

원자와 원자핵

방사선과 방사능

방사선피폭과  
방사선량

원자핵반응

방사성핵종

방사평형

방사선과 물질과의  
상호작용

# 9 차시

# 방사선과 물질의

# 상호작용

# 방사선과 물질과 상호 작용하면,

- **물질을 구성하고 있는 원자, 분자와 상호작용**

⇒ 산란, 들뜸, 이온화, 핵변환

- **물질 측면에서는**

- 들뜸, 이온화된 원자, 분자는 화학적으로 활성화  
→ 많은 화학반응

생체의 경우 물리적 과정과 이것으로 인한 화학반응을 거쳐  
간접적인 작용으로 인한 생물학적 영향 발생

- **방사선 측면에서는**

- 방사선은 이러한 작용만큼 에너지를 잃음.

## 1. 중하전입자 : 하전 입자 방사선의 무게가 전자보다 큰 것

- 충돌(Collision): 전리, 여기

## 2. 전자와 물질

- 충돌(Collision): 전리, 여기

## 3. 중성자와 물질

- 충돌(탄성산란, 비탄성산란)
- 포획반응, 하전입자 방출, 핵분열

## 4. 광자와 물질

- 광전효과 : 광전자
- 콤프턴산란 : 반도전자
- 전자쌍생성 : 음전자, 양전자

# 1. 중하전입자와 물질과 상호 작용

( $\alpha$ 입자, 양성자, 중양자, 중이온, 핵분열조각 등)

## 가. 탄성산란 (쿨롱산란)

물질의 원자핵과 입사입자의 쿨롱력 마찰로 전기적 반발력 발생  
상호작용은 입사 입자와 핵과는 거리의 제곱에 반비례하므로  
핵에서 멀리 있을 때는 작지만, 가까워짐에 따라 갑자기 커짐.

그 결과, 입사 입자는 방향만 바뀌서 튀어 오름.  
입사입자와 물질의 핵이 정면충돌하지 않더라도,  
반발력이 미칠 정도로 근접한 후 입사입자가 진로를 변경

에너지 보존법칙이 성립되며, 전 운동에너지도 보존됨.  
실험적으로는 **중하전입자의 질량이 커서 탄성산란이 발생 확률은 매우 희박**

c.f 이에 반해, 전자의 질량은 알파입자의 1/7300에 지나지 않으므로 매우  
높은 탄성산란 발생

## 나. 비탄성산란 (충돌손실, 이온화 손실)

물질 내에서의 에너지손실은 **비탄성충돌이 대부분을 차지,**  
충돌하는 전기적 인력(입사입자의 E)이 핵력의 크기에 따라  
**궤도전자를 이탈시켜 이온화 형성 또는 들뜸 현상**

- ☞ 이에 해당하는 뭣만큼 운동에너지를 잃게 되는 현상.  
충돌전후에 있어서 입사 입자와 표적입자의 본질은  
변하지 않지만 내부에너지가 변함.
  - 두 개의 납공의 충돌하면, 운동에너지의 일부가 납공 변형에 기여  
→ 충돌 후의 운동에너지는 충돌 전보다 감소
  
- ☞ 운동에너지의 보존법칙 성립되지 않음.  
그러나 총에너지는 보존(변형에 사용된 에너지)
  
- ☞ 따라서 입사입자의 운동에너지가 물질을 들뜨거나  
이온화하면서 에너지를 손실하여, 이온화손실, 충돌손실

# 비탄성 산란의 이해

- 알파입자의 에너지 : 4~9 MeV
- 비탄성산란 1회로 잃는 에너지 :
  - 100~200 eV에 불과함
- 알파입자가 에너지를 잃으려면 수만번의 비탄성산란하여 이온화능력을 잃게됨.
- 방사선이 단위길이당 잃게 되는 에너지의 정량화를 위해 **멈춤능력(저지능)** 개념으로 설명
  - 방사선의 측면에서 본 개념

- 저지능[Stopping power] : 단위길이당 평균 에너지 손실  
[단위: MeV/cm, keV/ $\mu\text{m}$ ]

1차 이온화 작용으로 생긴 전자 : 2차전자( $\delta$ 선)

\*  $\alpha$ 선의 이온화의 경우, 총 이온쌍의 60~80%가  $\delta$ 선에 의함.

$$S = -\frac{dE}{dx} \quad : \text{저지능 [Mev/cm]}$$

- 질량저지능[mass stopping power] :

물질의 밀도 종속성을 배제하기 위해 저지능을 밀도로 나눈값

$$\frac{S}{\rho} \quad : \text{질량저지능 [MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}]$$

## ■ 선에너지전달[linear energy transfer; LET]

- 물질에 전달되는 에너지 중 2차 방사선[주로 전자] 에너지 형태로 관심 영역을 빠져나간 것을 제외한 에너지 전달량으로 정의.
  - ※ 관심영역을 이탈하는 2차 방사선을  $\delta$ -ray라 부름
- 단위 길이당 어느 정도의 에너지가 물질에 전달되는 가를 의미함.
- LET는 에너지의 국지 흡수량을 평가하는 선량계측 목적으로
- 한정저지능[restricted stopping power] 이라고도 함.
  - 1차 입자에 의해 전자에 전달되는 에너지가 특정한 값.

$$LET = \left| -\frac{dE}{dx} \right|$$

$$LET_{\infty} = \left( -\frac{dE}{dx} \right)_{\infty} = \left( -\frac{dE}{dx} \right) : \text{stopping power}$$

※ 저지능은 방사선의 측면에서 본 개념, LET는 물질의 측면에서 본 개념



# 입자의 비정(range, 도달거리)

- 물질에 입사된 방사선이 정지할 때까지 진행한 최대 거리(cm,  $\mu\text{m}$ )
- 입자의 비정은 선원과 흡수재, 방사선계측기 이용하여 측정
- 흡수재의 두께를 점차 증가시키며 계측기의 계수가 '0'이 되는 지점.
- '0'을 찾기 어려울때는 초기 값의 1/2되는 평균비정  $R_0$ 지점이나,
- 직선부를 연장하여 X 축과의 교점을 외삽비정( $R_e$ )  $R_{air} = 0.318E^{3/2} (4 < E < 8) \text{MeV}$

※ 비정 R(하전입자가 에너지를 잃을 때까지 주행한 직선 거리)  $R \propto \frac{1}{S}$

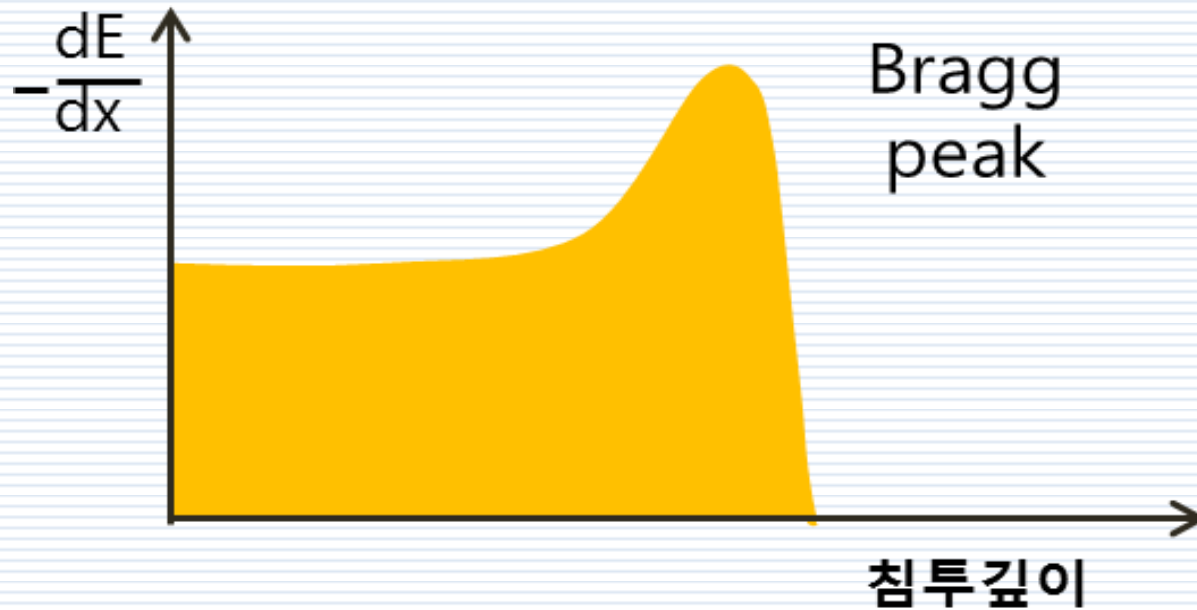
공기 이외의 물질에서 입자의 비정  $R_m = R_{air} \times (\rho_{air} / \rho_m)$

$$\frac{R_{Al}}{R_{air}} \approx \frac{\rho_{air}}{\rho_{Al}}$$

$$R \approx \frac{1}{\rho} \approx \frac{V}{m}$$

# Bragg peak

- **중하전 입자가** 물질 속에서 멈출 때까지 고유이온화도의 변화를 보면 에너지를 잃어가면 저지능 값이 근사적으로 증가하다가 입자가 정지상태에 이르면 최대도달거리(비정) 직전, 저지능이 최대로 된 피크



중하전입자의 거리에 따른 저지능 변화와 브래그피크

## 2. 전자선과 $\beta$ 선의 물질과 상호 작용

### 특징

- ✓ 전자선 : 균일한 에너지의 흐름을 갖는 전자의 흐름,
- ✓  $\beta$ 선 : 다양한 에너지를 갖는 전자의 흐름

구 분	베타선	전자선
차 이 점	발생원 : 핵에서 방출된다.	발생원 : 핵 밖(원자궤도)에서 방출된다.
	연속스펙트럼	선스펙트럼
공 통 점	① 전하 = $1.6 \times 10^{-19}$ C로 동일. ② 정지질량 ( $m_0$ ) = $9.1 \times 10^{-31}$ kg = 0.511 MeV로 동일. ③ 하전을 띤 입자방사선. ④ 물질과 상호작용하는 방법이 유사.	

전자도 중하전입자의 경우와 같이 물질 속에서  
탄성산란과 비탄성산란

그러나, 전자의 질량이 매우 작고( $\alpha$ 입자의 1/7,300),  
속도는  $\alpha$ 입자의 85배 빠르기 때문에 산란의 양상이 다르다.

- 중하전입자에서 볼 수 없는,  
전자 특유의 방사선손실과 후방산란현상

전자는 비정이 명확치 않음.  
무질서한 브라운 운동같은 형태를 취함

# 가. 전자의 이온화 손실

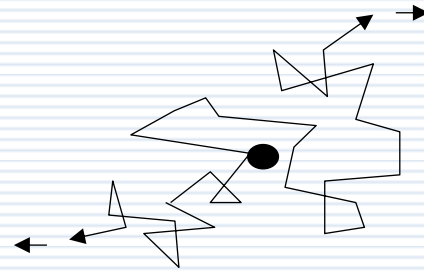
- 전자는 원자의 궤도 전자와의 사이에 쿨롱력이 작용하여 주변의 원자를 이온화(전리), 들뜸(여기)
- 입사 전자는 가법기 때문에 방향도 용이하게 변하면서 비탄성산란 : 에너지(이온화 능력)를 잃음

입사전자중 에너지가 높은 것은 2차 이온쌍 생성 : 총 이온화 에너지의 50%

- 고에너지 전자는 전방산란이 우세
- 저에너지 전자는 무질서한 브라운운동에 가까움



고에너지 전자



저에너지 전자

## 나. 전자의 방사 손실

원자핵이나 궤도에 전자선이 작용하게 되면, 전자 자신도 방향이 변하여 방사선손실 형태로 에너지를 잃음: 대표적인 것이 **제동 X 선**(BREMSSTRAHLUNG)

※ **입사 전자의 에너지가 높아지면, 이온화 손실보다 방사손실이 크다.**

방사손실 : 질량의 제공에 반비례하여 그 몫만큼 에너지를 잃는 현상  
전자는 중하전입자에 비해 질량이 매우 작으므로 방사손실이 크다.  
반면에 **중하전입자는 질량이 커서 방사손실은 무시할 만함.**

입사입자가 원자핵으로부터 쿨롱력으로 가속도를 받으면,  
전자의 속도가 빨라지고, 동시에 전자기파 방사.  
이때 입사전자는 그 만큼의 에너지를 잃고 속도도 떨어짐.  
☞ 입사전자가 원자핵에 의해 제동되므로, 제동방사라 함

**방사 손실(전자의 방사 멈춤능력)  $\approx \rho ZE$**

## 전자의 저지능(멈춤능력) :

충돌저지능[Collisional stopping power] + 방사저지능[radioactive stopping power]  
= 이온화 손실능 + 방사 손실능

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_r$$

입사전자가 낮은 에너지 영역 : 이온화 손실 ↑  
입사전자가 높은 에너지 영역 : 방사손실 ↑

$$\text{손실비} : \left(\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_r}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_c}\right) \cong \frac{ZE}{800}$$

두 손실이 같을 때: 임계에너지( $E_c$ )

방사손실과 충돌손실(이온화손실)이 같을 경우:  $ZE=800$



## 다. 베타선의 후방산란

베타선의 후방산란(backscatering) :

물질에 입사한 베타선은 원자핵과 탄성산란 또는 궤도전자와 비탄성산란을 거듭하면서 입사방향과 역방향으로 가는 것

후방산란은 입사전자가 물질표면에 반사되는 것이 아니라,  
입사전자가 물질속에서 산란되어 원래의 입사진로로 되돌아 가는 현상임.  
※  $\alpha$ 입자에서는 관찰 안됨.

☞ 후방산란 :  $\beta$ 선 방사선 측정시 문제되므로 반드시 보정이 필요함.

## 라. 소멸 방사

$\beta$ 선원 중에는  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$  와 같이 양전자를 방사하는 것이 있는데, 양전자도 음전자와 같이 탄성산란, 비탄성산란, 제동방사하지만.

양전자 특유의 소멸방사 함.

전리능력을 잃은 양전자가 부근에 있던 음전자와 충돌하여 합체하여 사라지고 그 대신에 두 개 전자의 정지에너지 만큼의 감마선을 방사하는 현상

두 개의 정지 에너지 :  $2m_0c^2 = 2 \times 0.511\text{MeV}$

소멸방사현상 : 양전자 소멸 또는 전자쌍 소멸이라고,  
이 때의 방사선을 소멸( $\gamma$ )방사선

☞ 양전자 단층촬영법(PET)에 이용

### 3. 중성자와 물질과의 상호작용

중성자의 종류	에너지 범위	상호작용
열 중성자	0.025 eV 이하	원자핵에 흡수 (n, r)
저속 중성자	eV~KeV	원자핵에 공명흡수
고속 중성자	MeV 이상	원자핵과 탄성산란

※ 속중성자 : 저속중성자(1eV~500keV), 고속중성자(500keV~10MeV)

## 가. 탄성산란

중성자가 핵과 충돌전후 핵의 에너지 상태가 불변인 반응(n,n)  
중성자의 에너지가 핵의 들뜬 에너지(1 MeV) 이하에서 일어나기 쉽다.  
1MeV이하에선 **비탄성산란**은 발생치 않음.

되튬에너지는 원자번호가 낮을 수록 최대이고,  
무거운 원자핵에서는 무시할 정도로 작다.  
수소 원자핵과 완전히 속도를 교환하고 멈춤.

수소와 같이 가벼운 원소의 물질은 투과하기 어렵고,  
무거운 원소의 물질은 투과하기 쉽다.

$$E = E_0 - E_r, \quad E_r = \frac{4A}{(A+1)^2} E_0 \cos^2 \phi$$

( $E$ : 산란 후 에너지,  $E_0$ : 산란전 에너지,  $E_r$ : 되튬에너지)

☞ 중성자는 탄성산란을 여러 차례 되튬이하하면서 에너지를 잃고 열중성자로 됨.

## 나. 비탄성산란

중성자가 핵과 충돌할 때, 되튬에너지를 핵에 주어 **들뜨게 하는 현상**. 운동에너지 보존 법칙 성립안함.

- 문턱값 존재: C-12 4.8 MeV, U-238 44 keV

$E = E_0 - E_r$  식은 성립안함.

산란 후 에너지는 산란 전보다 항상 작음 :  $(n, n')$  반응

중성자에 의해 들뜬 핵은 감마선을 방출하고 기저에너지 상태로 복귀

이 감마선이 주변의 원자, 분자를 이온화 및 들뜨게 함.

**중성자의 에너지가 높을 수록 일어나기 쉽다.**

수 MeV 에너지 상태에선 탄성산란과 비탄성 산란이 같은 비율로 발생함.

## 다. 중성자 포획 반응(n, $\gamma$ )

중성자의 속도가 느리면(<1keV), 원자핵에 충돌해도 산란 발생치 않고, 핵에 그대로 흡수되어  $\Rightarrow$  들뜬 상태  $\Rightarrow \gamma$ 선 방출후, 핵은 안정상태로 복귀

※ 이때 방출된  $\gamma$ 선 : 포획  $\gamma$ 선

중성자 포획시 질량수 1 증가 :  $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$

방사성이 아닌 핵종에서도 발생 :  $H + n \rightarrow D + \gamma$

중성자 포획단면적은 에너지가 낮을 때 발생 용이함.  
1eV 이하(열중성자 영역대)에서  $1/v$ 에 비례해서 증가.

열중성자는 원자핵에 흡수되어 붕괴됨 :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

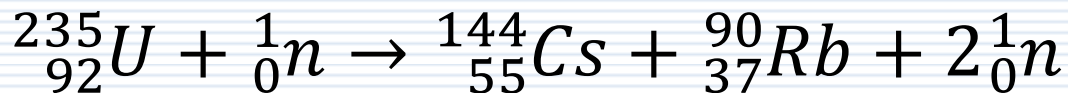
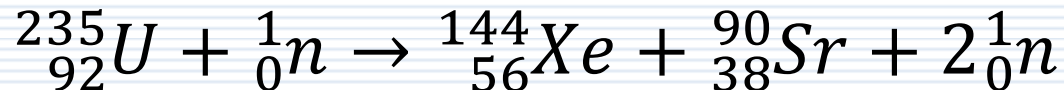
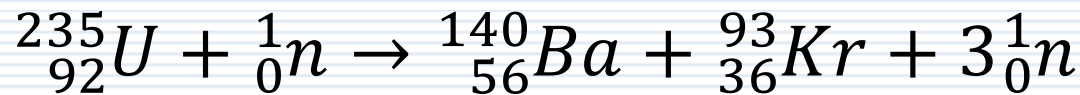
특정한 에너지(25eV)의 중성자에서 포획단면적이 높아져서 원자핵이 공명흡수.

※ 공명흡수(resonance) : 외부에서 중성자가 원자핵 가까이 접근하면 찰나에 원자핵 파동의 진폭에 의해 핵자간에 공명이 생겨나 아주 미세한 틈이 벌어져 중성자 포획단면적이 커져 원자핵에 흡수됨.

## 라. 하전입자 방출(핵변환) : 속중성자 경우

- 저에너지 중성자의 경우, 핵을 들뜨게 한 후  $\gamma$ 선을 방출하는 것과 달리,
- 고에너지 중성자는 핵에 충돌하면, 복합핵을 만들고 **양성자,  $\alpha$ 입자 방출**  
→ 주변의 원자, 분자를 이온화, 들뜨게 함.
- **통상 수 MeV 이상의 속중성자에서 일어나지만,**  
예외적으로 저속중성자  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ , 열중성자  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$

## 마. 핵분열반응



# 4. 광자와 물질과의 상호작용

전자기 방사선은 전장과 자장의 시간적변화와 공간적 전달현상으로 상대성이론에 따르면 에너지  $E$ 를 가진 것은  $E/c^2$ 의 질량과  $h\lambda$ 의 운동량을 갖으며, 전하를 갖지 않음에 따라 하전입자의 물질과의 상호작용과 달리 쿨롱력의 지배를 받지 않게 됨

## ● 상호작용의 물리적 현상

- 가. Photoelectric effect (광전효과)
- 나. Compton scattering (컴퓨터산란)
- 다. Pair production (전자쌍생성)

※ 광자는 이 세 과정에 따라 흡수, 산란하면서 차츰 에너지를 잃고, 물질속을 진행



## ■ 광전효과

일종의 이온화 현상

$$E_e = \frac{1}{2}mv^2 \text{ (광전자의 에너지)}$$

※ 광전자 : 원자밖으로 튕겨나간 전자

$$E_\gamma = h\nu \text{ (입사광자의 에너지)}$$

$E_b$  (속박전자의 결합에너지.)

광자가 원자핵에 가까운 궤도전자와 충돌하여, 광자 자신은 소멸

광자가 궤도전자에 충돌하여 전에너지를 원자와 결합된 전자에 전달.

방출된 전자는 전에너지에서 결합에너지를 뺀 나머지 양 만큼 운동에너지를 갖음

광자는 전자의 결합에너지( $E_b$ )보다 큰 에너지를 가져야 함.

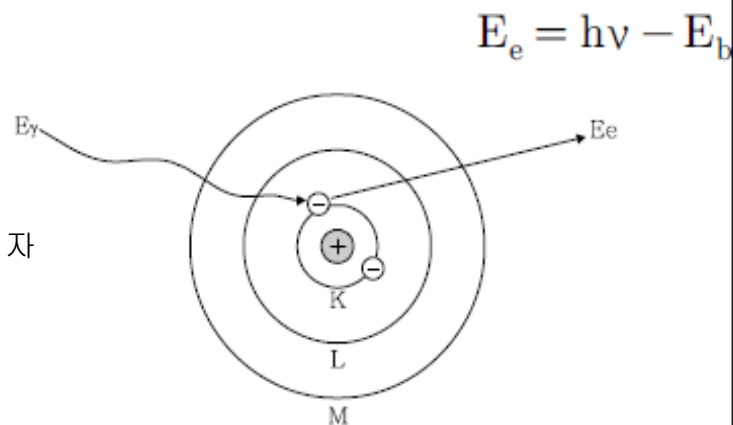
$$\text{발생 확률은 } \sigma_{ph} \propto \frac{Z^5}{(h\nu)^{\frac{7}{2}}}$$

광전효과는 원자핵 가까이에서 잘 일어 남

(모든 광전효과의 **80 % 이상**이 **최내각(K각)전자와 작용**-광자와 궤도전자의 공명현상)

이때 핵도 반도운동에너지를 가지나 광전자의 운동에너지보다 극히 작으므로 무시한다.

광자의 에너지가 고에너지에서 발생 확률은 낮지만 납과 같은 원자번호가 큰 원소에서는 무시 못함.



## < 하전입자에 의한 이온화와 광전효과에 의한 이온화 현상의 차이 >

- 하전입자의 경우, 하전입자에너지의 일부를 원자, 분자에 주면서 천천히 에너지를 잃는 반면,
- 광전효과는 전자기방사선의 에너지가 이온화에너지와 광전자의 운동에너지로 바뀌어 모두 원자에 흡수.  
즉, 전자기 방사선의 에너지는 모든 에너지를 잃고, 그대로 소멸됨.  
광전효과를 광전흡수라고도 함.
- 광전자는 부근의 원자, 분자를 2차적으로 이온화 시킴.  
(2차적 이온화가 압도적으로 많음)

광전효과로 인한 2차 방사선 : 광전자. 특성X선, 오제전자

- 입사 감마선은 궤도전자에 에너지를 주고, 자신은 흡수되어 소멸되고 궤도전자가 광전자로 생성. 이차적으로 특성X선과 오제전자 발생.
- 광전효과는 전자에 의한 에너지 흡수이므로 감마선 발생 없음.

## ■ 콤프턴산란

전자기 방사선이 원자, 분자의 근처를 지날 때, 광자가 원자의 궤도 전자와 충돌, 전자에 에너지 일부를 주어 전자를 튕기고, 동시에 광자 자신의 에너지는 그 몫만큼 낮아져서 다른 방향으로 산란되는 현상

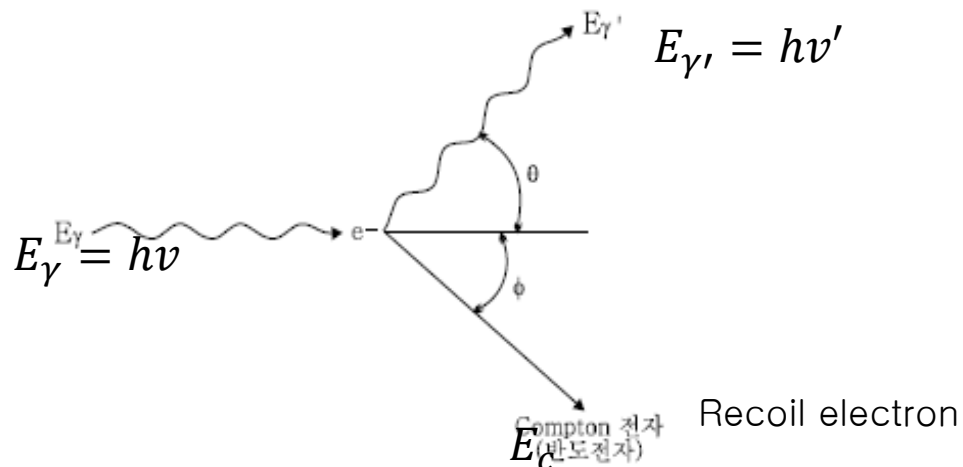
$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}(1 - \cos\theta)}{m_e c^2}}$$

콤프턴효과  $E_{\gamma}(h\nu) \geq m_0 c^2 = 0.51 \text{ MeV}$

즉, 입사광자의 에너지가 0.51MeV이상되면 결합에너지는 무의미해짐 (어느 궤도 전자도 원자핵에 의한 결합에너지 관여없함)

따라서 콤프턴효과는 1개 광자와 1개 궤도전자와의 충돌현상

$$\frac{E_c}{-e} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}(1 - \cos\theta)}{m_e c^2}}$$



$$\frac{E_{c(max)}}{E_{e(max)}} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_{\gamma}}}$$

반도되는 Compton전자의 에너지분포는 에너지가 높을수록 전방산란이 많아짐.

Compton edge는 Compton전자가 갖는 최대 에너지를 뜻함.

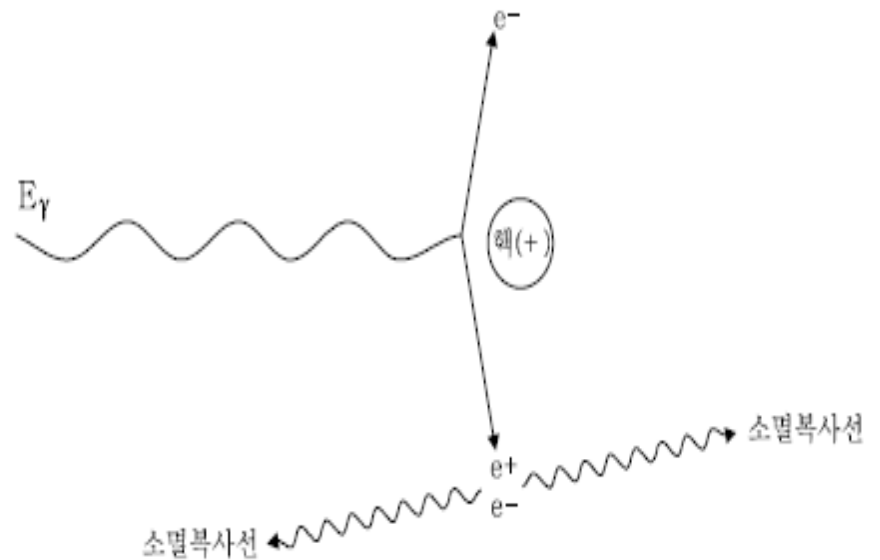
## 톰슨 산란

전자기파가 전자에 충돌할 때, 에너지 손실(흡수)은 없고,  
단순 산란 현상

입사광자 에너지 ( $E_\gamma = h\nu$ ) 가 비교적 낮을 때( $E_\gamma = (m_0c^2)$ ),  
산란광자의 에너지는  $h\nu' = h\nu$

## ■ 전자쌍생성

가. 일정한 에너지 이상을 가진 광자가 핵의 쿨롱 장 부근에서 소멸하여 음양의 한쌍의 전자를 생성하는 현상으로 1.02 MeV이하에서는 발생하지 않는다.



나. 쌍생성에 의해 생성된 음전자와 양전자는 광자의 진행방향과 유사한 방향으로 진행하면서 매질을

을 여기, 전리 및 제동복사를 일으켜 에너지를 상실하게 된다. 이때 양전자는 가진 에너지를 모두 소모하게 되면 주변전자와 결합하여 0.51 MeV의 운동에너지를 가진 2개의 소멸복사선을 발생시킨다. 결과적으로 1개의 높은 에너지를 가진 광자로 인하여 적은 에너지를 가진 2개의 광자가 발생된다.

$$\text{전자쌍의 발생확률 } \sigma_{pair} \propto Z^2(E_\gamma - 1.02), \quad (h\nu \geq 1.02\text{MeV})$$

광자의 에너지가 100MeV이상의 고에너지에선 전자쌍생성만 관측됨.

# 전자기 방사선의 감쇠

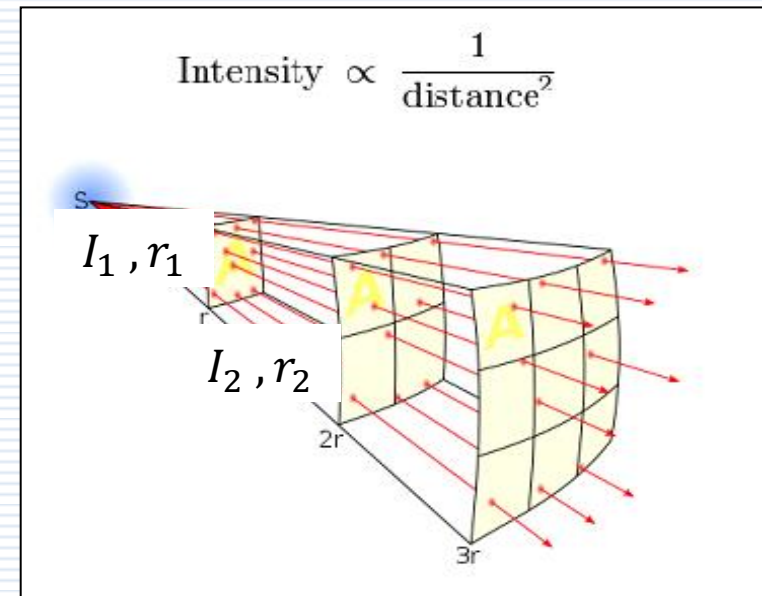
광자가 물질속을 투과할 때, 다음 메커니즘에 의해 세기가 약해짐.

1. 거리에 의한 감쇠 : 역자승 법칙
2. 물질과의 상호작용에 의한 흡수, 산란에 의한 감쇠 : 지수함수 형태

## ✓ 거리에 의한 감쇠

$$I \propto \frac{1}{r^2},$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2, \quad I_2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \cdot I_1$$



# 흡수, 산란에 의한 감쇠

광자의 에너지는 물질의 두께  $x$ 와  $x+dx$  사이에서 감소. 이 속에서 흡수 산란으로 소멸하는 광자수  $dN$ 은 물질속에서 광자수  $N$ 이 많을수록, 두께가 두꺼울수록 많아짐

( $dx$ :흡수 산란물질 두께)

$$-\frac{dN}{dx} = \mu N, \quad -dN = \mu N dx$$

( $\mu$ 는 감쇠계수, 흡수계수),

$\gamma$ 선의 강도  $I$ 는  $N$ 에 비례

$$\therefore -dI = \mu I dx$$

방사성붕괴식과 같은 형식  $N = N_0 e^{-\lambda t}$   
(붕괴는 시간의 함수인 반면,  
감쇠의 경우 두께  $x$ 의 함수로 표시)

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

# 감쇠계수

## 선형감쇠계수( $\mu$ )

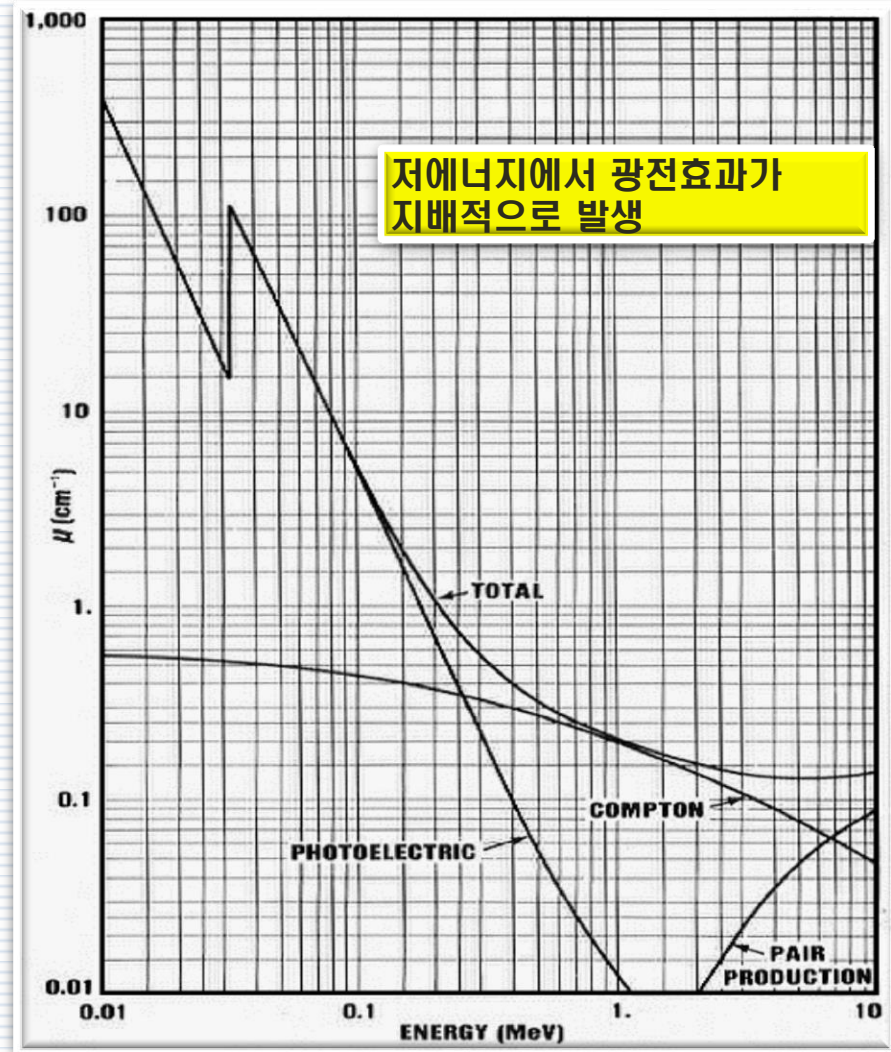
물질 내에서 광자가 단위거리를 이동하는 동안 물질과 상호작용을 일으킬 확률

$$\mu = N\sigma \text{ [cm}^{-1}, \text{m}^{-1}] ,$$

N : (1cm<sup>3</sup>)단위체적당 원자수,  
 $\sigma$  반응단면적

$$\mu = N\sigma_{ph} + ZN\sigma_{cs} + N\sigma_{pp}$$

NaI(Tl) 검출기에서  
감마선의 에너지에 따른 선형감쇠계수





# 질량감쇠계수 ( $\mu_m$ , mass attenuation coefficient)

---

물질의 두께  $x(\text{cm})$  대신 두께 밀도  $\rho x (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$  를 택하면  
⇒ 질량감쇠계수

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}, \quad \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{(\mu_{ph} + \mu_{CS} + \mu_{PP})}{\rho} = \frac{N\sigma}{\rho} = \frac{N_A}{A} \sigma$$

$$\frac{N}{\rho} = \frac{N_A}{A}, \quad \frac{N}{\rho} \approx \frac{N}{W}$$

## ■ 반가층(HVL; Half Value layer)

- 초기에 입사한 방사선의 강도(선량률)가 반으로 줄어드는데 필요한 차폐재의 두께

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu}$$

$$I(t) = I_0 e^{-\mu t}$$

$$I(t) = I_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

## ■ 십가층(TVL; Tenth Value layer)

- 초기에 입사한 방사선의 강도(또는 선량률)가 1/10 줄어드는데 필요한 차폐재의 두께

$$T_{1/10} = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2.303}{\mu}$$

$$I(t) = I_0 e^{-\mu t}$$

$$I(t) = I_0 \left( \frac{1}{10} \right)^{\frac{t}{T_{1/10}}}$$