

# **RADYASYONUN MADDE İLE ETKİLEŞMESİ VE RADYASYON DOZ BİRİMLERİ**

Prof. Dr. Turan OLĞAR

Ankara Üniv. Müh. Fak.

Fizik Müh. Böl.

# PARÇACIK ETKİLEŞMELERİ

- İyonizasyon
- Uyarma
- Işıma ile Enerji Kaybı

# Uyarma ve İyonizasyon

Enerjik yüklü parçacıklar, elektriksel (yani, coulomb) kuvvetlerle madde ile etkileşime girer ve uyarma, iyonlaşma ve ışınım kayıpları yoluyla kinetik enerjisini kaybeder. Uyarma ve iyonlaşma yüklü parçacıklar, ortamdaki yörünge elektronları ile etkileşime girerek enerji kaybettikleri zaman meydana gelir orta.

**Uyarma** olayında, gelen parçacık enerjisinin bir kısmı ortamdaki yörünge elektronuna aktarılır ve bu yörünge elektronunu bir üst enerji seviyesine çıkar. Uyarma olayından sonra, elektron uyarma enerjisini elektromanyetik radyasyon veya Auger elektronları şeklinde salarak daha düşük bir enerji seviyesine döner. Uyarma olayında yörünge elektronuna aktarılan enerji onun bağlanma enerjisini aşmaz.

# Uyarma ve İyonizasyon

Eğer gelen yüklü parçacık, ortamdaki elektrona bağlanma enerjisini aşacak şekilde enerji aktarırsa, iyonizasyon gerçekleşir yani elektron atomdan koparılır. İyonizasyon sonucu ortamda koparılan elektron ve pozitif yüklü atom bulunur.

# Lineer Enerji Transferi (LET)

- Birim uzunluk başına depo edilen enerjidir.  
Birimi eV/cm

$$\text{LET} \approx \frac{Q^2}{E_k}$$

# Işıma ile Enerji Kaybı (Bremsstrahlung)

Atom çekirdeği ile elektron etkileşimlerinin çoğu elastik olsa da, elektronlar pozitif yüklü çekirdek tarafından elektron yolunun saptırıldığı ve enerji kaybıyla sonuçlanan inelastik etkileşimler geçirir. Bu enerji anında elektromanyetik radyasyon olarak yayılır (yani, x-ışınları). Yayınlanan radyasyonun enerjisi, elektron tarafından kaybedilen kinetik enerjiye eşittir.

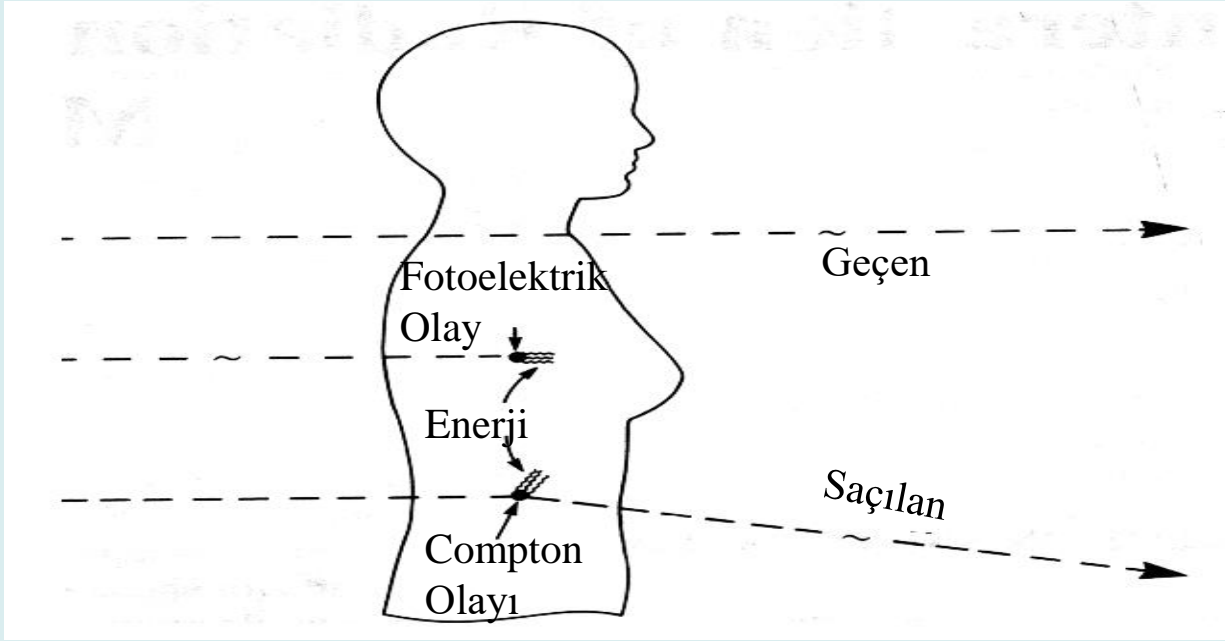
$$\frac{\text{Bremsstrahlung Radyasyonu}}{\text{Uyarma ve İyonizasyon}} = \frac{E_k Z}{820}$$

**E<sub>k</sub>**, Elektronun MeV cinsinden kinetik enerjisi

**Z**, Soğurucunun atom numarası

# X ve GAMA IŞINI ETKİLEŞMELERİ

Foton maddeden geçerken, soğurulmadan geçebilir, soğurulabilir ya da saçılabilir



# X ve GAMA IŞINI ETKİLEŞMELERİ

- Rayleigh Saçılması
- Compton Saçılması
- Fotoelektrik Olay
- Çift Oluşum

İlk üç etkileşme Diagnostik Radyoloji ve Nükleer Tıp incelemelerinde rol oynarken, çift oluşum sadece nükleer tıp incelemelerinde olasıdır.



# Diagnostik Radyolojide Foton-Atom Etkileşmeleri (Özet)

## Foton Soğurulması (Fotoelektrik)

$$\tau \propto \frac{Z^3}{E^3}$$

## Foton Saçılması (Compton, Inelastic, Incoherent)

$$\sigma \propto \frac{\text{Electron density}}{E}$$

Bir maddedeki elektron yoğunluğu (elektron / gr) =  $N \times \frac{Z}{A}$

Elektron / cm<sup>3</sup> = Yoğunluk (gr / cm<sup>3</sup>) x Elektron / gr

## Rayleigh/Thomson, Elastic, Coherent

$$\mu_e \propto \frac{Z^2}{E}$$

# X ve GAMA IŞINLARININ AZALIMI

**Lineer Azalım Katsayısı ( $\mu$ ):** Malzemenin birim kalınlığı başına tek enerjili x ya da gama fotunu demetinden ayrılan kesirdir ve birimi  $\text{cm}^{-1}$ 'dir.

$\Delta x$  kalınlığı üzerine gelen N foton sayılı demetten soğurulan foton sayısı  $n = \mu N \Delta x$  ile verilir. Örnek, 100 keV enerjili 1000 tane foton 1mm lik yumuşak doku üzerine gelirse 16 tanesi saçılma yada soğurulma ile demetten ayrılır. (Yumuşak doku için 100 keV'de  $\mu=0.016\text{mm}^{-1}$ )

# X ve GAMA IŞINLARININ AZALIMI

Monoenerjik demet için x kalınlıklı malzeme üzerine gelen ile geçirilen foton sayısı arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$N=N_0e^{-\mu x}$$

Örneğin, 6 cm lik yumuşak dokuya 100 keV enerjili 1000 foton gelsin. % 38'i geçer (380 foton), % 62'si demetten ayrılır.

$$\frac{N}{N_0} = e^{-(0.16\text{cm}^{-1})(6\text{cm})} = 0.38$$

$$\mu = \mu_{\text{Rayleigh}} + \mu_{\text{Photoelectric Effect}} + \mu_{\text{Compton Scatter}} + \mu_{\text{Pair Production}}$$

# X ve GAMA IŞINLARININ AZALIMI

**Kütle Azalım Katsayısı ( $\mu/\rho$ ):** Lineer azalım katsayısının yoğunluğa normalize edilmiş halidir. Verilen bir kalınlık için etkileşme olasılığı birim hacim başına atom sayısı ile orantılıdır. Bu bağımlılık lineer azalım katsayısının yoğunluğa normalize edilerek ortadan kaldırılır. Kütle azalım katsayısı yoğunluktan bağımsızdır.

$$\text{Kütle Azalım Katsayısı } (\mu / \rho) \left[ \text{cm}^2 / \text{gr} \right] = \frac{\text{Lineer Azalım Katsayısı } (\mu) \left( \text{cm}^{-1} \right)}{\text{Yoğunluk } (\rho) \left( \text{gr} / \text{cm}^3 \right)}$$

$$\mu_{\text{water}} / \rho_{\text{water}} = \mu_{\text{ice}} / \rho_{\text{ice}} = \mu_{\text{water vapor}} / \rho_{\text{water vapor}}$$

$$N = N_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x}$$

$\rho x$  (gr/cm<sup>2</sup>) = Kütle kalınlığıdır.

# X ve GAMA IŞINLARININ AZALIMI

**Yarı Değer Kalınlığı (Half Value Layer, HVL):** X ya da gama foton demeti şiddetini yarı değerine düşüren malzeme kalınlığıdır.

$$\begin{aligned}\text{MPF(Mean Free Path)} &= 1/\mu \\ &= 1/(0.693/\text{HVL}) \\ &= 1.44 \text{ HVL}\end{aligned}$$

Tek enerjili demet için HVL ile  $\mu$  arasındaki ilişki,  $\text{HVL} = 0.693/\mu$  ile verilir.

Örnek, 2mm kalınlıklı malzeme mono enerjik demetin % 25ini geçirmişse  $\text{HVL}=?$   $N=N_0e^{-\mu x}$  bağıntısından  $\mu=6.93 \text{ cm}^{-1}$  ve  $\text{HVL}=0.1\text{cm}$  elde edilir.

# X ve GAMA IŞINLARINDAN ENERJİ SOĞURULMASI

**Fluence (Akıcılık) ( $\Phi$ ):** Birim kesit alanından geçen foton ya da parçacık sayısıdır ve birimi  $\text{cm}^{-2}$ 'dir.

**Flux (Akı) ( $\dot{\Phi}$ ):** Akıcılık hızına da Akı denir ve birim zaman ve kesit alanı başına geçen foton ya da parçacık sayısıdır. Birimi  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

**Enerji Akıcılığı ( $\Psi$ ):** Birim kesit alanından geçen enerji miktarına enerji akışı denir. Tek enerjili foton demeti için enerji akıcılığı ( $\Psi$ ), akıcılık ( $\Phi$ ) ile foton başına enerjinin ( $E$ ) çarpımına eşittir. Enerji akıcılığının birimi  $\text{keV}/\text{cm}^2$  ya da  $\text{J}/\text{m}^2$

$$\Psi = (\text{Foton/Alan}) \times (\text{Enerji/Foton}) = \Phi \times E$$

# X ve GAMA IŞINLARINDAN ENERJİ SOĞURULMASI

Dolaylı yoldan iyonizasyona neden olan x, gama yada nötron demeti bir ortamdan geçerken ortamda iki şekilde enerji depolar.

**Aşama 1:** Fotonlar tarafından taşınan enerji yüklü parçacıklara kinetik enerji olarak fotoelektrik, compton ve yüksek enerjilerde çift oluşum ile aktarılır.

**Aşama 2:** Direkt olarak iyonizasyona neden olan yüklü parçacıklar ise ortama enerjilerini uyarma ve iyonizasyon ile depolar. Bazen enerji ortama etkileşmenin olduğu noktanın uzağında aktarılabilir.

**Kerma (K),** Aşama 1'de anlatıldığı gibi indirekt yolla iyonizasyona neden olan iyonize radyasyon tarafından birim kütle başına yüklü parçacıklara aktarılan kinetik enerjidir. Birimi J/kg'dır ya da Gray'dir. X ve gama ışınları için kerma, malzemenin kütle enerji transfer katsayısı ile enerji akışından hesaplanabilir.

# X ve GAMA IŞINLARINDAN ENERJİ SOĞURULMASI

**Kütle Enerji Transfer Katsayısı ( $\mu_{tr}/\rho_0$ ):** Kütle Enerji Transferi Katsayısı, kütle azalım katsayısı ile etkileşen foton enerjisinin yüklü parçacıklara kinetik enerji olarak aktarılan kesrinin çarpımına eşittir.

20 keV'lik fotonlar için yumuşak dokuda ( $\mu_{tr}/\mu$ )=0.68

50 keV'lik fotonlar için yumuşak dokuda ( $\mu_{tr}/\mu$ )=0.18 (Bu enerjide Compton saçılma olasılığı, fotoelektrik etkileşme olasılığına göre daha yüksektir.)

$$\text{Kerma} = \Psi \times (\mu_{tr}/\rho_0)_E = (\text{J/m}^2) \times (\text{m}^2/\text{kg}) = (\text{J/kg})$$

$(\mu_{tr}/\rho_0)_E$ : Soğurucunun E enerjisindeki kütle enerji transferi katsayısıdır



# X ve GAMA IŞINLARINDAN ENERJİ SOĞURULMASI

**Soğurulan Doz (D)**= Malzemenin birim kütlesi( $\Delta m$ ) başına iyonize radyasyon tarafından aktarılan enerji ( $\Delta E$ ) miktarıdır. Tüm iyonize radyasyon çeşitleri için tanımlanır. SI birim sisteminde birimi Gray'dir (J/kg), eski birim sisteminde rad'tır.

$$\text{Doz} = \Delta E / \Delta m = (\text{J/ kg}) = \text{Gray}$$

$$1\text{rad}=0.01 \text{ J/kg yada } 1\text{Gy}=100 \text{ rad}$$

Eğer yüklü parçacıklara aktarılan enerji ortamda soğurulursa ve bremsstrahlung ile enerji kaybı ihmal edilirse, soğurulan doz Kerma'ya eşittir. X ve gama ışınları için soğurulan doz, kütle enerji soğurma katsayısı ile enerji akıcılığından hesaplanabilir.

# X ve GAMA IŞINLARINDAN ENERJİ SOĞURULMASI

**Kütle Enerji Soğurma Katsayısı** ( $\mu_{\text{en}}/\rho_0$ ) = Kütle enerji transfer katsayısı, kütle azalım katsayısının soğurucunun küçük bir hacminde elektronların başlangıç kinetik enerjilerine sebep olan kesri olarak ifade edilir. Bu elektronların bazıları Bremsstrahlung x-ışınları üretebilir ve bu ışınlar soğurucunun bu küçük hacminden kaçabilir. Bu nedenle, kütle enerji soğurma katsayısı, kütle enerji transfer katsayısından biraz düşüktür. Fakat diagnostik enerji aralığında ve düşük Z'li soğurucularda (hava, su, yumuşak doku) ışınla enerji kaybı (Bremsstrahlung) çok küçüktür ve

$$\mu_{\text{en}} / \rho_0 \cong \mu_{\text{tr}} / \rho_0$$

alınabilir.

# X ve GAMA IŞINLARINDAN ENERJİ SOĞURULMASI

**Doz Hesabı:** Diagnostik radyolojide kullanılan düşük foton enerjileri için kerma ile doz arasındaki fark düşüktür. Herhangi bir malzemedeki doz,

$$D = \Psi (\mu_{\text{en}}/\rho_0)_E$$

ile verilir. Hava için kerma ile doz arasındaki fark, kerma kütle enerji transfer katsayısı ile tanımlanırken, doz kütle enerji soğurma katsayısı ile tanımlanır. Kütle enerji transfer katsayısı yüklü parçacıklara aktarılan enerjileri içerir, fakat bu enerjik yüklü parçacıklar (çoğunlukla elektronlar) soğurucuda Bremsstrahlung radyasyonu yayabilir ve bu küçük soğurucu hacminden de bu radyasyon kaçabilir. Bu nedenle  $(\mu_{\text{en}}/\rho_0)_E$  katsayısı ışıma ile enerji kaybını gözönünde bulundurur ve  $(\mu_{\text{tr}}/\rho_0)_E \geq (\mu_{\text{en}}/\rho_0)_E$

# X ve GAMA IŞINLARINDAN ENERJİ SOĞURULMASI

**Işınlama (X)** : Havanın birim kütlesi başına ( $\Delta m$ ), iyonize radyasyon tarafından (x-ışını, gama fotonları) havada oluşturulan toplam yük (elektron yada pozitif iyon) ( $\Delta Q$ ) miktarıdır. Bu tanımda, havanın birim kütlesinde fotonlar tarafından oluşturulan tüm elektronların hava tarafından tamamen soğurulduğu kabul edilir. Bu birim sadece havada etkileşmeler meydana getiren elektromagnetik radyasyon için tanımlanmıştır. Işınlama SI birim sisteminde ,

$$X = \Delta Q / \Delta m \text{ (C/kg)}$$

şeklinde tanımlanır. Eski birim Röntgendir ve

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$$

# X ve GAMA IŞINLARINDAN ENERJİ SOĞURULMASI

**Işınlama (X) :**

$$D [\text{Gy}] = f \cdot X [\text{C kg}^{-1}] \quad f = 34x \left( \frac{(\mu / \rho)_{\text{tissue}}}{(\mu / \rho)_{\text{air}}} \right)$$

Bu f faktörü, havadaki ışınlamadan (C/kg) dokudaki soğurulan doza (Gray) geçiş faktörüdür ve ortama bağlıdır. Dolayısıyla havadaki 1 C/kg'lık ışınlama 33,85 lik soğurulan doza karşılık gelir. Ya da eski birim sistemine göre

$$D [\text{rad}] = f \cdot X [\text{R}]$$

Havadaki 1 R'lik ışınlama 0,874 rad'lık soğurulan doza karşılık gelir.  $f_{\text{hava}}=0,869$

	f values (rad/ R)		
Photon energy	Water	Bone	Muscle
10 keV	0.91	3.5	0.93
100 keV	0.95	1.5	0.95

# X ve GAMA IŞINLARINDAN ENERJİ SOĞURULMASI

Işınlama havadaki dozdan hesaplanabilir. Havada dozun, havadaki ışınlamaya oranı W olsun ve D ile X ifadeleri yerine konulursa,

$$W = [(\Delta E / \Delta m) / (\Delta Q / \Delta m)] = \Delta E / \Delta Q$$

W, havada iyon çifti başına depo edilen ortalama enerjidir ve 33.97 J/C'tur.

$$D_{\text{air}} = W (33.97 \text{ J / C}) \times X (2.58 \times 10^{-4} \text{ C / kg})$$

$$D_{\text{air}} = 0.00876 \left( \frac{\text{Gy}}{\text{R}} \right) \times X(\text{R})$$

$$D_{\text{air}} (\text{mGy}) = 8.76 \times X(\text{R})$$

$$D_{\text{Ortamda Soğurulan Doz}} = X (\text{R}) \times (0.0087) (\text{Gy} / \text{R}) [ (\mu / \rho)_{\text{Ortam}} / (\mu / \rho)_{\text{Hava}} ]$$

$$\frac{\text{Doz}_{\text{ortam}}}{\text{Doz}_{\text{hava}}} = \frac{(\mu / \rho)_{\text{Ortam}}}{(\mu / \rho)_{\text{hava}}}$$

80 kV ve 2.5 mm Al, için genelde aşağıdaki faktör kullanılır:  
Yumuşak Doku Dozu = 1.06 Havadaki Doz

# EŞDEĞER ve ETKİN DOZ

Malzemedeki depolanan toplam enerjiye, verilen enerji (imparted energy) denir ve doz ile enerjinin depo edildiği soğurucunun kütlesinin çarpımına eşittir. Birimi  $(\text{J/kg}) \times \text{kg} = \text{J}$

**Eşdeğer Doz (H):** Tüm radyasyon çeşitleri birim doz başına aynı biyolojik hasarı vermez. ICRP (International Commission on Radiological Protection) herhangi bir radyasyon çeşidinin biyolojik hasarını modifiye etmek için radyasyon ağırlık faktörleri ( $w_r$ ) tanımlamıştır. Yoğun iyonizasyona neden olan radyasyon çeşitleri (Yüksek LET), düşük LET'li radyasyonlara göre birim doz başına daha fazla biyolojik hasar meydana getirirler. Eşdeğer Doz, Soğurulan doz ile radyasyon ağırlık faktörünün çarpımına eşittir.

$$H = D w_R$$

# EŞDEĞER ve ETKİN DOZ

EŞdeğer dozun birimi Sievert (Sv)'tir.

Table 2. Recommended radiation weighting factors.

Radiation type	Radiation weighting factor, $w_R$
Photons	1
Electrons and muons	1
Protons and charged pions	2
Alpha particles, fission fragments, heavy ions	20
Neutrons	A continuous function of neutron energy

Ağır yŭklŭ alfa parçacıkları için, LET yŭksek ve dolayısıyla biyolojik hasar da yŭksektir. 10 mGy alfa, 200 mGy'lik x-ışını kadar biyolojik hasara neden olur. EŞdeğer dozun eski birimi rem'dir.  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$



# EŞDEĞER ve ETKİN DOZ

**Etkin Doz (E)** : Tüm dokuların iyonize radyasyona karşı hassasiyetleri aynı değildir. ICRP doku yada organların radyasyona karşı hassasiyetlerini gösteren doku ağırlık faktörleri ( $w_T$ ) tanımlamıştır. Işınlanan bu organ yada dokuların eşdeğer dozlarının ( $H_T$ ), bu doku yada organların ağırlık faktörleri ile çarpımlarının toplamı Etkin Dozu (E) verir.

Etkin Dozun birimi Eşdeğer Doz ile aynıdır (Sievert yada rem).

$$E(\text{Sv}) = \sum w_T \times H_T (\text{Sv})$$

# EŞDEĞER ve ETKİN DOZ

Table 3. Recommended tissue weighting factors.

Tissue	Tissue weighting factor, $w_T$	Sum of $w_T$ values
Bone-marrow (red), colon, lung, stomach, breast, remainder tissues <sup>a</sup>	0.12	0.72
Gonads	0.08	0.08
Bladder, oesophagus, liver, thyroid	0.04	0.16
Bone surface, brain, salivary glands, skin	0.01	0.04
Total		1.00

<sup>a</sup> Remainder tissues: Adrenals, extrathoracic (ET) region, gall bladder, heart, kidneys, lymphatic nodes, muscle, oral mucosa, pancreas, prostate ( $\sigma$ ), small intestine, spleen, thymus, uterus/cervix ( $\text{♀}$ ).