

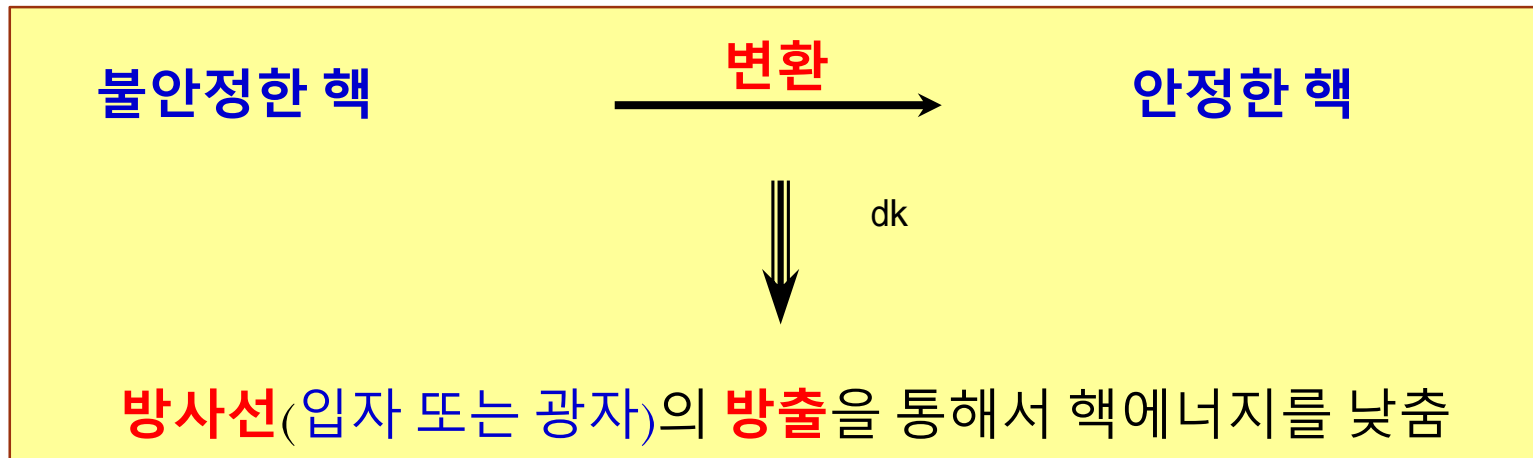
# 핵변환

## (Nuclear Transformations)

Reading Assignment : Ch. 2.1~2.5, 2.7~2.8

# 1. 방사능

1) \_\_\_\_\_ (Radioactivity) : 1896년 베크렐(Becquerel)에 의해서 처음으로 발견됨

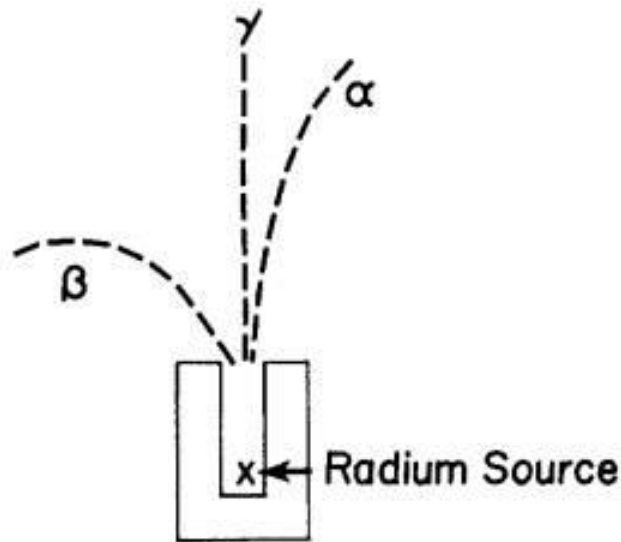


2) 방사선 (Radiation): \_\_\_\_\_ (예, 입자선 또는 광자선)

4) 주요방출입자: \_\_\_\_\_

5) 예시

그림 2.1 → 자기장의 영향 하에서 분리된 라듐에 의하여 방출되는 세 종류의 방사선



**FIG. 2.1.** Diagrammatic representation of the separation of three types of radiation emitted by radium under the influence of magnetic field (applied perpendicular to the plane of the paper).

## 6) 용어

- ① 불안정한 핵종: \_\_\_\_\_(parent)
- ② 부모핵종의 붕괴로 나타난 안정적 핵종: \_\_\_\_\_(daughter)
- ③ 대부분의 경우, 딸핵종도 추가 붕괴할 수 있음

## 7) 방사성 붕괴

- ① \_\_\_\_\_(Transition energy (Q)) 라고 불리는 핵 에너지 방출
- ② 방출된 에너지의 형태:
  - ✓ **광자에너지**
  - ✓ 입자와 recoiling nucleus 의 **운동에너지**

8) 방출된 에너지의 근원 : \_\_\_\_\_가 ( $E = mc^2$ ) (Mass-energy conversion principle)

9) 방사성 핵종의 특징

- ① 붕괴모드: 알파붕괴(alpha decay), 베타붕괴 (beta decay) 등
- ② 방출입자: 알파, 베타, 감마, 양성자, 중성미자 등
- ③ 전이에너지 (Transition energy)가 있음
- ④ 평균수명이 있음

## 2. 붕괴상수 (decay constant)

1) \_\_\_\_\_ ( $\Delta N/\Delta t$ )는 주어진 어떤 시간에 존재하는 방사성핵종의 수(N)에 \_\_\_\_\_함

$$\text{붕괴수 : } \Delta N \implies N(t_1) - N(t_2)$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{N(t_1) - N(t_2)}{t_2 - t_1} \propto N$$

$$\frac{N(t_1) - N(t_2)}{t_2 - t_1} = \lambda N$$

$$\frac{N(t_2) - N(t_1)}{t_2 - t_1} = -\lambda N$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad = (1/N) (N / t)$$

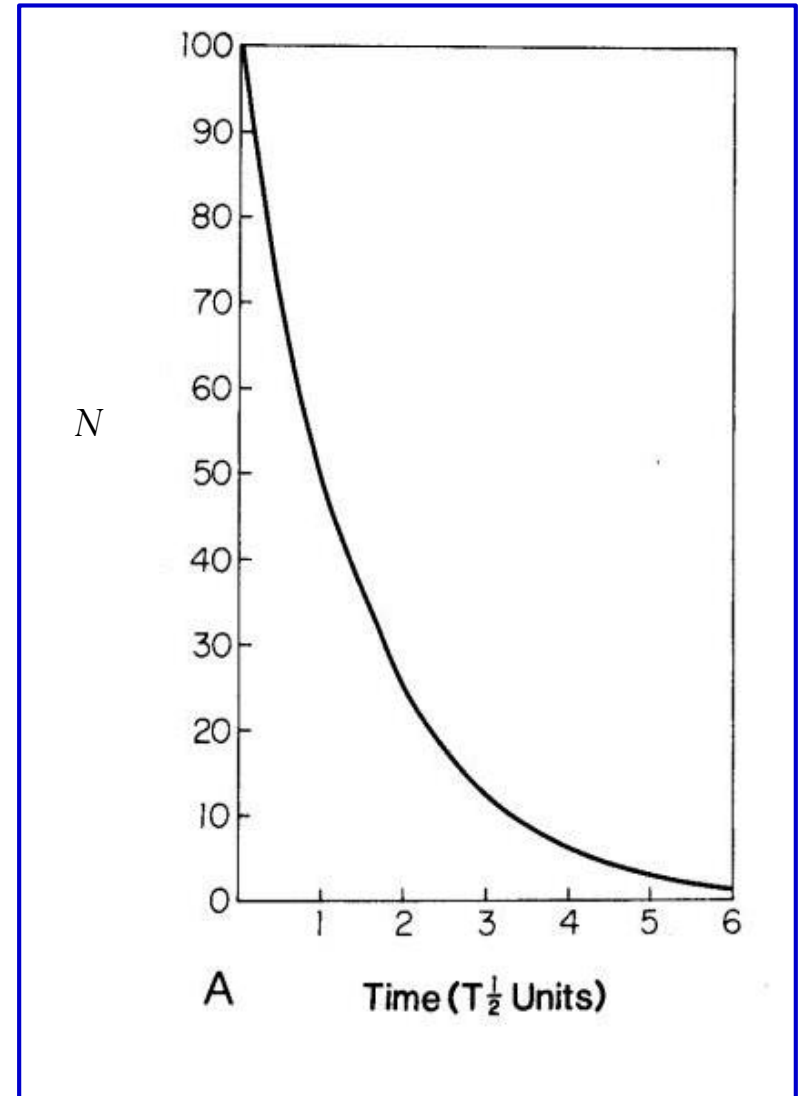
$$\int \frac{dN}{N} = \int -\lambda dt \implies N = N_0 e^{-\lambda t}$$

2)  $\lambda$  : \_\_\_\_\_ (decay constant)로 알려진  
비례상수이며 **시간의 역수를 단위**로 함

3)  $\lambda$  : 단위시간당 붕괴할 \_\_\_\_\_ (Probability)

$$= (1/N) ( \Delta N / \Delta t )$$

4) **음의 부호**: 남아있는 **방사성핵종의 개수**가  
\_\_\_\_\_을 의미함



### 3. 방사능

1) 방사성물질의 **붕괴율**(rate of decay)을 \_\_\_\_\_이라 하고 **A**로 표시함

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{N(t_1) - N(t_2)}{t_2 - t_1} = \lambda N = A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

2) 1 Bq (**벵크렐**) = 1 붕괴/초 = 1dps t=0 -> A\_0=

3) 1 Ci (**큐리, Radium-226 1그램의 초당 붕괴수**) =  $3.7 \times 10^{10}$  (dps)

4)  $1\text{Bq} = 2.70 \times 10^{-11} \text{ Ci}$

✓ 1 Ci = 37 GBq

✓ 1  $\mu\text{Ci}$  = 37 kBq

✓ 1 nCi = 37 Bq



## 4. 반감기와 평균수명

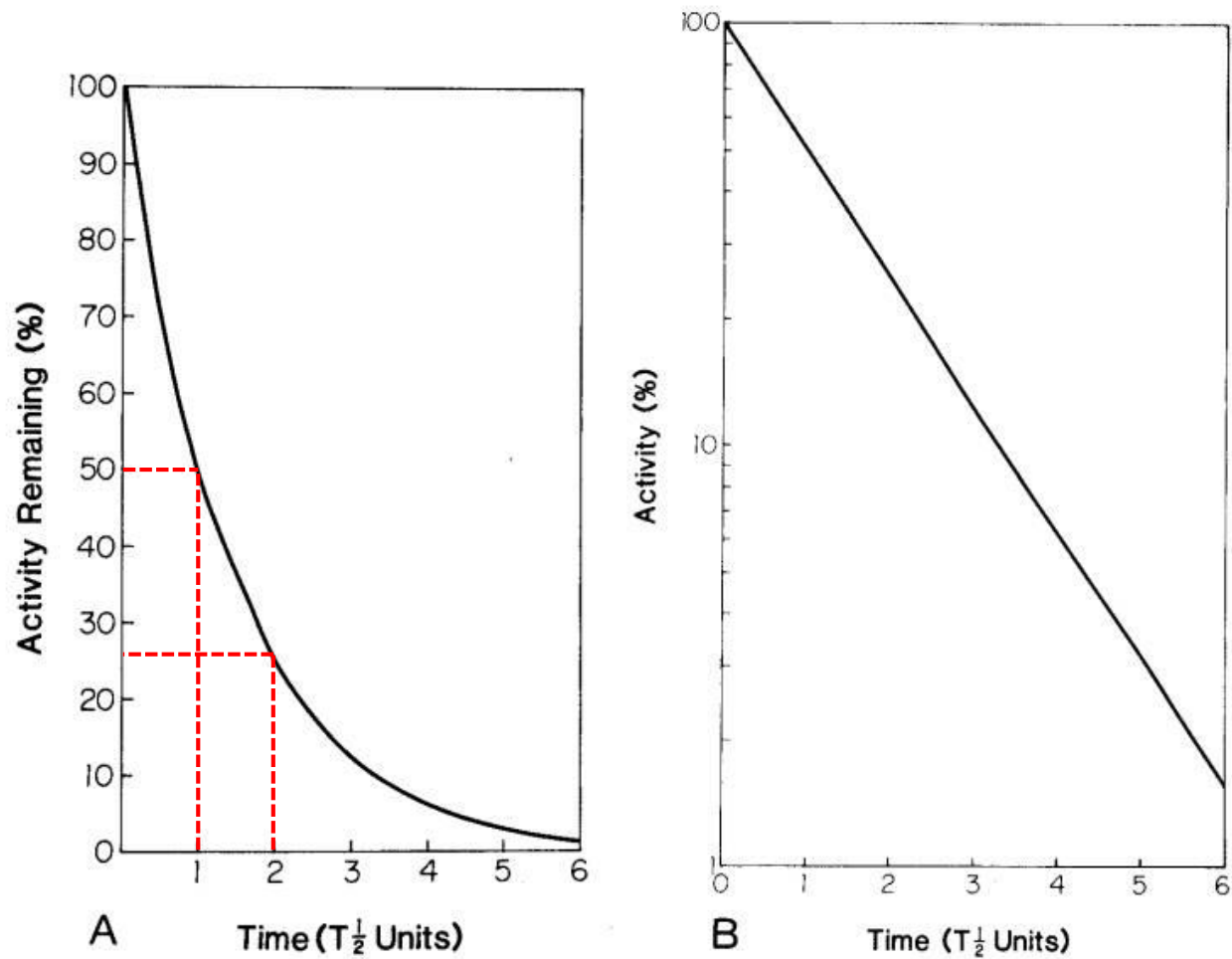
- 1) \_\_\_\_\_ (Half life,  $T_{1/2}$ ) : 방사능 또는 방사성핵종의 수가 초기값의 절반이 되는 데 걸리는 시간

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N = \frac{1}{2} N_0 \quad \Rightarrow \quad t_{1/2} = ?$$

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \quad \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$



**FIG. 2.2.** General decay curve. Activity as a percentage of initial activity plotted against time in units of half-life. **A**, plot on linear graph; **B**, plot on semilogarithmic graph.

2) \_\_\_\_\_:방사성핵종붕괴의 평균 기대수명

① **가상적인 개념임**

② 가정 1: 방사성핵종의 붕괴율이 시간에 상관없이 항상 초기 붕괴율과 같다

③ 가정 2: 총 붕괴횟수는 방사성핵종의 초기 숫자와 같다

평균수명  $\times$  초기 방사능 = 방사능핵종총갯수

$$T_a \lambda N_0 = N_0$$

$$T_a = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0.693} = 1.44T_{1/2}$$

3) ○○○○  
\_\_\_\_\_

① 정의: 방사성핵종의 **단위질량당 방사능**

② 높은 specific activity 가 치료에 요구되는 경우가 있음

# 5. 방사성계열

- 1) 원자 번호가 82 (납) 이상인 경우 방사성원소임
- 2) 자연적으로 발생하는 모든 방사성원소는 3개의 그룹으로 나누어져 있음
- 3) 우라늄계열, 악티늄계열 (actinium series), 토륨계열 (thorium series)

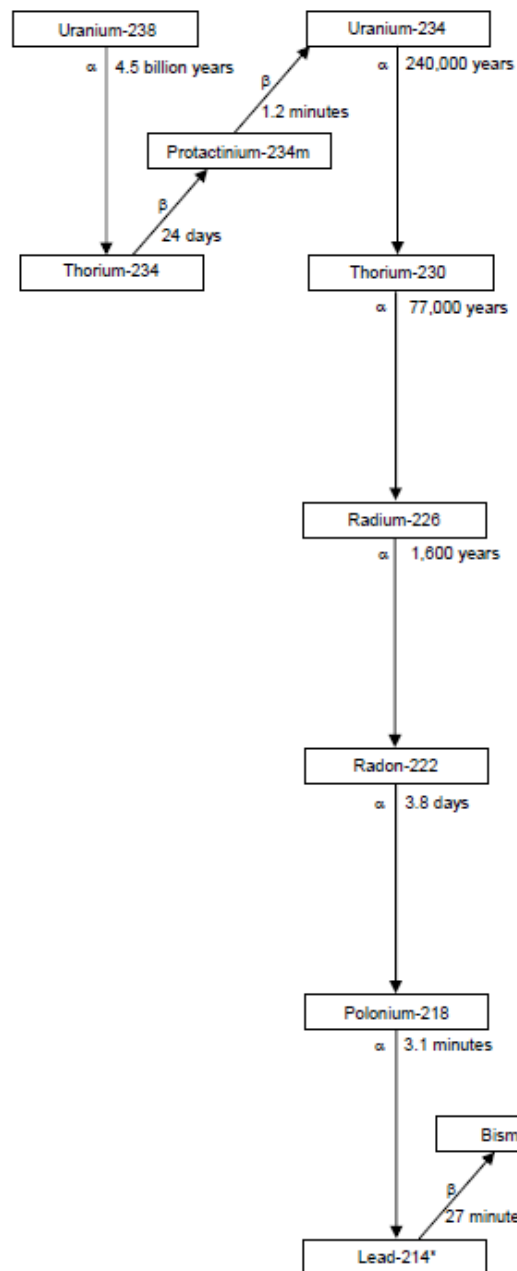
$^{238}\text{U} \rightarrow \dots \rightarrow ^{206}\text{Pb}$        $4n+2$  series (Uranium Series)

$^{235}\text{U} \rightarrow \dots \rightarrow ^{207}\text{Pb}$        $4n+3$  series (Actinium Series)

$^{232}\text{Th} \rightarrow \dots \rightarrow ^{208}\text{Pb}$        $4n$  series (Thorium Series)

- 4) 자연계에는 3개의 계열만 존재하며  $4n+1$  계열은 아직 발견되지 않음

## Uranium Series



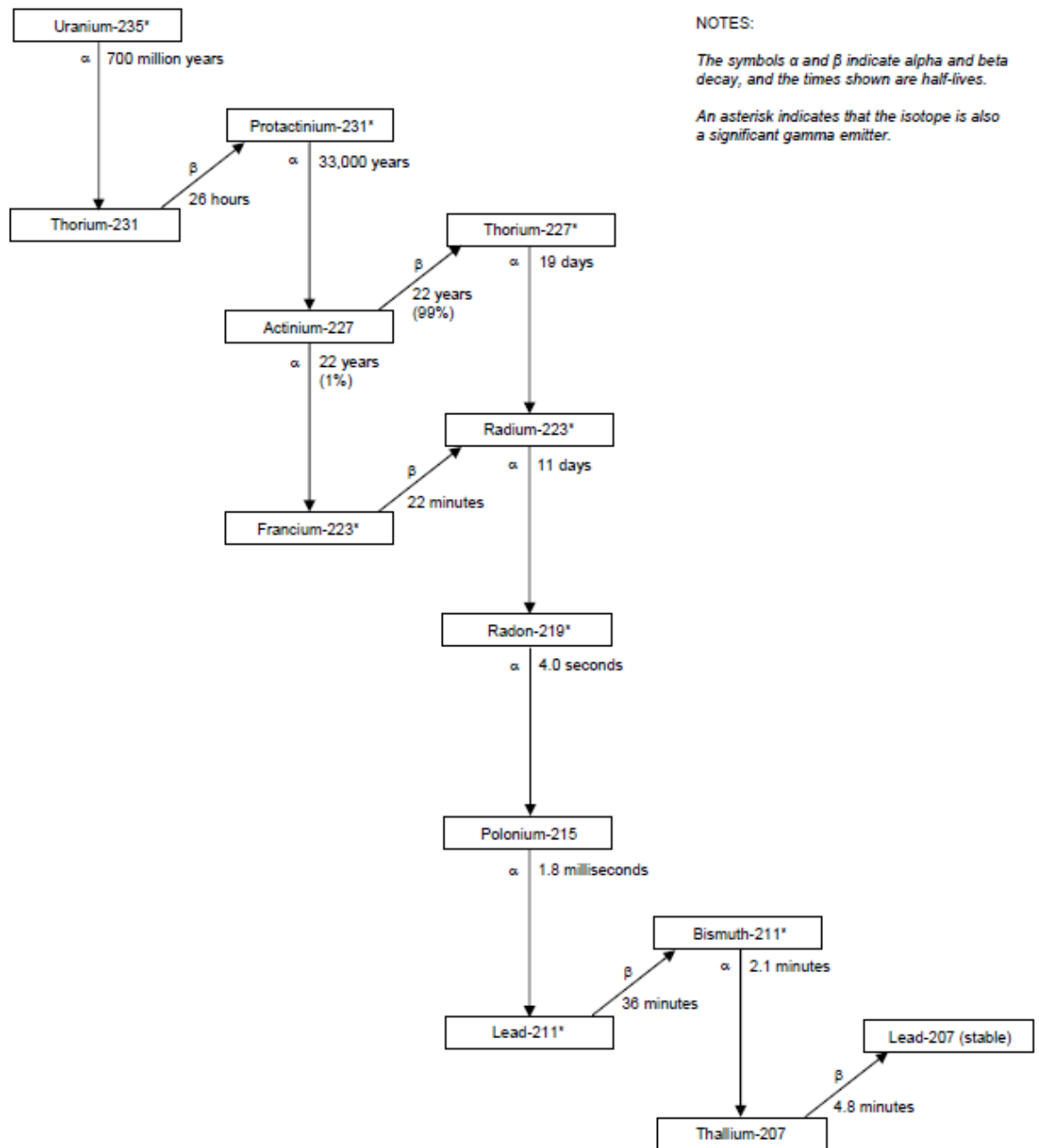
### NOTES:

The symbols  $\alpha$  and  $\beta$  indicate alpha and beta decay, and the times shown are half-lives.

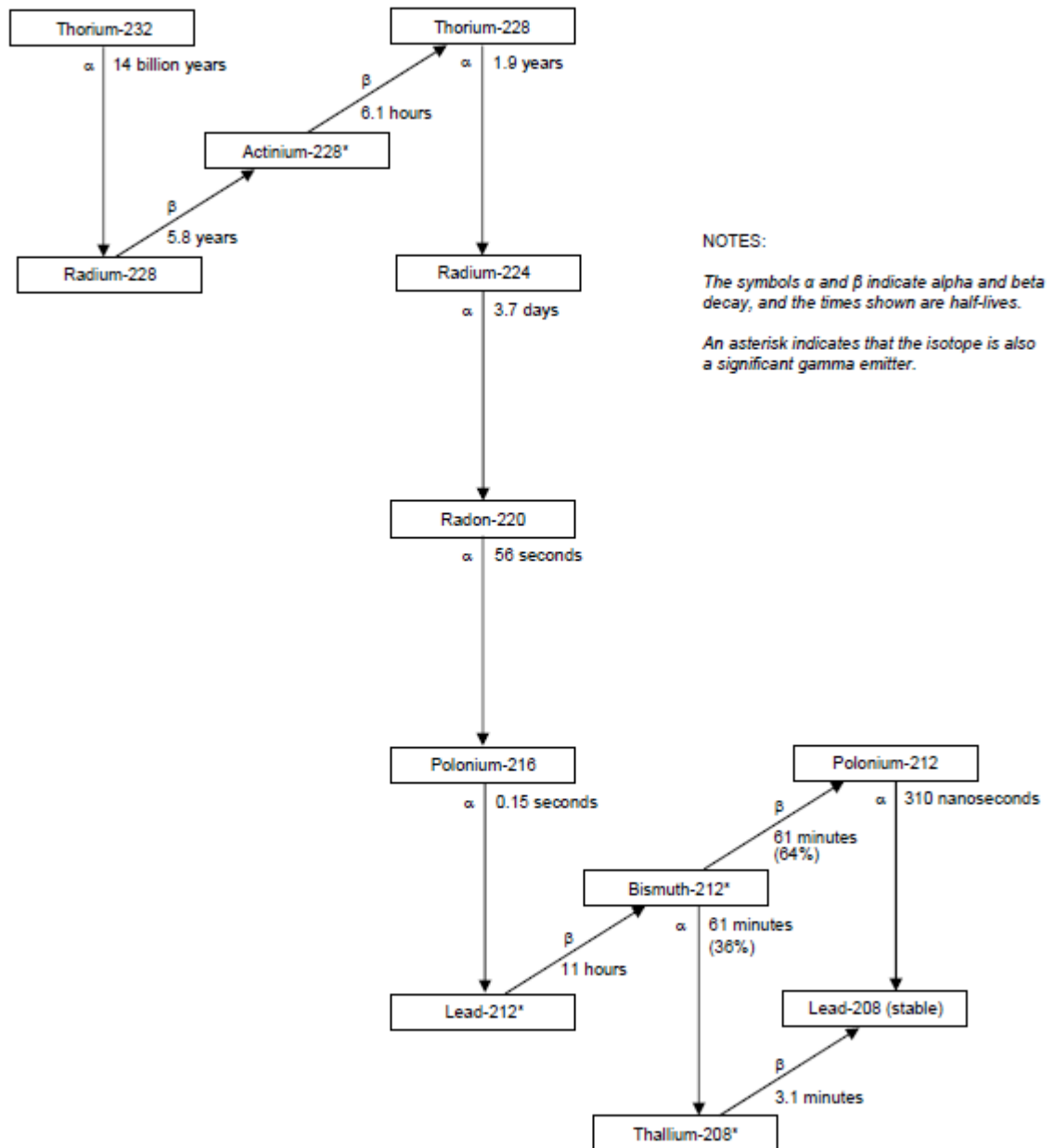
An asterisk indicates that the isotope is also a significant gamma emitter.

Uranium-238 also decays by spontaneous fission.

## Actinium Series



## Thorium Series



## 6. 방사성붕괴 방식

1) 방사성핵종의 붕괴는 \_\_\_\_\_(Excess energy)에 의한 현상임

2) 방사성붕괴방식의 예시

- ① 알파입자붕괴 ( $\alpha$ -Particle decay)
- ② 베타입자붕괴 ( $\beta$ -Particle decay)
- ③ 전자포획 (Electron capture)
- ④ 내부전환 (Internal conversion)
- ⑤ 감마선방출 ( $\gamma$ -Emission)



# A. 알파입자붕괴 ( $\alpha$ -particle decay)

- 1) **원자번호** 82 이상의 방사성핵종에서 많이 발생하며 **알파입자 방출**을 동반함
- 2) 주된 원인은 원자번호가 커질 경우 **핵내에 많은 양성자**가 존재하게 되고 이로 인해서 핵내        (Coulomb force)에 의한 **반발력**이 커지기 때문임
- 3) 알파입자붕괴의 결과물
  - ① **원자번호**가 2 감소함
  - ② **질량번호**가 4 감소함

Alpha Particle Radiation

The diagram illustrates the process of alpha particle radiation. A central nucleus, labeled 'Parent Nucleus U-235', is shown as a cluster of black and white spheres. Two arrows originate from it: one points to a smaller nucleus labeled 'Daughter Nucleus Th-231', and the other points to a small cluster of four spheres labeled 'Alpha Particle (Helium Nucleus)'. Above the diagram is a yellow radiation warning symbol. Below the diagram, the general equation for alpha decay is given: 
$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$$
 followed by a specific example: 
$${}^{226}_{88} \text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86} \text{Rn} + {}^4_2 \text{He}$$

알파입자붕괴의 일반식:  ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4He + Q$

$Q$ : 붕괴에너지

E.g.)  ${}_{88}^{226}Ra \rightarrow {}_{86}^{222}Rn + {}_2^4He + 4.87MeV$

$\Rightarrow$  운동에너지 ( $\alpha$  particle +  $Rn$  nucleus) : 4.87MeV

4) 알파입자의 운동량(momentum)은 반동된 라돈핵의 운동량과 같다  
(\_\_\_\_\_)

5) 라돈핵이 알파입자의 질량보다 훨씬 큼 !!

- ① 붕괴를 통해서 방출된 에너지는 거의 \_\_\_\_\_의 운동에너지(4.78 MeV)로 나타남
- ② 라돈의 운동에너지(0.09MeV)는 무시할 만큼 작음

## B.1. 베타마이너스 붕괴 ( $\beta^-$ decay, Negatron emission)

- 1) 안정적인 핵보다 \_\_\_\_\_ 방사성핵종  
→ 중성자 대 양성자의 비율을 작게 해서 안정성을 유지
- 2) 핵붕괴를 통해서 이 과정이 일어나며 이 때 \_\_\_\_\_가 방출됨

$\beta^-$  (electrons)



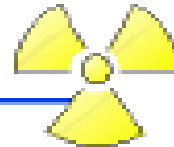
Beta Particle Radiation

Daughter  
Nucleus  
Calcium-40

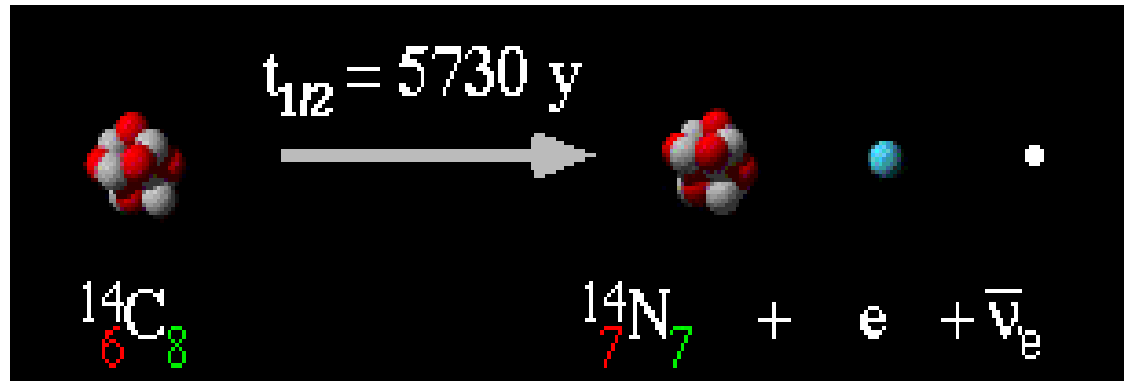
Parent Nucleus  
Potassium-40

$\bar{\nu}$   
Antineutrino

$e^-$   
Beta Particle



3)  $\beta^-$  붕괴에서는 **질량번호(A)**는 \_\_\_\_\_ **원자번호(Z)**는 1 증가 ( $Z \rightarrow Z+1$ )함



4)  $\beta^-$  붕괴에서는  $\beta^-$  입자와 함께 anti-neutrino 도 함께 방출됨

$$^A_Z X \rightarrow ^A_{Z+1} Y + \beta^- + \bar{\nu}$$

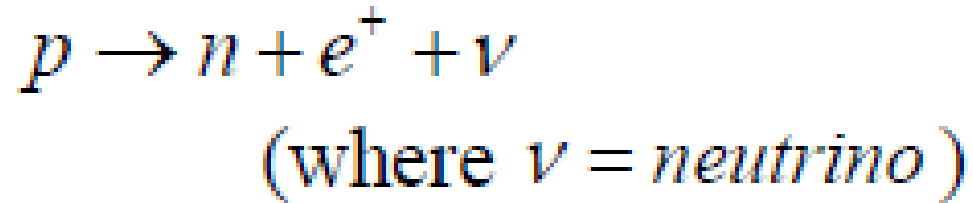


$\bar{\nu}$  = antineutrino

- varying energy
- no charge
- almost no mass

## B.2. 베타플러스 붕괴 ( $\beta^+$ decay, Positron emission)

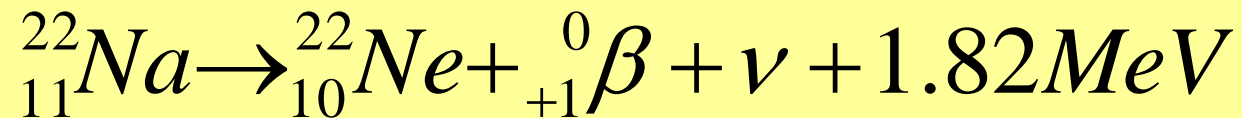
- 1)  $\beta^+$  붕괴: 안정적인 핵보다 \_\_\_\_\_, 핵종이 양전자를 방출하며 붕괴함



- 2)  $\beta^+$  붕괴를 통해서 중성자 대 양성자의 비율이 올라감
- 3) \_\_\_\_\_ (Positron,  $\beta^+$  입자) 의 전하는 +1 이고 질량은 음전자(electron)와 같음
- 4) 자연에 존재하는 양전자의 생존시간은 매우 짧음( $\mu\text{sec}$ )

5)  $\beta^+$  붕괴에서는, 질량번호 ( $A$ ) 는 변화하지 않고                     <sup>1</sup> 감소함

6)  $\beta^+$  붕괴의 예:  $^{22}\text{Na}$  붕괴

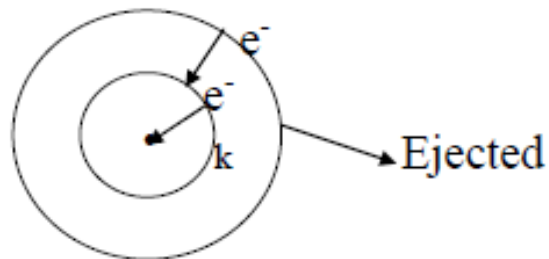
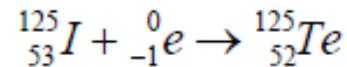
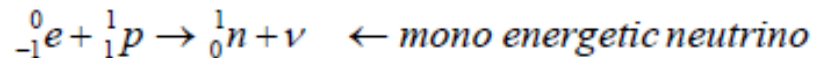


→ 방출에너지: 1.82 MeV

→ 방출에너지 = 양전자의 운동에너지 (0.545 MeV) + 딸핵에 의해 방출된  
감마선 에너지 (1.272 MeV)

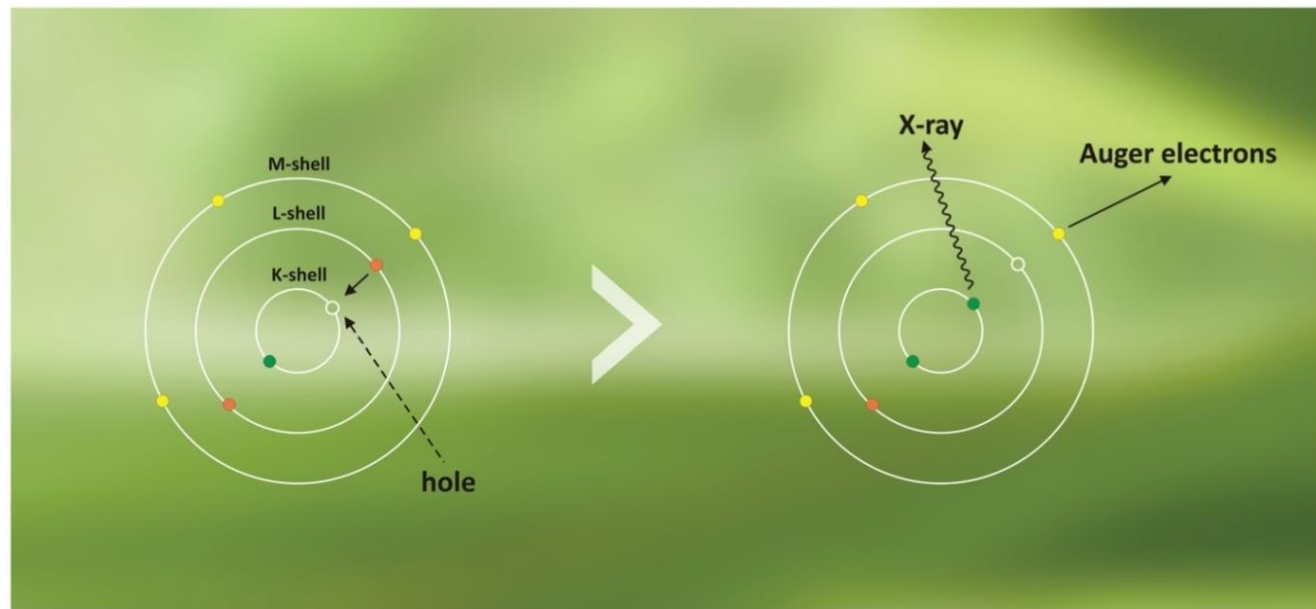
## C. 전자포획

- 1) \_\_\_\_\_은 궤도전자의 하나가 핵에 포획되는 현상으로 핵의 **양성자**가 **중성자**로 변환됨
- 2) 전자포획은 **중성자 대 양성장의 비율이 적을 때 일어나며** \_\_\_\_\_<sup>+</sup>대신 일어날 수 있음
- 3) 전자포획은 대개 **K각 전자**를 끌어 들임



#### 4) 전자포획의 결과로 궤도각에 빈공간이 생김

- ① 이 빈공간(empty hole)은 외각전자에 의해 채워지고            $x^-$            (characteristic x-ray)을 방출함
- ② 또는 이 과정의 대체과정으로                                  (Auger electrons)를 방출하기도 함
- ③ **오제전자**는 **외각전자가 특성 x-선의 흡수**를 통해 방출되는 현상으로 이해할 수 있음
- ④ 오제효과는                                 로 볼 수 있음



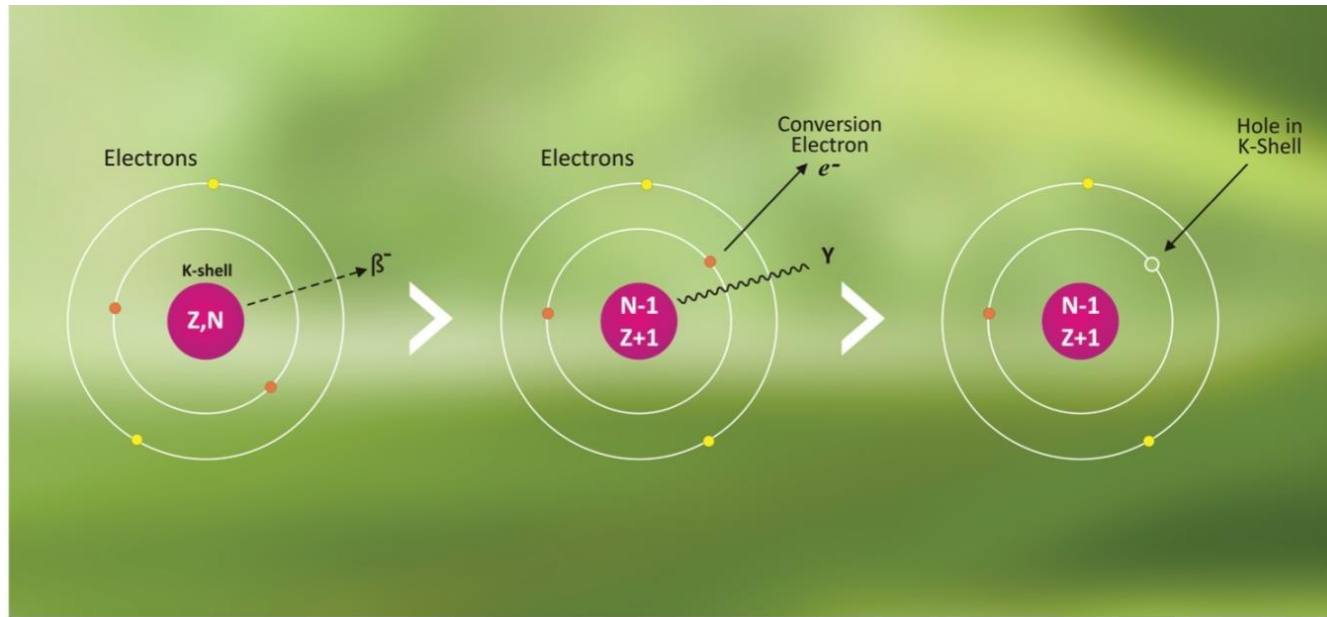
$$\text{Energy of x-ray} = E_K - E_L$$

$$\text{Energy of Auger electron} = (E_K - E_L) - E_M$$



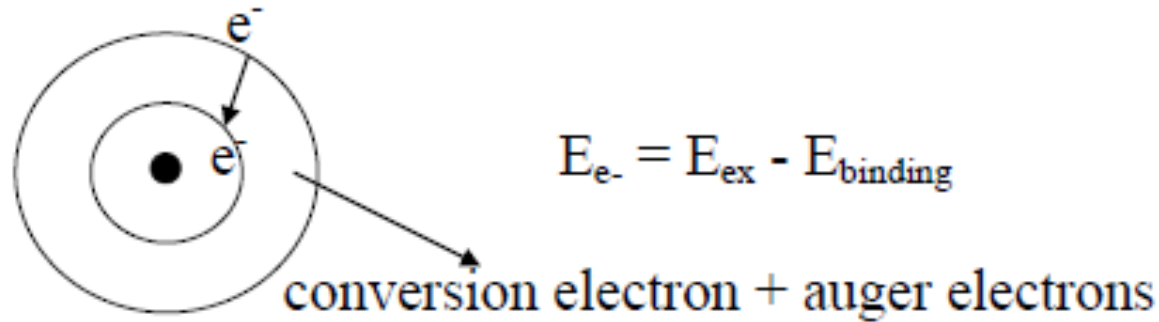
## D. 내부전환 (internal conversion)

- 1) \_\_\_\_\_은 여기상태(Excited state)의 핵에서 일어남
- 2) 여기상태의 핵이 **안정적인 핵으로 되는 방법**으로 \_\_\_\_\_과 \_\_\_\_\_이 있음
- 3) 내부전환에서 초과핵에너지는 방출되며 이 에너지가 궤도전자로 전달되면 원자 밖으로 방출됨

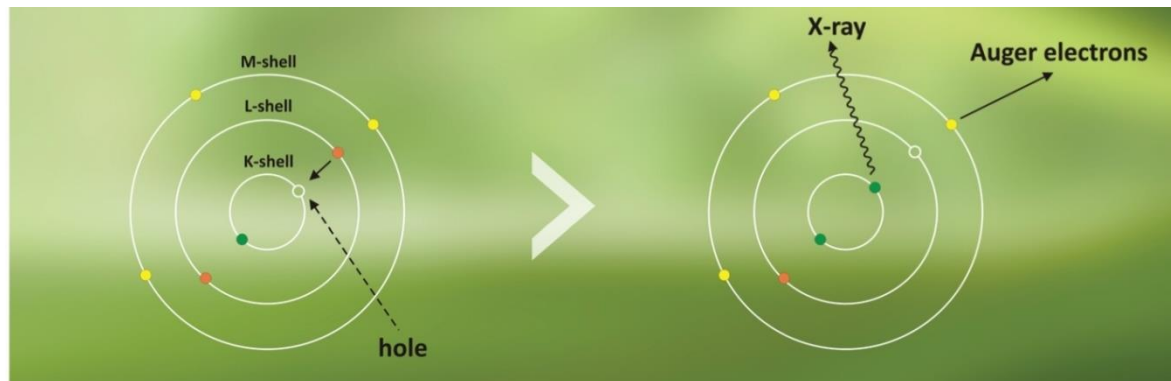


모핵:  $\beta^-$  핵붕괴  $\rightarrow$  딸핵: 감마선 방출 또는 궤도전자에 에너지 전달  $\rightarrow$  궤도전자방출 (conversion electron)

- 4) 내부전환 **전자의 운동에너지**는 핵에 의하여 방출되는 에너지에서 방출된 전자의 \_\_\_\_\_를 제외한 에너지와 같음



- 5) 전자포획의 경우와 같이 내부전환에 의한 **궤도전자 방출**은 해당궤도에 **빈 공간**을 만들고, 그 결과로 \_\_\_\_\_과 \_\_\_\_\_를 방출함

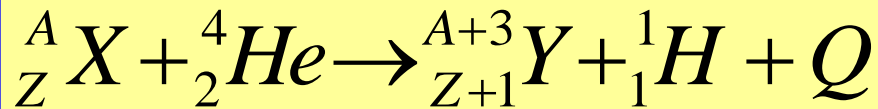


## 8. 핵반응

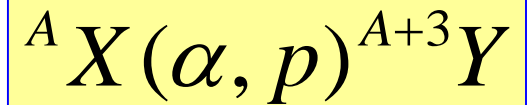
- A. (알파, 양성자) 반응 ( $\alpha$ , p reaction)
- B. (알파, 중성자) 반응 ( $\alpha$ , n reaction)
- C. 양성자 충돌 (Proton bombardment)
- D. 중양(성)자 충돌 (Deuteron bombardment)
- E. 중성자 충돌 (Neutron bombardment)
- F. 광 붕괴 (Photo disintegration)
- G. 핵분열 (Nuclear fission)
- H. 핵융합 (Nuclear fusion)

## A. ( $\alpha$ , p) 반응

- 1) 알파입자가 원자핵과 반응하여 **복합핵을 만드는 반응**
- 2) 복합핵은 양성자를 즉각적으로 방출하고 붕괴 되는 데 이를 **( $\alpha$ , p)** 반응이라고 함

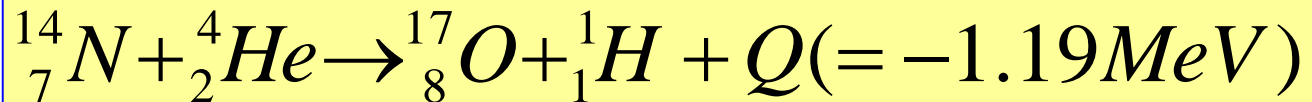


or



# 러더포드 실험 (Rutherford Experiment)

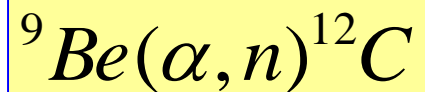
- 3) ( $\alpha$ , p) 반응을 처음으로 발견한 사람은 1919년에 **러더포드**임
- 4) 그는 **질소가스**(N<sub>2</sub> gas) 에 방사성물질로부터 알파입자를 충돌시킴



- 5) 위 식에서 **Q** 는 핵반응 동안 방출되거나 흡수된 **에너지를 의미함**
- 6) **양의 Q값** : 에너지가 \_\_\_\_ 됨, **음의 Q값**: 에너지가 \_\_\_\_ 됨
- 7) 위 식에서 -1.19 MeV 는 이 반응이 일어나기 위해서는 **알파입자** (헬륨핵,  ${}^4He$ )  
의 **운동에너지가 1.19 MeV 보다 커야 함**을 의미함

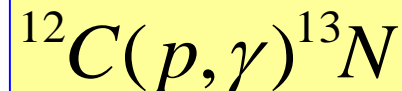
## B. ( $\alpha$ , n ) 반응

- 1) 알파입자가 원자핵에 충돌하여 중성자 방출될 경우 이를 ( $\alpha$ , n )반응이라고 한다.



## C. 양성자 충돌

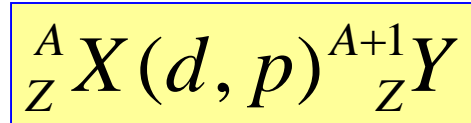
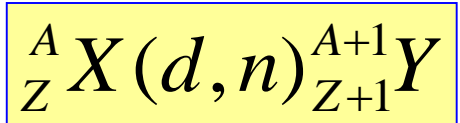
- 1) 양성자가 원자핵에 충돌하여 양성자는 포획되고 감마선이 방출될 때 이를 ( $p$ ,  $\gamma$ ) 반응이라고 한다.



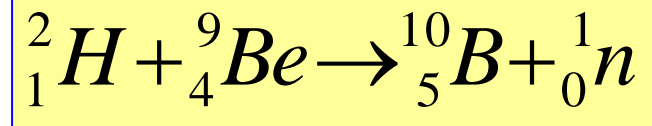
- 2) 또 다른 예: ( $p$ ,  $n$ ), ( $p$ ,  $d$ ) and ( $p$ ,  $\alpha$ )

## D. 중양자 충돌

- 1) 중양자는 양성자와 중성자의 조합으로 이루어 짐
- 2) 중양자 충돌에 의해 만들어진 핵은 반응 중에 중성자 또는 양성자를 방출함



- 3) \_\_\_\_\_를 얻을 수 있는 방법 중에 하나는 **중양자를 베릴륨(beryllium)**  
**에 충돌**하는 방법이 있음



## E. 중성자 충돌

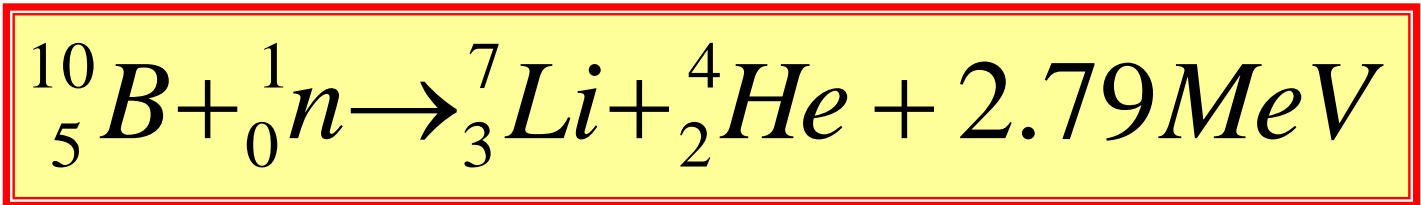
1) **중성자** (전하 없음): 원자핵포텐셜(nuclear potential)을 통과하여 **핵반응을 하는 데 효과적임**

→ 원자핵포텐셜을 통과하는 데 많은 양의 운동에너지가 필요하지 않음.

2) **Slow 중성자** (or 0.025 eV 에너지를 갖는 **열(thermal)중성자**)가 핵반응을 일으키기에 **매우 효과적임**



3) Slow 중성자에 의한 핵반응 중에 가장 중요한 것은 **붕소(boron)에 의한 (n , α) 반응**임



4) 붕소에 의한 **(n, α) 반응**은 \_\_\_\_\_에 사용됨

➔ **검출원리:** **붕소**가 함유된 가스(**BF<sub>3</sub>**)를 이온함에 넣고 중성자를 충돌시키면 붕소와 중성자가 반응해 **알파입자**가 만들어 지고 생성된 알파입자는 **이온을 생성**  
**시켜** 새로 발생한 **이온양을 측정**하면 중성자의 양을 간접적으로 알 수 있음

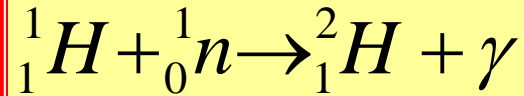
## (n,γ) 반응

6) (n,γ) : 중성자 충돌에서 일어나는 가장 **흔한 반응임**

7) 원리: 복합핵(Compound nucleus)이 **여기상태**가 됨

→ 이후 즉시 \_\_\_\_\_(γ-ray photon) 을 방출하고 정상상태로 돌아옴

8) \_\_\_\_\_(포획된 감마선)



✓ 파라핀(paraffin) 처럼 \_\_\_\_\_를 함유한 (hydrogenous) 물질에서 일어남

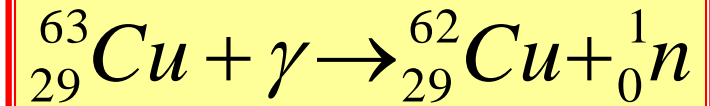
✓ **수소를 함유한 물질**은 중성자의 속도를 줄이고 결국 포획하는 데 효과적

임 → **중성자 shielding**에 많이 사용됨

## F. 광 붕괴 (Photo disintegration)

1) 광자와 원자핵과의 상호작용임

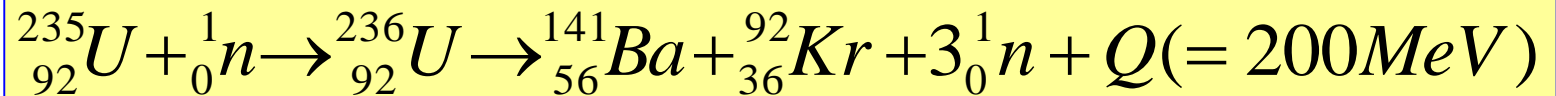
➔ 핵반응이 일어나고 **핵자(nucleons)**를 방출함



2) 위의 식에서 반응이 일어날 수 있는 문턱에너지는 10.86 MeV 임

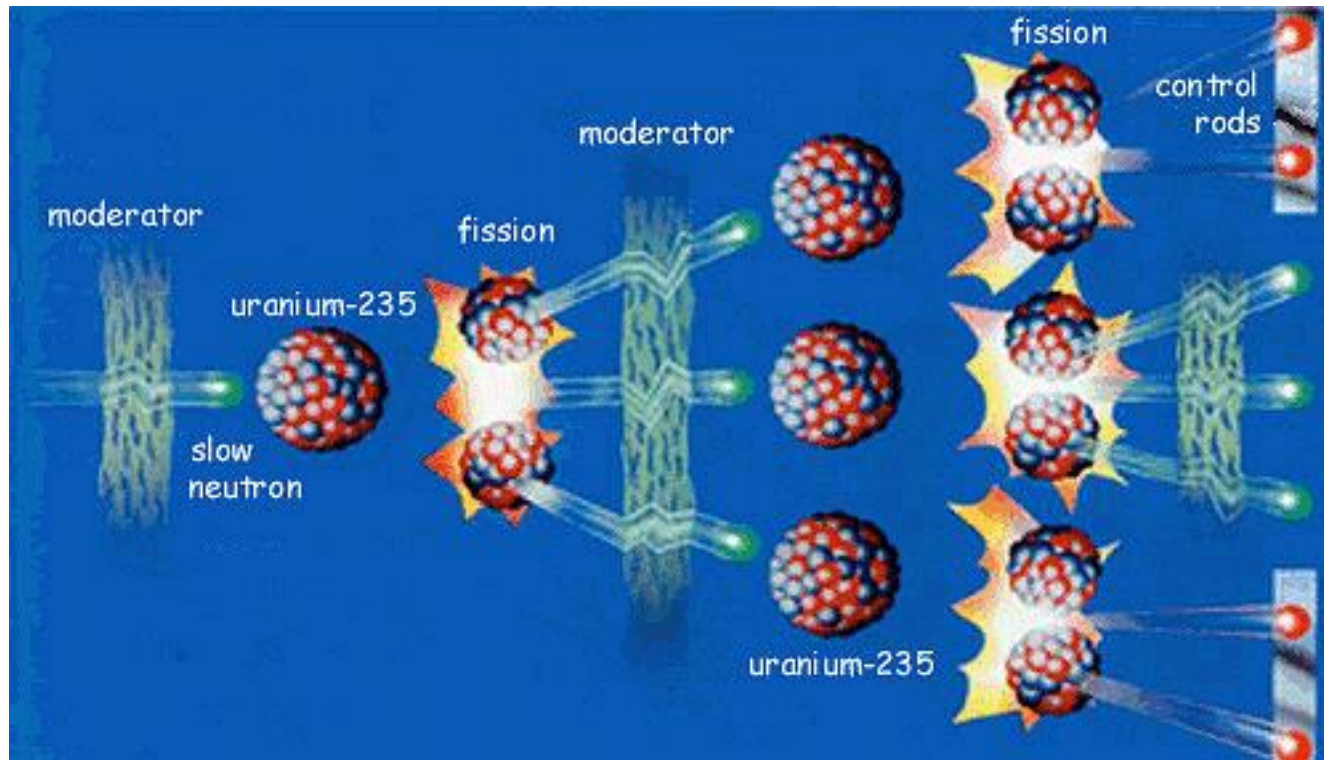
## G. 핵분열

- 1) 핵분열은 **원자번호가 높은 원자핵**에 \_\_\_\_\_를 충돌시킬 때 일어남



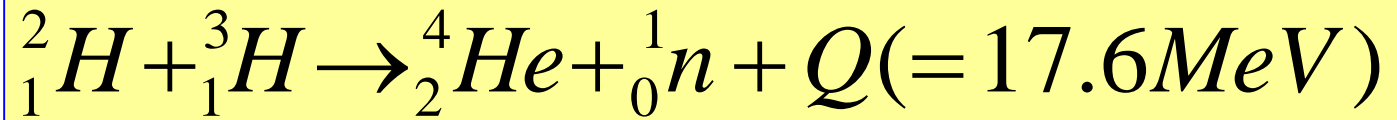
- 2) 위 식에서 **Q** 는 생성입자의 운동에너지와 X-rays **에너지의 합**
- 3) 이 반응에서 생긴 **3개의 중성자**는 **우라늄-235( ${}^{235}\text{U}$ )**와 \_\_\_\_\_(**chain reaction**)을 일으킴
- 4) 이 반응이 일어나기 위해서는 \_\_\_\_\_(**critical mass**)을 초과해야 함

# 핵분열 (Nuclear Fission)



## H. 핵융합

- 1) 핵융합은 **핵분열의 역과정**으로 볼 수 있음
- 2) 가벼운 **핵이 모여서 하나의 핵**을 만드는 과정임



- 3) 생성된 핵의 총 질량은 **반응한 핵들의 총 질량보다 작음**
- 4) 위의 반응에서는 **17.6 MeV의 에너지가 방출**됨
- 5) 핵융합은 일반적으로 \_\_\_\_\_ (**>10<sup>17</sup>K**)가 필요함  
→ 높은 열에너지에 의해 핵자간에 **척력을 극복**하고 근거리에서 작용하는 \_\_\_\_\_ **이 핵융합을 야기**시킴

# 핵융합 (Nuclear Fusion)

