CHAPTER 3-3

- Interaction of Radiation with Matter

U.C.Lee

Seoul National University
Department of Nuclear Engineering

목 차

- Chapter 3. Interaction of Radiation with Matter
  - Neutron interactions(중성자와의 핵반응 유형)
  - Cross sections(중성자 단면적)
  - Neutron attenuation(중성자 감속)
  - Neutron cross-section data
    - Compound Nucleus Formation
  - Energy loss in scattering collisions
  - Fission
    - Fission Cross Sections
    - Fission Products
    - Fission Neutrons
    - Prompt γ -rays
    - The Energy Released in Fission
  - Resonance absorption (공명 흡수)
  - Leakage of neutrons (중성자 누설)
  - Multiplication factor & Reactor critical (증배계수와 원자로 임계)
  - γ-ray interactions with matter

3.7 Resonance Absorption

➢ Resonance(공명)

❑ 중성자의 에너지와 흡수 단면적

- 1) 높은 에너지의 중성자(속중성자) : 만약 높은 에너지의 중성자가 핵 주위를 지나면 핵 주위의 핵력장에 의하여 조금 굴절되어 감. 중성자가 핵에 가까이 지나갈수록 더 많이 굴절되는데, 충분히 핵에 접근할 때 비로소 흡수되는 것임

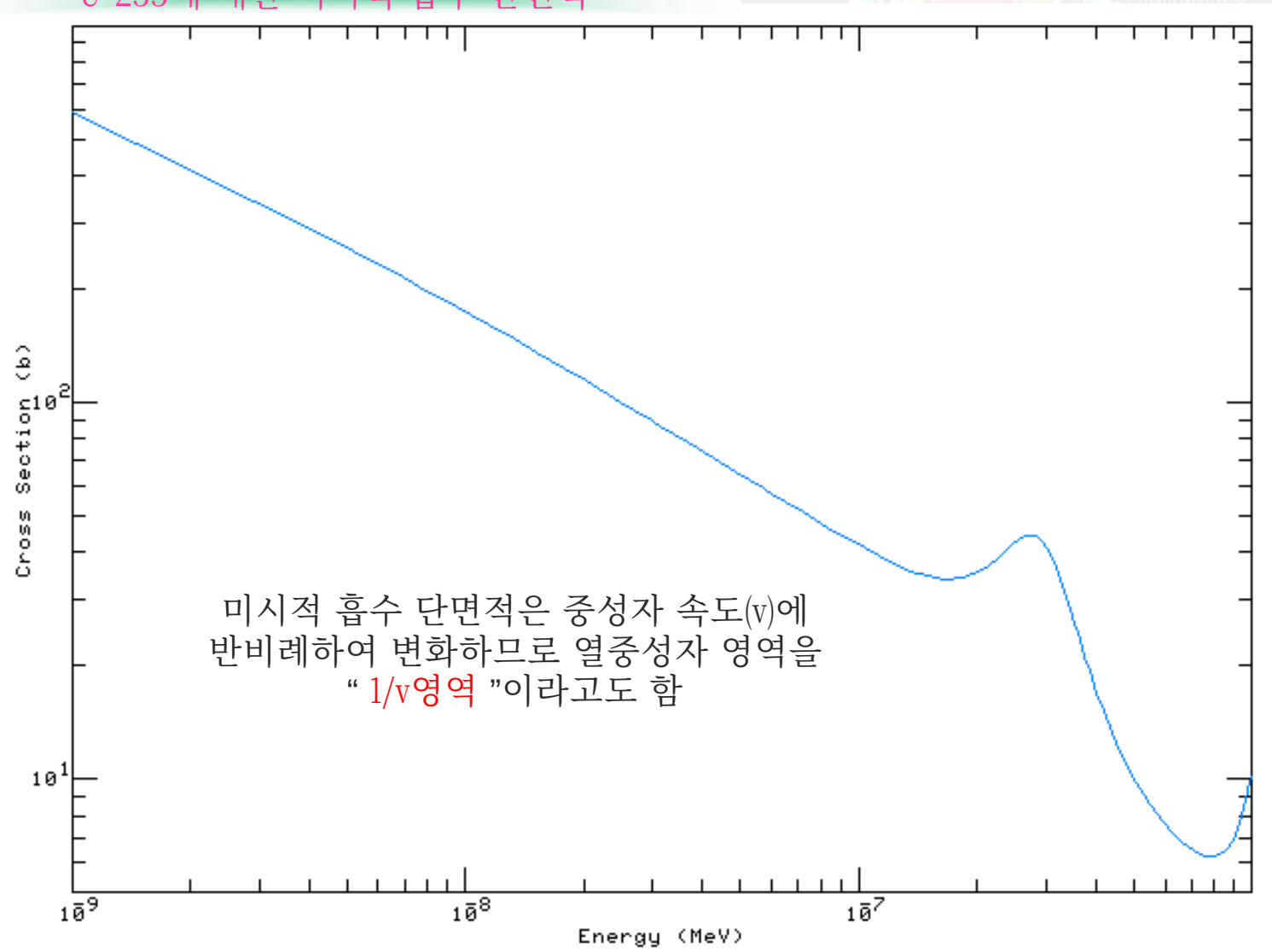
  -> 속중성자에 대하여 비교적 불변적이며 작은 값의 흡수 단면적을 가짐

- 2) 낮은 에너지의 중성자(열중성자) : 핵에서 멀리 지나가더라도 핵력에 의해 끌리게 됨. 중성자가 느리게 움직일수록 핵 주위에서 핵으로 끌어 당겨질 확률이 커짐

  -> 중성자의 에너지가 감소함에 따라 흡수 단면적이 증가함

3.7 Resonance Absorption

U-235에 대한 미시적 흡수 단면적



미시적 흡수 단면적은 중성자 속도(v)에
반비례하여 변화하므로 열중성자 영역을
" 1/v영역 "이라고도 함

Seoul National University
Department of Nuclear Engineering

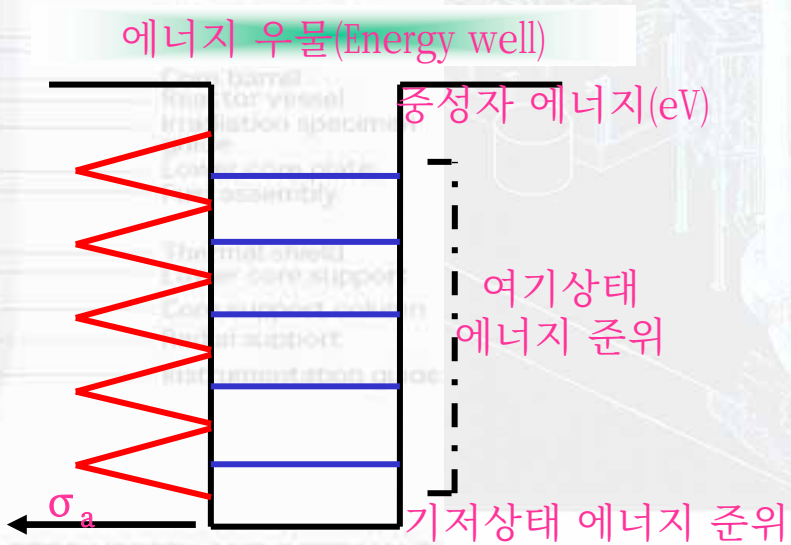
3.7 Resonance Absorption

➢ Resonance(공명) (계속)

- 3) 중간 에너지 영역(Epithermal Region : 열외중성자 영역) : 열외중성자 영역에서는 좀 더 복잡한 모습을 보이는 데 이를 위해 원자 핵의 에너지 상태에 대해 간단히 살펴 보면,
  - 원자가 원자 핵과 그 주위를 도는 전자들로 구성되어 있고 전자들은 그 궤도에 따라 여러 에너지 준위를 갖는다. 마찬가지로 원자핵도 내부에 여러 에너지 준위를 가지는데, 에너지를 흡수하여 기저 상태에서 여기 상태로 전이될 수도 있고 반대로 에너지를 방출하여 여기 상태에서 기저 상태로 떨어질 수도 있다.

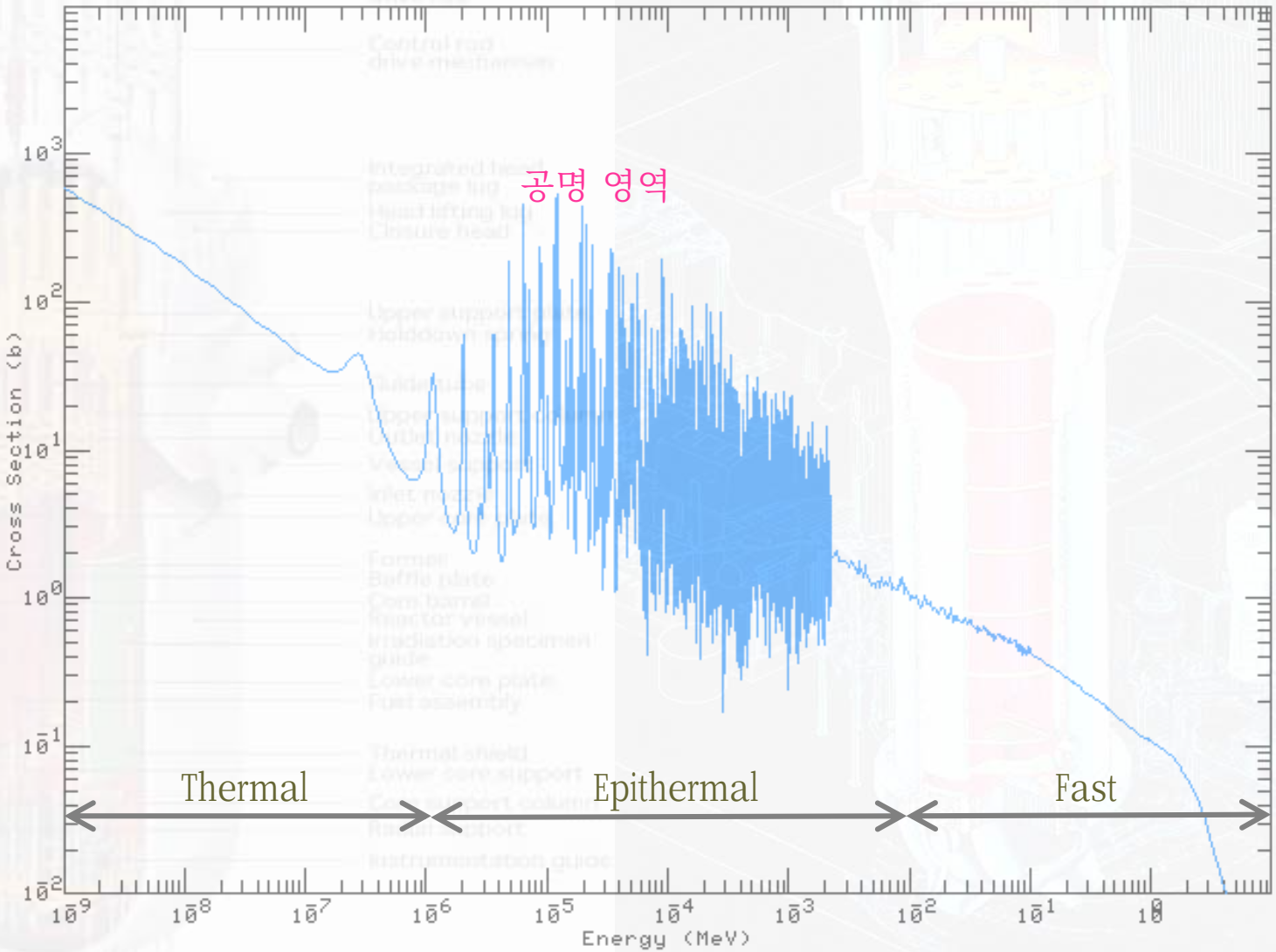
-> 따라서 이런 에너지 준위에 대응하는 중성자가 입사될 때 흡수 확률이 대단히 높아지는데 이 현상을 "공명(Resonance)"이라고 함

-> 공명 현상에 대응하는 중성자가 중간 에너지 영역의 중성자이고 이러한 이유로 그래프의 중간 에너지 영역을 공명 영역이라고 부름



3.7 Resonance Absorption

U-235에 대한 미시적 흡수 단면적



3.7 Resonance Absorption

➢ Resonance Absorption (공명 흡수)

❑ 의미

- 중성자가 감속 도중 공명 영역에서 흡수되는 것

❑ 특징

- 특히 원자로를 구성하고 있는 노물질 중 핵연료로 이용되고 있는 핵연료성 물질(U-238 등)의 공명 영역에서의 흡수단면적이 매우 큼

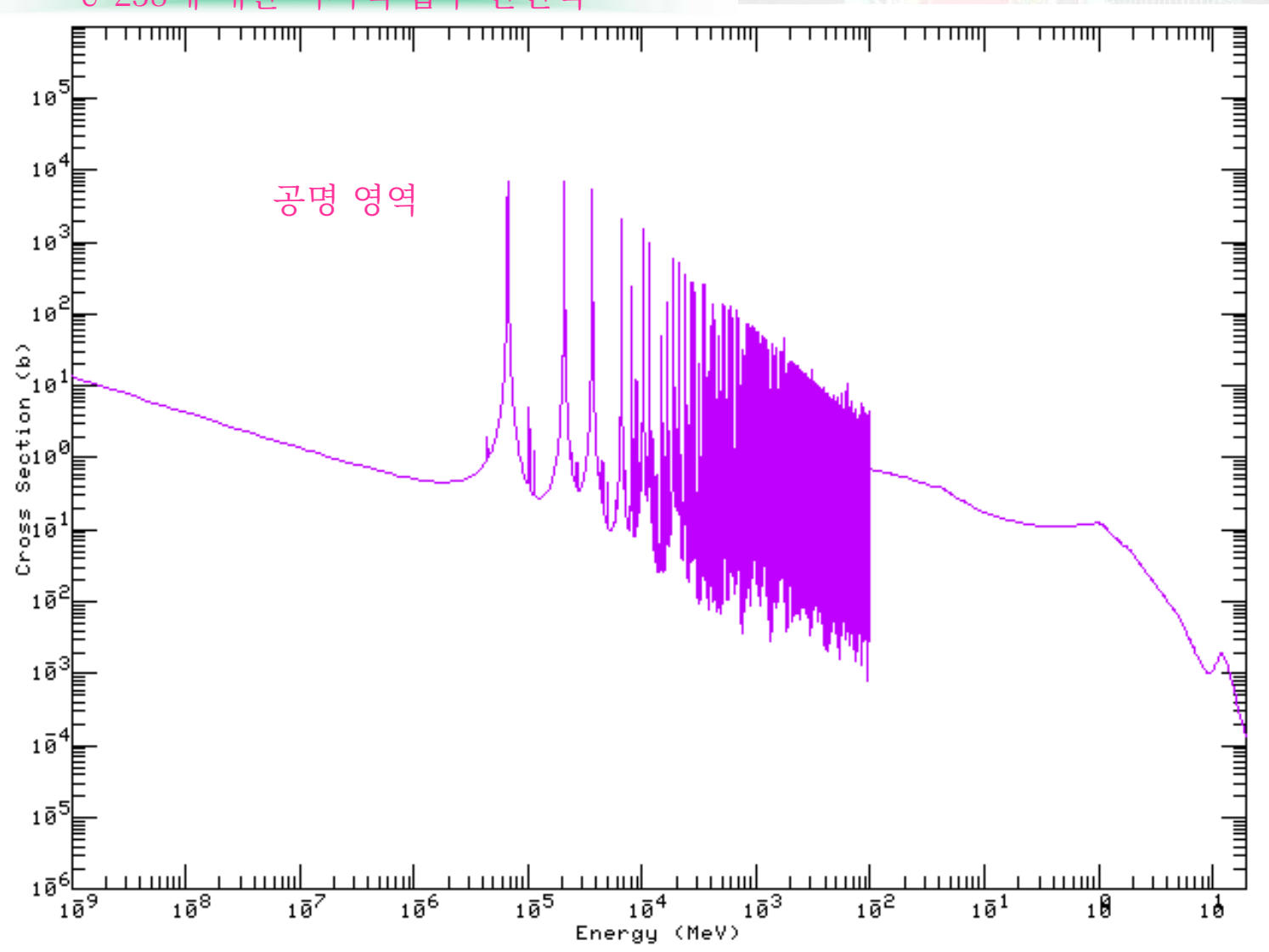
- 공명흡수는 원자로 내에서 핵분열 연쇄반응이 지속될 수 있느냐, 없느냐를 결정하는 주요 핵반응 현상임

  - 극단적으로 말하여 핵분열 시 나온 υ개의 중성자가 감속도중 모두 공명흡수가 되어 버리면 핵분열 연쇄반응을 기대하기 어려움

  - 다시 말하면 핵분열 연쇄반응을 지속하기 위해서는 감속 도중 공명흡수로 잃게 되는 중성자의 개수를 줄일 필요가 있음

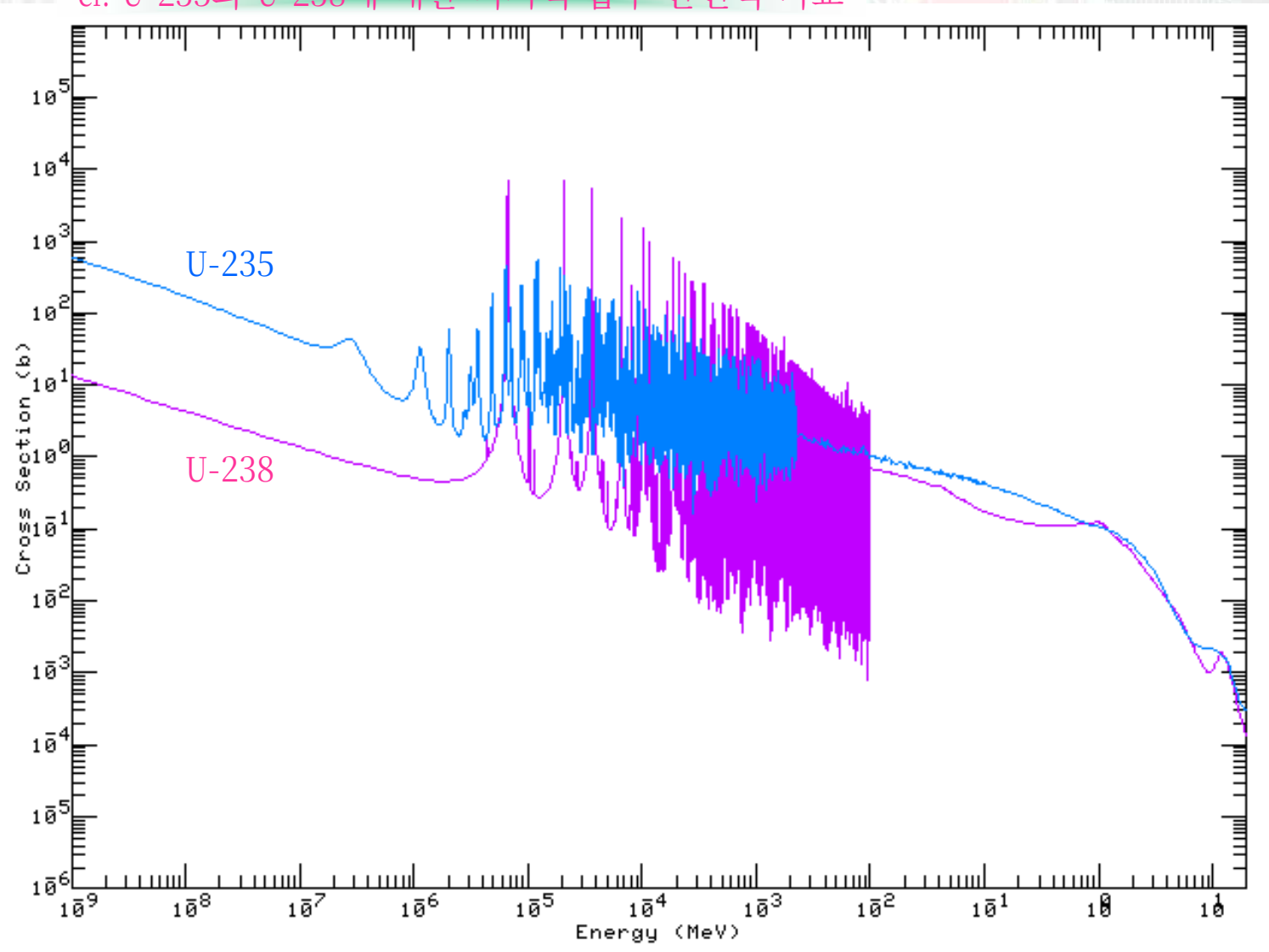
3.7 Resonance Absorption

U-238에 대한 미시적 흡수 단면적



3.7 Resonance Absorption

cf. U-235와 U-238에 대한 미시적 흡수 단면적 비교



3.8 Leakage of Neutrons

➢ 중성자 누설 (Leakage of Neutrons)

❑ 정의

- 중성자 누설은 중성자가 원자로의 표면을 통해 원자로 밖으로 새어나가는 현상

❑ 특징

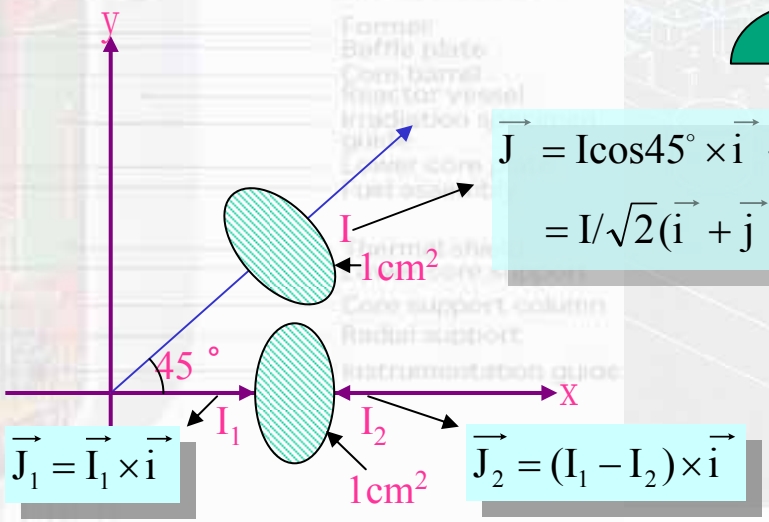
- 중성자 누설이 과도하게 많아지면 원자로는 핵분열 연쇄반응을 지속하기 어려움

❑ 계산 방법

- 중성자류($\vec{J}$)란 양에 의해서 정의

$\vec{J}$ = 어떤 방향에 수직으로 놓여있는 단위면적을 단위시간당 지나가는 총 중성자수

- Ex) 다음과 같은 경우를 가정하자. 이때 각각의 중성자류는 다음과 같음.



cf. I 는 초당 지나가는 중성자 수

$$\vec{J} = I\cos 45^\circ \times \vec{i} + I\sin 45^\circ \times \vec{j}$$
$$= I/\sqrt{2}(\vec{i} + \vec{j})$$

3.8 Leakage of Neutrons

- 어떤 면적 dS를 단위시간당 지나가는 총 중성자 수

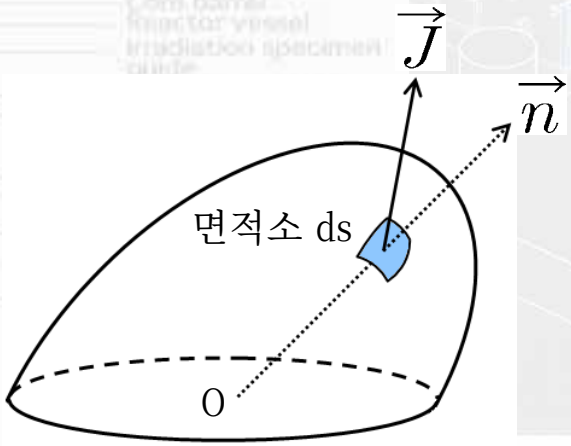
-> 중성자류 $\vec{J}$ 와 면적을 나타내는 벡터와의 내적으로 나타낼 수 있음

-> 일반적으로 공간에 놓인 어떤 면적은 그 면적에 수직인 단위 벡터 $\vec{n}$ 을 dS에 곱하여 $dS\cdot\vec{n}$ 으로 나타내는데 $\vec{J}\cdot dS\cdot\vec{n}$ 은,

$$\vec{J}\cdot dS\cdot\vec{n} = \text{dS면을 단위시간당 지나가는 총 중성자수}$$

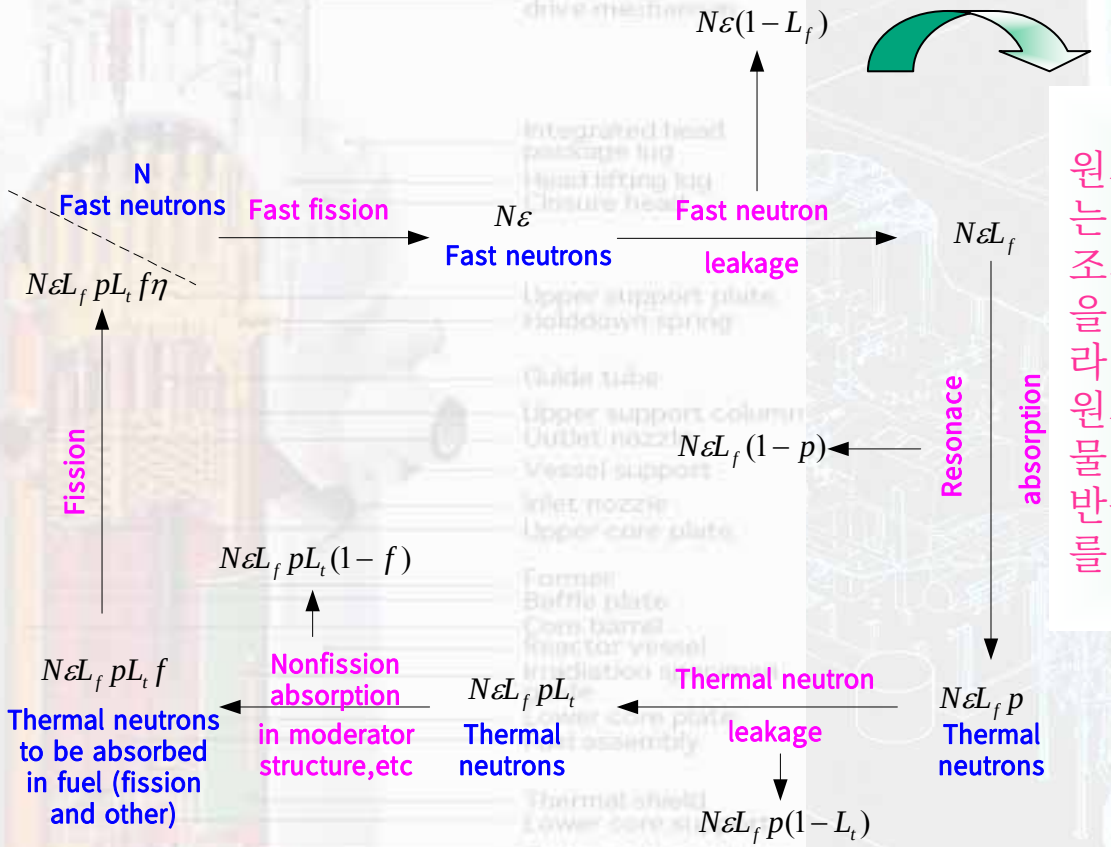
- 따라서 원자로 표면을 아래 그림과 같이 dS와 같은 면적소로 나누고 각 면적소를 지나가는 중성자수를 합하게 되면 원자로 표면을 단위 시간당 새어나가는 중성자수를 얻게 됨
- 결과적으로,

$$\int_S \vec{J}\cdot dS\cdot\vec{n} = \text{단위시간당 원자로 표면을 새어나가는 총 중성자수}$$



3.9 Multiplication factor & Reactor critical

➢ 원자로 노심 내 중성자 싸이클



원자로내에서 핵분열로 생성된 중성자는 원자로 물질(감속재, 핵연료, 기타 구조재) 에 흡수되거나 원자로심의 경계면을 통해 누설되어 마침내 원자로에서 사라지게 된다.
원자로 물질에 흡수된 중성자 중 핵연료 물질에 흡수된 일부의 중성자는 핵분열 반응을 일으키고, 그 결과 새로운 중성자를 탄생시킨다.

3.9 Multiplication factor & Reactor critical

➢ 원자로 노심 내 중성자 싸이클 (각 변수 정리 및 설명)

❑ 중성자 싸이클의 정량적 기술

- 중성자가 없어지고 새 중성자가 태어나는 과정을 열중성자로를 예로 삼아 정량적으로 기술하면 다음과 같음

- 먼저 핵분열에 의해 태어난 N개의 속중성자 있었다고 하면 이 속중성자는 1MeV이상 구간에서 속핵분열 반응을 일으킬 수 있으며 속핵분열의 결과 생겨나는 중성자는 다음과 같이 정의되는 속핵분열자 ε에 의해 정해짐

$$\varepsilon = \frac{\text{열핵분열 의해 생겨난 중성자 수} + \text{속핵분열에 의해 생겨난 중성자 수}}{\text{열핵분열에 의해 생겨난 중성자 수}}$$

- 따라서 초기 N개의 속중성자는 속핵분열 반응으로 εN개로 불어나며 이들은 열중성자로 감속되어 감

- 열중성자로 감속도중 속중성자의 일부는 원자로 밖으로 누설되며, 그 일부는 1eV~수백 KeV에 걸치는 에너지 영역에서 공명흡수되기 때문에 원자로 밖으로 누설되지 않고 또 공명흡수되지 않은 중성자만이 열중성자가 됨
- 그러므로 속중성자의 비누설확률과 공명흡수도피확률은 각각

L_f = 속중성자가 원자로 밖으로 새어나가지 않을 확률

p = 속중성자가 공명흡수를 피하고 무사히 열 중성자가 될 확률

3.9 Multiplication factor & Reactor critical

➢ 원자로 노심 내 중성자 싸이클 (각 변수 정리 및 설명) (계속)

- 열핵분열과 속핵분열에서 생긴 εN개의 중성자 중 $\varepsilon L_f N$ 개의 속 중성자는 원자로 밖으로 새어나가지 않은 채 감속하게 되고 이들 중 $\varepsilon L_f p N$ 개의 중성자는 공명흡수를 피하고 열중성자가 되게 됨.
- 열중성자 또한 그 일부는 원자로 밖으로 새어나가는데 열중성자의 비누설확률 L_t는,

$$L_t = \text{열중성자가 원자로 밖으로 새어나가지 않을 확률}$$

- 위와 같이 정의 되며, $\varepsilon L_f p L_t N$ 개가 열중성자로 남게 됨

- 이들 중성자는 원자로 물질(즉 핵연료, 감속재, 구조재 등)에 모두 흡수되어 버리는데 이 중 핵연료에 흡수되는 수는 열중성자이용확률 f 를,

$$f = \frac{\text{핵연료 물질에 흡수되는 열중성자 수}}{\text{원자로 물질에 흡수되는 총 열중성자 수}}$$

- 위와 같이 정의하면 $\varepsilon L_f p L_t f N$ 임

3.9 Multiplication factor & Reactor critical

➢ 원자로 노심 내 중성자 싸이클 (각 변수 정리 및 설명) (계속)

- 핵연료에 흡수된 열중성자는 핵분열 반응을 일으켜 새로운 중성자를 탄생시키는데 이는 중성자 재생인자 η 를

η = 핵연료에 하나의 중성자가 흡수될 때마다 핵분열에 의해 새로이 생성되는 중성자 수

- 위와 같이 정의하면 $\varepsilon L_f p L_t f \eta N$ 개의 새로운 속중성자가 열핵분열에 의해 탄생하게 됨
- 그리고 이들 속중성자가 다시 속핵분열에 참여하게 되면서 중성자 싸이클을 완성하게 됨

- 요약하면,
- 열핵분열의 결과로서 초기에 N개의 속중성자는 누설이나 흡수반응을 통해 종국에는 원자로에서 사라짐
- 그러나 이들 중 일부는 핵연료에 흡수되어 새 세대의 속중성자를 $\varepsilon L_f p L_t f \eta N$ 개 만큼 탄생시키게 됨

3.9 Multiplication factor & Reactor critical

➢ Multiplication factor (증배계수)

❑ 정의

- 증배계수는 핵분열 반응에 의해 새로이 탄생되는 새 세대의 중성자수와 흡수나 누설에 의해 원자로내에서 사라지는 바로 전 세대 중성자수의 비를 말함

$$k = \frac{\text{다음 세대의 중성자수}}{\text{어느 세대의 중성자수}}$$

- 증배계수가 1보다 크면 원자로내 중성자수는 세대가 지나면서, 즉 시간이 가면서 증가하며 반대로 증배계수가 1보다 작으면 중성자수는 시간이 가면서 감소함
- 따라서 증배계수(k)는 앞의 중성자 싸이클에서의 변수의 정의에 따라 다음과 같이 계산될 수 있음

$$k = \eta \cdot f \cdot \varepsilon \cdot p \cdot L_f \cdot L_t$$

❑ 무한증배계수 (k_∞)

- 증배계수가 무한대 크기의 이론적 원자로에 쓰일 경우, 즉 이 경우 누설이 없기 때문에 $L_t=1$, $L_f=1$ 임으로 증배계수는,

$$k_\infty = \eta \cdot f \cdot \varepsilon \cdot p$$

- 가 되며 이를 4인자 공식이라고 부름

3.9 Multiplication factor & Reactor critical

➢ Multiplication factor (증배계수) (계속)

❑ 유효증배 계수(k_{eff})

- 실제로 모든 원자로에서는 어느 정도 누설이 있으므로 무한증배계수에 누설을 결합하여 다음과 같이 유효증배계수를 정의함

$$k_{eff} = \eta \cdot f \cdot \varepsilon \cdot p \cdot L_f \cdot L_t$$

❑ 잉여증배계수 (k_{ex})

- 유효증배계수가 "임계로부터 얼마나 떨어져 있는가"하는 정도를 나타냄

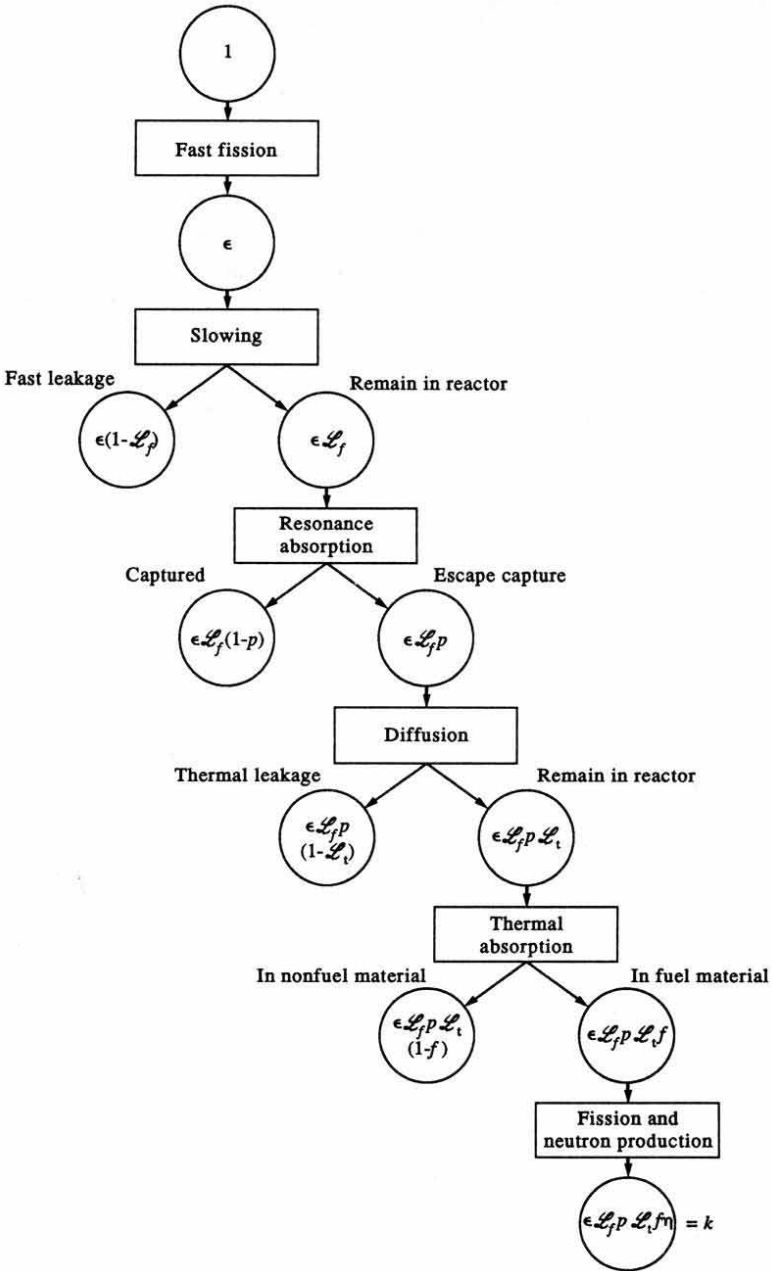
$$k_{ex} = k_{eff} - 1$$

➢ Reactor critical (원자로 임계)

❑ 또한 원자로 상태는 k의 값에 따라 다음과 같이 정의됨

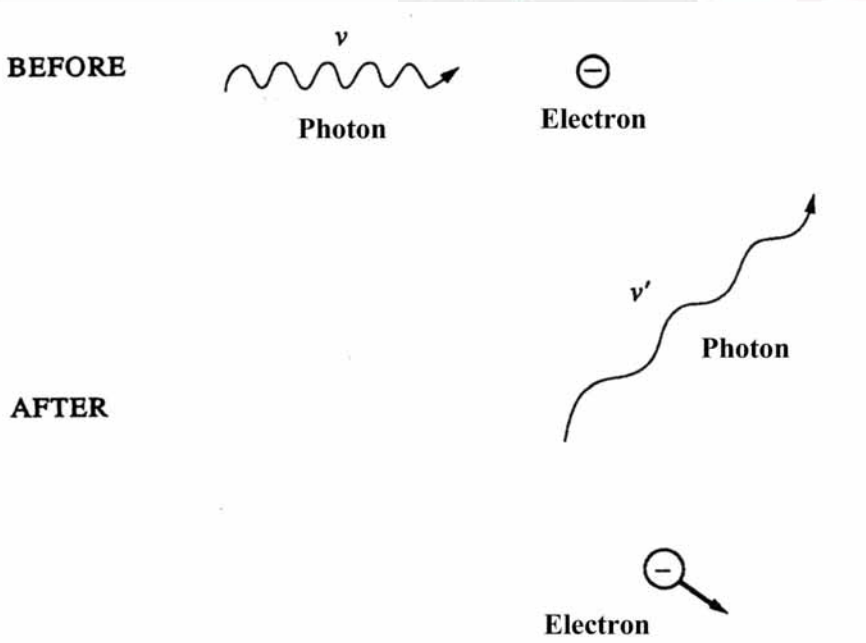
- k>1이면 초임계 상태
  - 초임계 상태는 노내 중성자가 시간에 따라 증가하고 있는 상태를 말함
  - 중성자 수의 증가는 핵분열 반응의 수의 증가를 뜻하며 이는 또한 원자로 열출력의 증가를 의미함
- k=1이면 임계 상태
  - 임계상태 원자로는 열출력이 일정한 값을 유지하게 됨
- k<1이면 미임계 상태
  - 노내 중성자가 시간에 따라 감소하고 있는 상태를 말함

3.9 Multiplication factor & Reactor critical



3.10 γ-ray interaction with matter

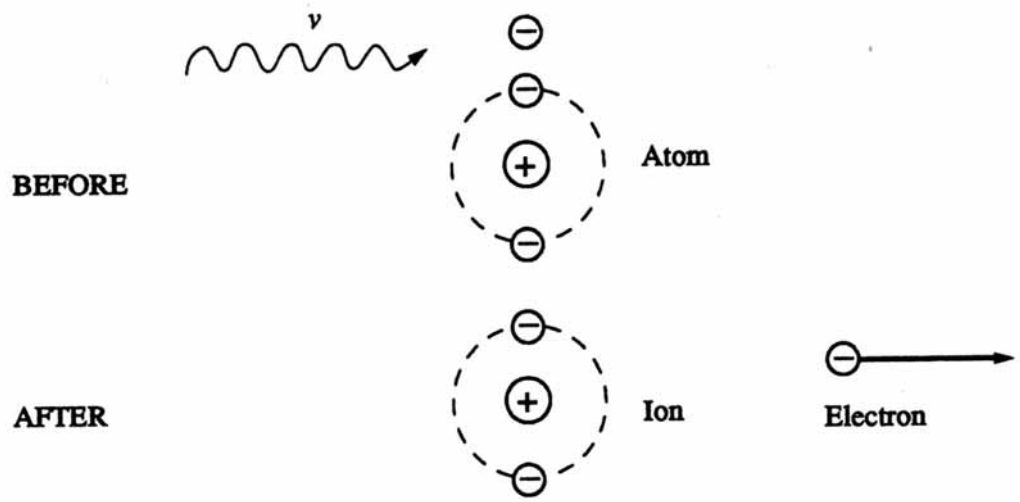
- **Photo-Electron Scattering (Compton effect)**
  - γ선을 물질에 조사해 산란시킬 때, γ선이 물질의 전자와 반응하면, γ선의 에너지 중 일부가 전자로 전달된다. 에너지를 잃은 γ선은 파장이 길어지며, 에너지를 얻은 전자는 물질로부터 떨어져 나가 자유전자가 된다.



Photon electron scattering (Compton effect).

3.10 γ-ray interaction with matter

- **Photoelectric effect**
  - γ선을 물질에 조사해, 전자가 이 에너지를 흡수하는 경우, 원자 내부의 포텐셜을 극복하고, 원자로부터 떨어져 나가는 현상. 이때, 전자는 γ선의 에너지에서 포텐셜 에너지를 뺀 만큼의 운동에너지를 가진다.

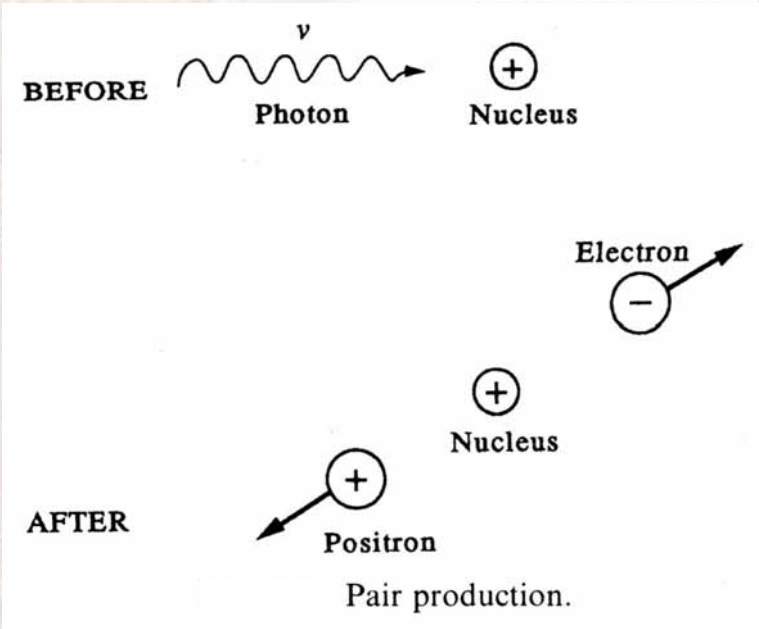


Photoelectric effect.

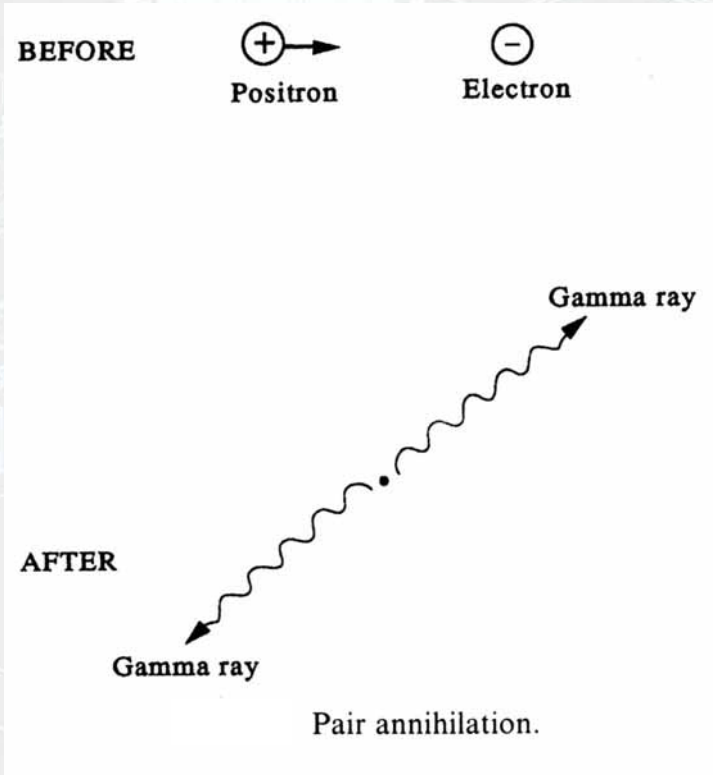
3.10 γ-ray interaction with matter

➢ Pair Production

- ❑ γ선을 물질에 조사했을 때, 물질의 핵 주변에서 electron과 positron 이 생성되는 현상. 이 때, γ선의 에너지는 최소한 1.02 MeV 이상이어야 하며, 이와 반대로 electron과 positron 이 만나 소멸하는 경우에는, 질량이 에너지로 전환되어 γ선이 발생한다.



Pair production.



Pair annihilation.