parçacık ve enerji açığa çıkaran çekirdeklere, radyoaktif çekirdek(radyoaktif element) denir.

Doğal radyoaktiflik, rastgele gerçekleşen bir durumdur ve aktif haldeki elementin çekirdeğinin, yarı ağırlığına ulaşma durumuna bu çekirdeğin (elementin) yarılanma ömrü denir.

### **1.3. Foto Aktivasyon Analizinin Temel Prensipleri**

Temel olarak kararlı durumdaki bir çekirdek, radyasyona maruz bırakılır. Bu durumda çekirdek uyarılmış olur. Uyarılmış halde bulunan kararsız ürün çekirdekleri oluşabileceği gibi eğer bu uyarılma ( $\gamma$ ,  $\gamma$ ) durumunda izomerik geçişler olarakta gözlemlenebilir. Her iki durumda da çok kısa bir süre kararsız halde bulunan çekirdek taban duruma, yani kararlı hale geçerken karakteristik gama ışını yayımlayacaktır (Segebade ve Berger 2008).

Yayımlanan karakteristik gama ışını ele alınan maddenin parmak izi niteliğindedir. Bu karakteristik gama ışını ölçülmesi yoluyla madde hakkında bilgi toplanır.

Maddeyi uyarmak için foton kullanılır. Günümüzde foton kaynağı olarak elektron hızlandırıcılar kullanılmaktadır. Bu elektron hızlandırıcılardan elde edilen bremsstrahlung frenleme fotonları madde ile etkileşime sokularak, ( $\gamma, p$ ) proton kopmalarına, ( $\gamma, n$ ) nötron kopmalarına, ( $\gamma, \gamma$ ) izomerik geçişlere neden olabilir.

Bu etkileşimler sonucu kararlı hale geçerken yaydığı karakteristik gama fotonu ölçülerek, hakkındaki bilgilere ulaşılır. PAA metodu jeoloji, tıp, kimya, arkeoloji gibi alanlarda hassas ölçüm ve maddeye zarar vermemesinden dolayı tercih edilen bir yöntemdir (Gilmore 2008).

## 2. KURAMSAL BİLGİLER

### 2.1. Çekirdek ve Özellikleri

#### 2.1.1. Çekirdeğin yapısı

Atom çekirdeği bildiğimiz anlamda ki keşfi Ernest Rutherford tarafından 1911 yılında gerçekleşmiştir. Çekirdeğin durumu hakkında, atomun merkezinde yer alır, bünyesinde nötron ve protonlar bulunur. Yoğun bir durumda olan bölge olarak tanımlanmıştır.

Yapılan bu keşfin ön hazırlığı Geiger-Marsden tarafından gerçekleştirilen altın levha deneyine dayanmaktadır. Atom çekirdeğinin bugünkü anlamda, proton ve nötronlardan oluştuğunu tanımı da 1932 senesinde nötronun keşfedilmesiyle birlikte, Dimitri Ivanenko ve Werner Heisenberg tarafından keşfedilmiştir (Anonim 3).

Çekirdek atom içinde, toplam atom kütlelerinin tamamına yakınına denk gelmektedir. Elektron bulutu toplam kütlede ki oranı çok azdır. Çekirdeği oluşturmak için, çekirdeğin bünyesinde bulunan kuvvetler tarafından, nötron ile protonlar çekirdeği oluşturmak için birbirine bağlanmıştır.

Basit ve anlaşılabilir yapısı sebebiyle hidrojen atomunu ele alırsak, hidrojen atomunun tek bir proton için çekirdek çapı 1.75 fm'dir. Farklı çekirdek çaplarını incelersek bu oran, 1.75 ila 15 fm arasında değişen büyüklüklere sahiptir. Örneğin daha ağır bir element olan uranyumun çekirdek çapı 15 fm'dir. Bahsi geçen boyutlar, atomun çapından daha küçüktür.

Çekirdeğin yapısında nötronlar ve protonlar bulunur. Kuark ise proton ve nötronların temel yapı taşı olarak ele alınabilir. Güçlü çekirdek kuvveti ise, baryonlar sayesinde hadronların yapılarında kararlı bir biçimde birleştirme etkisinden dolayı proton ve nötronlar bir arada durmaktadır.

Çekirdek içerisindeki protonların pozitif yüklerinden dolayı birbirlerini itmeleri beklenir. Ancak böyle bir durumda çekirdek bir arada duramazdı. Protonların birbirlerini itmemesi için güçlü çekirdek kuvveti, tüm protonları, baryonlar yardımıyla yeterli mesafede tutup, nötron ve protonları birbirine bağlarlar. Güçlü çekirdek kuvvetinin etkisi sınırlıdır, çekirdek içerisinde bir etkiye sahiptir, çekirdek dışında yada kenarında bir etkisi yoktur.

Çekirdeğin proton etkisiyle oluşturmuş olduğu pozitif elektriksel yük sayesinde, negatif yüklü, çekirdek çevresindeki yörüngede denge halindeki elektronlar bulunmaktadır. Çekirdek çevresinde ve belli bir yörünge dahilinde hareket etmekte olan elektronlar belli konfigürasyon için aynı özellikleri göstermektedirler.

Bu topluluğu kapsayan küme ise toplam elektronların sayısıdır. Bu elektronlar dışarıdan bir müdahale olmadığı sürece kendi yörüngelerinde kararlı olarak hareket etmektedirler. Kimyasal elementler olarak ele alırsak, elementler atomları temsil etmekte, ve bir atom kimyasal özellik olarak proton sayısı ile ele alınmaktadır. Eğer ele alınan element nötr bir atom ise çekirdekde var olan proton sayısı ile aynı sayıya sahip elektron sayısı bulunmaktadır.

Kimyada kararlı hale geçmek, fizikten farklı olarak elektron paylaşma metodu aracılığıyla gerçekleşir, ve bu sayede daha kararlı bir yapıya geçebilirler. Bu durumu gerçekleştirmek çekirdekte gerçekleşen reaksiyonlardan daha kolay gerçekleşebilir ve gözlemlenebilir. Çünkü elektron değişimini makro dünyada gözlemleyebiliriz.

Çekirdekte protonlar, tüm yükü gösterirler ve böylece kimyasal olarak kendine özel olan durumlarını yani kimliklerini tanımlamış olurlar. Nötron ise çekirdekte toplam kütle içerisinde protonlarla yakın değere sahiptirler.

İzotop atomlarda ise nötronların yeri ve önemi büyüktür. Nötronlar aracılığıyla izotop tanımını yapabilmekteyiz. İzotop aynı kimyasal elementin çeşitliliği anlamına gelmektedir. Ele alınan elementler arasındaki fark ise yalnızca atom külesidir. Kimyasal olarak herhangi bir farklılık gözlenmemektedir.

### 2.1.2. Nükleer Kuvvet

Atom altı parçacıklar arasında, nükleer kuvvet adı verilen bir kuvvet vardır. Bu kuvvet nükleonları yani, proton ve nötronu çekirdek içerisinde tutmaktadır. Nükleonlar, nükleer kuvvetten aynı oranda etkilenmektedirler (Anonim 4).

Çekirdek yapısına bakıldığında, proton sahip olduğu yüklerden dolayı, birbirlerini iterler ancak bu itici manyetik kuvvet, çekici nükleer kuvvetten daha azdır. Bu yüzden çekirdek içerisinde denge halinde bulunurlar.

Nükleer kuvvet, etki mesafesi az olmasına rağmen yaklaşık 1 fm, çok güçlü bir etkiye sahiptir, ve çekici bir kuvvettir

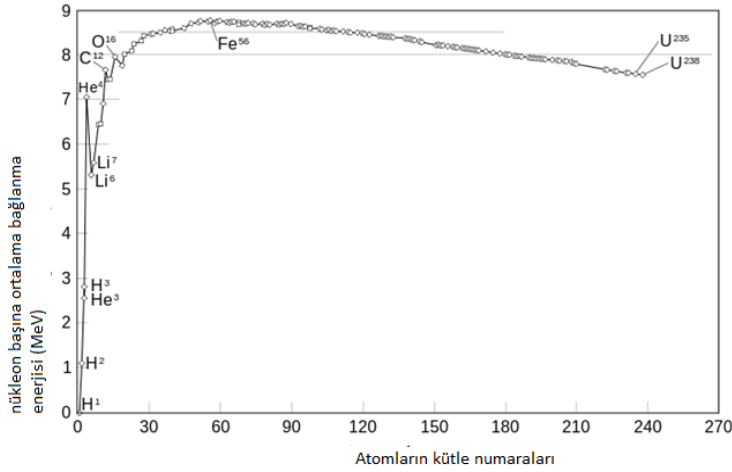
Çekici bir kuvvet olan nükleer kuvvet, eğer yaklaşık 0.7 fm'den daha az uzaklıkta ise itici kuvvete döner. Bu durum çekirdeğin boyutunu etkiler, çünkü protonlar ve nötronlar, nükleer kuvvetin belirli bir mesafesinden daha yakına gidemezler.

### 2.1.3. Bağlanma Enerjisi

Bağlanma veya koparma enerjisi aynı anlamdadır. Atom çekirdeği bir arada bulunmasını sağlayan enerji veya koparma için gereken en az enerjiye bağlanma enerjisi denmektedir.

$$B = (\Delta m)c^2 = [Zm_p + Zm_n - m({}_Z^AX - Zm_e)]c^2 \quad (2.1)$$

Formül tanımı olarak bağlanma enerjisi bünyesindeki proton ve nötron kütle enerjileri arasındaki farka eşittir.



**Şekil 2.1.** Nükleon başına düşen ortalama bağlanma enerjisi (MeV)(Segebade vd 1988).

Grafiği incelersek;

Bağlanma enerjileri, ortalama nükleon olarak düşük olan element grubu, ağır ve atom numarası 20'den az olan elementlerdir.

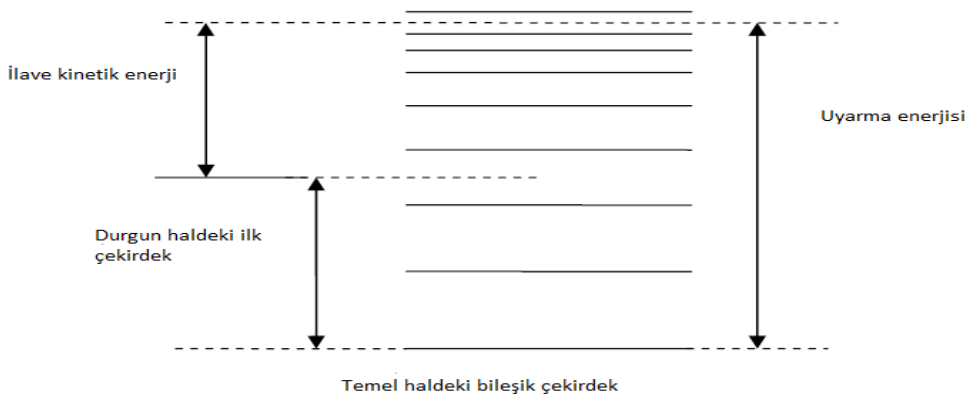
Proton ve nötron (nükleon) başına düşen, en küçük enerji değerine sahip olan atom hidrojenidir.

En kararlı alan da yer alan elementler, nikel, kobalt, bakır, çinko gibi element grubudur. Enerji değeri olarak en çok enerjiye sahip element demir (Fe), 8,8 MeV değerine sahiptir.

Kütle numaraları 50-100 aralığındaki element grubu, proton ve nötron başına en fazla bağlanma enerjisine sahip olan element grubudur. Doğal radyoaktiviteye sahip element grubu ise, kararsız yapıda karşımıza çıkar.

### 2.1.4. Nükleer uyarılmış durumlar

Uyarılmış durumlar, çiftlenmiş nükleonların oluşturduğu çekirdeğe enerji verilerek meydana getirilebilir. Bu enerji çekirdeğin kolektif dönme veya titreşim enerjisi şeklinde olabilir veya iki değerlik nükleonu oluşturacak biçimde bir çifti kırabilir (Krane, 1988).(Şekil 2.2)'de temel düzeyde gerçekleşen enerji geçişleri ve durum geçişleri gözlemlenebilir.



**Şekil 2.2.** Nükleer uyarılmış durumlar temel gösterimi (Krane 1988).



## 2.2. Radyoaktivite ve Bozunum Yasası

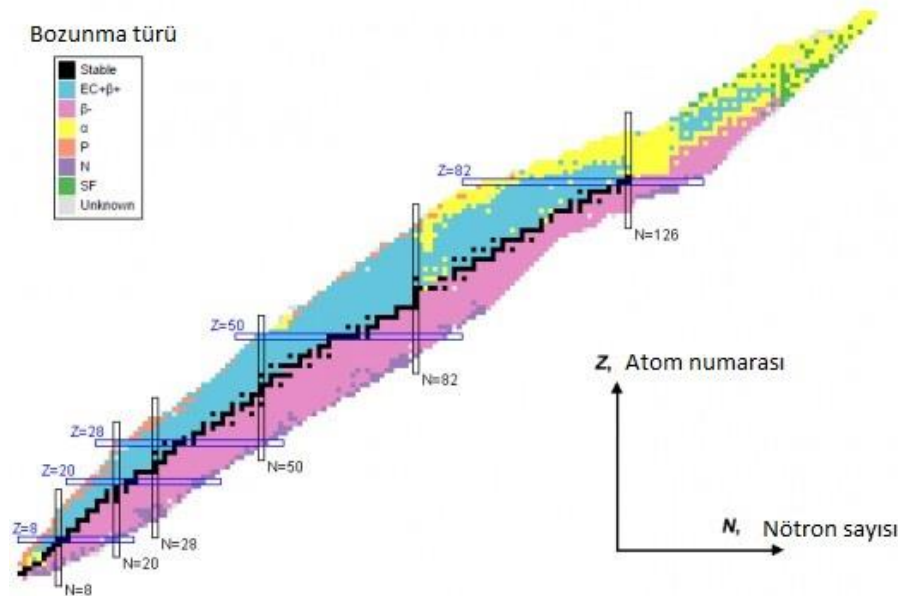
İki çeşit radyoaktiflik vardır. İlki doğal radyoaktiflik ikincisi ise yapay radyoaktifliktir. Doğal radyoaktiflik, genelde ağır elementlerin uranyum gibi, kendiliğinden ışımasıyla, yani kararlı hale geçmeye çalışmasıyla meydana gelen radyoaktifliktir. İkincisi ise kararlı haldeki bir çekirdeği, elektron veya nötron hızlandırıcısıyla aktif hale getirerek, kararsız halden kararlı hale geçerken yayımlamış olduğu radyasyondur.

Radyoaktiflik çeşitlerinden olan doğal radyoaktivite de, element özellikleri itibariyle, enerjisi yüksek ve kararsızdır. Bu elementler kararlı forma geçmek için sürekli ışınla yayarlar.

Diğer bir radyo aktiflik te yapay radyo aktifliktir. Yapay radyoaktiflikte, kararlı halde bulunan bir çekirdek, genellikle elektron ya da nötron nadiren proton ya da gama ışınlarına maruz bırakılarak, yani bombardıman edilerek kararsız hale getirilmeye çalışılıyor, tekrardan kararlı hale dönmek isteyen çekirdek bu sırada bozunmaya uğrayarak, etrafa radyasyon yayımlıyor.

### 2.2.1. Radyoaktif bozunum

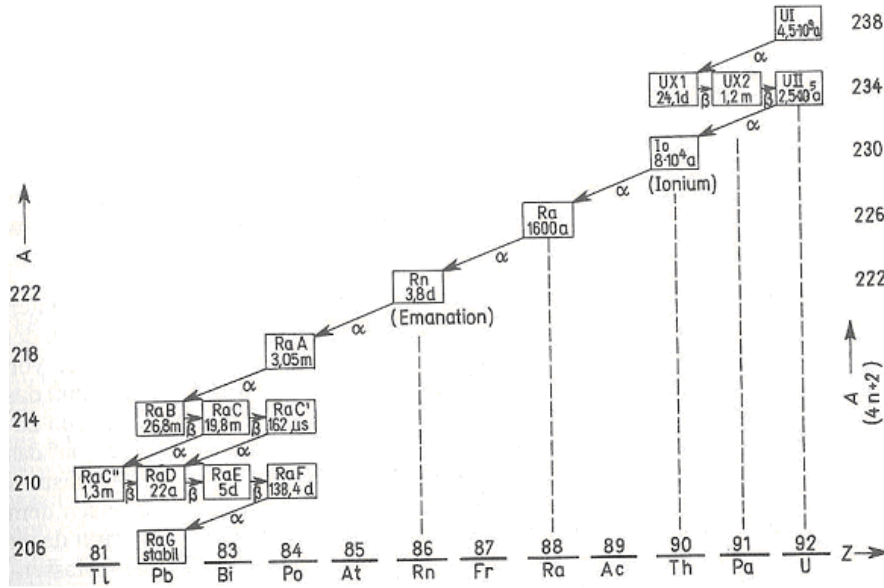
Atom çekirdeğindeki tanecikler sayesinde veya elektromanyetik ışınla yayarak kendiliğinden parçalanmasına doğal radyoaktivite denir. Kararsız haldeki doğal radyoaktif maddeler ışınla yayarak kararlı hale geçmeye çalışırlar.



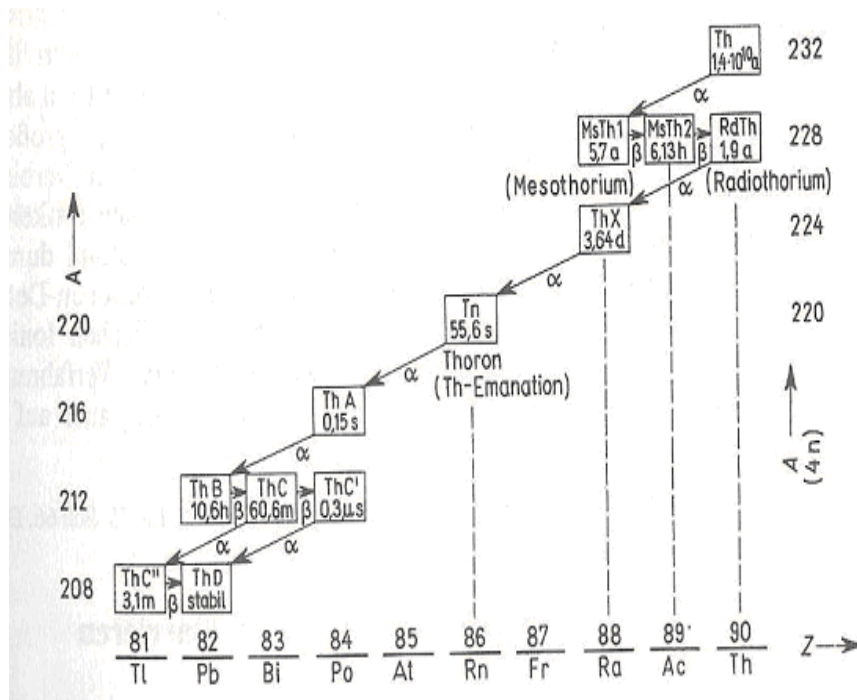
Şekil 2.3. Radyoaktif bozunum bölgeleri (Anonymous 1).

Kararlı hale geçmeye çalışan, kararsız haldeki çekirdekler, izotoplar halinde kararlı duruma geçene kadar başka bir izotopa dönüşerek sürece devam eder. Ancak kararlı hale geçince

bu işlem sona erer. Kararlı hale geçene kadar oluşan bu izotoplara seri isimleri verilmiştir. Bunlardan ilki Toryum serisi (Th) (Şekil 2.5), ikincisi Aktinyum serisi (Ac), üçüncüsü ise Uranyum(U) (Şekil 2.4). Aşağıda bu serilerin gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. Uranyum serisi (Segebade 1988).



Şekil 2.5. Toryum serisi (Segebade 1988).

Grafikler incelendiğinde bozunma türü olarak daha fazla gözlemlenen tür  $\beta$  bozunumudur. Diğer durumlar ise  $\alpha, \gamma$  bozunumları veya fisyon şeklinde gerçekleşir.

Belirli bir zamanda buna biz t dersek, var olan radyoaktif parçacık sayısına N dersek, oluşan sürece dışardan herhangi bir etkiye bulunulmadığı takdirde, limit zamanda yani, dt

zamanda parçalanana (bozunan) çekirdek sayısına  $dN$  dersek, tüm çekirdek sayısı olan  $N$  ile orantılı olarak değişecektir.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.3)$$

Denklem (2.3) yeniden düzenlendiğinde aşağıdaki hali alır.

$$dN/N = -\lambda dt \quad (2.4)$$

Bu ifadenin integrali alınırsa  $\ln N = -\lambda t + C$  elde edilir. Eğer  $t=0$  anında  $N_0$  radyoaktif çekirdek varsa  $C = N_0$  olur. Böylece Denklem (2.5) elde edilir ve bu denklem radyoaktif bozunma kanunu olarak adlandırılır.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

Bozunmamış çekirdek sayısını hesaplamak için  $t_1$  ve  $t_2$  zaman aralığında bozunmuş çekirdek yani radyasyonu ölçersek bozunmamış çekirdek sayısını hesaplayabiliriz (Krane 1988).

$t$  zamanında gerçekleşen aktif olma durumu,

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

burada  $A_0 = \lambda N_0$ .

Yarılanma ömrü, ya da yarı ömrün tanımını yaparsak, tüm çekirdek sayısının belirli bir süre içerisinde yarıya düşmesine yarılanma ömrü ya da yarı ömür diyoruz. Simgesi  $t_{1/2}$  şeklindedir. Matematiksel olarak gösterimi ise,  $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$  şeklindedir. Yarılanma süresince geçen ortalama zamana, ortalama ömür süresi dersek bu da,  $\tau = (1/\lambda)$  şeklinde olacaktır. Maddenin radyoaktiflik değeri  $e$  ile ters orantılı olarak yani,  $1/e$  şeklinde azalacaktır.

Birim zamandaki bozunma sayısı için (Aktiflik) bozunma/s birimi teorik olarak kullanılır. Aktifliğin önceki birimi Curie (Ci) dir. Curie'nin bozunma/s türünden değeri  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$  bozunma/s dir. Günümüzde SI birim sisteminde Becquerel (Bq) kullanılmaktadır. Becquerel'in tam karşılığı bozunma/s dir.

Radyoaktif bozunma kanununun uygulanabileceği örneklerden birisi, belirli bir radyoaktif çekirdeğin radyasyon yayınlamaya kararlı bir son çekirdeğe dönüşmesidir. Bu durumda 1. tür radyoaktif çekirdek  $\lambda_1$  bozunma sabiti ile 2. tür çekirdeğe bozunur.

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (2.7)$$

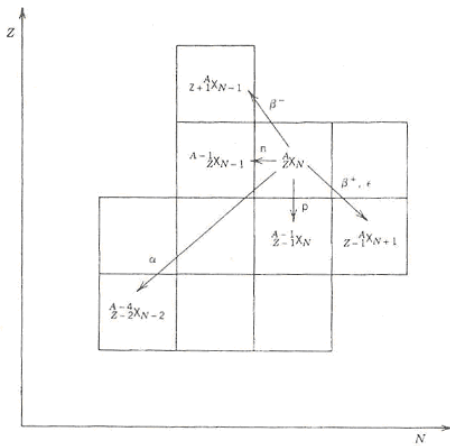
Denklem (2.7) de  $t=0$  anında 1. tür radyoaktif çekirdekte  $t$  süre içinde radyasyon yayarak bozunma sonucu, bozunmadan kalan çekirdeklerin sayısını ( $N_1$ ) verir. 2. tür çekirdek sayısını hesaplırsak,  $N_2 = N_0 - N_1 = N_0 - N_0 e^{-\lambda_1 t}$  tane 2. tür çekirdek olacaktır.  $N_2 = N_0 - N_1$  dersek;

$$N_2 = N_0(1 - e^{-\lambda_1 t}) \quad (2.8)$$

Eğer  $t$  burada sonsuza giderse çekirdek her durumda 2.tür e dönüşecek demektir.  $N_1 + N_2 = N_0$  bunun anlamı  $t$  süre sonunda bozunmadan kalan 1.tür çekirdek sayısı ile kararlı halde bulunan 2.tür çekirdek sayısının toplamı başlangıçta bulunan çekirdek sayısını verecektir.

### 2.3 Bozunum türleri

Kararsız bir çekirdek kararlı bir hale geçerken  $\alpha$ ,  $\beta$  veya  $\gamma$  yayımlar. Bu sayede kararlı hale geçerken kütle numarasında değişiklik meydana getirebilir. Ancak  $\gamma$  bozunumu çekirdeğin uyarılıp temel hale dönme durumudur ve kütle numarası değişmez. Bu bozunum türlerini (Şekil 2.6)'da gözlenlebilir.



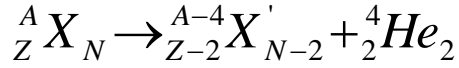
Şekil 2.6. Bozunma türleri (Kösehan 2015).

#### 2.3.1. $\alpha$ bozunumu

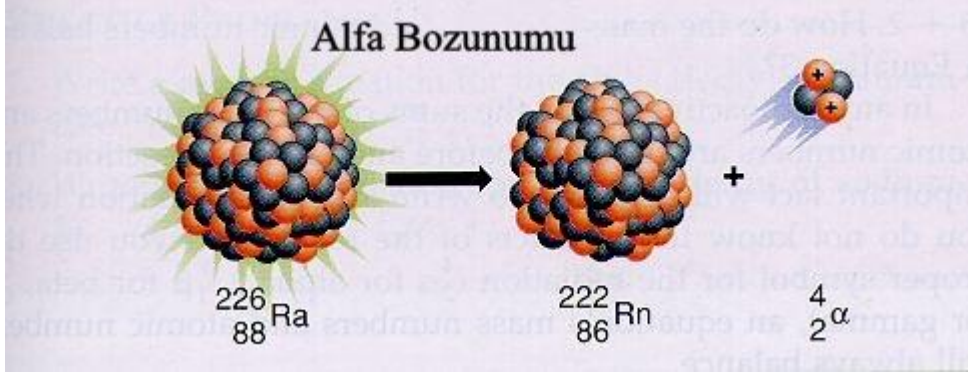
Doğal radyoaktif elementler, özellikle atom numarası 83'den daha fazla olan elementler, kararlı duruma geçmek için, atom numaralarını ve kütle numaralarını düşürerek, p/n oranını eşitlemeye çalışırlar. Büyük atom ve kütle numarasına sahip oldukları için, alfa ışınması, diğer bir ifadeyle He çekirdeği yayımlaması yaparlar. Ağır parçacığın He çekirdeği yayımlamasına alfa bozunumu adı verilir (Şekil 2.7)'de detaylı olarak gözlemlenebilir.

Eğer bir çekirdek, alfa bozunumu yaparsa, kütle ve atom numarası sırasıyla, 4 ve 2 azalır. Bu durumda atom numarası aradaki farktan dolayı 2 azalacaktır. Alfa parçacığının ağır bir parçacık olmasından dolayı, alfa( $\alpha$ ), giriciliği düşük olan bir parçacıktır. Ayrıca alfa parçacığı fotoğraf filminde iz bırakır.

Alfa parçacığının genel özellikleri ise, alfa parçacığı (+) yüke sahiptir. Bu yüzden elektrik alanında ve manyetik alanında (-) kutba doğru sapar. Alfa parçacığı karşılaşmış oldukları çekirdeklerde iyonlaşmaya sebep olur. Bunun nedeni ise molekülden elektron koparmış olmasıdır. Bir X elemanı için alfa ışınması sonunda, meydana gelen değişim aşağıdaki denklemde mevcuttur.



Burada X ana çekirdek, X' oluşan yeni çekirdek



Şekil 2.7. Alfa bozunumu (Anonim 5).

### 2.3.2. Beta bozunumu

$\beta$  Bozunumu üç şekilde gerçekleşebilir ve elektron yakalama (Electron capture, EC),  $\beta^+$  pozitron bozunumu,  $\beta^-$  negatron bozunumu olarak tanımlanırlar.  $\beta$  bozunumu türüne göre bir protonun nötrona dönüşmesi ( $\beta^+$ ) veya nötronun protona dönüşmesi ( $\beta^-$ ) olarak tanımlanır.

Beta ışınımının (bozunumunun) özellikleri

Alfa ışınımından daha hafif bir kütle ye sahip olduğu için, elektrik alanda ve manyetik alanda daha fazla saparlar. Beta nın yükü (-) olduğu için, bu sapma (+) kutba doğru olacaktır.

Alfa parçacığına göre, beta nın iyonlaştırma etkisi daha düşüktür.

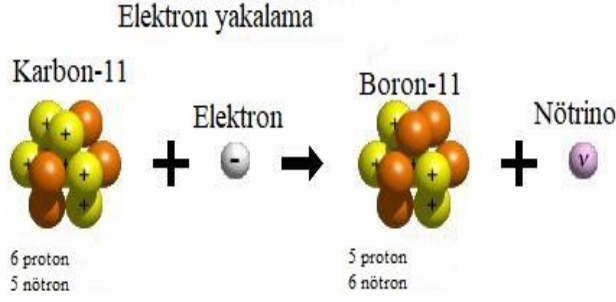
Hafif bir parçacık olmasından dolayı ışık hızı civarındaki hızlara daha kolay ulaşırlar.

Beta ışınım fotoğraf filminde iz bırakır.

Beta ışınımı, gama ışınımına göre az, alfa parçacığına göre daha fazla giricidirler.

### 2.3.3. Elektron yakalama

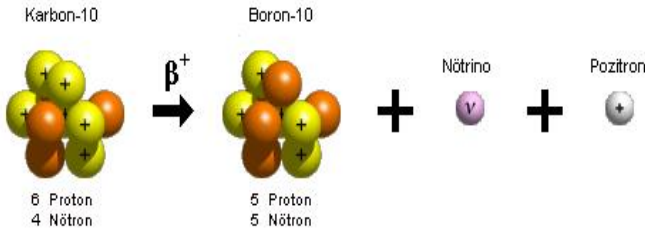
Elektron yakalama durumu, atom çekirdeğine en az mesafede duran orbitalden alınan elektron, çekirdekteki protonla etkileşerek, yeni bir nötron oluşturmasına, elektron yakalama denir. Şematik olarak gösterimi ise (Şekil 2.8)'deki gibi gerçekleşir.



Şekil 2.8. Elektron yakalama (Anonymous 2).

### 2.3.4. Pozitron bozunumu ( $\beta^+$ ışıması)

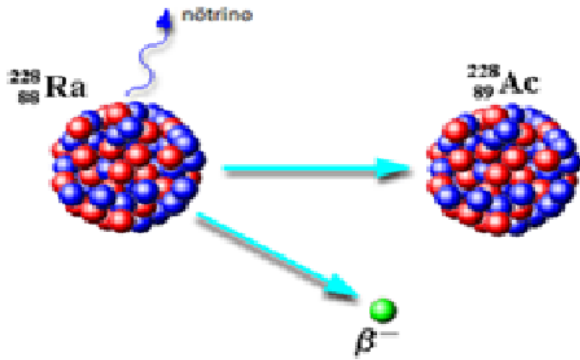
Pozitron, elektron ile aynı kütleye sahip ve yükü +1 dir. Bu bozunma çeşidi, radyoaktif yani kararsız durumdaki çekirdekte görülen bir bozunma türüdür. Bu bozunma yapmanın amacı n/p oranının artması içindir. Pozitron  $\beta^+$  parçacığı şeklinde gösterilir (Şekil 2.9). Sıklıkla gözlemlendiği grup ise, atom numarası 20'den daha az olan kararsız haldeki elementlerin, kararlı hale dönüşlerinde gözlemlenir. Bu ışıma sonucu kararlı hale geçerken bazı ürünlerde oluşur,  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$  denkleminde ürün olarak nötrinolar da oluşur. Bunun nedeni ise açısal momentum ile enerji korunmasından dolayıdır (Anonim 6).



Şekil 2.9. Pozitron bozunumu (Anonim 7).

### 2.3.5. $\beta^-$ bozunumu

Beta ışıması çekirdekte en yaygın görülen ışımalardandır. Bu ışıma radyoaktif (kararsız) durumda bulunan çekirdekte elektron atılması olayıdır. Atom çekirdeğinde elektron bulunmaz, ancak bir nötron parçalanarak, proton ve elektrona bölünür, elektron'da çekirdek dışına fırlatılır (Şekil 2.10).



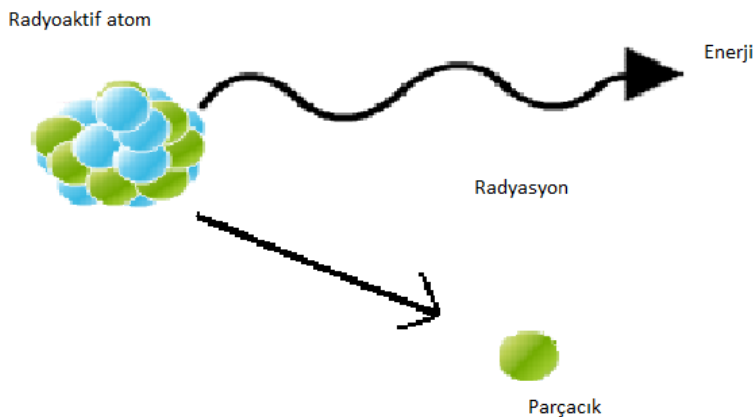
Şekil 2.10.  $\beta^-$  bozunumu (Anonim 8).

Beta bozunumunda atom numarasının sayısal değeri 1 artarken, kütle sayısı burada değişmez. Nötron çekirdekte, proton ve elektron olarak parçalandıktan sonra, proton çekirdekte kalır. Negatron yani beta ışınımı elektron kaynaklı olduğundan dolayı, elektrik alanda ve manyetik alanda sapma gösterirler.

### 2.3.6. $\gamma$ bozunumu

Kararsız haldeki çekirdekte, bozunum sonrasında tanecikler yeniden bir düzen alır. Olması gerekenden daha yüksek bir enerji değerine sahip olan çekirdekler, uyarılmış durumda bulduklarını gösterir. Bu uyarılan çekirdek, bir başka ışımaya türü olan gama ışınması yaparak kararlı hale dönmek isteyecektir. Gama ışınması atom çekirdeğindeki n/p oranını değiştirmez. Gama kararsız durumdan kararlı hale geçerken yayılan enerjidir (Şekil 2.11). Bir atom tek başına gama ışınması yapamaz, gama üründür. Yani alfa, pozitron yada negatron ışınmasının bir sonucu olarak tezahür edecektir.

Gama ışınımının özelliği, Kütsesizdir, bu yüzden gircilikleri alfa, pozitron ve negatrondan daha fazladır. Herhangi bir elektron yüküne sahip değildir. Yani ne pozitif ne de negatiftir, bu yüzden elektrik alanda veya manyetik alanda sapma göstermezler. Fotoğraf filminde iz bırakırlar.



Şekil 2.11. Gama bozunumu (Anonim 9).

## 2.4. Radyasyon Madde Etkileşimi

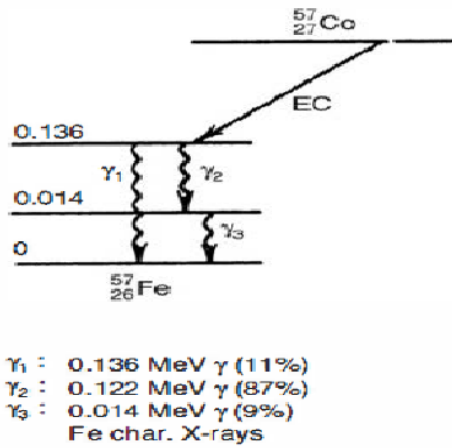
Bir maddenin enerjisini hesaplamak için, enerji soğurma sayısına bakmamız gerekir. Bir yüke sahip parçacıkların, bir maddenin içerisinden geçtiklerinde, iki ana unsur değişir. Bunlar'dan birincisi sapma doğrultusu, ikincisi ise enerjisi.

Bir beta ışınmasında meydana gelen, nötronun, proton ve elektrona parçalanmasından sonra, elektronun çekirdekte elastik çarpışması ile elektronun çekirdekten dışarıya fırlatılması bu etkilerin sonucudur.

Bir yüke sahip parçacıkları yüklerine göre iki ana grupta inceleyebiliriz. Bunlardan birincisi hafif yüklü diğeri ise ağır yüklü parçacıklar olarak. Hafif yüklü parçacıklara örnek olarak, elektron ve pozitron verilebilir. Ağır yüklü parçacıklara ise, proton ve alfa parçacıklarını örnek gösterebiliriz.

### 2.4.1. Ağır yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi

Ağır yüke sahip olan parçacıklar, proton ve alfa gibi, soğurucu bir bölgeye girdiklerinde, Coulomb kuvvetinden etkilenirler. Bunun nedeni ağır yüklü pozitif parçacıkların, yörüngede bulunan negatif yüklü elektronlar ile etkileşmesindedir. Burada proton ve alfa gibi parçacıkların inelastik çarpışmasından dolayı, bir enerji kaybı meydana gelecektir (Şekil 2.12). Etki ettiği bölgeden sonra, gelen parçacık eğer, atomun enerjisinden daha fazla iyonlaştırma enerjisine sahip ise, etki ettiği bölgedeki tüm atomları iyonlaştırmak amacıyla maddeye iletir.



Şekil 2.12. Co bozunum şeması (Segebade 1988).

Çekirdek'te elastik saçılma gerçekleşebilmesi için, bir yüke sahip olan parçacıkların, çekirdekle reaksiyona girmesi gerekir. Giriciliği düşük olan alfa partikülü ile çekirdeğin etkileşme oranı çok düşüktür. Ancak beta ya da pozitron ile etkileşime girme olasılığı daha fazladır. Çekirdek içerisine giremeyen ağır partiküller, elastik saçılma ile yön değiştirerek atom çekirdeğinden uzaklaşırlar ( J.L.Magee ve A.Chatterjee 1980).



### 2.4.2. Elektronların madde ile etkileşimi

Birbirine benzerlik gösteren etkileşimler, elektron etkileşimleri ve pozitron etkileşimleridir. Ağır yüklü parçacıklarda meydana gelen iyonlaşma etkisi, aynı zamanda beta parçacığı içinde, geçerli bir durumdur. Bunun nedeni ise, atom çevresindeki elektrik alandan kaynaklanır.

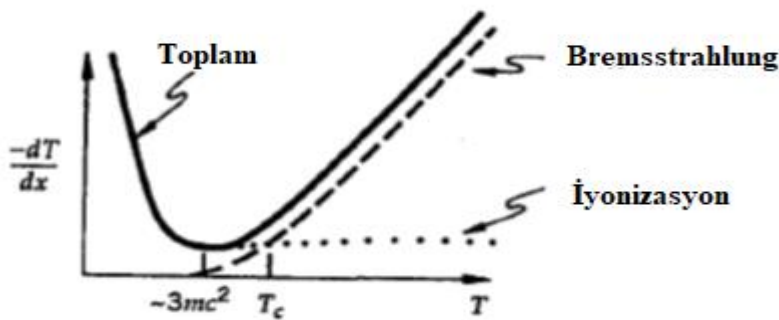
Ağır yüklü parçacıkların, madde içerisindeki hareketleri çok yavaştır. Ancak pozitron ya da elektron'unun madde içerisindeki hareketi, ağır yüklü parçacıklara göre daha hızlıdır. Burada incelenen beta ışınması, daha yüksek hızda (enerjide) olacağından dolayı, ışınma yaptıkları sırada geçtikleri bölgelerde bir enerji yitimine uğrarlar.

Beta ışınmasının uğramış olduğu enerji kaybının özel adı, Bremsstrahlung isimli, devamlı bir X ışınımı halinde ortaya çıkar. Diğer bir adıyla frenleme ışınımı olan bu durumun ortaya çıkmasının nedeni, elektronun ivmeli bir hareket yapmasından dolayıdır. Elektron, çekirdek'te var olan Coulomb etkileşiminden dolayı, sapmaya uğrayacaktır.

Ele alınan beta parçacıkları, eğer düşük bir enerji düzeyinde ise, kaybedilen enerji daha düşük olacaktır. Beta parçacıkları, kaybettiği enerjisinin büyük bir bölümünü, Moller ve Bhabha saçılmasında gerçekleştirecektir.

Bu saçılma çeşidinin gerçekleşmesi, inelastik şekilde gerçekleşir. Parçalanmış nötronlardan oluşan elektronlar ile yörünge elektronları arasında gerçekleşir. Buna Moller saçılması adı verilir. Diğer çarpışma şekli ise, pozitronların, nötronun parçalanması ile oluşan, atom elektronları ile çarpışmasıyla gerçekleşir. Bu çarpışmaya Bhabha saçılması adı verilir.

Burada kararsız halde yayımlanan radyasyondaki, beta ışınlarının enerjisi arttırılırsa, enerji kaybı daha fazla olacaktır. Bremsstrahlung ışınımında, kaybedilen enerji ile, inelastik çarpışmada kaybedilen enerjinin eşit olduğu enerji değerine, kritik enerji ya da eşik enerjisi adı verilir. Eğer kritik enerji seviyesinden daha fazla bir enerji kaybı söz konusu ise, radyasyondaki enerji kaybı artacaktır. Bir parçacığın atom çekirdeği içerisine girmesi için eşik enerjisi kadar enerjiye sahip olmalıdır (Şekil 2.13). Aksi takdirde parçacık, atom çekirdeği tarafından saçılır. Atom çekirdeği tarafından saçılan elektronlar, saçıldıkları ortama enerji aktarmazlar, ancak dedektör sisteminde fark edilebilirler.



Şekil 2.13. Elektronun madde içerisindeki enerji kaybı (Segebade 1988).

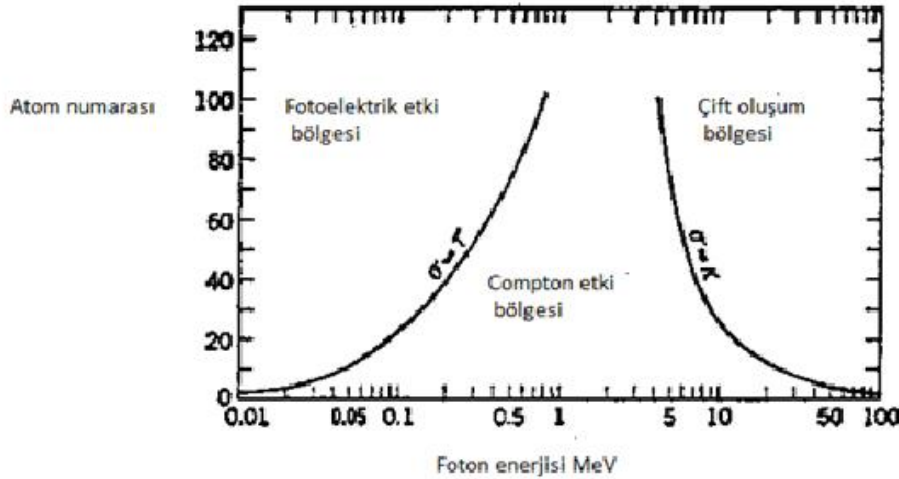
### 2.4.3. Foton madde etkileşimi

E.M. radyasyon olarak 3 tip ışınma düşünülebilir. Bunlar frenleme radyasyonları, gama ışınımı ve x ışınımı olarak sınıflandırılabilir. X ışını ve gama ışınları elektrik ve manyetik alanda sapma göstermedikleri için, atomdaki Coulomb kuvveti tarafından algılanmazlar.

Fotonlar olarak isimlendirilen, x ışını ve gama ışınları e.m. kuvveti ileten ışınımlardır. Çalışma prensiplerinde, madde içerisinde ilerlemelerini sağlayan şey ise, iyonlaşma ve enerjiyi hapsedebilme yetenekleridir.

Genel olarak, x ışını ve gama ışınlarının madde ile etkileşimi, alfa, beta gibi bir yüke sahip olan parçacıklardan çok farklıdır. Burada dikkat çekilmesi gereken ışın gama olursa, yüklü parçacıklardan ziyade, tüm enerjisini uğramış olduğu bir reaksiyonda kaybedebilir. Ayrıca gama ışınımı herhangi bir menzile sahip değildir, sonsuz uzaklıktaki madde ile etkileşebilir.

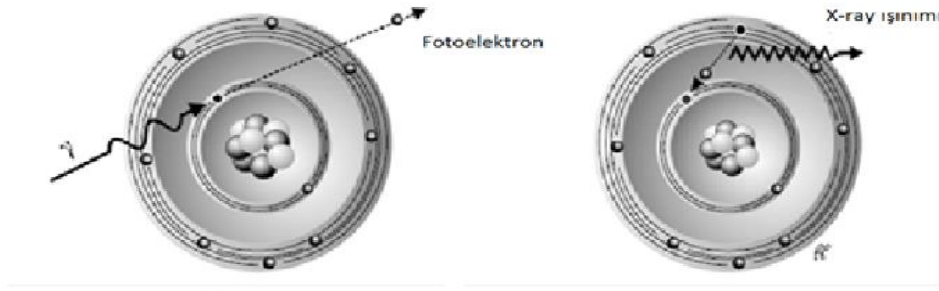
Fotonların etkileşimleri bölgesi, (şekil 2.14)' te detaylı olarak verilmiştir. Enerji seviyelerine göre sıralarsak, fotoelektrik olay ilk bölgede, ikinci bölgede ise Compton saçılması, üçüncü bölgede ise çift oluşum yer alacaktır.



Şekli 2.14. Gözlemlenen etkileşim bölgeleri (Segebade 1988).

#### 2.4.3.1. Fotoelektrik olay

Gelen düşük bir enerjiye sahip fotonun, soğurma özelliği bulunan elektron ile, etkileşerek kinetik enerjili başka elektron yayımlamasıdır (Şekil 2.15). Yayımlanan elektron sonucunda, elektron seviyesi boşalacağından, çekirdek yörüngesinde bulunan başka bir elektron, boşalan bu seviyeye doğru hareket eder. Bunun sonucunda X ışınımı yayımlanır.



Şekil 2.15. Fotoelektrik olay (Onay 2010).

Çekirdek içerisinde, nötron parçalanmasından oluşan elektron, sıfır potansiyel altında hareket edebilmesi için, gerekli enerjiye  $I_B$  ve çekirdeği etkilemek için dışardan gelen X ışını ya da gama ışınının enerjisi  $h\nu$  ise, korunum yasasından faydalanarak, fotoelektrik olaydaki Einstein bağıntısı aşağıdaki gibi olacaktır.

$$E_\gamma = h\nu = I_B + K_e \quad (2.11)$$

Fotonların enerji bölgesinde (KeV), fotoelektrik olayda incelendiğinde, tesir kesiti aşağıdaki gibi olacaktır;

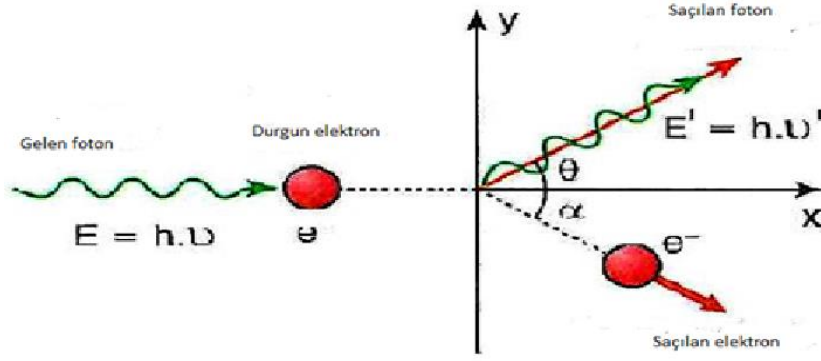
$$\sigma \approx \frac{Z^5}{(h\nu)^{7/2}} \quad E_\gamma < m_e c^2 \text{ için} \quad (2.12)$$

$$\sigma \approx \frac{Z^5}{(h\nu)} \quad E_\gamma > m_e c^2 \text{ için} \quad (2.13)$$

Buradaki reaksiyon sistemi, atom numarası büyük atomlar içindir. X ışını ve gama ışını için, 1 MeV enerjili değerlerde etkili bir sistem değildir.

#### 2.4.3.2. Compton saçılması

X ışını veya gama ışınlarının (fotonların) madde ile reaksiyonun, iyi gözlemlenen sistemlerinden biriside Compton saçılmasıdır. Kısaca Compton saçılması, elektron ile fotonun etkileşip, fotonun esnek saçılmaya uğramasıdır (Şekil 2.16). Burada önemli olan bir diğer husus ise, eğer gelen x ışını ya da gama ışınlarının enerjisi, elektronun bağlanma enerji değerinden fazla ise, elektron burada serbest parçacık gibi davranacaktır. Eğer gelen x ışını ya da gama ışınının enerjisi 100 KeV'den daha az bir değere sahipse bu reaksiyon oluşmaz.



Şekil 2.16. Compton olayı (Anonim 3).

Herhangi bir potansiyel altında bulunmayan elektron üstüne  $h\nu$  enerjisine,  $\frac{h\nu}{c}$  momentum değerine sahip, x ışını yada gama ışını geldiğinde, x ışını yada gama ışını  $\theta$  açısı ile düşük frekansta saçılır. Momentum büyüklüğü  $p$ , elektronun geliş açısı  $\alpha$  olacak şekilde çekirdekten fırlatılır. Buradaki  $\alpha$  açısı, x ışının veya gama ışınının enerjisi ile değişmektedir. Compton saçılmasına korunum kanunlarını uygularsak, aşağıdaki denklemlere ulaşırız.

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)} \quad \text{burada } \gamma \equiv h\nu / m_e c^2 \quad (2.14)$$

$$K_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\gamma(1 - \cos \theta)}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)} \quad (2.15)$$

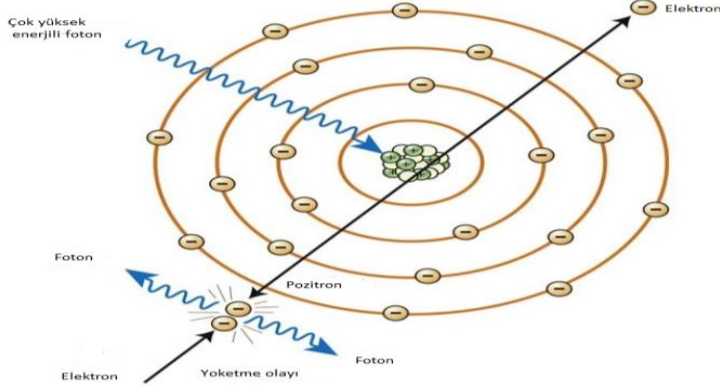
Compton olayında tesir kesiti olarak  $\sigma \approx \frac{Z}{h\nu}$  denliğini kullanabiliriz. Gelen x ışını yada gama ışınının enerji değer aralığı 0.1 ila 10 MeV arasında, Compton olayı daha fazla gözlemlenir.

İki tür saçılma çeşidi vardır, bunlardan birincisi Thomson saçılmasıdır. Burada potansiyeli sıfır olan bir ortamda gerçekleşen inelastik saçılmadır. Enerji seviyesi düşük olan saçılmalarda, Thompson'ın tesir kesiti, değişen atom numaraları ile birlikte lineer olarak değişmektedir. Momentum değeri az olan etkileşimlerde ise, saçılmaya uğrayan elektronların, x ışını genlikleri, kohorent bir türde, bir araya gelir. Bu tür saçılma çeşidine ise, Rayleigh saçılması adı verilir. Burada tesir kesiti  $Z^2$  şeklinde değişir.

Ancak bu iki tür saçılmada da, herhangi bir enerji aktarımı gerçekleşmez. Bu saçılmaların yarattığı etki, sadece ve sadece atom yönlerini değiştirir. İyonize olmazlar ya da uyarılmazlar. Bu saçılma etkileri relativistik alanda küçük bir değere sahiptir.

### 2.4.3.3. Çift oluşum

X ışını veya gama ışını, eşik enerji değerinde iken, madde ile etkileşime girerek soğurular, ve yük değeri olarak zıt yüklü parçacıklar oluşturur. Burada çift oluşum da meydana gelen x ışını veya gama ışınının, nötronu uyararak, proton ve elektron oluşturmasıdır (Şekil 2.17). Bunun için gerekli olan en az enerji değeri  $h\nu \approx 2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$  olacaktır.



Şekil 2.17. Çift oluşum (Anonymous 3).

Tesir kesit değeri her reaksiyonda farklılık gösterir, çift oluşum için bu değer  $Z^2$  ile orantılı olarak artar yada azalır. X ışını yada gama ışınlarının enerji değerleri 10 MeV'den fazla ise, enerji kaybı sistemleri devreye girer.

100 MeV ve daha fazla enerji değerine sahip durumlarda ise, pozitron ve elektron çiftleniminin tesir kesiti düşer. Bu değerden sonra, sabit katsayılı bir değer, soğurma katsayısı olarak belirlenir. Yeni meydana gelen pozitronlar, ilerledikleri ortamda, radyasyon ve iyonlaşma durumlarına enerji aktarırlar ve kaybederler. Hızını dolayısıyla kinetik enerjisi azalan pozitron, elektron ile çiftlenim oluşturarak, hidrojene benzeyen pozitronyum adı verilen bir sistem oluşturur.

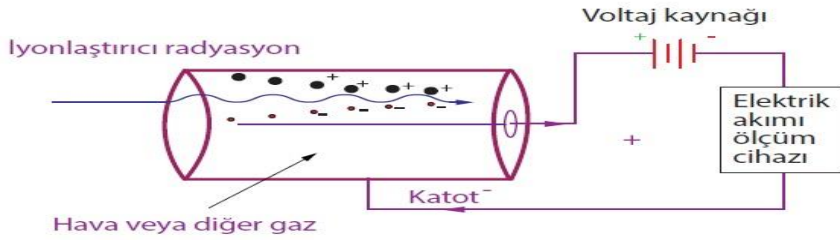
Bu oluşan pozitronyum, hidrojen gibi kararlı bir halde değildir. Tam tersi kararsızdır ve yarım ömrü yaklaşık 10 saniyedir. Bozularak iki farklı x ışını ya da gama ışını oluşturur. Burada yok olma işleminin tersi yönünde iki farklı x ışını ya da gama ışını oluşur. X ışını ya da gama ışınları korunum yasalarından dolayı 0.511 MeV'lik enerjide bulunmaları gerekir.

## 2.5. Dedektörler

Genel olarak tüm dedektörler içerisinde geçen bir radyasyonun enerjisinin tamamını veya bir kısmını elektrik atmasına dönüştürüp uyarıcı cihazlardır.

### 2.5.1. Gazlı sayacılar

Argon, ksenon veya kripton gibi bir soygazdan radyasyon geçirildiğinde her radyasyona karşılık çok sayıda pozitif gaz iyonları ve elektronlar (iyon çiftleri) oluşur ve iletkenlik artar. Genel olarak gazlı sayacı çalışma şeması (Şekil 2.18)'de verilmiştir.

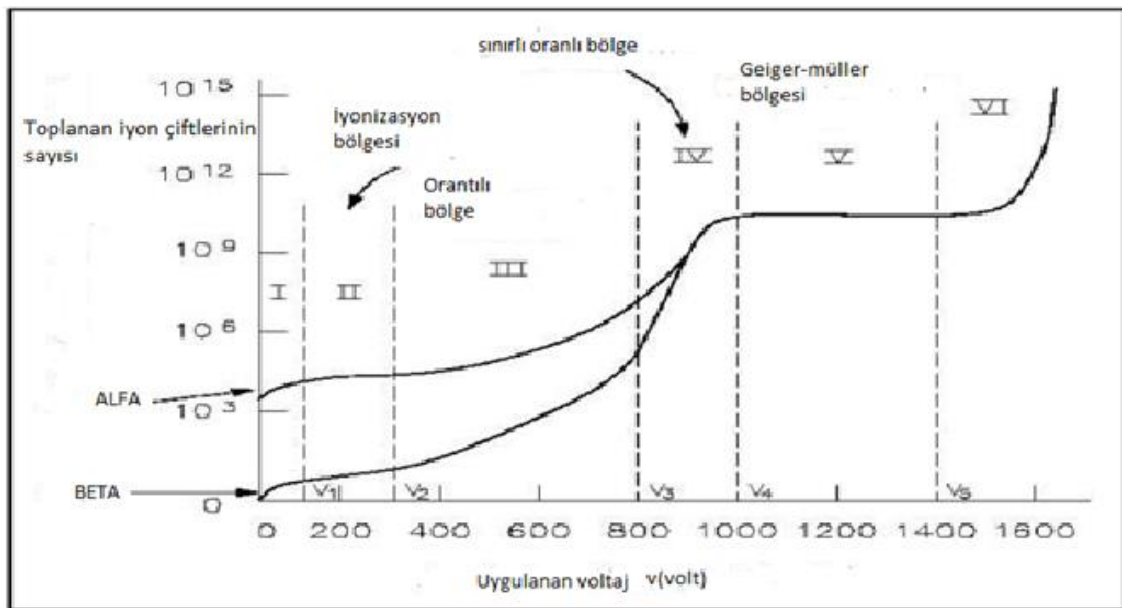


Şekil 2.18. Gazlı sayaç şeması (Anonymous 4).

Dönüm potansiyeli, iyon çiftlerindeki hızını etkileme kuvveti çok az bir değerdedir. Zıt yüklü tanecikleri ayıracak kadar yüksek bir durumda değildir.

Bu işlemden sonra elektronların anoda ulaşan kısımlarının sayısı, gelen fotonun ilk halinden azdır.

İyonizasyon alanında, anot kısmına geçebilen elektronlar değişmeyen bir değere sahiptir. Yalnızca fotonun yapmış olduğu sayıdadır. Orantılı alandaki elektronları sayıları ile orantılı olarak potansiyelde artar. Bu durumun nedeni ise gaz molekülleri ile hızlı elektronların etkileşimi, daha sonra oluşan iyon çiftlenimlerinin meydana gelmesidir. Buradan şunu anlayabiliriz ki oluşan iyon, buradaki akım değerini yükseltecektir. Bu duruma gaz amplifikasyonu denir. (Şekil 2.19)'da uygulanan voltajın, iyon çiftlenim sayısına olan oranının şekli mevcuttur.



Şekil 2.19. Sayaçların bölgesel dağılımı (Segebade, 1988).

Geiger alanında elektrik atması büyük bir değere sahiptir, yüksek hızlarda hareket eden elektronlar, pozitif yüklü iyonlardan uzaklaşmasıyla, pozitif yüklü iyonlara ait bir bölge oluşur ve bu bölgede elektron sayısı belirli bir değerdedir.

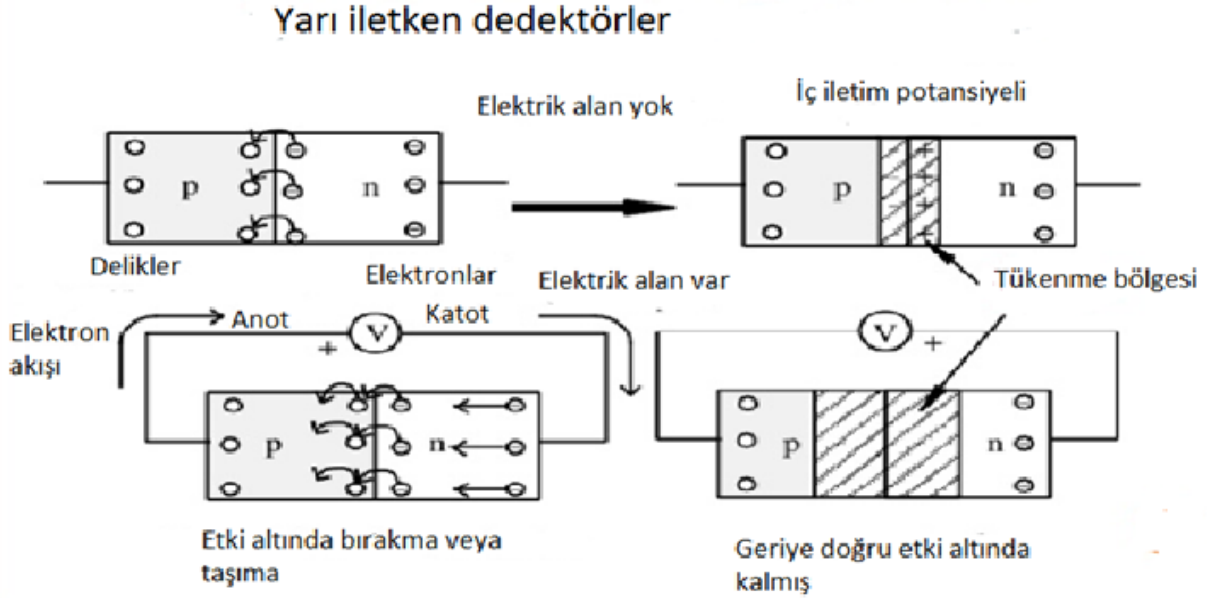
Bundan dolayı, elektronların anoda ulaşabilenlerinin sayısı, ilk durumdaki gelen fotonun enerji değerinden bağımsız olacaktır. Şekilde görüleceği üzere, 1 MeV lik bir enerji değerine sahip  $\beta$  ışınlarının, yüksek enerjili alanda oluşturduğu elektron, 100 keV lik  $\beta$  ışınımı ile meydana gelen fotonlardan çok olduğu gözlemlenmektedir. Dört farklı türde x ışını dedektörü vardır. Bunlar nötron sayıcısı, orantılı sayaç, geiger sayacı, ve iyonizasyon odasıdır.

### 2.5.2. Yarı iletken dedektörler

X ışını dedektörlerinden birisi de yarı iletken dedektördür. Diğer bir isimle germanyum dedektörü ya da lityum çökeltili dedektör adı verilir. Şekilde lityum çökeltili dedektör görünmektedir.

Dedektör kristalinde 3 farklı bölge vardır. Bunlardan ilki foton kaynağına doğru bana p-tipi ayrıca yarı iletken haldeki bir tabakadır. Sistemin merkezinde ise n-tipi başka bir tabaka mevcuttur (Şekil 2.20). Dedektör ün p tipi olan kısmında elektrik iletiminin iyi olması için ince bir altın tabaka ile sarılmıştır. Eğer altın tabaka kullanılmamış ise yine iyi elektrik ileten berilyum bazlı bir kaplama pencere kullanılabilir.

Eğer sistem n tipi bir sistem ise, silikon yüzeyi saran alüminyum bazlı, sinyali arttırıcı etkisi olan 10 adet, ön amplifiere ile beslenecektir. Madde ile temas halinde olabilen ön amplifier, bu dedektör sisteminin bir parçasıdır. Elektronik sesi en az seviyeye çekmek için, ön amplifier sürekli olarak sıvı azot termosunda tutulmalıdır ve sıcaklığı ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) olmalıdır. Eğer sistem sıcaklığı oda ile aynı değere gelirse dedektör yapısı bozulacaktır.



**Şekil 2.20.** Yarı iletken dedektörülerin çalışma şeması (Anonymous 5).

Bir silikon dedektörün gerçek tabakası, gazlı dedektördeki argon gazı gibi çalışır. Başlangıçta, bir foton absorblanarak yüksek enerjili bir foto elektron çıkar. Bu enerji silikonda birkaç bin elektron oluşmasıyla harcanırken iletkenlikte de önemli derecede yükselme gözlenir.



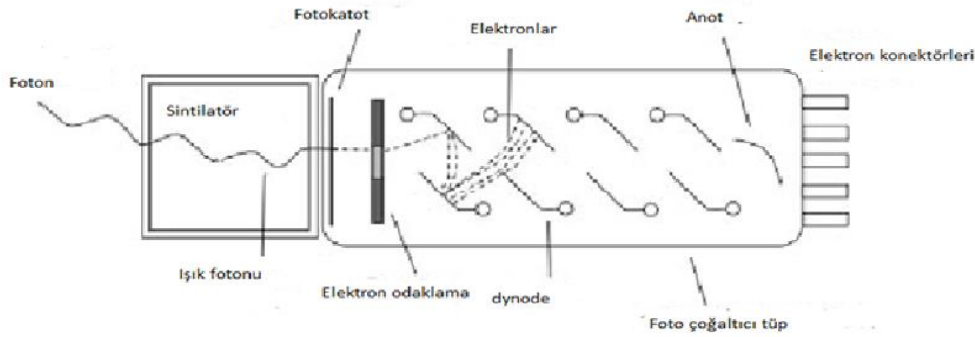
Kristale bir potansiyel uygulandığında her fotonun absorpsiyonunda bir akım pulsu alınır. Orantılı dedektörde olduğu gibi, pulsun büyüklüğü absorblanan fotonun enerjisiyle doğru orantılıdır.

Ancak burada, orantılı dedektörde karşılaşılan, pulsun ikinci bir defa daha yükseltilmesi olayı meydana gelmez.

### 2.5.3. Sintilasyon dedektörleri

Elektrona verilen enerji onu ortamdaki yerinden koparmaya yeterli olmadığı zaman uyarılan elektron, tekrar eski haline dönerken görünür ışık yayar.

Sintilasyon fosforlarının yaydığı ışık, foto çoğaltıcı tüpler tarafından toplanarak, voltaj pulsu haline getirilir. Meydana gelen pulsun büyüklüğü radyasyonun enerjisi ile orantılıdır.



Şekil 2.21. Sintilasyon dedektörünün çalışma şeması (Segebade 1988).

Bu dedektörler sayım ve aynı zamanda enerji ayırımı için kullanılır. Bu dedektörlerde foto çoğaltıcı tüpü ve kullanılan fosforu değiştirmek suretiyle değişik tipte radyasyonların tespiti mümkündür. Bunlar; alfa parçacıklarını ölçmek için gümüşle aktive edilmiş ZnS fosforu, Beta parçacıklarını ölçmek için naftalin ve stilben, düşük enerjili X ve gama ışınını ölçmek için talyumla aktive edilmiş NaI kristali kullanılır.

İnorganik kristallerde sintilasyon mekanizması, kristale giren yüksek enerjili parçacıkların kristal atomlarını uyararak foton yayınlanması prensibine dayanır ve süreç kristaldeki enerji bantları dikkate alınarak anlaşılabilir

Aktarılan enerji, iyonizasyon enerjisinden daha büyük ise, elektron valans banttan iletkenlik bandına uyarılabilir ve sonuçta serbest bir elektron ve serbest bir boşluk oluşur. Valans banttaki elektron tuzaklardaki bir boşluk ile tekrar birleşme yaparak yok olur. Bu süreçte açığa çıkan enerji bir foton olarak yayınlanabilir.

Aktarılan enerji bağlanma enerjisinden daha küçük ise, iletkenlik bandının altında bulunan ve eksiton (uyarım) bandı olarak adlandırılan bölge uyarılır.



Bu durumda elektron elektrostatik olarak hala valans bandındaki boşluğa bağlıdır ve bu elektron boşluk çiftine eksiton adı verilir.

Eksitonlar kristalde serbestçe hareket edebilirler. Eksiton bir ışıltama merkezine çarptığında bağlanma enerjisini aktarabilir. Kristal örgüsüne aktarılan bu enerji ya örgü titreşimleri olarak (fononlar) ortaya çıkar ya da ışık olarak yayınlanır.

## 2.6. Gama Spektrometresi

Çevresel örneklerdeki doğal radyoaktif serilere ait radyonüklitlerin belirlenmesi için birçok radyoanalitik yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları; gama spektrometresi, alfa spektrometresi, sıvı sintilasyon sayımı ve orantılı sayaçlar ile a-p toplam sayımı gibi tekniklerdir.

Sintilasyon NaI(Tl) dedektörü (verimi yüksek, çözme gücü düşük) ve yarı iletken (HPGe; verimi düşük, çözme gücü yüksek) dedektörlerin kullanıldığı gama spektrometrik yöntem, radyokimyasal ayırma işlemlerine gerek duyulmadan doğrudan, tahribatsız, hızlı ve radyonüklitleri aynı anda ölçme imkânı sağlamaktadır.

Yarı iletken dedektörlerle foton ölçümlerinin amacı, kaynak tarafından yayınlanan fotonların sayısı ve enerjilerini belirlemektir. Çoğu uygulamada bu bilgi kaynak içinde bulunan radyonüklitlerin tanımlanması ve kaynak içindeki bu radyonüklitlerin aktivitesini bulmak için kullanılmıştır.

Ölçümde ilgilenilen nicelik foton enerjisi olabileceği gibi bir foton grubunun bağlı yayınlanma oranı olabilir. Gama spektrometresinde esas amaç, enerji soğurmaya karşılık gelen darbe yüksekliği spektrum piklerinin analizidir.

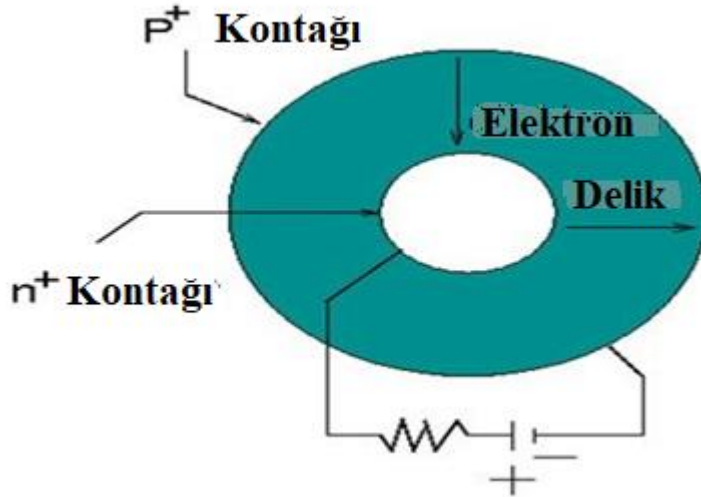
Dedektör ve diğer elektronik parçaların birleşiminden oluşan sisteme "gama spektrometresi" denir. Bir gama spektrometre sistemindeki süreç kabaca şu şekildedir: Dedektör kristali ile etkileşen gama radyasyonunun enerjisiyle orantılı oluşan pulslar ön yükselteç ve yükselteç ile işlenir, elde edilen sinyal Analog Sayısal Dönüştürücüde (ADC) sayısal hale getirilir ve çok kanallı analizörde (MCA) spektrum olarak kaydedilir.

### 2.6.1 HPGe (Yüksek saflıkta germanyum dedektörü) dedektörü

Ultra saf germanyum üretimi için teknikler 1970'lerde geliştirilmiştir. Başlangıçta germanyum yarı iletken olarak sanayisinde kullanılmıştır (Knoll 2000).

Yarı iletkenlik özelliği sayesinde halen elektronik aletlerde germanyum ve silisyum kullanılmaktadır.

Yüksek saflıkta germanyum (HPGe), lityum alt bileşeninde germanyum (Ge(Li)) gibi bir yarıiletken veya talyum aktive edilmesi ile sodyum iyodür (NaI(Tl)) gibi sintilasyon dedektör ile birlikte bir dizi elektronik modül ve çok kanallı analizörün (MCA) uygun kombinasyonuna gama spektrometresi denir.



**Şekil 2.22.** HPGe dedektörü p tipi (Anonymous 6).

Bir gama spektrometresine gelen x-ışınları, dedektör içindeki germanyum kristali ile etkileşerek (X-ışınları için Si), bir elektron boşluk çifti oluşturur ve kristal içinde bir elektrik akımı meydana getirirler.

Germanyum kristalde bir elektron boşluk çifti oluşturmak için gerekli enerji 2,96 eV'tur. Oluşan elektronlar ve boşluklar, kristale 18 dedektörün sıvı azotsuz kalması durumunda dedeksiyon özelliğini kaybetme riskinde vardır. Çünkü azot sıcaklığının sağlanamadığı bir anda Ge içine sürüklenmiş lityum iyonlarının kaybedilmesi ihtimali yüksektir.

Bu temel nedenden dolayı, oda sıcaklığında muhafaza edilebilen ve germanyum atomlarının saflığı  $10^{10}$  atom/cm<sup>3</sup> derecesinde olan HPGe yarı iletken dedektörlerin kullanımı tercih edilmektedir.

HPGe dedektör sıvı azot sıcaklığında (77 °K) çalıştırılır ve bu şekilde gürültü sinyalinin en az olduğu durum sağlanır. Dolayısıyla oda sıcaklığından ileri gelebilecek termal etkiler giderilmiş olur.

## 2.7. Aktive Edici Radyasyon Kaynakları

### 2.7.1. Radyonüklitler kaynaklar

Foton aktivasyon analizi için kullanılan ilk kaynaklardır. Döteryum, berilyum ve bölünebilir materyallerin analizleri, foton ayırma süreçlerinin kullanımıyla gerçekleştirilmiştir.

Güçlü <sup>124</sup>Sb gama radyasyon kaynakları da birçok uygulamada kullanılmıştır (Goldstein 1963) ve rapor edilmiştir (Kramer 1969).

Nüklit radyasyonlarıyla gerçekleştirilen ilk izomerik durumların foto uyarılmalarında <sup>226</sup>Ra (Goldhaber 1939), <sup>182</sup>Ta ve <sup>60</sup>Co kaynakları kullanılmıştır. (Harbottle 1954). Laboratuvar uygulamalarında kullanılan en güçlü kaynak <sup>60</sup>Co'dur (1013 Bq'dan 1015 Bq'ye kadar).

Günümüzde sağlık amaçlı kanser tedavisinde kullanılmakta olup burada kullanılan bazı radyonüklitlerin yarılanma ömrü, bozunma türü, yaydığı parçacık enerjisi tablosu aşağıda verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Radyonüklitlerin yarılanma ömrü tablosu (Segebade 1988).

Radyonüklitler	Yarılanma ömrü	Bozuma türü (%)	Yayılan parçacık enerjisi (KeV)
<sup>32</sup> P	14.26 d	β 100	690
<sup>137</sup> Cs	30.04 y	β 100	662
<sup>192</sup> Ir	73.8 d	β 95.34	380
<sup>108</sup> Au	2.69 d	β 100	412
<sup>125</sup> I	59.4 d	EC 100	28
<sup>189</sup> Yb	32.02 d	EC 100	93
<sup>103</sup> Pd	16.99 d	EC 100	21
<sup>142</sup> Pr	19.12 d	β 96.3	809
<sup>153</sup> Sm	46.28 h	β 100	223
<sup>170</sup> Tm	128.6 d	β 99.87	66.39

### 2.7.2 Elektron hızlandırıcılar

Parçacık hızlandırıcıları, elektron ( $e^-$ ), pozitron ( $e^+$ ), proton (p), anti proton gibi yüklü temel parçacık demetlerinin belirli bir amaç çerçevesinde belirlenen bir enerjiye ulaşıncaya kadar hızlandırılmasını sağlayan aygıtlardır.

20. yüzyıl başlarında Rutherford deneyi ile ortaya konulan doğru ve yeni atom modeli sonrasında insanoğlunun maddenin temel yapısını çözümüleme çerçevesindeki arayış ve gayretleri çerçevesinde özellikle yüksek enerji fiziği (parçacık fiziği) ve nükleer fizik konusunda yapacağı yeni deneylerde hızlandırılmış elektron ve proton demetlerinin kullanılmasını gündeme getirmiştir.

Katot ışınları tüpleri katod-anod arasında elektron akımı oluşturan ilk hızlandırıcılar olarak anılabilir. 1920 li yılların sonlarında Widereo ilk modern lineer elektron hızlandırıcısını (linak) tasarlamış ve hayata geçirmiştir (Knoll 2000).

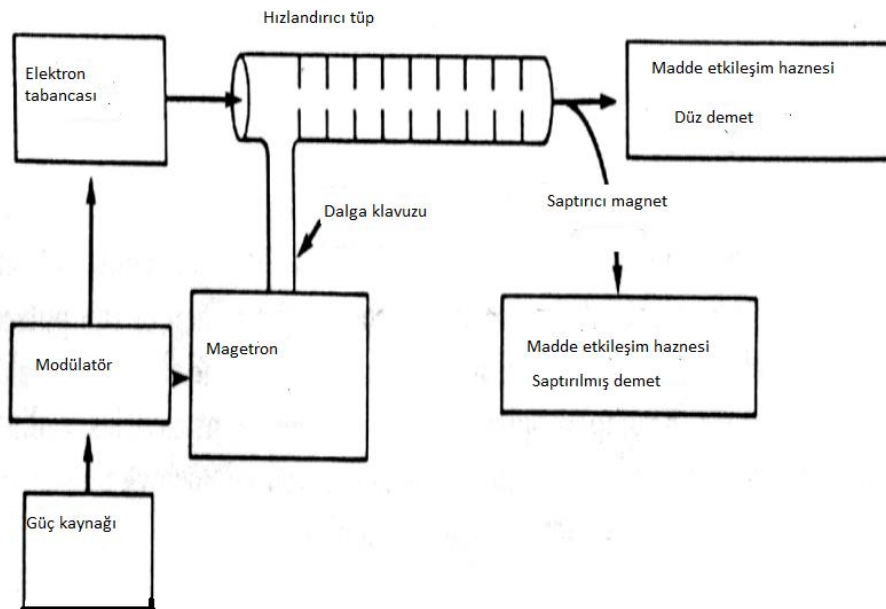
Cockcroft-Walton elektrostatik hızlandırıcısında yine aynı dönemde gerçekleştirilmiştir ve 1932 de Cockcroft-Walton proton hızlandırıcısı ile hızlandırılan protonlar Li çekirdekleri üzerine gönderilerek iki He çekirdeği ortaya çıkarılmıştır. Daha yüksek elektrostatik hızlandırma potansiyelleri ise Van de Graff jeneratörü ile elde edilmiştir. Bu hızlandırıcı ile enerji olarak MeV düzeyine ulaşılmıştır (1 eV bir elektronun 1 voltluk potansiyel farkını geçmesiyle kazanacağı enerjidir  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ). İndüksiyon doğrusal hızlandırıcıları ile yine bir kaç MeV enerjiye ulaşmak aynı tarihlerde söz konusu olmuştur. RF salınımlı (~MHz) elektromanyetik alanlar aracılığı ile uyarılan rezonans kaviteelerin (rezonans boşlukları) parçacık hızlandırılmasında kullanımı Widereo tarafından önerildikten sonra 30 sürüklenme tüpüne sahip böyle bir hızlandırıcı ile civa iyonları 1.26 MeV lik enerjiye hızlandırılmışlardır.

### 2.7.3. Lineer hızlandırıcılar

X ışın tüpünde olduğu gibi ısıtmak yoluyla metal telden serbestleşen elektronlar, daha yüksek kinetik enerjiye sahip olabilmek için elektromanyetik alan içerisinde hızlanırlar. Bu hızlandırılmış yüksek enerjili elektronlar direk olarak tedavide kullanılabileceği gibi (genellikle yüzeysel tedaviler için) bir hedefe çarptırılarak yüksek enerjili x ışınlarından elde edilebilir (derin tedaviler için) .

(Şekil 2.23)' te 4 ile 25 MeV enerjisindeki elektronlar ve hedefe çarptırılmaları ile 4-25 MeV enerjisinde X ışınları meydana gelir. Konvansiyonel X ışını tüplerinde elektronları 400 keV den daha fazla hızlandırılmalar mümkün değildir.

Bu nedenle LINAK cihazlarında yüksek frekanslı manyetik dalga odacıkları kullanılır. Bu şekilde (-) yüklü elektronların manyetik alandan etkilenerek hızlanması sonucu, yüksek kinetik enerji kazanmaları mümkün olur.



Şekil 2.23. Lineer hızlandırıcıların çalışma prensibi (Anonim 10).

Lineer hızlandırıcılar günümüzde modern tıpta kullanıldığı gibi modifiye edilerek madde etkileşimlerinde de kullanılabilir. Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Araştırma ve Uygulama Merkezi (NUBA) tarafından c-linac (klinik linak) modifiye edilerek bilimsel araştırmalarda kullanılabilir hale getirildi (Boztosun 2013).

Hızlandırma yapıları özel bir dizayna sahip dalga kılavuzlarıdır. Bu dalga kılavuzları elektromanyetik dalgadan elektronlara istenen değerlere kadar sürekli enerjinin transfer edilmesine olanak verir. Bir dalga kılavuzu bir yalıtkan ile tahliye edilen veya doldurulan bir metal oluktur.

Uygun şartlar altında elektromanyetik dalgalar bu dalga kılavuzu boyunca yayılabilirler. Elektron hızlandırıcılarda dalga kılavuzları, hızlandırıcı tüpün içindeki belli mesafelerde yerleştirilmiş olan merkezlerdeki (iris) dairesel boşlukları kapsayan diskler ile temin edilir.

Hızlandırma dalgasının faz hızı irislerin mesafesi ile birlikte artar (eğer iris yoksa faz hızı ışık hızını aşacaktır ve bu nedenle parçacık hızlandırma için uygun olmayacaktır). Bu dalga kılavuzları elektronları uç nokta enerjilerine taşıyan bir ilerleyen dalganın biçimlenmesine olanak sağlar.

Hızlandırma tüpünün sonunda, elektron demeti genellikle ince bir metal folyodan (örneğin titanyum) meydana gelen bir demet penceresiyle iletilir. Yüksek atom numaralı bir hedefte elektron demetinin soğurulmasıyla bremsstrahlung üretimi gerçekleştirilir.

### 2.7.3.1. Bremsstrahlung spektrumu

Elektronun radyal ivmesi çekirdekle ilişkili olan yörüngesine ve rastgele dağılmış yörüngelere bağlı olduğundan, klasik elektrodinamik çerçevesinde, yayınlanan fotonların spektrumunun sürekli olması beklenir.

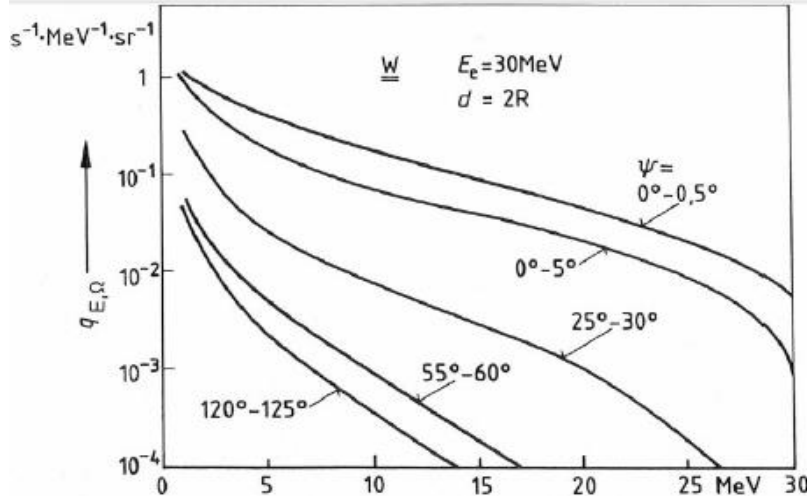
Eğer elektron hafifçe saptırılırsa, düşük enerjili bir foton yayınlanacaktır, fakat çekirdekler neredeyse merkezi bir çarpışma durumunda, bremsstrahlung fotonu elektronu, terk eden enerjinin neredeyse tamamını barındıracaktır.

Bu basit argümanla, bremsstrahlung fotonlarının enerji aralığının sıfır ile gelen elektronların enerjisine eşit bir maksimum enerji arasında olduğu sonucu çıkarılabilir.

Aslında kuantum mekaniksel hesaplamalar da aynı sonucu vermektedir. Ayrıca zayıf saptırmaların olasılığının güçlü saptırma olasılıklarından daha fazla olacağı sonucu da beklenebilir, çünkü çekirdeği büyük bir mesafeyle geçen elektron sayısı çekirdekle yakın temasta olan elektron sayısından daha fazladır.

Düşük enerjili fotonların toplam bremsstrahlung yoğunluğuna olan katkısı yüksek enerjili fotonlarından çok daha fazladır. Spektrum aynı zamanda gelen elektronların yönüyle ilişki olarak foton yayınlama acısına da bağlıdır (Kerst, D.W. 1940).

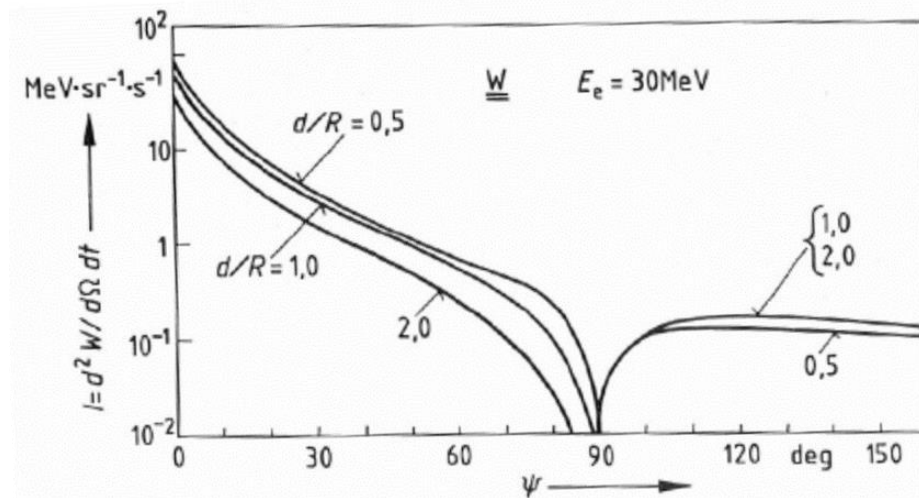
Artan açılarda yoğunluk tüm foton enerjileri için hızla düşmektedir ve spektrum daha yumuşak olmaya başlar, çünkü yayınlanma açısı ile birlikte azalış yüksek enerjili fotonlar için, düşük enerjili olanlardan daha belirgindir. Unutulmamalıdır ki 60 MeV elektron enerjisinde iken tüm foton enerjileri için yayınlanan foton sayısı 30 MeV elektron enerjisinde olduğundan daha fazladır (Şekil 2.24).



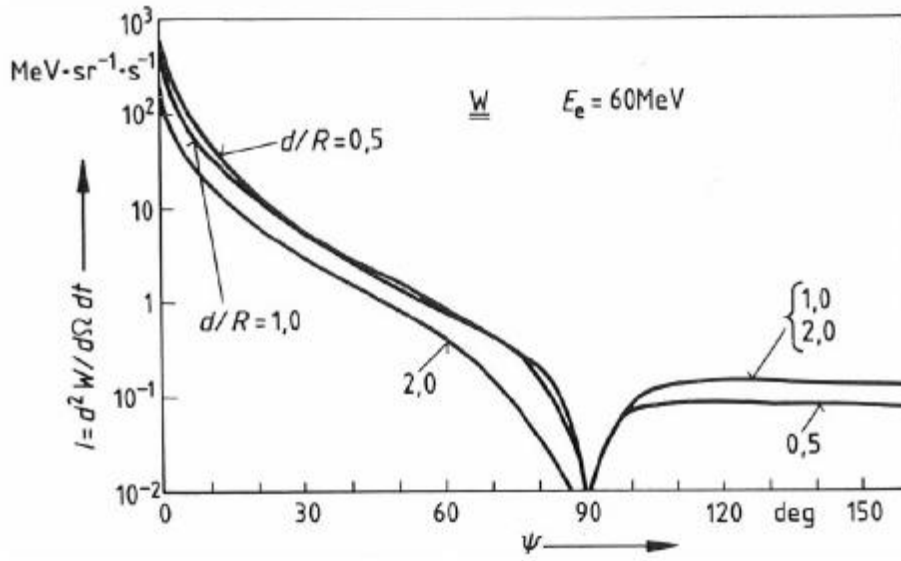
Şekil 2.24. Bremsstrahlung spektrumu (Segebade 1988).

Dahası, bremsstrahlung yoğunluğu artış yönünde dikkate değer ölçüde daha tüm küçük açılarda toplam bremsstrahlung yoğunluğunun hızla düştüğünü, orta açılarda yavaşça azaldığını,  $90^\circ$  yakınında aniden tekrar yükseldiğini ve daha sonrasında neredeyse sabit kaldığını göstermektedir.

(Şekil 2.25)'ten görüleceği üzere daha yüksek elektron enerjisindeki tek belirgin değişim açısal dağılımdaki eğim artışıdır. Bu artan elektron enerjisi ile birlikte açısal dağılım yarı genişliğinin azaldığı anlamına gelir, diğer bir ifadeyle küçük açılarda toplam foton enerjisinin azaldığı belirgin olarak gözlemlenmektedir (Şekil 2.26).



Şekil 2.25. Bremsstrahlung etkin enerji bölgesi (30 MeV)(Segebade 1988).



Şekil 2.26. Bremsstrahlung etkin enerji bölgesi (60 Mev)(Segebade 1988).

Işınlanacak olan tüm materyaller dikkatli bir şekilde mümkün olduğunca bremsstrahlung koni eksenine yerleştirilmelidir, çünkü tümü için özdeş ışınlama koşullarının oluştuğundan ve homojen bir materyal aktivasyonundan emin olunmalıdır.

Dönüştürücüden itibaren olan daha büyük mesafelerde demet eksenine dik olan akı gradyenti daha küçüktür, fakat bu mesafede yoğunluk zayıftır, çünkü foton akı yoğunluğu dönüştürücüden itibaren olan mesafenin karesiyle ters orantılıdır ve bu sebeple azalma gösterir (Engelmann 1971).

## 2.8. Foton Aktivasyon Analizi ve Gelişim Süreci

Foton aktivasyon analizi ilk defa 1971 yılında gerçekleştirilmiştir. Tıp alanında bu yöntemi kullanılması ilk defa 1981 yılında minerallerdeki element konsantrasyonu keşfedilmiştir (Randa, 1981). Ülkemizde ilk Prof. Dr. İsmail Boztosun ve ekibi tarafından 2013 yılında yerel imkânlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Hafif elementlerin fotoaktivasyon ürünleri sadece yok olma radyasyonuna neden olurlarken, daha ağır elementlerin fotonükleer reaksiyon ürünleri Nötron aktivasyonda olduğu gibi genellikle karakteristik gama ve X ışınları yayımlar. Bu elementler belirlendiğinde genellikle kimyasal ayırma işlemleri olmaksızın bir analitik süreç yürütülür.

Roma İmparatorluğunun değişik dönemlerine ait madeni paraları üzerinde 7 ayrı yöntemle yapılan analizlerde foto aktivasyon yönteminin yönteminin özellikle eser element konsantrasyonlarının belirlenmesinde oldukça hassas olduğu belirtilmektedir. Yapılan çalışmada her bir yöntemin avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. PAA yöntemiyle

bahsi geçen arkeolojik metal paralarda tespit edilen elementler Cr, Mn, Ni, Zn, Ge, As, Se, Ag, Sn, Sb, Te, Au, Tl, Pb, Bi ve U şeklinde sıralanmaktadır (Lutz,G.J. 1971).

PAA yöntemi ile süt dişleri, kalıcı dişler ve kemik örneklerindeki Sr/Ca oranı'nda incelenmiştir. Elde edilen sonuçların yüksek duyarlılıkta olduğu görülmektedir. Bu çalışmada  $^{48}\text{Ca}(n,\gamma)$ ,  $^{49}\text{Ca}$  reaksiyonunun düşük nötron yakalama tesir kesiti,  $^{24}\text{Na}$  gibi sayımda sınırlayıcı radyoaktif çekirdeklerin olası varlığı,  $^{49}\text{Ca}$ 'dan yayınlanan gama fotonlarının nispeten düşük verimlilikte olması ve  $^{49}\text{Ca}$  çekirdeğinin kısa yarı ömürlü olması gibi sebepler nedeniyle NAA yönteminin Ca'nın belirlenmesi için genellikle tercih edilmediği belirtilmektedir(Michael F.L, 1985).

Bununla birlikte protonlarla indüklenen X-ışını sayımı ile gerçekleştirilen PIXE yönteminin ise sadece kemik yüzeyi ve dis minesi gibi ince yüzey kısımlarının analiz edilmesine olanak sağladığı ifade edilmektedir.

Ayrıca kemik analizleri için NAA yönteminden ziyade PAA yönteminin avantajları arasında karmaşık nükleer reaksiyonların ve gama spektrumundaki karıştırıcı ve sınırlayıcı radyoaktif çekirdeklerin olmayışı ve hiçbir radyoaktif atığın söz konusu olmadığı da belirtilmektedir (Chao, 2009).

### 2.8.1. Foton ile aktive etme işlemi

Tanım olarak ifade edilecek bir fotonükleer reaksiyon eşitlik ile tanımlanacaktır:  $T(\gamma, b)$ . Burada b birçok parçacığı temsil edebilir. Bu öncelikle gelen fotonun enerjisine bağlıdır. Genellikle b, n veya  $\gamma$  şeklinde karşımıza çıkar, fakat  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, 3n)$ ,  $(\gamma, p)$ ,  $(\gamma, np)$  ve diğer reaksiyonlarda indüklenebilir. Fotonlarla aktivasyon işleminin ilk uygulamaları döteryum, berilyum, karbon, nitrojen, oksijen ve flor gibi hafif elementlerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu elementlerin nükleer özellikleri termal nötron aktivasyon analizleri için elverişli değilken fotonükleer reaksiyonlar için uygundur. İlk fotoaktivasyon deneylerinde izotop kaynaklar kullanılmıştır (Knoll 2000).

Sonuç olarak bu nedenle analitik uygulamalar iki element grubuna göre ayrılmıştır:

a) Yarı ömürleri ve mevcut aktiviteleri nedeniyle uygulamada kullanışlı olan  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , ve  $^{124}\text{Sb}$  gibi radyonüklit kaynaklarından yayınlanan gama enerjilerinden daha az nötron bağlanma enerjilerine sahip olanlar. Bu koşullar altında analiz edilebilecek iki kararlı çekirdek  $^2\text{H}$  ve  $^9\text{Be}$ 'dir.

b) Bahsedilen radyonüklitler'den elde edilen gama ışınları ile indüklenen  $(\gamma, \gamma')$  reaksiyonlarıyla uyarılabilen yeterince uzun yarı ömürlere sahip izomerik durumları olan  $^{77}\text{Se}$ ,  $^{107}\text{Ag}$  ve  $^{115}\text{In}$  gibi nüklitler. Daha sonra yüksek enerjili hızlandırıcılarla birlikte, PAA ile karbon, nitrojen, oksijen ve flor tespiti mümkün olmuştur. Bu elementlerin reaksiyon ürünleri  $\beta^+$  yayımıyla bozunurlar, dolayısıyla aktivite ölçümü için sadece belirsiz olan yok olma radyasyonu mevcuttur.



Sonuç olarak bremsstrahlung fotonlarına maruz bırakma işleminden sonra neredeyse tüm durumlarda radyokimyasal bir ayırma gereklidir. Bahsi geçen dört element PAA için en düşük hassasiyette olanlar arasındadır; bu elementlerin fotonükleer reaksiyonları nispeten elverişsiz nükleer verilere sahiptir.

Bununla birlikte bu elementlerin tespit limitleri söz konusu olduğunda PAA için oldukça düşük kesitleri mevcut olsa da, bazı durumlarda nanogram mertebesindeki miktarlar belirlenebilmektedir (Segebade, 1988).

Daha ağır elementler söz konusu olduğunda ise neon'dan daha ağır olan çok sayıda element NAA yönteminden daha avantajlı bir şekilde PAA yöntemiyle analiz edilebilmektedir.

Hafif elementlerin fotoaktivasyon ürünleri sadece yok olma radyasyonuna neden olurlarken, daha ağır elementlerin fotonükleer reaksiyon ürünleri NAA'de olduğu gibi genellikle karakteristik gama ve X ışınları yayımlar. Bu elementler belirlendiğinde genellikle kimyasal ayırma işlemleri olmaksızın bir analitik süreç yürütülür.

Element kompozisyonu bilinen bir referans materyalin eş zamanlı olarak numuneyle ışınlanması ile birlikte PAA niceliksel bir hal alır. Bu PAA'de özellikle gereklidir, çünkü hızlandırıcının makine parametrelerinin bazıları ve ayrıca reaksiyonların nükleer verilerinin bazıları ya bilinmiyor ya da kesin bir şekilde belirlenemiyordur.

Dahası, foton kaynağının bazı makine parametreleri, ışınlama periyodu boyunca sabit olarak dikkate almamaz. Aynı şartlar altında eş zamanlı olarak numuneyle birlikte ışınlanan bir referans materyalin kullanılmasıyla bu parametreler açıklanabilir. Sıklıkla numune kompozisyonuna benzer kompozisyonlara sahip sertifikalandırılmış referans materyaller kullanılmaktadır (Segebade 1988).

## 2.9. Nötron Aktivasyon Analizi

Nötron aktivasyon işleminde, reaktörlerden elde edilen termal nötronların yanı sıra, nötron akıları reaktörden elde edilenlere oranla çok daha az olan ve bu sebeple de aktivasyon işlemini sınırlandıran  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  veya  $^{252}\text{Cf}$  gibi radyonüklit kaynaklardan elde edilen nötronlar da sıklıkla kullanılmaktadır.

Ayrıca döteronların tritonlarla nükleer reaksiyonundan da yaklaşık 14 MeV enerjideki tek enerjili nötronlar elde edilebilmektedir(Segebade 1988).

## 2.10. Fotonükleer Reaksiyonlar

Foto-nükleer reaksiyon araştırmalarının başlangıcı olarak Chadwick ve Goldhaber'in 1934 yılında döteryum atomunun gama ışınlarıyla bombardıman edilmesi ile ilgili yayınladığı raporu gösterebiliriz (Chadwick ve Goldhaber 1934).

Foto-nükleer reaksiyonlarla ilgili sistematik çalışmalar ise 1950'lerde betatronların kullanılmasıyla başladı. 1960'larda ise lineer hızlandırıcıda oluşturulan pozitronların havada yok olmasıyla oluşturulan yarı-tek enerjili fotonlardan yararlanılmaya başlandı ve bu sayede kesin veriler elde edildi (Schuhl ve Zsara, 1961), (Jupiter 1961).

### 2.10.1. Fotonların çekirdek tarafından soğurulması

Elektromanyetik radyasyon kullanılarak gerçekleştirilen nükleer reaksiyonlar, düşük foton enerjileri için iki aşamalı bir süreçte ele alınabilir.

Bir fotonun soğurulması çekirdeğin uyarılmış duruma geçmesine neden olur. Böylece uyarılmış olan bileşik çekirdeğin uyarılma enerjisi çekirdekteki foton, nötron veya yüklü parçacık çıkmasıyla gerçekleşir. Çekirdeğin foton soğurma toplam tesir kesiti 8 ila 50 MeV arasında maksimum düzeye ulaşır (Segebade 1988).

### 2.10.2. Nükleer seviyelerin uyarılması

10 MeV civarı veya daha düşük enerjili durumlarda nükleer enerji durumları uyarılmış hale gelmiş olur.

Elektromanyetik radyasyon ve çekirdek arasındaki teoriden tek bir nükleer seviye için soğurma kesiti ;

$$\sigma_a = \sigma_m \cdot \frac{1/4 \cdot \Gamma_a^2}{(E - E_a)^2 + 1/4 \cdot \Gamma_a^2} \quad (2.16)$$

Yukarıdaki gibi olmaktadır. Burada ;

$\sigma_a$  : Soğurulma tesir kesiti

$\sigma_m$ : Pik tesir kesiti. Rezonanstaki fotonun dalgaboyuna ve çekirdeğin uyarılmış ve taban durumundaki özelliklerine bağlıdır.

E: Gelen fotonun enerjisi

$E_a$ : Rezonans enerjisi (uyarılmış durum enerjisi)

$\Gamma_a$ : a uyarılmış durumun toplam enerji genişliği

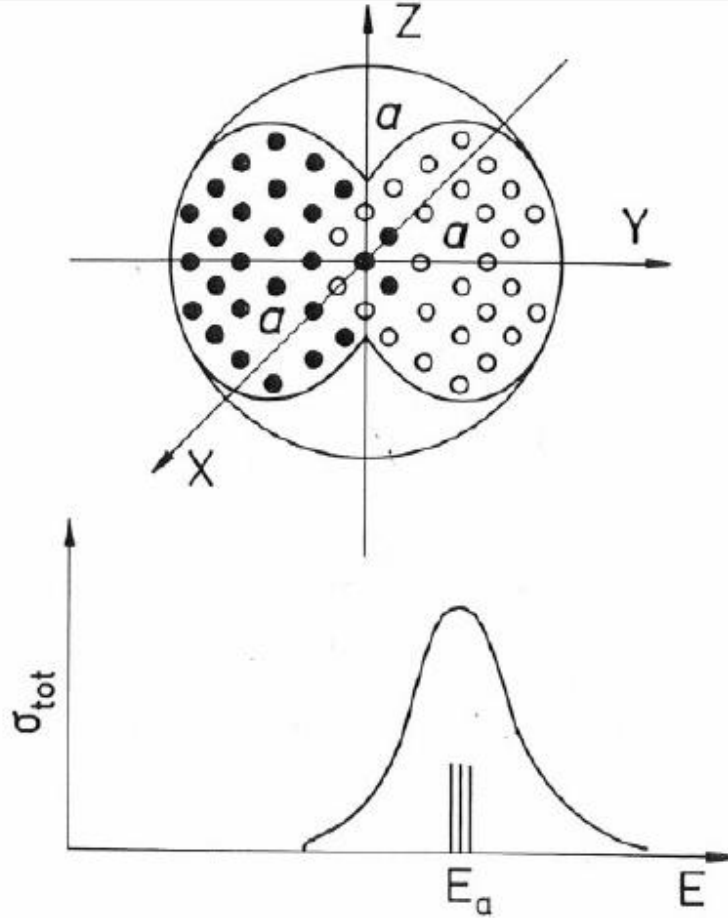
### 2.10.3. Dev dipol rezonans

Tüm fotonlar soğurma tesir kesiti incelendiğinde 10MeV ile 30MeV arasındaki enerji değerinde rezonansın pik yaptığı durumlar gözlemlenir. Daha düşük enerjili foton seviyelerinde ise, izole olmuş nükleer enerji seviyelerinin aksine, dev rezonans, çekirdekteki tüm proton ve nötronların birlikte titreşimsel hareket etmesi ile tanımlanır.

Fotonlar ile uyarılmış dev dipol rezonansa en önemli katkı elektrik dipol modtan gelmektedir. Elektrik dev dipol rezonans tüm protonların, tüm nötronlara karşı birlikte bir hareketi olarak yorumlanır. (Şekil 2.27)' de görüldüğü üzere bir küresel çekirdeğin bu titreşim modunda periyodik elektrik alan etkisi altında tüm protonlar, tüm nötronlar ile birlikte hareket ederler.

Çekirdek küresel simetrik olarak kabul edildiğinden titreşimsel hareketin yönü dikkate alınmaz ve bu nedenle rezonans frekansları üç serbestlik derecesi için de aynıdır.

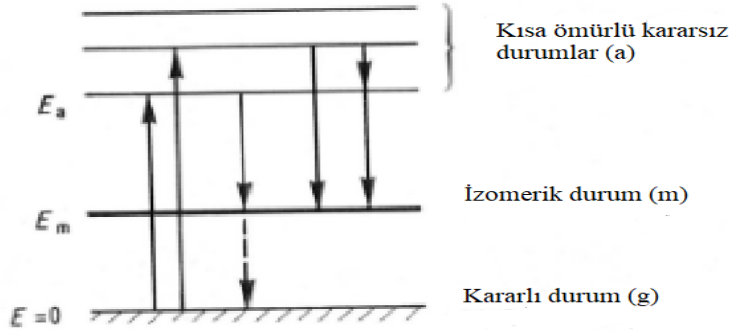
Bu nedenle küresel çekirdekler için toplam foton soğurma tesir kesitinde sadece tek, yayvan bir rezonans maksimumu gözlenir.



Şekil 2.27. Dev dipol rezonans (Segebade 1988).

#### 2.10.4. İzomerik geçişler

Çekirdek enerji seviye diyagramlarını kullanarak fiziksel geçişleri anlayabiliriz (Şekil 2.28). Çekirdek, izole edilmiş olan seviye ve taban durum arasındaki farka karşılık gelen uygun enerji değerindeki bir foton soğurulmasıyla uyarılabilir (rezonans soğurumu).



Şekil 2.28. İzomerik geçişler (Segebade 1988).

İzomerik geçiş reaksiyonunun tesir kesiti, foto nötron ( $\gamma, n$ ) reaksiyonlarının tesir kesitlerinden çok daha düşüktür. Bu nedenle izomerik geçiş reaksiyonları ile numune içinde meydana gelen aktivite ( $\gamma, n$ ) reaksiyonlarıyla elde edilenden çok daha düşüktür.

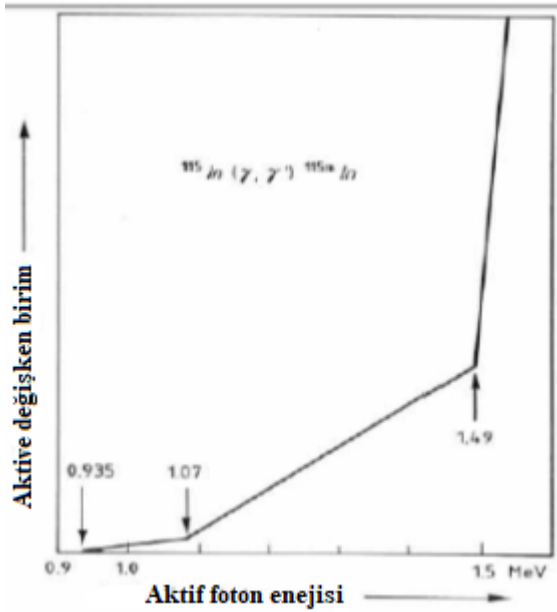
Sonuç olarak izomerik geçiş reaksiyonlarının analitik hassasiyetleri zayıftır. İzole edilmiş bir nükleer enerji seviyesinin uyarılması yalnızca gelen foton enerjisi ve uyarılmış durumun enerjisi arasındaki fark 1 eV den düşük olduğunda olasıdır. Bu sorun, geniş bir enerji aralığında foton içeren birincil bir sürekli foton spektrumunun kullanılmasıyla çözülebilir.

Uygun bir sürekli kaynak yüksek enerjili elektronların bir ağır metal hedef tarafından soğurulmasıyla oluşturulan "bremsstrahlung" radyasyonudur. Bu nedenle elektron hızlandırıcıları, izomerik geçiş reaksiyonlarının kullanıldığı aktivasyon analizleri için rahatlıkla kullanılabilirler.

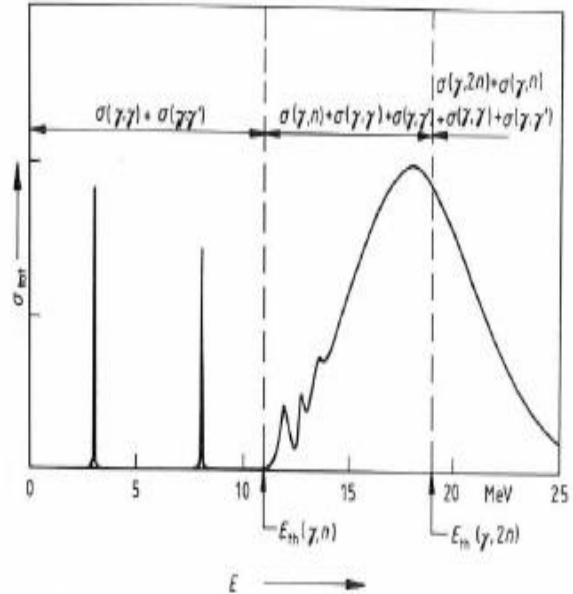
Bremsstrahlung fotonlarının maksimum enerjisi elektron enerjisi ile lineer bir şekilde değişir.

Giderek artan elektron enerjisiyle başarılı bir şekilde daha yüksek nükleer enerji seviyeleri uyarılabilir. Eğer taban durumdan ve (Şekil 2.28) 'de görüldüğü gibi direkt veya kademeli olarak izomerik bir seviyeye bozunma şeklindeki uyarılmalarla meydana gelen iki durum söz konusuysa, elektron enerjisinin bir fonksiyonu olarak izomerin belli aktivitesinden oluşan aktivasyon eğrisi belirgin bir şekilde farklı eğimlere sahip iki kısımdan oluşur. İlk reaksiyon daha düşük seviyedeki uyarılma nedeniyledir (Şekil 2.29).

Eğer elektron enerjisi bir sonraki seviyenin enerjisine ulaşırsa ek olarak izomerik duruma geçişler indüklenir, bu nedenle aktivasyon eğrisinin eğimi bu enerjide artar.



Şekil 2.29. Bremsstrahlung fotonu ile uyarılmış geçiş reaksiyonları (Segebade 1988).



Şekil 2.30. Düşük enerjili soğurma tesir kesiti (Segebade 1988).

## 2.11. Yüklü parçacıkların reaksiyonları

Siklotron veya Van de Graff hızlandırıcıları gibi iyon hızlandırıcılarla üretilen yüklü parçacıklar aktivasyon için kullanılabilir. Nötronlar veya fotonlar gibi yüksüz parçacıklara kıyaslandığında en önemli fark madde içerisinde yüklü parçacıkların daha az sayıda bulunmalarıdır. Bu nedenle aktivasyon için yüklü parçacıkların kullanımında, ışınlanan numune içerisindeki homojen olmayan uzaysal aktivite dağılımı göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu durum aslında numunelerde yüzey analizi gerektiği zaman büyük bir avantaj sağlayacaktır. Uygun bir parçacık enerjisi seçilerek aktive edilen katmanın kalınlığı önceden tayin edilebilir. Böylece hacminden ziyade iyi bilinen bir kalınlığa sahip numunenin yüzey tabakası radyasyona maruz bırakılabilir.

Yüklü parçacıklarla gerçekleştirilen aktivasyon analizi için yukarıda bahsedilenler arasından yalnızca Van de Graaf hızlandırıcıları ve küçük siklotronlar yaygın olarak kullanılmıştır. 100 mikroampere kadar çıkabilen demet akımında onlarca MeV'lik enerjilerde hafif iyon demeti üretebilen kompakt siklotronlar mevcuttur. İstenmeyen reaksiyonlar sonucu numune analizinde karışıklıklara neden olabileceğinden daha yüksek enerjiye sahip parçacıklar aktivasyon için uygun değildir. Bununla birlikte düşük atom numaralı (hafif) dönüştürücüler ile donatılmış olan siklotronlar aktivasyon için uygun enerjilerde nötronlar üretebilirler.

Alfa yayımlayan  $^{242}\text{Cm}$  gibi radyonüklitler bir çok özel durumda aktivasyon için alfa radyasyon kaynağı olarak kullanılabilirler. Aktivasyon için kullanılan en yaygın parçacıklar protonlar, döteronlar, trityumlar, alfa parçacıkları ve ağır iyonlardır. Ağır iyonlar da sıklıkla kullanılmışlardır.

Yüklü parçacıklarla aktivasyonun bazı özel avantajları su şekilde sıralanabilir; Parçacık tetikli x-ışını emisyonunun ve vaktinde yayımlanan gama ışını emisyonunun uygun bir dedektör sistemi ile es zamanlı olarak ölçümlerinin yapılabilmesi. Aktivasyon için yüksek çeşitlilikte parçacıkların bulunması. İstenen nükleer reaksiyonlar için büyük ölçüde sağlanan yarı-serbest seçim şansı. Özellikle hafif element analizi için yüksek yapısal duyarlılık vardır.

### 2.11.1. Fotonötron reaksiyonları

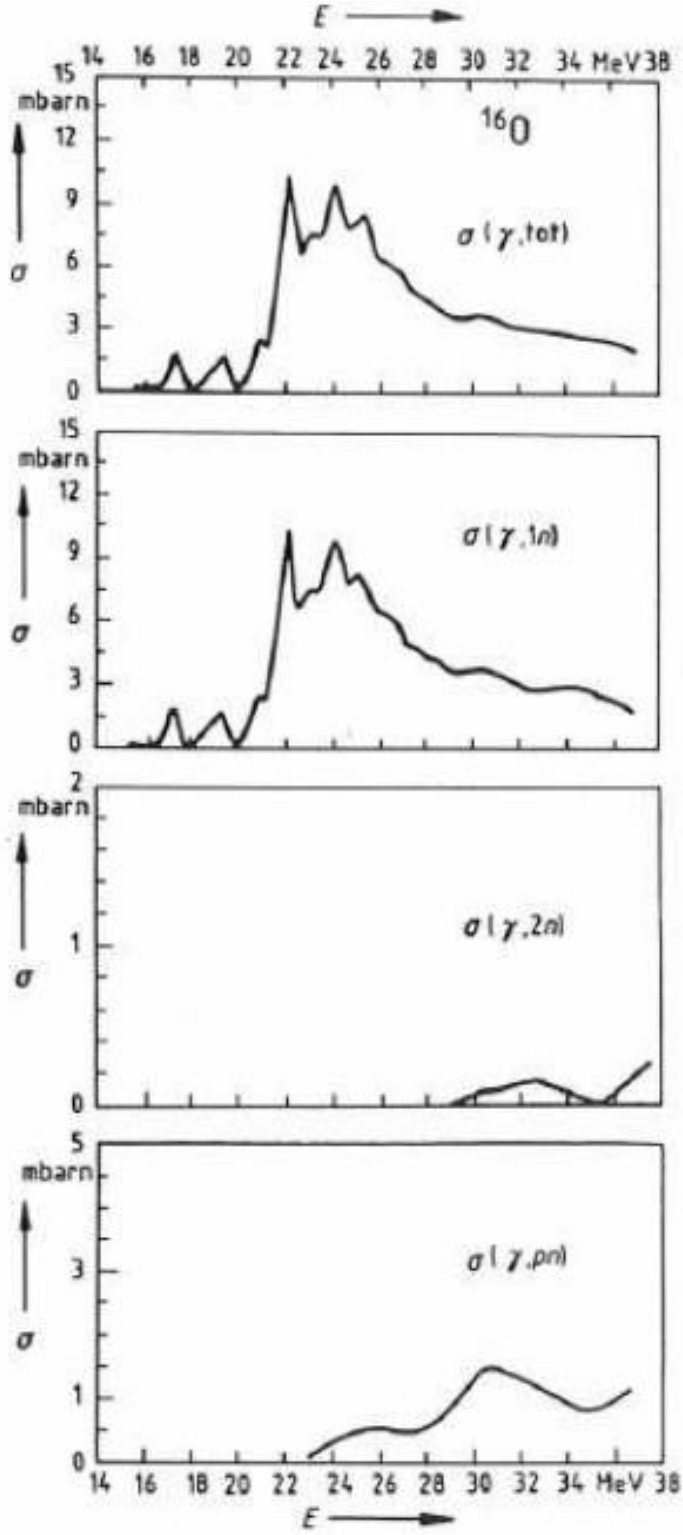
Eğer çekirdeğin uyarılma enerjisi bir nükleonun (nötron, proton) veya daha ağır bir parçacığın ( $\alpha$  parçacığı) bağlanma enerjisinden daha yüksekse, çekirdekten elektromanyetik radyasyon yerine bir nötron veya yüklü bir parçacık yayımlanabilir.

Nükleon yayımlama eşiğinden daha düşük enerjide, bu bölgede birkaç izole edilmiş soğurma çizgisi sergileyen toplam foton soğurma tesir kesitine, yalnızca elastik ve in elastik saçılmalar eşlik eder. Bu eşikten yüksek değerlerde ise uyarılmış nükleer durum foton veya nükleon yayımıyla bozunabilir.

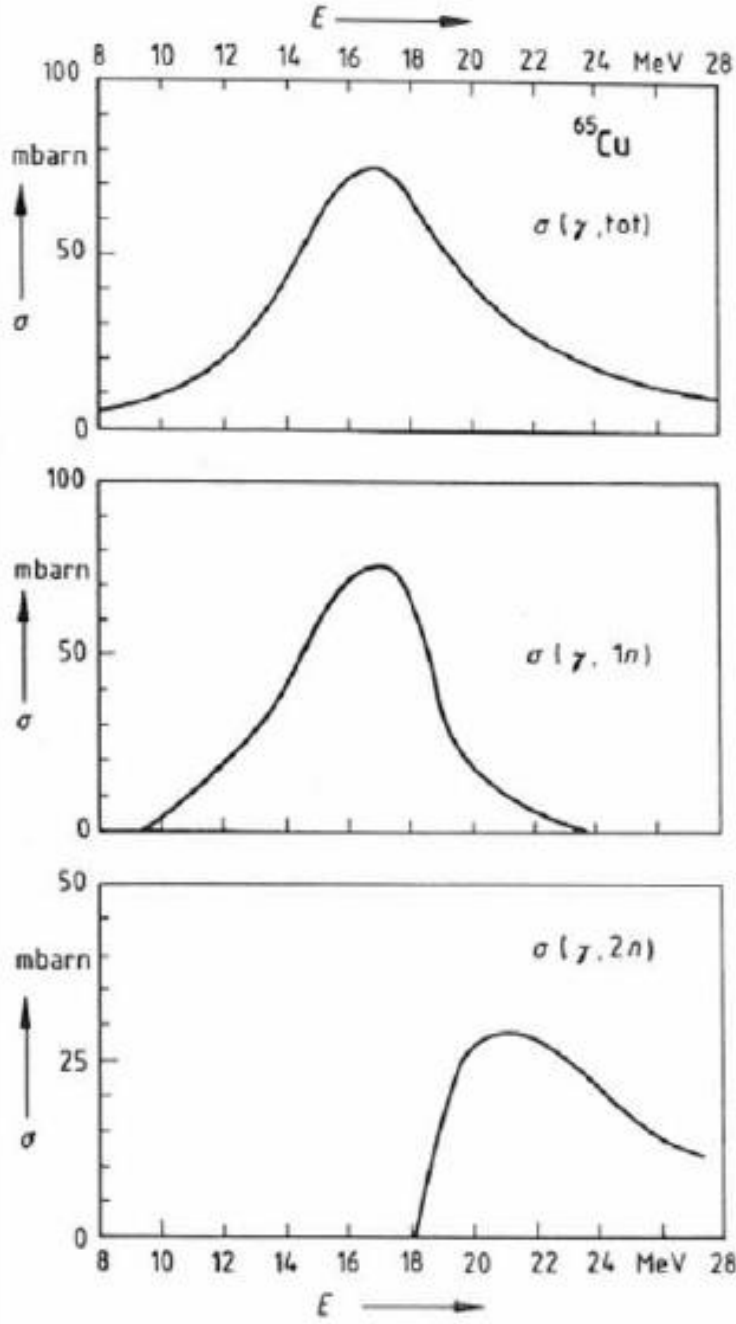
Nükleon yayımlama eşiği üstündeki seviyelerin yaşam sürelerinin çok kısa olması nedeniyle soğurma çizgileri artan bir şekilde genişler. Yüksek enerjilerde bile nükleer seviye açıklığı öyle küçüktür ki uyarılmış durumlar kısmen üst üste biner ve foton soğurması tüm nükleonların kolektif uyarılmasına yol açar. Bu daha önce bahsedilen dev rezonans bölgesidir.

Dev rezonans bölgesindeki toplam tesir kesiti, elastik-in elastik saçılma, bir veya daha fazla nükleonun yayımlanması ve elastik ve kompozit yüklü parçacık katkılarından meydana gelir.

Orta ve ağır çekirdekler için proton ve diğer yüklü parçacıkların yayımlanması Coulomb bariyeri tarafından yasaklanmıştır. Toplam foton soğurma tesir kesiti neredeyse tamamen toplam foto-nötron tesir kesiti ile verilir. Analitik amaçlar için en basit foto -nötron reaksiyon tipi ( $\gamma; n$ ) en önemlisidir (Şekil 2.31).



Şekil 2.31.  $^{16}\text{O}$  için foto-nötron tesir kesiti (Segebade 1988).



Şekil 2.32.  $^{65}\text{Cu}$  için foto-nötron tesir kesiti (Segebade 1988).

Analitik olarak en önemli reaksiyon olan izomerik geçiş reaksiyonunda uyarılmış çekirdekten sadece bir tek nötron yayımlanır.  $(\gamma, n)$  reaksiyonunun eşiği nötronun çekirdeğe bağlanma enerjisi ile aynıdır. Hedef çekirdeğin atom numarasının bir fonksiyonu olarak (Şekil 2.32) 'de gösterilen  $(\gamma, n)$  eşiği, hafif çekirdekler için 15 MeV, ağır çekirdekler için 8 MeV'e kadar nispeten düzgün bir azalışı göstermektedir.

Bazı atom numarası değerleri için hafif kesiklikler söz konusudur. Bu durum nükleer kabuk yapısını yansıtmaktadır ve  $(\gamma, 2n)$  eşik değerleri için daha belirgindir.



## 2.12 Fotoaktivasyon Analizinin Teorik Değerleri ve Formülleri

Doğrusal bir hızlandırıcıdan gelen elektron, bir dönüştürücüden geçer ve yüksek enerjili fotonlar üretir. Gelen ışın etki alanına yerleştirilen numuneler fotonların bir kısmını nükleer reaksiyonlar yoluyla absorbe eder. En yaygın meydana gelen nükleer reaksiyonlar  $A(y,n)$ , burada bir nötron foton tarafından çekirdeğin dışına atılır. Bir diğer nükleer reaksiyon ise  $B(y,p)$ , burada bir nötron foton tarafından çekirdeğin dışına atılır. Işınlanmış bir numuneden sonra, o numunedeki bir element aktivitesi aşağıdaki gibi verilir:

$$A = \frac{m.L.h}{A_r} \cdot \phi \cdot \sigma_{\text{eff}} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot T_i})$$

A: Ürünün aktivitesi

$A_r$ : Aktivitesi bilinen referans numunesi

m: Hedef elementin kütlesi

L: Avagadro sayısı

h: Hedef izotopun bolluğu

$\phi$ : Akı yoğunluğu integrali

$\sigma_{\text{eff}}$ : Nükleer reaksiyon tesir kesiti

$\lambda$ : Ürünün bozunma sabiti

$T_i$ : Işınlanma süresi

Belirli bir gama enerjisinin net tepe alanı aşağıdaki denklem ile verilir;

$$I = A \cdot \theta \cdot \eta \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot T_d}}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot T_c})$$

I: Spesifik gama net pik alanı

$\theta$ : Spesifik gama enerjisinin dallanma oranı

$\lambda$ : Bozunma sabiti

A: Gerçekleşen ışınlanmanın son aktivite değeri

$T_d$ : Işınlanma başlangıcı ile ışınlanma bitişi arasında geçen süre

$T_c$ : Toplam sayım zamanı

$\eta$ : Ürünün bozunma sabiti

$T_c$ : Gama enerjisi için algılama verimliliği

Referans gösterilen numunelerin kütlelerin oranı aşağıdaki denklemi verir;

$$\frac{M_s}{M_r} = \frac{(I_s.A_r.s).(\lambda_s.\theta_r.\dot{\eta}_r).(h_r.\sigma_{eff}.\phi_r)}{(I_r.A_s.r).(\lambda_r.\theta_s.\dot{\eta}_s).(h_s.\sigma_{eff}.\phi_s)} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_r.T_d,r}}{e^{-\lambda_s.T_s,r}}\right) \cdot \left(\frac{1-e^{-\lambda_r.T_c,r}}{1-e^{-\lambda_s.T_c,s}}\right) \cdot \left(\frac{1-e^{-\lambda_r.T_i,r}}{1-e^{-\lambda_s.T_i,s}}\right).$$

$A_r$ : Aktiflik değeri

$I_r$ : Net pik alanı

$A_s$ : Numune kaynaklı aktivite değeri

$I_s$ : Numune net pik alanı

$\lambda_r$ : Bozunma sabiti

$\lambda_s$ : Numunenin bozunma sabiti

Örneklerin kütlelerinin, referans numunenin kütlelerine oranı sabit bir değere sahiptir,  $\sigma_{eff}$  değerini belirlemek için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$\sigma_{eff} = \frac{\int \sigma(Ey) \cdot \frac{1}{Ey} \cdot d(Ey)}{\int \frac{1}{Ey} \cdot d(Ey)}$$

$\sigma(Ey)$  temel rezonans absorpsiyon kesitidir.  $\frac{1}{Ey}$  değeri ise bremsstrahlung akısını temsil ediyor (Green 2009).

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Element Analizinde Kullanılan Farklı Metodlar

##### 3.1.1. XRD metodu

Çok geniş bir uygulama alanı olan X-Işını Kırınımı (XRD) tekniği ile kristalin yapıya sahip inorganik ve bazı organik fazlar nitel ve nicel olarak tanımlanabilmektedir. Yani XRD metodu için kimyasal düzeyde bir analiz tanımı yapılabilir. Maddeyi atom boyutunda inceleyen bir tekniktir.

XRD yönteminde, X-ışını Difraksiyon spektroskopisi, adında da anlaşılacağı üzere X-ışını kullanılarak yapılan bir analiz yöntemidir. X-ışınları, Ultraviyole ışıklardan daha yüksek, gama ışınlarından daha düşük enerjili ışıklardır.

XRD tekniğinin temeli angström boyutundaki dalga boyuna sahip, X-ışınlarının kristallerin, yüzeylerini oluşturan atom düzlemleri arasında (kristal kafesi içerisine) girip-çıkabilmeleri ve bu yüzeylerden kırılarak yansiyabilmeleri prensibine dayanır (Bragg Eşitliği). Böylelikle her bir mineralin kristalinin parmak izi niteliğinde olan birim hücre parametreleri (d değerleri) tespit edilerek, mineraller tanımlanabilmektedir.

“Toz X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri, standartlara uygun olarak öğütülmüş (toz) numuneler üzerinde, toz X-ışını difraktometresinde ve amaca uygun analitik koşullarda gerçekleştirilmektedir”(Anonim 11).

##### 3.1.2. XRD yöntemi ile Fotoaktivasyon analizi yöntemi arasındaki farklar

XRD yöntemi, Maddenin katı yapısı ve toz yapısı örneklerin, çeşitli kristal formlar veya fazlar hakkında bilgi veren analitik bir tekniktir. XRD metodunda maddenin mineral yapısını tespit edilerek, buradan kimyasal formülü hesaplanır, ve kimyasal formüldeki etkin element tespit edilir.

XRD metodu, angström boyutlarında yani, atomik boyutlarda inceleme yapan bir madde analiz tekniğidir. Ayrıca düşük atom numarasına sahip elementlerin incelenmesi XRD yöntemi ile hassas sonuçlar vermeyecektir (Anonim 12).

Fotoaktivasyon analizi yöntemi ise, incelenen numune yapısının, kararlı haldeki çekirdeğini uyararak karakteristik gama ışınları analizi ile, numunedeki elementlerin yoğunluğu ve çeşidi hakkında bilgi verir. Bu çalışmada ise, sadece elementin kendisini değil, izotopları, kız ve ana çekirdekleri, yapmış olduğu ışınları tespit ettik, bu yönü ile diğer kantitatif element analizlerinden ayrılmaktadır. Yapmış olduğumuz analiz kalitatifdir.

### 3.1.3. XRF metodu (X-Işınları floresans spektrometresi)

XRF metodunu tanımlarsak, X-ışınları atomun yüksek enerjiye sahip foton veya hızlandırılmış elektron ile uyarılması sonucu atomdan koparılan bir elektronun, atom yörüngesinde bıraktığı boşluğun dış yörüngedeki elektronun boş seviyeye geçişi ile işlem tamamlanır. Uyarılan atomun yaydığı X-ışınının enerjisi elemente özgüdür, şiddeti elementin çokluğu ile orantılıdır. X-ışınlarının bu özelliklerinden yararlanılarak elementlerin nitel ve nicel analizleri yapılabilmektedir.

XRF metodunu teknik olarak incelersek, numuneye gönderilen X-ışınları ile meydana gelen, floresans hadeki x-ışınları, yapısında kristal bulunan spektrometre ile analiz edilerek, değişik açılardan gelen ve bunlarının pik lerinin şiddetlerine bağlı olarak, gerçekleştirilen kantitatif element analizi gerçekleştirilir.

XRF metodunun, hızlı sonuç vermesi nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir, kullanılan alanlar, jeoloji, tıp, kimya, ilaç sanayi bu alanlardan bazılarıdır.

### 3.1.4. XRF analiz yöntemi ile fotoaktivasyon analizi yöntemi arasındaki farklar

X-ışını floresans yöntemi, fotoaktivasyon analizi kadar hassas değildir. Çok özel koşullarda milyonda birkaç seviyelerindeki konsantrasyonlar ölçülebilir. Yöntemin normal ölçüm sınırları ancak % 0.01 - %100 aralığındadır.

Hafif elementlerin X-ışını floresans yöntemiyle analizi uygun değildir; atom numaraları 23 (vanadyum)'dan daha küçük olan elementlerde analiz zorlaşır. Ayrıca XRF analiz yöntemi kantitatif bir yöntemdir, yani bir maddenin içindekilerin ne olduğunu değil, bu maddenin içinde bulunanların ne kadar olduğunu analiz etmek için kullanılan bir analiz yöntemidir. Atom numarası 9 ile 92 arasında olan elementlerin kantitatif analizini yapar. Atom numarası 9'un altında olan elementleri inceleyemez. Kimyasal bağ derecesinde yeterince hassas değildir.

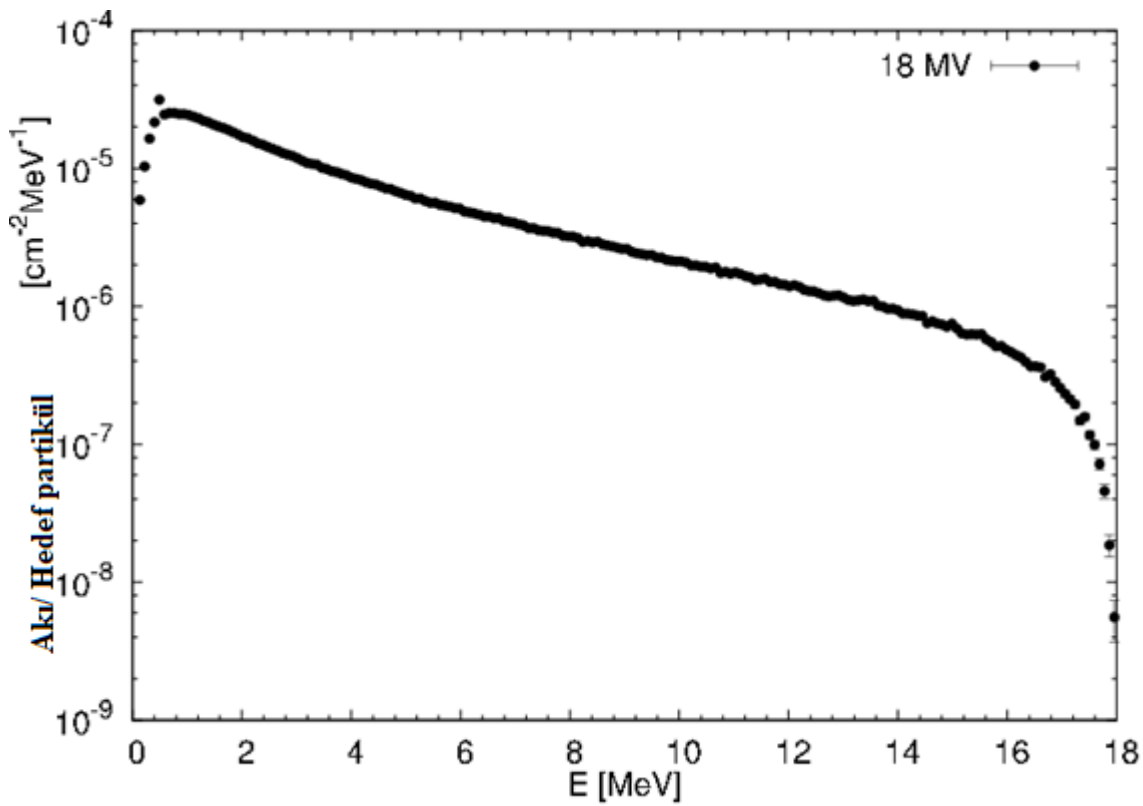
Fotoaktivasyon analizinde ise, her tür element için hassas ölçüm alınmaktadır. Fotoaktivasyon analizinde önemli olan elementin atom numarası değil, spektrumdaki enerji değeridir. Buradan hareketle, tüm elementlerin sadece kendisi değil, izotopları ve kız çekirdek halinde ulaşılabilir. XRF yönteminden farklı olarak ayrıca, burada biz sadece elementlerin neler olduğuna baktık, ne kadar olduğu ile ilgilenmedik.

### 3.2. Kullanılan Materyaller

#### 3.2.1. C-Linac ( klinik linear hızlandırıcı)

Materyal aktivasyonu için kullanılan c-linac (klinik linear hızlandırıcı), Bremsstrahlung fotonu kaynağı olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan klinik linak 18 MeV luk enerjiye sahip bremsstrahlung fotonları üretmektedir (Şekil 3.1). Klinik linakın temel olarak çalışma prensibi elektronların vakum yolu ile doğrusal olarak ve manyetik alan kullanılarak hedef materyale ulaştırılması şeklindedir.

Philips SLI-25 marka cihazın bremsstrahlung enerji sürekliliği aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Klinik linear hızlandırıcı Philips SLI-25' den elde edilen bremsstrahlung foton dağılımı (Anonymous 4).

#### 3.2.2. Gama spektrometresi

Örneklerin sayımı p tipi, koaksiyel (es eksenli), elektrik soğutuculu HPGe ile yapılacaktır. AMATEK-ORTEC (GEM40P4-83) model HPGe dedektörünün bağıl verimi %40 olup <sup>57</sup>Co radyoizotopunun 122 keV'deki piki için yarı yükseklikteki 99 tam genişlik (FWHM) değeri 768 eV, <sup>60</sup>Co radyoizotopunun 1332 keV'deki piki için FWHM değeri 1.85 keV'dir.

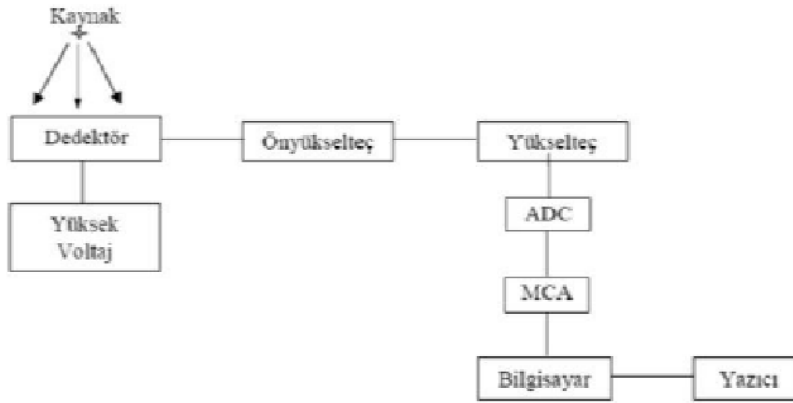
Sol resimde 10 cm kalınlığındaki HPGe dedektörü içine aktive edilmiş numune konularak ölçüm işlemi gerçekleştirilir. Sağ taraftaki bilgisayarda MAESTRO isimli programda pikler elde edilir. En son analiz GF3 isimli programda gerçekleştirilir.



**Şekil 3.2.** Gama spektrometre donanımı

Örneklerin sayımı p tipi, koaksiyel (es eksenli), elektrik soğutuculu HPGe ile yapılacaktır. AMATEK-ORTEC (GEM40P4-83) model HPGe dedektörünün bağıl verimi %40 olup  $^{57}\text{Co}$  radyoizotopunun 122 keV'deki piki için yarı yükseklikteki 99 tam genişlik (FWHM) değeri 768 eV,  $^{60}\text{Co}$  radyoizotopunun 1332 keV'deki piki için FWHM değeri 1.85 keV'dir.

HPGe dedektörü yine ORTEC markalı güç kaynağı, spektroskopi yükseltici, analog dijital dönüştürücüden oluşan NIM (Nuclear Instrumentation Module) kasaya ve bir bilgisayara bağlanmıştır. HPGe dedektörü 10 cm kalınlığındaki kursun bir zırh içerisinde bulunmaktadır. Ayrıca zırhtan kaynaklanabilecek x-ışınlarını filtrelemek için kursun zırhın iç kısmı 2 mm bakırla kaplanmıştır. Veri toplama ve analiz işlemleri MAESTRO (ORTEC) VE GF3 (RADWARE) yazılımları ile gerçekleştirilmektedir. Şekil (3.2)'de NUBA bünyesinde bulunan HPGe dedektör ve ekipmanlarının bir fotoğrafı verilmiştir.



**Şekil 3. 3.** Gama spektrometresinin şematik gösterimi.

Burada dedektörün yanı sıra dedektörün yük birikimi için gerekli elektrik alanı oluşturmak üzere, (-) veya (+) 5000 V'a kadar gerilim sağlayan yüksek voltaj ünitesi, dedektörden gelen atmaları depolanan enerji ile orantılı olarak voltaj sinyaline dönüştürüp atmaları şekillendiren ve büyüten ön yükselteç, ön yükselteçten gelen atmaların, atma yüksekliği analizi yapılabilecek kadar yükseltilmesini ve en iyi enerji ayrılmasını sağlayacak şekilde şekillendirmeyi sağlayan yükselteç, spektroskopi yükseltecinden gelen sinyalleri genlikleri ile orantılı olarak sayısal sisteme dönüştüren analog-dijital dönüştürücü (ADC) ve spektrumda oluşan piklerin

(atmaların) yüksekliğini ve küçük voltaj aralıklarında meydana gelen sayımları ölçen çok kanallı analizör (MCA), spektrometre sisteminde bulunan ve ölçümün bilgisayar yazılımları ile değerlendirilmesine olanak sağlayan tamamlayıcı elemanlardır (Şekil 3.3).

### 3.2.3. İncelenen numune ve referans materyali

Araştırmada incelenen numune insan diş numunelerinin içerisindeki elementleri tespit edilmiştir. Diş numunesi mineral özelliğe taşıyan hassas bir dokudur. İçerisinde yoğun olarak stronsiyum ve kalsiyum elementleri bulunmaktadır.

Fakat bu her diş numunesinde farklılık gösterip adeta bir parmak izi niteliği taşımaktadır. Referans materyali hazırlanırken de stronsiyum ve kalsiyum elementleri ile hazırlanmıştır. Referans materyali hazırlama yöntemi ICP-MS dir.

### 3.2.4. Diş numunelerinin hazırlanışını

Diş numuneleri klinik lineer hızlandırıcı ile aktive edilmeden önce 3 farklı işlemde geçmektedir.

#### 1-Kurutma işlemi

Diş numunelerinin mineral yapısı sebebiyle, öğütülmeden önce içeriğinde nem kalmaması için 105 °C' de 2 saat boyunca nemden arındırılıyor (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Diş numunelerindeki nemi almak için fırınlanırken.

2 saatin sonunda fırından çıkan diş numuneleri, nemi geçirmeyen kaplarla taşınarak elektronik değirmene taşınır.

## 2-Öğütme işlemleri

Elektronik değirmende toz haline gelir, varsa yabancı cisimler ayklanır. Toz haline gelmiş diş numunesi yine nemi geçirmeyen kapla taşınarak, nemi geçirmeyen plastik tüplere alınır. İşlem geçirmiş diş numunesinin görüntüsü (Şekil 3.5).

Öğütme işleminin hassas kalıntı bırakmayacak bir aletle yapılması gerekmektedir. Çünkü diş minerali kirliliğe karşı çok hassas bu yüzden nem den ve yabancı madde kirliliğinden korumamız gerekiyor.

Bu yüzden öğütme işleme hassas elektronik değirmende gerçekleştirildi. Öğütme değirmeninin bilyesi diş numunesine karışmayacak bir elementel yapıya sahiptir.



**Şekil 3.5.** Diş numunesinin toz haline gelmiş görüntüsü.

## 3-Paketleme işlemleri

Son olarak toz haline gelmiş diş numunesi ve toz halinde olan referans materyalinden, 1er g'dan daha fazla miktarda olmak üzere alınır. Alüminyum folyo ile sarılarak, sarma örgüsü önce bakır monitör, referans materyali, bakır monitör, diş numunesi ve yine en son bakır monitör konularak sarılır. Son halini aldığı anda klinik lineer hızlandırıcıda aktive edilmeye hazırdır.

Paketleme işlemleri numune hazırlamanın son safhasıdır. Bu kısımda dikkat edilen hususlar kalibrasyon materyali ve diş numunesi paket haline getirilirken nem geçirmeyen kapalı kap ortamında alüminyum folyo ile sarıldılar. Hem kalibrasyon materyali hem de diş numunesi hassas tartı da kütlesi tartılarak kaydedildi.

Ayrıca tek tek bütün bakır monitörler hassas tartı da kütleleri tartılıp kaydedildi. Paket son halini aldığı zaman (Şekil 3.6) bütün olarak tartıldı ve aktive olmak için zaman kaybetmeden ve nemi geçirmeyen kaplarla klinik lineer hızlandırıcıya taşındı.





**Şekil 3.6.** Aktive edilmeye hazır paket

Yaklaşık kare formda olan paket siyah ile boyalı bölge, klinik lineer hızlandırıcının çıkış noktasına yerleştirilir. Yani klinik lineer hızlandırıcıdan çıkan fotonlar ilk olarak numunenin siyaha boyalı kısmı ile temas edecektir.

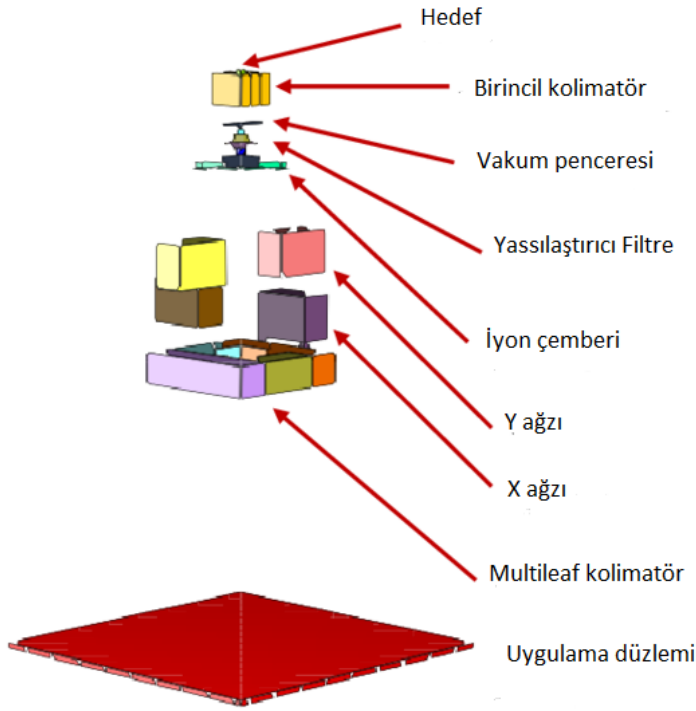
Aktif hale getirilen diş numunesi, karakteristik gama ışınlarının ölçümü için gama spektromesi, yapılmak üzere HPGe (Yüksek saflıkta germanyum) dedektöründe ölçüm yapılmak üzere taşınır. Taşıma işlemi tamamen kurşunla kaplanmış özel kaplarla gerçekleşir.

### **3.3. Bakır Monitörler**

Paket hazırlanırken, paket içerisine yerleştirilen bakır plaka (monitör)'lerin yerleştirme düzeni şu şekildedir, ilk olarak bakır monitör daha sonra kalibrasyon materyali, daha sonra bakır monitör, sonra diş numunesi şeklinde bir dikdörtgen biçimli şekil oluşmuştur. Bakır monitörlerin kullanılma nedeni ise, hızlandırıcıdan gelen akının, numuneye eşit olarak dağılmasını sağlar (Kavun, 2017).

Ayrıca bu monitörün bakır olmasının nedeni ise, bakır elementinin yarılanma ömrü çok kısa ve kimyasal olarak diş numunesinde herhangi bir kirliliğe sebep olmamaktadır. İşte bu sebeplerden dolayı, bakır monitörler kullanılarak (Şekil 3.6)'daki paket hazırlanır. Kararsız forma geçmeye hazır hale gelen numune ise, aşağıdaki (Şekil 3.7)'de kararsız hale getirilir.

### 3.4. Numuneyi Aktive Etme



**Şekil 3.7.** Klinik lineer hızlandırıcı

Analiz edilecek örnekler c-linac ile uç nokta enerjisi 18 MeV olmak üzere ışınlanacak ve aktive edecektir. Elektron doğrusal hızlandırıcının (e-LINAC) çalışma prensibi, elektronların vakum ortamında doğrusal bir kılavuzunun içinde hızlandırılması ve manyetik alanlar ile yönlendirilmesine dayanmaktadır.

İlk olarak vakum ortamında bulunan tungsten bir dirençten elektrik akımı geçirilerek termiyonik olarak elektronlar yayımlanması sağlanır.

Bremsstrahlung fotonlarının manyetik alan kullanılarak düz bir forma getirilişi ve hedef pozisyonuna etki etmesi şekilde görüldüğü gibidir. Burada klinik linak 18 MeV' luk bir enerji ile bremsstrahlung fotonları üreterek numuneyi 2000MU' luk bir radyasyona maruz bırakır.

Bu işlem yaklaşık bir saat sürmektedir. Numune fotonların çıkış noktasından yaklaşık 60 cm uzaklıktadır. Bremsstrahlung fotonlarına maruz kalan numune aktive edilmiş olur.

### 3.5. Ölçüm İşlemi ve Analiz Süreci

Klinik linak' ta aktive edilen numune belli bir bekleme süresi ardından ölçüm işlemi için HPGe dedektörü içine yerleştirilir. Daha sonra gama spektrometresi uygulanır. Her bir numune paketinde bulunan 3 adet akı monitörü için 5 dakikalık ölçüm alınmıştır. Akı monitörleri bileşimi bakırdır. Bakır çok aktif bir element olduğu için ölçümleri 24 saat sonra alınmaya başlar.

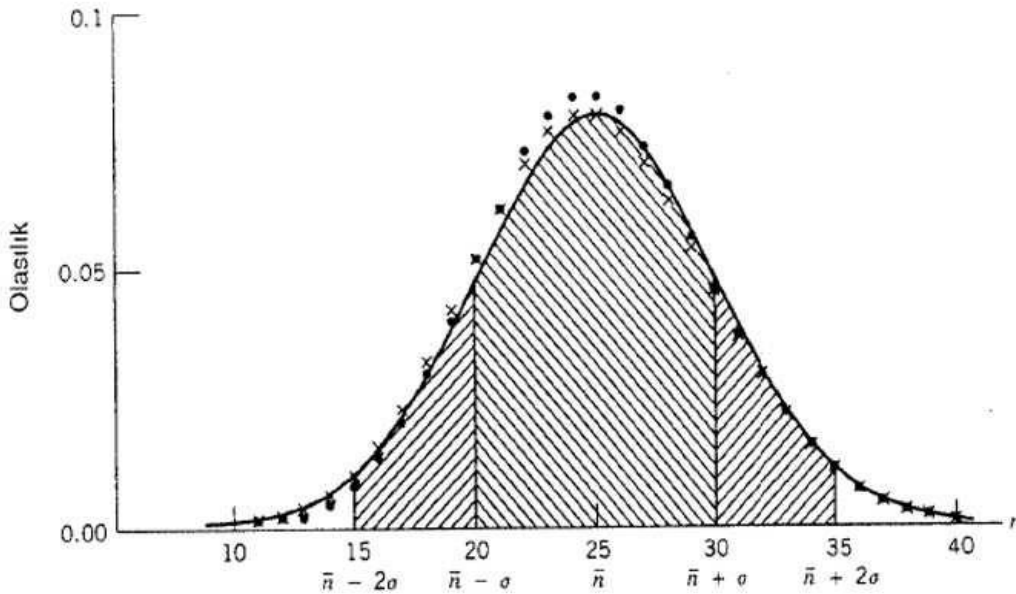
Diş numuneleri ve referans materyalleri aktive edildikten ve soğuma işlemi gerçekleştirildikten sonra, soğuma işlemi 1 saat' tir. Aynı anda HPGe dedektöründe 24 saatlik ölçüm alınmaktadır. Gama spektromesi sonucu elde edilen ölçümlerde ölü zaman yaklaşık %3 civarında olacak şekilde gerçekleşti. Bu sisteme göre numunenin dedektör içindeki uzaklığı ayarlanmıştır.

Gama spektromesinin son ayağı olan bilgisayarda analiz süreci başlar. MAESTRO32 isimli programla kaydedilen spektrum devamında gf3 (radware) ile grafik analizi ile karakteristik gama ışını analizi gerçekleştirilmiş olup, elde edilen veriler ışığında diş numunesindeki var olan elementleri tespit için bir sonraki adım olan NuDat2.7'den elementlerin tespiti gerçekleştirilmeye başlandı.

### 3.6. Sayım İstatistiği

#### 3.6.1. Gausyen dağılımı

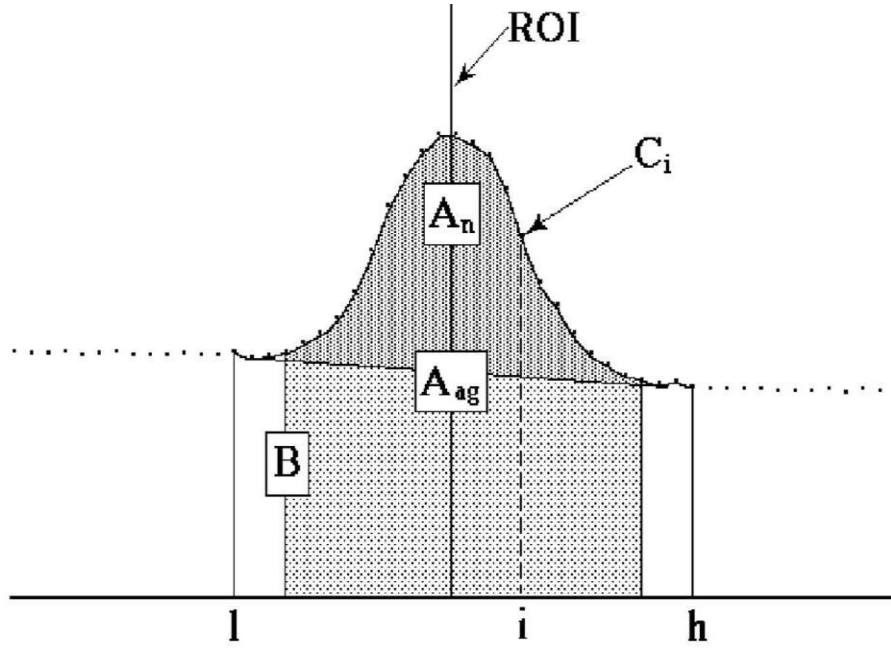
Deneylerdeki birçok rastgele değişken sürekli iken, gausyen dağılımı reel değişkenler ve kesikli rastgele değişkenleri içeren hem binom hem de poisson dağılımları içindir. Birçok deneme varsa ve değerler arasındaki değişiklik küçükse kesikli rastgele değişkenler için bile sürekli dağılımlar varsayılır. Yaklaşık 20 ve üzerindeki ortalama değerleri için poisson dağılımı simetrik hale gelir (Şekil 3.8) ve eşitlik ile verilen normal dağılım kullanılabilir.



**Şekil 3.8**  $n = 25$  için binom (•), poisson (×) ve gauss (—) dağılımlarının karşılaştırılması (Krane 1988).

#### 3.6.2. Pik alan hesabı

Bütün enerji pikini belirlemek için kullanılan detaylı yöntemlerden birisi hesaplanan arka plan değerinin çıkarılmasından sonra kalan veri için Gauss fonksiyonunu pike fit etmektir. Background değeri çıkarılmalıdır, çünkü pik Compton süreklilik bölgesi üzerinde olabilir. Bu genellikle (Şekil 3.9)'da görülebileceği gibi pikin alt ve üstündeki arka plan kanal grupları arasında lineer bir çizginin çekilmesiyle yapılır.



Şekil 3.9. Arka plan (Background) hesaplama detayları (Ortec 2008)

Pikin düşük kanal tarafındaki taban sayım, pik ilgili bölgesi için (Regions of Interest -ROI) ilk üç kanalının ortalamasıdır. Bu arka plan noktası için kanal numarası bu üç noktanın orta kanalındır. Pigin yüksek kanal tarafındaki arka plan ise ROI'nin son üç kanalının ortalamasıdır ve bu arka plan noktası için kanal numarası bu üç noktanın ortasıdır. Bu durumda arka plan için alan aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$B = \left( \sum_{i=l}^{l+2} (C_i) + \sum_{i=h-2}^h (C_i) \right) \cdot \frac{h-l+1}{6}$$

- B : arka plan alanı
- l : küçük ROI limiti
- h : büyük ROI limiti
- C<sub>i</sub> : i - inci kanal içeriği
- 6 : her iki tarafta uzer adet kullanılan veri kanal sayısı

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

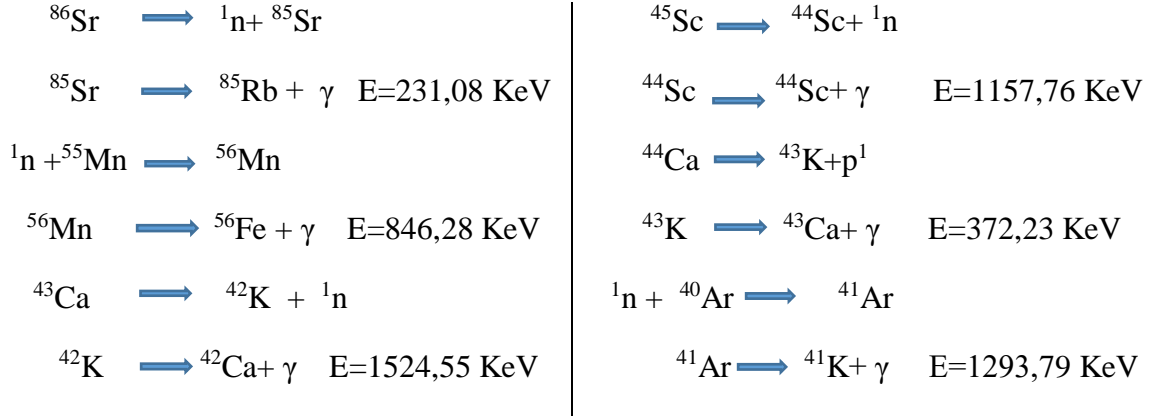
Burada örnek olarak (Şekil 4.1)'de bir numunenin enerji spektrumu ve değerleri bulunmaktadır. Elde edilen enerji değerleri aslında bir elementi simgelemektedir. Bu elementlerin tespiti NuDat2.7'deki enerji bilgileri ve yarı-ömürler göz önüne alınarak yapılmıştır.

**Çizelge 4.1.** 24, 30, 37 Numaralı 12, 23 ve 37 yaşındaki erkek, 4, 10 numaralı 25 ve 52 yaşındaki kadın, numunleri için verilen enerji değerleri.

30 Numaralı numune için enerji değerleri (KeV)	37 Numaralı numune için enerji değerleri ( KeV)	24 Numaralı numune için enerji değerleri ( KeV)	4 Numaralı numune için enerji değerleri (KeV)	10 Numaralı numune için enerji değerleri (KeV)
161,18	132,91	158,76	144,22	210,77
197,38	217,13	231,08	221,10	231,80
372,92	372,48	372,23	245,76	373,05
438,71	391,42	388,01	372,52	437,54
488,22	438,55	488,64	401,46	581,92
499,14	498,90	591,40	590,98	616,86
582,17	541,23	617,08	644,42	724,65
711,53	645,90	807,52	847,04	846,92
862,12	722,49	834,40	914,54	862,43
846,54	778,89	846,28	1048,07	915,14
989,85	846,70	989,85	1276,23	1142,76
1156,82	952,45	1157,76	1297,18	1377,03
1275,44	1156,94	1293,79	1562,56	1398,42
1323,99	1232,36	1377,44	1823,90	1653,82
1345,51	1443,27	1460,39	1966,29	1729,48
1371,68	1492,07	1524,55	2096,52	1824,01
1823,12	1654,24	2113,1	2341,56	1902,41
1945,86	1729,34	2127,54	2488,98	2124,13
2098,51	1967,48	2242,73	2612,97	2421,43
2489,28	2421,62	2613,46	2672,21	2613,09

Enerji değerleri bilinen dış numunesinin içerdiği elementlere ve yapmış olduğu bozunumlara bakarsak, numunelerde gözlemlenen reaksiyonlar ( $\gamma,n$ ), ( $n,\gamma$ ) ve ( $\gamma,p$ ) reaksiyonlarıdır. Klinik lineer hızlandırıcı ile  $\alpha$  ışınması gözlemlemek mümkün değildir. Çünkü kullandığımız klinik lineer hızlandırıcının enerji değeri 18 MeV'dur. 24 numaralı numune için tespit edilen elementler ve yapmış oldukları reaksiyonlar, enerji değerleri ile birlikte aşağıdaki gibi verilmiştir.

Numune no: 24 Yaş:37 Cinsiyet : Erkek

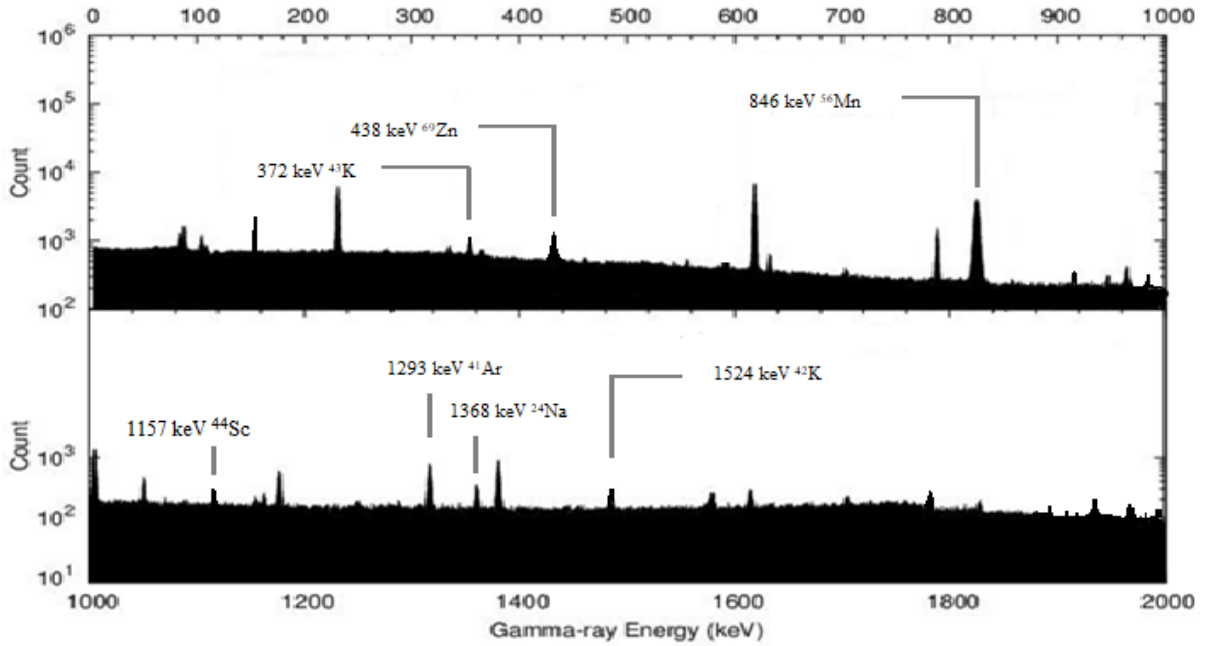


Dış numunesinde, mümkün olan reaksiyonlar, bozunum türleri ve ana çekirdek aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Fotonükleer reaksiyon sonucu dış numunelerinde oluşabilecek radyoaktif ürün çekirdekler ve bu çekirdeklerin mümkün bozunumları.

Ana çekirdek	Mümkün reaksiyonlar ve ürünleri			Mümkün Bozunum Türleri	
	( $\gamma,n$ )	( $n,\gamma$ )	( $\gamma,p$ )	$\beta^-$	$\beta^+/\text{EC}$
$^{68}\text{Zn}$	$^{67}\text{Zn}$	$^{69}\text{Zn}$	$^{67}\text{Cu}$	$^{69}\text{Ga}, ^{67}\text{Zn}$	
$^{44}\text{Ca}$	$^{43}\text{Ca}$	$^{45}\text{Ca}$	$^{43}\text{K}$	$^{45}\text{Sc}, ^{43}\text{Ca}$	
$^{41}\text{K}$	$^{40}\text{K}$	$^{42}\text{K}$	$^{40}\text{Ar}$	$^{42}\text{Ca}$	
$^{55}\text{Mn}$	$^{54}\text{Mn}$	$^{56}\text{Mn}$	$^{54}\text{Cr}$	$^{56}\text{Fe}$	
$^{45}\text{Sc}$	$^{44}\text{Sc}$	$^{46}\text{Sc}$	$^{44}\text{Ca}$	$^{46}\text{Ti}$	
$^{84}\text{Sr}$	$^{83}\text{Sr}$	$^{85}\text{Sr}$	$^{83}\text{Rb}$		$^{83}\text{Rb}$
$^{86}\text{Sr}$	$^{85}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}$	$^{85}\text{Rb}$		$^{85}\text{Rb}$
$^{23}\text{Na}$	$^{22}\text{Na}$	$^{24}\text{Na}$	$^{22}\text{Ne}$	$^{24}\text{Mg}$	
$^{25}\text{Mg}$	$^{24}\text{Mg}$	$^{26}\text{Mg}$	$^{24}\text{Na}$	$^{26}\text{Al}$	
$^{87}\text{Sr}$	$^{86}\text{Sr}$	$^{88}\text{Sr}$	$^{86}\text{Rb}$	$^{86}\text{Sr}$	
$^{40}\text{Ar}$	$^{39}\text{Ar}$	$^{41}\text{Ar}$	$^{39}\text{Cl}$	$^{39}\text{K}, ^{41}\text{K}$	
$^{58}\text{Ni}$	$^{57}\text{Ni}$	$^{59}\text{Ni}$	$^{57}\text{Co}$		$^{57}\text{Fe}$
$^{64}\text{Ni}$	$^{63}\text{Ni}$	$^{65}\text{Ni}$	$^{63}\text{Co}$	$^{65}\text{Cu}, ^{63}\text{Cu}$	
$^{43}\text{Ca}$	$^{42}\text{Ca}$	$^{44}\text{Ca}$	$^{42}\text{K}$	$^{42}\text{Ca}$	

#### 4.1 Enerji Spektrumu



Şekil 4.1. 36 Numaralı numune için enerji spektrumu

Şekildeki enerji spektrumu 36 numaralı dış numunesinin enerji spektrumudur. Şekilde oklarla belirtilen izotoplar gözlenmesi mümkün olan elementleri göstermektedir.

Bakır monitör ölçümleri fotoaktivasyon işleminden 1 gün sonra ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni yüksek miktarda aktifliğin ölü zamanı arttırmasıdır ve veri alımında hatalara sebep olmasıdır.

Ayrıca bazı numunelerde, numuneyi öğütme işlemi sırasında, dış numunesinde metal bazı kalıntılar tespit edilmiştir. Tespit edilen bu kalıntıların o numune içinde kirlenmeye sebep olabileceği düşünülmektedir.

Bu yüzden özel olarak numune 4 için tekrar detaylı inceleme ye sebep olmuştur. Hata kaynaklarının azaltılması için en üst seviyede dikkat ve ehemmiyet gösterilmesi rağmen, numune kaynaklı bir durum burada dikkat çekiyor. Bu numunede tespit edilen amalgam yapılı dolgu maddesi nedeniyle kirlilik oluşmuştur.

Bu çalışmada ayrıca başka bir makine kaynaklı eksik veri durumu söz konusu olabilir, bunun nedeni yarılanma ömrü 1 saat ve daha sürede olan elementlerin tespiti olanaksızdır. Bir numunenin spektrumu incelendiğinde, bazen yarılanma ömründen dolayı elementi tespit edemeyiz.

Bunun nedeni numune uyarıldıktan en erken 1 saat içinde numuneye ulaşmamızdan dolayıdır. İnsan sağlığı açısından ilk 1 saat numune ile temas ta bulunulmaması gerekmektedir. Eğer numune ilk aktif hale geldiğinde, ölçülmesi mümkün olsa, yarılanma ömrü 1 saatten az olan numuneler de tespit edilebilir, hale gelirdi.

XRF ve XRD metodunda bu tür bir etkiden söz etmemiz olanaksız. Çünkü bu yöntemlerde yapılan ölçüm süreçlerinin tamamı elektronik ortamda gerçekleşiyor. Fotoaktivasyon analizi yönteminin eksiklerinden biri olarak söz etmemiz mümkün olacaktır.

Fakat diğer ölçüm metodlarının aksine fotoaktivasyon analizinin tercih edilme nedeni, elementlerin kız, ana ve izotop çekirdeklerine ulaşabiliyor olmamızdan kaynaklanır. Yani kalitatif olarak mükemmel sonuç sağlayacaktır. Ayrıca fotoaktivasyon analizi ile istenirse kantitatif ölçüm yapmak ta mümkün olacaktır. “Yani analiz edilmek istenen numune hakkındaki, ilgilenilen elementler ile yüzdesel oran tespit etmek mümkün olacaktır”(Kavun 2017).



## 5. SONUÇ

Fotoaktivasyon yönteminin, dış numunelerinin mineral yapısında herhangi bir değişikliğe uğratmadan gerçekleşmesi, bu yöntemin en önemli faydalarından birisidir.

Fotoaktivasyon sürecine mercek tutacak olursak, ilk olarak dış numunesinin mineral bileşimine benzer (aynı elementler) oranda bir kalibrasyon materyali hazırlanır. Bu materyalin hazırlanışında ICP-MS yöntemi kullanılır. Daha sonra dış numunesi üzerinde çeşitli işlemler gerçekleşir, ilk olarak 105 °C' de 2 saat boyunca nemi alınmak üzere fırında kalır. Nemi alınmış dış numunesi toz haline getirilmek üzere, değirmende öğütülür. Toz hale gelen dış numunesi, nemden koruyan kaplarla laboratuvara taşınır. Laboratuvarda dikdörtgen biçimli, alüminyum folyo ile kaplı, kütlesi 1g'dan fazla olmak üzere paketlenir. Başlangıçta elementleri kararlı halde bulunan dış numunesinin, 18MeV'lik uç enerjisine sahip klinik linak ile elementleri kararsız hale getirilir (aktive edilir). Daha sonra bu elementler kararlı hale geçerken, karakteristik gama ışını yayımlarlar, bu karakteristik gama ışınları parmak izi niteliği taşımaktadırlar, karakteristik gama ışınlarının tespiti, yüksek saflıktaki germanyum detektörleriyle yapılır. Maestro programı ile spektrum kaydedilir, daha sonra ise gf3 radware isimli programda analiz işlemi gerçekleştirilir. Elementlerin kimliklerinin tespit edilmesinde NUDAT internet sitesindeki verilerden de faydalanılır. Elementi tespit ederken, iki kriter önem kazanıyor, birincisi enerji değeri, ikincisi ise yarılanma ömrü, bu kriterlerden çıkarılan sonuçlarla element analizi tamamlanır.

Bu çalışmada fotoaktivasyon analizi yöntemi (PAA) ile dış numunelerinin element çeşitliliğine incelenmiş olup, benzer çalışmalarda (Fallo-Sotello 2005), (CHAO 2009) gözlemlenen Sr, Zn, Cu, Ni, Fe, Mn, Na, Sc, Mg, Ca, K, Ga, Cl, Rb elementlerinin varlığı teyit edilmiştir.

Analiz için yerli imkanlar kullanılarak klinik lineer hızlandırıcı kullanılmıştır. 18 MeV'lik bremsstrahlung fotonları ile aktive edilen numunelerin gama spektromesi ile sayımları yapılmıştır. Gama spektromesi düzeneğinde HPGe dedektör kullanılmıştır. Elde edilecek verinin güvenilirliği için dış numunesi, referans materyali ve bakır monitörler için veri alımı aynı şekilde uygulanmaya çalışılmıştır.

Klinik lineer elektron hızlandırıcıda elektronlar, cihazın donanımında mevcut olan bir tungsten hedefe çarptırılıp 18 MeV uç nokta enerjili frenleme ışını üretilebilmektedir.

Bir çekirdekten nötron ve proton koparmak için gereken ortalama enerji 8 MeV'dir. Yani bu enerji değeri ile enerji seviyeleri tespiti ve aktivasyon analizi için gerekli en önemli reaksiyonlar olan ( $\gamma$ ; n) ve ( $\gamma$ ; p) reaksiyonları gerçekleştirilebilmektedir.

Dahası, bremsstrahlung dönüştürücüsünden (tungsten) koparılan nötronlar sayesinde de ( $1,2 \times 10^5$  nötron /  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ) nötron akısına sahip olmaktadır (Boztosun 2014). Bu sayede nötron yakalama tesir kesiti yüksek olan çekirdekler için (n;  $\gamma$ ) reaksiyonu da gözlenebilmektedir.

Bu tezde fotoaktivasyon analizinin kalitatif özelliğini kullanarak dış numunelerindeki elementleri ve ayrıca gerçekleştirmiş oldukları reaksiyonları tespit ettik. Bununla ilgili detaylı (Çizelge 5.1)'den incelenebilir.

**Çizelge 5.1.** Dış numunesinde gözlemlenen kararsız elementler, gerçekleştirdiği reaksiyonlar ve ana çekirdek. Tabloda gözlemlenen reaksiyonlar için; ( $\gamma, n$ ) reaksiyonu 1, ( $n, \gamma$ ) reaksiyonu 2, ( $\gamma, p$ ) reaksiyonu 3 ile numaralandırılmıştır.

Numune no	Cinsiyet	Yaş	Gerçekleşen reaksiyonlar	Gözlenen Kararsız Elementler	Ana çekirdek
31	Erkek	18	1, 2, 3	$^{67}\text{Cu}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{43}\text{K}$ , $^{42}\text{K}$	$^{68}\text{Zn}$ , $^{44}\text{Ca}$ , $^{41}\text{K}$ , $^{45}\text{Sc}$
30	Erkek	12	1, 2, 3	$^{56}\text{Mn}$ , $^{44}\text{Sc}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{43}\text{K}$	$^{55}\text{Mn}$ , $^{45}\text{Sc}$ , $^{68}\text{Zn}$ , $^{44}\text{Ca}$
4	Kadın	25	1,2, 3	$^{68}\text{Ga}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{44}\text{Sc}$ , $^{24}\text{Na}$	$^{68}\text{Zn}$ , $^{44}\text{Ca}$ , $^{23}\text{Na}$ , $^{25}\text{Mg}$ $^{69}\text{Ga}$
27	Erkek	19	1, 2, 3	$^{24}\text{Na}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{67}\text{Cu}$ , $^{68}\text{Ga}$ , $^{67}\text{Cu}$	$^{23}\text{Na}$ , $^{25}\text{Mg}$ , $^{68}\text{Zn}$ , $^{69}\text{Ga}$
10	Kadın	54	1,2, 3	$^{86}\text{Rb}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{42}\text{K}$ , $^{44}\text{Sc}$ , $^{65}\text{Ni}$	$^{87}\text{Sr}$ , $^{68}\text{Zn}$ , $^{41}\text{K}$ , $^{44}\text{Ca}$ , $^{45}\text{Sc}$ , $^{64}\text{Ni}$
34	Kadın	21	1, 2, 3	$^{44}\text{Sc}$ , $^{85}\text{Sr}$ , $^{24}\text{Na}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{43}\text{K}$	$^{44}\text{Ca}$ , $^{84}\text{Sr}$ , $^{23}\text{Na}$ , $^{25}\text{Mg}$ , $^{68}\text{Zn}$ , $^{45}\text{Sc}$
1	Kadın	34	1, 2, 3	$^{57}\text{Ni}$ , $^{85}\text{Sr}$ , $^{44}\text{Sc}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{56}\text{Mn}$ , $^{42}\text{K}$	$^{58}\text{Ni}$ , $^{84}\text{Sr}$ , $^{44}\text{Ca}$ , $^{68}\text{Zn}$ , $^{55}\text{Mn}$ , $^{41}\text{K}$ , $^{43}\text{Ca}$
36	Kadın	25	1, 2, 3	$^{44}\text{Sc}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{43}\text{K}$ , $^{42}\text{K}$ , $^{56}\text{Mn}$ , $^{41}\text{Ar}$ , $^{24}\text{Na}$	$^{45}\text{Sc}$ , $^{23}\text{Na}$ , $^{25}\text{Mg}$ , $^{68}\text{Zn}$ , $^{55}\text{Mn}$ , $^{41}\text{K}$ , $^{44}\text{Ca}$
35	Kadın	22	1, 2, 3	$^{44}\text{Sc}$ , $^{24}\text{Na}$ , $^{43}\text{K}$ , $^{56}\text{Mn}$ , $^{42}\text{K}$	$^{45}\text{Sc}$ , $^{23}\text{Na}$ , $^{25}\text{Mg}$ , $^{43}\text{Ca}$ , $^{55}\text{Mn}$ , $^{41}\text{K}$
29	Kadın	22	1, 2, 3	$^{44}\text{Sc}$ , $^{86}\text{Rb}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{56}\text{Mn}$ , $^{42}\text{K}$	$^{45}\text{Sc}$ , $^{68}\text{Zn}$ , $^{43}\text{Ca}$ , $^{55}\text{Mn}$ , $^{41}\text{K}$ , $^{87}\text{Sr}$ , $^{85}\text{Rb}$
37	Erkek	23	1, 2, 3	$^{44}\text{Sc}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{56}\text{Mn}$ , $^{43}\text{K}$	$^{45}\text{Sc}$ , $^{68}\text{Zn}$ , $^{43}\text{Ca}$ , $^{55}\text{Mn}$ ,
24	Erkek	37	1, 2, 3	$^{85}\text{Sr}$ , $^{44}\text{Sc}$ , $^{57}\text{Ni}$ , $^{56}\text{Mn}$ , $^{41}\text{Ar}$ , $^{42}\text{K}$	$^{45}\text{Sc}$ , $^{43}\text{Ca}$ , $^{55}\text{Mn}$ , $^{41}\text{K}$ , $^{86}\text{Sr}$ , $^{58}\text{Ni}$
19	Kadın	32	1, 2, 3	$^{57}\text{Ni}$ , $^{85}\text{Sr}$ , $^{44}\text{Sc}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{56}\text{Mn}$ , $^{42}\text{K}$	$^{45}\text{Sc}$ , $^{43}\text{Ca}$ , $^{55}\text{Mn}$ , $^{41}\text{Ca}$ , $^{58}\text{Ni}$ , $^{86}\text{Sr}$
20	Kadın	24	1, 2, 3	$^{44}\text{Sc}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{57}\text{Ni}$ , $^{24}\text{Na}$	$^{45}\text{Sc}$ , $^{23}\text{Na}$ , $^{25}\text{Mg}$ , $^{68}\text{Zn}$ , $^{55}\text{Mn}$
21	Erkek	27	1, 2, 3	$^{85}\text{Sr}$ , $^{57}\text{Ni}$ , $^{43}\text{K}$ , $^{56}\text{Mn}$ , $^{42}\text{K}$	$^{58}\text{Ni}$ , $^{86}\text{Sr}$ , $^{43}\text{Ca}$ , $^{55}\text{Mn}$ , $^{41}\text{K}$

**6. KAYNAKLAR**

- Anonim 1: [http://www.turkcewiki.org/wiki/Nükleer kuvvet](http://www.turkcewiki.org/wiki/Nükleer_kuvvet), [Son erişim tarihi 15/03/2018]
- Anonim 2: <https://www.fizikist.com/radyoaktivite-ve-nukleer-enerji>, [Son erişim tarihi 15/03/2018]
- Anonim 3: <http://www.fizik.net.tr>, [Son erişim tarihi 16/03/2018]
- Anonim 4 : [www.kuark.org/2012/04/atom-alti-parcaciklar](http://www.kuark.org/2012/04/atom-alti-parcaciklar), [Son erişim tarihi 14/03/2018]
- Anonim 5: <https://kurios.ku.edu.tr/tr/makaleler/superagir-elementler>, [Son erişim tarihi 16/03/2018]
- Anonim 6: <https://tipvefizik.wordpress.com/2013/02/11/bozunma-cesitleri>, [Son erişim tarihi 15/03/2018]
- Anonim 7: <http://slideplayer.biz.tr/slide/1964404/> Sarayköy nükleer araştırma ve eğitim Merkezi, [Son erişim tarihi 15/03/2018]
- Anonim 8: <https://kbrn.afad.gov.tr/kategori-1205-iyonlastirici-radyasyon-cesitleri.html>, [Son erişim tarihi 16/03/2018]
- Anonim 9: <https://maddeevren.tumblr.com/post/103456294879/radyoaktivite>, [Son erişim tarihi 15/03/2018]
- Anonim 10: <http://radiationandhuman.blogspot.com.tr/2014/02/lineer-hizlandiricilar.html>, [Son erişim tarihi 15/03/2018]
- Anonim 11: <http://www.sedlab.com.tr/x-isini-difraksiyonu-xrd-analizleri.html>, [Son erişim tarihi 16/03/2018]
- Anonim 12: <https://arum.ogu.edu.tr/Sayfa/Index/19/x-isinin-xrd-ve-xrf-analiz-birimi>, [Son erişim tarihi 16/03/2018]

Anonymous 1: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>, [Son erişim tarihi 15/03/2018]

Anonymous 2 : <https://education.jlab.org/glossary/electroncapture.html>, [Son erişim tarihi 16/03/2018]

Anonymous 3: <http://www.showme.com/sh/?h=zIK27Zw>, [Son erişim tarihi 15/03/2018]

Anonymous 4: [https://www.researchgate.net/figure/258295021\\_fig2\\_Figure-3-Schematic-diagram-of-the-experimental-setup-1-screw-compressor-2-air-storage](https://www.researchgate.net/figure/258295021_fig2_Figure-3-Schematic-diagram-of-the-experimental-setup-1-screw-compressor-2-air-storage), [Son erişim tarihi 14/03/2018]

Anonymous 5: <https://www.slideshare.net/MSmamita/solid-state-detector-mamita> 19/23, [Son erişim tarihi 13/03/2018]

Anonymous 6: <http://inspirehep.net/record/1083432/plots>, [Son erişim tarihi 14/03/2018]

Berger, M.J. Seltzer, S.M. 1970. Bremsstrahlung and Photoneutrons from Thick Tungsten and Tantalum Targets. Physical Review C, 2, 2, pp. 621-631

Bethe, H. 1936. An Attempt to Calculate the Number of Energy Levels of a Heavy Nucleus. Phys. Rev., 50: 332.

Boztosun, I., Dapo, H., Ozmen, S.F., Cecen, Y., Karakoc, M., Coban, A., Cesur, A., Caner, T., Bayram, E., Keller, G.B., Kucuk, B., Guvendi, A., Derman, M., and Kaya, D. 2014. The Results of the First Photonuclear Reaction Performed in Turkey: The Zinc Example. Turk. J. Phys., 38: 1-9.

Boztosun, I. Dapo, H. Karakoc, M. Ozmen, S.F. Cecen, Y. Coban, A. Cesur, A. Caner, T. Bayram, E. Saito, T.R. Akdogan, T. Bozkurt, V. Kaya, D. Kucuk, Y. 2015. Photonuclear reactions induced by a clinical linac. Journal of Physics: Conference Series, 590, 1, 012024

Boztosun, I. Dapo, H. Ustun, M. Yazgan, C. Cecen, Y. Gulumser, T. 2017. Photoneutron Flux Measurement via Neutron Activation Analysis in a Radiotherapy Bunker with an 18 MV Linear Accelerator. EPJ Web of Conferences 153, 07006

Chadwick, J. Goldhaber, M. 1934. A Nuclear Photo-effect: Disintegration of Deuteron by  $\gamma$ -rays. Nature, 134, 3381, 237

Chao, J.H., Liu, M.T., Yeh, S.A., Huang, S.S., Wu, J.M., Chang, Y.L., Hsu, F.Y., Chuang, C.Y., LIU, H.Y. and SUN, Y.C. 2009. Using Medical Accelerators and Photon Activation to Determine Sr/Ca Concentration Ratios in Teeth. Appl. Radiat. Isotopes, 67: 1121 -1126.

- Das, Ferbel Introduction to Nuclear and Particle Physics book, World scientific, 2003.
- Kösehan, D. Radyoaktivite, radyoaktif bozunma, 2015 <http://slideplayer.biz.tr/slide/1981540/>[ Son erişim tarihi: 16/03/2018]
- George, K.D. and Kramer, H.H. 1969. Deuterium Analysis by Photoneutron Detection. Nucl. Appl. Technol., 7: 385.
- Green A Priori Method of Using Photon Activation Analysis to Determine Unknown Trace Element Concentrations in NIST Standards 2009.
- Green, J., Wells, D., Benson, B., Zaijing, S., and Maschner, H. 2011. Using Photon Activation Analysis to Determine Concentrations of Unknown Components In Reference Materials. AIP Conf. Proc., 1336: 497.
- Gilmore, G.R. 2008. Practical Gamma-ray Spectrometry . England.
- Goldstein, G. 1963. Determination of Beryllium Using the Photoneutron Method. Anal. Chem., 35: 1620-1623.
- Goldhaber, M. 1939. Phys. Rev., 55: 1129
- Engelmann, C. 1971. Contribution a l'étude de la détermination de Be, B, C, N, O et F par activation au moyen de p, d,  $^3\text{He}$  et  $\gamma$ . J. Radioanal. Nucl. Chem., 7 (1): 89.
- F. o. Falla-Sotello, M. A. Rizzato; M. H. Tabacniks; N. Added; M. D. L. Barbosa; R. A. Markarian; A. Quinelato; M. Mori; M. Youssef Analysis and discussion of trace elements in teeth of different animal species.
- Harbottle, G. 1954. Activation of Nuclear Isomers by Gamma Rays. Nucleonics, 12 (4): 64-67.
- Huo, J., Huang, X. and Tuli, J.K. 2005. Nuclear Data Sheets for A=67. Nucl. Data Sheets, 106: 159-250.
- J.I.Magee and A.Chatterjee. 1980. Radiation chemistry of heavy-particle tracks. 1. General considerations : *J. Phys. Chem.*, 1980, 84 (26), pp 3529–3536
- Jupiter, C.P., Hanson, N.F., Shafer, R.E. and Fultz, S.C. 1961. Radiations from High-Energy Positrons Incident on a Beryllium Target. Phys. Rev., 121: 866.

- Kavun, Y. Fotoaktivasyon analizi ile dış örneklerinde Sr/Ca oranının belirlenmesi Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalı, Manisa 2017 (Doktora tezi).
- Kerst, D.W. 1940. Acceleration of Electrons by Magnetic Induction. Phys. Rev., 58: 841
- Knoll, G.F. 2000. Radiation Detection and Measurement. New York-Chichester-Weinheim-Brisbane-Toronto-Singapore
- Kösehan D. Radyoaktivite ve radyoaktif bozunma sunum, Ankara 2015.
- Krane, K.S. 1988. Introductory Nuclear Physics. 1, Canada.
- Lutz, G. J. 1971. Photon activation analysis-review. Anal. Chem., 43: 93-103.
- Meyer, R.A., Prindle, A.L., Myers, W.A., Hopke, P.K., Dieterly, D. and Koops, E. 1978. Multiparticle configurations in the odd-neutron nuclei  $^{61}\text{Ni}$  and  $^{67}\text{Zn}$  populated by decay of  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{67}\text{Cu}$  and  $^{67}\text{Ga}$ . Phys. Rev. C, 17: 1822-1831.
- Michael F.L'Annunziata Handbook of Radioactivity Analysis 1985.
- Mohr, P., Brieger, S., Witucki, G. and Maetz, M. 2007. Photoactivation at a Clinical LINAC: The  $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$  Reaction Slightly Above Threshold. Nucl. Instrum. Meth., A580: 1201-1208.
- Onay, Ö. 2010 Radyoterapinin tanımı tarihçesi, amacı, iş akışı, radyasyonun madde ile etkileşmesi ve kullanımı. <https://www.slideshare.net/ozgehan/radyoterapi-tarihceozgehan-onay> [Son erişim tarihi:16/03/2018]
- Ortec. 2008. Maestro-32 Software User's Manual. USA
- Randa, Z., Spacek, B., Kuncir, J. and Benada, J. 1981. Nondestructive Gamma Activation Analysis of Mineral Materials. Nuclear Information Centre.
- Randa, Z., Kucera, J., Mizera, J. and Frana, J. 2007. Comparison of the Role of Photon and Neutron Activation for Elemental Characterization of Geological, Biological and Environmental Materials. J. Radioanal. Nucl. Chem., 271: 589.
- Schuhl, C. and Zsara, C. 1961. Monochromateur De Positrons En Secteur D'Orange. Nucl. Instrum. Meth., 10: 217-223.
- Segebade, C. Berger, A. 2008. Photon Activation Analysis. Berlin.

Segebade, C., Weise H. P. and Lutz, G. J. 1988. Photon Activation Analysis.  
New York: W. de Gruite.

Sun, Z.J., Wells, D., Segebade, C. and Green, J. 2011. Standardizing Activation Analysis New  
Software for Photon Activation Analysis. AIP Conf. Proc., 1336:473.

Waldman, B., Collins, G.B., Stubblefield, E.M. and Goldhaber, M. 1939. Nuclear Excitation of Indium  
by X-Rays. Phys. Rev., 55: 507.

Wells, D., Segebade, C. and Cole, P. 2010. Photon Activation Analysis at the Idaho Accelerator Center.  
AIP Conf. Proc., 1265: 37

**7. EKLER**


## Ek 1.a. Etik kurul kararı

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
TIP FAKÜLTESİ  
KLİNİK ARAŞTIRMALAR ETİK KURULU**

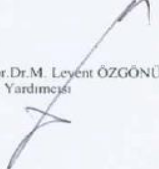
**2016**

**KARAR**


<b>ETİK KURUL BİLGİLERİ</b>	ETİK KURULUN ADI	Akdeniz Üniversitesi Tıp Fakültesi Klinik Araştırmalar Etik Kurulu
	AÇIK ADRESİ:	Akdeniz Üniversitesi Tıp Fakültesi Dekanlığı Morfoloji Binası A Blok 1. Kat No: A1-05 Kampüs /ANTALYA
	TELEFON	0 (242) 249 69 54
	FAKS	0 (242) 249 69 03
	E-POSTA	etik@akdeniz.edu.tr
<b>SORUMLU ARAŞTIRMACI UNVANI/ADI/SOYADI</b>	Yrd.Doç.Dr.Yiğit ÇEÇEN	
<b>ARAŞTIRMANIN AÇIK ADI</b>	Diş Örneklerinde Elementler ve Oranlarının Fotoaktivasyon Analizi ile Belirlenmesi	
<b>KARAR BİLGİLERİ</b>	<b>Karar No:</b> 138	<b>Tarih:</b> 24.02.2016
	Yukarıda bilgileri verilen çalışmanın bütçesinin TÜBİTAK tarafından karşılanması koşulu ile yapılmasında bilimsel ve etik açısından sakınca olmadığına oy birliği ile karar verilmiştir.	
Araştırmacıya çalışmalarında başarılar dileriz.		




Prof. Dr. Arda TAŞATARGİL  
Başkan




Öğr. Gör. Dr. M. Leyent ÖZGÖNÜL  
Başkan Yardımcısı




Prof. Dr. Can CEVİKOL  
Üye




Prof. Dr. Murat CANPOLAT  
Üye




Prof. Dr. Dilara İNAN  
Üye (Izinli)




Prof. Dr. Neemiye HADİMOĞLU  
Üye (Izinli)




Prof. Dr. Gülay ÖZBİLİM  
Üye (Izinli)



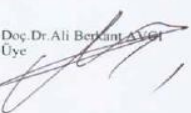
Doç. Dr. Gülşam ÖZGE BAYSAL  
Üye




Doç. Dr. Mehtap TÜRKAY  
Üye



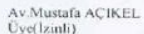
Doç. Dr. Doğa TÜRKKAHRAMAN  
Üye




Doç. Dr. Ali Bekir AYDIN  
Üye



Doç. Dr. Dijle KIRMEN KORGUN  
Üye




Av. Mustafa AÇIKEL  
Üye (Izinli)



Turgut ALTUN  
Üye



## Ek 1.b. Etik kurulu kararı (başkan)

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
TIP FAKÜLTESİ  
Klinik Araştırmalar Etik Kurulu**


26.02.2016

Sayı : 70904504/ 125  
Konu :

Sayın  
Yrd.Doç.Dr.Yiğit ÇEÇEN  
Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı  
Öğretim Üyesi

Değerlendirilmek üzere Klinik Araştırmalar Etik Kurulu'na başvuruda bulunduğunuz,  
"Diş Örneklerinde Elementler ve Oranlarının Fotoaktivasyon Analizi ile Belirlenmesi" adlı  
çalışmaya ait Kurul Kararı ekte sunulmuştur.

Bilgilerinizi rica ederim.

  
Prof.Dr.Arda TAŞATARGİL  
Klinik Araştırmalar Etik Kurulu Başkanı

**Eki:** Etik Kurul Kararı

---

Adres : Akdeniz Üniversitesi Tıp Fakültesi Dekanlığı 1. Kat ANTALYA  
Tel : (242)249 69 54  
Faks : (242) 249 69 03  
e-posta : etik@akdeniz.edu.tr

**ÖZGEÇMİŞ**

Adı Soyadı: Ahmet ÜNLÜ

Kurumu: Akdeniz Üniversitesi

E.posta: [kaptan\\_kaan\\_48@hotmail.com](mailto:kaptan_kaan_48@hotmail.com)

<b>Eğitim</b>
2009-2014 Akdeniz Üniversitesi Fen fakültesi fizik bölümü lisans eğitimi
2014-2015 Akdeniz Üniversitesi Eğitim fakültesi pedagojik formasyon programı
2014- Akdeniz Üniversitesi Fen fakültesi fizik yüksek lisans eğitimi

<b>Yabancı diller</b>
1.İngilizce B1
2.Almanca A2

<b>Katıldığı seminer ve konferanslar</b>
1- NUBA The 1st International Nuclear Physics Summer School, 19-25 Haziran 2014
2-NUBA The 3 rd International Nuclear Physics Summer School 29 Mayıs-5 Haziran 2016

<b>Bilgisayar kullanımı</b>
İşletim Sistemleri: Windows (3.1, 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, 7, 8,10), Linux(Open Suse)
• Programlama Dilleri: Mathematica
• Diğer: GF3 Radware, Maestro, root, Microsoft Office Programları