



ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

FOTON ETKİLEŞİMLERİ

101538

PROF. DR. HALUK YÜCEL

© Prof. Dr. Haluk Yücel

Radyasyondan Korunma Prensipleri

1. **Justification (Gerekçelendirme):** Radyasyon ışınlamasının dahil olduğu bir durumda karar verilirken sağlanan fayda zarardan fazla olmalıdır.
2. **Optimization:** Işınlama ihtimalleri, ışınlanacak insan sayısı ve her birinin kişisel dozunun her biri mümkün olan en düşük seviyede tutulmalıdır. (*As Low As Reasonably Achievable*, ALARA)
3. **Doz Limitleri:** Halk ve çalışan dozları komisyon tarafından belirlenen sınırları aşmamalıdır.

	Çalışan	Halk
Etkin doz	5 yılın ortalaması 20 mSv (50mSv/ yıl)	1 mSv (5 mSv)
Göz lensi	20 mSv	?
Deri	500mSv	50mSv
Eller Ayaklar(Ekstremite)	500mSv	50mSv

Spesifik Gama-Işını Sabiti (Γ)

- Gama yayımlayan bir izotopun $I^2 \frac{\Delta x}{\Delta t}$ değerini A ile bölümüdür.

- Spesifik Gama Sabiti,

$$\Gamma = \frac{I^2 \frac{\Delta x}{\Delta t}}{A} = \frac{I^2}{A} * \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

- Burada A, nüklitin aktivitesi,

- $\dot{X} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, bu nüklitin noktasal kaynağından 1 m mesafedeki ışınlama hızıdır.

$$\Gamma \left(\frac{R \text{ m}^2}{h \text{ Ci}} \right)$$

Γ – Spesifik Gama Sabitleri

Kaynak	$R/mCi \cdot h @ 1m$	$\mu Sv/GBq \cdot h @ 1m$
^{60}Co	12.87	347.5
^{226}Ra	8.25	222.8
^{137}Cs	3.32	89.6
^{131}I	2.27	61.3
^{99m}Tc	0.78	21.1
^{201}Tl	0.46	12.4

Örnek: ^{32}P $E_{\beta}=1.71$ MeV $R=800$ mg/cm², $\rho_{s.tissue}=1$ g/cm³, $R=800$ mg/cm² / 1 g/cm³ = 0.8 cm, $A=1750$ MBq ise ^{137}Cs 'nin 50 cm'de beklenen ışınlanması nedir?

$$\Gamma(^{137}Cs) = 89.6 \mu Sv/GBq \cdot h @ 1 m, 1.750 GBq olduğuna göre$$

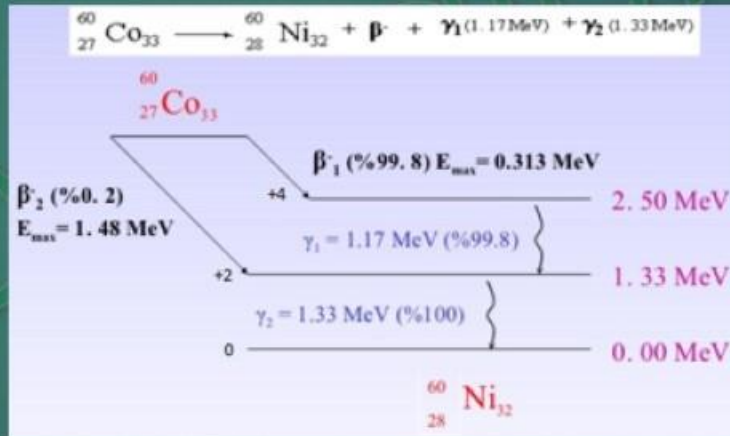
$$1.75 \times 89.6 = 156.8 \mu Sv/GBq \cdot h @ 1m$$

$$156.8 \times \left(\frac{100}{50}\right)^2 = 634,8 \mu Sv/GBq \cdot h @ 50cm$$

Radyasyon Kaynakları

Gama Bozunumu:

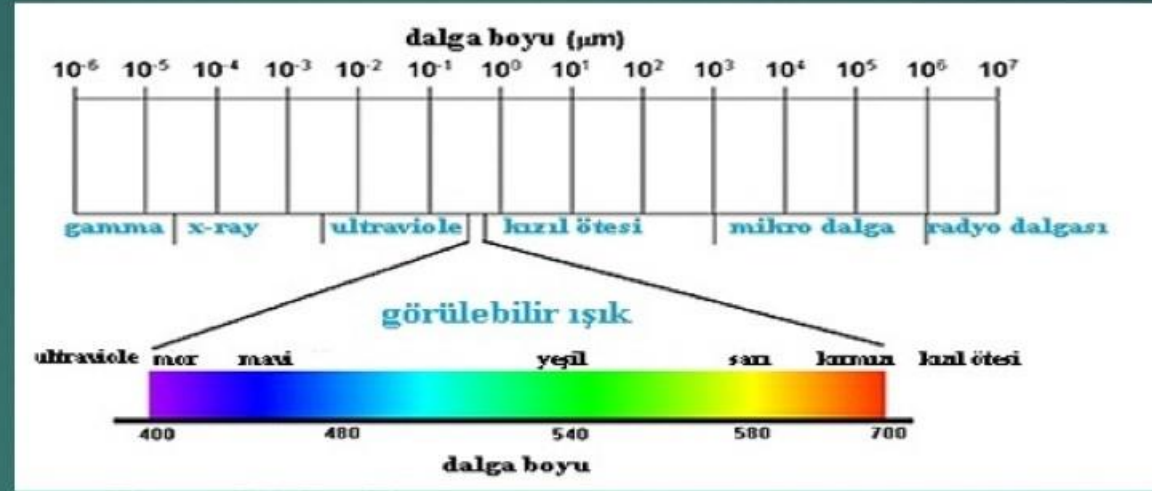
- Gama yayını, çekirdeklerin uyarılmış seviyeleri arasındaki geçişlerden salınır. Bu bozunmada, kütle numarasında ve çekirdekteki nükleonlarda bir değişme olmaz. (Z,N veya A'da değişme olmaz)
- Bu bozunma prosesinde fazlalık uyarılma enerjisi kaybolur. α veya β bozunumunu takiben bir yan ürün gibi düşünülebilir.



Co-60 Bozunumu Şeması [1]

Gama Işını

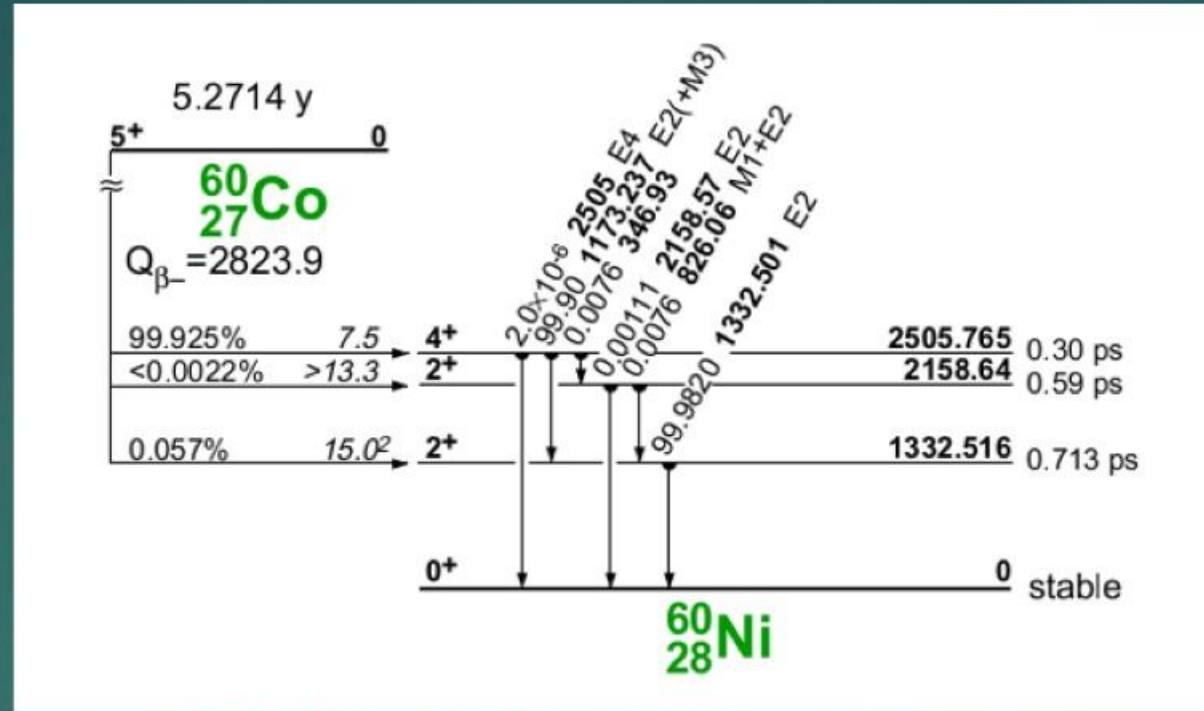
- Elektromanyetik radyasyondur. Elektromanyetik spektrumun yüksek enerji tayfında ve kısa dalga boyundadır.



Elektromanyetik Dalga Spektrumu [2]

- $E = h\nu$, $\lambda = c / \nu$;
- $h = 4.135 \times 10^{-35} \text{ eV/Hz}$, $c = 2.997926 \times 10^8 \text{ m/s}$, $100 \text{ keV} = 1.2398 \times 10^{-12} \text{ m} = 2.4180 \times 10^{20} \text{ Hz}$

- Bazen yüksek enerjili X-ışınları ve γ -ışınları birbirlerinin üzerine binebilir.
- X-ışını $\rightarrow 1 - 100 \text{ keV}$, γ -ışınları $\rightarrow 10 - 10000 \text{ keV}$,
- Kozmik γ -ışınları 100 MeV ve üst limiti yok
- Soft γ -ışınları $10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}$
- Medium γ -ışınları $30 \times 10^6 \text{ eV} = 30 \text{ MeV}$
- Yüksek enerjili γ -ışınları $10^{10} \text{ eV} - 10^{13} \text{ eV} = 10 \text{ GeV}$
- Çok yüksek (ultra) γ -ışınları $> 10^{14} \text{ eV}$



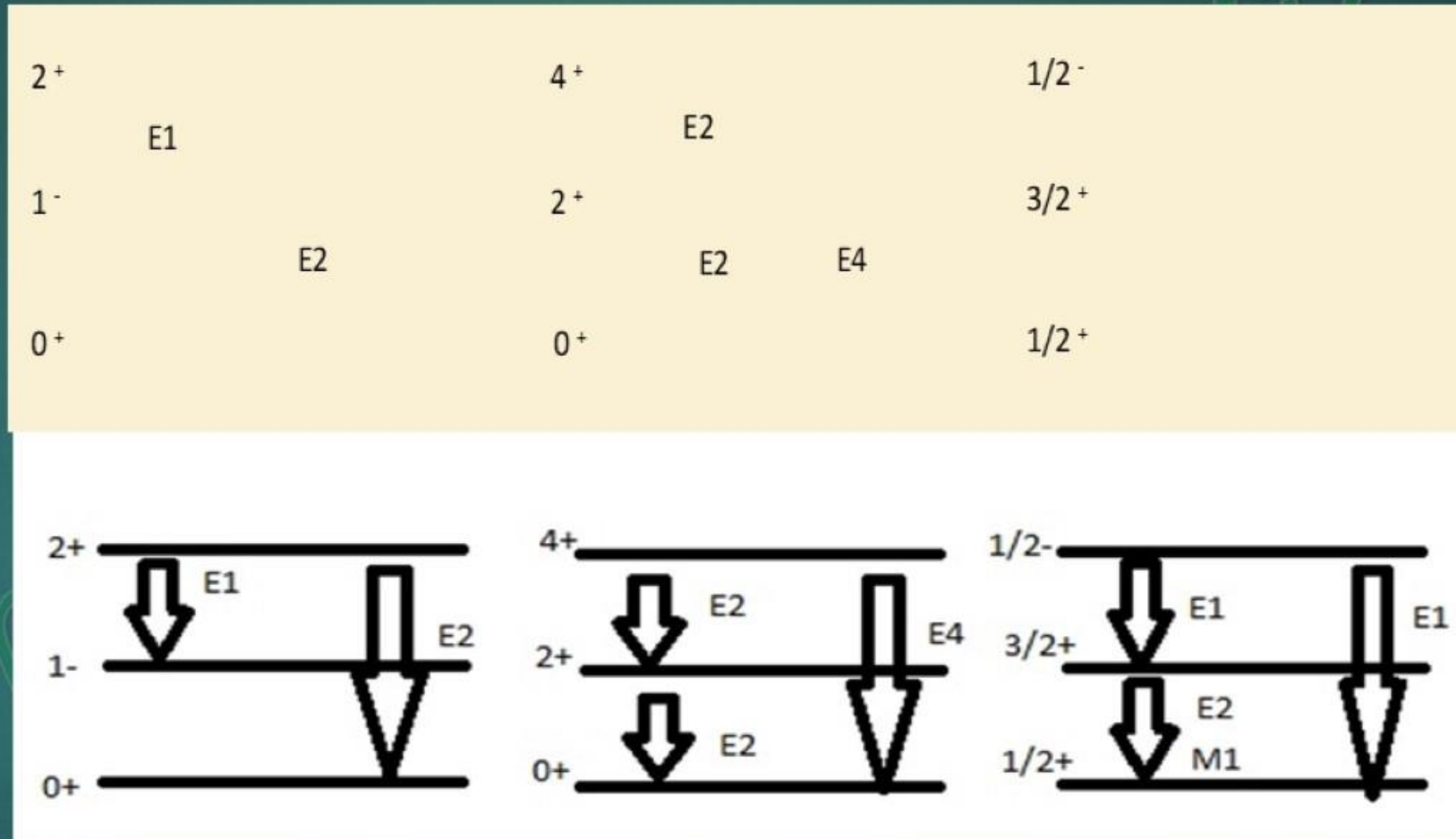
- Gama geçişleri, ışın enerjilerinin tek (Unique) olması radyoaktif maddenin karakterizasyonunda kullanılır.
- Bu enerjiler yüksek kesinlikle ölçülebilmektedir.

- Uyarılmış bir nükleer seviyede, bir veya daha fazla nükleon daha yüksek enerjili kabuk veya kabuklara atlayabilir.
- Nükleer enerji seviyeleri yük ve akım dağılımları olarak “çekirdekte bir değişmeye” yol açar.
 - ✓ Yük dağılımları Elektrik momentlerine $\rightarrow E$
 - ✓ Akım dağılımları manyetik momentlerinin $\rightarrow M$ oluşmasına neden olur.

Not: Nötron yüksüz olmasına karşın, yine de bir manyetik momenti vardır.

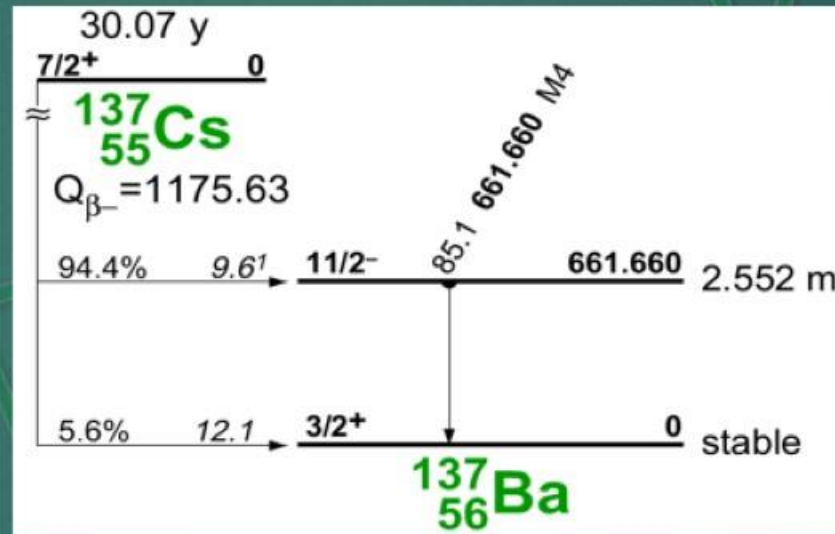
- Bir birimlik açısal momentum değişimine elektrik dipol momenti denir $E1$ ile gösterilir.
- İki birimlik açısal momentum değişimine elektrik quadrupol momenti denir $E2$ ile gösterilir.
- Manyetik momentlerde değişim $\rightarrow M1$ (dipol), $M2$ (quadrupol)

- Bozunma ile çekirdek pariteleri de değişebilir. Π (+) çift, (-) tek



İzomerik Geçiş

- İzomerik State (m): Nükleer seviye ömrü kolayca ölçülebilecek uzunlukta ise buna izomerik seviye denir. Çoğu gama geçişi $< 10^{-12} s$ de gerçekleşir. Pratikte $\mu s, ms$ kesim noktası $1 ns$ üstünde ömürlere sahip nükleer seviyelere "Metastable State" denir.
- ^{137m}Ba $t_{1/2} = 2.552 dk$

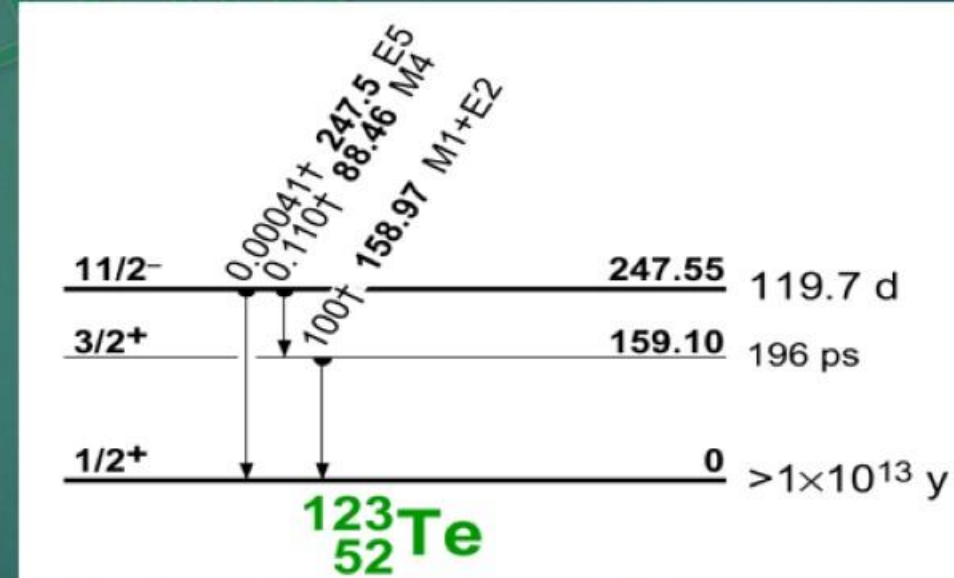


Cs-137 izomerik geçişi_[3]

İç Dönüşüm (Internal Conversion) – IC

- Çekirdeğin Enerjisi, dışarıdaki (çekirdek dışı) elektrona aktarılır ve atomdan “monoenerjitik” bir elektron fırlatılır. Buna iç dönüşüm elektronu denir.
- IC bir bozunma (de-eksitasyon modu) durumudur ve N, Z ve A’da bir değişme gözlenmez. Ana çekirdeğin izomerik durumunun bir karakteristiğidir ve bir X ışını üretilir. Ana düzey Ξ yeni oluşan (Daughter) düzey. Elektron Yakalama (EC) zıttı bir durumdur.
- γ - emisyonuyla, iç dönüşüm birbirleriyle yarışan olaylardır.
- İç Dönüşüm katsayısı,

$$\alpha = \frac{\text{Yayımlanan IC elektron sayısı}}{\text{Yayımlanan } \gamma\text{-ışınları sayısı}}$$



- Gama bozunmasında,

Enerji korunumu, $E_j = E_i - E_f - E_R$

Geri tepme enerjisi $E_R = 0.5368 \times 10^{-6} \frac{E_\gamma^3}{A_r}$

(keV)

Relatif kütle

- $J_i = J_f + L$, $J = \sqrt{J * (J + 1)} * \hbar$, $|J_f - L| < J_i * |J_f + L|$

- $\pi_i = \pi_f + \pi_\gamma$, $L = \sqrt{L * (L + 1)} * \hbar$

Fotonların Madde İle Etkileşmesi

- X ve y ışınları olarak da adlandırılan fotonlar, elektromagnetik radyasyondurlar. Işık hızında (c) ilerleyen durgun kütleleri ve yükleri sıfır olan parçacık gibi düşünülebilirler.
- Bir fotonun enerjisi (E) ile dalga boyu (λ) ve frekansı (ν) arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

- X-ışınları genellikle iyonizasyon ve uyarılma gibi atomik geçişler sonucunda oluşurlar. Gama ışınları ise nükleer geçişler sonucunda yayılırlar. Fotonlar ayrıca, yüklü parçacıkların hızlandırılması veya yavaşlatılması ile Bremsstrahlung X-ışınları olarak da üretilirler. Atom ve çekirdekler tarafından yayılan fotonlar tek enerjili iken, Bremsstrahlung, sürekli bir enerji spektrumuna sahiptir.
- Fotonların madde ile birçok şekilde etkileşimi mümkündür ancak, bunlardan en önemlileri fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumdur.

1. Fotoelektrik Etki

- Fotoelektrik etki, bir foton ile bağlı durumdaki bir atom elektronu arasındaki bir etkileşmedir. Bu etkileşmenin sonucunda, foton kaybolur ve atomik elektronlardan biri serbest hale gelir (koparılır), serbest hale gelen bu elektrona "fotoelektron" adı verilir. Elektronun kinetik enerjisi,

$$T = E_{\gamma} - B_e$$

E_{γ} : gelen fotonun enerjisi

B_e : elektronun bağlanma enerjisi

- Bu etkileşmenin gerçekleşme olasılığı, "fotoelektrik tesir kesiti" olarak adlandırılır. Bu olasılığın E_{γ} , Z ve A gibi parametrelerle olan ilişkisi aşağıdaki denklemden gösterilmiştir. Fotoelektrik tesir kesiti,

$$\tau [m^{-1}] = a N \frac{Z^n}{E_{\gamma}^m}$$

τ : foton tarafından kat edilen mesafe başına fotoelektrik olayın gerçekleşme olasılığı,

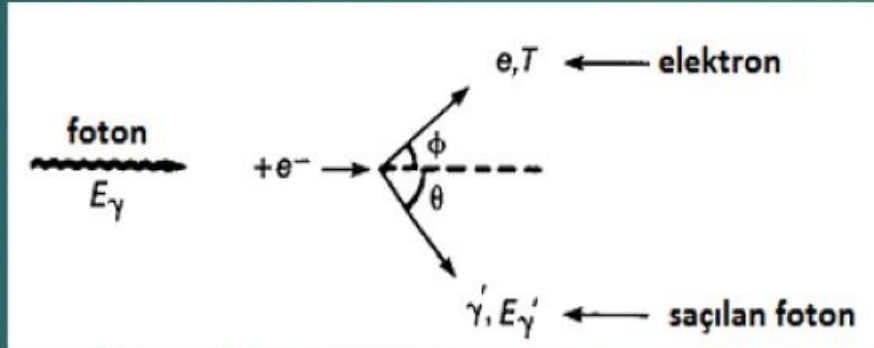
a : Z ve E_{γ} 'den bağımsız bir sabit,

m, n : E_{γ} 'ya bağılı olarak 3 ile 5 arasında değer alabilen sabitler

2. Compton Etkisi

- Compton etkisi bir foton ile bir serbest elektronun çarpışması olayıdır. Tabii ki normal koşullarda ortamdaki bütün elektronlar bağlı halde bulunurlar ancak, fotonun enerjisinin KeV ve elektronun bağlanma enerjisinin eV mertebesinde olduğu durumlar için elektronların serbest oldukları varsayılabilir.
- Compton saçılmasından sonra foton, doğrultusu ve enerjisi değişerek hareketine devam eder. Fotonun enerjisi, elektrona aktardığı enerji kadar azalır. Enerjinin korunumundan,

$$T = E_{\gamma} - E_{\gamma'}$$



$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (1 - \cos \theta) E_{\gamma}/mc^2}$$

$$\tan \theta = \frac{1}{\left[1 + (E_{\gamma}/mc^2) \tan(\theta/2)\right]}$$

- Bu etkileşmenin gerçekleşme olasılığı, "Compton tesir kesiti" olarak adlandırılır. Compton tesir kesiti,

$$\sigma [m^{-1}] = NZf(E_\gamma)$$

σ : birim mesafe başına Compton etkileşmesinin gerçekleşme olasılığı,

$f(E_\gamma)$: E_γ 'nin bir fonksiyonu

$$\sigma \sim \rho \frac{N_A}{A} Z f(E_\gamma) \sim \rho \left(\frac{N_A}{A} \right) \frac{A}{2} f(E_\gamma) \sim \rho \frac{N_A}{2} f(E_\gamma)$$

3. Çift Oluşumu

- Çift oluşumu etkileşmesi foton ve çekirdek arasında gerçekleşir. Bu etkileşmenin sonucu olarak, bir elektron-pozitron çifti oluşur.

- Enerjinin korunumundan aşağıdaki elektron ve pozitron kinetik enerji denklemi geliştirilebilir:

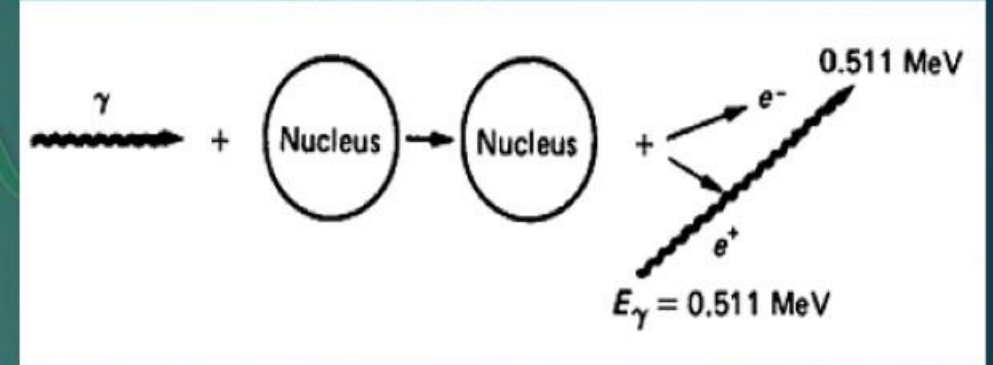
$$T_{e^-} + T_{e^+} = E_\gamma - (mc^2)_{e^-} - (mc^2)_{e^+} = E_\gamma - 1.022 \text{ MeV}$$

- Elektron ve pozitron çiftinin kazanabileceği kinetik enerji, gelen fotonun enerjisinin, iki durgun kütleyi oluşturabilmek için gereken enerji kadar (1.022 MeV) eksiktir. Geriye kalan enerji, elektron ve pozitron tarafından paylaşılır:

$$T_{e^-} = T_{e^+} = \frac{1}{2} (E_\gamma - 1.022 \text{ MeV})$$

- Çift oluşumunun gerçekleşme olasılığına "çift oluşumu tesir kesiti" olarak adlandırılır. Bu olasılık, E_γ ve Z 'nin bir fonksiyonudur.

$$\kappa [m^{-1}] = NZ^2 f(E_\gamma, Z)$$



Toplam Azalım Katsayısı

- Bir foton bir ortamda hareket ettiğinde, bahsedilen etkileşmeler oluşabilir (Çift oluşumu için $E_\gamma > 1.022 \text{ MeV}$).

- Fotonun madde ile etkileşmesinin toplam olasılığı her bir farklı etkileşmenin olasılıklarının toplamına eşittir.

$$\mu [m^{-1}] = \tau + \sigma + \kappa$$

$$\mu [m^2/kg] = \frac{\mu (m^{-1})}{\rho (kg/m^3)}$$

