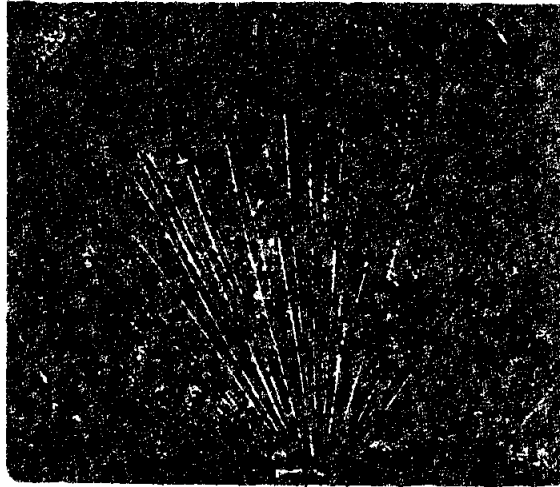


### วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้วจะสามารถ

1. อธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคแอลฟาได้
2. สร้างระดับพลังงานนิวเคลียร์จากการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา และเขียนแผนผังแสดงการสลายได้
3. อธิบายทฤษฎีการส่งอนุภาคแอลฟาได้

อนุภาคแอลฟา คือนิวเคลียสของฮีเลียม ประกอบด้วยโปรตอน 2 ตัว และนิวตรอน 2 ตัว จึงเป็นอนุภาคที่มีประจุบวก (+2e), เป็นอนุภาคที่เกิดจากการสลายของนิวเคลียสหนัก เพื่อต้องการลดประจุและมวลอย่างรวดเร็ว ความรู้ที่ได้รับจากพลังงานของอนุภาคที่ส่งออกมา ทำให้สามารถสร้างระดับพลังงานนิวเคลียร์ และหาค่ามวลทางนิวเคลียร์ได้ และยังสามารถนำไปสู่ทฤษฎีการสลายของอนุภาคอีกด้วย



รูปที่ 6.1 ภาพทางเดินของอนุภาคแอลฟา จาก  $P_{\alpha}^{210}$  ถ่ายจากห้องหมอก (Cloud Chamber)

## 6.1 การวัดความเร็วของอนุภาคแอลฟา

ความเร็วของอนุภาคแอลฟา หาได้โดยให้อนุภาคแอลฟา ผ่านไปในสนามแม่เหล็ก แนวการเคลื่อนที่จะโค้งเป็นวงกลม วัดรัศมีได้จาก

$$H q v = \frac{M v^2}{r} \quad \dots (6.1)$$

เมื่อ H เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็ก (เกาส์)

q เป็นประจุของอนุภาค (emu.) =  $\frac{esu}{C}$

M เป็นมวลของอนุภาค (กรัม)

r เป็นรัศมีทางเดินของอนุภาค (ซม.)

สมการ (6.1), เขียนใหม่คือ

$$v = \frac{q}{M} H r \quad \dots (6.2)$$

อนุภาคที่มีความเร็วเท่ากัน จะวิ่งเป็นครึ่งวงกลมด้วยรัศมีเท่ากัน มวลของอนุภาคแอลฟาหาได้ โดยนำค่ามวลของอิเล็กตรอน 2 ตัว ลบออกจากมวลของฮีเลียม

ถ้าอนุภาคมีความเร็วสูง ทำให้ค่ามวลเปลี่ยนแปลง ดังนั้น จึงต้องนำทฤษฎีสัมพัทธภาพ มาใช้ด้วย นั่นคือ

$$v = H r \frac{q}{M_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \dots (6.3)$$

และ

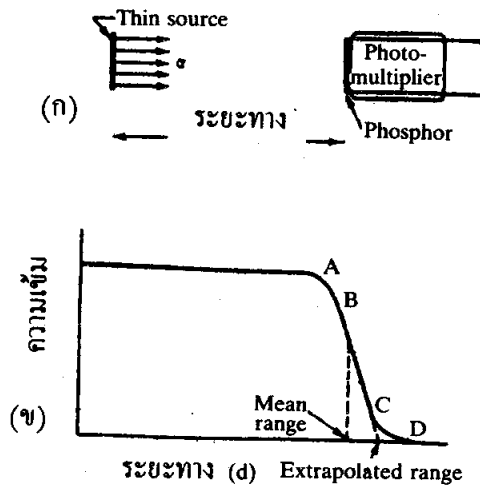
$$T = M_0 c^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right] \quad \dots (6.4)$$

เมื่อ  $M_0$  คือมวลของอนุภาคขณะอยู่นิ่ง

## 6.2 การดูดกลืนอนุภาคแอลฟา และพิสัย ที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านไปได้

### (The absorption of alpha particles and range)

ในการพิจารณาพลังงานของอนุภาคที่มีประจุ รวมทั้งอนุภาคแอลฟาด้วย จะใช้การดูดกลืนอนุภาคในสารต่างๆ อนุภาคแอลฟาเป็นอนุภาคที่มีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ ดังนั้น จึงผ่านสารไปได้ไม่ไกลนัก เมื่อให้อนุภาคแอลฟาจากตัวกำเนิดอนุภาค ผ่านตัวดูดกลืน อาจใช้อากาศหรืออะลูมิเนียม แล้วผ่านเข้าไปยังเครื่องนับ ปรากฏว่า เมื่อตัวดูดกลืนมีความหนา ค่าหนึ่ง จำนวนที่วัดได้จะมีค่าคงที่ เมื่อเพิ่มความหนาอีก จำนวนที่นับได้ จะลดลงจนเป็นศูนย์ ระยะทางซึ่งเป็นความหนานั้นเรียก พิสัยของอนุภาค (range) ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานเดิมของอนุภาค และชนิดของตัวดูดกลืน เมื่อนำพิสัยหรือระยะทางที่วัดได้มาเขียนกราฟกับค่าพลังงาน ที่หาได้จากการเบนในสนามแม่เหล็ก เรียก กราฟของพิสัย-พลังงาน (range-energy curve) เป็นวิธีที่ใช้หาพลังงานของอนุภาค



รูปที่ 6.2 (ก) แสดงการวัดระยะทางที่อนุภาคแอลฟาผ่านไปได้  
 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม และ  
 ระยะทางที่อนุภาคผ่านไปได้

การวัดระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านไปได้ในตัวกลางใด ๆ เรียกว่า พิสัยในตัวกลางนั้น หาได้จากการทดลอง ดังแสดงตามรูปที่ 6.2 โดยการใช้ไอออนไนเซชัน แคมเบอร์ เมื่ออนุภาคแอลฟาวิ่งเข้าชนสารเรืองแสง (phosphor) จะเกิดแสงวาบ ไฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะวิ่งผ่านคาโทด และหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ทำให้เกิดกระแส I โดยการสร้างกราฟตามรูป 6.2 (ข) จะได้ พิสัยจากการเอ็กซ์ทราโพลเลท (extrapolated range) บางทีอาจใช้ พิสัยเฉลี่ย (mean range) ซึ่งจะหาได้จากระยะทางที่ความเข้มลดลงเหลือเพียง 1/2 ของค่าสูงสุด ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าค่าระยะทางที่ได้จากการเอ็กซ์ทราโพลเลท เพียงเล็กน้อย

ส่วนท้ายที่เบนออก เรียก การกระจัดกระจาย (straggling) เกิดจากการชนระหว่างอนุภาคกับอะตอม เป็นแบบทางสถิติ ทั้งจำนวนอะตอมที่ถูกชน และพลังงานที่อนุภาคเสียไปต่อการชน ทำให้จำนวนไอออนแพร์ (ion pair) ที่เกิดขึ้นนั้นไม่ลดลงจนเป็นศูนย์ทีเดียว

ตารางที่ 6.1 แสดงพิสัยที่อนุภาคแอลฟาสามารถวิ่งผ่านไปได้ในอากาศ

พลังงาน (เอ็มอีวี)	พิสัย (range)	
	ชม.	นิ้ว
4.0	2.5	1.0
4.2	2.7	1.06
4.4 และ 4.6	2.9 และ 3.1	1.15 ถึง 1.2
4.8	3.3	1.3
5.1	3.6	1.4

### 6.3 การแตกตัวเป็นไอออน (Ionization)

การสูญเสียประจุของอะตอม เป็นเหตุให้เกิดไอออนแพร์ จำนวนไอออนแพร์ที่เกิดขึ้นต่อระยะทาง 1 ซม. ที่อนุภาคผ่านไป เรียก การแตกตัวจำเพาะ (specific ionization) ปริมาณนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานและชนิดของอนุภาค และตัวกลางที่อนุภาควิ่งผ่าน โดยมากมักกำหนดให้อนุภาคเสียพลังงาน 34 อิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อทำให้เกิดไอออนแพร์ 1 คู่ ในอากาศ เมื่ออนุภาคเริ่มวิ่งผ่านแก๊สจะเกิดไอออนแพร์จำนวนหนึ่ง เมื่อพลังงานของอนุภาคลดลง (ความเร็วลดลง) ทำให้มีโอกาสวิ่งผ่านอะตอมของแก๊สได้เป็นจำนวนมาก เป็นผลให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนได้มาก แต่เมื่อพลังงานต่ำลง จนไม่สามารถทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนได้ พลังงานจำนวนนั้นจะเสียให้กับอะตอมของแก๊ส ในที่สุดเมื่ออนุภาคแอลฟามีพลังงานพอเหมาะจะจับอิเล็กตรอน เพื่อเป็นอะตอมของฮีเลียม

### 6.4 อำนาจการหยุดอนุภาค (Stopping power)

อำนาจการหยุดอนุภาค หมายถึง พลังงานที่อนุภาคต้องสูญเสียไป เมื่อวิ่งผ่านตัวกลางเป็นระยะทาง 1 หน่วย เป็นปริมาณที่แสดงถึงอำนาจดูดกลืนในสารแต่ละชนิดด้วย

$$S(E) = -\frac{dE}{dx} \quad \dots (6.5)$$

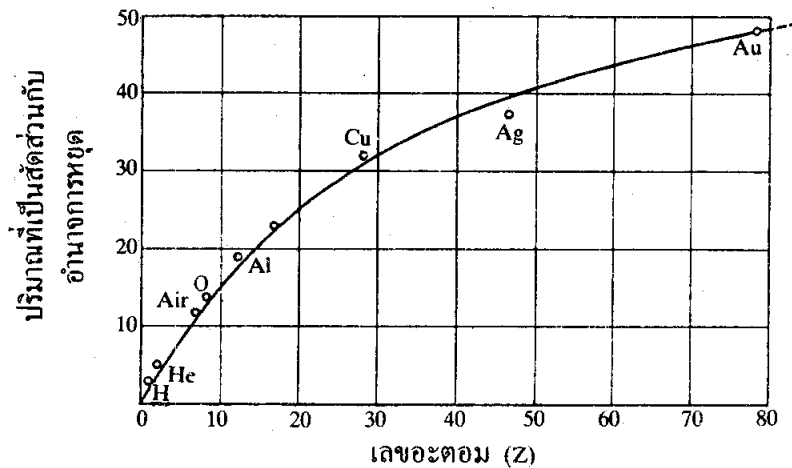
เมื่อ E คือพลังงานจลน์ของอนุภาค

ค่าอำนาจการหยุดอนุภาค แปรเปลี่ยนไปตามพลังงานของอนุภาค และมีความสัมพันธ์กับพิสัย ดังสมการ

$$R = \int_0^R dx = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S(E)} \quad \dots (6.6)$$

เมื่อ  $E_0$  เป็นพลังงานจลน์เดิม

การทดลองวัดค่าอำนาจการหยุดอนุภาค สำหรับธาตุต่างๆ โดยการวัดพลังงาน (จากการเบนในสนามแม่เหล็ก) แล้วนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟระหว่าง ปริมาณที่เป็นสัดส่วนกับค่าอำนาจการหยุดอนุภาคกับเลขอะตอม ( $Z$ ) จะได้กราฟตามรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงการแปรเปลี่ยนของค่าอำนาจการหยุดอนุภาคกับเลขอะตอม ( $Z$ )

เนื่องจากอำนาจการหยุดอนุภาค แปรเปลี่ยนไปตามความเร็วของอนุภาค จึงเป็นการสะดวกที่จะหาปริมาณที่ไม่ขึ้นกับความเร็ว โดยเรียกปริมาณนี้ว่า อำนาจการหยุดสัมพัทธ์ (Relative stopping power) ให้ความหมายว่า

$$\text{อำนาจการหยุดสัมพัทธ์} = \frac{\text{ระยะทางที่อนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ไปได้ในอากาศ}}{\text{ระยะทางที่อนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ไปได้ในสารนั้น}} \quad (6.7)$$

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าเปลี่ยนแปลง เมื่อใช้ธาตุที่มีเลขอะตอม Z ต่างกันเป็นตัวดูดกลืนอนุภาคแอลฟา

ตัวดูดกลืน	ไมกา (Mica)	อะลูมิเนียม (Al)	ทองแดง (Cu)	เงิน (Ag)	ทอง (Au)
อำนาจการหยุดสัมพัทธ์	2,000	1,600	4,000	3,700	4,800

ค่าอำนาจการหยุดอนุภาค สำหรับอากาศเท่ากับ 1

### 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยและพลังงาน (Range – energy curve)

การวัดพลังงานของอนุภาคแอลฟา มักวัดพิสัยที่อนุภาคสามารถวิ่งผ่านไปได้ในตัวกลางนั้น เพราะสะดวกกว่าการวัดความเร็วของอนุภาค โดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและพิสัยที่อนุภาควิ่งผ่านไปได้ ตามรูปที่ 6.4 จะสามารถหาค่าพลังงานของอนุภาคแอลฟาได้

ในช่วงพลังงาน 4–7 เมมอีวี พิสัยมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงาน กราฟที่ได้เป็นไปตามสมการ

$$R = 0.318 E^{3/2} \quad \dots (6.8)$$

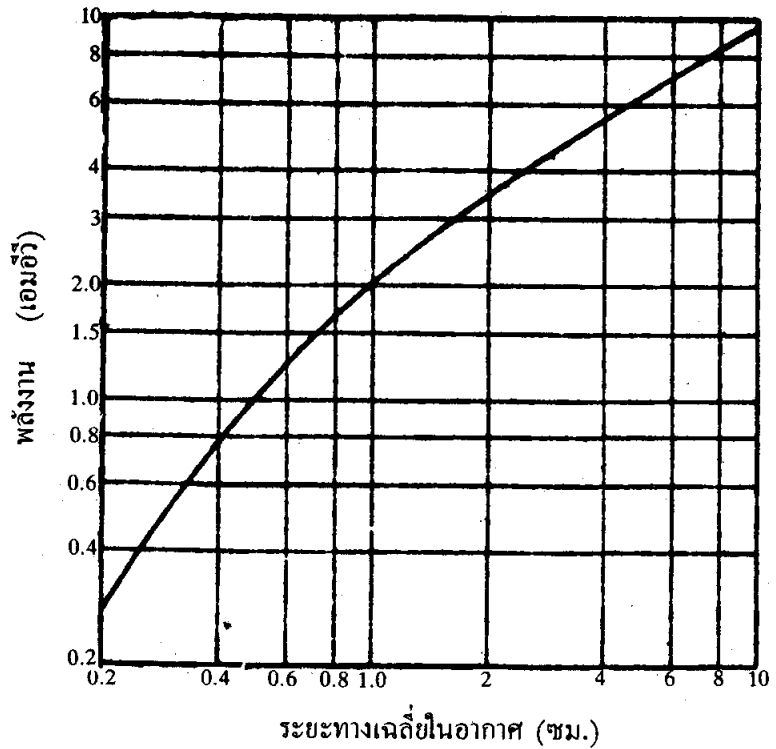
หรือ

$$E = 2.12 R^{2/3}$$

เมื่อ

R = พิสัย (ซม.) ในอากาศ

E = พลังงานเดิม (เมมอีวี)



รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พิสัย-พลังงาน  
ของอนุภาคแอลฟาในอากาศ

แบรค-คลีแมน (Bragg-Kleeman) ได้หาสูตรแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยที่อนุภาคแอลฟาผ่านไปได้ในสารใด ๆ กับในอากาศอย่างประมาณ ได้ว่า

$$R_s = \frac{3.2 \times 10^{-4} R \cdot A^{1/2}}{\rho} \quad \dots (6.9)$$

- เมื่อ  $R_s$  เป็นพิสัยในของแข็ง ความหนาแน่น  $\rho$   
 $A$  เป็นเลขมวล และ  
 $R$  คือพิสัยในอากาศ (ชม.)

สูตรสำหรับหาพิสัยสำหรับอนุภาคที่มีประจุอีกสูตรหนึ่งที่ควรทราบ คือ

$$R_{Z, M, E} = \frac{M}{Z^2} \cdot R_{p, \frac{E}{M}} \quad \dots (6.10)$$

- เมื่อ  $R_{p, \frac{E}{M}}$  คือพิสัยสำหรับโปรตอนที่มีพลังงาน  $\frac{E}{M}$   
 ในตัวกลางเดียวกัน และ



$R_{Z,M,E}$  คือพิสัยสำหรับอนุภาคที่มีประจุ  $Z$ , มวล  $M$ , และพลังงาน  $E$

ด้วยเหตุนี้ อนุภาคแอลฟาและโปรตอนที่มีความเร็วเท่ากัน จะมีระยะทางที่ผ่านไปได้เท่ากัน และอนุภาคแอลฟา จะเสียพลังงานไปเป็น 4 เท่า ของพลังงานที่โปรตอนจะต้องเสียไปเมื่อวิ่งผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน

### ตัวอย่างที่ 6.1

จงหาค่าพิสัยสำหรับอนุภาคแอลฟาพลังงาน 5 เมออีวี ในอะลูมิเนียม

อ่านค่าพิสัยในอากาศ จากรูปที่ 6.4 สำหรับอนุภาคแอลฟาพลังงาน 5 เมออีวี ได้

3.45 ซม.

$$\text{เลขมวลอะตอมของอะลูมิเนียม} = 27$$

$$\text{ความหนาแน่นของอะลูมิเนียม} = 2.7 \text{ กรัม/ซม.}^3$$

แทนค่าในสมการ (6.9) จะได้

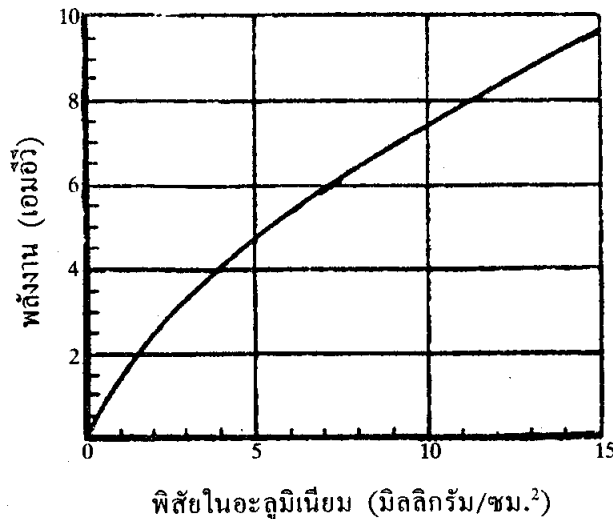
$$R_{Al} = \frac{(3.2 \times 10^{-4}) (3.45) (27)^{1/2}}{2.7}$$

$$R_{Al} = 2.12 \times 10^{-3} \text{ ซม.}$$

$$= 2.12 \times 10^{-3} \times 2.7 \times 1000$$

$$= 5.7 \text{ มิลลิกรัม/ซม.}^2$$

เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้ กับค่าที่อ่านได้จากกราฟรูปที่ 6.5 ผิดไปประมาณ 10 - 15 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.5 แสดงพิสัยที่อนุภาคแอลฟาผ่านไปได้ในอะลูมิเนียม

ยังมีความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยสำหรับอนุภาคแอลฟาในอากาศกับในเนื้อเยื่อ ซึ่งเป็นที่น่าสนใจทางการแพทย์ มีสูตรอย่างประมาณคือ

$$R_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} = R_{\text{tissue}} \cdot \rho_{\text{tissue}} \quad \dots (6.11)$$

เมื่อ  $\rho_{\text{air}} =$  ความหนาแน่นของอากาศ = 0.00129 กรัม/ซม.<sup>3</sup>  
 $\rho_{\text{tissue}} =$  ความหนาแน่นของเนื้อเยื่อ = 1 กรัม/ซม.<sup>3</sup>

### ตัวอย่างที่ 6.2

จงหาพิสัยที่อนุภาคแอลฟาพลังงาน 5 เอ็มอีวี วิ่งผ่านไปได้ในเนื้อเยื่อ ซึ่งอนุภาคแอลฟาพลังงานนี้ผ่านไปในอากาศได้ระยะทาง 3.45 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} R_{\text{tissue}} &= 0.00129 \times 3.45 \\ &= 45 \times 10^{-4} && \text{ซม.} \\ &= 45 && \text{ไมครอน} \end{aligned}$$

## 6.6 ระดับพลังงานนิวเคลียร์

### (Nuclear energy level)

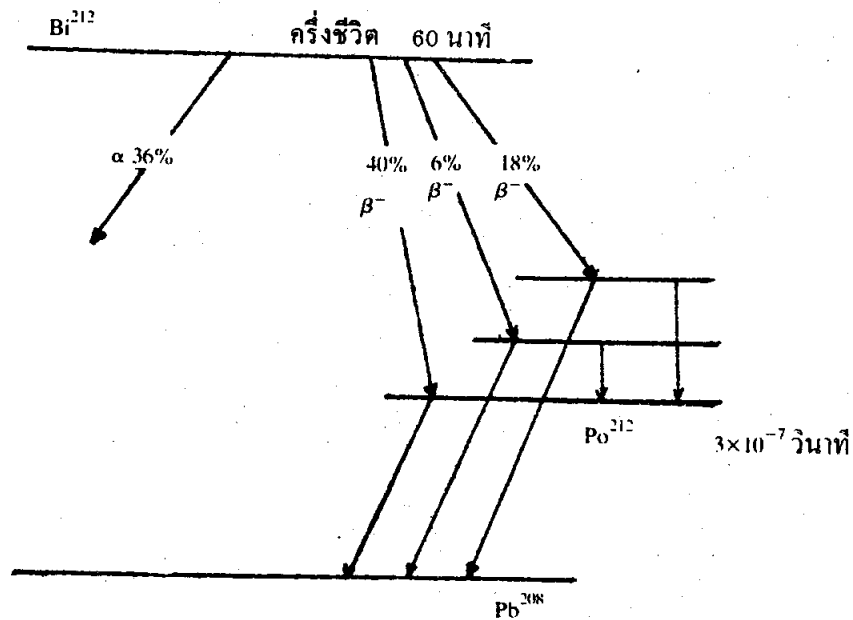
การที่นิวเคลียสส่งอนุภาคแอลฟา มีพลังงานออกมา เป็นช่วง ๆ (discrete energy) มีผู้ตั้งสมมติฐานว่า มีระดับพลังงานที่เป็นช่วง ๆ (discrete energy level) จำนวนหนึ่งอยู่ในนิวเคลียส ขณะที่นิวเคลียสนั้นอยู่ในระดับพลังงานขั้นต่ำสุด โดยที่ยังมีพลังงานที่ถูกกระตุ้นอยู่อีกในช่วงเวลาสั้น ๆ

ด้วยเหตุที่ระดับพลังงานยังอยู่ในสภาวะกระตุ้นนี้ นิวเคลียสจะส่งพลังงานออกมา โดยกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง เพื่อลดพลังงานจำนวนนี้ บางทีนิวเคลียสที่ส่งอนุภาคแอลฟาแล้ว ยังส่งรังสีแกมมาออกมาอีก พลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในกระบวนการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา เรียก พลังงานการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา  $E$  (alpha-disintegration energy) เป็นกระบวนการสลายที่ให้พลังงานจำนวนหนึ่งออกมา ตามหลักการอนุรักษ์โมเมนตัม เมื่อนิวเคลียสส่งอนุภาคแอลฟาออกมาแล้ว นิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ด้วย

ตามหลักการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$m_{\alpha} v_{\alpha} = M_r V \quad \dots (6.12)$$





รูปที่ 6.6 แสดงแผนผังการสลายของ  $\text{Bi}^{212}$  และ  $\text{Po}^{212}$

รูปที่ 6.6 แสดงการสลายของ  $\text{Bi}^{212}$  โดยการส่งอนุภาคเบตา ไปยังสถานะกราวน์ หรือสถานะที่ถูกกระตุ้น ของ  $\text{Po}^{212}$  โดยปกติแล้ว เมื่อนิวเคลียสอยู่ที่สถานะที่ถูกกระตุ้นมักจะมี การสลายต่อไปโดยการส่งรังสีแกมมา จากการสลายโดยใช้เวลาดสั้น ๆ จึงดูเหมือนกับว่า ทั้งพลังงานของอนุภาคแอลฟาและรังสีแกมมาถูกส่งออกมาพร้อม ๆ กัน

## 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและครึ่งชีวิต

รทเซอร์ฟอร์ดเป็นผู้ริเริ่มงานนี้ จากการสังเกตว่า อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานสูง มักส่งออกมาจากนิวเคลียสที่มีครึ่งชีวิตสั้น เช่น  $\text{Po}^{212}$  มีครึ่งชีวิต เท่ากับ  $3 \times 10^{-7}$  วินาที ส่งอนุภาค-แอลฟาพลังงาน 8.95 เมมอีวี แต่อนุภาคแอลฟาที่ส่งออกมาจาก  $\text{Th}^{232}$  มีครึ่งชีวิตเท่ากับ  $1.4 \times 10^{10}$  ปี มีพลังงานเพียง 4.0 เมมอีวี ถ้าจะคิดช่วงของครึ่งชีวิตที่สั้นที่สุด จนถึงยาวที่สุด คือจาก  $3 \times 10^{-7}$  จนถึง  $4 \times 10^{17}$  วินาที จะมีขนาดถึง  $10^{24}$  นับว่าเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน มาก เมื่อเทียบกับพลังงานที่เปลี่ยนไปเพียง 2 เท่านั้น

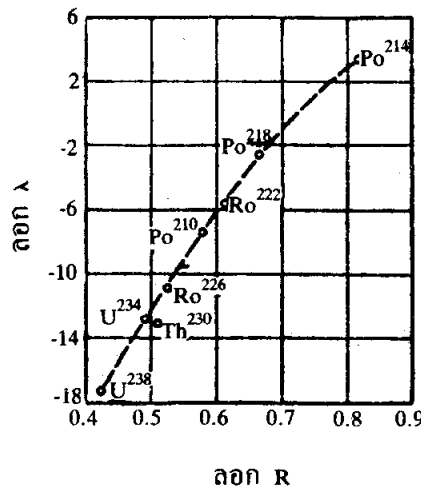
ไกเกอร์-นัททอล (Geiger - Nuttall) ได้กล่าวว่า ถ้าจะสร้างกราฟระหว่างค่าลอกของค่าคงที่ของการสลาย  $\lambda$  ในหน่วยวินาที<sup>-1</sup> กับลอกของพิสัยที่อนุภาคแอลฟาจะเคลื่อนที่ผ่านไปได้ในอากาศในหน่วยเซนติเมตรสำหรับการส่งอนุภาคแอลฟาในอนุกรมการสลายโดยการส่รังสีเดียวกัน (radioactive series) จะได้กราฟเป็นเส้นตรงขนานกัน (โดยประมาณ) ทั้งสามอนุกรมของการสลายตามธรรมชาติ กฎนี้แทนได้ด้วยสูตร

$$\log \lambda = A \log R + B \quad \dots (6.15)$$

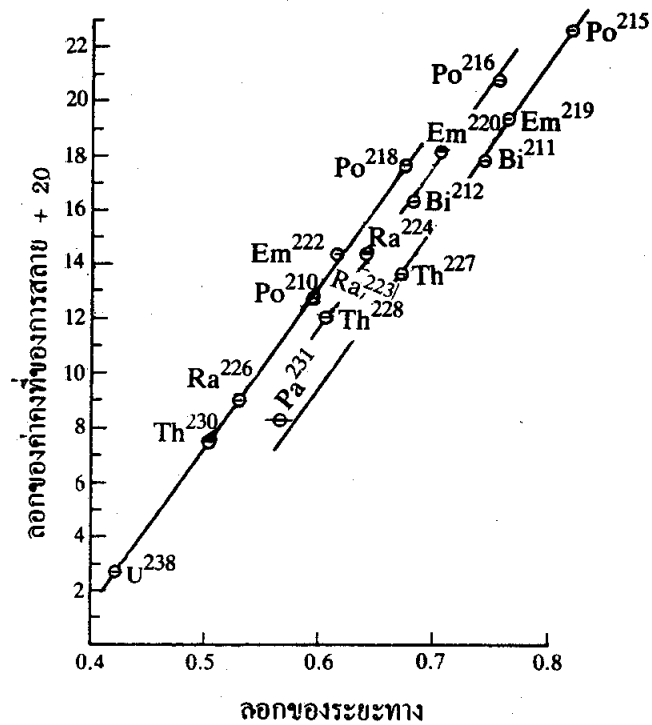
ค่าคงที่ A เป็นความชัน (Slope) ของเส้นตรง ซึ่งจะมีค่าเกือบเหมือนกันทั้งสามอนุกรม (series) แต่ B มีค่าแตกต่างกันไปดังแสดงตามรูปที่ 6.8 ค่าระยะทางเฉลี่ย (mean range) พบว่าเป็นสัดส่วนกับ  $E^{3/2}$  ตามสมการที่ (6.8) เมื่อ E เป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟา กฎของไกเกอร์ - นัททอล อาจเขียนได้อีกแบบหนึ่งคือ

$$\log \lambda = A' \log E + B' \quad \dots (6.16)$$

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างลอกของค่าคงที่ของการสลายและพลังงาน



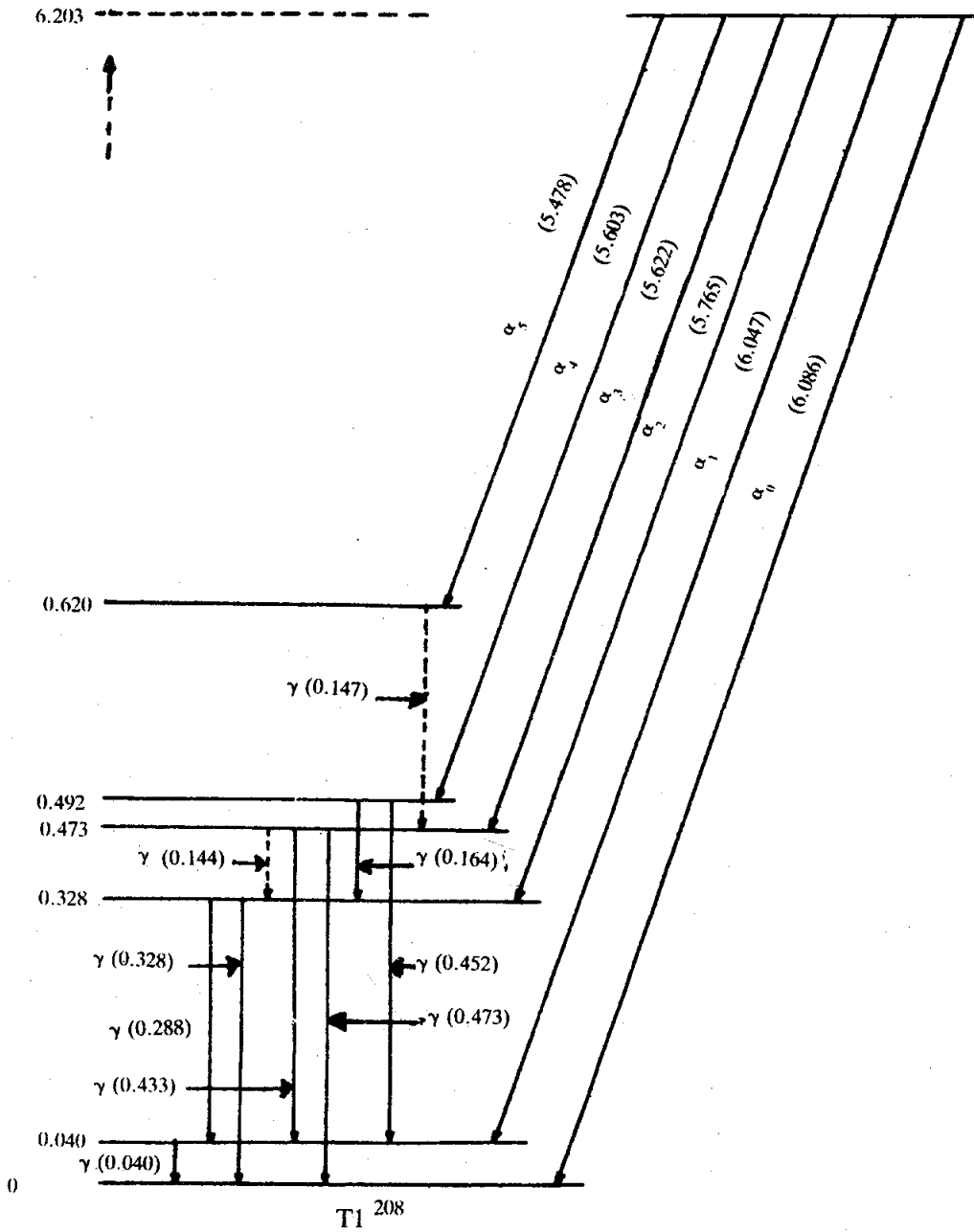
รูปที่ 6.7 กราฟที่ไกเกอร์ - นัททอล สร้างขึ้น แสดงการส่งอนุภาคแอลฟา ในอนุกรมยูเรเนียม



รูปที่ 6.8 แสดงกฎของไอเกอร์ - นัททอล

พลังงานเหนือระดับศูนย์ของ  $Tl^{208}$

$Bi^{212}$



รูปที่ 6.9 แสดงแผนผังการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟาจาก  $Bi^{212}$  ไปเป็น  $Tl^{208}$

รูปที่ 6.9 แสดงระดับพลังงานนิวเคลียร์กรณีการสลายของนิวไคลด์  $\text{Bi}^{212}$  ซึ่งจะส่งอนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานต่าง ๆ กันออกมา 6 กลุ่ม พลังงานของอนุภาคแอลฟาที่มีค่ามากที่สุดคือ กลุ่ม  $\alpha_0$  มีพลังงาน 6.086 เมออีวี หรือพลังงานการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟาจาก  $\text{Bi}^{212}$  เพื่อเป็น  $\text{Tl}^{208}$  มีค่าเท่ากับ 6.203 เมออีวี ตามสมการที่ (6.14) ทำให้  $\text{Tl}^{208}$  ที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะพลังงานต่ำสุดหรือสภาวะกราวน์ พลังงานการสลายจะเอาไปใช้เป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟาและเป็นพลังงานของนิวเคลียส  $\text{Tl}^{208}$  ในการเคลื่อนที่ถอย สมมุติว่านิวเคลียส  $\text{Bi}^{212}$  ส่งอนุภาคแอลฟาในกลุ่มที่มีพลังงาน  $\alpha_1$  พลังงาน 6.047 เมออีวี ซึ่งมีค่าพลังงานการสลาย 6.163 เมออีวี หรือมีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานการสลายที่มีค่าสูงสุด 0.040 เมออีวี พลังงานที่เหลืออยู่นี้จะทำให้  $\text{Tl}^{208}$  อยู่ที่สภาวะถูกกระตุ้น จึงกลับสู่สภาวะกราวน์ โดยการส่งรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของรังสีแกมมาพลังงาน 0.040 เมออีวี ในการสลายจาก  $\text{Bi}^{212}$  ไปเป็น  $\text{Tl}^{208}$  จึงพบ  $\text{Tl}^{208}$  เหนือระดับกราวน์ 5 สภาวะ ในการทดลองพบรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ กัน คือ 0.040, 0.144, 0.164, 0.288, 0.328, 0.433, 0.452 และ 0.473 เมออีวี ตามลำดับ รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจะต้องตรงตามหลักเกณฑ์ที่เป็นไปได้ในการที่จะกระโดดจากสภาวะหนึ่งไปเป็นอีกสภาวะหนึ่ง พลังงานของรังสีแกมมาที่ส่งออกมาก็คือค่าพลังงานที่แตกต่างกันระหว่าง 2 สภาวะพลังงาน สเปกตรัมของอนุภาคแอลฟาจาก  $\text{Bi}^{212}$  ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 แสดงสเปกตรัมของอนุภาคแอลฟาจาก  $\text{Bi}^{212}$

กลุ่ม	พลังงานของอนุภาคแอลฟา (เมออีวี)	พลังงานการสลาย (เมออีวี)	ค่าแตกต่างของพลังงานการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟาจากกลุ่ม $\alpha_0$ (เมออีวี)
$\alpha_0$	6.086	6.203	0.000
$\alpha_1$	6.047	6.163	0.040
$\alpha_2$	5.765	5.875	0.328
$\alpha_3$	5.622	5.730	0.473
$\alpha_4$	5.603	5.711	0.492
$\alpha_5$	5.478	5.583	0.62



## 6.9 ทฤษฎีการส่งอนุภาคแอลฟา (Theory of alpha emission)

โดยการใช้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานสูง จากการสลายของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ มีพลังงานประมาณ 9 เมออีวี ยิ่งเข้าไปใน  $U^{238}$  อนุภาคจะเข้าไปใกล้นิวเคลียสที่สุดประมาณ  $3 \times 10^{-14}$  เมตร เท่านั้น เพราะพลังงานที่มีอยู่ ไม่มากพอที่จะเอาชนะพลังงานกุดอมบ์ได้ พลังงานศักย์ (potential energy) ของอนุภาคแอลฟาในสนามของนิวเคลียส ยังคงใช้สูตรของกุดอมบ์ คือ

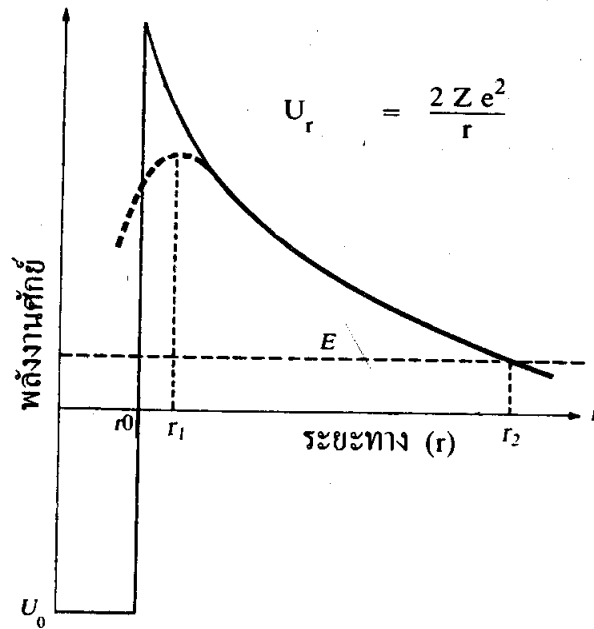
$$U_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r} \quad \dots (6.17)$$

$Z$  = คือเลขอะตอมของนิวเคลียส

พลังงานศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะทาง  $r$  มีค่าน้อยลง และเมื่อใกล้แก่นกลางของนิวเคลียส กฎของกุดอมบ์ก็ใช้ไม่ได้อีกต่อไป โดยมีศักดาที่คอยผลักไม่ให้อนุภาคเข้าไปในนิวเคลียส เรียกกำแพงศักย์ (potential barrier)

แต่พบว่า นิวเคลียสของยูเรเนียม ส่งอนุภาคแอลฟาออกมา มีพลังงานประมาณ 4 เมออีวี เท่านั้น จึงเป็นการยากที่จะเข้าใจว่า อนุภาคที่อยู่ในนิวเคลียส มีพลังงานพอที่จะผ่านกำแพงศักย์ออกมาได้อย่างไร ตามฟิสิกส์แผนเดิม ไม่สามารถจะอธิบายปัญหานี้ได้

ตามรูปจะเห็นว่า พลังงานศักย์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จาก  $r_2$  จนถึง  $r_1$  แสดงว่า แรงผลักเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคเข้าใกล้นิวเคลียส ใกล้นิวเคลียสเข้าไปจนถึงภายใน รูปร่างของพลังงานศักย์ที่แท้จริงยังไม่มีใครทราบ แต่พลังงานกุดอมบ์จะสิ้นสุดลง และมีศักดาชนิดดึงดูด (attractive potential) เกิดขึ้นแทน การกระทำระหว่างนิวเคลียสและอนุภาคแอลฟาในขอบเขตของความไม่แน่นอนนี้ อาจแทนได้โดยใช้ค่าพลังงานศักย์ชนิดดึงดูดที่มีค่าคงที่เป็น  $U_0$  กระทำตลอดระยะ  $r_0$  เรียกรัศมีแท้จริง (effective radius) ของนิวเคลียส ศักดาชนิดนี้มักกล่าวกันว่าเป็นบ่อศักดา (potential well) ลึก  $U_0$  และมีความกว้างเป็นระยะทาง  $r_0$  ภายใต้กลศาสตร์แผนเดิม อนุภาคแอลฟาจะต้องอยู่ในบ่อนี้ด้วยพลังงานจลน์  $E - U$  (เมื่อ  $E$  เป็นพลังงานการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา) ในการหนีออกจากนิวเคลียส อนุภาคแอลฟาจะต้องมีพลังงานจลน์อย่างน้อยเท่ากับค่าพลังงานศักย์สูงสุดของกราฟที่แสดงไว้ เช่นเดียวกับเมื่ออนุภาคแอลฟาจะเข้าไปในนิวเคลียส จะทะลุผ่านไปได้เมื่อมีพลังงานจลน์มากพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ได้เท่านั้น



รูปที่ 6.10 การส่งอนุภาคแอลฟา แสดงพลังงานศักย์ของนิวเคลียสและอนุภาคแอลฟา เป็นฟังก์ชันของระยะทาง

จากกราฟรูปที่ 6.10 มีเขตที่น่าสนใจคือ

- 1) ในเขตที่เป็นทรงกลม  $r < r_0$  คืออยู่ในนิวเคลียส มีบ่อศักย์ (potential well) ลึก  $U_0$  ตามฟิสิกส์แผนเดิม อนุภาคแอลฟาจะเคลื่อนที่อยู่ในเขตนี้ ด้วยพลังงานจลน์  $E - U$  แต่ก็ไม่สามารถหนีออกมาได้
- 2) เขตที่เป็นวงแหวน  $r_0 < r < r_2$  เกิดกำแพงศักย์ เขตนี้พลังงานศักย์มากกว่าพลังงานในการสลายทั้งหมด  $E$  ตามหลักฟิสิกส์แผนเดิม อนุภาคแอลฟาไม่สามารถเข้าไปในเขตนี้ได้ ไม่ว่าจะมาจากทิศทางใด พลังงานจลน์จะมีค่าเป็นลบ
- 3) เขตที่  $r > r_2$  ตามหลักฟิสิกส์แผนเดิม ถือเป็นเขตที่อยู่นอกกำแพง (barrier)

จากหลักการที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่า อนุภาคแอลฟาในเขต (1) จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา และพยายามผ่านตำแหน่ง  $r = r_0$  ตามกลศาสตร์ควอนตัมถือว่าอนุภาคเหล่านี้มีโอกาสที่จะหนีออกจากกำแพงได้ เรียกรั่ว (leakage) หรือการลอดอุโมงค์ออกมา (tunnel effect)

จากความจริงที่ว่า นิวคลีไอที่สลายโดยให้อนุภาคแอลฟาจะไม่สลายทันทีทันใด อนุภาคแอลฟาภายในนิวเคลียสจะปรากฏตัวเองครั้งแล้วครั้งเล่าที่ตรงผิวกำแพง เพื่อจะหาทางทะลุทะลวงออกมา

ในการพิจารณาการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา พบว่าอนุภาคแอลฟา มีโอกาสที่จะหนีออกมาจากกำแพงศักย์ได้ แม้ว่าพลังงานจะน้อยกว่าพลังงานศักย์ที่ยอดของกำแพงศักย์ เพราะอนุภาคที่มาถึงกำแพงแล้ว ไม่จำเป็นต้องสะท้อนกลับ อาจจะผ่านกำแพงออกไปโดยเคลื่อนที่ต่อไปเรื่อย ๆ จำนวนครั้งที่อนุภาคปรากฏตัวที่กำแพงศักย์หาได้อย่างหยาบ ๆ จาก

$$\omega = \frac{v}{r} \quad \dots (6.18)$$

เมื่อ  $v$  เป็นความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาคแอลฟา ขณะวิ่งกลับไปกลับมาในนิวเคลียส มีค่าเท่ากับ  $v_{\alpha} \left(1 + \frac{m_{\alpha}}{M_r}\right)$

ถ้า  $E_k$  เป็นพลังงานจลน์ของระบบ  
จากสูตร

$$v = \left[ \frac{2 E_k}{m} \right]^{1/2} \quad \dots (6.19)$$

เมื่อ  $m$  เป็นมวลลดลง (reduced mass) ของอนุภาคในนิวเคลียสที่เหลืออยู่ หามวล  $m$  ได้โดยพิจารณาจากระบบที่มี 2 อนุภาค มวล  $m_1$  และ  $m_2$

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$$

$$m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

ถ้า  $E_k = 10$  เมมอีวี,  $m_1 = 4$ ,  $m_2 = 238$

$m = 6.29 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม

$v = 1.78 \times 10^7$  เมตร/วินาที

$r = 9.29 \times 10^{-15}$  เมตร

จากสมการ (6.18),

$\omega \approx 2 \times 10^{21}$  ครั้ง/วินาที

### ตัวอย่างที่ 6.4

จงคำนวณหาค่ากำแพงศักย์ของนิวไคลด์  ${}_{92}\text{U}^{238}$  สำหรับอนุภาคแอลฟา, รัศมีของนิวไคลด์หาได้จาก  $r = 1.5 \times 10^{-15} A^{1/3}$  เมตร,  $238^{1/3} = 6.197$

$$U_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r}$$

$$r = 1.5 \times 10^{-15} \times 238^{1/3} = 1.5 \times 6.197 \times 10^{-15} = 9.295 \times 10^{-15} \text{ เมตร,}$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ คูลอมป์}$$

$$= \frac{9 \times 10^9 \times 2 \times 92 \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{9.295 \times 10^{-15} \times 1.6 \times 10^{-13}}$$

$$= 28.5 \text{ เอมอีวี}$$

ยอดกำแพงศักย์สูงถึงประมาณ 29 เอมอีวี นับว่าสูงกว่าพลังงานการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟามาก

## 6.10 การหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่อนุภาคแอลฟาวิ่งมาปรากฏตัวที่กำแพง เพื่อหนีออกมา กับโอกาสที่จะหนีออกมาได้

กาโมว์ (Gamow) ได้แสดงสูตรสำหรับการส่งอนุภาคแอลฟาในเทอมของค่าคงที่ของการสลาย ดังนี้

$$\ln \lambda = \ln \left( \frac{h}{4m r_0^2} \right) - \frac{8 \pi^2 e^2 Z'}{h v_c} + \frac{16 \pi e}{h} \sqrt{m r_0 Z'} \quad \dots (6.20)$$

เมื่อ

$\lambda$  = ค่าคงที่ของการสลาย

$m$  = มวลของอนุภาคแอลฟา

$r_0$  = รัศมีของนิวเคลียสที่แท้จริงสำหรับการส่งอนุภาคแอลฟา

$v_c$  = ความเร็วของอนุภาคแอลฟาที่สัมพันธ์กับนิวเคลียสที่เหลือ =  $v_\alpha \left( 1 + \frac{M_\alpha}{M_r} \right)$

$Z'$  = ประจุของนิวเคลียสที่เหลืออยู่

เมื่อแทนค่าลงในสมการ (6.20) จะได้

$$\log \lambda = -3.61 - 2 \log r_0 - 1.192 \times 10^9 \frac{Z'}{v_c} + 4.10 \times 10^6 \sqrt{Z' r_0} \quad \dots (6.21)$$

เป็นการหาค่าคงที่ของการสลาย สำหรับการส่งอนุภาคแอลฟาอย่างหยาบ ๆ

ตัวอย่างที่ 6.5

จงหาครึ่งชีวิตของ  $U^{238}$  โดยใช้ความสัมพันธ์ที่กาโมว์ได้ให้ไว้ โดยการวัดพิสัยของอนุภาคแอลฟา พบว่ามีความเร็ว  $1.42 \times 10^9$  ซม./วินาที

$$r_0 = 1.4 (238)^{1/3} = 8.66 \quad \text{เฟอร์มี}$$

$$v_c = 1.42 \times 10^9 \times \frac{238}{234} = 1.44 \times 10^9 \quad \text{ซม./วินาที}$$

$$\begin{aligned} \log \lambda &= -3.61 - 2 \log (8.66 \times 10^{-13}) - \frac{1.192 \times 10^9 \times 90}{1.44 \times 10^9} \\ &\quad + 4.10 \times 10^6 (90 \times 8.66 \times 10^{-13})^{1/2} \end{aligned}$$

$$= -3.61 + 26.00 - 2 \log 8.66 - 74.58 + 4.10 \times 8.85$$

$$= -80.07 + 62.21$$

$$= -17.86$$

$$\lambda = 1.4 \times 10^{-18} \quad \text{วินาที}^{-1}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{1.4 \times 10^{-18}}$$

$$= 4.9 \times 10^{17} \quad \text{วินาที}$$

$$= 1.6 \times 10^{10} \quad \text{ปี}$$





## แบบฝึกหัดบทที่ 6

- 6.1 จงอธิบายทฤษฎีการส่งอนุภาคแอลฟา แต่เพียงย่อ ๆ
- 6.2 จงหาพลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟา ในปฏิกิริยา  $\text{Li}^6(n, \alpha)$  โดยใช้เทอร์มอลนิวตรอน เมื่อวัดพลังงานของอนุภาคแอลฟาในแนวทำมุม  $90^\circ$  กับทิศทางการเคลื่อนที่ของนิวตรอน
- 6.3 จงหาค่าควิ ในปฏิกิริยา  ${}_3\text{Li}^7(p, \alpha){}_2\text{He}^4$  และหาพลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟา ถ้าโปรตอนมีพลังงาน 440 เคอีวี กำหนดมุมที่อนุภาคแอลฟากระเด็นออกมาเท่ากับ  $90^\circ$  จากทิศทางเดิม
- 6.4 จงหาค่าควิที่เกิดขึ้น ในปฏิกิริยา
- (ก)  $\text{Be}^8(\alpha)\alpha$
  - (ข)  $\text{Li}^5(\alpha)\text{H}^1$
  - (ค)  $\text{He}^5(\alpha)n^1$
- 6.5 อนุภาคแอลฟาที่ส่งออกมาจากนิวไคลด์  $\text{Po}^{214}$  มีพลังงาน 7.68 เมอีวี จงหาพลังงานทั้งหมดในการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา
- 6.6 จงหาพลังงานในการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา เมื่อวัดพลังงานของอนุภาคแอลฟาที่ส่งออกมาจาก  $\text{Po}^{210}$  ได้ 5.3 เมอีวี ถ้ากำหนดมวลของ  $\text{Pb}^{206} = 205.97446$  เอเอมยู จงหาค่ามวลของ  $\text{Po}^{210}$
- 6.7 จงคำนวณหาค่ากัมพียงศักย์ สำหรับ  $\text{Po}^{212}$  ในการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา
- 6.8 การส่งอนุภาคแอลฟา จากไอโซโทปของธอเรียม แสดงได้ด้วยสมการ

$$\log \lambda = 56.13 - \frac{105.07 \times 10^9}{v_\alpha}$$

พลังงานของอนุภาคแอลฟา จาก  $\text{Th}^{224} = 7.33$  เมอีวี, จงหาครึ่งชีวิตของ  $\text{Th}^{224}$  จากสูตรข้างบน



6.9 นิวไคลด์  $U^{233}$  ส่งอนุภาคแอลฟา มีพลังงานจลน์ 4.816, 4.773, 4.717, 4.655, 4.582 และ 4.489 เมออีวี ตามลำดับ จงหาพลังงานทั้งหมดในการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา และสร้างแผนผังการสลาย

6.10 โดยใช้สูตร  $V_r = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}$

เมื่อ  $Z_1 e$  เป็นประจุของนิวเคลียส รัศมี  $r$

$Z_2 e$  เป็นประจุบวกของอนุภาค

และ  $r = 1.5 \times 10^{-15} A^{1/3}$  เมตร

เมื่อ  $A$  = เลขมวลของนิวเคลียส

จงหาความสูงของกำแพงศักย์ สำหรับอนุภาคแอลฟา และโปรตอน สำหรับ  ${}_{10}Ne^{20}$ ,  ${}_{50}Sn^{112}$  และ  ${}_{90}Th^{232}$