

บทที่ 7

การสลายโดยการส่งอนุภาคเบตา

BETA-DECAY

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้จะสามารถ

1. อธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคเบตาได้
2. คำนวณหาพลังงานการสลาย โดยการส่งอนุภาคเบตา และมีรังสีแกมมาออกมาด้วย และหามวลของนิวไคลด์ใหม่ที่เกิดขึ้นได้
3. เขียนแผนผังแสดงระดับพลังงานในการสลายโดยการส่งอนุภาคเบตาได้

ในบทที่ 6 ได้ศึกษาการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟาจากนิวไคลด์หนัก ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติ, โครงสร้าง และเขียนแผนผังการสลายได้ ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีการส่งอนุภาคเบตา จะนำไปสู่การสร้างระดับพลังงานนิวเคลียร์ และแผนผังการสลายได้เช่นกัน

นิวไคลด์ส่วนมาก สลายโดยการส่งอิเล็กตรอน, โพซิตรอนและการจับอิเล็กตรอน มากกว่าการส่งอนุภาคแอลฟา เป็นผลให้เกิดธาตุใหม่อย่างมากมาย และไม่เจาะจงว่าจะต้องเป็นนิวไคลด์ที่มีมวลหนักจึงสลายได้โดยวิธีนี้

พลังงานของอนุภาคที่วัดได้ในการสลายโดยการส่งอนุภาคเบตาเป็นสเปกตรัมของพลังงาน คุณสมบัติที่สำคัญคือ การสลายโดยการส่งอนุภาคเบตา เป็นการสลายจากนิวเคลียส มีการแจกแจงพลังงานเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous energy spectrum)

7.1 ความเร็วและพลังงานของอนุภาคเบตา

ความเร็วของอนุภาคเบตา วัดได้จากการเบนทางเดินของอนุภาคในสนามแม่เหล็ก อนุภาคเบตาที่ส่งจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามธรรมชาติ มักมีความเร็วสูงถึง 0.99 ของความเร็วแสง โดยทั่วไปแล้ว พลังงานของอนุภาคเบตา ทั้งอิเล็กตรอนและโพซิตรอนมักจะมีพลังงานน้อยกว่าพลังงานของอนุภาคแอลฟาที่ส่งออกมาจากนิวไคลด์กัมมันตรังสี เช่น อนุภาคเบตาจะมีพลังงานน้อยกว่า 4 เมออีวี ขณะที่อนุภาคแอลฟามีพลังงานมากกว่า 4 เมออีวี เนื่องจากอนุภาคเบตามีมวลน้อยกว่า ดังนั้น เมื่อมีพลังงานเท่ากัน อนุภาคเบตาจึงเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าอนุภาคแอลฟา อนุภาคแอลฟาพลังงาน 4 เมออีวี มีความเร็ว 0.05 ของความเร็วแสง แต่อิเล็กตรอนที่มีพลังงาน 4 เมออีวี จะมีความเร็วเกือบ 0.995 ของความเร็วแสง ด้วยเหตุนี้ ในการคำนวณ จึงต้องนำค่าสัมพัทธภาพมาใช้

จาก

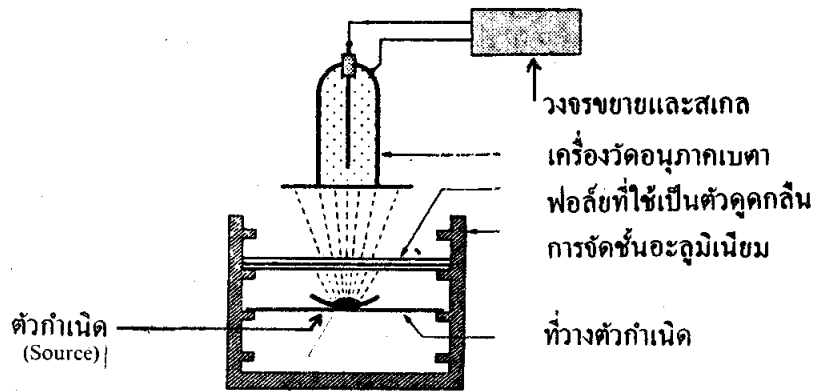
$$v = H\gamma \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \dots(7.1)$$

และ

$$T = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right] \quad \dots(7.2)$$

เมื่อ m_0 เป็นมวลของอิเล็กตรอนขณะอยู่นิ่ง และ

- e เป็นขนาดของประจุของอิเล็กตรอน
 m_0c^2 คือพลังงานของอิเล็กตรอนเนื่องจากมวลขณะอยู่นิ่ง มีค่า 0.511 เมมอีวี

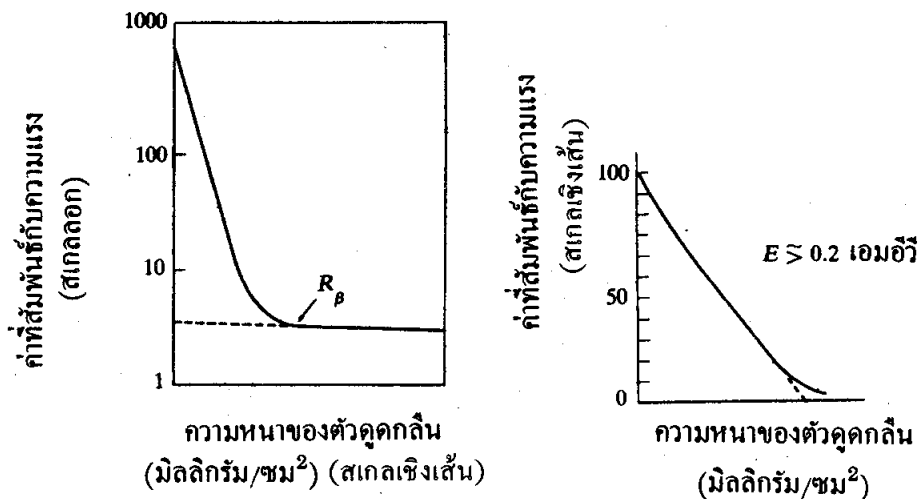


รูปที่ 7.1 แสดงการจัดเครื่องมือ เพื่อวัดการดูดกลืนอนุภาคเบตา

7.2 การดูดกลืนอนุภาคเบตา และพิสัยที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านไปได้

(The absorption of beta particles and range)

ถ้าจะเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา กับอนุภาคเบตา เมื่อวิ่งผ่านสาร จะเห็นว่า อนุภาคแอลฟามีทิศทางการเคลื่อนที่เกือบเป็นเส้นตรง จึงหาพิสัยสำหรับแต่ละพลังงานได้อย่างถูกต้อง ส่วนอนุภาคเบตา เมื่อชนกับอะตอมของสาร จะมีการกระเจิง และเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิต ระหว่างอะตอมของสารกับอิเล็กตรอน ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนไป จะเห็นว่า อนุภาคเบตาที่วิ่งผ่านความหนาของตัวดูดกลืนที่เท่า ๆ กัน ทิศทางที่อนุภาคเบตา วิ่งออกมาจากตัวดูดกลืน จะต่างกันไป ด้วยเหตุนี้ จึงไม่สามารถหาพิสัยได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 7.2 แสดงการดูดกลืนอนุภาคเบตา

จากรูปที่ 7.2 จำนวนอนุภาคเบตาที่วัดได้ เมื่อตัวดูดกลืนมีความหนาต่าง ๆ กัน มีค่าลดลงเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล นั่นคือ

$$A(x) = A_0 e^{-\mu x} \quad \dots(7.3)$$

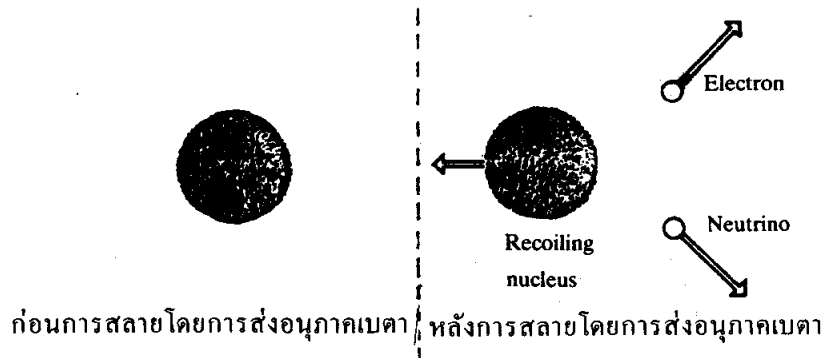
- เมื่อ A_0 เป็นความแรงเมื่อไม่มีตัวดูดกลืน
- $A(x)$ เป็นความแรงเมื่ออนุภาควิ่งผ่านตัวดูดกลืนความหนา x
- μ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient)

ความแรงจะไม่ลดลงเป็นศูนย์ เมื่อตัวดูดกลืนมีความหนามากพอ เนื่องจากค่าที่เรียกแบกกราวน์ (background) เป็นความแรงที่มีอยู่เดิมตามธรรมชาติ ณ ที่แห่งนั้น เป็นรังสีที่เครื่องนับ จะนับค่าความแรงได้ โดยไม่ต้องมีตัวกำเนิดเบตา ดังแสดงในกราฟรูปที่ 7.2

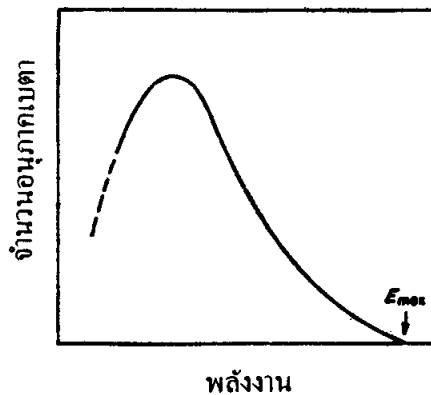
7.3 การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเบตา

อนุภาคเบตาที่ส่งออกมาจากสารกัมมันตรังสี มีลักษณะการแจกแจงพลังงานแบบต่อเนื่อง (continuous distribution of energies) เป็นสเปกตรัมของพลังงานแบบต่อเนื่อง (continuous energy spectrum) มีพลังงานสูงสุด เป็นค่าเฉพาะของแต่ละตัวกำเนิด ดังรูปที่ 7.4 ค่าเฉลี่ยของพลังงานของอนุภาคที่ส่งออกมา จะมีค่าเพียงหนึ่งในสามของค่าพลังงานสูงสุด

การที่นิวไคลด์จะส่งอนุภาคเบตาออกมา เชื่อว่า มีอนุภาคนิวตริโนเกิดขึ้น พลังงานทั้งหมดจึงต้องแบ่งปันกันระหว่างอนุภาคเบตากับนิวตริโน การแบ่งปันไม่มีสัดส่วนที่แน่นอน เชื่อว่า อนุภาคเบตาเข้าไปเพียงหนึ่งในสาม ส่วนนิวตริโนจะพาพลังงานส่วนที่เหลือ คือ สองในสามของพลังงานทั้งหมดออกไป



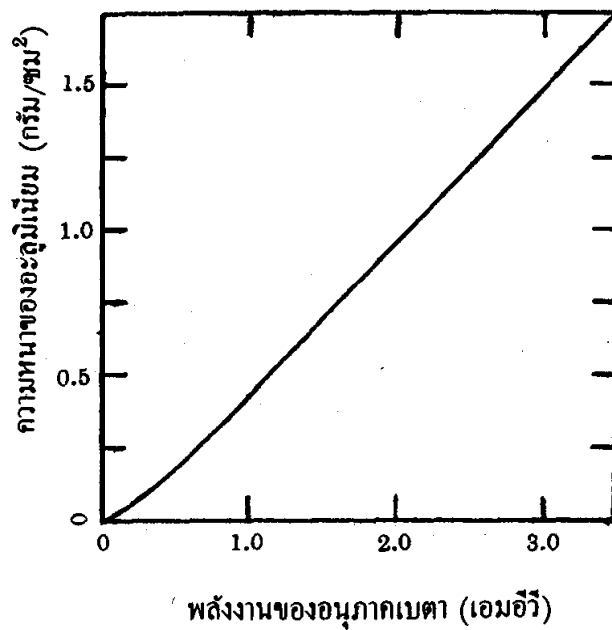
รูปที่ 7.3 แสดงการสลายโดยการส่งอนุภาคเบตา



รูปที่ 7.4 แสดงสเปกตรัมของพลังงานของอนุภาคเบตา

7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัย และพลังงาน ของอนุภาคเบตา

พิสัยที่อนุภาคเบตาผ่านไปได้ ในสารดูดกลืนใด มักกล่าวในเทอมของความหนาของตัวกลางที่สามารถจะกั้นอนุภาคได้ มักใช้ระยะทาง (ซม.) \times ความหนาแน่น (กรัม/ซม.³) เรียกความหนาที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่น (thickness density) มีหน่วยเป็น กรัม/ซม.² โดยการใช้ตัวกำหนดที่ให้พลังงานต่าง ๆ กันหลายชนิด และใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวดูดกลืน จะได้ความสัมพันธ์ดังกราฟ



รูปที่ 7.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของอะลูมิเนียม (กรัม/ซม.²) กับพลังงานของอนุภาคเบตา (เอมอีวี)

ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยกับพลังงาน ในช่วงพลังงาน 0.8 ถึง 3 เอมอีวี (กราฟเป็นเส้นตรง) เป็นไปดังสมการ

$$R \times \rho \text{ (กรัม/ซม.}^2\text{)} = 0.54E_m - 0.15 \quad \dots(7.4)$$

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าประมาณของพิสัยที่อนุภาคเบตาผ่านไปได้ในอากาศ

พลังงานสูงสุด E_m (เอมอีวี)	พิสัย	
	เมตร	ฟุต
0.1	0.11	0.36
0.5	1.5	4.9
1.0	3.7	12.0
2.0	8.5	28.0
3.0	13.0	43.0

พลังงานสูงสุดของอนุภาคเบตาที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว ประมาณ 1.2 เอมอีวี ในการคำนวณจึงคิดว่าพลังงานสูงสุดของอนุภาคเบตา ไม่ควรสูงกว่า 3 เอมอีวี

ตัวอย่างที่ 7.1

จงหาพิสัยสูงสุดที่อนุภาคเบตาจะผ่านไปได้ จากธาตุที่เกิดหลังการแบ่งแยกตัวเมื่ออนุภาคเบตาวิ่งผ่านคอนกรีต ความหนาแน่น 2.8 กรัม/ซม.³

อนุภาคเบตาที่ส่งออกมาจากธาตุที่เกิดหลังการแบ่งแยกตัว จะมีพลังงานไม่มากกว่า 3 เอมอีวี จึงใช้สูตร

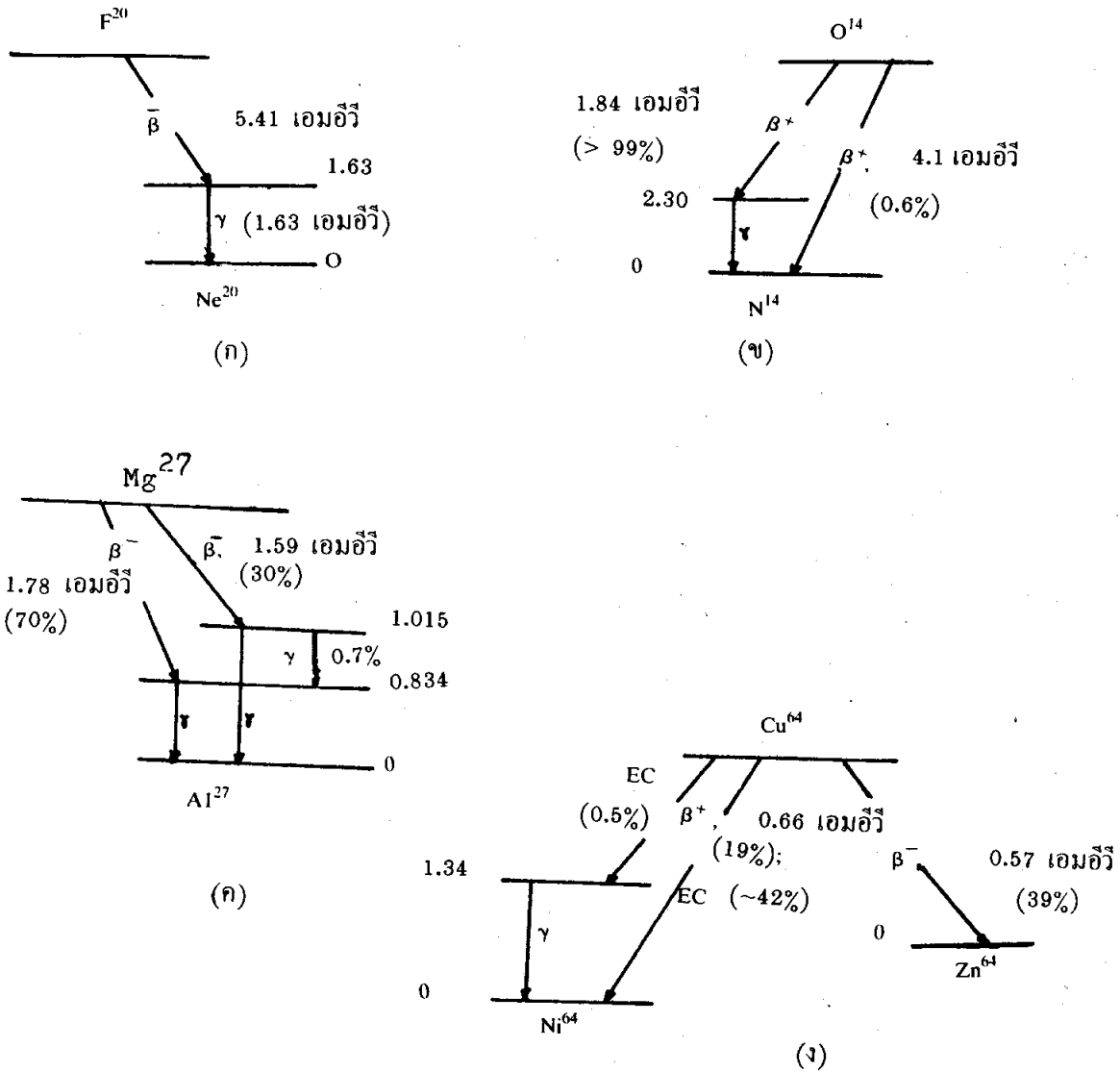
$$R \text{ (ซม.)} \times \rho \text{ (กรัม/ซม.}^3\text{)} = 0.54 \times 3 - 0.15 = 1.47$$

อนุภาคเบตาวิ่งผ่านคอนกรีต ความหนาแน่น 2.8 กรัม/ซม.³ ได้พิสัย

$$R = \frac{1.47}{2.8} = 0.53 \text{ ซม.}$$

นั่นคือ พิสัยที่ผ่านไปได้สูงสุดประมาณ 0.53 ซม. หรือประมาณ 0.21 นิ้ว

7.5 ระดับพลังงาน และแบบแผนแสดงการสลาย (Energy levels and decay schemes)



รูปที่ 7.6 แสดงแผนผังการสลายสำหรับการส่งอนุภาคเบตา

การเปลี่ยนแปลงโดยการส่งอนุภาคเบตา บางทีจะมีรังสีแกมมาออกมาด้วย และการส่งรังสีแกมมา แสดงว่านิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่ ยังอยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้นและจะกลับสู่สภาวะกราวน์ โดยการส่งรังสีแกมมา แต่ถ้าไม่มีรังสีแกมมา แสดงว่าเมื่อส่งอนุภาคเบตาแล้ว จะได้นิวเคลียสใหม่อยู่ที่สภาวะกราวน์

ในกรณีการสลายของ O^{15} โดยการส่งโพซิตรอน และไม่พบรังสีแกมมา พลังงานของอนุภาคคือ 1.73 เมออีวี พลังงานการสลายสำหรับการส่งอนุภาคเบตา คือ $1.73 + 1.02 = 2.75$ เมออีวี ทั้งนี้เนื่องจากการส่งโพซิตรอน จำเป็นต้องใช้มวลอิเล็กตรอน 2 ตัว ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ค่าแตกต่างระหว่างพลังงานที่สภาวะกราว์นซ์ของ O^{15} และ N^{15} คือ 2.75 เมออีวี ซึ่งเป็นพลังงานที่มีค่าเท่ากับค่าแตกต่างระหว่างมวลของนิวไคลด์ที่จะสลายและนิวไคลด์ที่เกิดขึ้นใหม่

การสลายของ F^{20} โดยการส่งอิเล็กตรอน วัดพลังงานได้ 5.41 เมออีวี และมีรังสีแกมมาพลังงาน 1.63 เมออีวี ออกมาด้วย พลังงานทั้งหมดสำหรับการสลายคือ $5.41 + 1.63 = 7.04$ เมออีวี และนิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นคือ Ne^{20} มีพลังงานที่ถูกกระตุ้น = 1.63 เมออีวี เหนือสภาวะกราว์นซ์ ดังแสดงในรูปที่ 7.6

บางที่มีอนุภาคเบตาส่งออกมา 2 กลุ่ม และยังมีรังสีแกมมาอีก เช่น ในกรณี O^{14} มีประมาณ 99% ที่ส่งโพซิตรอน ที่มีพลังงาน 1.84 เมออีวี และรังสีแกมมา พลังงาน 2.30 เมออีวี พลังงานทั้งหมดของการสลาย = $1.84 + 1.02 + 2.30 = 5.16$ เมออีวี พลังงานที่ต่างกันระหว่างสภาวะกราว์นซ์ของ O^{14} และสภาวะที่ถูกกระตุ้นของนิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่ N^{14} คือ 2.86 เมออีวี นิวเคลียส N^{14} จะกลับสู่สภาวะกราว์นซ์ โดยการส่งรังสีแกมมาพลังงาน 2.30 เมออีวี มีเพียง 0.6% ของการสลายของ O^{14} ที่จะไปยังสภาวะกราว์นซ์ของ N^{14} โดยการส่งอนุภาคโพซิตรอนพลังงาน 4.14 เมออีวี

สำหรับ Mg^{27} เป็นการสลายโดยการส่งอิเล็กตรอนประมาณ 70% มีพลังงาน 1.78 เมออีวี และอีก 30% มีพลังงาน 1.59 เมออีวี พบรังสีแกมมาพลังงาน 0.834 เมออีวี และ 1.015 เมออีวี ตามลำดับ และยังมีอีกที่น้อยกว่า 1% จะให้รังสีแกมมาพลังงาน 0.18 เมออีวี ออกมา แสดงว่ารังสีแกมมาพลังงาน 0.834 เมออีวี เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการสลาย โดยให้รังสีเบตาพลังงาน 1.78 เมออีวี การสลายจากสภาวะกราว์นซ์ของ Mg^{27} ไปยังสภาวะกราว์นซ์ของ Al^{27} โดยการส่งอิเล็กตรอนนั้น นับว่าเป็นการยากที่จะเกิดขึ้น

นิวไคลด์ Cu^{64} มีการสลายโดยการส่งทั้งอิเล็กตรอน และโพซิตรอน และยังมีกรับอิเล็กตรอน เกิดขึ้นอีก โดยการส่งอิเล็กตรอน 39% พลังงาน 0.57 เมออีวี เกิดนิวเคลียส Zn^{64} ที่สภาวะกราว์นซ์ เกิดโพซิตรอน 19% พลังงาน 0.66 เมออีวี ได้นิวเคลียสใหม่คือ Ni^{64} ที่สภาวะกราว์นซ์ และ 42% เป็นการสลายโดยการเกิดการจับอิเล็กตรอนในเค-เชล เกิด Ni^{64} เหนือสภาวะกราว์นซ์ = 1.34 เมออีวี ดังนั้น จึงพบรังสีแกมมาพลังงาน 1.34 เมออีวี มีบางส่วนเท่านั้นที่จะทำให้เกิด Ni^{64} ที่สภาวะกราว์นซ์

ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้สามารถพบรูปแบบของการสลายอย่างมากมาย

7.6 เบรมสตราลิ่ง

(Bremsstrahlung)

อนุภาคที่มีประจุ เมื่อวิ่งผ่านใกล้อะตอมของสาร ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่ตามวงโคจร (เกิดปฏิกิริยากับสนาม) อนุภาคจะเปลี่ยนทิศทาง ทำให้ความเร็วลดลง พลังงานจะถูกส่งออกมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียก รังสีเอ็กซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous X-ray) บางทีเรียก เบรมสตราลิ่ง หรือรังสีเบรก (braking radiation) หาค่าความถี่ และความยาวคลื่น ได้จากหลักการอนุรักษ์พลังงาน คือ

$$\frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v'^2 = h \nu \quad \dots (7.5)$$

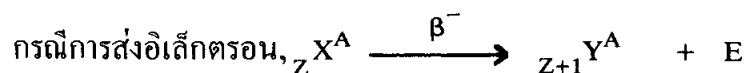
เมื่อ m คือมวลของอนุภาค
 h คือค่าคงที่ของพลังค์
 ν ความถี่ของคลื่น

ความเข้มของเบรมสตราลิ่ง ขึ้นอยู่กับ ประจุ, มวลของอนุภาคที่วิ่งเข้าชน และเลขอะตอม (Z) ของสารที่ถูกชน ดังนั้น ถ้ามวลที่ใช้กันรังสี มีเลขอะตอมสูง จะทำให้เกิดเบรมสตราลิ่งมีค่าสูงด้วย

สรุป

1. อนุภาคเบตาก็คืออนุภาคที่มีคุณสมบัติคล้ายกับอิเล็กตรอน แต่ส่งออกมาจากนิวเคลียสที่จะสลาย อาจมีประจุลบเรียก เบตาเนกาตรอนถ้ามีประจุบวกเรียก โพซิตรอน การสลายจะเป็นการสลายจากนิวเคลียสหนึ่งไปเป็นอีกนิวเคลียสหนึ่ง เนื่องจากค่ามวลที่ใช้ส่วนมากเป็นค่ามวลของนิวไคลด์จากท้ายเล่ม จึงเปลี่ยนมวลของนิวเคลียสเป็นมวลของนิวไคลด์ได้ดังที่เคยศึกษามาแล้วในบทที่ 2

2. หาพลังงานทั้งหมดในการสลาย (E) ได้จากสมการ



มวลของนิวไคลด์ใหม่ที่เกิดขึ้นหาได้จาก

$$M({}_{Z+1} Y^A) = M({}_Z X^A) - \frac{E}{931.5}$$

หน่วยของมวลคือ เอเอ็มยู

3. สร้างระดับพลังงานการสลายทางนิวเคลียร์ได้โดยพิจารณาจากสมการการสลาย (ทราบค่า Z) และค่าที่คำนวณได้ คือ E และพลังงานของรังสีแกมมา จะทราบระดับพลังงานนิวเคลียร์ ถ้านิวเคลียสใหม่ยังอยู่ที่สภาวะถูกกระตุ้น จะกลับสู่สภาวะกราวน์โดยการส่งรังสีแกมมา พลังงานการสลาย E จะเป็นพลังงานที่รวมทั้งพลังงานของรังสีแกมมาที่ส่งออกมาด้วย

แบบฝึกหัดบทที่ 7

7.1 จงอธิบายว่า ทำไมพลังงานในการสลาย โดยการส่งอนุภาคเบตา จึงมีลักษณะเป็นสเปกตรัมของพลังงานแบบต่อเนื่อง

7.2 ${}_{20}\text{Ca}^{38}$ สลายโดยการส่งโพซิตรอน และรังสีแกมมา ด้วยครึ่งชีวิต 0.66 วินาที จงหา

(ก) พลังงานทั้งหมดในการสลาย

(ข) ถ้าพบรังสีแกมมาพลังงาน 3.5 เมออีวี จงหาพลังงานของโพซิตรอน

(ค) จงเขียนแผนผังการสลาย

กำหนดมวลในหน่วยเอเอมยู ของ

$${}_{20}\text{Ca}^{38} = 37.9758, \quad {}_{19}\text{K}^{38} = 37.96909$$

7.3 ${}_{27}\text{Co}^{61}$ สลายโดยการส่งเบตา และรังสีแกมมา

(ก) จงหาพลังงานในการสลาย

(ข) ถ้าพบรังสีแกมมา พลังงาน 0.07 เมออีวี จงหาพลังงานของอนุภาคเบตา

(ค) จงเขียนแผนผังการสลาย

กำหนดมวลในหน่วย เอเอมยู ของ

$${}_{27}\text{Co}^{61} = 60.93243, \quad {}_{28}\text{Ni}^{61} = 60.93105$$

7.4 การสลายของนิวไคลด์ F^{20} โดยการส่งอนุภาคเบตา พลังงาน 5.41 เมออีวี และรังสีแกมมา พลังงาน 1.63 เมออีวี ถ้ากำหนดมวลของ ${}_{9}\text{F}^{20} = 19.999985$ เอเอมยู จงเขียนแผนผังการสลาย และหามวลของ ${}_{10}\text{Ne}^{20}$

7.5 $\text{Na}^{22} (\beta^+)$, มีรังสีแกมมา พลังงาน 1.274 เมออีวี ออกมาด้วย

(ก) จงเขียนสมการให้สมบูรณ์

(ข) หาพลังงานของอนุภาคที่ส่งออกมา

กำหนดมวลในหน่วย เอเอมยู ของ

$${}_{11}\text{Na}^{22} = 21.994435, \quad {}_{10}\text{Ne}^{22} = 21.991385$$

7.6 จงหาพลังงานจากการสลายของ ${}_{16}\text{S}^{30}$ โดยการส่งโพซิตรอน และหาพลังงานของโพซิตรอน สำหรับแต่ละกรณี

(ก) ไม่พบรังสีแกมมา

(ข) มีรังสีแกมมาพลังงาน 0.68 เมออีวี ออกมาด้วย