

ทฤษฎีนิวตรอนและขบวนการแตกตัว

2.1 คุณสมบัติของนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอน (n) ค้นพบครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1932 โดย เจมส์ แชดวิก (James Chadwick) จากการทดลองยิงอนุภาคอัลฟาไปยังโลหะเบริลเลียม

อนุภาคนิวตรอนมีคุณสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า คือไม่มีประจุ มีมวล  $1.6750 \times 10^{-27}$  kg. หรือ 1.0086652 หน่วยมวลอะตอม (amu) หรือคิดเป็นพลังงานเทียบเท่า ได้เท่ากับ 939.507 MeV เมื่ออยู่ในสภาวะอิสระ จะสลายตัวให้โปรตอนและอิเล็กตรอน โดยมีครึ่งชีวิตเท่ากับ 12 วินาที

เมื่อนิวตรอนเข้าชนกับนิวเคลียสของอะตอม จะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ได้ต่าง ๆ กัน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของนิวตรอน และคุณสมบัติของอะตอม การแยกประเภทของนิวตรอนจึงเป็นไปตามค่าพลังงาน อาจแบ่งได้ ดังนี้คือ (1)

ชนิดของนิวตรอน	พลังงาน
นิวตรอนพลังงานสูง (high energy neutron)	> 10MeV
นิวตรอนเร็ว (fast neutron)	10KeV-10MeV
นิวตรอนปานกลาง (intermediate neutron)	100eV-10KeV
นิวตรอนช้า (slow neutron)	0.03eV-11eV
อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron)	~ 1eV
เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron)	~ 0.025eV
	ที่อุณหภูมิ 20 °ซ.
แคดเมียมนิวตรอน (cadmium neutron)	< 1eV

2.2 เทอร์มัลนิวตรอน

เทอร์มัลนิวตรอนมีพลังงานเท่ากับพลังงานจลน์ของอะตอมตัวกลางที่อุณหภูมินั้น ๆ พลังงานจลน์และความเร็วของนิวตรอน มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังนี้

$$E_n = 1/2 \cdot m_n v_p^2 = KT_n \quad \dots\dots(2.1)$$

เมื่อ  $E_n$  = พลังงานที่พบมากที่สุด (most probable energy) ของนิวตรอน

$T_n$  = อุณหภูมิของตัวกลาง

$K$  = ค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ (Boltzmann's constant)

$$= 1.38 \times 10^{-23} \quad \text{จูล/เคลวิน}$$

$m_n$  = มวลของนิวตรอน

$v_p$  = ความเร็วที่พบมากที่สุด (most probable velocity) ของนิวตรอน

จากสมการ (2.1) ได้

$$v_p = \sqrt{2KT/m_n} \quad \dots\dots(2.2)$$

ที่  $T = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$  จะได้

$$v_p = \frac{2(1.38 \times 10^{-16}) 293}{1.675 \times 10^{-24}} = 2205 \quad \text{เมตร/วินาที} \quad \dots(2.3)$$

ระยะทางการกระจายของเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron diffusion length,  $L$ ) เป็นระยะทางเฉลี่ยที่นิวตรอนเคลื่อนที่จากต้นกำเนิดไปยังตำแหน่งที่ตัวมันเองถูกดูดกลืนโดยมีความสัมพันธ์ กับค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (diffusion coefficient,  $D$ ) และ ค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนมหภาค (macroscopic absorption cross section,  $\Sigma_a$ ) ของเทอร์มัลนิวตรอน คือ

$$L^2 = D/\Sigma_a \quad \dots\dots(2.3)$$

หรือ  $L$  มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังนี้

$$L^2(T_n) = L_0^2 \cdot (T_n/293)^{1/2} \quad \dots\dots(2.4)$$

เมื่อ  $L_0$  เป็นค่า  $L$  อยู่ที่อุณหภูมิ 293 เคลวิน และ  $T_n$  มีหน่วยเป็นเคลวิน

### 2.3 อันตรกิริยานิวตรอน (neutron interaction) (2)

เมื่อนิวตรอนอิสระเข้าชนกับนิวเคลียสของอะตอม สามารถทำให้เกิดอันตรกิริยาได้หลายแบบ ดังต่อไปนี้

2.3.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) นิวเคลียสเมื่อถูกนิวตรอนชนแล้วยังคงอยู่ในสถานะ ground state ส่วนนิวตรอนจะกระเจิงออกมา โดยเปลี่ยนทิศทางและความเร็ว ลักษณะการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสในกรณีนี้ มีได้ 2 แบบ คือ

- เมื่อนิวตรอนถูกจับในนิวเคลียสเชิงประกอบ (compound nucleus) และปล่อยนิวตรอนอีกตัวออกมาภายหลัง
- ในกรณีที่นิวตรอนชนกับนิวเคลียสที่มีเลขอะตอมต่ำ และกระเด็นกลับเป็นไปตามกฎการคงที่ของพลังงาน และของโมเมนตัม

2.3.2 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) เป็นปฏิกิริยาที่นิวตรอนชนกับนิวเคลียส แล้วรวมกันเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ และมีนิวตรอนตัวหนึ่งถูกปล่อยออกมา โดยที่นิวเคลียสอยู่ในสถานะ excited state เมื่อนิวเคลียสดังกล่าวลดพลังงานลงที่ ground state พร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา พลังงานจลน์รวมก่อนชนกับหลังชนมีค่าต่างกัน เนื่องจากพลังงานจลน์ภายหลังการชนส่วนหนึ่งเปลี่ยนไปในรูปของการปลดปล่อยรังสีแกมมา สัญลักษณ์ย่อของปฏิกิริยานี้เป็น  $(n, n')$

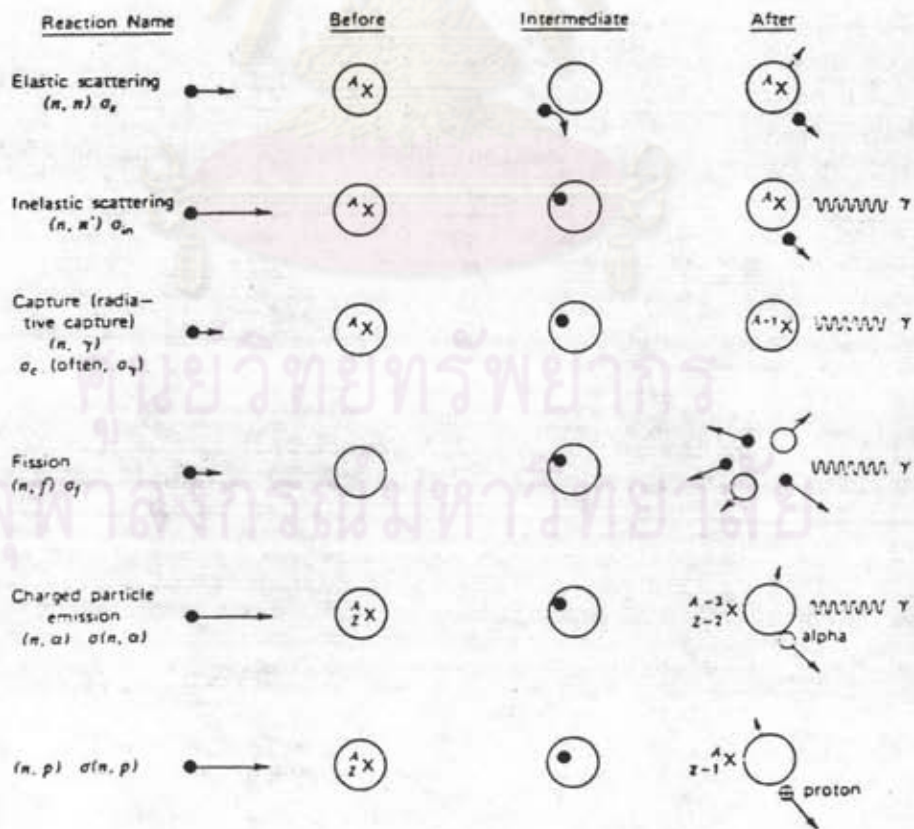
2.3.3 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (neutron capture) หรือเรียกว่า radiative capture  $(n, \gamma)$  เมื่อนิวตรอนถูกจับเข้าไปรวมกับนิวเคลียสของอะตอม เกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่า ground state จึงปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ ได้แก่  $Co^{59}(n, \gamma)Co^{60}$  และ  $Al^{27}(n, \gamma)Al^{28}$

2.3.4 ปฏิกิริยาแตกตัว (fission reaction,  $(n, f)$ ) เมื่อนิวตรอนถูกจับโดยนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิดเกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบและนิวเคลียสเชิงประกอบแบ่งออก 2 นิวคลีแอฟกเมนต์ พร้อมกับให้นิวตรอนออกมา 2-3 ตัว นิวไคลด์ที่เกิดปฏิกิริยาแตกตัวกับเทอร์มัลนิวตรอนได้ เช่น  $U^{235}$   $Pu^{239}$  และ  $U^{233}$  และสำหรับนิวตรอนเร็วสามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัวได้กับนิวไคลด์ของธาตุหนักชนิดอื่น เช่น  $U^{238}$   $Th^{232}$

2.3.5 ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (charged particle emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด อนุภาคมีประจุเช่น อนุภาคอัลฟา หรือโปรตอน จะถูกขับออกจากนิวเคลียสเชิงประกอบได้ก็เมื่อ มีพลังงานพอที่จะเอาชนะแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic) และค้ำกั้นของ

คูลอมบ์ (coulombic potential) ดังนั้นปฏิกิริยาประเภทนี้มักจะเกิดกับนิวตรอนที่มีพลังงานสูงประมาณ 1 MeV หรือมากกว่า ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา  $N^{14}(n,p)C^{14}$  ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากอนุภาคนิวตรอนพลังงานสูงจากรังสีคอสมิกทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในบรรยากาศของโลก เกิดเป็นไอโซโทปรังสีคาร์บอน-14 นิวเคลียสที่เกิดปฏิกิริยา  $(n, \alpha)$  กับนิวตรอนพลังงานสูงได้เช่น  $Li^7$  ปฏิกิริยา  $(n, \alpha)$  กับนิวเคลียสบางชนิด สามารถเกิดได้กับเทอร์มวลนิวตรอน ที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยา  $Li^6(n, \alpha)H^3$  และ  $B^{10}(n, \alpha)Li^7$  ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีบทบาทสำคัญเกี่ยวกับการวัดรังสีนิวตรอนและการกำบังรังสีนิวตรอน

2.3.6 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (neutron producing reaction) เมื่อนิวตรอนที่มีพลังงานสูงพอ คือ ประมาณ 10 MeV เข้าชนกับนิวเคลียส และสามารถดึงเอานิวตรอน 2 ตัว หรือมากกว่า และโปรตอนจากนิวเคลียส เกิดเป็นปฏิกิริยา  $(n, 2n)$  ,  $(n, 3n)$  และ  $(n, np)$



รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดอันตรกิริยานิวตรอนในแบบต่าง ๆ

หลังจากที่นิวตรอนเร็วชนกับอะตอมของตัวกลาง แบบการกระเจิงยืดหยุ่นทำให้ความเร็วของนิวตรอนลดลงจนในที่สุดจะมีพลังงานเท่ากับพลังงานจลน์เฉลี่ยของอะตอมในตัวกลางกลายเป็นเทอร์มัลนิวตรอน เรียกขบวนการที่นิวตรอนเร็ว ลดพลังงานลงเป็นเทอร์มัลนิวตรอนว่า เทอร์มัลไลเซชัน (thermalization) หรือ moderation ส่วนตัวกลางนั้นเรียกว่า ตัวหน่วงนิวตรอน (moderator) ตัวอย่างของตัวกลางที่นำมาใช้ เป็นตัวหน่วงนิวตรอนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เช่น น้ำมวลหนัก (heavy water) น้ำ และ แกรไฟต์ (graphite)

#### 2.4 ภาคตัดขวางนิวตรอน (neutron cross section)

ในการที่จะบอกการเกิดอันตรกิริยาใด ๆ ของนิวตรอนกับสสารนั้น นิยมบอกในเทอมของภาคตัดขวาง ซึ่งภาคตัดขวางนิวตรอน แสดงถึงโอกาสที่นิวตรอนเข้าชนหรือทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอน และชนิดของเป้าที่นิวตรอนเข้าชน โดยแบ่งออกเป็น

##### 2.4.1 ภาคตัดขวางจุลภาค (microscopic cross section)

$\sigma$  หมายถึงในพื้นที่ 1 นิวเคลียสที่มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาได้ ดังแสดงจากสูตร

$$\sigma = \frac{C}{(N\delta x)l} \quad \text{ชม.}^2/\text{นิวเคลียส} \quad \dots (2.5)$$

เมื่อ  $N$  = ความหนาแน่นอะตอม (อะตอมต่อตารางเซนติเมตร)

$\delta$  = พื้นที่หน้าตัดของเป้า

$x$  = ความหนาของเป้า

ดังนั้น  $\delta x$  คือปริมาตรของเป้า

$C$  = จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

$l$  = ความเข้มนิวตรอน (ต่อตารางเซนติเมตร) ที่กระทบเป้า

โดยปกติ  $\sigma$  มีค่าอยู่ระหว่าง  $10^{-22}$  กับ  $10^{-26}$  ชม.<sup>2</sup>/นิวเคลียส

และกำหนดให้  $10^{-24}$  ชม.<sup>2</sup>/นิวเคลียส = 1 บาร์น (barn)

##### 2.4.2 ภาคตัดขวางมหภาค (macroscopic cross section)

$\Sigma$  คือ ภาคตัดขวางรวมของนิวคลีโอทั้งหมด ใน 1 ตารางเซนติเมตร โดยมีค่าเป็น

$$\Sigma = N\sigma = \frac{\rho N_A \sigma}{A} \quad \dots (2.6)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่น (กรัม/ตร.ซม.)  
 $N_a$  = ตัวเลข อโวกาโดร ( $6.022 \times 10^{23}$ )  
 $A$  = น้ำหนักอะตอม (atomic weight)

ในแต่ละนิวเคลียสมีค่าภาคตัดขวางหลายแบบ ซึ่งสัมพันธ์กับชนิดของปฏิกิริยาของนิวตรอน โดยแบ่งลักษณะของภาคตัดขวางของนิวตรอนออกได้เป็น

2.4.2.1 ภาคตัดขวางของการดูดกลืน (absorption cross section) ( $\sigma_a$ ) เกิดจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ( $\sigma_{in}$ ), radiative capture ( $\sigma_r$ ) และ non-radiative capture ( $\sigma_n$ )

2.4.2.2 ภาคตัดขวางของการกระเจิง (scattering cross section),  $\sigma_s$  แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการชนกันแบบยืดหยุ่น

2.4.2.3 ภาคตัดขวางของการแตกตัว (fission cross section),  $\sigma_f$  แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาแตกตัว

ในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของนิวเคลียส เมื่อถูกนิวตรอนเข้าชนนั้น มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากหรือน้อย สำหรับนิวเคลียสแต่ละธาตุไม่เท่ากัน ทั้งนี้ สามารถแสดงได้ด้วยค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการแตกตัว และค่านี้ยังสัมพันธ์กับพลังงานของนิวตรอนที่เข้าชนอีกด้วย

ตารางที่ 2.1 ค่าภาคตัดขวางต่าง ๆ สำหรับเทอร์มัลนิวตรอน (2200 m/s) กับนิวไคลด์บางชนิด (3)

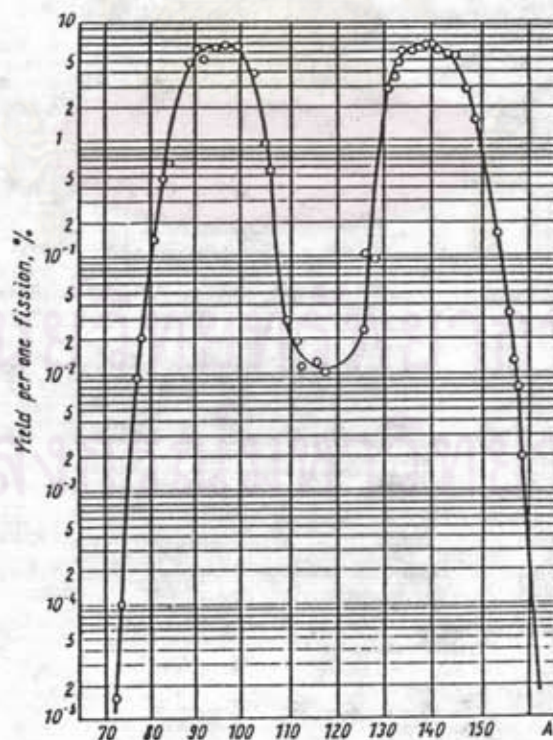
นิวเคลียส	Fission (barn)	Radiative Capture (barn)	Total Absorption (barn)
U-233	527	54	581
U-235	577	106	683
Pu-239	742	287	1029
U-238	-	2.71	2.71
Nat. U	4.2	3.5	7.7

## 2.5 ขบวนการแตกตัว

ฮาน (Hahn) และ สตราสส์มาน (Strassman) พบว่าเมื่อยิงนิวตรอนเข้าไปยังนิวเคลียสของยูเรเนียม (ต่อมาทราบว่า เป็นนิวเคลียสของ

ยูเรเนียม-235) ทำให้นิวเคลียสของยูเรเนียมแตกตัวออกเป็น 2 นิวไคลด์ เรียกปฏิกิริยาแบบนี้ว่า "นิวเคลียร์ฟิชชัน" แต่ละนิวไคลด์ที่แตกตัวออกมาเรียกว่า ฟิชชันแฟรกเมนต์ (fission fragment) ซึ่งมีเลขมวลต่างกัน ปฏิกิริยาแตกตัวจะเกิดได้กับนิวเคลียสของธาตุที่มีเลขอะตอมสูงใกล้เคียงกับ 100 ขึ้นไป ในกรณี ยูเรเนียม-235 กับเทอร์มัลนิวตรอนนั้นมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาแตกตัวได้มากกว่า 80 แบบ โดยให้ฟิชชันแฟรกเมนต์ที่มีเลขมวลอยู่ ระหว่าง 72 ถึง 161 และมีเลขอะตอมระหว่าง 30 ถึง 65 ได้นิวไคลด์ที่เกิดจากการแตกตัวประมาณ 300 นิวไคลด์ มีทั้งที่เป็นไอโซโทปอยู่ตัว (stable isotope) และเป็นไอโซโทปรังสี (radioactive isotope)

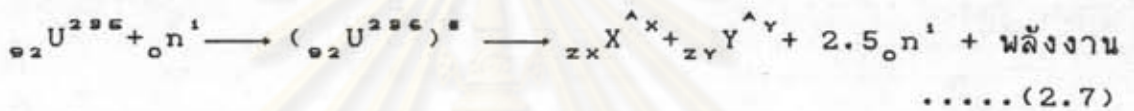
ค่าyield ของแฟรกเมนต์เป็นฟังก์ชันกับเลขมวลดังกราฟใน รูปที่ 2.2 ฟิชชันแฟรกเมนต์ที่เกิดจากการแตกตัวแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือกลุ่มฟิชชันแฟรกเมนต์ที่มีเลขมวลต่ำ เรียกกลุ่มเบา (light group) และอีกกลุ่มมีเลขมวลสูง เรียกกลุ่มหนัก (heavy group)



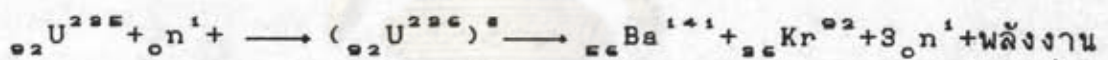
รูปที่ 2.2 Yield ของการแตกตัว  $U^{235}$  เป็นฟังก์ชันกับเลขมวลของแฟรกเมนต์จากการแตกตัวกับเทอร์มัลนิวตรอน

นอกจากยูเรเนียม-235 ที่แตกตัวได้กับนิวตรอน ยังมีนิวไคลด์อื่น ๆ อีกเช่น พลูโทเนียม-239, ยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 เป็นต้น เทอร์มัลนิวตรอน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวได้กับยูเรเนียม-235 และ พลูโทเนียม-239 แต่จะไม่เกิดปฏิกิริยาแตกตัวกับยูเรเนียม-238 และ ทอเรียม-232 นอกจากนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานประมาณ 1 MeV ขึ้นไป ดังกราฟในรูปที่ 2.3 อนุภาคมีประจุ เช่น อนุภาคอัลฟาพลังงานสูง โปรตอน ดิวเทรอน และ รังสีแกมมา สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวได้เช่นกัน

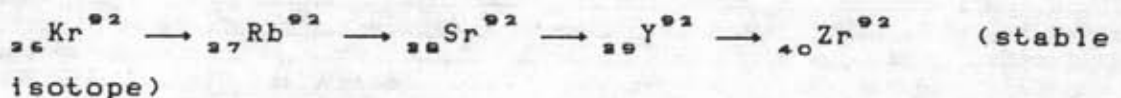
รูปสมการทั่ว ๆ ไปของปฏิกิริยาแตกตัวของยูเรเนียม-235 กับ เทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งให้ 2 นิวตรอนแฟรกเมนต์พร้อมกับให้นิวตรอนออกมาอีกครั้ง ละประมาณ 2-3 ตัว ดังนี้



จากสมการ (2.7) ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดปฏิกิริยาได้หลายแบบเช่น



นิวไคลด์ที่เกิดขึ้นใหม่ ไม่เสถียรภาพ จึงสลายตัวโดยการแผ่รังสี เพื่อกลายเป็นนิวไคลด์ใหม่ที่เสถียรภาพ จากตัวอย่าง แบบเรียม-141 และ คริปทอน-92 มีการสลายตัวต่อพร้อมกันให้รังสีเบต้า ตามโคอะแกรมดังนี้



## 2.6 ทฤษฎีการแตกตัว

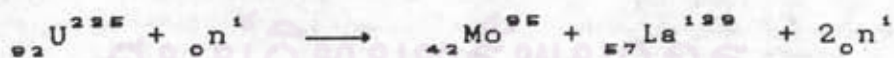
ทฤษฎีการแตกตัว สามารถอธิบายได้ด้วย แบบจำลองหยดของเหลว (liquid drop model) ซึ่งได้รับการเสนอโดยบอร์ (Bohr) และวิลเลอร์ (Wheeler) โดยถือว่า นิวเคลียสขนาดใหญ่ มีลักษณะเหมือนหยดน้ำเป็น





ทรงกลม มีความสมคูลย์ ระหว่างแรงดึงดูดผิวกับแรงผลักรวม การเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในของเหลว เปรียบได้กับการเคลื่อนที่ของนิวคลีออน ในนิวเคลียส เมื่อยิ่งนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น อยู่ในสถานะกระตุ้นและนิวคลีออนทั้งนิวเคลียสสั้น แรงผลักระหว่างโปรตอนมีมากขึ้น ประกอบกับพลังงานไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic) และพลังงานที่ผิว เพิ่มขึ้น ทำให้นิวเคลียสเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปไข่ (ellipsoidal) ถ้าพลังงานที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าพลังงานวิกฤต (critical energy) จะทำให้นิวเคลียสกลับมาเป็นทรงกลมเหมือนเดิม พร้อมกับลดพลังงานลงให้รังสีแกมมาออกมาซึ่งก็คือ กระบวนการ radiative capture แต่ถ้าพลังงานกระตุ้นมีค่ามากพอ คือมากกว่าพลังงานวิกฤตสำหรับการแตกตัว นั่นคือ แรงผลักระหว่างโปรตอน เท่ากับ หรือมากกว่าพลังงานขีดเริ่มของการแตกตัว (fission threshold energy) หรือ เรียกว่าพลังงานวิกฤตของการแตกตัว จะทำให้นิวเคลียสแตกออกจากกันเป็น 2 ส่วน และวิ่งออกในทิศทางตรงกันข้ามด้วยแรงผลักรวมไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic) ระหว่างกันและกันพร้อมกับให้พลังงานออกมา แต่ละส่วนจะจัดรูปร่างใหม่ ให้อยู่ในรูปทรงกลม ซึ่งเป็นสถานะเสถียรที่สุด พร้อมกับให้นิวตรอน และรังสีแกมมา ระยะเวลาที่ใช้ในการแตกตัวประมาณ  $10^{-12}$  วินาที

สำหรับ ยูเรเนียม-235 เมื่อเกิดปฏิกิริยาแตกตัว กับเทอร์มัลนิวตรอนในแต่ละครั้งจะให้พลังงานออกมาประมาณ 200 MeV ดังตัวอย่างการคำนวณหาพลังงานที่จากปฏิกิริยาการแตกตัวของยูเรเนียม-235 (4)



จากตารางมวลอะตอม ได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

$\text{U}^{235}$	235.117496	$\text{Mo}^{95}$	94.9357
$\text{n}$	1.008982	$\text{La}^{139}$	138.9495
	<u>236.126478</u>		<u>235.9031</u>

$$\begin{aligned} \text{มวลที่แตกต่างกัน} &= 0.2234 \text{ amu.} \\ &= 208 \text{ Mev.} \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.2 พลังงานขีดเริ่มของการแตกตัวสำหรับนิวไคลด์บางชนิด (5)

นิวไคลด์	พลังงานขีดเริ่มของการแตกตัว (MeV)
Th <sup>232</sup>	5.9
U <sup>233</sup>	5.5
U <sup>235</sup>	5.75
U <sup>238</sup>	5.85
Pu <sup>239</sup>	5.5

### 2.7 อัตราการแตกตัว (fission rate)

เมื่อนิวตรอนที่มีพลังงานเดียว (monoenergetic neutrons) เข้าชนกับนิวเคลียสที่แตกตัวได้ (fissile nucleus) เกิดปฏิกิริยาแตกตัว อัตราในการแตกตัว เขียนได้ดังนี้

$$R = \Sigma_f \phi = N \sigma_f n v \quad \dots\dots(2.8)$$

- เมื่อ  $R$  = อัตราของการแตกตัว (ฟิชชันต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)  
 $\Sigma_f$  = ภาคตัดของมหภาคของการแตกตัวสำหรับขบวนการแตกตัว  
 $= N \sigma_f$   
 $\phi$  = ฟลักซ์ของนิวตรอนที่มีพลังงานเดียว  
 $= n v$   
 $N$  = จำนวนนิวเคลียสที่แตกตัวได้ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
 $\sigma_f$  = ภาคตัดขวางของการแตกตัว (ตารางเซนติเมตรต่อนิวเคลียส)  
 $n$  = ความหนาแน่นของนิวตรอน หรือจำนวนนิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
 $v$  = ความเร็วของนิวตรอน (เมตรต่อวินาที)

### 2.8 ชนิดของขบวนการแตกตัว

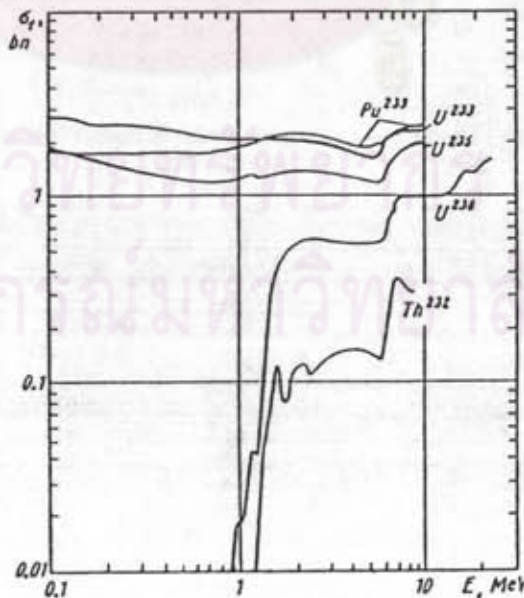
กระบวนกรแตกตัวสามารถแบ่งออกได้ 4 อย่าง ตามลักษณะการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ

#### 2.8.1 การแตกตัวกับเทอร์มัลนิวตรอน (thermal fission)

เป็นปฏิกิริยาแตกตัวที่เกิดจาก เทอร์มัลนิวตรอนร่วมกับนิวเคลียส ที่แตกตัวได้ เช่น นิวเคลียสของ ยูเรเนียม-235 และ พลูโทเนียม-239

2.8.2 การแตกตัวกับนิวตรอนเร็ว (fast fission) ปฏิกิริยาการแตกตัว เนื่องจากนิวตรอนพลังงานสูง สามารถเกิดได้ทั้ง ไอโซโทป ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 ยูเรเนียม-233 พลูโทเนียม-239 และ ทอเรียม-232 จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า  $U^{235}$  และ  $Th^{232}$  มีจุดขีดเริ่มการแตกตัว (fission threshold) ประมาณ 1.0 MeV และจะมีค่าภาคตัดขวางของการแตกตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อนิวตรอนมีพลังงานสูงขึ้น

2.8.3 การแตกตัวเมื่อถูกเหนี่ยวนำจากอนุภาค (particle induced fission) สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่า 90 สามารถแตกตัวได้เมื่อถูกยิงด้วย โปรตอน ดิวเทอรอน และ อนุภาคอัลฟา โดยโปรตอนที่มีพลังงาน 7 MeV ทำให้ยูเรเนียมเกิดปฏิกิริยา (p, f) ได้ ส่วนดิวเทอรอนต้องใช้พลังงานมากกว่าโปรตอนเล็กน้อยจึงจะเกิดปฏิกิริยา (d, f) สำหรับ การแตกตัวแบบโฟโตฟิชชัน (photofission) ต้องใช้โฟตอนที่พลังงานสูง ในกรณีของยูเรเนียม-238 มีจุดขีดเริ่มของปฏิกิริยาแตกตัว ( $\gamma, f$ ) ที่พลังงาน 5.1 MeV



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงค่าภาคตัดขวางของการแตกตัวสำหรับนิวไคลด์บางชนิด ที่พลังงานต่าง ๆ (5)

2.8.4 การแตกตัวได้เอง (spontaneous fission หรือ self fission) นิวเคลียสที่แตกตัวได้ โดยปกติจะเกิดการแตกตัวได้เอง ซึ่งมีอัตราการแตกตัวเป็นฟังก์ชันกับ  $Z^2/A$  สำหรับยูเรเนียมธรรมชาติปริมาณ 1 กรัม เกิดการแตกตัวได้เองประมาณ 25 ครั้งต่อชั่วโมง  $\text{Th}^{232}$  ให้อัตราการแตกตัวได้เองช้าที่สุด คือน้อยกว่า  $10^{-4}$  ครั้ง/กรัม-วินาที ในขณะที่  $\text{Cm}^{242}$  ให้อัตราการแตกตัวเร็วที่สุด คือ ประมาณ  $10^7$  ครั้ง/กรัม-วินาที  ${}_{98}\text{Cf}^{252}$  มีการแตกตัวได้เอง ประมาณ 3 % ของการสลายตัว ดังนี้



ตารางที่ 2.3 อัตราการแตกตัวได้เองของนิวไคลด์บางชนิด (6)

นิวไคลด์	ครึ่งชีวิตของการแตกตัวได้เอง (ปี)	จำนวนแตกตัวใน 1 วินาที ต่อ 1 กิโลกรัม
$\text{Th}^{232}$	$1.4 \times 10^{10}$	0.04
$\text{U}^{238}$	$3 \times 10^{17}$	0.2
$\text{U}^{235}$	$1.9 \times 10^{17}$	0.3
$\text{U}^{233}$	$8 \times 10^{15}$	7
$\text{Pu}^{239}$	$5.5 \times 10^{15}$	10

## 2.9 ต้นกำเนิดนิวตรอน (neutron sources)

ต้นกำเนิดนิวตรอน หมายถึงแหล่งที่ให้อนุภาคนิวตรอนออกมา ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้กันอยู่ ผลิตนิวตรอนมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ และการแตกตัวได้เองของนิวคลีไอ ซึ่งแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.9.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากสารกัมมันตรังสี (radioactive sources) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่เกิดจาก อนุภาคซึ่งถูกปลดปล่อยจากสารกัมมันตรังสีแล้ววิ่งกระทบเข้า เกิดเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์และให้นิวตรอนออกมา แบ่งต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทนี้ตามลักษณะของปฏิกิริยานิวเคลียร์ ได้ดังนี้

2.9.1.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา  $(\alpha, n)$  ผลิตอนุภาคนิวตรอนจากการที่อนุภาคอัลฟาซึ่งถูกปลดปล่อยจากสารกัมมันตรังสี เช่น  $\text{Po}^{210}$   $\text{Am}^{241}$   $\text{Pu}^{239}$  และ  $\text{Ra}^{226}$  วิ่งชนนิวเคลียสของธาตุบางชนิดที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้าย (last neutron) ต่ำ ทำให้มีอนุภาคนิวตรอนหลุดออกมา ธาตุที่นิวตรอนตัวสุดท้ายมีพลังงานยึดเหนี่ยว ต่ำ ได้แก่ เบริลเลียม โบรอน และคิวเทอเรียม ตัวอย่างของต้นกำเนิดนิวตรอนเหล่านี้ ได้แก่  $\text{Am}^{241}/\text{Be}$   $\text{Pu}^{239}/\text{Be}$   $\text{Ra}^{226}/\text{Be}$  และ  $\text{Po}^{210}/\text{Be}$  โดยให้สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนเป็นพลังงานต่อเนื่องกันที่มีค่าระหว่าง 1 MeV ถึง 13 MeV และมีค่าพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนประมาณ 4-5 MeV ปฏิกิริยาที่ให้นิวตรอนแบบนี้ คือ



2.9.1.2 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา  $(\gamma, n)$  หรือเรียกว่าต้นกำเนิดโฟโตนิวตรอน (photoneutron source) ผลิตนิวตรอนจากการที่รังสีแกมมาซึ่งถูกปลดปล่อยจากสารกัมมันตรังสีและมีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายของธาตุที่ใช้เป็นเป้า ทำให้มีอนุภาคนิวตรอนหลุดออกมา ทำนองเดียวกันกับต้นกำเนิดนิวตรอนแบบ  $(\alpha, n)$  ต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทนี้ที่สำคัญ คือ  $\text{Sb}^{124}/\text{Be}$  โดยที่  $\text{Sb}^{124}$  ให้แกมมาที่มีพลังงานสูง เมื่อไปชนกับนิวเคลียสของเบริลเลียมจะให้นิวตรอนออกมา ตามปฏิกิริยา  $\text{Be}^9(\gamma, n)\text{Be}^8$

2.9.1.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยาแตกตัวได้เองของนิวคลีไอ (spontaneous fission) ตัวอย่างของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบนี้ คือ  ${}_{98}\text{Cf}^{252}$  ซึ่งสามารถแตกตัวให้นิวตรอนได้เอง โดยมีครึ่งชีวิต 86 ปี ปริมาณ 1 กรัมของแคลิฟอร์เนียมจะแตกตัวให้อนุภาคนิวตรอนประมาณ  $3 \times 10^{12}$  นิวตรอน/วินาที

2.9.2 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาคมีประจุ (charged particle accelerator) การเร่งอนุภาคมีประจุ เช่น อนุภาคอัลฟา โปรตอน และคิวเทอรอน ให้มีพลังงานสูงขึ้นไปกระทบเป้าที่ประกอบด้วยอะตอมเบาบางชนิดซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้าย ต่ำ แล้วให้อนุภาคนิวตรอนออกมา เป้าลักษณะอย่างนี้ เช่น คิวเทอเรียม ทริเทียม และลิเทียม ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ ได้แก่  $\text{Li}^7(p, n)\text{Be}^7$   $\text{H}^2(d, n)\text{He}^3$  และ  $\text{H}^3(d, n)\text{He}^4$  ปฏิกิริยาเหล่านี้ให้นิวตรอนพลังงานเดียว

2.9.3. เครื่องผลิตนิวตรอน (neutron generator) ต้นกำเนิดแบบนี้ ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยา  $H^2(d,n)He^4$  หรือเรียกว่าปฏิกิริยา D-T ในทางปฏิบัติ อนุภาคดิวเทอเรียม ( $H^2$  หรือ  $D^2$ ) จะถูกเร่งให้มีพลังงานสูงประมาณ 100-200 KeV แล้ววิ่งเข้าชนเป้าทริเทียม อนุภาคนิวตรอนที่เกิดขึ้นมีพลังงานเดียว และสามารถให้นิวตรอนพลังงานสูงถึง 14 MeV เครื่องผลิตนิวตรอนอาจใช้ดิวเทอเรียมเป็นเป้าแทนทริเทียม ซึ่งจะให้นิวตรอนออกมาจากปฏิกิริยา  $H^2(d,n)He^3$  เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยา D-D

2.9.3 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้นิวตรอนได้มากที่สุด โดยได้นิวตรอนจากปฏิกิริยาแตกตัวแบบลูกโซ่ ของธาตุที่แตกตัวได้ เมื่อจับอนุภาคนิวตรอน เช่น ยูเรเนียม-235

#### 2.10 ธาตุยูเรเนียม (7) (8)

ไอโซโทปตามธรรมชาติของธาตุยูเรเนียม มี 3 ชนิด คือ ยูเรเนียม-234 ยูเรเนียม-235 และยูเรเนียม-238 ยูเรเนียมมีน้ำหนักอะตอม 238.03 เลขอะตอม 92 ความถ่วงจำเพาะ 19.05 มีจุดหลอมเหลว  $1133^{\circ}C$  และจุดเดือดประมาณ  $3927^{\circ}C$  วาเลนซ์ตามปกติของยูเรเนียม คือ +3 +4 และ +6 และมี Oxides อยู่ 4 ตัว คือ  $UO$   $UO_2$   $U_2O_3$  และ  $UO_3$

ตารางที่ 2.4 ปริมาณยูเรเนียมธรรมชาติ ครึ่งชีวิต และ มวลไอโซโทปของแต่ละไอโซโทปของยูเรเนียมที่มีอยู่ในยูเรเนียมธรรมชาติ

ไอโซโทป	เปอร์เซ็นต์ในยูเรเนียมธรรมชาติ	ครึ่งชีวิต (ปี)	มวลไอโซโทป (amu)	เอกสารอ้างอิง
U-234	0.0058	$2.454 \times 10^5$	234.1141	(3)
	0.0055			(9)
U-235	0.711	$7.037 \times 10^8$	235.1175	(3)
	0.72			(9)
U-238	99.283	$4.468 \times 10^9$	238.1252	(3)
	99.2745			(9)

ยูเรเนียม-238 เมื่อสลายตัวจะให้อนุกรมยูเรเนียม ซึ่งประกอบด้วยยูเรเนียม-234 เป็น intermediate daughter และสิ้นสุดด้วยตะกั่ว-206 ซึ่งมีสถานะเสถียร การสลายตัวของยูเรเนียม-238 1 อะตอมจนสิ้นสุดการสลายตัวจะได้ 1 อะตอมของตะกั่ว-206 และให้อนุภาคอัลฟา 8 อนุภาค และเบต้า 6 อนุภาค ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

อนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม-235 เรียกว่าอนุกรมแอกทิנם ซึ่งสิ้นสุดด้วย ตะกั่ว-207 ด้วยการให้ 7 อนุภาคอัลฟา และ 4 อนุภาคเบต้า ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 การสลายตัวแบบลูกโซ่ของอนุกรมยูเรเนียม

Parent Element	Nuclides		Particle Emitted	Particle Energy* (MeV)	Half-Life
	Parent	Daughter			
Uranium (U-I)	$^{238}_{92}\text{U}$	$\longrightarrow$ $^{234}_{90}\text{Th}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	4.20	$4.51 \times 10^8$ years
Thorium (UX <sub>1</sub> )	$^{234}_{90}\text{Th}$	$\xrightarrow{(99+\%)} ^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	0.19	} 24.1 days
		$\xrightarrow{(0.63\%)} ^{234}_{91}\text{Pa}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	0.088	
Protactinium (UX <sub>2</sub> )	$^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}$	$\longrightarrow$ $^{234}_{92}\text{U}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	2.29	1.2 min
Protactinium (UZ)	$^{234}_{91}\text{Pa}$	$\longrightarrow$ $^{234}_{92}\text{U}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	1.3	6.7 hr
Uranium (U-II)	$^{234}_{92}\text{U}$	$\longrightarrow$ $^{230}_{90}\text{Th}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	4.77	$2.47 \times 10^5$ years
Thorium (ionium)	$^{230}_{90}\text{Th}$	$\longrightarrow$ $^{226}_{88}\text{Ra}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	4.68	$8.0 \times 10^4$ years
Radium	$^{226}_{88}\text{Ra}$	$\longrightarrow$ $^{222}_{86}\text{Rn}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	4.78	$1.6 \times 10^4$ years
Radon (Ra-emanation)	$^{222}_{86}\text{Rn}$	$\longrightarrow$ $^{218}_{84}\text{Po}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	5.49	3.8 days
Polonium (Ra-A)	$^{218}_{84}\text{Po}$	$\xrightarrow{(99+\%)} ^{214}_{82}\text{Pb}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	6.00	} 3.0 min
		$\xrightarrow{(0.02\%)} ^{218}_{85}\text{At}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	?	
Lead (Ra-B)	$^{214}_{82}\text{Pb}$	$\longrightarrow$ $^{214}_{83}\text{Bi}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	1.03	26.8 min
Astatine	$^{218}_{85}\text{At}$	$\longrightarrow$ $^{214}_{83}\text{Bi}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	6.70	2.0 sec
Bismuth (Ra-C)	$^{214}_{83}\text{Bi}$	$\xrightarrow{(99+\%)} ^{214}_{84}\text{Po}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	3.26	} 19.7 min
		$\xrightarrow{(0.04\%)} ^{210}_{81}\text{Tl}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	5.51	
Polonium (Ra-C')	$^{214}_{84}\text{Po}$	$\longrightarrow$ $^{210}_{82}\text{Pb}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	7.68	$1.6 \times 10^{-4}$ sec
Thallium (Ra-C'')	$^{210}_{81}\text{Tl}$	$\longrightarrow$ $^{210}_{82}\text{Pb}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	2.3	1.3 min
Lead (Ra-D)	$^{210}_{82}\text{Pb}$	$\longrightarrow$ $^{210}_{83}\text{Bi}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	0.061	22 years
Bismuth (Ra-E)	$^{210}_{83}\text{Bi}$	$\xrightarrow{(99+\%)} ^{210}_{84}\text{Po}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	1.16	} 5.0 days
		$\xrightarrow{(2 \times 10^{-4}\%)} ^{206}_{81}\text{Tl}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	4.69	
Polonium (Ra-F)	$^{210}_{84}\text{Po}$	$\longrightarrow$ $^{206}_{82}\text{Pb}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	5.30	138.4 min
Thallium	$^{206}_{81}\text{Tl}$	$\longrightarrow$ $^{206}_{82}\text{Pb}$	$-\frac{0}{-1}\text{e}$ ( $\beta$ )	1.52	4.2 min
Lead (Ra-G)	$^{206}_{82}\text{Pb}$	Stable	---	---	Infinite



ตารางที่ 2.6 การสลายตัวแบบลูกโซ่ของอนุกรมแอกทีนัม

Parent Element	Nuclides		Particle Emitted	Particle Energy <sup>*</sup> (MeV)	Half-Life
	Parent	Daughter			
Uranium (actinouranium)	${}^{235}_{92}\text{U}$	$\longrightarrow$ ${}^{231}_{90}\text{Th}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	4.58	$7.1 \times 10^8$ years
Thorium (U-Y)	${}^{231}_{90}\text{Th}$	$\longrightarrow$ ${}^{231}_{91}\text{Pa}$	$-{}^0_1e$ ( $\beta$ )	0.30	25.6 hr
Protactinium	${}^{231}_{91}\text{Pa}$	$\longrightarrow$ ${}^{227}_{89}\text{Ac}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	5.05	$3.4 \times 10^4$ years
Actinium	${}^{227}_{89}\text{Ac}$	$(98.8\%) \longrightarrow$ ${}^{227}_{90}\text{Th}$	$-{}^0_1e$ ( $\beta$ )	0.046	} 21.6 years
		$(1.2\%) \longrightarrow$ ${}^{223}_{87}\text{Fr}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	4.95	
Thorium (radioactinium)	${}^{227}_{90}\text{Th}$	$\longrightarrow$ ${}^{223}_{88}\text{Ra}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	6.04	18.2 days
Francium (actinium K)	${}^{223}_{87}\text{Fr}$	$(99+\%) \longrightarrow$ ${}^{223}_{88}\text{Ra}$	$-{}^0_1e$ ( $\beta$ )	1.15	} 22 min
		$(4 \times 10^{-4}\%) \longrightarrow$ ${}^{219}_{85}\text{At}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	?	
Radium (Ac-X)	${}^{223}_{88}\text{Ra}$	$\longrightarrow$ ${}^{219}_{86}\text{Rn}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	5.75	11.4 day
Astatine	${}^{219}_{85}\text{At}$	$(97\%) \longrightarrow$ ${}^{219}_{86}\text{Rn}$	$-{}^0_1e$ ( $\beta$ )	?	} 0.9 min
		$(3\%) \longrightarrow$ ${}^{215}_{83}\text{Bi}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	6.28	
Radon (Ac-emanation)	${}^{219}_{86}\text{Rn}$	$\longrightarrow$ ${}^{215}_{84}\text{Po}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	6.82	3.96 sec
Bismuth	${}^{215}_{83}\text{Bi}$	$\longrightarrow$ ${}^{215}_{84}\text{Po}$	$-{}^0_1e$ ( $\beta$ )	?	8 min
Polonium (Ac-A)	${}^{215}_{84}\text{Po}$	$(99+\%) \longrightarrow$ ${}^{211}_{82}\text{Pb}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	7.38	} $1.8 \times 10^{-4}$ sec
		$(5 \times 10^{-4}\%) \longrightarrow$ ${}^{215}_{85}\text{At}$	$-{}^0_1e$ ( $\beta$ )	?	
Astatine	${}^{215}_{85}\text{At}$	$\longrightarrow$ ${}^{211}_{83}\text{Bi}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	8.01	$10^{-4}$ sec
Lead (Ac-B)	${}^{211}_{82}\text{Pb}$	$\longrightarrow$ ${}^{211}_{83}\text{Bi}$	$-{}^0_1e$ ( $\beta$ )	1.36	36.1 min
Bismuth (Ac-C)	${}^{211}_{83}\text{Bi}$	$(99+\%) \longrightarrow$ ${}^{207}_{81}\text{Tl}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	6.62	} 2.16 min
		$(0.3\%) \longrightarrow$ ${}^{211}_{84}\text{Po}$	$-{}^0_1e$ ( $\beta$ )	?	
Polonium (Ac-C')	${}^{211}_{84}\text{Po}$	$\longrightarrow$ ${}^{207}_{82}\text{Pb}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ ( $\alpha$ )	7.45	0.52 sec
Thallium (Ac-C'')	${}^{207}_{81}\text{Tl}$	$\longrightarrow$ ${}^{207}_{82}\text{Pb}$	$-{}^0_1e$ ( $\beta$ )	1.44	4.8 min
Lead (Ac-D)	${}^{207}_{82}\text{Pb}$	Stable	—	—	Infinite