บทที่ 1
โครงสร้างของสสาร

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาโครงสร้างของอะตอม แบบจำลองของอะตอม และ สเปคตรัมของอะตอมไฮโดรเจน
2. ศึกษานิวเคลียส ปฏิกริยานิวเคลียร์

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

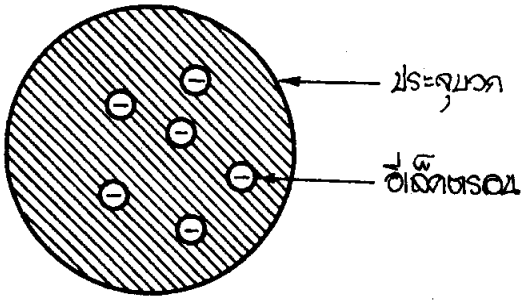
ต่อมาประมาณศตวรรษที่ 17 ดาลตัน (Dalton) ตั้งทฤษฎีอะตอมขึ้นโดยอาศัยวิธีการทางเคมีมาพิสูจน์ อะตอมของดาลตันมีหลายชนิดแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของธาตุ เนื่องจากมีการทดลองมาสนับสนุนทฤษฎี นักวิทยาศาสตร์จึงหันมาค้นคว้าหาความจริงเกี่ยวกับอะตอม จนเป็นที่เชื่อแน่ว่า อะตอมมีอยู่จริง

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

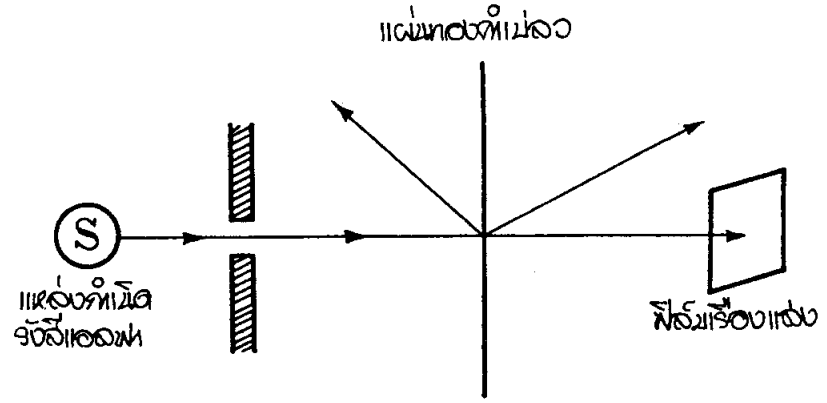
หลังจากการค้นพบอีเล็คตรอน ทอนสันได้เสนอว่า อะตอมควรประกอบด้วยประจุบวกรวมกันเป็นทรงกลม มีรัศมีประมาณ 10^{-10} เมตร อีเล็คตรอนเป็นเม็ดเล็กๆ ฝังกระจายอยู่ภายในทรงกลมอย่างสม่ำเสมอจำนวนประจุบวกและประจุลบมีค่าเท่ากัน ทำให้อะตอมมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นกลาง อีเล็คตรอนเคลื่อนที่ไปมาในเนื้อที่ประจุบวกได้โดยสะดวก เมื่ออีเล็คตรอนได้รับพลังงานจะเคลื่อนที่ไปมาและเปล่งคลื่นแม่เหล็กไ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



รูปที่ 1.1 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน

1.4 แบบจำลองอะตอมของรัทเธอร์ฟอร์ด

เออเนสต์ รัทเธอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) ทำการทอลองหาโครงสร้างของอะตอมในปี 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 และมีอีเล็คตรอนโคจรอยู่ห่างๆ



รูปที่ 1.2 การทดลองของรัทเธอร์ฟอร์ด (Scattering experiment)

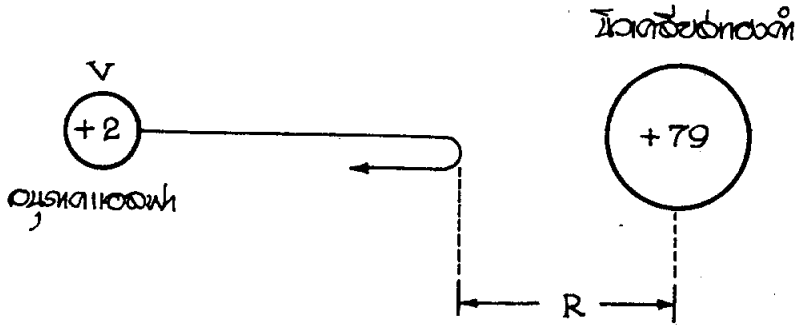
อะตอมของรัทเธอร์ฟอร์ดมีข้อขัดแย้งกับทฤษฎีฟิสิกส์คือ ตามทฤษฎีของแมกซ์แวลล์ (Maxwell) ประจุไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจะเปล่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อีเล็คตรอนโคจรรอบประจุบวกจะมีความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางซึ่งจะต้องส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ทำให้อีเล็คตรอนสูญเสียพลังงานโคจรเข้าใกล้ประจุบวก และผลสุดท้ายจะตกลงสู่ประจุบวกอีเล็คตรอนจึงไม่สามารถโคจรรอบประจุบวกตลอดไป

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)

จากการที่อะตอมตามแบบของรัทเธอร์ฟอร์ดยังมีข้อโต้แย้งอยู่ นีล บอร์ (Neils Bohr) พยายามแก้ข้อโต้แย้งนี้โดยการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับอะตอม ซึ่งมีใจความดังต่อไปนี้

ก. เมื่ออีเล็คตรอนโคจรรอบนิวเคลียส โดยมีโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) เป็นไปตามความสัมพันธ์ข้างล่างนี้ จะไม่มีการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา

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

เมื่อ L = โมเมนตัมเชิงมุม

m = มวลของอีเล็คตรอน

V = ความเร็วของอีเล็คตรอน

R = รัศมีของวงโคจร

n = เลขเต็มหน่วยบวก = 1, 2, 3, ...

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

h = ค่าคงที่ของแพลงค์

ข. พลังงานของอีเล็คตรอนจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่ออีเล็คตรอนเปลี่ยนระดับวงโคจรจากระดับหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่ง ถ้าอีเล็คตรอนเคลื่อนเข้าใกล้นิวเคลียสจะคายพลังงานออกมา แต่ถ้าเคลื่อนออกห่างจากนิวเคลียสจะต้องไรับพลังงานจำนวนหนึ่ง ถ้าอิเล็คตรอนเคลื่อนจากระดับโคจรที่มีพลังงาน E_i ไปยังระดับวงโคจรที่มีพลังงาน E_f จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานดังนี้

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

เมื่อ ΔE = การเปลี่ยนแปลงของพลังงาน

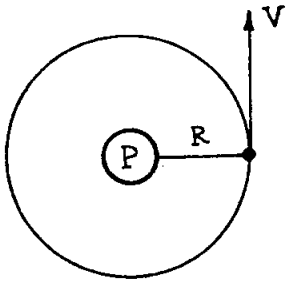
E_i = พลังงานเริ่มต้น

E_f = พลังงานสุดท้าย

ν = ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.6 อะตอมไฮโดรเจน

อะตอมไฮโดรเจนประกอบด้วยโปรตอน 1 ตัว อยู่ตรงกลางของอะตอมและมีอีเล็คตรอน 1 ตัว โคจรเป็นวงกลมอยู่ห่างๆ กำหนดให้รัศมีของวงโคจร = R และความเร็วของอีเล็คตรอน = V ในสภาวะปกติอีเล็คตรอนจะโคจรอยู่ในวงโคจรที่ใกล้กับนิวเคลียสมากที่สุด คือ วงโคจร n = 1 เรียกว่า อะตอมอยู่ในภาวะพื้นฐาน (ground state) เมื่ออีเล็คตรอนได้รับพลังงานจะเคลื่อนไปยังวงโคจรที่ห่างจากนิวเคลียสมากยิ่งขึ้น 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 = พลังงานของอีเ,คตรอนในวงโคจรชั้น n

รัศมีของวงโคจร (R_n)

อีเล็คตรอนโคจรเป็นวงกลมรอบโปรตอนเกิดแรงสู่นย์กลาง ซึ่งเป็นแรงเดียวกับแรงคูลอมป์ 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.

$K = 9 \times 10^9$

$e = 1.6 \times 10^{-19}$ คูลอมป์

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$= -\frac{13.6}{n^2} \quad \text{จูล}$$

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

1.7 สเปคตรัมของอะตอมไฮโดรเจน

เมื่ออีเล็คตรอนเคลื่อนที่จากวงโคจรชั้น n_1 มายังวงโคจรชั้น n_f จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน ถ้าอีเล็คตรอนเคลื่อนเข้าใกล้นิวเคลียส 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 เกิดจากการที่อีเล็คตรอนเปลี่ยนระดับจากวงโคจรชั้นนอกเข้าสู่วงโคจรชั้น n = 2 เช่น เปลี่ยนจากระดับวงโคจรชั้น n = 3 ไปยังวงโคจรชั้น n = 2 ทำให้ได้โฟตอนซึ่งมีความยาวคลื่น 656 นาโนเมตร

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

ค. ชุดของพาสเชน (Paschen) อีเล็คตรอนเปลี่ยนระดับวงโคจรเข้าสู่วงโคจรชั้น n = 3

ง. ชุดของแบรคเกท (Bracket) อีเล็คตรอนเปลี่ยนระดับวงโคจรเข้าสู่วงโคจรชั้น n = 4

จ. ชุดของฟันด์ (Pfund) อีเล็คตรอนเปลี่ยนระดับวงโคจรเข้าสู่วงโคจรชั้น 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 เมื่ออีเล็คตรอนเปลี่ยนระดับโคจรจากวงโคจรชั้น 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 $n = \infty$ $E_\infty = 0$ 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 $n_i = \infty$, $n_f = 2$

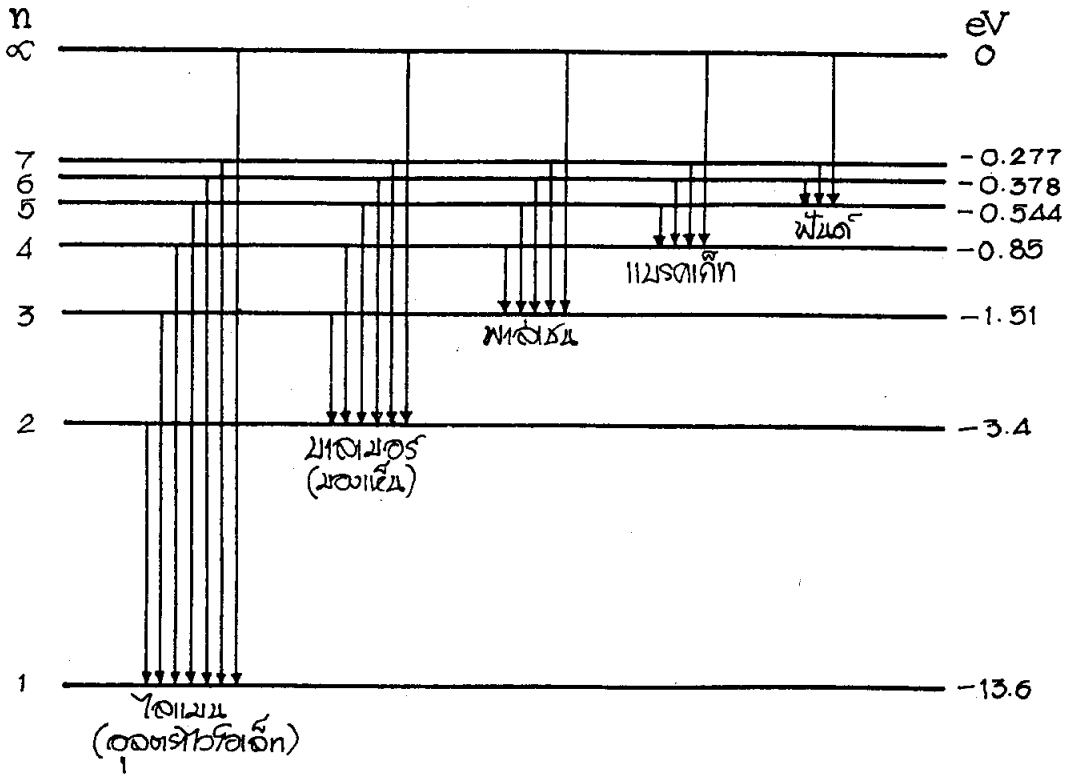
$$\Delta E = E_\infty - E_2 = 0 - (-3.4) = 3.4 \text{ eV}$$

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

1.8 ระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน

จากสูตรที่ใช้ในการหาระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน เมื่อแทนค่า n จะได้พลังงานที่ระดับต่างๆ สามารถนำมาเขียนเป็นไดอะแกรมแสดงระดับพลังงานได้ (Energy level diagram) จากไดอะแกรมนี้จะแสดงให้เห็นสเปคตรัมชุดต่างๆ 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

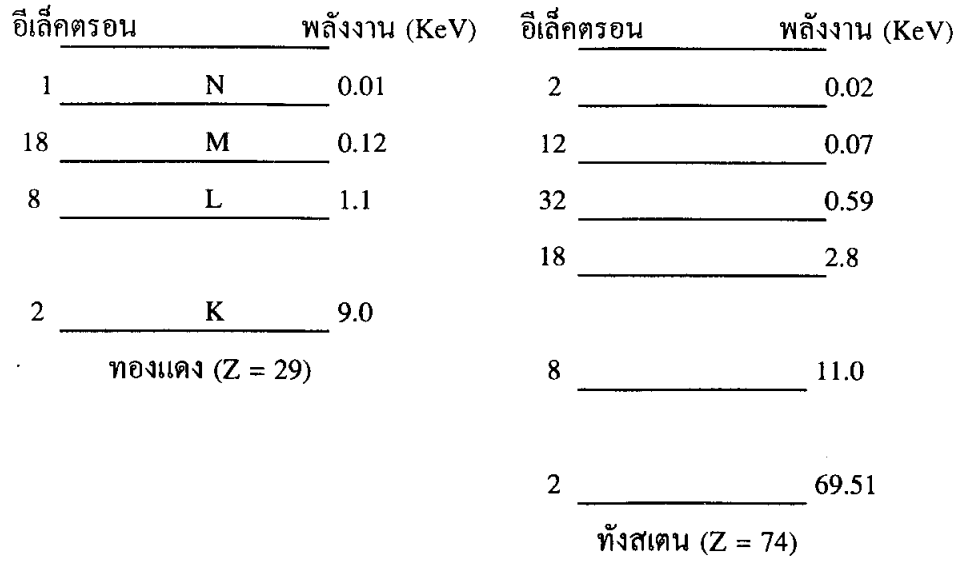
$$= V_3 / 2\pi R_3$$

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

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

1.9 อะตอมที่มีอีเล็คตรอนมากกว่าหนึ่งตัว

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

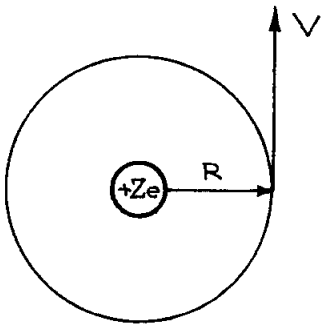


รูปที่ 1.5 ระดับพลังงานของอะตอมทองแดงและทังสเตน

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 อะตอมฮีเลียมมีอีเล็คตรอนสองตัว เมื่อสูญเสียอีเล็คตรอนไปหนึ่งตัว จะเหลืออีเล็คตรอนเพียงตัวเดียว

ก. จงหาระดับพลังงานและรัศมีวงโคจรของวงโคจรชั้นต่างๆ ของอีเล็คตรอนที่เหลือ

ข. ถ้าอีเล็คตรอนเคลื่อนจากวงโคจรชั้น n = 4 ไปยังวงโคจรชั้น n = 3 จงหา

ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ปล่อยออกมา

ค. ถ้าต้องการดึงอีเล็คตรอนตัวที่เหลือนี้ให้หลุดออกจากอะตอม 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

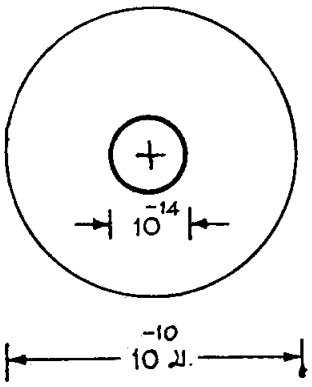
ค. ดึงให้หลุดจากอะตอม ก็คือ ทำให้อีเล็คตรอนเปลี่ยนระดับวงโคจรจากวงโคจรชั้น n = 1 ไป ยัง n = ∞

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

จะต้องให้พลังงานแก่อีเล็คตรอน = 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 (คูลอมป์)	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 อ๊อกซิเจนธรรมดามีมวล 15.994915 เอเอ็มยู

1.12 สัญญลักษณ์ของนิวเคลียส

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

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

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

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

จำนวนนิวตรอน = A - Z

เนื่องจากอะตอมที่เป็นกลางจะมีจำนวนอีเล็คตรอนเท่ากับจำนวนโปรตอน ฉะนั้นจะทราบจำนวนอีเล็คตรอนของอะตอมด้วย เช่น อ๊อกซิเจนมีอีเล็คตรอน 8 ตัว, ยูเรเนียมมีอีเล็คตรอน 92 ตัว

ตัวอย่างที่ 1.5 จงหาจำนวนโปรตอน อีเล็คตรอน และนิวตรอนของอะตอมต่อไปนี้

$^{7}_{3}Li$, $^{22}_{11}Na$, $^{32}_{15}P$ 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 คือไอโซโทป, ไอโซโทน, ไอโซบา และไอโซเมอร์

ไอโซโทป (Isotope) หมายถึง กลุ่มของอะตอมที่มีจำนวนโปรตอนเท่ากัน เช่น ไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทป คือ $^{1}_{1}H$, $^{2}_{1}H$ และ $^{3}_{4}H$ 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

$$\text{Mass defect} = Zm, + (A\ Z)m_n\ \ m$$

เมื่อ m_p = มวลของโปรตอน

m_n = มวลของนิวตรอน

m = มวลของนิวเคลียส

ทำนองเดียวกันพลังงานยึดเหนี่ยวจะมีค่าดังนี้

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

หรือถ้ามวลเป็นเอเอ็มยู

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

ตามปกติ เรามักจะพบตารางแสดงมวลของอะตอมมากกว่าแสดงมวลของนิวเคลียส ดังนั้น ในการหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสจะสะดวกกว่า ถ้าจะหาจากมวลของอะตอม กำหนดให้ M = มวลของอะตอม

$$M = m + Zm_e$$

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

$$= [Zm_p + Zm, + (A - Z)m_n' - M] c^2$$

$$= [ZM, + (A \quad Z)m_n - M] c^2$$

เมื่อ M_H = มวลของอะตอมไฮโดรเจน = 1.007825 amu.

m_n = มวลของนิวตรอน = 1.008665 amu.

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

ตัวอย่างที่ 1.6 จงหาค่าพลังงานยึดเหนียวและพลังงานต่อนิวคลีออนของนิวเคลียสของคาร์บอน 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. = $[Zm, + (A \quad Z)m_n - m] c^2$

$= [6(1\ 00727) + (12 - 6)1.00866 - 12]\ 931$ MeV

$= 89$ MeV

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

ตัวอย่างที่ 1.7 จงหาพลังงานยคดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนของ

ก. อ๊อกซิเจน -16 ซึ่งมีมวลอะตอมเท่ากับ 15.994915 เอเอ็มยู

ข. ตะกั่ว -208 ซึ่งมีมวลอะตอมเท่ากับ 207.976650 เอเอ็มยู

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

fl. B.E. = $[1.007825(8) + 1.008665(16 - 8) - 15.9949151\ 931$ MeV

$= 127.52$ MeV

B.E. = 127.52 = 797 MeV

A 16

ข. B.E. = [1.007825(82) + 1.008665(208 - 82) - 207.9766501 931 MeV

= 1634.88 MeV

B.E. = 1634.88 = 7.86 MeV

A 208

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

วิธี ทำ 1 B.E. = [1.0078252 + 1.008665(A - Z) - M] 931 MeV

B.E. = [1.007825(92) + 1.008665(230 - 92) - 230.0339261 931 MeV

= 1751.6 MeV

B.E. = 1751.6 = 7.62 MeV

A 230

ยูเรเนียม -252

B.E. = [1.007825(92) + 1.008665(232 - 92) - 232.0371671 931 MeV

= 1751.6 MeV

B.E. = 1765.0 = 7.61 MeV

A 232

ยูเรเนียม -238

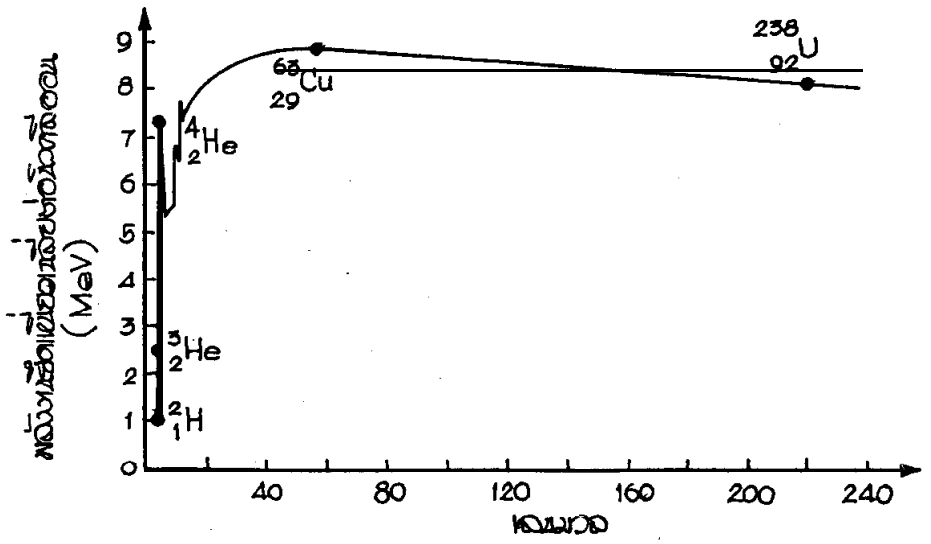
B.E. = [1.007825(92) + 1.008665(238 - 92) - 234.0507601 931 MeV

= 1800.8 MeV

B.E. = 1800.8 = 7.57 MeV

A 238

ตามปกติไอโซโทปที่มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนมาก จะมีเสถียรภาพมากทำให้มีอยู่ตามธรรมชาติมากกว่าไอโซโทปอื่นๆ ของธาตุเดียวกัน ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนจะมีค่าเพิ่มขันเมื่อนิวเคลียสมีขนาดเพิ่มขึ้น 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 ส่วนปฏิกริยาเคมีเกิดจากการรวมตัวของอีเล็คตรอนที่โคจรรอบอะตอมของสารที่มีปฏิกริยาเข้าด้วยกัน 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

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

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 เอ็มอีวี

ชนิดของปฏิกริยานิวเคลียร์

ปฏิกริยาทางนิวเคลียร์มีอยู่มากมายหลายชนิด อาจจำแนกได้โดยดูจากชนิดอนุภาคที่ทำให้เกิดปฏิกริยาและอนุภาคที่เกิดขึ้น

1. **ปฏิกริยาที่เกิดจากอนุภาคแอลฟา**

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

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

$$^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He \longrightarrow [\,{}^{31}_{15}p\,] \longrightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{1}_{1}H$$

$$^{32}_{16}S + {}^{4}_{2}He \longrightarrow [\,{}^{36}_{13}A\,] \longrightarrow {}^{35}_{17}Cl + {}^{1}_{1}H$$

$$^{10}_{5}B + {}^{4}_{2}He \longrightarrow [\,{}^{14}_{7}N\,] \longrightarrow {}^{13}_{6}C + {}^{1}_{1}H$$

$$^{39}_{19}K + {}^{4}_{2}He \longrightarrow [\,{}^{43}_{21}Se\,] \longrightarrow {}^{42}_{20}Ca + {}^{1}_{1}H$$

1.2 alpha - neutron reaction

$$^{9}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \longrightarrow [\,{}^{13}_{6}C\,] \longrightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n$$

$$^{23}_{11}Na + {}^{4}_{2}He \longrightarrow [\,{}^{20}_{10}Al\,] \longrightarrow {}^{26}_{13}Al + {}^{1}_{0}n$$

2. ปฏิกริยาที่เกิดจากโปรตอน

2.1 proton - alpha reaction

$$^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \longrightarrow [\,{}^{8}_{4}Be\,] \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He$$

$$^{19}_{9}F + {}^{1}_{1}H \longrightarrow [\,{}^{20}_{10}Ne\,] \longrightarrow {}^{16}_{8}O + {}^{4}_{2}He$$

2.2 proton - neutron reaction

$$^{58}_{28}\mathrm{Ni} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow [\,{}^{59}_{29}\mathrm{Cu}\,] \longrightarrow {}^{58}_{29}\mathrm{Cu} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

2.3 proton - gamma reaction

$$^{19}_{9}\mathrm{F} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow [\,{}^{20}_{10}\mathrm{Ne}\,] \longrightarrow {}^{20}_{10}\mathrm{Ne} + \mathrm{r}$$

2.4 proton - deuteron reaction

$$^{9}_{9}\mathrm{Be} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow [\,{}^{10}_{5}\mathrm{B}\,] \longrightarrow {}^{8}_{4}\mathrm{Be} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

3. ปฏิกริยาที่เกิดจากดิวเทอรอน

3.1 deuteron - alpha reaction

$$^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow [\,{}^{18}_{9}\mathrm{F}\,] \longrightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

3.2 deuteron - proton reaction

$$^{31}_{15}\mathrm{p} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow [\,{}^{33}_{16}\mathrm{S}\,] \longrightarrow {}^{32}_{15}\mathrm{p} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

3.3 deuteron - neutron reaction

$$^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow [\,{}^{14}_{7}\mathrm{N}\,] \longrightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow [\,{}^{9}_{4}\mathrm{Be}\,] \longrightarrow {}^{8}_{4}\mathrm{Be} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

4. ปฏิกริยาที่เกิดจากนิวตรอน

4.1 neutron - alpha reaction

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \longrightarrow [^{7}_{3}Li] \longrightarrow ^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He$$

4.2 neutron - proton reaction

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}N \longrightarrow [^{15}_{7}N] \longrightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

4.3 (n, 2n) reaction

$$^{27}_{13}Al + ^{1}_{0}n \longrightarrow [^{28}_{13}Al] \longrightarrow ^{26}_{13}Al + ^{1}_{0}n + ^{1}_{0}n$$

4.4 (n, r) reaction

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{0}n \longrightarrow [^{2}_{1}H] \longrightarrow ^{2}_{1}H + r$$

5. **ปฏิกริยาที่เกิดจากรังสีแกมมา**

5.1 (γ, n) reaction

$$^{2}_{1}H + \gamma \longrightarrow [^{2}_{1}H] \longrightarrow ^{1}_{1}H + ^{1}_{0}n$$

5.2 (r, p) reaction

$$^{27}_{13}Al + \gamma \longrightarrow [^{27}_{13}Al] \longrightarrow ^{25}_{11}Na + ^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H$$

1.18 ฟิชชัน (Fission)

ขบวนการฟิชชันถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1930 โดยใช้นิวตรอนยิงนิวเคลียสของธาตุหนัก เช่น ยูเรเนียม ทำให้นิวเคลียสนั้นแตกตัวออกได้นิวเคลียสชนิดใหม่ ซึ่งมีขนาเล็กลง 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 x 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

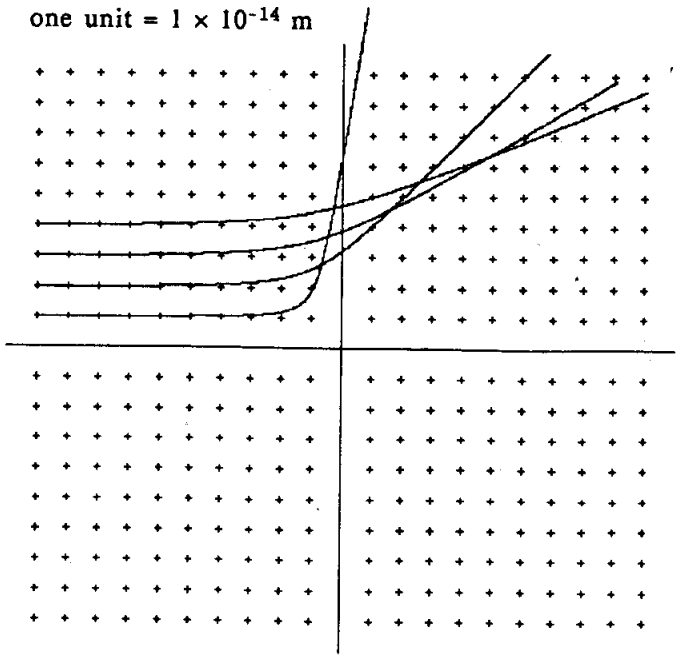
มวลหายไป 0.018883 เอเอ็มยู

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 อนุภาคแอลฟาถูกเบี่ยงเบนโดยนิวเคลียสของทองคำ

```
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 Xl
350     Xl      =       0 : REM draw vertical axis
360 FOR Yl =            -100 TO 100 STEP 1.5
370     xs      =       XO + SX*X1 : YS = YO - SY*Yl : PSET (XS,YS)
380 NEXT Yl
390     REM draw coordinate grid
400 fOR Xl =            -100 TO 100 STEP 10
410 FOR Xl =            -90 TO 90 STEP 10
420     XS      =       XO + SX*X1 : YS = YO - SY*Yl : PSET (XS,YS)
430 NEXT Y1
440 NEXT Xl
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         =       Vl = 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 v x        =       V1 :x = Xl
1080 VY         =       v2:  Yl
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. จงหาพลังงานยึดเหนี่ยมวของ $^{4}_{2}He$

16. จงหาพลังงานที่ได้จากปฏิกริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้

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

17. จงหาพลังงานที่ถูกดูดกลืนจากปฏิกริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้

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

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)