



หน่วยที่ 9

โครงสร้างของอะตอมและนิวเคลียส

9.1 โครงสร้างอะตอม

เป็นที่ทราบกันมาตั้งแต่ก่อนคริสต์ศตวรรษที่ 19 แล้วว่าอะตอมเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของสสาร แต่ความเข้าใจภายในของอะตอมยังไม่เป็นที่กระจ่างชัด จนกระทั่ง ทอมสัน (Joseph J. Thomson) ได้ค้นพบอิเล็กตรอนในปี ค.ศ. 1897 แสดงว่าภายในอะตอมที่ว่างที่สุดยังประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน ในภาวะปกติอะตอมมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังนั้น ในอะตอมจึงต้องมีประจุบวกจำนวนเท่ากับอิเล็กตรอนด้วย ค.ศ. 1911 รัทเธอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้เสนอวิธีตรวจสอบโครงสร้างอะตอมโดยวิธียิงอนุภาคแอลฟาเข้าไปยังเป้าซึ่งเป็นแผ่นโลหะบาง ๆ มีเลขอะตอมสูง เช่น ทองคำเปลว การเบี่ยงเบนของอนุภาคแอลฟาที่ผ่านออกมาจากแผ่นโลหะสามารถใช้อธิบายโครงสร้างของอะตอมได้ รัทเธอร์ฟอร์ดนำผลการทดลองมาคำนวณและสรุปว่า อะตอมมีนิวเคลียสซึ่งประกอบด้วยประจุไฟฟ้าบวกรวมกันแน่นอยู่ที่ศูนย์กลางของอะตอม รัศมีของนิวเคลียสมีระดับขนาด 10^{-15} เมตร รัศมีของอะตอมมีระดับขนาด 10^{-10} เมตร หรือประมาณ 10^5 เท่าของรัศมีนิวเคลียส แสดงว่าอะตอมมีที่ว่างเป็นส่วนใหญ่

9.1.1 แบบจำลองอะตอมของบอร์

ค.ศ.1913 บอร์ (Niels Bohr) ได้ใช้อะตอมของไฮโดรเจนเป็นแบบจำลองของอะตอม อะตอมของไฮโดรเจนมีโปรตอนเป็นนิวเคลียส 1 ตัว และมีอิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียส 1 ตัว บอร์ได้ตั้งสมมติฐานโดยอาศัยแนวความคิดจากทฤษฎีควอนตัมอธิบายโครงสร้างของไฮโดรเจน และการเกิดสเปกตรัมของไฮโดรเจนได้ชัดเจน สมมติฐานของเขามีดังนี้

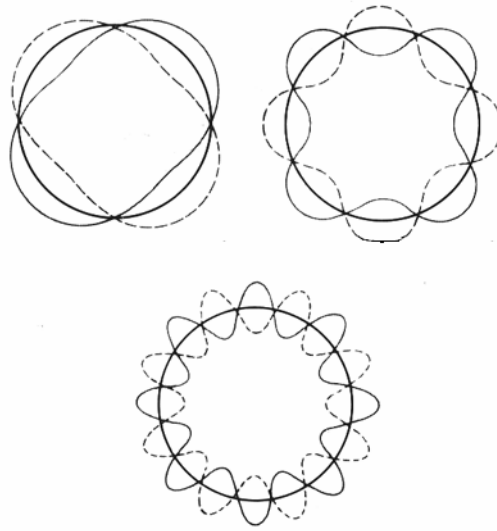
1. อิเล็กตรอนของอะตอมมีได้หลายวงโคจร อิเล็กตรอนจะอยู่ในวงเหล่านี้ได้โดยไม่แผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โมเมนตัมเชิงมุมของวงจรมีค่าไม่ต่อเนื่อง มีค่าเป็นจำนวนเต็มของ $h/2\pi$ เรียกสถานะเช่นนี้ว่า สถานะคงตัว (stationary state)

ให้ L เป็นโมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอน

m และ v คือมวลและความเร็วของอิเล็กตรอน

r_n คือรัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอน วงที่ n

$$L = m v r = n h / 2\pi \dots\dots\dots(9.1)$$



รูป 9.1 อิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนจะเสถียรภาพ เมื่อมีวงโคจร

มีรูปเป็นแบบคลื่นนิ่ง ความยาว 2, 4 และ 8 เท่าของ λ

2. เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนวงโคจรจะมีการปลดปล่อยหรือดูดกลืนพลังงานเกิดขึ้น ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (f) ที่ได้คือ

$$hf = E_i - E_f \quad \dots\dots\dots(9.2)$$

เมื่อ E_f และ E_i คือพลังงานในวงโคจรที่ f และ i ตามลำดับ

อิเล็กตรอนสามารถอยู่ในวงโคจรใดก็ได้แสดงว่า แรงเข้าสู่ศูนย์กลางมีค่าเท่ากับแรงดึงดูดของประจุ

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$(mv_n r_n)^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} m e^2 r_n$$

จากสมมติฐานข้อที่ 1 สามารถหารรัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอนแต่ละวงได้เป็น ($n = 1, 2, 3, \dots$)

$$r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \quad \dots\dots\dots(9.3)$$

พลังงานทั้งหมดที่ยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนไว้ในวงโคจรคือ

$$E_n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2r_n}$$

พลังงานรวมมีค่าเป็นลบ แสดงว่าพลังงานศักย์ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดของประจุมีค่ามากกว่าพลังงานจลน์ อิเล็กตรอนจึงถูกยึดเหนี่ยวไว้เป็นวงโคจรรอบนิวเคลียส เรียกพลังงานนี้ว่าเป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม (Binding energy) ถ้าจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากวงโคจรเป็นอิเล็กตรอนอิสระจะต้องให้พลังงานแก่อะตอมไม่น้อยกว่าค่านี้



เมื่อแทนค่า r_n จากสมการ (9.3) ลงไปในสมการ พลังงานจะได้

$$E_n = \frac{-me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} \dots\dots\dots(9.4)$$

อิเล็กตรอนในวงหนึ่ง ๆ จะมีระดับพลังงาน (energy level) ค่าหนึ่ง ๆ เฉพาะวงของมันเอง

เมื่อ $n = 1$ จะเป็นวงในสุดและเสถียรมากที่สุด E_1 จึงเป็นพลังงานที่ระดับต่ำสุด เรียกว่า สถานะพื้นฐาน (ground state)

แทนค่า m, e, ϵ_0 และ h ลงในสมการ (9.4) และ (9.5) จะได้ $r_1 = 0.528 \times 10^{-10}$ เมตร และ $E_1 = -13.6$ eV r_1 เป็นรัศมีวงโคจรที่เล็กที่สุด เรียกว่า รัศมีของบอร์ (Bohr radius) ซึ่งสอดคล้องกับค่ารัศมีของอะตอมไฮโดรเจนที่หาได้จากวิธีอื่น พลังงานค่าที่น้อยที่สุดเพียงพอที่จะให้อิเล็กตรอนของไฮโดรเจนหลุดเป็นอิสระ คือ 13.6 eV

วงโคจรอื่น ๆ ที่อิเล็กตรอนของไฮโดรเจนสามารถอยู่ได้โดยไม่แผ่รังสี คือวงที่มีรัศมีสอดคล้องกับสมการ (9.4) หรือ

$$r_n = n^2 r_1 \dots\dots\dots(9.5)$$

คือวงที่มีรัศมีเป็น $r_1, 4r_1, 9r_1, \dots$ ตามลำดับ เมื่อแทนค่า E_1 ลงในสมการ (9.4) จะได้

$$E_n = -E_1 / n^2 \dots\dots\dots(9.6)$$

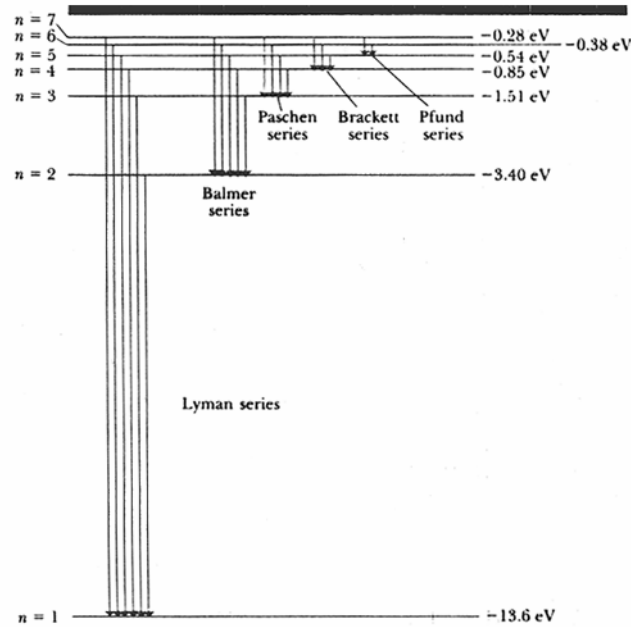
ระดับที่มีพลังงานสูงขึ้น ตั้งแต่ $E_2, E_3, E_4, \dots, E_\infty$ เรียกว่าสถานะกระตุ้น (excited state) เมื่อ n มากขึ้น ระดับพลังงานจะเข้าใกล้กันมากขึ้นจนดูเหมือนมีค่าต่อเนื่อง เมื่อ $n = \infty$ แสดงว่าอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนอิสระ

ในสภาวะปกติ อิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนอยู่ที่สถานะพื้นเสมอ เมื่อได้รับพลังงานจากภายนอกจะโดยวิธีใดก็ตาม อิเล็กตรอนจะเคลื่อนย้ายไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น ($n = 2, 3, \dots$) แต่อิเล็กตรอนพยายามจะรักษาสถานะของตัวเองมันเองมาอยู่ที่สถานะพื้น อิเล็กตรอนจึงพยายามกระโดดจากสถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า (n_i) ไปสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า (n_f) จากสมการ (9.2) และสมการ (9.4) สามารถคำนวณความยาวคลื่นของโฟตอนที่อิเล็กตรอนแผ่ออกมาได้ดังนี้

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \dots\dots\dots(9.7)$$

แทนค่าเทอม $\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c}$ ด้วย R เรียกว่าค่าคงที่ของริดเบิร์ก (Rydberg's Constant)

มีค่าเท่ากับ 1.0974×10^7 ต่อเมตร ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (9.7) จะสอดคล้องกับผลการทดลอง



รูป 9.2 ระดับพลังงานใน H-atom

สเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจนจะแบ่งเป็นอนุกรม จัดโดยดูจากอิเล็กตรอนเปลี่ยนจากระดับพลังงานใดไปสู่ระดับพลังงานใด

อนุกรมของไลแมน (Lyman series) อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับ (n_i) เท่ากับ 2, 3, 4, ... ลงมาอยู่ที่ $n_f = 1$

อนุกรมของบาล์มเมอร์ (Balmer series) อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $n_i = 3, 4, 5, 6 \dots$ ลงมาอยู่ที่ $n_f = 2$

อนุกรมของพาสเชน (Paschen series) อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $n_i = 4, 5, 6, \dots$ ลงมาอยู่ที่ $n_f = 3 \dots$ ฯลฯ

ความสำเร็จของแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของบอร์คือ สามารถอธิบายได้ว่าเหตุใดอิเล็กตรอนในอะตอมจึงอยู่ได้โดยไม่ถูกดูดเข้าไปหานิวเคลียส อธิบายการเกิดสเปกตรัมได้สอดคล้องกับการทดลอง แต่ข้อจำกัดของแบบจำลองนี้คือ ไม่สามารถนำไปอธิบายอะตอมที่มีอิเล็กตรอนหลายตัวได้ และเส้นสเปกตรัมของไฮโดรเจนเมื่อใช้สเปกโตรมิเตอร์ที่มีกำลังขยายสูงพบว่าแต่ละเส้นยังมีเส้นย่อยเล็ก ๆ อยู่ติดกันมาก แบบจำลองของบอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากสาเหตุใด

ตัวอย่าง 9.1 อะตอมไฮโดรเจนมีพลังงานที่สถานะพื้นฐาน -13.58 eV ได้รับพลังงานจากโฟตอน 12.2 eV อิเล็กตรอนจะขึ้นไปอยู่ระดับพลังงานสถานะกระตุ้นที่เท่าใด



วิธีทำ พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากโฟตอน คือ

$$\begin{aligned}
 &= + 12.2 - 13.58 = - 1.38 \text{ eV} \\
 E_n &= \frac{-E_1}{n^2} \\
 n^2 &= \frac{-E_1}{E_n} \\
 &= \frac{-13.58}{-1.38} \\
 n &= 3.14 \approx 3
 \end{aligned}$$

อิเล็กตรอนจะขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้นที่ 3

9.1.2 การใช้ทฤษฎีควอนตัมอธิบายโครงสร้างอะตอม

เพื่อจัดข้อบกพร่องของแบบจำลองอะตอมของบอร์ จึงใช้ทฤษฎีควอนตัม โดยนำสมการชเรอดิงเงอร์หาฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนซึ่งจะได้ค่าเจาะจง (eigen value) ของอะตอมไฮโดรเจนสอดคล้องกับสูตรที่ได้จากสมมติฐานของบอร์ดังที่ได้กล่าวมา

เริ่มต้นด้วยสมการพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจน พลังงานทั้งหมด (E) ของอิเล็กตรอน คือ

$$\frac{P^2}{2m} + V(r) = E \quad \dots\dots\dots(9.8)$$

m, P คือ มวลและโมเมนตัมของอิเล็กตรอน

V คือ พลังงานศักย์ของแรงระหว่างนิวเคลียสและอิเล็กตรอน หาได้จาก

$$V(r) = \frac{-1}{4\pi \epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad \dots\dots\dots(9.9)$$

ให้ ψ คือฟังก์ชันของอิเล็กตรอน แทน P ด้วยตัวปฏิบัติการ $\frac{-h\nabla^2}{2m}$ จะได้สมการชเรอดิงเงอร์ในแกนพิกัดฉากทรงกลม คือ

$$\begin{aligned}
 \frac{-\hbar^2}{2m} \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \right] + V(r, \theta, \phi) \psi \\
 = E \psi \quad \dots\dots\dots(9.10)
 \end{aligned}$$

อิเล็กตรอนที่วิ่งรอบนิวเคลียสในทฤษฎีควอนตัมจะไม่มีเป็นวงโคจรที่แน่นอน ตำแหน่งของอิเล็กตรอนจะบอกในรูปความน่าจะเป็น พบอิเล็กตรอนตรงบริเวณที่ต้องการเท่านั้น



อิเล็กตรอนจะวิ่งรอบนิวเคลียสในลักษณะหมอกอิเล็กตรอนแบบ 3 มิติ ระยะที่ใกล้ นิวเคลียสที่สุดที่จะพบอิเล็กตรอนในอะตอม ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและลักษณะการแผ่รังสียังคงเป็นเช่นแบบจำลองอะตอมของบอร์เหมือนเดิม

การหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (9.10) ใช้วิธีแยกตัวแปรออกจากกัน คำตอบของสมการจะอยู่ในรูป

$$\psi(r, \theta, \phi) = R(r) \Theta(\theta) \Phi(\phi)$$

การแก้สมการเพื่อหาค่า ψ ที่แท้จริงของสมการ (9.10) ทำได้ค่อนข้างยาก ต้องเกี่ยวข้องกับคณิตศาสตร์ชั้นสูง ในที่นี้จะยกมากล่าวเฉพาะผลที่ได้หลังจากการหาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์นี้เรียบร้อยแล้ว

ผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อย ซึ่งมีฟังก์ชันย่อย 3 ฟังก์ชันคือ $R(r)$, $\Theta(\theta)$ และ $\Phi(\phi)$ จะทำให้ได้เลขควอนตัม 3 แบบ ดังนี้

1. เลขควอนตัม n เรียกว่า เลขควอนตัมสำคัญ (Principal quantum number) มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มบวก ใช้บอกระดับพลังงานเช่นเดียวกับแบบจำลองอะตอมของบอร์ นั่นคือ

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}$$

2. เลขควอนตัม l เรียกว่า เลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม (Orbital quantum number หรือ angular momentum quantum number) ค่าที่จะเป็นไปได้ของ l จะต้องสอดคล้องกับค่า n โดย l จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง $n - 1$

จากสมมติฐานของบอร์ โมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับเลขควอนตัมสำคัญ ($L = nh/2\pi$) แต่จากการหาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ โดยใช้ทฤษฎีควอนตัม พบว่า

$$L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi} \dots\dots\dots(9.11)$$

ที่สถานะพื้นฐาน $n = 1$ จะได้ $l = 0$ โมเมนตัมเชิงมุมมีค่าเพียงค่าเดียวคือศูนย์

ที่สถานะกระตุ้น $n = 2$ จะได้ $l = 0, 1$ โมเมนตัมเชิงมุมมี 2 ค่า คือ $0, \frac{\sqrt{2} h}{2\pi}$

ที่สถานะกระตุ้น $n = 3$ จะได้ $l = 0, 1, 2$ โมเมนตัมเชิงมุมมี 3 ค่า คือ $0, \frac{\sqrt{2} h}{2\pi}, \frac{\sqrt{6} h}{2\pi}$

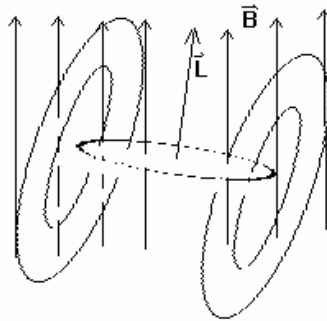
ที่ระดับพลังงาน n เดียวกัน แต่อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานเดียวกันนี้ มีโมเมนตัมเชิงมุมต่างกัน เรียกสภาพเช่นนี้เป็น degeneracy เช่น $n = 3$ จะมี 3 degeneracy



3. เลขควอนตัม m_l เรียกว่าเลขควอนตัมแม่เหล็ก (magnetic quantum number) โมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอนจะเรียงตัวในทิศใด ๆ การบอกทิศของ \vec{L} ทำได้โดยให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกผ่านอะตอมแล้วใช้ทิศของสนามแม่เหล็กเป็นหลัก ถ้าให้ทิศของสนามแม่เหล็กขนานกับแกน z การฉาย \vec{L} ไปในแนวแกน z คือ L_z จะเป็นโมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอนที่กำหนดทิศแน่นอน จากทฤษฎีควอนตัมพบว่า

$$L_z = m_l \frac{h}{2\pi} \dots\dots\dots(9.12)$$

ค่าที่เป็นไปได้ของ m_l ถูกกำหนดโดยค่า l โดย m_l จะมีค่าตั้งแต่ $-l, -(l-1), \dots, 0, (l-1), l$ รวมทั้งสิ้น $2l + 1$ ค่า



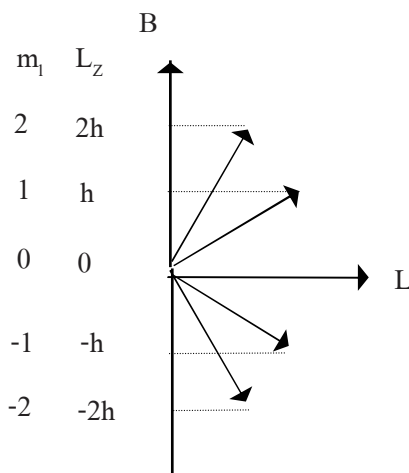
รูป 9.3 แสดงทิศของ \vec{L} และทิศทางของ \vec{B} ภายนอก

ตัวอย่าง 9.2 โมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอน ที่ $l = 2$ จะมีทิศใดได้บ้าง ถ้ามีสนามแม่เหล็กภายนอกผ่านอะตอมในแนวแกน z

วิธีทำ เมื่อ $l = 2$ ค่า m_l ที่เป็นไปได้คือ $-2, -1, 0, 1, 2$ ทั้งหมด $2 \times 2 + 1 = 5$ ค่า

ให้ θ เป็นมุมระหว่างสนามแม่เหล็ก \vec{B} และ

โมเมนตัมเชิงมุม \vec{L}



$$L_z = L \cos \theta$$

$$\cos \theta = \frac{L_z}{L} = \frac{m_l}{\sqrt{l(l+1)}}$$

เมื่อแทนค่า m_l ค่า $\cos \theta$ ที่เป็นไปได้คือ $\frac{-2}{\sqrt{6}},$

$\frac{-1}{\sqrt{6}}, 0, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{2}{\sqrt{6}}$ ทำมุม $144^\circ, 114^\circ, 90^\circ, 65^\circ$ และ 36° ตามลำดับ

รูป 9.4



ค.ศ. 1925 กูดสมิท (S.A. Goudsmit) และอะลันเบ็ค (G.E. Uhlenbeck) พบว่า อิเล็กตรอนมีโมเมนตัมเชิงมุมอีก 1 ค่า นอกเหนือไปจากโมเมนตัมเชิงมุมที่เกิดจากการโคจรรอบ นิวเคลียส โมเมนตัมเชิงมุมนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง เรียกสั้น ๆ ว่า สปิน (spin) เรียกชื่อโมเมนตัมเชิงมุมนี้ว่า โมเมนตัมเชิงมุมของการหมุนรอบตัวเอง (spin angular momentum, \vec{S}) เป็นปริมาณเวกเตอร์และมีสภาพควอนไทซ์ (quantize) เลขควอนตัม s เรียกว่า เลขควอนตัมของการหมุน (spin quantum number) มีค่าเพียงค่าเดียวคือ 1/2

โมเมนตัมเชิงมุมของการหมุน (\vec{S}) หาได้จาก

$$\vec{S} = \sqrt{s(s+1)} \frac{h}{2\pi} \dots\dots\dots(9.13)$$

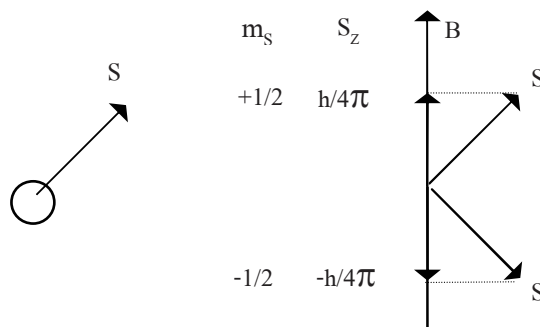
เมื่อ $s = \frac{1}{2}$ จะได้

$$\vec{S} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \frac{h}{2\pi}$$

เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกผ่านในอะตอมพบว่าเวกเตอร์ของโมเมนตัมเชิงมุมของการหมุนสามารถจัดตัวได้สองลักษณะคือ ขนานและสวนกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก จะได้เลขควอนตัมแม่เหล็กของการหมุน (m_s , spin magnetic quantum number) จึงมี 2 ค่าคือ $+\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$

ให้ \vec{S}_z เป็นโมเมนตัมเชิงมุมของการหมุนซึ่งเกิดจากการฉาย \vec{S} ในทิศของสนามแม่เหล็ก จะได้

$$S_z = m_s \frac{h}{2\pi} \dots\dots\dots(9.14)$$



รูป 9.5 การเกิดเลขควอนตัมของการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน

มาถึงจุดนี้ จะเห็นว่า การอธิบายอิเล็กตรอนในอะตอม ไม่สามารถใช้เลขควอนตัม n เพียงตัวเดียวเหมือนกับแบบจำลองของบอร์ได้อีกต่อไป การบอกสถานะของอิเล็กตรอนใน



อะตอมซึ่งมีพฤติกรรมเป็นแบบคลื่นนั้นต้องให้เลขควอนตัม 4 ตัว คือ n , l , m_l และ m_s สรุปเป็นตาราง 9.1 ได้ดังนี้

ตาราง 91 เลขควอนตัมที่เกี่ยวข้องกับการบอกสถานะของอิเล็กตรอน

เลขควอนตัม	เกี่ยวข้องกับ	ค่าที่เป็นไปได้
n	พลังงาน	1, 2, 3, ∞
l	โมเมนตัมเชิงมุม	0, 1, 2, ... $n-1$
m_l	โมเมนตัมเชิงมุมในแนว สนามแม่เหล็ก	- l ถึง l
m_s	โมเมนตัมเชิงมุมของการ หมุนรอบตัวเองในแนว สนามแม่เหล็ก	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

9.1.3 หลักการกีดกันของเพาลี

อะตอมของไฮโดรเจนเป็นอะตอมที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด อะตอมของธาตุอื่น ๆ จะมีอิเล็กตรอนตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปในอะตอม โครงรูปของอิเล็กตรอน (configuration) ในอะตอมเช่นนี้จะมีลักษณะอย่างไร อิเล็กตรอนทั้งหลายจะอยู่ในสถานะที่มีเลขควอนตัมเหมือนกัน หรืออยู่ในระดับพลังงานเดียวกันทั้งหมดได้หรือไม่ ทำไมธาตุที่มีอิเล็กตรอนต่างกันเพียง 1 ตัว สมบัติทางเคมีของธาตุนั้นจึงต่างกัน เช่น แก๊สไนออน (เลขอะตอม = 10) และโลหะโซเดียม (เลขอะตอม = 11) แก๊สไนออนเป็นธาตุเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับธาตุใด ๆ ขณะที่โซเดียมไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารอื่น

ผู้ที่ศึกษาการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอมเป็นโครงสร้างที่ชัดเจนคือเพาลี (Wolfgang Pauli) เมื่อ ค.ศ. 1925 ตั้งเป็นกฎเรียกว่า หลักการกีดกันของเพาลี (Pauli's exclusion principle) กล่าวว่าในอะตอมหนึ่ง ๆ อิเล็กตรอนของอะตอมนั้นจะมีเลขควอนตัม n , l , m_l และ m_s ชุดเดียวกันนี้ได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น

การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนจะเริ่มที่ระดับพลังงานต่ำสุดก่อน เลขควอนตัม n จะบอกชั้น (shell) จะแทนด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ K, L, M, N, O และ P แทนชั้นที่ 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 ตามลำดับโดยนับเริ่มต้นจากวงในสุด

วงโคจรที่มีระดับพลังงาน n แต่ l มีค่าต่างกัน ค่า l แต่ละค่าจะบอกถึงชั้นย่อย (subshells) จะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็ก s, p, d, f, g, h และ i แทนชั้นย่อย $l = 0, 1, 2, 3, 4, 5$



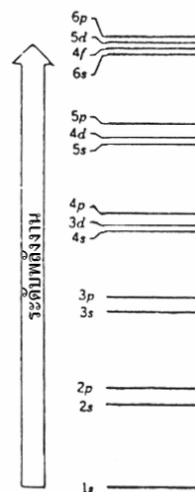
และ 6 ตามลำดับ จำนวนอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในแต่ละชั้นย่อยเท่ากับ $2(2l + 1)$ จำนวน 2 มาจากอิเล็กตรอนสามารถมีค่า m_s ได้ 2 ค่า คือ $\frac{+1}{2}$ และ $\frac{-1}{2}$

จำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นและชั้นย่อยแสดงไว้ในตาราง 9.2

ตาราง 9.2 แสดงจำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น

n	ชั้น	l	ชั้นย่อย	จำนวนอิเล็กตรอน ในชั้นย่อย $2(2l + 1)$	จำนวนอิเล็กตรอน ทั้งหมด $2n^2$
1	K	0	1s	2	2
2	L	0	2s	2	8
		1	2p	6	
3	M	0	3s	2	18
		1	3p	6	
		2	3d	10	
4	N	0	4s	2	32
		1	4p	6	
		2	4d	10	
		3	4f	14	

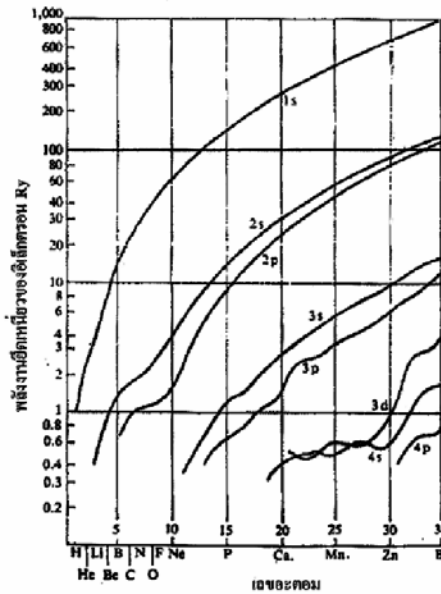
อะตอมที่มีอิเล็กตรอนหลายตัวจนอิเล็กตรอนสามารถยึดครองได้ถึงระดับพลังงานที่ $n = 3$ ขึ้นไป การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนจะไม่เรียงลำดับตามตาราง ชั้นย่อย 4s อาจล้าเข้าไปใกล้นิวเคลียสมากกว่าชั้นย่อย 3d ระดับพลังงานย่อยจะเหลื่อมกัน ดังรูป 9.6



รูป 9.6 ระดับพลังงานของชั้นย่อยของอะตอมเรียงตามลำดับของระดับพลังงาน



เมื่อพล็อตกราฟระหว่างเลขอะตอม และพลังงานยึดเหนี่ยว อิเล็กตรอนของแต่ละระดับพลังงาน (มีหน่วยเป็นริตเบิร์ก) จะเห็นการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานย่อย เมื่ออิเล็กตรอนเริ่มยึดครองที่ระดับพลังงาน $n = 3$ ขึ้นไป ในรูป 9.7 อะตอมที่มีอิเล็กตรอน 19-20 ตัว อิเล็กตรอนจะยึดครองชั้นย่อย 4s ก่อน 3d



รูป 9.7 พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนของอะตอมของธาตุต่าง ๆ ¹

ตารางที่ 7.3 แสดงการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนของธาตุต่าง ๆ เริ่มจากเลขอะตอม 1 ถึง 30

ธาตุ	สัญลักษณ์	เลขอะตอม (Z)	การจัดเรียงอิเล็กตรอน
Hydrogen	H	1	1s
Helium	He	2	1s ²
Lithium	Li	3	1s ² 2s
Beryllium	Be	4	1s ² 2s ²
Boron	B	5	1s ² 2s ² 2p
Carbon	C	6	1s ² 2s ² 2p ²
Nitrogen	N	7	1s ² 2s ² 2p ³
Oxygen	O	8	1s ² 2s ² 2p ⁴
Fluorine	F	9	1s ² 2s ² 2p ⁵
Neon	Ne	10	1s ² 2s ² 2p ⁶

¹Beiser, Arthur. **Concept of Modern Physics.**(Singapore : McGraw - Hill, Inc., 1987.) p. 252.



Sodium	Na	11	$1s^2 2s^2 2p^6 3s$
Magnesium	Mg	12	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
Aluminum	Al	13	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p$
Silicon	Si	14	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Phosphorus	P	15	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
Sulfur	S	16	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
Chlorine	Cl	17	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
Argon	Ar	18	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$
Potassium	K	19	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s$
Calcium	Ca	20	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$
Scandium	Sc	21	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d 4s^2$
Titanium	Ti	22	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$
Vanadium	V	23	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^3 4s^2$
Chromium	Cr	24	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^4 4s^2$
Manganese	Mn	25	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^2$
Iron	Fe	26	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$
Cobalt	Co	27	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^7 4s^2$
Nickel	Ni	28	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8 4s^2$
Copper	Cu	29	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s$
Zinc	Zn	30	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$

จากตารางเริ่มต้นธาตุไฮโดรเจน มีอิเล็กตรอน 1 ตัว เขียนได้เป็น $1s$ หมายถึงมีอิเล็กตรอน 1 ตัว อยู่ที่สถานะพื้นฐานมีเลขควอนตัม $n = 1, l = 0, m_l = 0, s = +1/2$

ธาตุฮีเลียม ($Z = 2$) มีอิเล็กตรอน 2 ตัว อยู่ในชั้นที่ 1 มีเลขควอนตัม $n = 1, l = 0, m_l = 0$ เหมือนกัน แต่มีสปินตรงข้ามกัน คือ $m_s = 1/2$ และ $m_s = -1/2$ อะตอมของฮีเลียมมีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่ 1 เต็มพิกัด

ธาตุลิเทียม ($Z = 3$) มีอิเล็กตรอนอยู่ในวง $n = 1$ 2 ตัว และวง $n = 2$ 1 ตัว อิเล็กตรอนที่อยู่ในวง $2s$ จะอยู่ห่างจากนิวเคลียสมากกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ในวง $1s$ อิเล็กตรอน 1 ตัวที่อยู่ในวง $2s$ จึงถูกยึดไว้อย่างหลวม ๆ ค่อนข้างจะหลุดเป็นอิสระได้ง่าย โดยใช้พลังงานภายนอกเพียง 5.4 eV (อิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนหลุดเป็นอิสระได้ต้องให้พลังงานแก่



อะตอมถึง 13.6 eV) ในทางเคมี ลิเทียมจัดเป็นโลหะอัลคาไล (alkali) รวมตัวกับธาตุอื่นเป็นสารประกอบประเภทไอออนิก โดยจะเป็นฝ่ายสูญเสียอิเล็กตรอนในวงนอกสุด 1 ตัว ลิเทียมจึงมีวาเลนซ์เท่ากับ 1 ธาตุเบริลเลียม ($Z = 4$) มีอิเล็กตรอนครบสองตัวในสถานะนั้น ($n = 1$) และมีอิเล็กตรอนในวง L อีก 2 ตัว เบริลเลียมจัดเป็นธาตุแรกของหมู่ธาตุ alkaline-earth มีวาเลนซ์ +2

ธาตุอื่น ๆ สามารถไล่การจัดเรียงอิเล็กตรอนได้เช่นเดียวกับที่กล่าวมา เช่น ธาตุนีออน มีเลขอะตอม = 10 อิเล็กตรอนจะอยู่ในชั้น K และ L จนเต็ม ไม่มีอิเล็กตรอนในวง M ธาตุนี้จึงเสถียร ยากที่จะรับหรือสูญเสียอิเล็กตรอน ธาตุถัดจากนีออนคือ โซเดียม ($Z = 11$) อิเล็กตรอนจะมีอยู่ในวง K และ L จนเต็ม มีอิเล็กตรอนเพียง 1 ตัวในวง M มีลักษณะคล้ายกับธาตุลิเทียม จึงจัดไว้ในหมู่ธาตุอัลคาไลเช่นกัน ธาตุฟลูออรีนอยู่ก่อนหน้าธาตุนีออน มีเลขอะตอม = 9 จะมีที่ว่างสำหรับอิเล็กตรอน 1 ที่ในวง L ธาตุฟลูออรีนจึงมีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนจากธาตุอื่น มีค่าวาเลนซ์เท่ากับ -2 ธาตุที่มีลักษณะคล้ายธาตุฟลูออรีน ได้แก่ คลอรีน, โบรมีน, ไอโอดีน และแอสทาทีน) เราจัดธาตุเหล่านี้ไว้ในหมู่ธาตุเดียวกันเรียกว่า ธาตุฮาโลเจน (halogens)

นักวิทยาศาสตร์ได้นำลักษณะการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน และคุณสมบัติทางเคมีที่คล้ายกันของแต่ละธาตุไปจัดเป็นหมวดหมู่ เรียกว่า ตารางธาตุ (periodic table of the elements) ธาตุที่มีสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกันจะอยู่กันเป็นแถวเป็นสดมภ์อย่างมีแบบแผน

9.2 เลเซอร์เบื้องต้น

เลเซอร์ (Laser) และ เมเซอร์ (Maser) เป็นคลื่นแสงและคลื่นไมโครเวฟ ที่ได้จากขบวนการทางฟิสิกส์ ที่เรียกว่า Light Amplification by Stimulated Emission Radiation นำตัวอักษรตัวหน้าของแต่ละคำมารวมกันเป็น LASER สำหรับเมเซอร์เปลี่ยนจากคำว่า Light เป็น Microwave ถ้าจะแปลตามศัพท์ในประโยคภาษาอังกฤษ หมายถึงการขยายแสงหรือไมโครเวฟ โดยการกระตุ้นให้ปลดปล่อยรังสีออกมา เลเซอร์และเมเซอร์จึงมีหลักการการทำงานเหมือนกัน ต่างกันตรงช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น

เมเซอร์ถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ.1954 ต่อมาในปี ค.ศ. 1958 ทาวน์และชอโลว์ (C.H. Townes and A.L. Schawlow) ได้เสนอว่าหลักการที่ทำให้เกิดเมเซอร์ น่าจะนำมาใช้กับคลื่นแสงได้ ค.ศ. 1960 ไมแมน (Theodore Maiman) ได้ผลิตแสงเลเซอร์จากผลึกทับทิมได้สำเร็จเป็นครั้งแรก จัดเป็นเลเซอร์แบบของแข็ง (solid state laser) ให้แสงสีแดงมีความยาวคลื่น 694.3 นาโนเมตร ค.ศ. 1961 แจแวน, เบนเนตต์ และเฮอเรียท (Javan, Bennett and Herriot) สร้างเลเซอร์แก๊ส (Gas laser) ทำจากแก๊สฮีเลียม - นีออน เป็นครั้งแรก โดยให้เลเซอร์ซึ่งเป็นแสงอินฟราเรด มีความยาวคลื่น 1.15 ไมโครเมตร ค.ศ. 1962 ริจเดน และไวท์ (Rigden and White) สามารถสร้างเลเซอร์สีแดงที่ส่งออกมาอย่างต่อเนื่องจากแก๊สฮีเลียม-นีออน มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร นำมาใช้งานมากที่สุดในห้องปฏิบัติการ



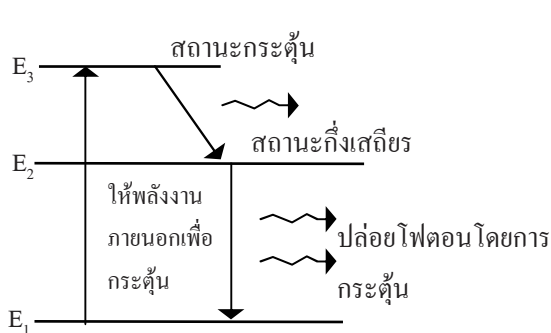
ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1962 เป็นต้นมา การพัฒนาการสร้างเลเซอร์แบบต่าง ๆ ดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันมีเลเซอร์ที่ทำจากของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ให้เลเซอร์ตั้งแบบคลื่นต่อเนื่องและคลื่นดล (pulse) พื้นฐานการสร้างเลเซอร์เหล่านี้เกิดจากการที่นักวิทยาศาสตร์มีความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างอะตอมของธาตุต่าง ๆ ได้ลึกซึ้งนั่นเอง

สมบัติของเลเซอร์ต่างจากคลื่นแสงทั่ว ๆ ไป คือ เลเซอร์เป็นแสงที่มีความบริสุทธิ์ทางแสง (spectral purity) มากที่สุดเท่าที่นักวิทยาศาสตร์ทำได้ เป็นแสงที่มีความถี่เดียว เลเซอร์ทุกขบวนจะมีเฟสที่ตรงกัน ที่เรียกกันว่าเป็นคลื่นอาพันธ์ (coherent) สามารถปรับโฟกัสให้เป็นจุดเล็กที่สุดได้ง่าย เพราะไม่มีแสงความถี่อื่นเจือปน จุดโฟกัสทำให้เล็กได้ถึงขนาด 1-2 ไมครอน ลำแสงเลเซอร์จะมีลักษณะขนานกันไปตลอดระยะทางไกล ๆ ไม่บานปลายออก ทำให้ความเข้มของแสงที่ปลายทางกับต้นทางต่างกันไม่มากนัก นักวิทยาศาสตร์สามารถสร้างเลเซอร์ให้มีความเข้มสูงมากเป็นพิเศษ เช่น สามารถสร้างเลเซอร์จากผลึกทับทิม ให้มีความสว่างถึง 100 วัตต์/เซนติเมตร² - สเตอเรเดียน (ความสว่างของแสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 130 วัตต์/เซนติเมตร² - สเตอเรเดียน)

9.2.1 หลักการทำให้เกิดแสงเลเซอร์

โดยปกติอิเล็กตรอนในอะตอมจะอยู่ในสถานะพื้นที่มีระดับพลังงานต่ำสุด ถ้ากระตุ้นอะตอมโดยใช้พลังงานจากภายนอก (เช่น กระตุ้นด้วยโฟตอน, หรือชนด้วยอิเล็กตรอนจากอะตอมอื่น) ทำให้อะตอมไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น โดยทั่วไปอะตอมจะอยู่ที่สถานะกระตุ้นได้ไม่เกิน 10^{-8} วินาที จะกลับไปสู่สถานะพื้นทันที แต่บางครั้งอะตอมจะไปอยู่สถานะกระตุ้นที่ต่ำกว่า และสามารถอยู่ในสถานะนี้ได้ยาวนานถึง 10^{-3} วินาที หรือมากกว่า เราเรียกสถานะนี้ว่า เป็นสถานะเสถียรชั่วคราว (metastable state) ก่อนที่จะกระจายโฟตอนออกมาแล้วกลับมาอยู่ที่สถานะพื้น

การทำให้เกิดเลเซอร์จึงต้องเกี่ยวข้องกับระดับพลังงานอย่างน้อย 3 ระดับ จากรูป 9.8 ให้ E_1 เป็นระดับพลังงานสถานะพื้น E_2 และ E_3 เป็นระดับพลังงานของสถานะกระตุ้น



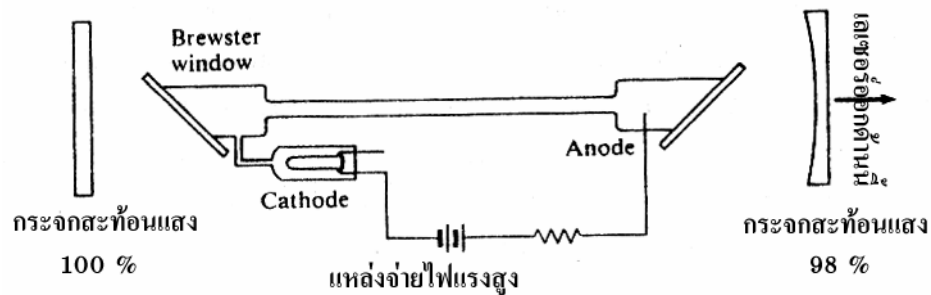
รูป 9.8 ระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเลเซอร์

กระตุ้นชั่วคราว แต่ถ้าอะตอมที่ระดับพลังงาน E_2 นี้ถูกกระตุ้น ซึ่งอาจเกิดจากอะตอมตัวใดตัวหนึ่ง



ปล่อยโฟตอนออกมาก่อน และโฟตอนที่ปล่อยออกมาจะไปกระตุ้นให้อะตอมอื่น ๆ ปลดปล่อยโฟตอนออกมาพร้อม ๆ กันจะได้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เสริมกัน ถ้ามีอะตอมที่ E_2 นี้เป็นล้านล้านตัว จะได้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เดียวกัน ความเข้มของคลื่นจะมากกว่าปกติ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้นี้คือเลเซอร์นั่นเอง เลเซอร์ที่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน 3 ระดับ ได้แก่ เลเซอร์จากผลึกทับทิม

เลเซอร์ที่ได้จากแก๊สฮีเลียม-นีออน จะเกิด population inversion ต่างจากที่เกิดในเลเซอร์ทับทิม ต้องใช้ระดับพลังงานถึง 4 ระดับ ลักษณะของหลอดเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน แสดงไว้ในรูปที่ 9.8



รูป 9.9 ส่วนประกอบของหลอดฮีเลียม-นีออนเลเซอร์

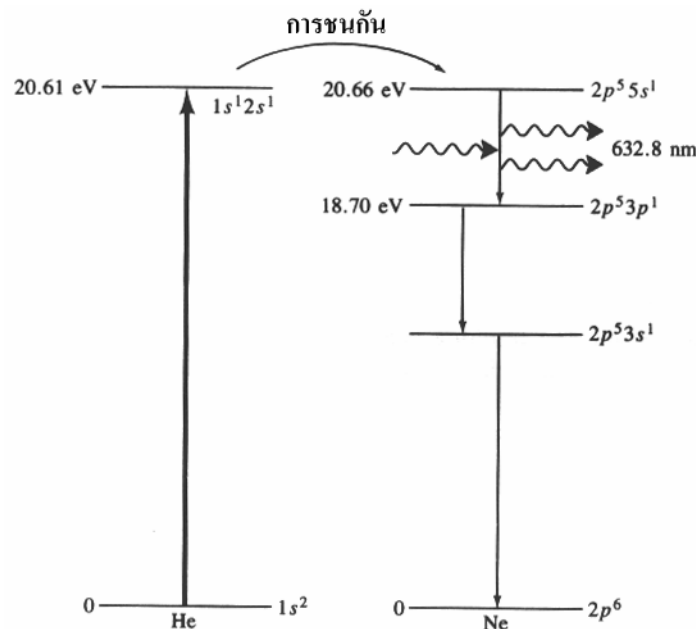
หลอดฮีเลียม-นีออนเลเซอร์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30-40 มิลลิเมตร ภายในมีหลอดแก้วรูปแคบ เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.5-3 มิลลิเมตร ภายในหลอดแก้วรูปแคบนี้บรรจุแก๊สฮีเลียม-นีออน อัตราส่วนจำนวนอะตอมฮีเลียมมากกว่าจำนวนอะตอมนีออน เป็นอัตราส่วน 5:1,7 :1 หรือ 10:1 ความดันอากาศภายในหลอดแก้วรูปแคบประมาณ 1 มิลลิเมตรปรอท ปลายหลอดทั้งสองมีกระจกขนาน ด้านหนึ่งสะท้อนแสงได้ 100% อีกด้านหนึ่งสะท้อนแสงได้ประมาณ 98% แสงเลเซอร์จะออกทางด้านนี้ ระยะห่างระหว่างกระจกทั้งสองเป็นเลขจำนวนเต็มของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเลเซอร์ที่ต้องการ ความต่างศักย์ที่ขั้วของหลอดประมาณ 1.5 kV ถึง 4 kV ขึ้นอยู่กับความยาวของหลอด กำลังที่ได้จากหลอดเลเซอร์อยู่ในช่วง 1-5 มิลลิวัตต์ ขึ้นอยู่กับขนาดของหลอดเลเซอร์

เมื่อจ่ายไฟให้หลอดเลเซอร์ทำงาน อิเล็กตรอนจากแคโทดจะไปกระตุ้นอะตอมของแก๊สผสม อะตอมฮีเลียมจะถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่าอะตอมนีออน อะตอมของฮีเลียมจะถูกกระตุ้นจากระดับพลังงาน 1s ไปสู่สถานะกระตุ้น 2s ระดับพลังงานนี้มีค่าเท่ากับ 20.61 eV อะตอมฮีเลียมที่ถูกกระตุ้นบางอะตอมเมื่อชนกับอะตอมนีออนจะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมนีออน ทำให้อิเล็กตรอนของนีออนที่ระดับพลังงาน 3p ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงาน 4s หรือ 5s ซึ่งมีค่า



พลังงาน 19.78 eV และ 20.66 eV ตามลำดับ ทั้งนี้ เพราะระดับพลังงานทั้งสองค่านี้มีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงาน 5s บางตัวจะตกมาอยู่ชั้น 4p แล้วคายพลังงานในรูปแบบแสงที่มีความยาวคลื่น 3391 nm และบางตัวจะตกมาอยู่ที่ระดับพลังงาน 3p ให้แสงสีแดง ความยาวคลื่น 632.8 nm อะตอมนีออนที่ระดับพลังงาน 4s จะกลับมาสู่ระดับพลังงาน 3p จะให้แสงที่มีความยาวคลื่น 1152 nm และ 1118 nm

อะตอมของฮีเลียมมีจำนวนมากกว่าอะตอมของนีออน และเมื่ออะตอมฮีเลียมซึ่งถูกกระตุ้นมีมาก การชนกับอะตอมนีออนทำให้อะตอมของนีออนไปอยู่ที่ระดับพลังงาน 4s และ 5s มีมากกว่าอะตอมนีออนที่สถานะปกติ และจะยังคงอยู่ที่สถานะกระตุ้น 4s และ 5s นานกว่าปกติ จึงเรียกระดับพลังงาน 4s และ 5s ว่าเป็นสถานะเสถียรชั่วคราว (metastable states) การที่อะตอมนีออนไปอยู่ที่สถานะกระตุ้นเป็นจำนวนมากนี้ เรียกว่าเกิด population inversion เมื่ออะตอมนีออนถูกกระตุ้นให้คายพลังงานเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ และมีทิศทางต่าง ๆ กัน แสงที่อยู่ในแนวแกนของหลอดเลเซอร์เท่านั้นที่จะสะท้อนที่กระจกที่ปลายทั้งสอง แล้วบางส่วนย้อนกลับเข้ามาใหม่ ซึ่งจะกระตุ้นให้อะตอมนีออนตัวอื่นคายพลังงานออกมาด้วย แสงส่วนที่ไม่อยู่ในแนวแกนจะผ่านข้างหลอดแก้วเป็นแสงธรรมดา เราสามารถเลือกความยาวของคลื่นแสงเลเซอร์ที่ต้องการ โดยเคลือบกระจกสำหรับความยาวคลื่นแสงที่ต้องการให้ผ่านเท่านั้น เนื่องจากมีอิเล็กตรอนกระตุ้นอะตอมฮีเลียมตลอดเวลา ทำให้หลอดเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนทำงานต่อเนื่องกัน แสงเลเซอร์ที่ได้จึงเป็นคลื่นต่อเนื่อง เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนนี้นิยมใช้ในการสาธิตเกี่ยวกับสมบัติของแสงในห้องทดลอง



รูป 9.10 แผนภาพระดับพลังงานของการเกิดเลเซอร์แบบฮีเลียม-นีออน



9.2.2 ประโยชน์ของเลเซอร์

เลเซอร์ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ด้านการแพทย์ นำเลเซอร์ไปใช้งานด้านศัลยกรรมต่าง ๆ เช่น ศัลยกรรมตกแต่ง ใช้ผ่าตัดไฝ ขจัดปานดำ ตกแต่งผิวหนัง หรือหน้าอกหย่อนยาน ใช้ในการผ่าตัดกระดูกและข้อต่อ ทำลายก้อนเนื้ออกและมะเร็ง ใช้ในงานผ่าตัดเล็ก ๆ ที่ต้องการความละเอียดมาก ๆ เช่น ผ่าตัดนัยน์ตา ผ่าตัดระบบประสาท สมอง แสงเลเซอร์สามารถโฟกัสได้เป็นบริเวณเล็ก ๆ ดีกว่าคมมีด ผ่าตัด แสงเลเซอร์จะทำให้เส้นโลหิตและเม็ดโลหิตปิดตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่ต้องเสียเลือดมาก การผ่าตัดจึงสะดวก ลดการติดเชื้อได้มาก

2. ด้านอุตสาหกรรม ในงานโลหะ ใช้เลเซอร์ตัดหรือเจาะชิ้นงาน สามารถตัดได้คงที่ทุกทิศทาง ไม่ต้องเริ่มต้นจากขอบชิ้นงาน แนวการตัดจะเป็นรอยเล็กมาก ผิวที่ตัดจะเรียบไม่ขรุขระเหมือนตัดด้วยแก๊สทั่วไป เลเซอร์ที่นิยมใช้คือ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าเลเซอร์ CO₂ ขนาด 2 กิโลวัตต์ สามารถตัดเหล็กสแตนเลสหนา 6.3 มิลลิเมตร ด้วยความเร็ว 4 มิลลิเมตรต่อวินาที ตัดทองเหลืองหนา 3.2 มิลลิเมตร ด้วยความเร็ว 3 มิลลิเมตร/วินาที ในงานอิเล็กทรอนิกส์ใช้เลเซอร์ในการเชื่อมอุปกรณ์ขนาดเล็ก ซึ่งไม่สามารถเชื่อมได้ด้วยหัวแร้งธรรมดา เช่น การเชื่อมตัวเก็บประจุลงบนแผ่นซิลิคอน การบัดกรีในวงจรไอซี ใช้เลเซอร์ตัดแผ่นฟิล์มบาง ๆ ขนาด 2 × 3 มิลลิเมตร เพื่อทำตัวต้านทานแบบฟิล์มบางใช้ในการขีดแผ่น semiconductor wafer ให้เป็นรอยโดยปราศจากฝุ่นผงรบกวน

3. ด้านคอมพิวเตอร์ สามารถใช้เลเซอร์บันทึกสัญญาณดิจิทัลลงบนแผ่นซีดี (compact disk, CD) ขณะเดียวกันก็ยังสามารถอ่านข้อมูล แผ่นซีดีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร สามารถจุข้อมูลได้ถึง 600 MB (หรือบันทึกตัวอักษรได้ 2 แสนหน้ากระดาษ)

แผ่น laser videodisk มีขนาดใหญ่ประมาณ 12-14 นิ้ว อ่านได้อย่างเดียว สามารถจุข้อมูลได้ 1000 ถึง 4000 MB หรือมากกว่านี้ การใช้แผ่นซีดีเก็บบันทึกข้อมูล เป็นตัวกระตุ้นให้มีการพัฒนาตัวรับและส่งแสงเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ไดโอด ปัจจุบันเราสามารถสร้างแผ่นซีดีที่สามารถอ่านและเขียนได้ คาดกันว่าระบบนี้จะเข้ามาแทนที่ไมโครฟิล์ม เพราะสามารถที่จะจัดเก็บเอกสารและรูปภาพได้มากกว่าและละเอียดกว่า

4. ด้านโทรคมนาคม ใช้แสงเลเซอร์ในการส่งข้อมูลแทนไมโครเวฟ โดยผ่านทางเส้นใยนำแสง (Fibre optics) สามารถส่งได้ไกลหลายร้อยกิโลเมตร ข้อมูลที่ส่งได้มีทั้งเสียง, ภาพเคลื่อนไหว และตัวอักษร ในอนาคตโทรศัพท์ที่ใช้งานในปัจจุบันจะมีจอภาพมองเห็นตัวผู้พูดด้วย

5. ด้านการค้าขาย ศูนย์การค้าบางแห่งจะใช้บาร์โค้ด (barcode) ติดไว้ที่สินค้า บาร์โค้ดนี้จะบอกราคา รหัสสินค้า ประเภทสินค้า สามารถอ่านบาร์โค้ดนี้ด้วยเครื่องอ่านที่ใช้แสงฟิสิกส์รามงกล <http://www.rit.ac.th/homepage-sc/physics/>



เลเซอร์ตรวจจับแถบของบาร์โคด แล้วนำมาแปลความหมาย ทำให้คิดราคาสินค้าได้รวดเร็ว สามารถเก็บข้อมูลที่อ่านได้จากการขายสินค้าส่งไปยังคลังสินค้าเพื่อตรวจสอบสต็อก

6. ด้านงานวิจัยวิทยาศาสตร์ ใช้ในการกำหนดค่ามาตรฐานของความยาว วัดระดับพลังงานของอะตอมและโมเลกุล การสร้างภาพโฮโลกราฟี (Holography) ใช้เลเซอร์ใน ขบวนการแยกไอโซโทป และขบวนการปฏิกิริยาเคมี

นอกจากนี้ ยังนำไปใช้ในด้านพลังงาน โดยการโฟกัสแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดเล็ก ๆ ทำให้บริเวณที่โฟกัสมีพลังงานสูงมาก มีอุณหภูมิถึง $10^8 - 10^9$ เคลวิน นำความร้อนนี้ไปใช้ใน งานวิจัย ทำให้เกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์แบบฟิวชัน (Thermonuclear fusion) ที่สามารถ ควบคุมได้ ด้านการทหาร ใช้เลเซอร์พลังงานสูงเป็นอาวุธทำลายรถถังและจรวดนำวิถี ใช้เป็น อาวุธในสงครามอวกาศในโครงการ “สตาวอร์ (starwar)”

9.3 นิวเคลียสและสมบัติของนิวเคลียส

นิวเคลียสเป็นแก่นของอะตอม อิเล็กตรอนในระดับพลังงานทั้งหลายเป็นเพียงผิวนอกของอะตอมเท่านั้น มวลส่วนใหญ่ของอะตอมจะอยู่ที่นิวเคลียส ธาตุต่าง ๆ เกิดขึ้นได้เพราะ จำนวนอนุภาคในนิวเคลียสของแต่ละธาตุแตกต่างกัน

9.3.1 ส่วนประกอบของนิวเคลียส

นิวเคลียสของธาตุทั้งหลายประกอบด้วยอนุภาคพื้นฐาน 2 ชนิด คือ โปรตอน และ นิวตรอน โปรตอนคือนิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจน มีขนาดประจุเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูโลมบ์ มีมวล 1.673×10^{-27} กิโลกรัม ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1886 และนิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุไฟฟ้า มีมวล 1.675×10^{-27} กิโลกรัม ถูกค้นพบโดยแชดวิก (J. Chadwick) ในปี ค.ศ. 1932 เราเรียก โปรตอนและนิวตรอนที่อยู่ในนิวเคลียสว่า นิวคลีออน (nucleon) ในการเขียนสัญลักษณ์ของธาตุ X ใด ๆ จะเขียนเป็น ${}_Z X^A$ Z จะใช้แทนเลขอะตอม (atomic number) เป็นตัวเลขที่บอกจำนวน โปรตอนในนิวเคลียส A แทนเลขมวล (mass number) บอกจำนวนโปรตอนและนิวตรอนใน นิวเคลียส

จากการใช้เครื่องมือ mass spectrometer วัดมวลของอะตอมต่าง ๆ ในสภาวะที่เป็น อีออน (ion) เมื่อหักลบมวลของอิเล็กตรอน ผลที่เหลือคือมวลของนิวเคลียส พบว่าธาตุชนิด เดียวกันมีมวลอะตอมไม่เท่ากัน เช่น ธาตุคลอรีนมีมวลอะตอม 35.5 kg/kmole เมื่อตรวจด้วย mass spectrometer จะพบคลอรีนที่มีมวลประมาณ 35 kg/kmole 75% และคลอรีนที่มีมวล ประมาณ 37 kg/kmole ประมาณ 25% เมื่อหาค่าเฉลี่ยของมวลอะตอมจะได้ 35.5 พอดี คลอรีน ทั้งสองแบบมีสมบัติทางเคมีเหมือนกันทุกประการ ธาตุเดียวกันแต่มีมวลอะตอมไม่เท่ากัน



เรียกว่า ไอโซโทป ซึ่งต่อมาทราบว่ามวลอะตอมที่ต่างกันนั้นเกิดจากการมีจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสไม่เท่ากัน มีธาตุประมาณ 20 ธาตุที่มีไอโซโทปไม่น้อยกว่า 6 ไอโซโทป ดีบุก (Sn) มีจำนวน 10 ไอโซโทป ไอโซโทปของธาตุหนึ่ง ๆ เรียกว่าเป็นนิวไคลด์ (nuclide) ตัวหนึ่ง นิวเคลียสของธาตุหนึ่งจึงมีนิวไคลด์ได้หลายแบบ ปัจจุบันพบว่ามีนิวไคลด์ประมาณ 280 ชนิดเป็นนิวไคลด์ที่เสถียร และประมาณ 1200 ชนิดจะไม่เสถียร จะแผ่รังสีแล้วสลายตัวกลายเป็นนิวไคลด์อีกชนิดหนึ่ง

เนื่องจากมวลของนิวไคลด์มีขนาดเล็กมาก ในปี ค.ศ. 1960 นักวิทยาศาสตร์จึงได้วางมาตรฐานสากลเพื่อใช้วัดนิวไคลด์ โดยใช้หน่วย u หรือ amu (Unified Atomic Mass Unit) กำหนดให้ 1 u เท่ากับ 1/12 ของมวลอะตอมของคาร์บอน 12 (C^{12} เป็นธาตุที่พบในธรรมชาติ 98.89% มีมวลอะตอมเท่ากับ 12 พอดี) โดย $1 \text{ u} = 1.66042 \times 10^{-27}$ กิโลกรัม โดยใช้สูตร $E = mc^2$ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} 1 \text{ u} &= 1.660566 \times 10^{-27} \text{ กิโลกรัม} \\ &= 1.49231 \times 10^{-10} \text{ จูล} \\ &= 931.476 \text{ เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์} \end{aligned}$$

มวลของโปรตอนและนิวตรอนในหน่วยของ u และหน่วยอื่นจะเป็นดังนี้

ตาราง 9.4 มวลของนิวคลีออนและอิเล็กตรอน

อนุภาค	มวล (kg)	มวล (u)	มวล (MeV/c ²)
โปรตอน	1.67252×10^{-27}	1.0072825	938.256
นิวตรอน	1.67482×10^{-27}	1.0086659	939.550
อิเล็กตรอน	9.1095×10^{-31}	5.486×10^{-4}	0.511

9.3.2 ขนาดของนิวเคลียสและพลังงานยึดเหนี่ยว

การทดลองของรัทเธอร์ฟอร์ด โดยยิงอนุภาคแอลฟาเข้าไปในแผ่นโลหะบางๆ สามารถคำนวณหาระยะทางที่อนุภาคแอลฟาวิ่งเข้าไปใกล้นิวเคลียสมากที่สุดได้เมื่อการชนของอนุภาคแอลฟากับอะตอมอยู่ในแนวเส้นตรง (head on) ทำให้มุมสะท้อนกลับของอนุภาคแอลฟาเท่ากับ 180 องศา เมื่อยิงอนุภาคแอลฟาผ่านแผ่นทองคำเปลว พบว่าอนุภาคแอลฟาเข้าไปใกล้นิวเคลียสอยู่ห่างจากนิวเคลียสประมาณ 3.0×10^{-14} เมตร นั่นคือ ขนาดของนิวเคลียสประมาณได้ไม่เกินตัวเลขค่านี้นี้ อนุภาคแอลฟาไม่สามารถเข้าไปถึงนิวเคลียสได้มากกว่านี้เพราะแรงผลักรวมกันจะต้านไว้



ในการวัดขนาดของนิวเคลียสเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงค่าที่แท้จริงนั้น ในภายหลังใช้ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (100 MeV ถึง 1 GeV) หรือนิวตรอนซึ่งเป็นอนุภาคเป็นกลางมีความเร็วสูง (20 MeV หรือมากกว่า) การกระเจิงของอิเล็กตรอนจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับประจุที่อยู่ภายในนิวเคลียส การกระเจิงของนิวตรอนทำให้สามารถประมาณเนื้อสารภายในนิวเคลียสได้ จากการทดลองทุก ๆ กรณีพบว่า ปริมาตรของนิวเคลียสจะเป็นสัดส่วนตรงกับจำนวนนิวคลีออนที่มีอยู่ในนิวเคลียสนั้น หรือขึ้นกับจำนวนโปรตอนและนิวตรอน (A)

ให้ R เป็นรัศมีของนิวเคลียส ปริมาตรของนิวเคลียสคือ $\frac{4}{3}\pi R^3$ จะได้

$$R \propto A^{1/3}$$

สมการสำหรับรัศมีของนิวเคลียสจะได้เป็น

$$R = R_0 A^{1/3} \dots\dots\dots(9.15)$$

R_0 เป็นค่าคงที่ แต่ปัจจุบันยังวัดค่าที่แน่นอนไม่ได้ (มีค่าอยู่ระหว่าง 1.2×10^{-15} ถึง 1.48×10^{-15} เมตร) ขึ้นอยู่กับลักษณะการทดลองและอนุภาคที่ใช้ยิงเข้าไปในนิวเคลียส อิเล็กตรอนและนิวตรอนมีอันตรกิริยากับนิวเคลียสต่างกัน ค่าที่นิยมใช้คือ $R_0 = 1.35 \times 10^{-15}$ เมตร กำหนดหน่วยใหม่โดยให้ 1 เฟอรัมี (Fermi) เท่ากับ 10^{-15} เมตร สมการ (9.15) จึงเขียนได้ใหม่เป็น

$$R \cong 1.35 A^{1/3} \text{ Fermi} \dots\dots\dots(9.16)$$

ตัวอย่าง 9.3 จงคำนวณหารัศมีของนิวเคลียสของสังกะสี ${}_{30}\text{Zn}^{65}$ และยูเรเนียม ${}_{92}\text{U}^{238}$

วิธีทำ จากสมการ (9.15)

$$\text{รัศมีของนิวเคลียสของสังกะสี} \cong 1.35 \times (65)^{1/3}$$

$$\cong 5.428 \text{ เฟอรัมี}$$

$$\text{รัศมีของนิวเคลียสของยูเรเนียม} \cong 1.35 \times (238)^{1/3}$$

$$\cong 8.366 \text{ เฟอรัมี}$$

นิวคลีออนถูกยึดไว้ให้อยู่ในนิวเคลียสได้ทั้ง ๆ ที่โปรตอนเป็นประจุบวก แรงผลักรวมปีไม่สามารถกระจายโปรตอนเหล่านี้ได้ แสดงว่าแรงนิวเคลียร์แบบเข้ม (strong nuclear force) ยึดนิวคลีออนเหล่านี้ไว้ด้วยพลังงานมหาศาล พลังงานนี้เรียกว่า พลังงานยึดเหนี่ยวของ



นิวเคลียส (binding energy) พลังงานนี้มีค่าเป็น MeV เราสามารถใช้สูตรมวล-พลังงานของไอน์สไตน์ ($E = mc^2$) อธิบายพลังงานยึดเหนี่ยวได้ในเทอมของมวล

จากการทดลองพบว่ามวลของนิวเคลียสที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าผลบวกของมวลของนิวคลีออนของนิวเคลียสในภาวะอิสระเสมอ มวลที่หายเนื่องจากการรวมตัวของอนุภาคต่าง ๆ เพื่อเป็นนิวเคลียส เรียกว่ามวลพร่อง (mass defect) ซึ่งจะกลายเป็นพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างนิวคลีออนในนิวเคลียสนั้น ๆ

ตัวอย่าง 9.4 อะตอมไฮโดรเจน (deuterium) มีโปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 1 ตัวในนิวเคลียส จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส

วิธีทำ นิวเคลียสของดิวเทอเรียม เรียกว่า ดิวเทอรอน มีลักษณะที่ง่ายที่สุด มวลของอะตอมไฮโดรเจนปกติคือ 1.007825 u มวลของนิวตรอน 1 ตัว คือ 1.008665 u ผลรวมของมวลอะตอมไฮโดรเจนและนิวตรอน คือ 2.016490 u แต่มวลของดิวเทอเรียมที่วัดได้จริง ๆ คือ 2.014102 u

$$\begin{aligned} \text{มวลพร่อง} &= 2.016490 - 2.014102 \text{ u} \\ &= 0.002388 \text{ u} \end{aligned}$$

มวล 1 u เมื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานมีค่าเท่ากับ 931.476 MeV

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น พลังงานที่ยึดเหนี่ยว} &= 0.002388 \times 931.476 \\ &= 2.2244 \text{ MeV} \end{aligned}$$

นั่นคือ จะต้องให้พลังงาน 2.2244 MeV แก่ดิวเทอรอนเพื่อจะแยกโปรตอนและนิวตรอนออกเป็นอิสระ

มวลของดิวเทอเรียม 2.014102 เป็นมวลของอะตอม ในการคำนวณเราใช้มวลอะตอมแทนมวลของนิวเคลียส เมื่อต้องการรู้มวลนิวเคลียสก็นำเอามวลอิเล็กตรอนมาหักออก

อะตอมของธาตุใดซึ่งเขียนอยู่ในรูป ${}_Z X^A$ สามารถคำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{Binding Energy} = [Zm_p + (A - Z)m_n + Zm_e - M(A, Z)]c^2$$

เมื่อ m_p , m_n และ m_e คือ มวลของโปรตอน, นิวตรอน และอิเล็กตรอน ตามลำดับ $M(A, Z)$ เป็นมวลอะตอมที่วัดได้จริงซึ่งจะน้อยกว่าผลรวมของมวลของอนุภาคทั้งหมด ถ้ากำหนดให้ $m_p + m_e = m_H$ ซึ่งเป็นมวลของไฮโดรเจนอะตอม สมการพลังงานยึดเหนี่ยวจะเขียนได้ใหม่เป็น



$$\text{Binding Energy} = [Zm_p + (A - Z)m_n - M(A, Z)]c^2 \dots\dots\dots(9.17)$$

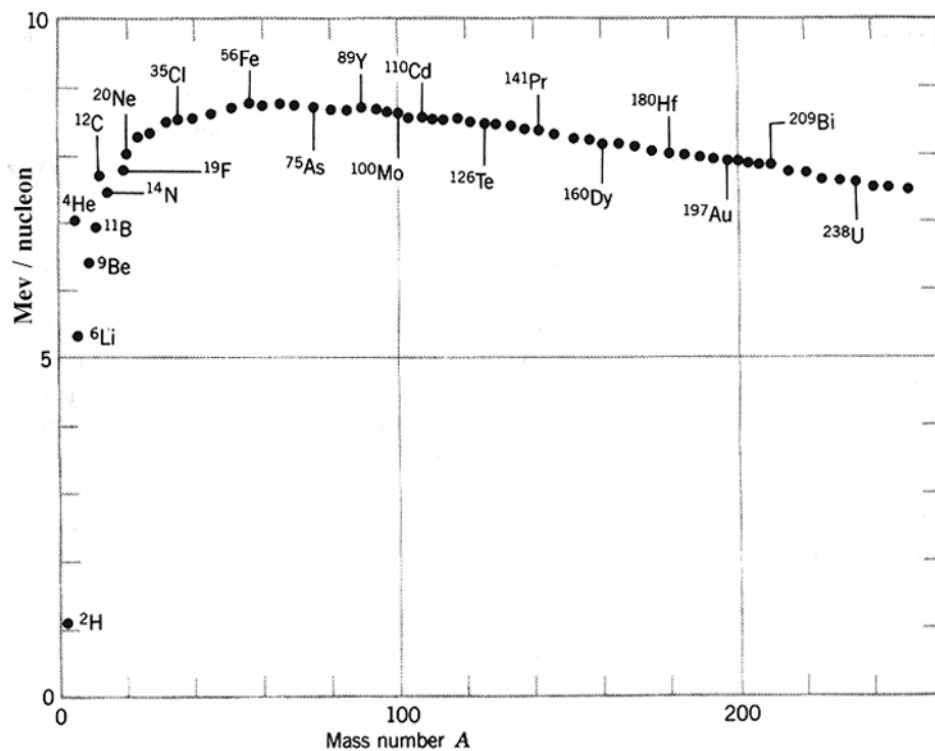
ตัวอย่าง 9.5 จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวของ ${}_{83}\text{Bi}^{209}$ ที่มีมวลอะตอม 208.980388 u

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{พลังงานยึดเหนี่ยวของบิสมีท} &= (83 \times 1.007825 + (209 - 83) \times 1.008665 - \\ &208.980388) \times c^2 \times \frac{931.476}{c^2} \text{ MeV} \\ &= 1640.215 \text{ MeV} \end{aligned}$$

พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส ขนาด MeV มีค่าค่อนข้างสูงมาก พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวไคลด์มีค่าเริ่มตั้งแต่ 2.22 MeV (ของดิวเทอเรียม) จนถึง 1640 MeV (ของบิสมีท 209) เมื่อเปรียบเทียบพลังงานนี้ให้เป็นกิโลจูล/กิโลกรัม พลังงานยึดเหนี่ยวโดยเฉลี่ยเมื่อแปลงเป็นหน่วยนี้จะมีค่าประมาณ 8×10^{11} kJ/kg พลังงานความร้อนที่ได้จากแก๊สโซลีนมีค่าประมาณ 4.7×10^4 kJ/kg เท่านั้น น้อยกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวถึง 17 ล้านเท่า

พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนหมายถึงนำจำนวนนิวคลีออน(โปรตอนและนิวตรอน) ไปหารพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของดิวเทอเรียมมีค่า $2.2 \text{ MeV}/2 = 1.1 \text{ MeV/nucleon}$ ของบิสมีท (${}_{83}\text{Bi}^{209}$) มีค่าเท่ากับ $1640 \text{ MeV}/209 = 7.8 \text{ MeV/nucleon}$ เมื่อนำค่าพลังงานเหนี่ยวนำต่อนิวคลีออนเขียนเป็นกราฟกับเลขมวลอะตอมของธาตุต่าง ๆ จะได้เส้นกราฟ ดังรูป 9.11



รูป 9.11 พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนกับเลขมวลอะตอมของธาตุต่าง ๆ

นิวเคลียสของธาตุใดที่มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมาก แสดงว่านิวเคลียสนั้นจะเสถียร เพราะจะต้องใช้พลังงานมากในการที่จะทำให้อนุภาคในนิวเคลียสเป็นอิสระ พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมีค่าสูงสุดที่ $A = 56$ คือ ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ ซึ่งเป็นนิวเคลียสของเหล็ก เหล็กจึงมีนิวเคลียสที่เสถียรที่สุด

เมื่อ A มีค่าน้อย ๆ พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนจะมีค่าน้อย และจะเพิ่มอย่างรวดเร็วจนถึง $A = 20$ (ธาตุนีออน) นิวเคลียสที่มีเลขมวลอะตอมเท่ากับ 20 ถึง 160 พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก มีค่าเฉลี่ยประมาณ 8.5 MeV

เมื่อเลขมวลอะตอมมีค่าสูง ๆ ตั้งแต่ 140 เป็นต้นไป ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนจะลดลงอย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง ลดลงจนถึง 7.6 MeV ที่ $A = 238$ ซึ่งเป็นธาตุยูเรเนียม ประกอบด้วยโปรตอน 93 ตัว และนิวตรอน 143 ตัว แสดงว่านิวคลีออนยึดกันอยู่อย่างหลวม ๆ เมื่อพิจารณานิวเคลียสที่มีเลขอะตอมสูง ๆ พบว่า พลังงานศักย์ที่เกิดจากแรงผลักระหว่างโปรตอนจะไปลดพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวคลีออน ทำให้นิวเคลียสสลายตัวแผ่กัมมันตภาพรังสีออกมา จำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสมีส่วนเป็นกันชนระหว่างโปรตอนกับโปรตอนด้วยกัน จะช่วยลดพลังงานศักย์ที่เกิดจากแรงคูโลมบ์ จำนวนนิวตรอนต่อจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1.55



9.3.3 แบบจำลองของนิวเคลียส

โครงสร้างที่แท้จริงของนิวเคลียสมีลักษณะอย่างไรนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน เราทราบว่าแรงนิวเคลียร์เป็นแรงดึงดูดที่แรงกว่าแรงคูลอมบ์ เป็นแรงที่มีระยะพิสัยสั้น มีขอบเขตจากจุดศูนย์กลางถึงผิวของนิวเคลียสหรือต่ำกว่าผิวนเล็กน้อย ยังไม่มีทฤษฎีใดที่อธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียส ลักษณะเสถียรและไม่เสถียรของนิวไคลด์ต่าง ๆ ได้อย่างสมบูรณ์ นักวิทยาศาสตร์พยายามสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายพฤติกรรมต่างๆ ของนิวเคลียส เช่น แบบจำลองหยดของเหลว (liquid drop model) แบบจำลองแบบชั้น (shell model) แบบจำลองที่มีอันตรกิริยาโดยตรง (direct-interaction model) แบบจำลองเฟอร์มิแก๊ส (Fermi gas model) แบบจำลองนิวเคลียสเป็นวัตถุโปร่งแสง (optical model) แบบจำลองชั้นและหยดของเหลวผสมกัน (collective model) แต่ละแบบที่เสนอมานั้นไม่มีแบบใดที่สมบูรณ์ เพราะแต่ละแบบสามารถใช้ อธิบายปรากฏการณ์ของนิวเคลียสได้สอดคล้องบางเรื่องเท่านั้น

ตาราง 7.5 แสดงมวลและตัวเลขของอะตอมของธาตุต่าง ๆ บางธาตุ



Z	ธาตุ	สัญลักษณ์	A	มวลอะตอม (u)
0	นิวตรอน	n	1	1.008665
1	ไฮโดรเจน	H	1	1.007825
			2	2.014102
			3	3.01605
2	ฮีเลียม	He	3	3.016029
			4	4.002603
			6	6.018891
3	ลิเทียม	Li	6	6.015123
			7	7.016004
			8	8.022487
6	คาร์บอน	C	10	10.016858
			11	11.011433
			12	12.000000
			13	13.003355
			14	14.003242
			15	15.010599
8	ออกซิเจน	O	14	14.008597
			15	15.003065
			16	15.974915
			17	16.999131
			18	17.999159
			19	19.003576
9	โซเดียม	Na	22	21.994435
			23	22.98977
			24	23.990963
13	อลูมิเนียม	Al	27	26.981541
29	ทองแดง	Cu	63	62.929599
			64	63.929766
			65	64.927792
47	เงิน	Ag	107	106.905095
			108	107.905956
			109	108.904754



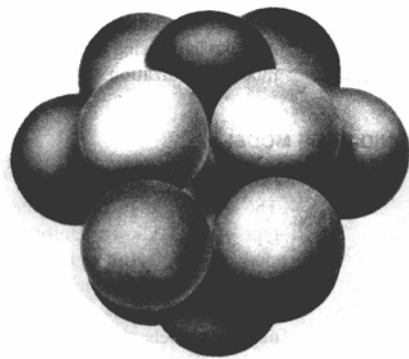
แบบจำลองหยดของเหลว

เสนอโดยบอร์ ในปีค.ศ. 1937 อาศัยหลักที่ว่าแรงนิวเคลียร์มีระยะพิสัยสั้น นิวคลีออนในนิวเคลียสจึงมีอันตรกิริยาต่อกันเฉพาะนิวคลีออนที่อยู่รอบ ๆ ตัวมันเท่านั้น เช่นเดียวกับแรงระหว่างโมเลกุลของของเหลว ซึ่งจะคิดเฉพาะโมเลกุลข้างเคียง โมเลกุลมีการสั่นและสามารถเคลื่อนที่โดยรักษาระยะห่างระหว่างโมเลกุลไว้เสมอ อันที่จริงผลึกในของแข็งก็เป็นแบบนี้เช่นกัน แต่เราไม่นำมาทำเป็นแบบจำลอง เพราะเมื่อคำนวณพลังงานเฉลี่ยซึ่งเกิดจากการสั่นของนิวคลีออนในรูปผลึกของแข็ง พบว่ามีค่ามากเกินไป ซึ่งทำให้นิวเคลียสไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้ การใช้หยดของเหลวมาทำเป็นแบบจำลองจึงเหมาะสมกว่า

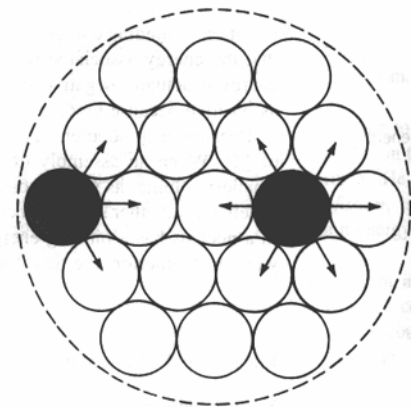
แบบจำลองหยดของเหลวนี้กำหนดให้นิวเคลียสมีรูปร่างเป็นทรงกลมเพราะจะทำให้เกิดแรงดึงดูดมากที่สุด และเสถียรมากที่สุดด้วย นิวคลีออนเปรียบเสมือนเป็นโมเลกุลของของเหลว แบบจำลองนี้นำไปใช้อธิบายพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส สมการพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส (9.17) เป็นการคำนวณที่ได้จากมวลพ่องโดยอาศัยการพิจารณาพลังงานอื่น ๆ ที่ทำให้นิวคลีออนยึดติดอยู่ได้เหมือนเช่นหยดของเหลว เราก็จะหาพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสได้เช่นกัน พลังงานที่เกี่ยวข้องซึ่งต้องพิจารณามีดังนี้

ก. พลังงานที่นิวคลีออนใช้ยึดกันให้เป็นรูปทรงปริมาตร (volume energy) นิวคลีออน

ที่อยู่ใกล้กัน 2 ตัวถูกยึดไว้ด้วยพันธะ (bond) ระหว่างกันด้วย พลังงานเท่ากับ U เมื่อคิดต่อหนึ่งนิวคลีออนจะเท่ากับ $U/2$ นิวคลีออนตัวหนึ่งจะถูกนิวคลีออนอื่นรายรอบทั้งหมด 12 ตัว (เมื่อคิดว่านิวคลีออนแต่ละตัวมีรูปร่างเป็นทรงกลม) นิวคลีออนที่อยู่ภายในนิวเคลียสตัวหนึ่งจึงมีพลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ $(12)(U/2) = 6U$



(ก)



(ข)

รูป 9.12 นิวคลีออนในนิวเคลียสเป็นเสมือนโมเลกุลของหยดน้ำ

(ก) นิวเคลียส 1 ตัวถูกล้อมรอบด้วยตัวอื่น ๆ 12 ตัว

(ข) นิวคลีออนที่อยู่ใกล้ผิวจะมีอันตรกิริยาน้อยกว่าตัวที่อยู่



ให้จำนวนนิวคลีออนในนิวเคลียส คือ A พลังงานที่ใช้ในการยึดเหนี่ยวให้เป็นรูปทรงทั้งหมด คือ E_V

$$E_V = 6 AU$$

หรือเขียนสั้น ๆ ได้เป็น

$$E_V = a_1 A$$

พลังงานที่ยึดเหนี่ยวนิวคลีออนให้เป็นปริมาตรอยู่ได้จะแปรผันตรงกับจำนวนนิวคลีออน

ข. พลังงานยึดเหนี่ยวบริเวณพื้นผิว (Surface energy, E_S) นิวคลีออนที่อยู่ภายในนิวเคลียสจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่านิวคลีออนที่อยู่ทีพื้นผิว จำนวนนิวคลีออนที่อยู่ทีผิวนิวเคลียส จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของนิวเคลียส ให้ R เป็นรัศมีของนิวเคลียส

$$4\pi R^2 = 4\pi R_0^2 A^{2/3}$$

ผลที่ตามมาคือพลังงานยึดเหนี่ยวจะลดลงไปตามจำนวนนิวคลีออนที่อยู่ทีพื้นผิว

$$E_S = -a_2 A^{2/3}$$

E_S จะมีผลชัดเจนต่อนิวเคลียสที่เบาอย่างชัดเจนเพราะสัดส่วนจำนวนนิวคลีออนจะมากที่อยู่ทีผิวกว่าอยู่ภายใน และนิวเคลียสที่มีพื้นที่ผิวมาก ๆ เสถียรภาพของนิวเคลียสนั้นจะลดลง

ค. พลังงานคูลอมบ์ (Coulomb energy, E_C) เราหาพลังงานคูลอมบ์ในนิวเคลียสได้โดยคิดว่าเคลื่อนย้ายโปรตอนจำนวน Z ตัวจากระยะอนันต์ มารวมกันอยู่ในทรงกลมของนิวเคลียส ถ้าโปรตอนแต่ละคู่อยู่ห่างจากกันเป็นระยะ r เท่ากันทุกคู่ พลังงานศักย์เนื่องจากแรงคูลอมบ์ของแต่ละคู่คือ

$$V = \frac{-e^2}{4\pi \epsilon_0 r}$$

โปรตอนจับคู่กันได้ทั้งหมด $\frac{Z(Z-1)}{2}$ คู่ ดังนั้น

$$E_C = \frac{-Z(Z-1)e^2}{8\pi \epsilon_0} \frac{1}{r}$$



ถ้าโปรตอนกระจายในทรงกลมอย่างสม่ำเสมอ อาจประมาณได้ว่า $\frac{1}{r} \approx \frac{1}{R} \approx \frac{1}{A^{1/3}}$

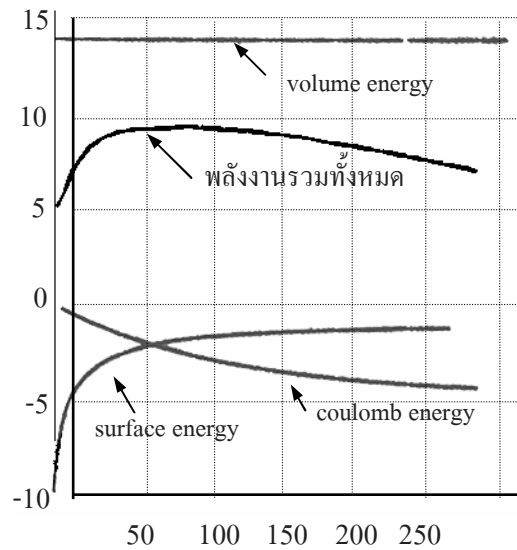
ดังนั้น

$$E_C = -a_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$$

พลังงานยึดเหนี่ยวในข้อ ก, ข และ ค นำไปรวมเป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสทั้งหมด คือ

$$\begin{aligned} \text{พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส } (E_b) &= E_V + E_S + E_C \\ &= a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} \dots\dots\dots(9.18) \end{aligned}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนกับจำนวนนิวคลีออน ผลที่ได้จะสอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้จากมวลพหุคูณ



รูป 9.13 พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนหาจากผลรวมของ E_V , E_S และ E_C ²

เราสามารถปรับปรุงสูตรในสมการ (9.18) ให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงค่าแท้จริง โดยพิจารณาผลกระทบจากสิ่งต่อไปนี้

² Beiser, Arthur. **Concepts of Modern Physics**. (Singapore : McGraw - Hill, 1987), p. 426.



ก. จำนวนนิวคลีออนที่เป็นเลขคู่-คู่ พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนจำนวนโปรตอน และนิวตรอนเท่านั้น ยังขึ้นอยู่กับจำนวนคู่หรือคี่ของโปรตอนและนิวตรอนอีกด้วย จากการจำแนกนิวไคลด์ต่าง ๆ พบว่าเป็นนิวไคลด์ที่เสถียร 259 ชุด แบ่งเป็นตารางดังนี้

ตาราง 9.6 แสดงนิวไคลด์ที่เสถียรจำแนกจำนวนโปรตอน-นิวตรอนเป็นเลขคู่-คี่

เลขมวล (A)	จำนวนโปรตอน (Z)	จำนวนนิวตรอน (A - Z)	จำนวนนิวไคลด์เสถียร
คู่	คู่	คู่	150
คี่	คู่	คี่	50
คี่	คี่	คู่	48
คู่	คี่	คี่	11
		รวม	259

จำนวนนิวคลีออนที่เป็นคู่-คู่ จะเสถียรมากที่สุด เช่น ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$ และ ${}^{16}_8\text{O}$ ให้ E_p เป็นพลังงานเนื่องจากการจับคู่ของนิวคลีออน (pairing energy) จะมีค่าเป็นบวกสำหรับจำนวนนิวคลีออนที่เป็นเลขคู่ ทั้งคู่เป็นศูนย์สำหรับจำนวนนิวคลีออนที่เป็นคู่-คี่ และคี่-คู่ และมีค่าเป็นลบสำหรับนิวคลีออนที่เป็นจำนวนคี่ทั้งคู่

$$\begin{aligned}
 E_p &= +a_4 A^{-3/4} \text{ เมื่อโปรตอนและนิวตรอนเป็นจำนวนคู่} \\
 &= 0 \text{ เมื่อโปรตอนและนิวตรอนเป็นคี่-คู่ หรือคู่-คี่} \\
 &= -a_4 A^{-3/4} \text{ เมื่อโปรตอนและนิวตรอนเป็นคี่-คี่}
 \end{aligned}$$

ข. จำนวนนิวคลีออนที่เบี่ยงเบนไปจากเส้น $Z = N$ จำนวนโปรตอนและนิวตรอนเป็นจำนวนคู่-คู่แล้ว ทำให้นิวไคลด์นั้นเสถียรแล้ว จำนวนโปรตอนใกล้เคียงกับจำนวนนิวตรอน นิวไคลด์นั้นจะเป็นนิวไคลด์ที่เสถียรด้วย นิวไคลด์ที่มีเลขอะตอมเบี่ยงเบนไปจาก $Z = N$ มาก ๆ พลังงานยึดเหนี่ยวจะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนตรงกับ $1/A$ ให้ E_A เป็นพลังงานที่เกิดจากจำนวนนิวคลีออนเบี่ยงเบนไปจากค่า $Z = N$ จะได้

$$E_A = -a_5 \frac{(A - 2Z)^2}{A}$$

พลังงานยึดเหนี่ยวที่ได้ปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาดแล้วจะได้เป็น



$$E_b = a_1 A - a_2 A^{\frac{2}{3}} - a_3 \frac{Z(Z-1)}{A^3} (\pm, 0) \frac{a_4}{A^4} - a_5 \frac{(A-2Z)^2}{A}$$

.....(9.19)

เรียกสมการ (9.19) ว่าเป็นสูตรของ C.F. Von Weizsacker เสนอไว้ในปี ค.ศ. 1935 ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมได้กำหนดไว้ดังนี้ $a = 14 \text{ MeV}$, $a_2 = 13 \text{ MeV}$, $a_3 = 0.60 \text{ MeV}$, $a_4 = 34 \text{ MeV}$ และ $a_5 = 19 \text{ MeV}$

แบบจำลองชั้น

อิเล็กตรอนในอะตอมจะเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า มีสถานะควอนตัมของแต่ละตัวโดยเฉพาะ แบ่งออกเป็นระดับพลังงาน และระดับพลังงานย่อย ธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับ 2, 10, 18, 36 และ 54 ซึ่งเป็นธาตุฮีเลียม, นีออน, อาร์กอน, คริปทอน และซีนอน ตามลำดับ จะไม่ทำปฏิกิริยากับธาตุอื่น พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุเหล่านี้มีค่ามากกว่าธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียง เราเรียกตัวเลขพวกนี้ว่าเป็นตัวเลขพิศวงของอะตอม (atomic magic number) ในนิวเคลียส นักวิทยาศาสตร์พบว่านิวเคลียสที่มีจำนวนโปรตอนหรือนิวตรอนเท่ากับ 2 8 20 28 50 82 และ 126 จะเป็นนิวเคลียสที่มีเสถียรภาพมาก นิวเคลียสจึงมีตัวเลขพิศวงเช่นเดียวกัน แสดงว่านิวคลีออนน่าจะมีโครงสร้างเช่นเดียวกับอะตอม คือเคลื่อนที่ภายใต้สนามของแรงนิวเคลียร์มีสถานะควอนตัมที่แน่นอน การเรียงตัวของนิวคลีออนมีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ

หลักฐานอื่น ๆ ที่แสดงว่านิวคลีออนมีโครงสร้างเป็นชั้น ได้แก่

- ธาตุที่มีจำนวนโปรตอนหรือนิวตรอน ตรงกับตัวเลขพิศวงจะมีจำนวนไอโซโทปที่เสถียรมากกว่าธาตุที่อยู่ใกล้เคียง เช่น ดีบุก ($Z = 50$) มีไอโซโทปที่เสถียร 10 ตัว ขณะที่อินเดียม ($Z = 49$) และพลวง ($Z = 51$) มีไอโซโทปที่เสถียรเพียง 2 ตัว

- นิวคลีดที่มีจำนวนโปรตอนหรือนิวตรอนเป็นตัวเลขพิศวง จะพบปริมาณไอโซโทปในธรรมชาติมากกว่า 60% ของธาตุนั้น โดยทั่วไปธาตุที่มีจำนวนนิวคลีออนเป็นเลขคู่โอกาสที่พบไอโซโทปของมันตามธรรมชาติน้อยกว่า 60% ตัวอย่างเช่น จากการสำรวจธาตุซีลีเนียม ($Z = 34$) ในธรรมชาติพบว่ามี $\text{Se}^{74} = 0.87\%$, $\text{Se}^{76} = 9.02\%$, $\text{Se}^{78} = 23.52\%$, $\text{Se}^{80} = 49.82\%$ และ $\text{Se}^{82} = 9.12\%$ ไม่มีไอโซโทปตัวใดมีปริมาณมากถึง 60% เลย

เมื่อพิจารณาธาตุที่มีจำนวนนิวตรอนเป็นตัวเลขพิศวง ${}_{38}\text{Sr}^{88}$ (จำนวนนิวตรอน = 50) พบในธรรมชาติ 82.56% ${}_{56}\text{Ba}^{138}$ (จำนวนนิวตรอน = 82) พบในธรรมชาติ 71.56% ${}_{58}\text{Ce}^{140}$ (จำนวนนิวตรอน = 82) พบในธรรมชาติ 88.48% ${}_{82}\text{Pb}^{208}$ (จำนวนโปรตอน = 82, นิวตรอน = 126) จะพบเพียง 52.3% ของปริมาณตะกั่วในธรรมชาติ แต่ก็ถือว่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของไอโซโทปที่มีจำนวนโปรตอน-นิวตรอนเป็นเลขคู่-คู่



จากการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสี ซึ่งแบ่งออกเป็นอนุกรม 4 ชุด พบว่าธาตุสุดท้ายที่เสถียร คือ $_{82}\text{Pb}^{208}$ และ $_{83}\text{Bi}^{209}$ ต่างก็มีจำนวนนิวตรอนเท่ากับ 126 ทั้งคู่

ในการอธิบายแบบจำลองชั้นของนิวเคลียสได้ตั้งสมมติฐานสำหรับแบบจำลองนี้ ดังนี้

1. นิวคลีออนแต่ละตัวจะเคลื่อนที่อย่างอิสระในสนามของแรงนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดขนาดมหึมา มีระยะพิสัยของแรงสั้นมากไม่เกิน 10^{-15} เมตร จากจุดศูนย์กลางของนิวเคลียส พลังงานศักย์เป็นฟังก์ชันกับระยะทางที่วัดจากจุดศูนย์กลางของระบบ

2. ระดับพลังงานหรือชั้นของนิวคลีออนจะเป็นไปตามหลักการกีดกันของเพาลี

(Pauli's exclusion principle)

เราสามารถใช้สมการชเรอดิงเงอร์(9.10) คำนวณหาสถานะควอนตัมของนิวคลีออนในนิวเคลียส โดยเปลี่ยนพลังงานศักย์ ($V(r)$) ในสมการให้สอดคล้องกับพลังงานศักย์ในนิวเคลียส ในปี ค.ศ. 1949 เมเยอร์ (Maria Mayer) และเจนเซน (J.H.D. Jensen) ได้เสนอโครงสร้างชั้นของนิวคลีออนพร้อม ๆ กัน โดยไม่ได้นัดหมายกันมาก่อน สิ่งที่จะต้องนำมาคิดในการกำหนดระดับพลังงานของนิวคลีออนด้วยก็คือ อันตรกิริยาที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองและการเคลื่อนที่รอบจุดศูนย์กลางระบบ (spin - orbit interaction) โดยให้ j เป็นเลขควอนตัมเนื่องจากอันตรกิริยานี้ j มีค่า

เท่ากับ $l \pm 1/2$ เป็นเลขควอนตัมบอกระดับพลังงาน l เป็นเลขควอนตัมเช่นเดียวกับในเรื่องของอะตอม $l = 0, 1, 2, 3, 4$ จะแทนด้วย s, p, d, f, g, ... ตามลำดับ เลขควอนตัม j ทำให้เกิดสถานะย่อยที่เป็นไปได้คือ $2j+1$ สถานะ เช่นในระดับพลังงาน $n = 2$ $l = 1$ j มีค่า $1/2$ และ $3/2$ เขียนเป็นสัญกรณ์เพื่อบอกสถานะได้เป็น $2P_{1/2}$ และ $2P_{3/2}$ จำนวนนิวคลีออนที่บรรจุได้สูงสุดในแต่ละค่า j เมื่อ $j = 1/2, 3/2, 5/2 \dots$ จะได้เป็น 2, 4, 6, ตามลำดับ จำนวนนิวคลีออนในแต่ละระดับพลังงานจึงมีจำนวนเป็น 2, 6, 12, 8, 22, 32 และ 44 จำนวนนิวคลีออน (ทั้งโปรตอนหรือนิวตรอน) ที่มีอยู่เต็มในระดับพลังงานที่เป็นไปได้จึงมีค่าเป็น 2, 8, 20, 28, 50, 82 และ 126 สอดคล้องกับตัวเลขพิศวง รายละเอียดของนิวคลีออนแต่ละระดับชั้นดูได้จากตาราง 9.7

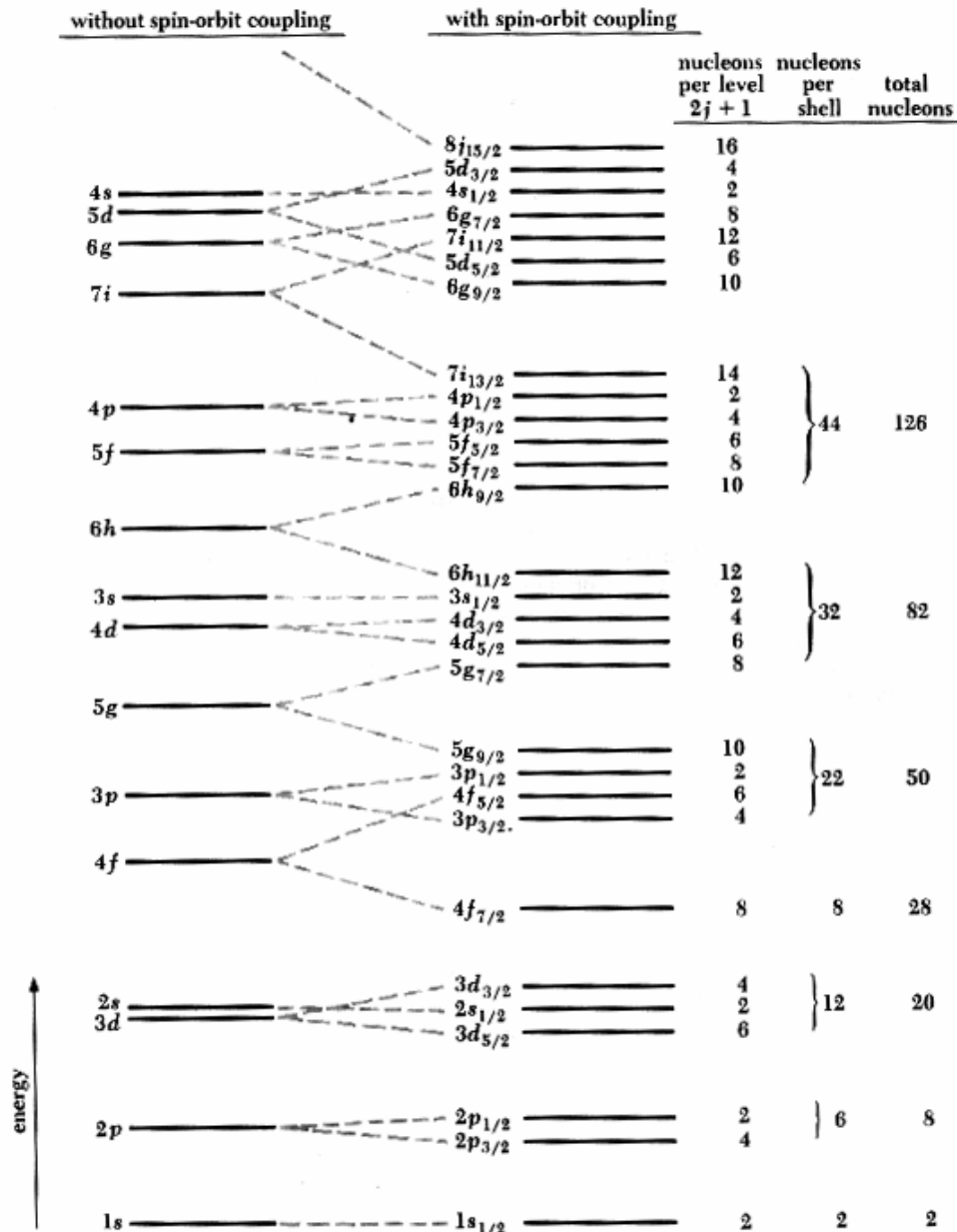
9.4 กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

สารกัมมันตภาพรังสีถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1896 โดยเบคเคอเรล (Henri Becquerel) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส พบว่าเกลือยูเรเนียมให้รังสีแผ่ออกมาเมื่ออำนาจในการผ่านทะลุสูง นักวิทยาศาสตร์อีกหลายท่าน เช่น คูรี, รัทเธอร์ฟอร์ด ได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสี สรุปได้ว่า รังสีที่แผ่ออกมามีด้วยกันอยู่ 3 ชนิด คือ รังสีแอลฟา (α - ray) รังสีเบ



ตา (β -ray) และรังสีแกมมา (γ - ray) การเกิดกัมมันตภาพรังสีเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในนิวเคลียส ไม่เกี่ยวกับสภาพแวดล้อม เช่น ความดัน อุณหภูมิ หรือสนามแม่เหล็ก

ตาราง 7.7 ระดับพลังงานของนิวคลีออนในแบบจำลองชั้น



ไฟฟ้า รังสีแอลฟาและเบตาจะถูกปล่อยออกมาเมื่อนิวเคลียสสลายตัวกลายเป็นนิวเคลียสใหม่ (spontaneous disintegration) แต่ถ้านิวเคลียสจัดเรียงโปรตอนและนิวตรอนภายในใหม่จะแผ่รังสีแกมมาออกมา



รังสีแอลฟาหรืออนุภาคแอลฟา คือ นิวเคลียสของธาตุฮีเลียม ประกอบด้วย โปรตอน 2 ตัว และนิวตรอน 2 ตัว มีพลังงานอยู่ในช่วง 4 MeV ถึง 9 MeV มีอำนาจในการผ่านทะลุต่ำ วิ่งผ่านอากาศได้เพียงไม่กี่เซนติเมตร

รังสีเบตาหรืออนุภาคเบตา คือ อิเล็กตรอน (β^-) หรือโพสิตรอน (β^+) แต่โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงรังสีเบตา จะหมายถึงอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบ มีพลังงานสูง ผ่านทะลุอากาศได้ระยะทางเป็นฟุต มีความเร็วเกือบเท่าความเร็วแสง

รังสีแกมมา เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมาก มีความเร็วเท่ากับแสง ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า

สารกัมมันตภาพรังสีที่เกิดในธรรมชาติ มีเป็นจำนวนน้อย เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 81 ยกเว้นบางนิวเคลียส เช่น C^{14} และ K^{40} ซึ่งเป็นนิวเคลียสของธาตุนั้น สารกัมมันตภาพรังสีส่วนใหญ่จึงเป็นสารกัมมันตภาพรังสีประดิษฐ์ กฎการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสีทั้งสองแบบไม่มีความแตกต่างกัน

9.4.1 กฎการสลายตัว

การที่นิวเคลียสของธาตุที่ไม่เสถียรเปลี่ยนสภาพเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ หรือเปลี่ยนโครงสร้างภายในแล้วปล่อยกัมมันตภาพรังสีออกมา เรียกว่า การสลายตัว (decay) การสลายตัวเกิดขึ้นค่อย ๆ ไม่รุนแรง พลังงานที่ปลดปล่อยรังสีออกมามีแหล่งกำเนิดจากภายในนิวเคลียสนั้นเอง ไม่มีพลังงานภายนอกมากระตุ้นเหมือนการแผ่รังสีของอะตอม พลังงานนี้ได้มาจากการเปลี่ยนมวลสารเป็นพลังงาน ตามสมการมวล-พลังงานของไอน์สไตน์ นิวเคลียสตัวใดจะสลายตัวก่อนหลังนั้นไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน เป็นกระบวนการทางสถิติที่เรียกว่าความน่าจะเป็นใน 1 หน่วยเวลา

อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสี เรียกว่า กัมมันตภาพ (activity) จะเป็นปริมาณตรงกับจำนวนนิวเคลียสที่มีอยู่ในขณะนั้น

ให้ N เป็นจำนวนนิวเคลียสที่ไม่เสถียรที่เวลาใด ๆ

A คืออัตราการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสี

จะได้

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad \dots\dots\dots(9.20)$$



λ คือค่าคงที่ของการสลายตัว มีหน่วยเป็น (วินาที)⁻¹ บอกความน่าจะเป็นที่นิวเคลียส 1 ตัวจะสลายตัวใน 1 วินาที เมื่อเวลาผ่านไปจำนวนนิวเคลียสจะลดลงไปเรื่อย ๆ จึงมีเครื่องหมายลบติดอยู่ที่สมการ (9.20) หน่วยของ A ในระบบ SI จะตั้งตามชื่อเบคเคอเรล (Becquerel) หมายถึงจำนวนอนุภาคที่แผ่ออกมาใน 1 วินาที (1 event/sec หรือ 1 disintegration/sec) 1 เบคเคอเรล (Bq) จึงเท่ากับ 1 (วินาที)⁻¹

หน่วยของกัมมันตภาพที่ใช้บ่อยคือ คูรี (Curie, Ci) ซึ่งนิยามจากอัตราการสลายตัวของเรเดียม (${}_{88}\text{Ra}^{226}$) จำนวน 1 กรัม 1 คูรี = 3.70×10^{10} Bq

ถ้ากำหนดให้ตอนเริ่มต้น ($t = 0$) จำนวนนิวเคลียสของสารกัมมันตภาพรังสี = N_0 ต้องการหาจำนวนนิวเคลียสของสารกัมมันตภาพรังสีเมื่อเวลาผ่านไป t ทำได้โดยอินทิเกรตสมการ (9.20)

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \dots\dots\dots(9.21)$$

สมการ (9.21) เรียกว่ากฎการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสี (law of radioactive decay)

เราไม่สามารถคำนวณหาเวลาที่สารกัมมันตภาพรังสีสลายตัวจนหมดได้ แต่จะหาเวลาที่จำนวนนิวเคลียสของมันลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของตอนเริ่มต้น ระยะเวลาช่วงนี้เรียกว่า ครึ่งชีวิต (half-life)

ให้ $T_{\frac{1}{2}}$ เป็นครึ่งชีวิตของสารกัมมันตภาพรังสีซึ่งทำให้ $N = \frac{N_0}{2}$ จากสมการ (9.21) จะได้

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$\text{จะได้} \quad T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} \quad \dots\dots\dots(9.22)$$

อายุของนิวเคลียสของสารกัมมันตภาพรังสีจะมีค่าต่างกัน เราสามารถหาอายุเฉลี่ย (average life time, τ) ได้จากการรวมอายุของนิวเคลียสแต่ละตัวจนครบทุกตัว แล้วหารด้วยจำนวนนิวเคลียสทั้งหมดที่มีอยู่ตั้งแต่ตอนเริ่มต้น

$$\tau = \int_0^{N_0} \frac{t dN}{N_0}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \dots\dots\dots(9.23)$$



อายุเฉลี่ยของนิวเคลียสของสารกัมมันตภาพรังสีจะมีค่าเป็นส่วนกลับของค่าคงที่ของการสลายตัว

ตัวอย่าง 9.6 จงหาปริมาณของสารกัมมันตภาพ (activity) ของเรดอน จำนวน 1 ไมโครกรัม มีครึ่งชีวิต 3.8 วัน และเป็นเวลานานเท่าใดปริมาณของเรดอนจึงจะสลายไป 60% ของค่าเริ่มต้น

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad \text{ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน} &= \frac{0.693}{T_{1/2}} \\ &= \frac{0.693}{(3.8\text{d})(86,400 \text{ s / d})} \\ &= 2.1 \times 10^{-6} \text{ วินาที}^{-1} \end{aligned}$$

เรดอน มีเลขมวลอะตอม = 222 มวลอะตอมจะมีค่าใกล้เคียงกับเลขมวลอะตอมในหน่วย u จำนวนอะตอมของเรดอน คือ

$$\begin{aligned} N &= \frac{10^{-6} \text{ kg}}{(222\text{u})(1.66 \times 10^{-27} \text{ kg / u})} \\ &= 2.7 \times 10^{18} \text{ อะตอม} \end{aligned}$$

กัมมันตภาพของเรดอน 1 ไมโครกรัม

$$\begin{aligned} A &= \lambda N \\ &= (2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1})(2.7 \times 10^{18} \text{ nuclei}) \\ &= 5.7 \times 10^{12} \text{ Bq} \end{aligned}$$

เมื่อเรดอนสลายตัวไป 60% จาก

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{-\lambda t} \\ \text{หรือ} \quad t &= \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N} \\ \text{ในที่นี้} \quad N &= (1 - 0.6) = 0.4 N_0 \\ t &= \frac{3.8\text{d}}{0.693} \ln \frac{1}{0.4} \\ &= 5.02 \text{ วัน} \end{aligned}$$

ต้องใช้เวลา 5.02 วัน เรดอนจึงจะสลายตัวไป 60% ของปริมาณเริ่มต้น

ตัวอย่าง 9.7 วัดกัมมันตภาพของคาร์บอน-14 ในวัตถุโบราณชิ้นหนึ่งได้เท่ากับ 2.8×10^7 Bq ครึ่งชีวิตของคาร์บอน-14 มีค่าเท่ากับ 5730 ปี

- จงหาค่าคงที่ของการสลายตัว ในหน่วย วินาที⁻¹
- จงคำนวณปริมาณเริ่มต้นของคาร์บอน-14
- จงหาค่ากัมมันตภาพเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ปี



ง. จงหาค่ากัมมันตภาพเมื่อเวลาผ่านไป 4 เท่าของครึ่งชีวิต

วิธีทำ ก. ค่าคงที่ของการสลายตัว = $\frac{0.693}{T_{1/2}}$

$$= \frac{0.693}{(5730\text{y})(315 \times 10^7 \text{ s / y})}$$

$$= 3.84 \times 10^{-12} \text{ วินาที}^{-1}$$

ข. เพราะ $A = \lambda N_0$ เมื่อ N_0 คือปริมาณเริ่มต้นของคาร์บอน-14

$$\text{จะได้ } N_0 = \frac{2.8 \times 10^7 \text{ Bq}}{3.84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}}$$

$$= 7.3 \times 10^{18} \text{ อะตอม}$$

ค. $N = N_0 e^{-\lambda t}$

$$= (2.8 \times 10^7 \text{ Bq}) \cdot \exp(-(3.84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1})(3.15 \times 10^{10} \text{ s}))$$

$$= 2.5 \times 10^7 \text{ Bq}$$

ง. เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งชีวิต ปริมาณคาร์บอน-14 จะลดเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม เมื่อเวลาผ่านไป 4 เท่าของครึ่งชีวิต นั่นคือ

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^4$$

$$= 1.7 \times 10^6 \text{ Bq}$$

9.4.2 อนุกรมกัมมันตภาพรังสี

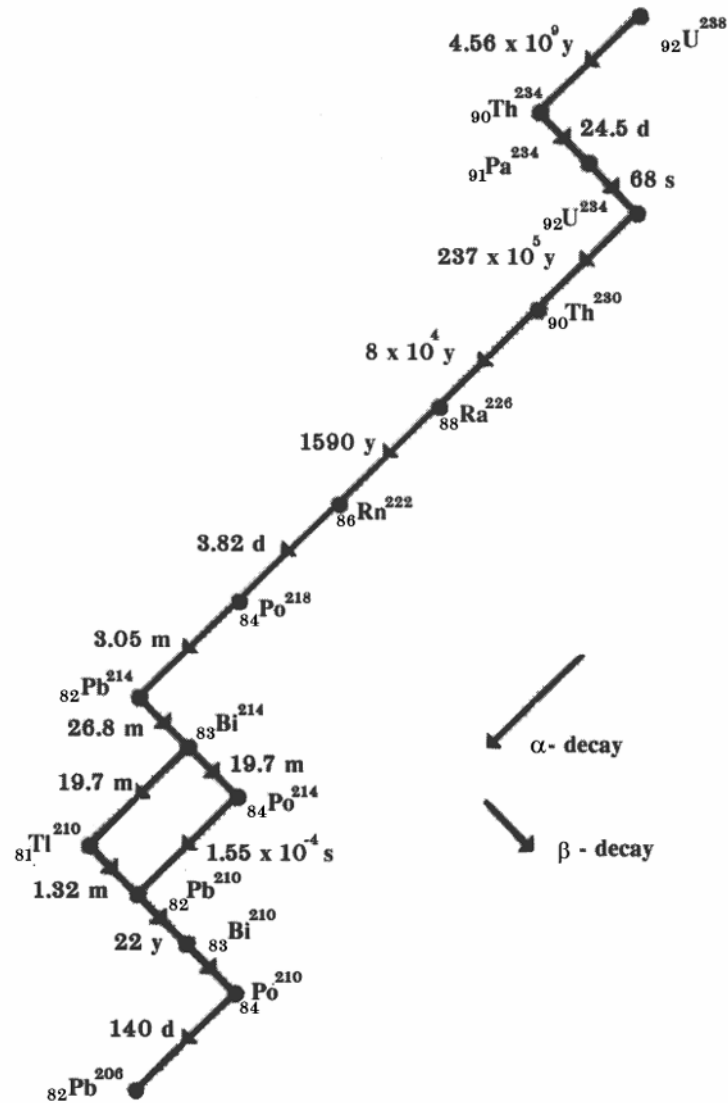
นิวเคลียสที่เป็นสารกัมมันตภาพรังสีเมื่อสลายตัวกลายเป็นนิวเคลียสอีกชนิดหนึ่ง แล้วนิวเคลียสนี้สลายตัวต่อไปเป็นนิวเคลียสชนิดอื่น ๆ อีก จนได้นิวเคลียสสุดท้ายซึ่งเสถียร ลำดับการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสีนี้เรียกว่า อนุกรมกัมมันตภาพรังสี (Radioactive series) แบ่งออกเป็น 4 อนุกรม ดังตาราง 9.8 แสดงอนุกรมของสารกัมมันตภาพรังสีของแต่ละชุด

ตาราง 9.8 แสดงนิวเคลียสเริ่มต้น และนิวเคลียสสุดท้ายของอนุกรมแต่ละชุด

เลขมวล (A)	อนุกรม	นิวเคลียสเริ่มต้น	ครึ่งชีวิต (ปี) ของนิวเคลียสเริ่มต้น	นิวเคลียสสุดท้าย
4n	Thorium	${}_{90}\text{Th}^{232}$	1.39×10^{10}	${}_{82}\text{Pb}^{208}$
4n + 1	Neptunium	${}_{93}\text{Np}^{237}$	2.25×10^6	${}_{83}\text{Bi}^{209}$
4n + 2	Uranium	${}_{92}\text{U}^{238}$	4.51×10^9	${}_{82}\text{Pb}^{206}$
4n + 3	Actinium	${}_{92}\text{U}^{235}$	7.07×10^8	${}_{82}\text{Pb}^{207}$

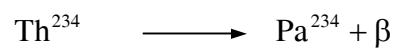
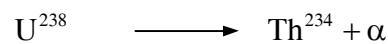


รูป 9.11 เป็นแผนภูมิของ Segre' แสดงการสลายตัวของยูเรเนียม 238 ซึ่งอยู่ในอนุกรม $4n + 2$ นิวเคลียสสุดท้ายที่เสถียรคือ ตะกั่ว 206

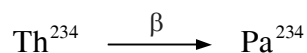
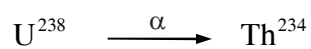


รูป 9.14 แผนภูมิการสลายตัวของอนุกรม $4n+2$

สามารถเขียนเป็นสมการแสดงการสลายตัวได้ดังนี้



หรือเขียนให้อยู่ในรูปสั้น ๆ จะได้เป็น





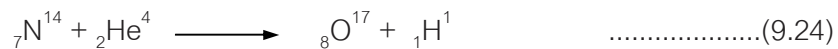
ในการสลายตัวของนิวเคลียสธอเรียม จะได้นิวเคลียสลูก (daughter nucleus) เป็นโพแทสเซียม (Pa²³⁴) ซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้น จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาเพื่อให้ นิวเคลียสกลับมาอยู่ในสถานะพื้น เมื่อสลายตัวมาจนถึงตำแหน่งที่เกิดนิวเคลียสของบิสมัท 214 นิวไคลด์นี้จะสลายตัวกลายเป็นตะกั่ว 210 โดยวิธีปลดปล่อยรังสีแอลฟาและรังสีเบตา ในอนุกรมนี้ยังแสดงให้เห็นการเกิดไอโซโทปที่ไม่เสถียรของธาตุหลายธาตุ ซึ่งเกิดจากการมีจำนวน นิวตรอนในนิวเคลียสมากเกินไป

9.5 ปฏิกิริยานิวเคลียร์

9.5.1 หลักการของปฏิกิริยานิวเคลียร์

การศึกษาโครงสร้างของนิวเคลียสนอกจากจะพิจารณาการสลายตัว หรือการแผ่รังสีของนิวเคลียสแล้ว ยังสามารถใช้วิธียิงอนุภาคหรือรังสีไปยังนิวเคลียส (bombardment) ทำให้ นิวเคลียสเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ เกิดเป็นนิวเคลียสตัวใหม่ 1 ตัวหรือมากกว่า 1 ตัว หรืออาจเกิดการแผ่รังสีออกมาจากนิวเคลียส

ค.ศ. 1919 รัทเธอร์ฟอร์ด ได้ระดมยิงอนุภาคแอลฟาเข้าไปในแก๊สไนโตรเจน พบว่าเกิดนิวเคลียสออกซิเจนและโปรตอน ดังสมการ



รัทเธอร์ฟอร์ดจึงเป็นคนแรกที่ค้นพบปฏิกิริยานิวเคลียร์ พลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟาที่ใช้ยังมีค่าเท่ากับ 7.68 MeV อนุภาคที่ใช้ยังนิยมใช้นิวตรอน โปรตอน หรือนิวเคลียสของธาตุเบา ๆ เช่น ดิวทีรอน, อนุภาคแอลฟา เราไม่นิยมใช้ธาตุหนัก ๆ เป็นตัวยิงเพราะจะเกิดแรงผลักรวมระหว่างนิวเคลียสมาก ต้องใช้พลังงานสูงจึงจะฝ่าเข้าไปถึงนิวเคลียสได้ รังสีที่นิยมใช้เป็นตัวยิงคือรังสีแกมมา พลังงานของรังสีแกมมาทำให้นิวคลีออนจัดเรียงตัวใหม่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้

เราสามารถเขียนปฏิกิริยานิวเคลียร์ในสมการ (9.24) ให้อยู่ในรูปที่สั้นลงได้ดังนี้



รัทเธอร์ฟอร์ดใช้อนุภาคแอลฟาซึ่งได้มาจากการสลายตัวของโพลเนียม 214 ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์สร้างเครื่องมือเร่งอนุภาค ทำให้อนุภาคมีพลังงานสูงขึ้น เช่น เครื่องไซโคลตรอน ทำให้การศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ทำได้กว้างขวางมากขึ้น

ในสมการแสดงปฏิกิริยานิวเคลียร์ ผลรวมของเลขอะตอมและผลรวมของเลขมวลทางด้านซ้ายมือจะเท่ากับผลรวมของเลขอะตอมและผลรวมของเลขมวลทางขวามือเสมอ ซึ่งเป็นไปตามหลักการอนุรักษ์ของประจุไฟฟ้า หลักการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการมวล-พลังงานของไอน์สไตน์ยังคงเป็นจริงเสมอในปฏิกิริยานิวเคลียร์

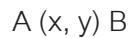


เมื่อพิจารณามวลหนึ่งของอะตอมและอนุภาคในสมการ (9.24)

ไนโตรเจน	14.00307 u	ออกซิเจน	16.99913 u
อนุภาคแอลฟา	<u>4.00260 u</u>	ไฮโดรเจน	<u>1.00783 u</u>
	18.00567 u		18.00696 u

มวลนี้เหล่านี้นรวมมวลของอิเล็กตรอนทั้ง 9 ตัวด้วย จะเห็นว่ามวลหนึ่งของผลที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียสมีค่ามากกว่ามวลหนึ่งตอนก่อนเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ เท่ากับ 0.00129 u เมื่อแปลงมวลนี้เป็นพลังงาน ($1u = 931.5 \text{ MeV}$) จะได้เท่ากับ 1.20 MeV มวลหนึ่งที่เพิ่มขึ้นมาเกิดจากการดูดกลืนพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เป็นตัวยิง ถ้าพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เป็นตัวยิงมีค่าน้อยกว่า 1.20 MeV ปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้จะไม่เกิดขึ้น

ถ้านิวเคลียส A ถูกยิงด้วยอนุภาค x กลายเป็นนิวเคลียส B และอนุภาค y เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



พลังงานที่เปลี่ยนไปซึ่งอาจถูกดูดกลืนหรือคายออกมาขณะเกิดปฏิกิริยา เรียกว่าค่า Q หรือพลังงานปฏิกิริยา โดยที่

$$Q = [(m_A + m_x) - (m_B + m_y)]c^2 \dots\dots\dots(9.25)$$

เมื่อ m_A, m_B คือมวลของนิวเคลียส A, B,

m_x, m_y คือมวลของอนุภาคที่ใช้ยิง

ค่า Q เป็นได้ทั้งบวกและลบ ถ้าค่า Q เป็นลบแสดงว่าปฏิกิริยาจะเป็นแบบดูดกลืนพลังงาน พลังงานบางส่วนจะเปลี่ยนเป็นมวลสาร ถ้าเป็นบวกแสดงว่าเป็นปฏิกิริยาแบบคายพลังงาน แสดงว่ามีมวลบางส่วนหายไปกลายเป็นพลังงานจลน์หรือพลังงานโฟตอน

ตัวอย่าง 7.8 จงคำนวณหาค่า Q ของปฏิกิริยาต่อไปนี้ ${}_4\text{Be}^9(\alpha, n){}_6\text{C}^{12}$

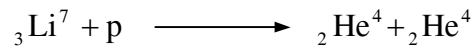
วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 Q &= [m_{\text{Be}} + m_{\alpha} - (m_{\text{C}} + m_n)] c^2 \times 931.5 \text{ MeV} \\
 &= [9.01219 + 4.00260 - (12.0000 + 1.00867)]c^2 \times 931.5 \\
 &= + 5.70 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

ค่า Q เป็นบวกแสดงว่าปฏิกิริยานี้คายพลังงานออกมา

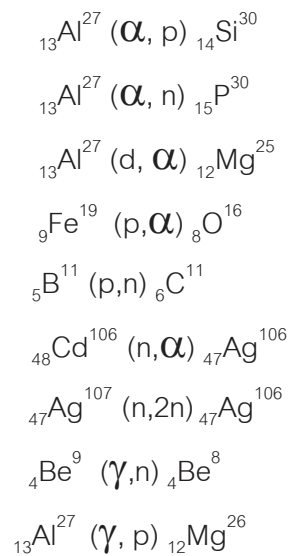


ค.ศ. 1932 คอคครอฟต์ (J.D. Cockcroft) และวอลตัน (T.S. Walton) ได้สร้างเครื่องเร่งโปรตอน ทำให้โปรตอนมีพลังงานจลน์หลายแสนอิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อยิงไปที่เป้าซึ่งเป็นนิวเคลียสของโลหะลิเทียมจะได้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ดังนี้



ค่า Q ที่ได้จากปฏิกิริยานี้เท่ากับ 17.3 MeV ซึ่งจะเป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟาที่หลุดออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ 2 ตัว ผลการทดลองนี้กระตุ้นให้นักฟิสิกส์คนอื่น ๆ ค้นคว้าทดลองเพิ่มเติม ได้ใช้อนุภาคพลังงานสูงอื่นๆ ยิงนิวเคลียสต่างๆ ทำให้เกิดนิวเคลียสใหม่ ทำให้ความรู้ฟิสิกส์นิวเคลียร์ก้าวหน้าเป็นอย่างมาก

ตัวอย่างปฏิกิริยานิวเคลียร์อื่น ๆ ซึ่งค้นพบภายหลัง ได้แก่



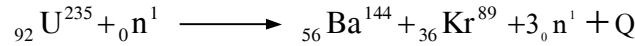
9.5.2 กระบวนการแบ่งแยกตัว (Nuclear fission)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ซึ่งเกิดจากการยิงนิวตรอนหรืออนุภาคอื่นๆ เช่น อนุภาคแอลฟาหรือโปรตอน ไปยังนิวเคลียสของธาตุหนัก ทำให้นิวเคลียสของธาตุนั้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้นแล้วแบ่งตัวเองออกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนจะเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และมีนิวตรอนถูกปล่อยออกมาครั้งละประมาณ 2-3 ตัว ปฏิกิริยาแบบนี้เรียกว่า กระบวนการแบ่งแยกตัว

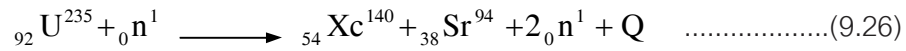
กระบวนการแบ่งแยกตัวถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1939 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน 2 คน คือ ฮาน (Otto Hahn) และสตราสมาน (Fritz Strassman) เขาใช้นิวตรอนยิงเข้าไปในนิวเคลียสของยูเรเนียม ทำให้ยูเรเนียมแยกออกเป็นนิวเคลียสใหม่ 2 นิวเคลียส ซึ่งเขา



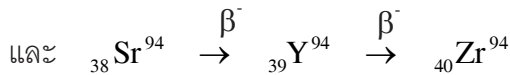
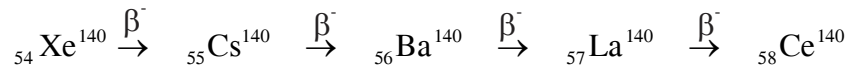
กว่านิวเคลียสของยูเรเนียม พร้อมกับมีนิวตรอนออกมา 2-3 ตัว การค้นพบนี้แสดงว่าสามารถแบ่งนิวเคลียสหนักออกเป็น 2 ส่วนได้ ดังสมการ



นิวเคลียสใหม่ที่แยกออกมาจากนิวเคลียสยูเรเนียมเป็นไปได้หลายอย่าง อีกกรณีหนึ่งคือ



นิวเคลียสของธาตุใหม่ส่วนมากจะเป็นสารกัมมันตภาพรังสี ซึ่งจะสลายตัวต่อไปจากสมการ (9.26)



การคำนวณพลังงานที่เกิดจากกระบวนการฟิชชัน สามารถใช้สมการ (9.26) ประมาณค่าได้เมื่อยูเรเนียม 235 ถูกยิงด้วยนิวตรอนแตกตัวเป็นซีนอน (Xenon) 140 และสตรอนเทียม (strontium) 38 และสลายตัวต่อไปให้อนุภาคเบตา 6 ตัว กลายเป็นนิวเคลียสที่เสถียรคือ ซีเรียม (Cerium) 140 และเซอร์โคเนียม (Zirconium) 94 ตามลำดับ

มวลของยูเรเนียม	235.0439 u	มวลของ Ce	139.9054 u
มวลนิวตรอน	1.0087 u	มวลของ Zn	93.9036 u
	236.0521 u	นิวตรอน 2 ตัว	2.0173 u
		เบตา 6 ตัว	<u>0.0033 u</u>
			235.8296 u
มวลที่หายไป	= 0.223 u	=	207.7 MeV

กระบวนการแบ่งแยกตัวจะคายพลังงาน (ค่า Q เป็นบวก) ด้วยค่าสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสีที่ปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา ซึ่งมีค่าอยู่ในระหว่าง 4 ถึง 9 MeV

กระบวนการแบ่งแยกตัวจะให้นิวตรอนตัวใหม่ออกมาประมาณ 2-3 ตัว ต่อการเกิดปฏิกิริยาแต่ละครั้ง นิวตรอนที่เกิดใหม่นี้สามารถวิ่งเข้าชนนิวเคลียสยูเรเนียมที่เหลือต่อไปได้ ทำให้ปฏิกิริยานิวเคลียร์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) โดยใช้เวลานั้น ๆ พลังงานที่ได้จึงมีค่ามหาศาล ซึ่งเป็นที่มาของระเบิดนิวเคลียร์ นักวิทยาศาสตร์สามารถควบคุมนิวตรอนที่เกิดขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและควบคุมได้ เราจึงนำพลังงานนี้ไปใช้ทางสันติ เช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นต้น

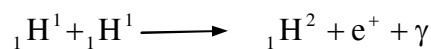


สมมติว่าโรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 1000 ล้านวัตต์ ต้องการให้พลังงานนิวเคลียร์จากกระบวนการแบ่งแยกตัว พบว่าโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ที่สร้างใช้อยู่ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพเพียง 1/3 นั่นคือปริมาณพลังงานที่ได้จากกระบวนการแยกตัวต้องมีค่าถึง 3000 ล้านวัตต์ จึงจะผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 1000 ล้านวัตต์ได้ ปริมาณยูเรเนียมที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจะมากขึ้นเพียงใดในแต่ละวินาทีจะต้องมีพลังงานเกิดขึ้น 3000 MJ หรือ 3000×10^6 J กระบวนการแบ่งแยกตัวที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งจะให้พลังงาน 200 MeV หรือ 3.2×10^{-11} J จำนวนครั้งของกระบวนการแบ่งแยกตัวที่ต้องเกิดขึ้นใน 1 วินาทีคือ $3000 \times 10^6 \text{ J} / 3.2 \times 10^{-11} \text{ J} = 0.94 \times 10^{20}$ ครั้ง อะตอมยูเรเนียม 1 อะตอมมีมวล = $(235)(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}) = 3.9 \times 10^{-25} \text{ kg}$ จำนวนยูเรเนียมที่ถูกใช้ใน 1 วินาทีเท่ากับ $(0.94 \times 10^{20})(3.9 \times 10^{-25} \text{ kg}) = 37 \text{ mg}$ ใน 1 วัน (86,400 วินาที) ปริมาณยูเรเนียมถูกใช้ไปเท่ากับ 3.2 kg ถ้าโรงไฟฟ้านี้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินจะต้องใช้ถ่านหิน 10,600 ตันต่อวัน การเผาถ่านหินจะให้พลังงานเพียง 2 eV ต่ออะตอมคาร์บอน 1 ตัว จะเห็นว่ากระบวนการแบ่งแยกตัวเมื่อนิวเคลียสยูเรเนียมจะให้พลังงานมากกว่าถ่านหินถึง 10^8 เท่า

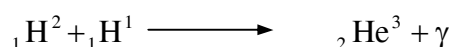
9.5.3 กระบวนการหลอมตัว (Nuclear Fusion)

ปฏิกิริยานิวเคลียสอีกประเภทหนึ่งเกิดจากนิวเคลียสเบา 2 นิวเคลียส หลอมตัวเป็นนิวเคลียสที่หนักกว่า ผลรวมของมวลนิ่งของนิวเคลียสเบาจะมีค่ามากกว่ามวลนิ่งของนิวเคลียสตัวใหม่ มวลที่หายไปนี้กลายเป็นพลังงานมหาศาลซึ่งถูกปลดปล่อยออกมา ปฏิกิริยาเช่นนี้เรียกว่ากระบวนการหลอมตัว เชื่อกันว่าปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบนี้เกิดขึ้นในดาวฤกษ์ และเป็นต้นกำเนิดของพลังงานเกือบทั้งหมดในจักรวาล

กระบวนการหลอมตัวที่เกิดขึ้นในดาวฤกษ์เกิดจากนิวเคลียสไฮโดรเจนหลอมตัวกลายเป็นนิวเคลียสของฮีเลียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้มีอยู่ 2 ลักษณะ ลักษณะแรกเรียกว่า วัฏจักรโปรตอน-โปรตอน (the proton-proton cycle) โปรตอน 2 ตัวชนกันตรงทำให้เกิดนิวเคลียสหนักกว่าเดิม ดังสมการ

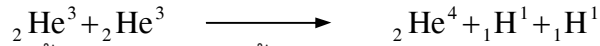


นิวเคลียสที่เกิดใหม่นี้คือดิวเทรียม มีอนุภาคโพสิตรอน (อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก) และรังสีแกมมา เมื่อดิวเทรียมชนกับโปรตอนอีกครั้งจะหลอมตัวกลายเป็นไอโซโทปของฮีเลียม





จากนั้นไอโซโทปของฮีเลียม 2 นิวเคลียสจะหลอมตัวกลายเป็นนิวเคลียสฮีเลียมปกติ และเกิดโปรตอนใหม่อีก 2 ตัว



โพสิตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในขั้นแรกจะชนกับอิเล็กตรอนสลายตัวกลายเป็นพลังงาน (รังสีแกมมา) พลังงานสุทธิที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาทั้งหมดหาได้จากผลต่างระหว่างมวลของไฮโดรเจน 4 ตัว กับมวลของฮีเลียม 1 ตัว และพลังงานจากรังสีแกมมา

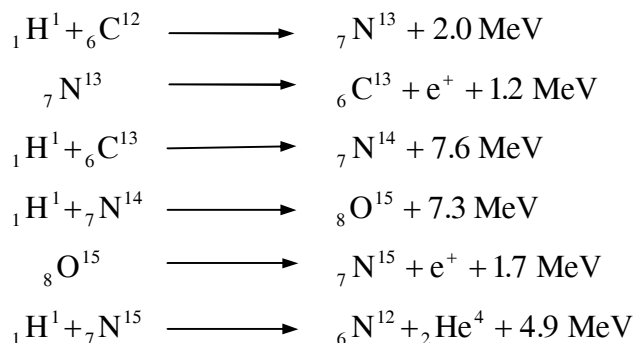
มวลของไฮโดรเจน (รวมอิเล็กตรอน) 4 อะตอม	4.03132 u
มวลของฮีเลียม (รวมอิเล็กตรอน 2 ตัว) 1 อะตอม	<u>4.00370</u> u
ผลต่างของมวล	0.02762 u

คิดเป็นพลังงานเท่ากับ 25.7 MeV

เมื่อพิจารณามวลของดวงอาทิตย์ 1 กรัม ซึ่งมีโปรตอนอยู่ 2×10^{23} ตัว ถ้าโปรตอนทุกตัวหลอมตัวกลายเป็นฮีเลียม พลังงานที่ปล่อยออกมามีค่าประมาณ 57,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ถ้าดวงอาทิตย์ให้พลังงานด้วยอัตราเท่านี้ ต้องใช้เวลาถึง 3 หมื่นล้านปีจึงจะใช้โปรตอนที่มีอยู่จนหมด

กระบวนการหลอมตัวเกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียสของธาตุเบาเข้ามาอยู่ใกล้กันในระยะพิสัยของแรงนิวเคลียส (10^{-15} เมตร) ซึ่งต้องเอาชนะแรงผลักรวม พลังงานศักย์เนื่องจากแรงไฟฟ้าของโปรตอน 2 ตัวที่ระยะ 10^{-5} เมตร นี้มีค่าเท่ากับ 1.1×10^{-13} J หรือ 0.7 MeV นั่นคือ พลังงานจลน์ของนิวเคลียสของธาตุเบาจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.7 MeV กระบวนการหลอมตัวจึงจะเกิดขึ้นได้ จากการคำนวณในวิชาอุณหพลศาสตร์พบว่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของแก๊สที่อุณหภูมิ T มีค่าเท่ากับ $3 kT/2$ เมื่อ k คือค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ ถ้าโมเลกุลของแก๊สมีพลังงานจลน์ 1.1×10^{-13} จูล อุณหภูมิของแก๊สต้องมีค่าเท่ากับ 5×10^9 เคลวิน นั่นคือ กระบวนการฟิวชันจะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ เป็นล้านองศาสมบูรณ์เท่านั้น

กระบวนการหลอมตัวอีกลักษณะหนึ่งเรียกว่า วัฏจักรคาร์บอน (carbon cycle) เชื่อกันว่าเกิดขึ้นบนดาวฤกษ์ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าดวงอาทิตย์มาก ๆ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นมีดังนี้





ผลสุดท้ายที่ได้คือ อนุภาคแอลฟา 1 ตัว และคาร์บอน-12 เหมือนกับตอนก่อนเกิดปฏิกิริยา คาร์บอน-12 จึงเป็นเสมือนตัวเร่งปฏิกิริยานี้เท่านั้น พลังงานที่ได้มาจากกระบวนการนี้มีค่าประมาณ 24.7 MeV มีค่าใกล้เคียงกับพลังงานที่ได้จากวัฏจักรโปรตอน-โปรตอน

กระบวนการแบ่งแยกตัวของยูเรเนียม-235 จะได้พลังงานออกมา 200 MeV ซึ่งมีค่ามากกว่า 24.7 MeV มาก แต่เมื่อคิดพลังงานที่ได้ต่อมวลของสารพบว่ากระบวนการหลอมตัวจะให้พลังงานต่อมวลเทียบกับกระบวนการแบ่งแยกตัวเป็นอัตราส่วนถึง 7 ต่อ 1

9.5.4 ประโยชน์และโทษของพลังงานนิวเคลียร์

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ให้พลังงานออกมามากกว่าปฏิกิริยาเคมีหลายล้านเท่า นักวิทยาศาสตร์จึงหาวิธีที่จะควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์เพื่อที่จะนำพลังงานไปใช้ประโยชน์ทดแทนพลังงานชนิดอื่น ๆ ในกระบวนการแบ่งแยกตัวถ้ามีการดูดกลืนนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาถูกใช้ด้วยวัตถุบางชนิดไม่ให้นิวตรอนทั้งหมดไปชนนิวเคลียสที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ก็จะสามารถควบคุมปฏิกิริยาถูกใช้ให้เกิดขึ้นในอัตราที่ต้องการค่าหนึ่งได้ อุปกรณ์ที่สามารถควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์ให้เกิดในระดับที่ต้องการนี้ เรียกว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor)

เราสามารถนำพลังงานจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ไปใช้แทนพลังงานจากถ่านหิน น้ำมัน ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้กลั่นน้ำทะเลให้เป็นน้ำจืด ใช้ในการขับเคลื่อนเรือเดินสมุทรขนาดใหญ่ หรือเรือดำน้ำ ใช้เป็นแหล่งผลิตสารกัมมันตภาพรังสี เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ การเกษตร และอุตสาหกรรม

ในประเทศไทยได้ก่อตั้งสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติเมื่อ 27 ตุลาคม ค.ศ. 1962 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ใช้ในการผลิตไอโซโทปบางชนิด ซึ่งเป็นสารกัมมันตภาพรังสี เช่น ^{131}I , ^{99}Tc ใช้ในทางการแพทย์เพื่อวินิจฉัยและบำบัดโรค ^{32}P ใช้ในการเกษตร นอกจากนี้ ยังวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ (Neutron activation analysis) เป็นการหาชนิดและปริมาณของธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ใช้ในการศึกษาการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ซึ่งใช้ในงานทดสอบโดยไม่ทำลายชิ้นงาน

พลังงานนิวเคลียร์ถูกนำไปใช้ในด้านอาหาร เช่น ใช้ทำระเบิดนิวเคลียร์ โดยอาศัยหลักปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวแบบลูกโซ่ของยูเรเนียม-235 หรือพลูโตเนียม-239 โดยไม่ต้องมีการควบคุมและเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น (1 ในล้านวินาที) พลังงานที่ปล่อยออกมาจึงมีค่ามากสามารถทำลายเมืองใหญ่ ๆ ได้ในพริบตา ระเบิดนิวเคลียร์ซึ่งนำไปทิ้งที่เมืองฮิโรชิมาในประเทศญี่ปุ่น เมื่อ 6 สิงหาคม ค.ศ. 1945 ใช้ยูเรเนียม-235 เป็นเชื้อเพลิง อีก 3 วันต่อมาระเบิดนิวเคลียร์ลูกที่สองถูกทิ้งลงที่เมืองนางาซากิ ใช้พลูโตเนียม-239 เป็นเชื้อเพลิง ระเบิดแต่ละลูกมีแรงระเบิด



เท่ากับระเบิดที่เอ็นที หนึ่งสองหมื่นตัน ทำให้เกิดความร้อนค่ามหาศาล อุณหภูมิใกล้ ๆ จุดที่ระเบิดสูงเป็นล้านองศา ความร้อนแผ่กระจายทำให้บ้านเมืองพังพินาศเสียหายอย่างใหญ่หลวงผลที่ตามมาหลังจากการระเบิดคือจะมีกัมมันตภาพรังสี เช่น รังสีแกมมา นิวตรอน กระจายไปทั่วรังสีเหล่านี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โดยจะไปทำลายเนื้อเยื่อและอวัยวะในร่างกาย ถ้าได้รับรังสีในปริมาณต่ำจะมีผลกระทบทางด้านพันธุกรรม ทำให้เป็นโรคมะเร็ง

แบบฝึกหัดหน่วยที่ 9

- 9.1 จงคำนวณหารัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนในวงที่ 2
(2.12 แองสตรอม)
- 9.2 อิเล็กตรอนในวงโคจรสถานะพื้นของอะตอมไฮโดรเจนของบอร์จะเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสที่รอบ/วินาที และในวงโคจรที่สองความถี่ในการโคจรรอบนิวเคลียสจะเป็นกี่เท่าของวงแรก
(6.6×10^{15} รอบ/วินาที, 1/8)
- 9.3 ถ้าอะตอมของธาตุหนึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่ที่วงโคจรรัศมี 1 มม. ที่วงนี้จะมีระดับพลังงานกี่อิเล็กตรอนโวลต์ กรณีนี้เกิดขึ้นได้จริงหรือไม่
($n = 4347$, n มีค่ามาก ไม่มีธาตุใดที่มีระดับพลังงานถึงค่านี้)
- 9.4 โปรตอนและอิเล็กตรอนอยู่ห่างกันเป็นระยะอนันต์ ถ้าอนุภาคทั้งสองรวมกันเป็นอะตอมไฮโดรเจนที่สถานะพื้น จงหาความยาวคลื่นโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาจากการรวมตัวนี้
(912 แองสตรอม)
- 9.5 จงคำนวณหาความถี่สูงสุดของโฟตอนที่ปลดปล่อยออกจากอะตอมของไฮโดรเจน
(3.248×10^{15} Hz)
- 9.6 อะตอมของไฮโดรเจนอยู่ที่สถานะกระตุ้นที่สอง (-3.4 eV) กระโดดสู่สถานะพื้น (-13.6 eV) จงหาพลังงานและความยาวคลื่นโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมา
(10.2 eV, 1218 แองสตรอมเป็นรังสี UV)
- 9.7 จงคำนวณหาความถี่ 3 ค่าแรกของอนุกรมไลแมนในสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน
[(2.47, 2.92, 3.08) $\times 10^{15}$ Hz]



- 9.8 จะต้องใช้อิเล็กตรอนจากภายนอกที่มีพลังงานจลน์เท่าใดถึงอะตอมไฮโดรเจนที่สถานะพื้น เพื่อกระตุ้นให้เกิดสเปกตรัมของอนุกรมไลแมนเส้นที่ 1
($1.63 \times 10^{-18} \text{ J}$)
- 9.9 จงคำนวณหาความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของสเปกตรัมเส้นแรกของอนุกรมบาล์มเมอร์ (อิเล็กตรอนกระโดดจาก $n = 3$ ไปสู่ $n = 2$) ของธาตุไฮโดรเจน (มวล = 1.01 u) และ ดิวเทอเรียม (มวล = 2.01 u)
(326.54 nm)
- 9.10 รั้งสีอุลตราไวโอเล็ต ความยาวคลื่น 1850 แองสตรอมส่องไปยังอะตอมไฮโดรเจน พลังงานจลน์ต่ำสุดของอิเล็กตรอนเมื่อหลุดจากอะตอมมีค่าเท่าใด
(3.32 eV)
- 9.11 โมเมนตัมเชิงมุมรอบวงโคจรของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนมีค่าเท่าใดได้บ้าง เมื่อ $n = 4$ (ตอบในหน่วย $h/2\pi$)
($0, \sqrt{2}, \sqrt{6}, \sqrt{12}$)
- 9.12 อิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนมีเลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม = 2 มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำกับอะตอมนี้ จงหาทิศที่โมเมนตัมเชิงมุมกระทำกับสนามแม่เหล็ก
(42, 68, 90, 112 และ 138 องศา)
- 9.13 อิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่ M
ก. จงคำนวณหาชั้นย่อย (l) ที่มีได้ในชั้นนี้ (3)
ข. m_l มีกี่ค่า (9)
ค. อิเล็กตรอนมีสถานะต่างกันกี่ค่า (18)
- 9.14 นิวเคลียส A จะเป็น mirror isobar ของนิวเคลียส B เมื่อ $Z_A = N_B$ และ $Z_B = N_A$ จงหา นิวเคลียสที่เป็น mirror isobar ของ ${}^9\text{F}^{19}$
- 9.15 กำหนดธาตุดังต่อไปนี้ นีออน ${}_{10}\text{Ne}^{21}$, เงิน ${}_{47}\text{Ag}^{108}$ ในแต่ละธาตุ
ก. จงคำนวณรัศมีของนิวเคลียส (3.72, 6.43 เฟอรัมิ)
ข. พื้นที่ผิวของนิวเคลียส ($173.90 \times 10^{-30} \text{ m}^2, 519.56 \times 10^{-30} \text{ m}^2$)
ค. ปริมาตรของนิวเคลียส ($214.47 \times 10^{-45} \text{ m}^3, 1113.58 \times 10^{-45} \text{ m}^3$)
ง. ความหนาแน่นของนิวเคลียสในหน่วย กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยมวลของนิวเคลียสหาได้จากเลขมวล (A) ของธาตุนั้น ๆ ($1.6 \times 10^{-17} \text{ kg/m}^3, 1.61 \times 10^{-17} \text{ kg/m}^3$)



9.16 จงประมาณค่ารัศมีของนิวเคลียสของ โบรอน-10 และ เงิน-157 (2.4, 6.4 เฟอรัมิ)

9.17 จงใช้ตารางธาตุในภาคผนวก หาสัญลักษณ์ X เมื่อ ${}_Z^A X^A$ แทนนิวเคลียสต่อไปนี้

ก. $Z = 7, N = 8$

ข. $A = 23, N = 12$

ค. $Z = 29, A = 64$

9.18 ดาวนิวตรอนหรือดาวพัลซาร์ (pulsar) ดวงหนึ่งมีมวล 4×10^{30} กิโลกรัม (2 เท่าของดวงอาทิตย์) ซึ่งมีแต่ความหนาแน่นของนิวเคลียส ถ้ากำหนดให้ดาวมีลักษณะเป็นทรงกลม

จงคำนวณหาปริมาตรและรัศมีของดาวดวงนี้ ($1.3 \times 10^{13} \text{ m}^3, 1.5 \text{ km}$)

9.19 จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวและพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของแคลเซียม 40

(เลขอะตอม 20) (342 MeV, 8.55 MeV/nucleon)

9.20 จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวและพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของออกซิเจน 16

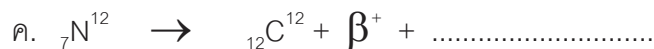
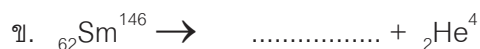
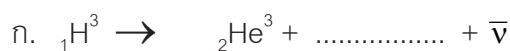
(เลขอะตอม 8) (127.6 MeV, 7.97 MeV/nucleon)

9.21 จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ Cr^{52} และ F^{56} ทั้งสองเป็นนิวเคลียสที่มีค่า

พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนสูง จึงเป็นนิวเคลียสที่เสถียร (8.78, 8.79 MeV)

และ จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ H^2 และ He^3 ทั้งสองเป็นนิวเคลียสของธาตุเบาที่เสถียร (1.11, 2.57 MeV)

9.22 จงเขียนสัญลักษณ์ที่ขาดหายไป



($\beta^-, {}_{60}\text{Nd}^{142}, \bar{\nu}$)

9.23 คาร์บอน 14 มีอัตราการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสี = 18.5×10^{10} Bq ครึ่งชีวิตของคาร์บอนประมาณ 5570 ปี จงหาจำนวนคาร์บอน 14 ตอนเริ่มต้น (1.09 กรัม)

9.24 ยูเรเนียม (238) 1 กิโลกรัม สลายตัวปล่อยอนุภาคแอลฟา ครึ่งชีวิตของยูเรเนียม เท่ากับ 4.5×10^9 ปี จงหากัมมันตภาพ (activity) ของยูเรเนียม (1.24×10^7 ต่อวินาที)

9.25 เป็นเวลานานเท่าใด เรเดียมจึงจะสลายตัวไป 15/16 ของมวลเดิม ครึ่งชีวิตของเรเดียม = 1600 ปี (6400 ปี)



9.26 สารกัมมันตภาพรังสีชนิดหนึ่งมีจำนวน 10^{12} อะตอม มีครึ่งชีวิต 1 ชั่วโมง ในเวลา 1 วินาทีจะสลายตัวไปกี่อะตอม (1.93×10^8)

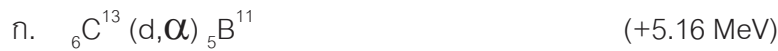
9.27 ต้องใช้เวลานานเท่าใด โซเดียม 22 (เลขอะตอม 11) 5 มิลลิกรัมจะลดลงเหลือ 1 มิลลิกรัม $T_{1/2}$ ของโซเดียม = 216 ปี (502.9 ปี)

9.28 ทองคำ 200 (เลขอะตอม 79)หนัก 3×10^{-9} กก. มี activity 58.9 คูรี จงหาครึ่งชีวิตของทองคำ (69.06 นาที)

9.29 หน่วยของกัมมันตภาพที่นิยมใช้อีกหน่วยหนึ่งคือ คูรี (Curie, Ci) ถ้าครึ่งชีวิตของเรเดียม-226 คือ 1620 ปี จงแสดงว่า activity ของเรเดียม 1 กรัม มีค่า 1 คูรี

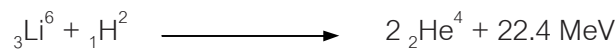
9.30 ธอเรียม-232 (${}_{90}\text{Th}^{232}$) สลายตัวปล่อยอนุภาคแอลฟา จงเขียนสมการแสดงการสลายตัว $({}_{90}\text{Th}^{232} \rightarrow {}_{88}\text{Ra}^{228} + {}_2\text{He}^4)$

9.31 จงหาค่า Q จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้



9.32 เมื่อใช้ดิวเทอรอน 4 MeV ยิงไปที่นิวเคลียส ${}_3\text{Li}^6$ มีอนุภาคแอลฟา 2 ตัว พลังงานจลน์ตัวละ 13.2 MeV จงหาค่า Q ของปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้

9.33 จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้



จงหามวลของลิเทียม เมื่อดิวเทอรอนมีมวล = 2.01355 u อนุภาคแอลฟามีมวล = 4.00260 u (6.015 u)

9.34 $\text{C}^{12} (d, \alpha) \text{B}^{10}$ เป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบดูดกลืนพลังงาน โดย $Q = -1.35 \text{ MeV}$ จงหาพลังงานต่ำสุดของดิวเทอรอนที่จะทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ (1875.11 MeV)

9.35 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้แบบดูดกลืนหรือคายพลังงาน



9.36 จงเขียนปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้ให้ครบ

