บทที่ 1
โครงสร้างของสสาร

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาโครงสร้างของอะตอม แบบจำลองของอะตอม และ สเปคตรัมของอะตอมไฮโดรเจน
2. ศึกษานิวเคลียส ปฏิกิริยานิวเคลียร์

1.1 บทนำ

สสารทุกชิ้นในโลกประกอบด้วยส่วนประกอบที่มีชื่อเรียกว่า อะตอม (atom) นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการค้นคว้าศึกษาเรื่องราวของอะตอมมานานแล้ว และสามารถเข้าใจปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดจากอะตอม อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์ก็ยังต้องศึกษาเรื่องราวของอะตอมอยู่ เพราะว่า มีการค้นพบคุณสมบัติของอะตอมซึ่งยังคงต้องการคำอธิบายเพิ่มขึ้นอีกมาก เนื่องจากอะตอมมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า การศึกษาอะตอมจึงกระทำไปด้วยความยากลำบากและเป็นไปอย่างเชื่องช้า

1.2 ประวัติการศึกษาอะตอม

ประมาณ 400 ปีก่อนคริสต์ศักราช ดิโมคริตัส (Dimocritus) กล่าวถึงอะตอมเป็นคนแรก ตามความคิดของเขาสสารทุกชนิดประกอบด้วยชิ้นส่วนที่เล็กที่สุดที่แบ่งแยกต่อไปอีกไม่ได้ ชิ้นส่วนนี้มีชื่อเรียกว่าอะตอม เหตุที่สสารมีหลายชนิดก็เนื่องมาจากโครงสร้างการจับตัวของอะตอมแตกต่างกัน ระหว่างอะตอมเป็นที่ว่างเปล่า ซึ่งอะตอมสามารถเคลื่อนที่ไปมาภายในที่ว่างเปล่านี้ อีกประมาณ 60 ปีต่อมา อริสโตเติล (Aristotle) นักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อเสียงมาก

ไม่เชื่อเรื่องอะตอม เขากล่าวว่า สสารไม่ได้ประกอบขึ้นจากอะตอม แต่ประกอบจากธาตุ 4 อย่าง คือ ดิน น้ำ ลม ไฟ เนื่องจากอริสโตเติลเป็นบุคคลที่มีผู้เชื่อถือมาก ทำให้ความคิดเกี่ยวกับอะตอม ต้องหยุดชะงักลงเป็นเวลากว่า 2,000 ปี

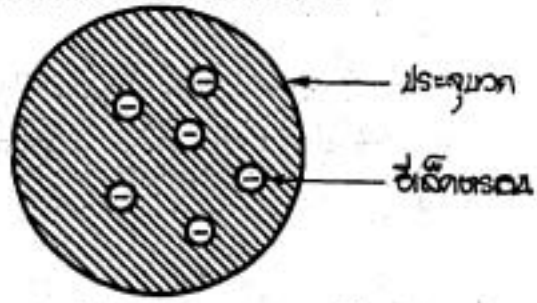
ต่อมาประมาณศตวรรษที่ 17 ดาลตัน (Dalton) ตั้งทฤษฎีอะตอมขึ้นโดยอาศัยวิธีการทางเคมีมาพิสูจน์ อะตอมของดาลตันมีหลายชนิดแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของธาตุ เนื่องจากมีการทดลองมาสนับสนุนทฤษฎี นักวิทยาศาสตร์จึงหันมาค้นคว้าหาความจริงเกี่ยวกับอะตอม จนเป็นที่เชื่อแน่ว่า อะตอมมีอยู่จริง

ค.ศ. 1875 เซอร์วิลเลียมครุกส์ (Sir Williams Crookes) ต่อแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงเข้ากับขั้วไฟฟ้าของหลอดสูญญากาศ ปรากฏว่าเกิดแสงเรืองสีเขียวขึ้นบริเวณผิวแก้วใกล้ขั้วบวก (Anode) เขาสรุปว่า สิ่งที่ทำให้เกิดแสงเรือง จะต้องเป็นอะไรสักอย่างหนึ่งที่ออกมาจากขั้วลบ (cathode) พยายามจะวิ่งไปยังขั้วบวกทำให้เกิดแสงเรืองขึ้น เขาเรียกสิ่งที่ออกมาจากขั้วลบนี้ว่า รังสีแคโทด (cathode rays)

เจ เจ ทอมสัน (J. J. Thomson) เป็นคนแรกที่พิสูจน์ว่ารังสีแคโทดที่แท้จริงเป็นอนุภาคที่มีประจุ เพราะรังสีนี้ถูกเบี่ยงเบนได้โดยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ทอมสันสามารถวัดอัตราส่วนระหว่างประจุกับมวลของอนุภาคนี้ได้ ต่อมาอนุภาคนี้มีชื่อเรียกว่า อีเล็คตรอน (electron)

1.3 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน

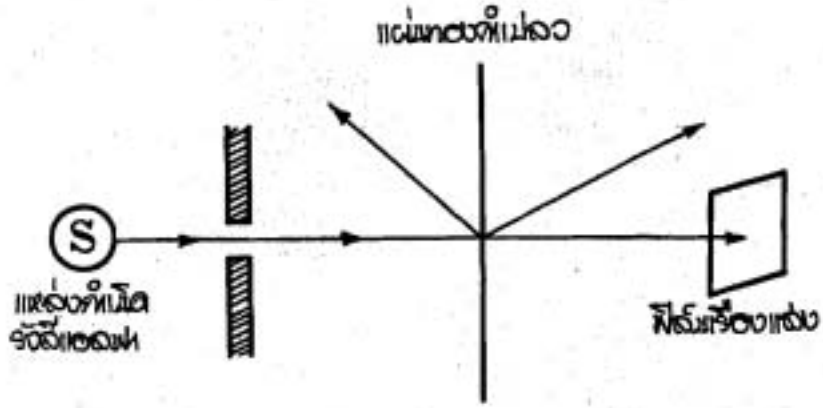
หลังจากการค้นพบอีเล็คตรอน ทอมสันได้เสนอว่า อะตอมควรประกอบด้วยประจุบวกรวมกันเป็นทรงกลม มีรัศมีประมาณ 10^{-10} เมตร อีเล็คตรอนเป็นเม็ดเล็กๆ ฝังกระจายอยู่ภายในทรงกลมอย่างสม่ำเสมอจำนวนประจุบวกและประจุลบมีค่าเท่ากัน ทำให้อะตอมมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นกลาง อีเล็คตรอนเคลื่อนที่ไปมาในเนื้อที่ประจุบวกได้โดยสะดวก เมื่ออีเล็คตรอนได้รับพลังงานจะเคลื่อนที่ไปมาและเปล่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา



รูปที่ 1.1 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน

1.4 แบบจำลองอะตอมของรัทเธอร์ฟอร์ด

เออเนสต์ รัทเธอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) ทำการทดลองหาโครงสร้างของอะตอมในปี ค.ศ. 1911 ณ ประเทศอังกฤษ เขาใช้สารกัมมันตรังสีเรเดียม (radium) ซึ่งสลายตัวให้อนุภาคแอลฟ่า (alpha) พลังงาน 7.6 เอ็ม อี วี (MeV) เป็นแหล่งกำเนิดของอนุภาคที่มีความเร็วสูงประมาณ 10^7 เมตร/วินาที และทำให้ลำแคบวิ่งเข้าชนแผ่นทองคำบางๆ (gold leaf) ผลการทดลองพบว่า อนุภาคแอลฟ่าส่วนมากวิ่งทะลุผ่านแผ่นทองคำราวกับว่าไม่ได้ชนอะไรเลย ส่วนน้อยที่เบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม และบางตัวสะท้อนกลับ แสดงว่าจะต้องชนกับอะไรสักอย่างหนึ่งที่มีขนาดใหญ่กว่า รัทเธอร์ฟอร์ดจึงสรุปว่า อะตอมประกอบด้วยพื้นที่ว่างเป็นส่วนมาก โดยมีประจุบวกรวมตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นอยู่ตรงกลางของอะตอม และมีอิเล็คตรอนโคจรอยู่ห่างๆ



รูปที่ 1.2 การทดลองของรัทเธอร์ฟอร์ด (Scattering experiment)

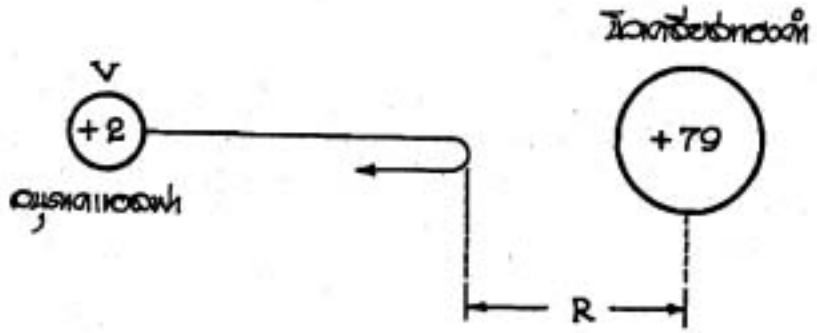
อะตอมของรัทเธอร์ฟอร์ดมีข้อขัดแย้งกับทฤษฎีฟิสิกส์คือ ตามทฤษฎีของแมกซ์แวลล์ (Maxwell) ประจุไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจะเปล่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อิเล็คตรอนโคจรรอบประจุบวกจะมีความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางซึ่งจะต้องส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ทำให้อิเล็คตรอนสูญเสียพลังงานโคจรเข้าใกล้ประจุบวก และผลสุดท้ายจะตกลงสู่ประจุบวกอิเล็คตรอนจึงไม่สามารถโคจรรอบประจุบวกตลอดไป

ตัวอย่างที่ 1.1 อนุภาคแอลฟ่าพลังงานจลน์ 5 เอ็มอีวี วิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของทองคำซึ่งมีประจุบวก 79 จงหา

ก. ความเร็วของอนุภาคแอลฟ่า เมื่ออยู่ห่างจากนิวเคลียสมาก จนถือว่าไม่เกิดแรงกระทำกับนิวเคลียส

ข. ระยะทางที่อนุภาคแอลฟ่าสามารถเข้าใกล้นิวเคลียสได้มากที่สุด โดยถือว่านิวเคลียสของทองคำอยู่นิ่งตลอดเวลา

วิธีทำ



กำหนดให้ V = ความเร็วของอนุภาคแอลฟ่า

R = ระยะห่างจากนิวเคลียส

ก) พลังงานจลน์ (K.E.) = $^1/_2\ mV^2$

$$V^2 = \frac{2\ K.E.}{m}$$

แทนค่า

$$V^2 = \frac{2(5 \times 10^{6} \times 1.6 \times 10^{-19})}{4 \times 1.66 \times 10^{-27}}$$

$$V = 1.5 \times 10^{2} \text{ เมตร/วินาที}$$

ความเร็วของอนุภาคแอลฟ่า 1.5×10^{2} เมตร/วินาที

ข) เมื่ออนุภาคแอลฟ่าเข้าไปใกล้นิวเคลียสมากที่สุด ความเร็วจะเป็นศูนย์ พลังงานจลน์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์

พลังงานจลน์ (K.E.) = พลังงานศักย์ (P.E.)

$$^1/_2\ mV^2 = \frac{KQ_1Q_2}{R}$$

$$5 \times 10^{6} \times 1.6 \times 10^{-19} = \frac{(9 \times 10^{9})(2 \times 1.6 \times 10^{-19})(79 \times 1.6 \times 10^{-19})}{R}$$

$$R = \frac{(9 \times 10^{9})(2 \times 1.6 \times 10^{-19})(79 \times 1.6 \times 10^{-19})}{5 \times 10^{6} \times 1.6 \times 10^{-19}}$$

$$= 5 \times 10^{-14} \text{ เมตร}$$

อนุภาคเข้าไปใกล้ผิวนิวเคลียสมากที่สุดในระยะ 5×10^{-14} เมตร

1.5 สมมติฐานเกี่ยวกับอะตอมของบอร์ (Bohr)

จากการที่อะตอมตามแบบของรัทเธอร์ฟอร์ดยังมีข้อได้แย้งอยู่ นีล บอร์ (Neils Bohr) พยายามแก้ข้อได้แย้งนี้โดยการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับอะตอม ซึ่งมีใจความดังต่อไปนี้

ก. เมื่ออิเล็คตรอนโคจรรอบนิวเคลียส โดยมีโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) เป็นไปตามความสัมพันธ์ข้างล่างนี้ จะไม่มีการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา

$$L = mVR = nh = \frac{nh}{2\pi}$$

เมื่อ L = โมเมนตัมเชิงมุม

m = มวลของอิเล็คตรอน

V = ความเร็วของอิเล็คตรอน

R = รัศมีของวงโคจร

n = เลขเต็มหน่วยบวก = 1, 2, 3, ...

$n = \frac{h}{2\pi}$

h = ค่าคงที่ของแพลงค์

ข. พลังงานของอิเล็คตรอนจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่ออิเล็คตรอนเปลี่ยนระดับวงโคจรจากระดับหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่ง ถ้าอิเล็คตรอนเคลื่อนเข้าใกล้นิวเคลียสจะคายพลังงานออกมา แต่ถ้าเคลื่อนออกห่างจากนิวเคลียสจะต้องรับพลังงานจำนวนหนึ่ง ถ้าอิเล็คตรอนเคลื่อนจากระดับโคจรที่มีพลังงาน E_i ไปยังระดับวงโคจรที่มีพลังงาน E_f จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานดังนี้

$$\Delta E = E_f - E_i = h\nu$$

เมื่อ ΔE = การเปลี่ยนแปลงของพลังงาน

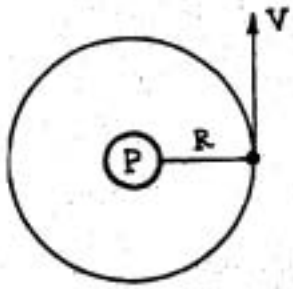
E_i = พลังงานเริ่มต้น

E_f = พลังงานสุดท้าย

ν = ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.6 อะตอมไฮโดรเจน

อะตอมไฮโดรเจนประกอบด้วยโปรตอน 1 ตัว อยู่ตรงกลางของอะตอมและมีอีเล็กตรอน 1 ตัว โคจรเป็นวงกลมอยู่ห่างๆ กำหนดให้รัศมีของวงโคจร = R และความเร็วของอีเล็คตรอน = V ในสภาวะปกติอีเล็คตรอนจะโคจรอยู่ในวงโคจรที่ใกล้กับนิวเคลียสมากที่สุด คือ วงโคจร n = 1 เรียกว่า อะตอมอยู่ในภาวะพื้นฐาน (ground state) เมื่ออีเล็คตรอนได้รับพลังงาน จะเคลื่อนไปยังวงโคจรที่ห่างจากนิวเคลียสมากยิ่งขึ้น คือ วงโคจรชั้น n = 2, 3, 4, ... เรียกว่า อะตอมอยู่ในภาวะกระตุ้น (excited state)



รูปที่ 1.3 อะตอมไฮโดรเจน

กำหนดให้ V_n = ความเร็วของอีเล็คตรอนในวงโคจรชั้น n

R_n = รัศมีของวงกลมชั้น n

E_n = พลังงานของอีเล็คตรอนในวงโคจรชั้น n

รัศมีของวงโคจร (R_n)

อีเล็คตรอนโคจรเป็นวงกลมรอบโปรตอนเกิดแรงสู่นย์กลาง ซึ่งเป็นแรงเดียวกับแรงคูลอมบ์ ซึ่งเกิดจากการดูดของโปรตอนกับอีเล็คตรอน

$$\frac{mV_n^2}{R_n} = \frac{KQ_1Q_2}{R_n^2}$$

สำหรับอะตอมไฮโดรเจน $Q_1 = Q_2 = e$

$$\frac{mV_n^2}{R_n} = \frac{Ke^2}{R_n^2}$$

$$mV_n^2R_n^2 = Ke^2R_n$$

m คูณตลอด ; $m^2V_n^2R_n^2 = mKe^2R_n$

แต่ $mV_nR_n = nh$

ดังนั้น $n^2h^2 = mKe^2R_n$

$$\boxed{R_n = \frac{n^2h^2}{mKe^2}}$$

แทนค่า $h = 1.055 \times 10^{-34}$ จูล-วินาที

$m = 9.11 \times 10^{-31}$ กก.

$K = 9 \times 10^9$

$e = 1.6 \times 10^{-19}$ คูลอมบ์

$$R_n = \frac{n^2(1.055 \times 10^{-34})^2}{(9.11 \times 10^{-31})(9 \times 10^9)(1.6 \times 10^{-19})^2}$$

$$= n^2 \times 5.3 \times 10^{-11} \text{ เมตร}$$

$$\boxed{R_n = (5.3 \times 10^{-11})n^2 \text{ เมตร}}$$

ความเร็วของอีเล็คตรอน (V_n)

จาก $mV_nR_n = nh$

แทนค่า R_n ; $mV_n \dfrac{n^2h^2}{mKe^2} = nh$

$$\boxed{V_n = \frac{Ke^2}{nh}}$$

$$V_n = \frac{(9 \times 10^9)((1.6 \times 10^{-19})^2}{n(1.055 \times 10^{-34})}$$

$$= \frac{2.18 \times 10^6}{n} \text{ เมตร/วินาที}$$

$$\boxed{V_n = \frac{2.18 \times 10^6}{n} \text{ เมตร/วินาที}}$$

พลังงานของอีเล็คตรอน (E_n)

พลังงานของอีเล็คตรอนเท่ากับผลบวกของพลังงานจลน์ (K.E.) และพลังงานศักย์-ไฟฟ้า (P.E.)

$$E_n = K.E. + P.E.$$

$$= \frac{1}{2} mV_n^2 - \frac{Ke^2}{R_n}$$

แทนค่า V_n^2

$$E_n = \frac{1}{2} m \frac{Ke^2}{mR_n} - \frac{Ke^2}{R_n}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{Ke^2}{R_n} - \frac{Ke^2}{R_n}$$

$$= -\frac{1}{2}\frac{Ke^2}{R_n}$$

แทนค่า R_n

$$E_n = -\frac{1}{2}Ke^2 \cdot \frac{mKe^2}{n^2h^2}$$

$$\boxed{E_n = -\frac{mK^2e^4}{2n^2h^2}}$$

แทนค่า $E_n = \frac{(9.11 \times 10^{-31})(9 \times 10^9)^2(1.6 \times 10^{-19})^4}{2n^2(1.055 \times 10^{-32})^2}$

$$= -\frac{2.172 \times 10^{-18}}{n^2} \text{ จูล}$$

$$= -\frac{2.172 \times 10^{-18}}{1.6 \times 10^{-9} n^2} \text{ eV}$$

$$= -\frac{13.6}{n^2} \text{ จูล}$$

$$\boxed{E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV}}$$

1.7 สเปคตรัมของอะตอมไฮโดรเจน

เมื่ออิเล็คตรอนเคลื่อนที่จากวงโคจรชั้น n_i มายังวงโคจรชั้น n_f จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน ถ้าอิเล็คตรอนเคลื่อนเข้าใกล้นิวเคลียส จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา

$$h\nu = E_i - E_f$$

แทนค่า E_i และ E_f

$$h\nu = \frac{-mK^2e^4}{2n_i^2h^2} - \frac{mK^2e^4}{2n_f^2h^2}$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{mK^2e^4}{2n_f^2h^2} - \frac{mK^2e^4}{2n_i^2h^2}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\,\frac{mK^2e^4}{2h^2hc}$$

แทนค่า

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\,\frac{(9.11 \times 10^{-31})(9 \times 10^{9})^2(1.6 \times 10^{-19})^4}{2(1.055 \times 10^{-34})^2(6.63 \times 10^{-34})(3 \times 10^{8})}$$

$$= 1.0918 \times 10^{7}\ \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}$$

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = 1.0918 \times 10^{7}\left[\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right]}$$

ก่อนที่บอร์จะค้นพบสูตรของสเปคตรัมสูตรนี้ ในปี ค.ศ. 1885 เจ บาลเมอร์ (J. Balmer) ได้ทำการทดลองหาสเปคตรัมของอะตอมจากผลการทดลองที่ได้ โดยอาศัยคณิตศาสตร์ก็สามารถหาสูตรสเปคตรัมได้ โดยเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = R_H\left[\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right]}$$

เมื่อ R_H = ค่าคงที่ของไรด์เบิก (Rydberg)

= 1.09721×10^{7} เมตร$^{-1}$

เส้นสเปคตรัมของอะตอมไฮโดรเจนนี้ นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ทำการค้นคว้า

จึงแบ่งสเปคตรัมออกเป็นหลายชุด

ก. ชุดของบาลเมอร์ เกิดจากการที่อิเล็คตรอนเปลี่ยนระดับจากวงโคจรชั้นนอกเข้าสู่วงโคจรชั้น $n = 2$ เช่น เปลี่ยนจากระดับวงโคจรชั้น $n = 3$ ไปยังวงโคจรชั้น $n = 2$ ทำให้ได้โฟตอนซึ่งมีความยาวคลื่น 656 นาโนเมตร

ข. ชุดของไลแมน (LYMAN) อิเล็คตรอนเปลี่ยนระดับโคจรไปหยุดอยู่ที่วงโคจรชั้น $n = 1$

ค. ชุดของพาสเชน (Paschen) อิเล็คตรอนเปลี่ยนระดับวงโคจรเข้าสู่วงโคจรชั้น $n = 3$

ง. ชุดของแบรคเกท (Bracket) อิเล็คตรอนเปลี่ยนระดับวงโคจรเข้าสู่วงโคจรชั้น $n = 4$

จ. ชุดของฟันด์ (Pfund) อิเล็คตรอนเปลี่ยนระดับวงโคจรเข้าสู่วงโคจรชั้น $n = 5$

ตารางที่ 1.1 เส้นสเปคตรัมชุดต่างๆ

สเปคตรัมชุด	ระดับวงโคจรสุดท้าย (n_f)	ระดับวงโคจรเริ่มต้น (n_i)
บาลเมอร์	2	3, 4, ...
ไลแมน	1	2, 3, ...
พาสเชน	3	4, 5 ...
แบรคเกท	4	5, 6, ...
ฟันด์	5	6, 7, ...

ตัวอย่างที่ 1.2 จงคำนวณความยาวคลื่นของโฟตอนที่เกิดจากอะตอมไฮโดรเจน เมื่ออิเล็คตรอนเปลี่ยนระดับโคจรจากวงโคจรชั้น $n = 3, 4, 5, 6$ และ ∞ มายังชั้น $n = 2$ (เส้นสเปคตรัมชุดบาลเมอร์)

วิธีทำ วิธีที่ 1 จาก
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right]$$

เส้นแรก $n_i = 3$, $n_f = 2$, $R_H = 1.09721 \times 10^7$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.09721 \times 10^7 \left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right]$$

$= 6.65 \times 10^{-7}$ เมตร

เส้นที่สอง $n_i = 4$, $n_f = 2$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.09721 \times 10^{7} \left[\frac{1}{4} - \frac{1}{16} \right]$$

$$\lambda = 4.86 \times 10^{-7} \text{ เมตร}$$

เส้นที่สาม $n_i = 5$, $n_f = 2$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.09721 \times 10^{7} \left[\frac{1}{4} - \frac{1}{25} \right]$$

$$\lambda = 4.34 \times 10^{-7} \text{ เมตร}$$

เส้นที่สี่ $n_i = 6$, $n_f = 2$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.09721 \times 10^{7} \left[\frac{1}{4} - \frac{1}{36} \right]$$

$$\lambda = 4.10 \times 10^{-7} \text{ เมตร}$$

เส้นสุดท้าย $n_i = \infty$, $n_f = 2$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.09721 \times 10^{7} \left[\frac{1}{4} - 0 \right]$$

$$\lambda = 3.64 \times 10^{-7} \text{ เมตร}$$

วิธีที่ 2 จาก $E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$

เมื่อ $n = 2$ $E_2 = -3.4$ eV

เมื่อ $n = 3$ $E_3 = -1.51$ eV

เมื่อ $n = 4$ $E_4 = -0.85$ eV

เมื่อ $n = 5$ $E_5 = -0.544$ eV

เมื่อ $n = 6$ $E_6 = -0.378$ eV

เมื่อ $n = \infty$ $E_7 = 0$ eV

เส้นที่ 1 $n_i = 3$, $n_f = 2$

$$\Delta E = E_3 - E_2 = (-1.51) - (-3.4) = 1.89 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 2.998 \times 10^{8}}{E \times 1.602 \times 10^{-19}}$$

$$\lambda = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{E} \text{ เมตร}$$

แทนค่า $\lambda = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{1.89} = 6.65 \times 10^{-7}$ เมตร

เส้นที่สอง $n_i = 4$, $n_f = 2$

$$\Delta E = E_4 - E_2 = (-0.85) - (-3.4) = 2.55 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{2.55} = 4.86 \times 10^{-7} \text{ เมตร}$$

เส้นที่สาม $n_i = 5$, $n_f = 2$

$$\Delta E = E_5 - E_2 = (-0.544) - (-3.4) = 2.856 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{2.856} = 4.34 \times 10^{-7} \text{ เมตร}$$

เส้นที่สี่ $n_i = 6$, $n_f = 2$

$$\Delta E = E_6 - E_2 = (-0.378) - (-3.4) = 3.022 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{3.022} = 4.1 \times 10^{-7} \text{ เมตร}$$

เส้นสุดท้าย $n_i = \infty$, $n_f = 2$

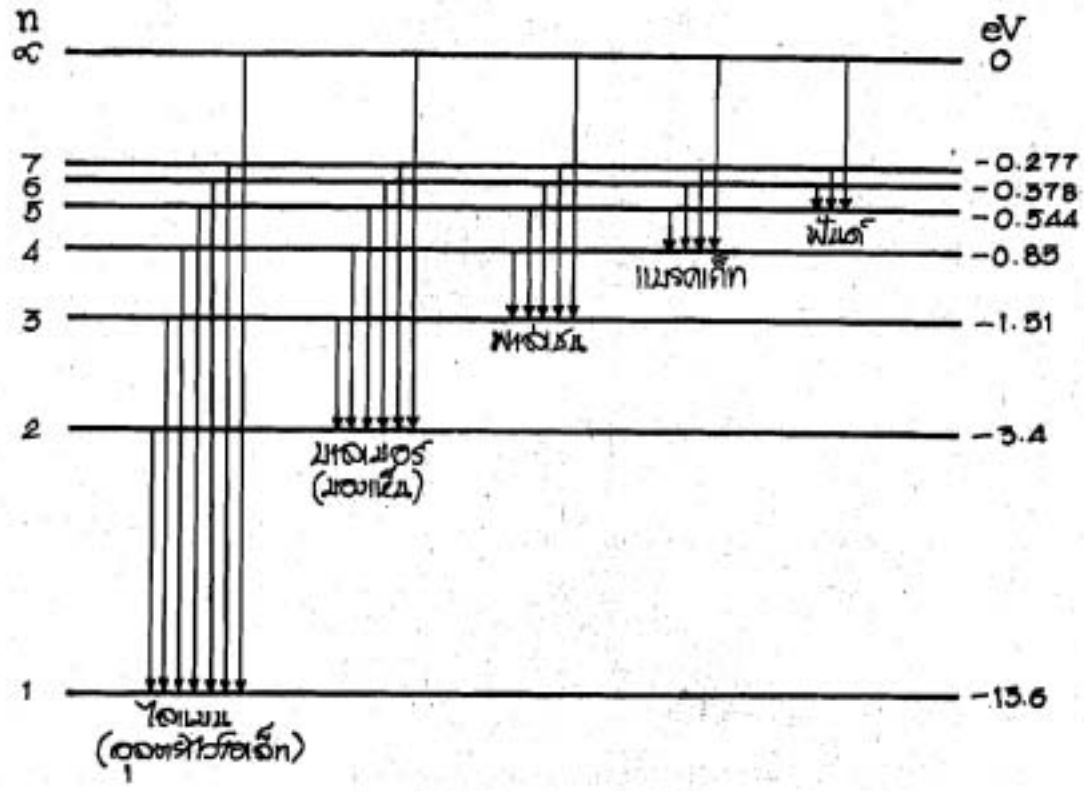
$$\Delta E = E - E_2 = 0 - (-3.4) = 3.4 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{3.4} = 3.64 \times 10^{-7} \text{ เมตร}$$

1.8 ระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน

จากสูตรที่ใช้ในการหาระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน เมื่อแทนค่า n จะได้พลังงานที่ระดับต่างๆ สามารถนำมาเขียนเป็นไดอะแกรมแสดงระดับพลังงานได้ (Energy level diagram) จากไดอะแกรมนี้จะแสดงให้เห็นสเปกตรัมชุดต่างๆ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

n	E_n (eV)
1	- 13.6
2	- 3.4
3	- 1.51
4	- 0.85
5	- 0.544
6	- 0.378
7	- 0.277
:	:
∞	0



รูปที่ 1.4 ไดอะแกรมแสดงระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน

ตัวอย่างที่ 1.3 ถ้าอีเล็คตรอนของอะตอมไฮโดรเจนอยู่ในวงโคจรชั้น n = 3 จงหา

ก. ความเร็วของอีเล็คตรอน

ข. รัศมีของวงโคจร

ค. จำนวนรอบต่อวินาที

วิธีทำ ก. จาก $V_n = \frac{2.18 \times 10^6}{n}$ เมตร/วินาที

$$V_3 = \frac{2.18 \times 10^6}{3} = 7.27 \times 10^5 \text{ เมตร/วินาที}$$

ข. จาก $R_n = 5.3 \times 10^{-11} n^2$ เมตร

$$R_3 = 5.3 \times 10^{-11} 3^2 \text{ เมตร}$$

$$= 4.77 \times 10^{-10} \text{ เมตร}$$

ค. จำนวนรอบต่อวินาที = ความเร็ว / เส้นรอบวง

$$= V_3 / 2\pi R_3$$

$$= \frac{7.27 \times 10^5}{2 \times \frac{22}{7} \times 4.77 \times 10^{-10}}$$

$$= 2.5 \times 10^{14} \text{ รอบ/วินาที}$$

1.9 อะตอมที่มีอีเล็คตรอนมากกว่าหนึ่งตัว

อะตอมตามแบบของบอร์ไม่สามารถอธิบายถึงพลังงานที่ส่งออกมาจากอะตอมชนิดอื่นที่มีโครงสร้างยุ่งยากกว่าอะตอมไฮโดรเจนได้ นักวิทยาศาสตร์หลายท่านพยายามปรับปรุงโครงสร้างอะตอมของบอร์ เพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดจากอะตอมชนิดอื่นที่มีอีเล็คตรอนมากกว่า 1 ตัว (multielectron atom) แต่ก็ไม่ประสพผลสำเร็จมากนัก จนกระทั่งนักวิทยาศาสตร์ได้ตั้งทฤษฎีควันตัม (Quantum theory) ขึ้น จึงสามารถทำนายผลจากการทดลองได้ถูกต้องยิ่งขึ้น สำหรับงานทางด้านรังสีสามารถใช้อะตอมตามแบบของบอร์มาอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ได้ดีอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีควันตัม ซึ่งมีความยุ่งยากจากการคำนวณมาก

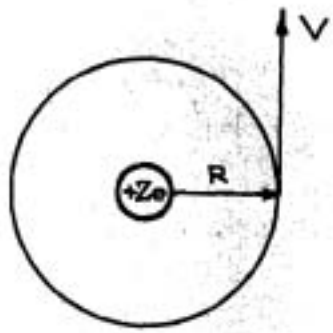
อีเล็คตรอน		พลังงาน (KeV)	อีเล็คตรอน		พลังงาน (KeV)
1	N	0.01	2		0.02
18	M	0.12	12		0.07
8	L	1.1	32		0.59
			18		2.8
2	K	9.0			
ทองแดง (Z = 29)			8		11.0
			2		69.51
			ทังสเตน (Z = 74)		

รูปที่ 1.5 ระดับพลังงานของอะตอมทองแดงและทังสเตน

ตามปกติอะตอมจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นกลาง เพราะว่าจำนวนอีเล็คตรอนภายนอกนิวเคลียสมีค่าเท่ากับประจุบวกของนิวเคลียส อีเล็คตรอนทั้งหมดจะโคจรรอบนิวเคลียส วงโคจรชั้นแรก (n = 1) เรียกว่า วงโคจรชั้นเค (K - shell) จะมีอีเล็คตรอนอยู่ได้ไม่เกิน 2 ตัว วงโคจรชั้นที่สอง (n = 2) เรียกว่า วงโคจรชั้นแอล (L - shell) มีอีเล็คตรอนไม่เกิน 8 ตัว วงโคจรชั้นที่สาม (n = 3) เรียกว่า วงโคจรชั้นเอ็ม (M - shell) จะมีอิเล็คตรอนได้ไม่เกิน 18 ตัว วงโคจรชั้นนอกสุดของอะตอมมีชื่อเรียกว่า วาเลนซ์อีเล็คตรอน (Valence electron) เป็นอีเล็คตรอนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของอะตอมมาก อะตอมที่วงโคจรชั้นนอกสุดมีอีเล็คตรอนอยู่เต็ม 8 ตัว ไม่ค่อยจะทำปฏิกริยาทางเคมีกับอะตอมอื่น อะตอมชนิดนี้ คือ อะตอมของพวกก๊าซเฉื่อย (Inert gas) เช่น ฮีเลียม, นีออน, อาร์กอน ฯลฯ

1.10 อะตอมที่มีอีเล็คตรอนตัวเดียว

อะตอมอื่นๆ ซึ่งตามปกติมีอีเล็คตรอนมากกว่า 1 ตัว เมื่อเกิดการสูญเสียอีเล็คตรอนขึ้นจนมีอีเล็คตรอนเหลืออยู่เพียงตัวเดียว จะสามารถใช้ทฤษฎีของบอร์ได้ พิจารณาอะตอมที่นิวเคลียสมีประจุ Ze แต่สูญเสียอีเล็คตรอนบางตัวจนเหลืออีเล็คตรอนเพียงตัวเดียว ตามทฤษฎีของบอร์จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้



$$mVR = nh$$

$$\frac{mV^2}{R} = \frac{K(Ze)(e)}{R^2} = \frac{KZe^2}{R^2}$$

$$E = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{K(-e)(+Ze)}{R^2} = \frac{1}{2}mV^2 - \frac{KZe^2}{R}$$

จากการพิสูจน์โดยใช้วิธีการเดียวกับอะตอมไฮโดรเจน จะสามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$V = \frac{KZe^2}{nh} = \frac{2.18 \times 10^6}{n} \quad \text{เมตร/วินาที}$$

$$R = \frac{n^2h^2}{mKZe^2} = \frac{5.3 \times 10^{-11}n^2}{Z} \quad \text{เมตร}$$

$$E = \frac{-mK^2Z^2e^4}{2n^2h^2} = \frac{-13.6Z^2}{n^2} \quad \text{eV}$$

ตัวอย่างที่ 1.4 อะตอมฮีเลียมมีอิเล็คตรอนสองตัว เมื่อสูญเสียอิเล็คตรอนไปหนึ่งตัว จะเหลืออิเล็คตรอนเพียงตัวเดียว

ก. จงหาระดับพลังงานและรัศมีวงโคจรของวงโคจรชั้นต่างๆ ของอิเล็คตรอนที่เหลือ

ข. ถ้าอิเล็คตรอนเคลื่อนจากวงโคจรชั้น n = 4 ไปยังวงโคจรชั้น n = 3 จงหา

ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ปล่อยออกมา

ค. ถ้าต้องการดึงอิเล็กตรอนตัวที่เหลือนี้ให้หลุดออกจากอะตอม จะต้องใช้พลังงานเท่าไร

วิธีทำ ก. จาก $E_n = -\frac{13.6Z^2}{n}$ eV

และ $R_n = \frac{5.3 \times 10^{-11} n^2}{Z}$ เมตร

อะตอมฮีเลียม $Z = 2$ แทนค่า n จะได้ระดับพลังงานและรัศมีของวงโคจร

n	E_n (eV)	R_n ($\times 10^{-10}$ เมตร)
1	-54.4	0.27
2	-13.6	1.06
3	-6.04	2.38
4	-3.40	4.24
5	-2.18	6.63
6	-1.51	9.54
∞	0	∞

ข. $\Delta E = E_4 - E_3 = -3.4 - (-6.04) = 2.64$ eV

$\lambda = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{2.64} = 4.7 \times 10^{-7}$ เมตร

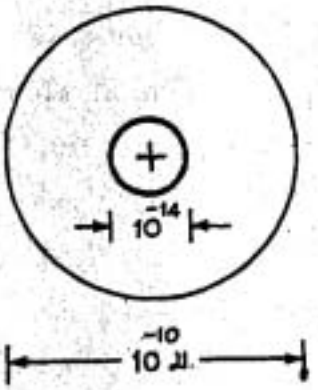
ค. ดึงให้หลุดจากอะตอม ก็คือ ทำให้อิเล็คตรอนเปลี่ยนระดับวงโคจรจากวงโคจรชั้น n = 1 ไป ยัง n = ∞

$\Delta E = E_1 - E_\infty = -54.4 - (0) = -54.4$ eV

จะต้องให้พลังงานแก่อิเล็คตรอน = 54.4 eV

1.11 นิวเคลียส

นิวเคลียสประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอนรวมตัวกันอย่างหนาแน่นอยู่ตรงกลางอะตอม นิวเคลียสมีขนาดเล็กมากประมาณ 10^{-14} เมตร ส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของอะตอมประมาณ 10^{-10} เมตร ซึ่งจะพบว่านิวเคลียสมีขนาด 1/10,000 เท่าของอะตอม



รูปที่ 1.6 อะตอมของไฮโดรเจน

ถ้าหากว่านิวเคลียสเป็นทรงกลมรัศมี R จากการทดลองพบว่า รัศมีของนิวเคลียสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ (เลขมวล)$^{1/3}$

ในปี ค.ศ. 1932 แชดวิค (James Chadwick) ค้นพบนิวตรอน ซึ่งเป็นอนุภาคอีกชนิดหนึ่งที่ประกอบขึ้นเป็นนิวเคลียส นิวตรอนเป็นอนุภาคที่มีมวล แต่ไม่มีประจุ ใช้สัญญลักษณ์ $^{1}_{0}n$

ตารางที่ 1.2 แสดงคุณสมบัติของอนุภาคที่ประกอบขึ้นเป็นอะตอม

อนุภาค	ประจุ (คูลอมบ์)	มวล	
		กรัม	เอเอ็มยู
อีเล็คตรอน	-1.64×10^{-19}	9.1×10^{-28}	0.00055
โปรตอน	1.64×10^{-19}	1.67252×10^{-24}	1.00727
นิวตรอน	0	1.67482×10^{-24}	1.00866

อะตอมมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุก้อนหนึ่ง หน่วยที่ใช้กับวัตถุจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับอะตอม นักวิทยาศาสตร์จึงตั้งหน่วยใหม่เพื่อใช้กับอะตอมและอนุภาคที่ประกอบขึ้นเป็นอะตอมโดยใช้ธาตุคาร์บอนเป็นตัวมาตรฐานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ กำหนดให้ 1 เอเอ็มยู (amu) มีค่าเท่ากับ $^{1}/_{12}$ เท่าของมวลของนิวเคลียสของคาร์บอน ซึ่งประกอบด้วยโปรตอน 6 ตัว และนิวตรอน 6 ตัว ดังนั้น 1 เอเอ็มยู เท่ากับ 1.6605×10^{-27} กิโลกรัม มวลของอะตอมชนิดอื่นก็คิดเทียบจากมวลของอะตอมคาร์บอนนี้ เช่น ไฮโดรเจนธรรมดามีมวลเท่ากับ 1.007825 เอเอ็มยู อ็อกซิเจนธรรมดามีมวล 15.994915 เอเอ็มยู

1.12 สัญญลักษณ์ของนิวเคลียส

$$ {}^{A}_{Z}X \qquad \text{หรือ} \qquad X^{A}_{Z} $$

เมื่อ X = สัญญลักษณ์ทางเคมีของธาตุที่มีนิวเคลียสชนิดนั้น เช่น นิวเคลียสของไฮโดรเจนใช้ตัว H, นิวเคลียสของอ็อกซิเจนใช้ตัว O, นิวเคลียสของยูเรเนียมใช้ตัว U

A = เลขมวล (mass number) เป็นตัวเลขแสดงจำนวนนิวตรอน และจำนวนโปรตอนที่มีอยู่ในนิวเคลียสของอะตอมนั้น เช่น ^{16}O หมายความว่า นิวเคลียสของอ็อกซิเจนมีโปรตอนและนิวตรอนรวมกัน 16 ตัว ^{235}U หมายความว่า นิวเคลียสของยูเรเนียมมีโปรตอนและนิวตรอนรวมกัน 235 ตัว

Z = เลขอะตอม (atomic number) เป็นตัวเลขที่แสดงจำนวนโปรตอนที่มีอยู่ภายในนิวเคลียส เช่น ${}_{8}O$ หมายความว่า นิวเคลียสของอ็อกซิเจนประกอบด้วยโปรตอน 8 ตัว, ${}_{92}U$ หมายความว่า นิวเคลียสของยูเรเนียมประกอบด้วยโปรตอน 92 ตัว

จำนวนนิวตรอน = A - Z

เนื่องจากอะตอมที่เป็นกลางจะมีจำนวนอีเล็คตรอนเท่ากับจำนวนโปรตอน ฉะนั้นจะทราบจำนวนอีเล็คตรอนของอะตอมด้วย เช่น อ็อกซิเจนมีอีเล็คตรอน 8 ตัว, ยูเรเนียมมีอีเล็คตรอน 92 ตัว

ตัวอย่างที่ 1.5 จงหาจำนวนโปรตอน อีเล็คตรอน และนิวตรอนของอะตอมต่อไปนี้

$${}^{7}_{3}Li \;,\; {}^{22}_{11}Na \;,\; {}^{32}_{15}P \text{ และ } {}^{204}_{82}Pb$$

วิธีทำ

${}^{7}_{3}Li$

จำนวนโปรตอน + จำนวนนิวตรอน = 7

จำนวนโปรตอน = 3

จำนวนนิวตรอน = 7 - 3 = 4

จำนวนอีเล็คตรอน = จำนวนโปรตอน = 3

${}^{22}_{11}Na$

จำนวนโปรตอน + จำนวนนิวตรอน = 22

จำนวนโปรตอน = 11

จำนวนนิวตรอน = 11

จำนวนอีเล็คตรอน = จำนวนโปรตอน = 11

${}^{32}_{15}P$

จำนวนโปรตอน + จำนวนนิวตรอน = 32

จำนวนโปรตอน = 15

จำนวนนิวตรอน = 32 - 15 = 17

จำนวนอีเล็คตรอน = จำนวนโปรตอน = 15

$^{204}_{82}Pb$ จำนวนโปรตอน + จำนวนนิวตรอน = 204

จำนวนโปรตอน = 82

จำนวนนิวตรอน = 122

จำนวนอีเล็คตรอน = จำนวนโปรตอน = 82

1.13 สัญญลักษณ์ของอนุภาค

$^{1}_{1}H$ หมายถึงโปรตอนหรือนิวเคลียสของไฮโดรเจน

$^{2}_{1}H$ หมายถึงดิวเทอรอนหรือนิวเคลียสของดิวเทอเรียม

$^{3}_{1}H$ หมายถึงตริตอนหรือนิวเคลียสของตริเตียม

$^{1}_{0}n$ หมายถึงนิวตรอน

$^{0}_{-1}e$ หมายถึงรังสีเบตาชนิดลบหรือเนกาตรอน

$^{0}_{+1}e$ หมายถึงรังสีเบตาชนิดบวกหรือโพซิตรอน

$^{12}_{6}C$ หมายถึงนิวเคลียสของธาตุคาร์บอน

$^{3}_{2}He$ หมายถึงฮีเลียม -3

$^{4}_{2}He$ หมายถึงอนุภาคแอลฟา หรือนิวเคียสของฮีเลียมหรือรังสีแอลฟา

γ หมายถึงรังสีแกมมา

1.14 การจัดกลุ่มของอะตอม

อะตอมอาจจัดแยกเป็นกลุ่มโดยอาศัยลักษณะที่เหมือนกันได้หลายกลุ่ม คือ ไอโซโทป, ไอโซโทน, ไอโซบา และไอโซเมอร์

ไอโซโทป (Isotope) หมายถึง กลุ่มของอะตอมที่มีจำนวนโปรตอนเท่ากัน เช่น

ไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทป คือ $^{1}_{1}H$, $^{2}_{1}H$ และ $^{3}_{1}H$ หรือยูเรเนียมมีหลายไอโซโทป คือ U - 227, U - 228, U - 230, U - 231, U - 232, U - 233, U - 234, U - 235, U - 236, U - 237, U - 238, U - 239 และ U - 240

ไอโซบาร์ (Isobar) หมายถึง กลุ่มของอะตอมที่มีเลขมวล (mass number) เท่ากัน

เช่น $^{2}_{1}H$, $^{3}_{2}He$ หรือ $^{14}_{6}C$, $^{14}_{7}N$, $^{14}_{8}O$

ไอโซโทน (Isotone) หมายถึง กลุ่มของอะตอมที่มีจำนวนนิวตรอนเท่ากัน เช่น

$^{2}_{1}H$, $^{3}_{2}He$ หรือ $^{9}_{3}Li$, $^{10}_{4}Be$, $^{11}_{5}B$, $^{12}_{6}C$, $^{13}_{7}N$, $^{14}_{8}O$

ไอโซเมอร์ (Isomer) หมายถึง กลุ่มของอะตอมชนิดเดียวกัน แต่มีพลังงานต่างกัน

เช่น ^{99}Tc, ^{99m}Tc หรือ ^{113}In, ^{113}In

ตารางที่ 1.3 กลุ่มของอะตอม

กลุ่มอะตอม	เลขอะตอม	จำนวนนิวตรอน	เลขมวล
ไอโซโทป	เหมือน	ต่าง	ต่าง
ไอโซโทน	ต่าง	เหมือน	ต่าง
ไอโซบาร์	ต่าง	ต่าง	เหมือน
ไอโซเมอร์	เหมือน	เหมือน	เหมือน

1.15 รูปร่างของนิวเคลียส

นักวิทยาศาสตร์หลายท่านพยายามอธิบายถึงรูปร่างของนิวเคลียส การอยู่ร่วมของโปรตอนและนิวตรอนภายในนิวเคลียส มีการตั้งทฤษฎีต่างๆ หลายทฤษฎี แต่ทุกทฤษฎีไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทั้งหมดที่เกิดจากนิวเคลียสได้ ทฤษฎีแต่ละอันถูกสร้างมาเพื่อจะอธิบายปรากฏการณ์ที่ต้องการเท่านั้น อาจเปรียบเทียบได้กับตาบอดคลำช้างแล้วพยายามสร้างมโนภาพว่าช้างมีรูปร่างอย่างไร ถ้าคลำถูกตัวช้างอาจคิดว่าช้างมีรูปร่างเหมือนกล่องขนาดใหญ่ แต่ถ้าคลำถูกงวงอาจคิดว่าช้างมีรูปร่างเหมือนงู เป็นต้น นักวิทยาศาสตร์ก็เช่นกันสร้างโมเดลขึ้นมาเพื่ออธิบายเหตุการณ์อย่างหนึ่ง แต่ไม่สามารถอธิบายเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดจากนิวเคลียสได้ โมเดล 2 ชนิด ที่ใช้อธิบายงานทางด้านรังสี คือ โมเดลรูปหยดน้ำ (liquid drop model) และโมเดลรูปชั้น (shell model)

อนุภาคที่มีประจุเหมือนกันจะออกแรงผลักซึ่งกันและกัน ดังนั้นโปรตอนในนิวเคลียสจะออกแรงผลักกันเอง แต่โปรตอนก็ยังคงสามารถรวมกันอยู่ภายในนิวเคลียสซึ่งมีขนาดเล็กมากได้ แสดงว่า จะต้องมีแรงอีกชนิดหนึ่งมายึดไว้ และมีขนาดมากกว่าแรงผลักของโปรตอน เรียกชื่อ แรงชนิดนี้ว่า แรงนิวเคลียร์ (nuclear force) ซึ่งกระทำเมื่อนิวคลีออนห่างกันน้อยกว่าขนาดของนิวเคลียสเท่านั้น

1.16 แมสดีเฟ็คและพลังงานยึดเหนี่ยว

มวลของนิวเคลียสน้อยกว่าผลรวมของนิวคลีออนที่ประกอบขึ้นเป็นนิวเคลียส ผลต่างของมวลจำนวนนี้มีชื่อเรียกว่า แมสดีเฟ็ค (mass defect) มวลที่หายไปเปลี่ยนเป็นพลังงานเพื่อยึดนิวคลีออนไว้ เรียกพลังงานนี้ว่า พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy)

ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและพลังงานเป็นไปตามสมมติฐานซึ่งไอน์สไตน์

(Einstein) ตั้งขึ้นในปี 1905 คือ

$$E = mc^2$$

เมื่อ E เป็นพลังงาน m = มวล และ c = ความเร็วแสง

มวล 1 เอเอ็มยูสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้เท่ากับ

$$\frac{(1\ \text{amu})(1.66 \times 10^{-27}\ \text{Kg/amu})(3 \times \times 10^{8}\ \text{m/s})^2}{(1.6 \times \times 10^{-13}\ \text{J/MeV})} = 931\ \text{MeV}$$

ดังนั้น $1\ \text{amu} = 931\ \text{MeV}$

ถ้าเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ จะหาค่าแมสดีเฟ็คได้ดังนี้

$$\text{Mass defect} = Zm_p + (A - Z)m_n - m$$

เมื่อ m_p = มวลของโปรตอน

m_n = มวลของนิวตรอน

m = มวลของนิวเคลียส

ทำนองเดียวกันพลังงานยึดเหนี่ยวจะมีค่าดังนี้

$$\text{B.E.} = \left[Zm_p + (A - Z)m_n - m\right] c^2$$

หรือถ้ามวลเป็นเอเอ็มยู

$$\text{B.E.} = \left[Zm_p + (A - Z)m_n - m\right] 931\ \text{MeV}$$

ตามปกติ เรามักจะพบตารางแสดงมวลของอะตอมมากกว่าแสดงมวลของนิวเคลียส ดังนั้น ในการหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสจะสะดวกกว่า ถ้าจะหาจากมวลของอะตอม กำหนดให้ M = มวลของอะตอม

$$M = m + Zm_e$$

แทนค่า $\text{B.E.} = \left[Zm_p + (A - Z)m_n - (M - Zm_e)\right] c^2$

$$= \left[Zm_p + Zm_e + (A - Z)m_n - M\right] c^2$$

$$= \left[ZM_H + (A - Z)m_n - M\right] c^2$$

เมื่อ M_H = มวลของอะตอมไฮโดรเจน = 1.007825 amu.

m_n = มวลของนิวตรอน = 1.008665 amu.

$$\boxed{B.E. = \left[1.007825\ Z + 1.008665\ (A - Z) - M\right] c^2}$$

ตัวอย่างที่ 1.6 จงหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวและพลังงานต่อนิวคลีออนของนิวเคลียสของคาร์บอน ซึ่งมีโปรตอน 6 ตัว และนิวตรอน 6 ตัว

วิธีทำ มวลของโปรตอน 6 ตัว = 6(1.00727) = 6.04362 amu.

มวลของนิวตรอน 6 ตัว = 6(1.00866) = 6.05196 amu.

มวลของนิวคลีออน 12 ตัว = 12.09558 amu.

มวลของนิวเคลียสคาร์บอน = 12.00000 amu.

Mass defect = 0.09558 amu.

พลังงานยึดเหนี่ยว = 0.09558 x 931 = 89 MeV

พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน = 89 / 12 = 7.42 MeV

หรือ แทนค่าในสูตร

$B.E. = \left[Zm_p + (A - Z)m_n - m\right] c^2$

$= \left[6(1.00727) + (12 - 6)1.00866 - 12\right] 931$ MeV

$= 89$ MeV

$\frac{B.E.}{A} = \frac{89}{12} = 7.42$ MeV

ตัวอย่างที่ 1.7 จงหาพลังงานยคดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนของ

ก. อ๊อกซิเจน -16 ซึ่งมีมวลอะตอมเท่ากับ 15.994915 เอเอ็มยู

ข. ตะกั่ว -208 ซึ่งมีมวลอะตอมเท่ากับ 207.976650 เอเอ็มยู

วิธีทำ $B.E. = \left[1.007825Z + 1.008665(A - Z) - M\right] 931$ MeV

ก. $B.E. = \left[1.007825(8) + 1.008665(16 - 8) - 15.994915\right] 931$ MeV

$= 127.52$ MeV

$$\frac{B.E.}{A} = \frac{127.52}{16} = 797 \text{ MeV}$$

ข. B.E. = $[1.007825(82) + 1.008665(208 - 82) - 207.976650]$ 931 MeV

= 1634.88 MeV

$$\frac{B.E.}{A} = \frac{1634.88}{208} = 7.86 \text{ MeV}$$

ตัวอย่างที่ 1.8 จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนของยูเรเนียม -230 ยูเรเนียม -232 และยูเรเนียม -238 เมื่อมวลอะตอมของไอโซโทปทั้งสามเท่ากับ 230.033926 เอเอ็มยู 232.037167 เอเอ็มยู และ 238.050760 เอเอ็มยู ตามลำดับ

วิธีทำ B.E. = $[1.007825Z + 1.008665(A - Z) - M]$ 931 MeV

B.E. = $[1.007825(92) + 1.008665(230 - 92) - 230.033926]$ 931 MeV

= 1751.6 MeV

$$\frac{B.E.}{A} = \frac{1751.6}{230} = 7.62 \text{ MeV}$$

ยูเรเนียม -232

B.E. = $[1.007825(92) + 1.008665(232 - 92) - 232.037167]$ 931 MeV

= 1751.6 MeV

$$\frac{B.E.}{A} = \frac{1765.0}{232} = 7.61 \text{ MeV}$$

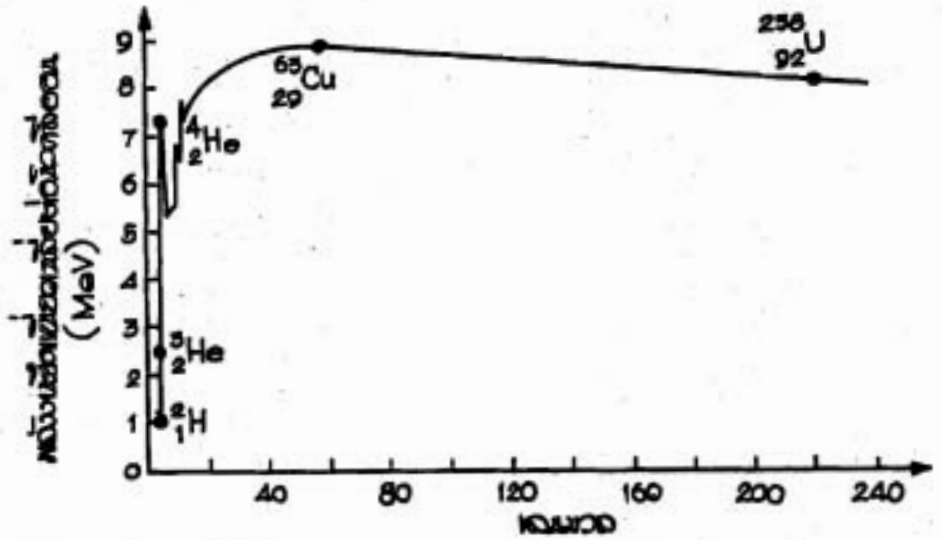
ยูเรเนียม -238

B.E. = $[1.007825(92) + 1.008665(238 - 92) - 234.050760]$ 931 MeV

= 1800.8 MeV

$$\frac{B.E.}{A} = \frac{1800.8}{238} = 7.57 \text{ MeV}$$

ตามปกติไอโซโทปที่มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนมาก จะมีเสถียรภาพมากทำให้มีอยู่ตามธรรมชาติมากกว่าไอโซโทปอื่นๆ ของธาตุเดียวกัน ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อนิวเคลียสมีขนาดเพิ่มขึ้น ถ้านิวเคลียสมีเลขมวลมากกว่า 63 ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนจะมีค่าลดลง แต่ก็ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะมีค่าประมาณ 8 เอ็มอีวีต่อนิวคลีออน พลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนของอนุภาคแอลฟา จะมีค่ามากกว่านิวเคลียสที่มีขนาดใกล้กัน ดังนั้นอนุภาคแอลฟาหรือนิวเคลียสของฮีเลียม จึงมีเสถียรภาพสูงเมื่อเทียบกับนิวเคลียสขนาดเล็กๆ ด้วยกัน



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขมวลกับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออน

1.17 ปฏิกริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction)

ปฏิกริยานิวเคลียร์เกิดจากการแลกเปลี่ยนนิวคลีออนระหว่างสองนิวเคลียสที่วิ่งมาชนกัน ซึ่งก็คือ การรวมนิวเคลียสเข้าด้วยกัน หลังจากเกิดปฏิกริยานิวเคลียร์แล้ว ส่วนมากจะได้อะตอมชนิดใหม่เกิดขึ้น ส่วนปฏิกริยาเคมีเกิดจากการรวมตัวของอิเล็คตรอนที่โคจรรอบอะตอมของสารที่มีปฏิกริยาเข้าด้วยกัน ไม่มีอะตอม (ธาตุ) เกิดขึ้น ดังนั้น นักเล่นแร่แปรธาตุในสมัยโบราณจึงไม่สามารถผลิตธาตุชนิดใหม่ได้ แต่นักฟิสิกส์ในปัจจุบันสามารถสังเคราะห์ธาตุใหม่จากปฏิกริยานิวเคลียร์

ในการนำนิวเคลียสสองชนิดมารวมตัวกัน จะต้องเร่งคือ ให้พลังงานแก่นิวเคลียสจนสามารถเอาชนะแรงผลักที่เกิดจากนิวเคลียสทั้งสอง ในทางปฏิบัติจะใช้นิวเคลียสที่มีขนาดไม่เท่ากัน นิวเคลียสขนาดเล็ก เช่น อนุภาคแอลฟา โปรตอน หรือดิวเทอรอน จะถูกเร่งให้มี

ความเร็วสูง พุ่งเข้าชนนิวเคลียสที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยูเรเนียม เป็นต้น

เมื่อเกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน พลังงานจำนวนนี้จะแทนด้วยสัญญลักษณ์ Q พิจารณาปฏิกริยานิวเคลียร์ซึ่งแทนด้วยสมการต่อไปนี้

$$x + X \longrightarrow Y + y$$

เมื่อ x = อนุภาคที่ถูกเร่งเข้าชน (bombarding particle, incident particle)

X = นิวเคลียสที่ถูกชน (target nucleus)

Y = นิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่ (product nucleus)

y = อนุภาคที่เกิดขึ้น (product particle)

ตามปกติในการทำให้เกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ นิวเคลียสที่ถูกชน X จะหยุดนิ่ง คือ ไม่มีพลังงานจลน์ เนื่องจากพลังงานทั้งหมดของอนุภาค หรืออะตอมมีค่าเท่ากับผลบวกของพลังงานนิ่ง (rest energy) และพลังงานจลน์ จะเขียนสมการแสดงพลังงานได้ดังนี้

$$(E_x + m_x c^2) + M_x c^2 = (E_Y + M_y c^2) + (E_y + m_y c^2)$$

เมื่อ m_x = มวลของอนุภาคที่ถูกเร่งเข้าชน

M_X = มวลของนิเคลียสที่ถูกชน

m_y = มวลของอนุภาคที่เกิดขึ้น

M_Y = มวลของนิวเคลียสที่เกิดขึ้น

E = พลังงานจลน์

พลังงาน Q มีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานจลน์ หลังเกิดปฏิกริยากับพลังงานจลน์ก่อนเกิดปฏิกริยา

$$\boxed{Q = E_Y + E_y - E_x}$$

จากสมการ $E_Y + E_y - E_x = (M_X + m_x - M_Y - m_y)c^2$

ดังนั้น $\boxed{Q = (M_X + m_x - M_Y - m_y)c^2}$

ตัวอย่างที่ 1.9 จงหาพลังงานที่ได้จากปฏิกริยานิวเคลียร์

$$^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He$$

กำหนดให้ มวลของ $^{7}_{3}Li$ = 7.01823

มวลของ $^{1}_{1}H$ = 1.00841

มวลของ $^{4}_{2}H$ = 4.00388

วิธีทำ

$$Q = (M_X + m_x - M_Y - m_y)c^2$$

$$= (7..01823 + 1.00814 - 4.00388 - 4.00388 - 4.00388)c^2$$

$$= (0.01861)c^2$$

$$= (0.1861)\ 931$$

$$= 17.3\ MeV$$

พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาเท่ากับ 17.3 เม็มอีวี

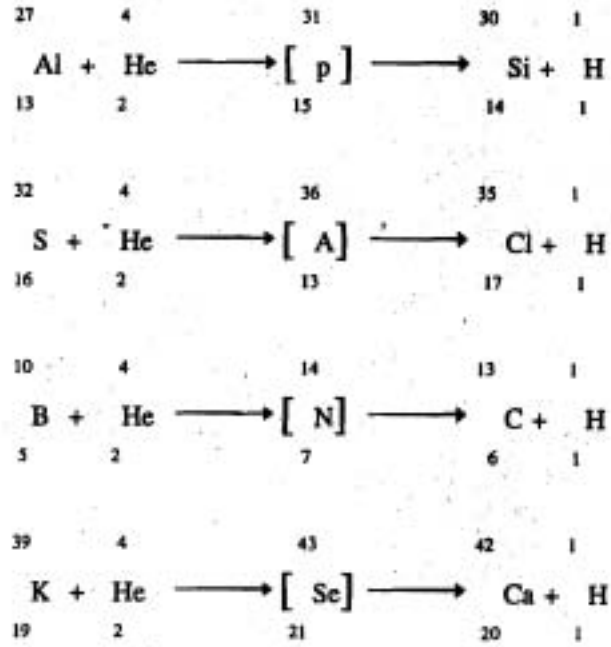
ชนิดของปฏิกริยานิวเคลียร์

ปฏิกริยาทางนิวเคลียร์มีอยู่มากมายหลายชนิด อาจจำแนกได้โดยดูจากชนิดอนุภาคที่ทำให้เกิดปฏิกริยาและอนุภาคที่เกิดขึ้น

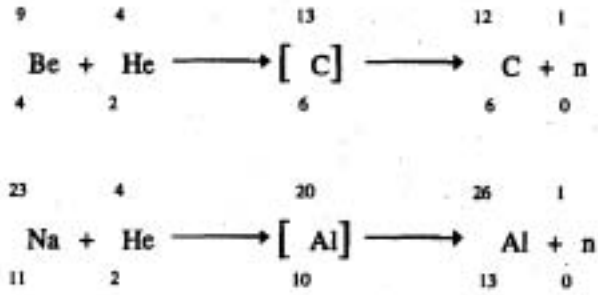
1. **ปฏิกริยาที่เกิดจากอนุภาคแอลฟา**

1.1 ปฏิกริยาที่เกิดจากอนุภาคแอลฟาวิ่งชนนิวเคลียส (taget nucleus) ได้นิวเคลียสชนิดใหม่ (product nucleus) และอนุภาคโปรตอน เรียกว่า alpha - proton reaction เขียนแทนด้วยสัญญลักษณ์ (α, p) reaction ดังสมการต่อไปนี้

$$^{23}_{11}Na + {}^{4}_{2}He \longrightarrow [{}^{27}_{13}Al] \longrightarrow {}^{12}_{12}Mg + {}^{1}_{1}H$$

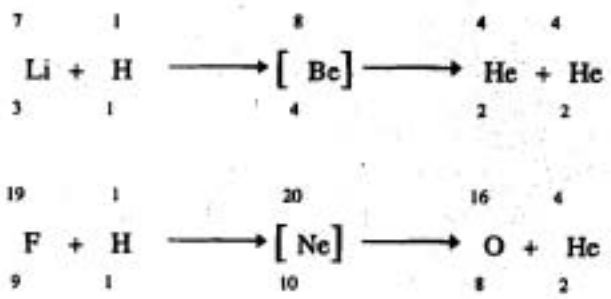


1.2 alpha - neutron reaction

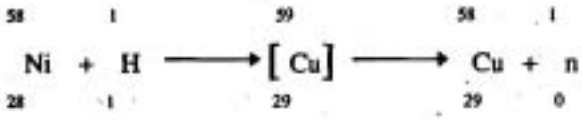


2. ปฏิกริยาที่เกิดจากโปรตอน

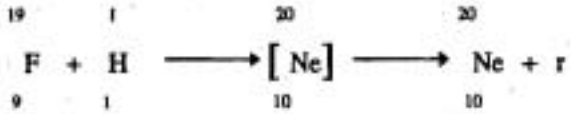
2.1 proton - alpha reaction



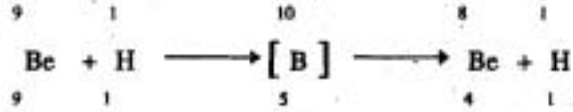
2.2 proton - neutron reaction



2.3 proton - gamma reaction

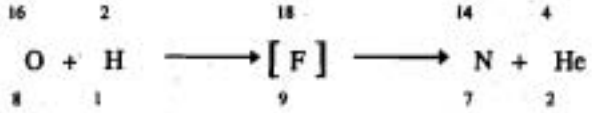


2.4 proton - deuteron reaction

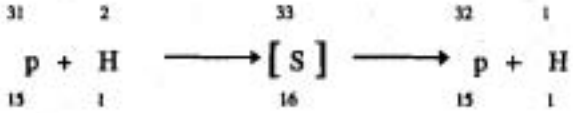


3. ปฏิกริยาที่เกิดจากดิวเทอรอน

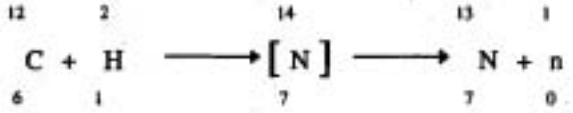
3.1 deuteron - alpha reaction

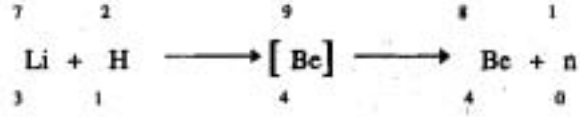


3.2 deuteron - proton reaction



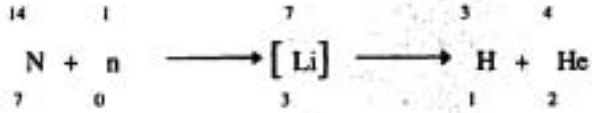
3.3 deuteron - neutron reaction



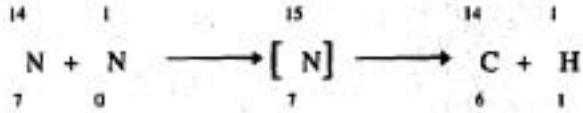


4. ปฏิกริยาที่เกิดจากนิวตรอน

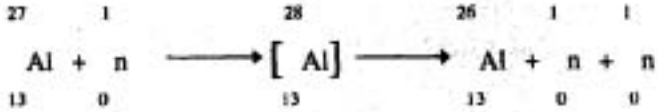
4.1 neutron - alpha reaction



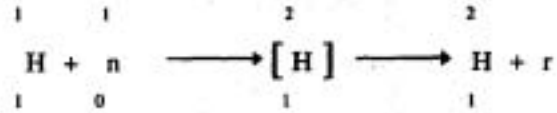
4.2 neutron - proton reaction



4.3 (n, 2n) reaction

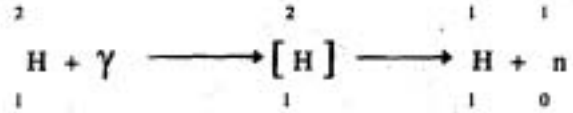


4.4 (n, r) reaction

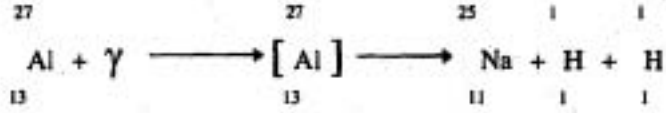


5. ปฏิกริยาที่เกิดจากรังสีแกมมา

5.1 (γ, n) reaction



5.2 (r, p) reaction



1.18 ฟิชชัน (Fission)

ขบวนการฟิชชันถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1930 โดยใช้นิวตรอนยิงนิวเคลียสของธาตุหนัก เช่น ยูเรเนียม ทำให้นิวเคลียสนั้นแตกตัวออกได้นิวเคลียสชนิดใหม่ ซึ่งมีขนาดเล็กลง และได้พลังงานเกิดขึ้นมากมาย ตัวอย่างฟิชชันของยูเรเนียม -235 คือ

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{90}_{38}Sr + {}^{136}_{54}Xe + 10\,{}^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{146}_{58}Ce + {}^{88}_{34}Se + 2\,{}^{1}_{0}n$$

สมการทั้งสามนี้เป็นเพียงตัวอย่างเล็กน้อยของปฏิกริยาฟิชชันที่เกิดขึ้น ฟิชชันของยูเรเนียม - 235 มีหลายชนิด จากสมการจะพบว่า ยูเรเนียม - 235 แตกตัวเป็นสตรอนเชียม - 90 และซีนอน - 136 ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีจะต้องสลายตัวต่อไปอีก นอกจากนี้ยังได้นิวตรอนเกิดใหม่เพิ่มขึ้นอีกหลายตัว นิวตรอนนี้สามารถชนกับนิวเคลียสของยูเรเนียม - 235 ทำให้เกิดปฏิกริยาฟิชชันอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า ปฏิกริยาลูกโซ่ (Chain reaction)

ตัวอย่างที่ 1.10 จงหาพลังงานที่ได้จากฟิชชันของยูเรเนียม - 235 ตามสมการ

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{90}_{38}Sr + {}^{136}_{54}Xe + 10\,{}^{1}_{0}n$$

กำหนดให้ มวลของ U - 235 = 235.0439 เอเอ็มยู

มวลของนิวตรอน = 1.0087 เอเอ็มยู

มวลของ Sr - 90 = 89.9073 เอเอ็มยู

มวลของ Xe - 136 = 135.9072 เอเอ็มยู

วิธีทำ $\Delta M = 235.0439 + 1.0087 - 89.9073 - 135.9072 - 10(1.0087)$

$= 0.1514$ เอเอ็มยู

มวลหายไป 0.1514 เอเอ็มยู

เปลี่ยนเป็นพลังงาน $= 0.1514 \times 931 = 141$ MeV

หลังจากเกิดปฏิกริยาจะได้พลังงาน 141 เอ็มอีวี

1.19 ฟิวชัน (Fusion)

ขบวนการฟิวชันเป็นขบวนการรวมตัวของนิวเคลียสที่มีขนาดเล็กเข้าด้วยกัน ทำให้ได้นิวเคลียสที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและพลังงานจำนวนหนึ่ว ตัวอย่างของฟิวชัน คือ

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}H$$

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

ตัวอย่างที่ 1.11 จงหาพลังงานที่ได้จากฟิวชันของดิวเทอเรียมกับตริเตียมดังสมการต่อไปนี้

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

กำหนดให้ มวลของดิวเทอเรียม = 2.014102 เอเอ็มยู

มวลของตริเตียม = 3.016049 เอเอ็มยู

มวลของฮีเลียม = 4.002603 เอเอ็มยู

วิธีทำ ΔM = (2.014102 + 3.016049 - 4.002603 - 1.008665)

= 0.018883 เอเอ็มยู

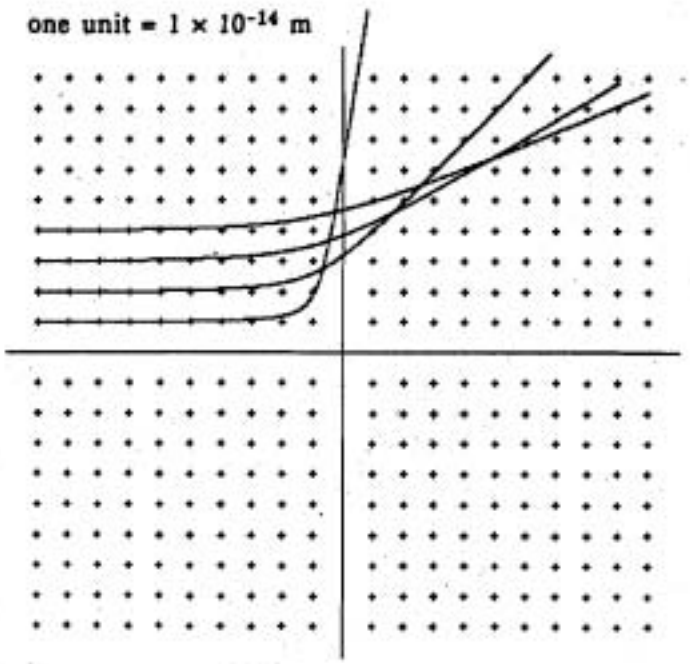
มวลหายไป 0.018883 เอเอ็มยู

คิดเป็นพลังงาน = 0.018883 x 931 = 17.6 เอ็มอีวี

พลังงานที่ได้จากปฏิกริยา = 17.6 เอ็มอีวี

โปรแกรมแสดงการทดลองของรัทเธอร์ฟอร์ด

```
90 REM          ***** Program 1.1 *****
95 REM      The Rutherford Scattering Experiment
```



รูปที่ 1.8 อนุภาคแอลฟ่าถูกเบี่ยงเบนโดยนิวเคลียสของทองคำ

```
100 REM     ***** Set up graphics characteristics *****
110 SCREEN 2      : CLS ; XO = 320  :  YO = 100  :  SX = 1.5  :  SY  = SX/2.25
150 REM     ***** specify initial conditions *****
160 E       =     1.6*10^-19
170 M       =     4*1.67*10^-27
180 K       =     9*10^9
190 Z       =     53
200 VX      =     1.4*10^7
210 VY      =     0
220 X       =     -10*10^-14
230 Y       =     2*10^-14
240 DT      =     10^ -22
300 REM     ***** set up screen display *****
310 Y1      =     0 : REM draw horizontal axis
320 FOR X1  =     -110  TO  110  STEP  2
330 XS      =     XO + SX*S1 : YS = YO - SY*Y1 : PSSET (XS,YS)
```

```
340 NEXT X1
350 X1      =     0 : REM draw vertical axis
360 FOR Y1 =      -100 TO 100 STEP 1.5
370 XS      =     XO + SX*X1 : YS = YO - SY*Y1 : PSET (XS,YS)
380 NEXT Y1
390   REM draw coordinate grid
400 fOR X1 =      -100 TO 100 STEP 10
410 FOR X1 =      -90 TO 90 STEP 10
420 XS      =     XO + SX*X1 : YS = YO - SY*Y1 : PSET (XS,YS)
430 NEXT Y1
440 NEXT X1
1000 REM    ***** calculations and plotting *****
1002 SC     =     10^-14
1004 SX     =     10*SX/XC : SY = SX/2.25
1006 LOCATE 1,55 : PRINT " one unit = " ;SC;"m"
1010 FOR T =      0 TO 2*10^-20 STEP DT
1020 V1     =     V1 = VX+(K*Z*E*E/M) / (X^2 + Y^2)(X/S^2 + y^2) ^. 5 )*DT
1030 X1     =     X + VX*DT
1040 V2     =     VY +((K*X*R*R* / M) / (X ^2 + Y^2))*(Y/(X^2 + Y^2) ^.5)*DT
1050 Y1     =     Y+VY*DT
1060 GPSIN 3000
1070 VX     =     V1 :X = X1
1080 VY     =     V2 : Y1
1090 NEXT T
1200 END
2990          ***** plotting subroutine *****
3000 XS     =     XO + SX*X : YS = YO - SY*Y : PSET (XS,YS)
3010 RETURN
```

แบบฝึกหัดที่ 1

1. จงอธิบายถึงการทดลองของรัทเธอร์ฟอร์ด เพื่อหาโครงสร้างของอะตอม
2. อะตอมของรัทเธอฟอร์ด มีข้อขัดแย้งกับทฤษฎีฟิสิกส์อย่างไร
3. สมมติฐานเกี่ยวกับอะตอมของบอร์ มีใจความว่าอย่างไร
4. จงหา ก. ความเร็วของอีเล็คตรอนในวงโคจรสามชั้นแรกของอะตอมไฮโดรเจน
   ข รัศมีของวงโคจรทั้งสามนี้
5. จงหา ก. เวลาในการวิ่งครบรอบของอีเล็คตรอนในวงโคจรชั้นแรกของอะตอมไฮโดรเจน
   ข ความเร็วเชิงมุมของอีเล็คตรอน
6. จงหาพลังงานลน์ของอีเล็คตรอนในวงโคจรชั้นที่ n ของอะตอมไฮโดรเจนและหาพลังงานจลน์ เมื่อ n = 1, 2, 3 และ ∞
7. จงหาพลังงานจลน์, พลังงานศักย์ และพลังงานรวมของอีเล็คตรอนในวงโคจรชั้นแรกของอะตอมไฮโดรเจน
8. จงหาพลังงานในการแตกตัวของอะตอมไฮโดรเจน
9. จงหา exeitation potential ครั้งที่หนึ่งของอะตอมไฮโดรเจน
10. จงหจำนวนโปรตอนและนิวตรอนของนิวเคลียสต่อไปนี้ ก. $^{24}_{12}Mg$ ข. $^{25}_{12}Mg$ ค. $^{26}_{12}Mg$
11. จงอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเลขมวล (A) กับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออน (B.E./A)
12. จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวของ $^{27}_{13}Al$
13. จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวของ ก. $^{3}_{1}H$ ข. $^{3}_{2}He$ นิวเคลียสทั้งสองตัวนี้นิวเคลียสใดมีเสถียรภาพดีกว่า
14. จงหาพลังงานยึดเหนี่ยมวของ $^{7}_{3}Li$

15. จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวของ $^{4}_{2}He$

16. จงหาพลังงานที่ได้จากปฏิกริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้

$$^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He$$

17. จงหาพลังงานที่ถูกดูดกลืนจากปฏิกริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \longrightarrow ^{17}_{1}He + ^{1}_{8}O$$

18. ระดมยิง $^{6}_{3}Li$ ด้วยดิวเทอรอน ทำให้เกิดอนุภาคแอลฟาสองตัว พร้อมกับได้พลังงาน 22.3 เอมอีวี กำหนดให้ มวลอะตอมดิวเทอรอนเท่ากับ 2.01474 และมวลอะตอมฮีเลียมเท่ากับ 4.00388 จงหามวลของลิเธียม-6

19. จงอธิบายฟิชชัน (Fission)

20. จงอธิบายฟิวชัน (Fusion)