

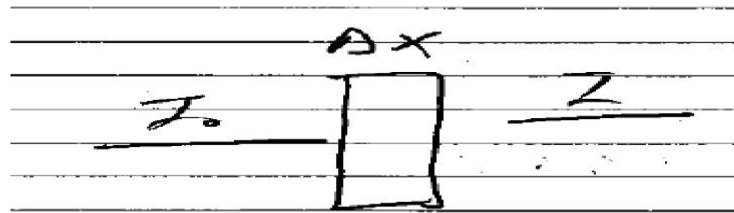
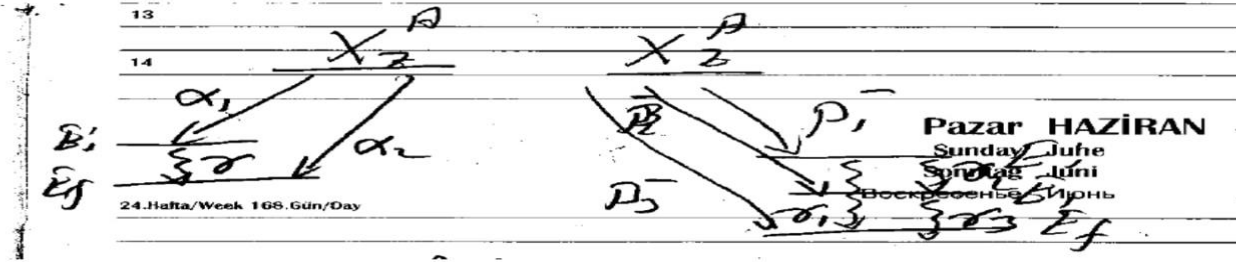
FZM 316 Nükleer Fizik 1  
A.Ü. Mühendislik Fakültesi  
Fizik Mühendisliği Bölümü  
Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

## 11. Hafta

### 14)GAMA RADYASYONU

Bir çekirdekten alfa veya beta parçacığı gibi bir parçacık yayınlanması çekirdeği uyarılmış durumda bırakır.Yüksek enerjili durumdan ( $E_i$ )daha düşük bir enerji duruma ( $E_f$ ) geçen bir çekirdek fazla enerjiyi( $\Delta E=E_i - E_f$ )

- 1)Gama ışını yayınlayarak
- 2)Dahili oluşum
- 3)Çift dahili oluşum ile atar.



$$\Delta I = -\Gamma I \Delta x$$

$$I = I_0 e^{-\Gamma x}$$

Gama radyasyonununun maddeyle etkileşmesi:

## GAMMA VE X – IŞINLARI

Gamma ışınları, radyoaktif parçalanmadan sonra uyarılmış çekirdekten yayınlanan elektromanyetik radyasyondur. Gamma ışınları ile x-ışınları arasındaki fark, gamma ışınlarının çekirdekten, x-ışınlarının ise atomun en iç tabakalarındaki elektromanyetik geçişlerden yayınlanmasıdır.

<b>FREKANS ( HZ )</b>	<b>DALGABOYU</b>	<b>FOTON ENERJİSİ</b>	<b>ÖZELLİĞİ</b>
$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{18}$	10nm- 100pm	124 eV - 12.4 keV	yumuşak x-ışınları
$3 \times 10^{18} - 3 \times 10^{19}$	100 pm - 10pm	12.4 keV - 124 keV	Diagnostik x-ışınları
$3 \times 10^{19} - 3 \times 10^{20}$	10 pm - 1 pm	124 keV - 1.24 keV	terapi x - ışınları ve Radiumun parçalanması sonucu oluşan gamma ışınları

## **X-ışınlarının Özellikleri:**

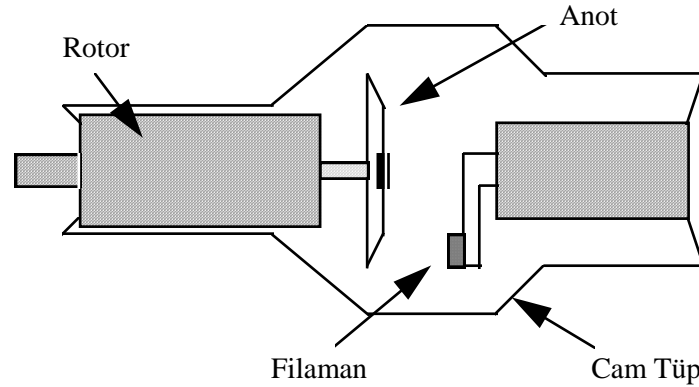
- i) Dalga karakteri taşıdığından ışık hızı ile hareket ederler. (  $E = h\gamma$  )
- ii) Elektrik ve manyetik alanlarda sapmazlar.
- iii) Madde içinde saçılabilir ve soğurulabilir.
- iv) Girişim meydana getirir.
- v) Polarize olur.
- vi) Madde içinde iyon oluşturur.
- vii) Fotoğraf filmi üzerinde görüntü oluşturur.

## **X - ışınlarının oluşumu**

Elektrik enerjisini x-ışınına ve sıcaklığa dönüştüren x-ışını tüpleri basitçe, anod ve katot olmak üzere iki elemandan oluşur. Tüpün negatif tarafını oluşturan katot, kap şeklinde bir girintinin içersinde küçük bir tel sarımdan (flaman) meydana gelir. Katodun temel görevi elektron üreterek anoda odaklamaktır. Tüpün pozitif tarafını oluşturan anodun ise elektrik enerjisini x-ışınına dönüştürmek ve olay sırasında meydana gelen ısıyı dağıtmak gibi iki temel işlevi vardır.

X-ışını tüpünde elektrik enerjisi, flamanı ısıtarak termiyonik salma yoluyla elektron üretmek ve üretilen bu elektronları anoda doğru hızlandırmak için kullanılır. Bu nedenle x-ışını tüpünde iki akımdan söz edilebilir. Birincisi katot flaman akımı, ikincisi anod - katot arasına yüksek voltaj uygulandığında ortaya çıkan ve katotdan anoda akan akım (mA) dır.

Anodda hedef madde olarak, atom numarası ( $Z=74$ ) ve erime noktasının ( $3370\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) yüksek olması nedeniyle genellikle tungsten kullanılır. Katotdan gelen elektronların anod üzerine düştüğü noktaya odak noktası (focal spot) denir. Burada elektron enerjisinin ancak %1 i x-ışınlarına, geri kalanı ise ısı enerjisine dönüşür. Anod, üzerindeki ısı problemini azaltmak için, dakikada 2800 - 10800 devir yapacak şekilde döndürülür .



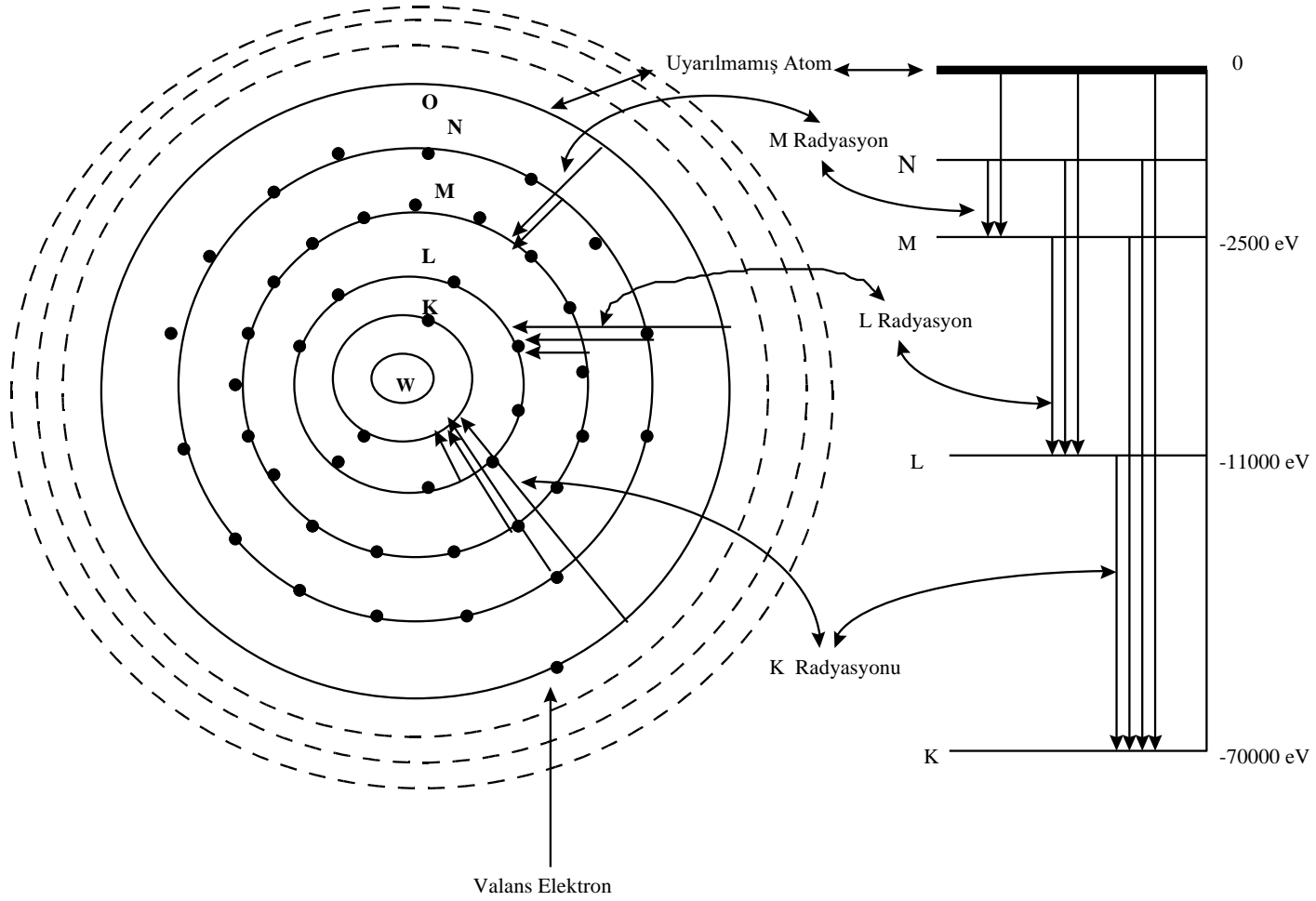
### Şekil 3.1: X-ışını tüpü

Hızlı elektronlar x-ışını tüpünün anodunda iki farklı yöntemle x-ışını üretirler: Bunlardan ilki elektronların hedef atomun çekirdeği ile etkileşmesidir. Bir elektron bir çekirdeğin yakınından geçerken çekirdeğin pozitif yükü elektronun negatif yüküne etki eder ve onu kendine doğru çekerken yönünü değiştirir. Bu da elektronun ivmeli hareket yapmasına ve dolayısıyla enerji kazanmasına neden olur. Elektron tarafından kazanılan kinetik enerji foton olarak yayınlanır. Bu şekilde üretilen radyasyona “genel radyasyon” veya “frenleme radyasyonu” (Bremsstrahlung) denir. Hedefe çarpan demetteki elektronlar farklı enerjilere sahiptirler ve durgun hale gelene kadar birçok etkileşme yaparak enerji kaybederler. Bu nedenle frenleme olayı ile üretilen radyasyonun enerji spektrumunda geniş bir dağılım görülür. Bu dağılımın maksimum değeri elektronların hızlanma potansiyeline bağlıdır.

İkinci tür x-ışını oluşumu ise hedefe çarpan hızlı elektronların anod maddesinin yörünge elektronları ile etkileşmesi sonucu oluşan karakteristik x-ışınlarıdır. Örnek olarak aşağıdaki

şekilde gösterilen tungsten atomunu ele alalım. Tungsten atomunun K,L ve M tabakalarının enerji seviyeleri sırası ile 70.000 eV, 11.000 eV ve 2500 eV dur. Şimdi yüksek hızlı bir elektronun tungstenin bir atomuna çarptığını ve bir K elektronunu atomdan uzaklaştırdığını var sayalım. Bu olayın olması için atoma çarpan elektronun enerjisinin enaz 70.000 eV olması gerekir. Çok kısa sürede L tabakasında bulunan başka bir elektron, K tabakasında oluşan bu elektron boşluğunu doldurmak üzere, L tabakasından K tabakasına geçecek. Bu durumda enerjisi  $(70.000 - 11.000 = )$  59.000 eV olan bir radyasyon yayınlanacak. Bu radyasyona karakteristik radyasyon denilir (X-ışınları) çünkü maddenin karakteristiğinden dolayı üretilmiştir.

Yüksek hızlı elektron K tabakası elektronu yerine L, M veya N tabakası elektronlarından birini sökebilir. Eğer L tabakası elektronunu (Bağlanma enerjisi 11.000 eV) sökerse ve oluşan boşluk M tabakası elektronu ile doldurulursa (bağlanma enerjisi 2.500 eV) ozaman  $(11.000 - 2.500 = )$  8.500 eV enerjiye sahip bir karakteristik X-ışını yayınlanır. Bu olaylarda yayınlanan karakteristik X-ışınının enerjisi daima iki tabakanın bağlanma enerjisinin farkına eşit olacaktır.



Şekil: Tungsten atomunun şematik diagramı. Sol tarafta Tungsten atomunun tabakaları, sağ tarafta ise enerji seviyeleri gösterilmektedir.

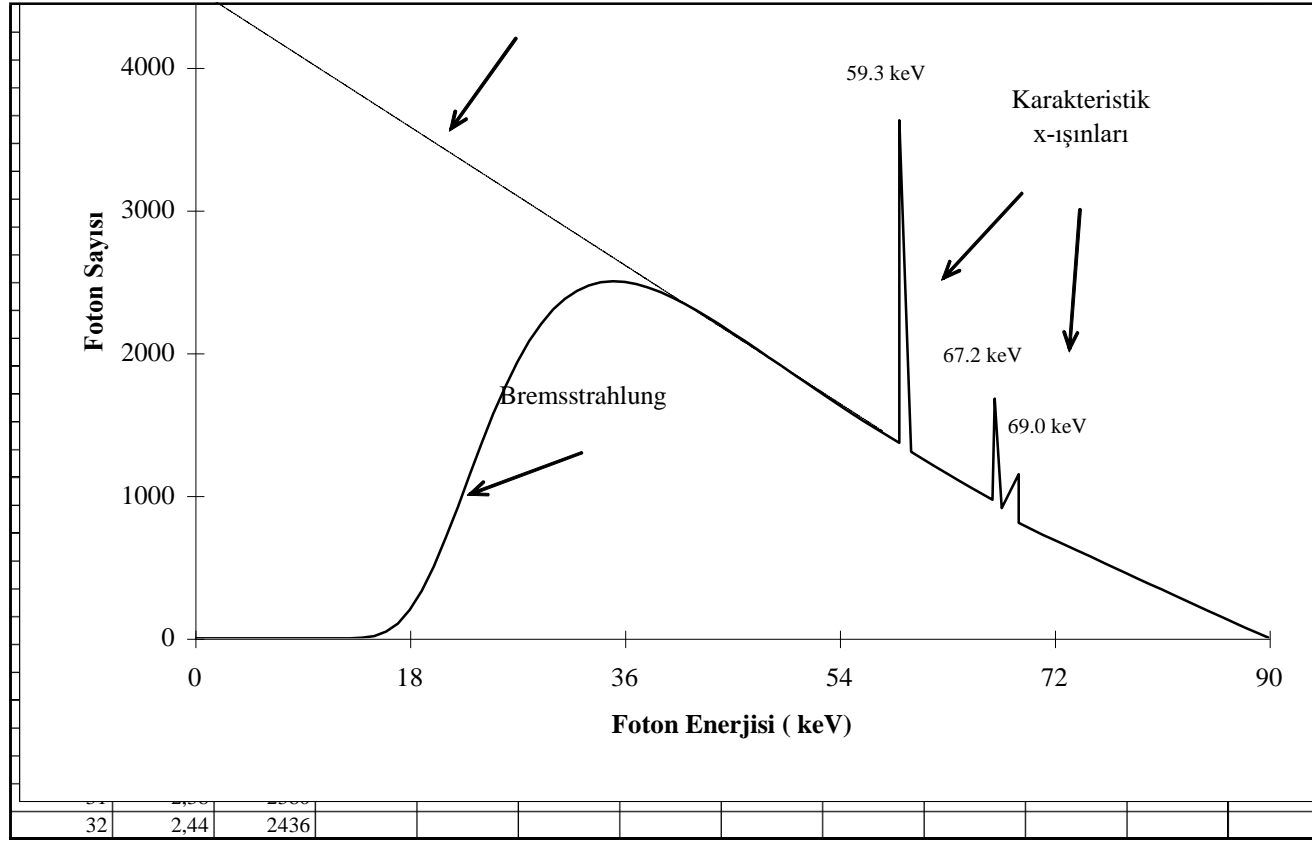
Gerçekte L tabakasının 3, M tabakasının 5 ve N tabakasının 7 alttabakası vardır ve bu tabakaların bağlanma enerjileri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

<b>TABAKA</b>	<b>K</b>	<b>L<sub>I</sub></b>	<b>L<sub>II</sub></b>	<b>L<sub>III</sub></b>	<b>M<sub>I</sub></b>	<b>M<sub>II</sub></b>	<b>M<sub>III</sub></b>	<b>M<sub>IV</sub></b>	<b>M<sub>V</sub></b>
Tungsten (keV)	69.525	12.098	11.541	10.204	2.820	2.575	2.281	1.871	1.809

Tungsten atomunun karakteristik X-ışınları ise aşağıdaki tablodadır.

<b>K tabakası Geçişleri</b>			<b>L Tabakası Geçişleri</b>		
<b>Geçiş</b>	<b>Enerji(keV)</b>	<b>Rölatif Sayı</b>	<b>Geçiş</b>	<b>Enerji(keV)</b>	<b>Rölatif Sayı</b>
K - N <sub>II</sub> N <sub>III</sub>	69.081	7	L <sub>I</sub> - N <sub>III</sub>	11.674	10
K - M <sub>III</sub>	67.244	21	L <sub>II</sub> - N <sub>IV</sub>	11.285	24
K - M <sub>II</sub>	66.950	11	L <sub>III</sub> - N <sub>V</sub>	9.962	18
K - L <sub>III</sub>	59.321	100	L <sub>I</sub> - M <sub>III</sub>	9.817	37
K - L <sub>II</sub>	57.984	58	L <sub>II</sub> - M <sub>IV</sub>	9.670	127





Şekil 3.3. Toplam filtrasyonu 2.5 mm alüminyum olan tungsten anodlu bir x-ışını cihazından 90 kVp de elde edilen tipik bir enerji spektrumu

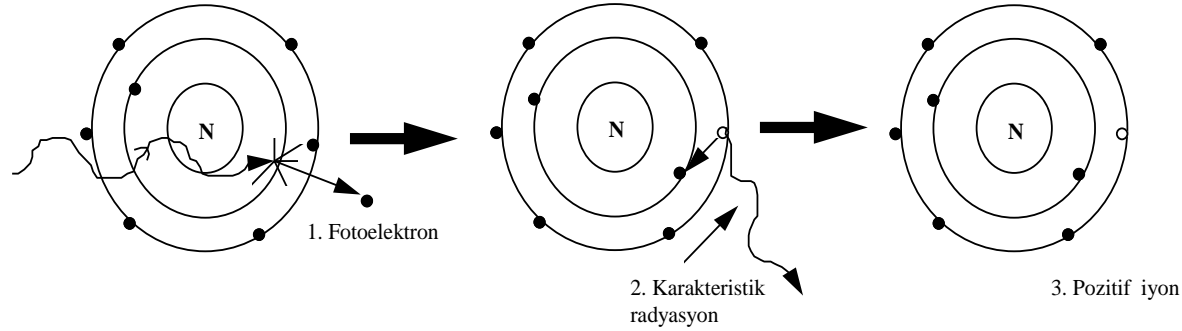
## **X - Işınlmasının Madde ile Etkileşmesi**

Fotonlar madde içinden geçerken ya atomların çekirdekleri ya da yörünge elektronları ile etkileşirler. Etkileşmede rol oynayan en önemli olaylar fotoelektrik soğurma, Koherant Saçılma, Compton saçılması ve çift oluşumudur. Bu olaylar sonucunda foton ya soğurulur veya enerjisinin bir kısmını maddede bırakarak saçılır ya da hiç enerji bırakmadan orjinal yönünden sapar.

### **Fotoelektrik soğurma**

Fotoelektrik olayda, gelen fotonun enerjisi atoma bağlı elektronun bağlanma enerjisini biraz aşarsa Şekil de görüldüğü gibi foton elektron tarafından soğurulur ve elektron serbest hale geçer. Bu yolla atomdan ayrılan fotoelektronun kinetik enerjisi soğurulan foton enerjisi ile bağlanma enerjisinin arasındaki farka eşittir. Bu elektron ortamda ilerlerken ikincil iyonizasyona, uyarmaya ve frenleme ışınımına sebep olur. Bununla birlikte teşhiste kullanılan enerji bölgesindeki fotonlar için elektronun menzili genellikle çok küçüktür. (Örneğin suda, 100 keV'lik fotonlar için elektronun menzili 0.13 mm dir.) Bu yüzden fotoelektron enerjisinin ortam tarafından tamamen soğurulduğu kabul edilir.

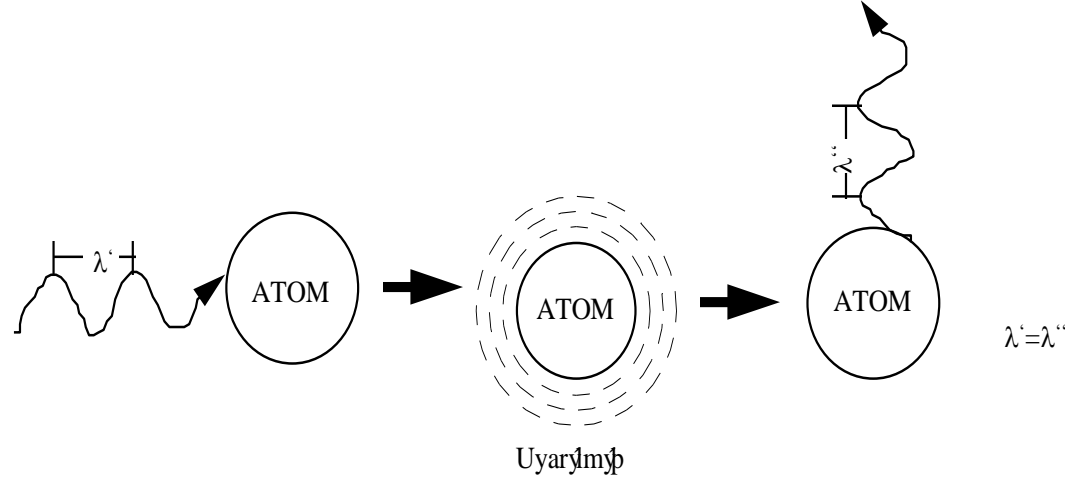
İyonize olmuş atom birbiri ile yarışan iki olayla enerjisini serbest bırakır. Bunlar x-ışını ve/veya Auger elektronları yayınıdır. Auger elektronları etkileşmenin olduğu yerde hemen soğurulur. Karakteristik x ışınları ise, gelen ilk fotonun yaptığı gibi çarpışmalara sebep olarak, sonunda ya ortamdan kaçar ya da ortam tarafından tamamen soğurulur.



Şekil3.4.: Fotoelektrik olay

## Koherent saçılma

Bu etkileşimde radyasyonun dalga boyunda bir değişiklik olmaz, yalnızca yönü değişir. İki tip koherent saçılma vardır, Thomson saçılması ve Rayleigh saçılması. Thomson saçılmasında etkileşme bir elektronla Rayleigh saçılmasında ise atomun tüm elektronları ile olur. Düşük enerjili radyasyon bir atomun elektronlarıyla etkileşirse onları kendi frekansında titreştirmeye başlar. Titreşen elektronlar ivmeli hareket yaptıklarından radyasyon yayar ve sonuçta atom eski kararlı haline geri döner. Etkileşmenin bu tipinde iyonizasyon oluşmaz, çünkü bir iyon çiftinin oluşabilmesi için, atoma enerji transferi gerekir. Rayleigh saçılmasında enerji transferi yoktur. Yalnızca gelen radyasyonun yönü değişir .



Şekil 3.5: Rayleigh saçılması

Saçıcı ortamın bir molekülü için Rayleigh saçılma diferansiyel tesir kesiti

$$\frac{d\sigma_{Koh}}{d\Omega} = \frac{d\sigma_{Thomson}}{d\Omega} F^2(\nu, Z)$$

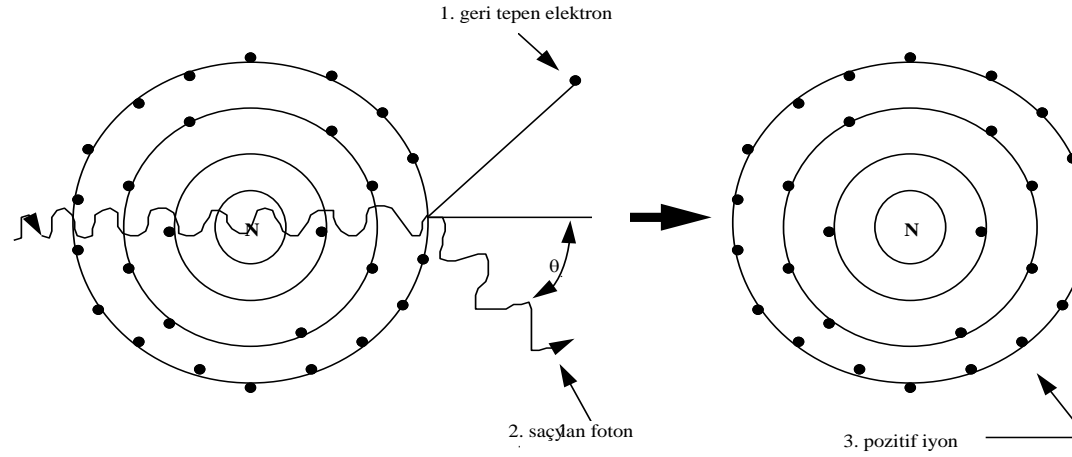
şeklinde ifade edilir. Burada  $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$  katı açı elemanı,  $d\sigma_{Thomson}/d\Omega = r_0^2/2(1+\cos^2\theta)$  elektron başına Thomson diferansiyel tesir kesiti ve

## Compton saçılması

Düşük atom numaralı maddelerde, enerjileri 30 keV ile 20 Mev arasında olan fotonlar için Compton saçılması çok önemli bir etkileşmedir. Şekil de görüldüğü gibi Compton saçılma olayında serbest kabul edilebilen bir elektronla etkileşen bir foton, elektrona enerjisinin ve momentumunun bir kısmını aktararak orjinal yönünden sapar. Saçılan fotonun  $E'$  enerjisi ile  $\theta$  sapma açısı arasındaki bağıntı, elektronun serbest kabul edildiği koordinat sisteminde

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

şeklindedir. Burada  $E$  gelen fotonun enerjisidir.  $E$  ve  $E'$  arasındaki fark ise geri tepen elektronun kinetik enerjisini verir.



Şekil 3.6: Compton saçılması

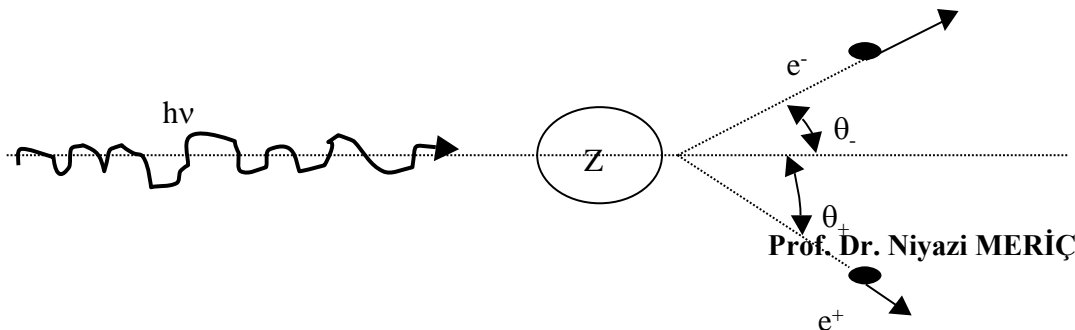
100 keV enerjide bir foton, Compton saçılması sonucunda elektrona maksimum 28 keV'lik bir enerji transfer edebilir. Bu enerjiye sahip bir elektronun sudaki menzili ise yalnızca 13 mikrondur. Bu yüzden geri tepen elektronun enerjisinin etkileşme yerinde hemen soğurulduğu kabul edilir.

Serbest elektronlar için Compton saçılmasının diferansiyel tesir kesiti 1929 yılında Klein ve Nishina tarafından, Dirac'ın relativistik elektron teorisi temel alınarak aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left(\frac{E^\odot}{E}\right)^2 \left(\frac{E^\odot}{E} + \frac{E}{E^\odot} + \cos^2\theta - 1\right)$$

### Çift oluşum

Enerjisi 1.02 Mev'den büyük olan bir foton, bir atomun çekirdeği ile etkileştiğinde yok olur ve onun yerine bir elektron - pozitron çifti oluşur. Bir elektronun kütlesi 0.51 Mev'e eşit olduğundan çift oluşumun ağır bir çekirdek yakınında gerçekleşebilmesi için minimum foton enerjisinin 1.02 Mev olması gereklidir.





### Şekil 3.7: Çift oluşum

Enerjinin korunumu:

$$h\nu = (m_0c^2 + K_+) + (m_0c^2 + K_-) + E_{\text{geri tepme}} (= 0)$$

$$h\nu = 2m_0c^2 + (K_+ + K_-)$$

$$h\nu \geq 2m_0c^2 = 1.02 \text{ MeV}$$

$$(K_+ + K_-) = h\nu - 2m_0c^2$$

$h\nu - 2m_0c^2$  enerjisi, elektron ve pozitrona kinetik enerji olarak verilir. Ağır çekirdeğin kinetik enerjisi çok küçüktür ve yaklaşık olarak sıfır alınır.

Pozitronun ve elektronun geliş doğrultusu ile yaptığı açı ise;

$$\theta_+ = \theta_- = \tan^{-1} (0.511 / E_-)$$

dir.

Aynı olay çok zayıf bir olasılıkla bir elektron yakınında da olabilir. Bu durumda eşik enerjisi  $4m_0c^2$  dir. Çünkü geri tepen elektron büyük bir hızla hareket eder. Bu durumda üç tane hafif parçacık vardır.

Çift oluşum olayının tesir kesiti yaklaşık olarak  $Z^2 + Z$  ile artar. Bu nedenle yüksek atom numaralı soğurucularda önemlidir.

Çift oluşumdan sonra elektron ve pozitron enerjisini uyarma, iyonlama ve Bremstrahlung ile ortama bırakır. Pozitron tüm enerjisini kaybettiğinde bir elektronla birleşerek yok olur ve herbiri 0.51 MeV enerjili zıt yönlere giden iki  $\gamma$  oluşur. Bu  $\gamma$  larda yeniden fotoelektrik veya Compton olayları ile soğurucuda etkileşir.

## **X - Işınlının Azalımı**

Bir x-ışını demetinin dx kalınlığında bir maddeden geçtikten sonra şiddetindeki azalma

$$-dI = \mu I dx$$

ile verilir. Burada I, x ışını demetinin şiddeti,  $\mu$  ise “linear soğurma katsayısı” adı verilen (maddeye ve foton enerjisine bağlı) bir büyüklüktür. Yukarıdaki bağıntı integre edilmesiyle

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

azalım kanunu elde edilir. Burada  $I_0$  ve  $I$  demetin başlangıçtaki ve madde içinde  $x$  kadar yol aldıktan sonraki şiddetidir.

Çalışmalarda genellikle lineer soğurma katsayısı yerine  $\rho$  yoğunluklu bir madde için  $(\mu/\rho)$  olarak tanımlanan “kütle soğurma katsayısı” kullanılır. Lineer ve kütle soğurma katsayılarının cgs ve SI birimleri sırasıyla (1/cm, 1/m) ve (cm<sup>2</sup>/gr, m<sup>2</sup>/kg) dir. Diğer taraftan soğurma ile ilgili çalışmalarda

$$\frac{\mu_{ab}}{\rho} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \left(\frac{E_{ab}}{E}\right)$$

şeklinde verilen kütle soğurma katsayısı kullanılır. Bu bağıntıda  $E_{ab}$  etkileşme başına soğurulan ortalama enerjidir.

