แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2
นิวเคลียสของอะตอม

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

การค้นพบอิเล็กตรอน ประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน ประจุของอิเล็กตรอน การค้นพบโปรตอนและนิวตรอน มวล พลังงานและประจุไฟฟ้าของนิวเคลียส ขนาด ความหนาแน่นของนิวเคลียส แรงนิวเคลียร์ และเสถียรภาพของนิวเคลียส

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้ผู้ศึกษาสามารถ

1. อธิบายการค้นพบอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน
2. อธิบายและคำนวณค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน
3. เขียนความสัมพันธ์และคำนวณหาค่ามวล พลังงานและประจุไฟฟ้าของนิวเคลียส
4. อธิบายและคำนวณหาค่าขนาด ความหนาแน่นของนิวเคลียส
5. อธิบายแรงและเสถียรภาพของนิวเคลียร์

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. บรรยายและตอบปัญหาซักถามประเด็นข้อสงสัย
2. อภิปรายศึกษาจากเอกสารประกอบการสอนและวิดีทัศน์
3. สรุปและทบทวนเนื้อหาเพิ่มเติมเมื่อจบบทที่ 2
4. ศึกษาแหล่งเรียนรู้เพิ่มเติมด้วยตนเอง

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอน
2. วีดีทัศน์
3. สไลด์ประกอบการสอน
4. คำถามท้ายบท

การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากพฤติกรรมการมีส่วนร่วมในห้องเรียน
2. ประเมินผลจากแบบทดสอบก่อนและหลังเรียน
3. ประเมินจากการนำเสนอรายงาน

บทที่ 2

นิวเคลียสของอะตอม

การมีอยู่ของอะตอมได้ถูกนำเสนอตั้งแต่ก่อนคริสตศักราชที่ 400 โดยนักปราชญ์ชาวกรีก ชื่อ เดโมครีตุส (Democritus) ได้เสนอแนวคิดว่าสสารทุกชนิดเกิดขึ้นมาจากอนุภาคที่เล็กมารวมตัวกัน โดยอนุภาคที่เล็กนั้น เรียกว่า อะตอม (Atom) ซึ่งมาจากภาษากรีกว่า อะโตโมส (Atomos) แปลว่า ไม่สามารถแบ่งแยกได้อีก แนวคิดนี้ไม่ค่อยได้รับการยอมรับจากผู้คนในสมัยนั้น เนื่องจากเป็นการคาดคะเนจากมโนภาพและไม่ได้มีการพิสูจน์ทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับการมีอยู่จริงของอะตอม จนกระทั่งเมื่อระยะเวลาผ่านไป แนวคิดเรื่องอะตอมได้รับการฟื้นฟูอีกครั้งจากนักวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ในช่วงศตวรรษที่ 19

ทฤษฎีอะตอมของดอลตันสามารถอธิบายอะตอม โดยมีสมมติฐานเกี่ยวกับธรรมชาติของสสารดังนี้ (อัญชุลี ฉวีราช, สมศักดิ์ ศิริไชย, และ นิศากร ทองก้อน, 2553)

1. ธาตุประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก เรียกว่า อะตอม

2. อะตอมของธาตุหนึ่งๆ จะมีลักษณะเฉพาะตัว มีขนาด มวล และคุณสมบัติทางเคมีที่เหมือนกัน อะตอมของธาตุชนิดหนึ่งจะแตกต่างจากอะตอมของธาตุชนิดอื่นๆ

3. สารประกอบเกิดจากอะตอมของธาตุมากกว่าหนึ่งอะตอมรวมกัน สารประกอบหนึ่งจะมีสัดส่วนอะตอมของธาตุสองชนิดที่เป็นเลขจำนวนเต็มหรือสัดส่วนอย่างต่ำ

4. ปฏิกิริยาเคมีเกี่ยวข้องกับการแยก การรวม หรือการจัดเรียงตัวใหม่ของอะตอม ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างหรือการทำลายอะตอม

นอกจากนี้ทฤษฎีอะตอมของดอลตันได้สนับสนุนกฎทางวิทยาศาสตร์ ได้แก่

1. กฎทรงมวลของสสาร (law of conservation of mass) กล่าวว่า สสารจะเกิดขึ้นใหม่หรือทำลายไม่ได้ เพราะสสารเกิดจากอะตอมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในเชิงปฏิกิริยาเคมี

2. กฎสัดส่วนคงที่ (law of constant composition) กล่าวว่า สารชนิดเดียวกันประกอบด้วยธาตุที่มีองค์ประกอบในสัดส่วนที่มีมวลเท่ากัน

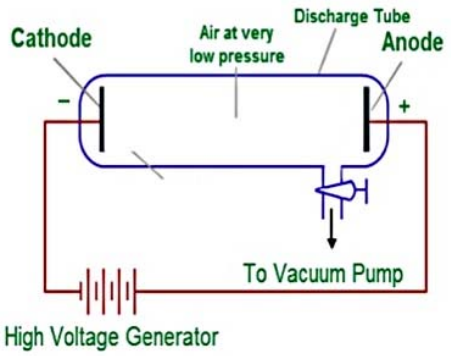
3. กฎสัดส่วนพหุคูณ (law of multiple proportion) กล่าวว่า เมื่อนำธาตุ 2 ชนิดมารวมกันเป็นสารประกอบที่มากกว่า 1 ชนิด มวลของธาตุหนึ่งในสารประกอบต่าง ๆ ที่รวมพอดีกับมวลคงที่ของอีกธาตุหนึ่ง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน จะได้อัตราส่วนเป็นเลขลงตัวน้อย ๆ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ทฤษฎีอะตอมของดอลตันก็ยังไม่สามารถอธิบายกฎการทดลองอื่นอีกมากมาย เช่น เมื่อนำสสารดังเช่นแก้วมาถูด้วยผ้าไหมหรือขนสัตว์จะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งการเกิดประจุไฟฟ้า

สามารถอธิบายกับสิ่งที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคย่อยของอะตอมอีกหลายชนิดที่ถูกค้นพบในศตวรรษที่ 20 โดยในที่นี้เราจะกล่าวถึงเฉพาะอนุภาคของโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน

การค้นพบอิเล็กตรอน

ในปี ค.ศ. 1830 ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ทำการทดลองปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลท์ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและการสะสมสารที่ขั้วอิเล็กโทรด จากผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าสารละลายต่างๆ ประกอบด้วยอะตอม เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าอะตอมบางส่วนหลุดออกมา ซึ่งเป็นอนุภาคไฟฟ้าได้

ในช่วงกลางปี ค.ศ. 1850 นักวิทยาศาสตร์มากมายได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดกระแสไฟฟ้าในหลอดสุญญากาศ โดยใช้หลอดรังสีแคโทดที่ทำจากแก้วและภายในบรรจุด้วยแผ่นโลหะบาง ๆ จำนวน 2 แผ่น เรียกว่า อิเล็กโทรด ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 หลอดรังสีแคโทด
ที่มา: (Chemdemos, ออนไลน์)

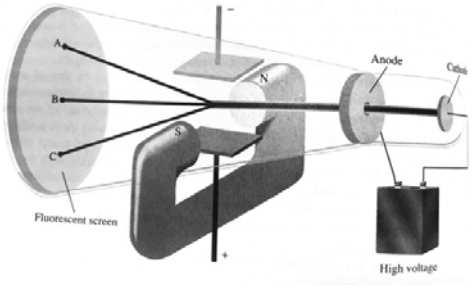
เมื่อนำกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซที่มีความดันต่ำและความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง จะทำให้กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอิเล็กโทรดขั้วลบ (ขั้วแคโทด) ไปยังขั้วตรงข้าม ซึ่งเป็นอิเล็กโทรดขั้วบวก (ขั้วแอโนด) เมื่อไปกระทบกับฉากที่เคลือบด้วยสารเรืองแสง เช่น ซิงค์ซัลไฟด์ (zinc sulphide) จะทำให้เห็นเป็นแสงสว่างขึ้น เรียกรังสีที่เกิดขึ้นนี้ว่า รังสีแคโทด

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า

1. รังสีแคโทดเกิดจากการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด
2. รังสีแคโทดเป็นรังสีที่ไม่สามารถมองเห็นได้โดยตรงแต่สามารถสังเกตการเกิดขึ้นของรังสีได้จากการใช้วัสดุที่เป็นสารเรืองแสง
3. รังสีแคโทดเมื่อผ่านสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง
4. รังสีแคโทดมีพฤติกรรมคล้ายกับอนุภาคประจุลบหรือเรียกว่า อิเล็กตรอน เมื่อเคลื่อนที่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก
5. คุณสมบัติของรังสีแคโทดไม่ได้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ขั้วอิเล็กโทรดและก๊าซที่อยู่ในหลอดรังสีแคโทด

ประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน

ในปี ค.ศ. 1897 นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ชื่อ เจ เจ ทอมสัน (J.J Thomson) ได้ทำการวัดอัตราส่วนประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน โดยใช้หลอดรังสีแคโทดที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เขาพบว่าเมื่อนำสนามไฟฟ้าเข้าไปในหลอดรังสีแคโทด อิเล็กตรอนจะมีทิศการเบี่ยงเบนและตกกระทบบนฉากเรืองแสง ณ จุด A ในลักษณะเดียวกัน และเมื่อนำสนามแม่เหล็กเข้าไป อิเล็กตรอนจะเบี่ยงเบนและตกกระทบบนฉากเรืองแสง ณ จุด C และเมื่อค่อย ๆ ปรับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าให้มีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเบี่ยงเบนและตกกระทบบนฉากเรืองแสง ณ จุด B เหมือนตอนที่ยังไม่ใส่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังภาพที่ 2.2 นอกจากรังสีแคโทดสามารถเบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าแล้วยังสามารถเบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กอีกด้วย ดังนั้น เขาจึงสรุปว่า“อนุภาคลบในรังสีแคโทดจะต้องมีลักษณะเหมือนกัน และอะตอมทุกชนิดย่อมจะมีอนุภาคที่มีประจุลบเป็นองค์ประกอบเหมือนกัน และเรียกอนุภาคลบนี้ว่าอิเล็กตรอน”



ภาพที่ 2.2 หลอดรังสีแคโทดของการทดลองประจุต่อมวล
ที่มา: (Raymond and Ken , 2003, p.32)

เมื่อนำความแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า และความแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคลบมา คำนวณอัตราส่วนของประจุต่อมวล (e/m) ของอนุภาคลบนั้น ปรากฏว่าได้ค่าคงที่เท่ากันทุกครั้ง ไม่ว่าทอมสันจะใช้ก๊าซชนิดใด หรือไม่ว่าจะใช้โลหะใดเป็นแคโทด ดังนั้น เขาจึงสรุปว่าค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอนมีค่าดังสมการที่ 2.1

$$\frac{e}{m_e} = 1.7588 \times 10^{11} \ Ckg^{-1} \tag{2.1}$$

เมื่อ

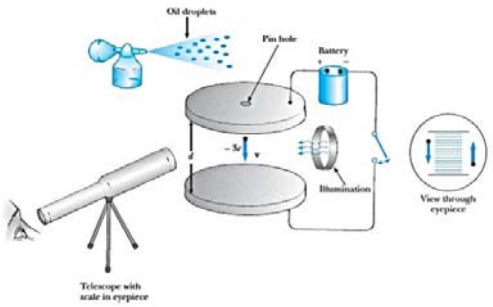
m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็นกิโลกรัม

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็นคูลอมบ

ประจุของอิเล็กตรอน

ในปี ค.ศ. 1906 มิลลิแกน (Millikan) ได้ทำการทดลองเป็นที่รู้จักกันในชื่อว่า การทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน (Millikan's Oil Drop Method) ซึ่งศึกษาการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมันขนาดเล็กหนึ่งหยดที่มีค่าประจุคงที่และต่างจากประจุอื่น ๆ ในอากาศ และใช้สนามไฟฟ้าในการทำให้หยดน้ำมันกระจายในอากาศ จากการทดลองพบว่าค่าประจุของอิเล็กตรอน เท่ากับ $-1.6022\times10^{-19} \ C$ และสามารถหามวลของอิเล็กตรอนได้จากค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอนจากการทดลองของทอมสัน ดังสมการที่ 2.2

$$m_e = \frac{e}{e/m_e} = \frac{1.6022\times10^{-19} \ C}{1.758820 \times 10^{-11} \ Ckg^{-1}} = 9.10 \times 10^{-31} \ kg \tag{2.2}$$



ภาพที่ 2.3 การทดลองหาค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน

ที่มา: (Serway , Moses and Moyer, 2005, p.115)

การค้นพบโปรตอนและนิวตรอน

การปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปในหลอดรังสีแคโทดที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ทำให้สามารถค้นพบอนุภาคประจุบวก (positive charge) หรือ รังสีเคเนล (canal rays) คุณสมบัติของอนุภาคประจุบวกมีดังนี้

1. ประจุบวกมีความแตกต่างกับรังสีแคโทด โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซที่อยู่ในหลอดรังสีแคโทด และชนิดของก๊าซจะทำให้เกิดไอออนของประจุบวก
2. สัดส่วนของประจุต่อมวลของอนุภาคขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ
3. พฤติกรรมของอนุภาคบวกในสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้ามีลักษณะที่ตรงข้ามกับอิเล็กตรอนหรือรังสีแคโทด

ไอออนของประจุบวกที่มีขนาดเล็กสุดและน้ำหนักเบาที่สุดได้จากธาตุไฮโดรเจน เรียกว่า โปรตอน โดยลักษณะอนุภาคประจุบวกได้ค้นพบในปี ค.ศ. 1919 และหลังจากนั้นไม่นาน ในปี ค.ศ. 1932 แซดวิก (Chadwick) ได้ค้นพบอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยยิงอนุภาคแอลฟาไปยังแผ่นเบริลเรียมบาง ๆ และมีอนุภาคพลังงานสูงเปล่งออกมาจากแผ่นเบริลเรียม ซึ่งรังสีนี้มีองค์ประกอบของอนุภาคขนาดเล็กกว่าอะตอม และมีมวลค่อนข้างมากกว่าโปรตอนเล็กน้อยได้ถูกกระเจิง เรียกอนุภาคนี้ว่า อนุภาคนิวตรอน

มวล พลังงานและประจุไฟฟ้าของนิวเคลียส

มวลอะตอมมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับสสารอื่นๆ หน่วยที่ใช้วัดมวล ซึ่งกำหนดเป็นกรัม กิโลกรัมหรือปอนด์ จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้กับสิ่งที่มีขนาดเล็กมาก เช่น อะตอม นิวเคลียส หรืออนุภาคต่าง ๆ ดังนั้น จึงมีการกำหนดหน่วยใหม่ขึ้น เพื่อใช้กับอนุภาคที่มีขนาดเล็กๆ โดยใช้อะตอมของธาตุคาร์บอนเป็นมาตรฐาน หน่วยนี้คือ หน่วยมวลอะตอม (atomic mass unit) ใช้อักษรย่อว่า amu หรือ u โดยที่

$$1 \text{ amu} = \frac{1}{12} \text{ (มวลของอะตอม } {}^{12}C \text{)}$$

$$= 1.6605655 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$= 1.6605655 \times 10^{-24} \text{ g}$$

จากทฤษฎีสัมพันธภาพ (Theory of relativity) ของไอสไตน์ที่แสดงความสัมพันธ์ของมวลกับพลังงาน (Serway , Moses and Moyer, 2005) ดังสมการที่ 2.3

$$E = m_0 c^2 \tag{2.3}$$

เมื่อ

E คือ พลังงาน

m_0 คือ มวลนิ่ง (rest mass)

c คือ ความเร็วแสง (2.9979×10^8 m/s)

โดยทั่วไปนิยมใช้พลังงานในหน่วยของอิเล็กตรอนโวลต์ (electron volt) แทนด้วยสัญลักษณ์ eV ซึ่งหมายถึงพลังงานจลน์ที่ทำให้อิเล็กตรอน 1 ตัว สามารถวิ่งผ่านความต่างศักย์ 1 โวลต์ และ สามารถคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้นได้แน่นอนด้วย

จาก
$$\begin{aligned} E &= m_0 c^2 \\ &= (1u)\left(1.6605\times 10^{-27}\ {kg}/{u}\right)\left(2.9979\times 10^{8}\ {m}/{s}\right)^2 \\ &= 1.4924 \times 10^{-10}\ J \end{aligned}$$

เมื่อ
$$1\ eV = 1.602189 \times 10^{-19}\ J$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{1.4924 \times 10^{-10}\ J}{1.602189 \times 10^{-19}\ J} \\ &= 931.469 \times 10^{6}\ eV \\ &= 931.47\ MeV \end{aligned}$$

ดังนั้น มวล 1u มีค่าเท่ากับพลังงาน 931.5 MeV

ตัวอย่างที่ 2.1 จงคำนวณหาพลังงานของโปรตอนขณะอยู่นิ่ง ในหน่วย MeV

<u>ตอบ</u> จาก $E = m_0 c^2$

$$= \left(1.6726 \times 10^{-27}\ kg\right)\left(2.9979 \times 10^{8}\ {}^{m}\!/\!_{s}\right)^2$$

$$= 1.503233 \times 10^{-10}\ J$$

$$= \frac{1.503233 \times 10^{-10}\ J}{1.6022 \times 10^{-19}\ {}^{J}\!/\!_{eV}}$$

$$= 938.23\ MeV$$

ดังนั้น พลังงานของโปรตอนขณะอยู่นิ่ง มีค่าเท่ากับ $938.23\ MeV$

สำหรับประจุไฟฟ้าของโปรตอนและอิเล็กตรอนปริมาณ 1 อนุภาค มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ ซึ่งค่านี้ใช้สัญลักษณ์ “e” แทน กำหนดให้

$$1e = 1.60 \times 10^{-19}\ C$$

นอกจากนี้สามารถบอกมวลและปริมาณประจุไฟฟ้าของนิวไคลด์ ${}^{A}_{Z}X$ ได้ดังนี้

มวลนิวเคลียส $\approx A\,(1.67 \times 10^{-27}\ kg)$

หรือ $M \approx A\,(1u)$ (2.4)

ปริมาณประจุไฟฟ้า $= Z(1.6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C})$

หรือ $Q = Ze$ (2.5)

ขนาด ความหนาแน่นของนิวเคลียส

ขนาดของนิวเคลียสได้จากการทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ดโดยยิงอนุภาคแอลฟาไปยังแผ่นบาง ๆ โดยเรียกการทดลองนี้ว่า การทดลองการกระเจิง (scattering experiment) โดยใช้หลักการพื้นฐานเรื่องการอนุรักษ์พลังงานสามารถประมาณขนาดของนิวเคลียส โดยยิงอนุภาคมวล m ประจุ q เข้าไปยังนิวเคลียสของธาตุที่มีประจุ +Ze ด้วยความเร็วและคาดว่าอนุภาคดังกล่าววิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสได้มากที่สุด โดยอยู่ห่างจากกึ่งกลางของนิวเคลียสเป็นระยะ d แสดงว่ารัศมีของนิวเคลียสของธาตุมีค่าน้อยกว่าอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $\bar{v}$ ดังนั้นขณะเริ่มต้นอนุภาคมีพลังงานจลน์ $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ แต่เมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสของธาตุมากขึ้น พลังงานจลน์ของอนุภาคค่อยๆ ลดลงเป็นเพราะถูกแรงผลักทางไฟฟ้า เนื่องจากทั้งอนุภาคและนิวเคลียสมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก

เหมือนกัน แรงผลักทางไฟฟ้าจะทำให้อนุภาคหยุดห่างจากนิวเคลียสเป็นระยะ d ขณะหยุดอนุภาคมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ แต่ขณะนั้นอนุภาคมีพลังงานศักย์ไฟฟ้า $(E_p) = \frac{K(Ze)q}{d}$

หลักการอนุรักษ์พลังงาน จะได้

$$\begin{aligned} E_k &= E_p \\ \frac{1}{2}mv^2 &= \frac{K(Ze)q}{d} \\ d &= \frac{2K(Ze)q}{mv^2} \end{aligned} \qquad (2.6)$$

ค่า d เรียกว่า พารามิเตอร์กระทบ (Impact parameter)

จากหลักการอนุรักษ์พลังงาน รัทเทอร์ฟอร์ดทดลองยิงอนุภาคแอลฟาเข้าใกล้นิวเคลียสของทอง ระยะที่อนุภาคแอลฟาเข้าใกล้นิวเคลียสของทองได้มากที่สุดเท่ากับ 3.2×10^{-14} เมตร แต่เมื่อเปลี่ยนจากนิวเคลียสของทองเป็นนิวเคลียสของเงินได้ระยะทาง d เท่ากับ 2.0×10^{-14} เมตร ในการทดลองมีการเปลี่ยนนิวเคลียสของธาตุไปหลายชนิดค่า d ที่ได้ของทุกนิวเคลียสจะอยู่ในอันดับขนาด 10^{-14} เมตร และแปรผันตรงกับมวลของนิวเคลียสนั้น นั่นคือ ถ้านิวเคลียสที่มีจำนวนนิวคลีออนน้อย ค่า d ที่ได้จะสั้นกว่าค่า d ของนิวเคลียสที่มีจำนวนนิวคลีออนมาก (พูนทรัพย์, 2550)

จากการทดลอง รัทเทอร์ฟอร์ดได้สรุปขนาดของนิวเคลียสของธาตุที่มีจำนวนนิวคลีออนมากจะใหญ่กว่าขนาดของนิวเคลียสของธาตุที่มีจำนวนนิวคลีออนน้อย กล่าวได้ว่า รัศมีเฉลี่ยของนิวเคลียสมีค่าแปรผันตรงกับจำนวนนิวคลีออน (พัฒนสุข ชำนินอก, 2555) ดังสมการที่ 2.7

$$r = r_0 A^{1/3} \qquad (2.7)$$

กำหนดให้

r คือ รัศมีเฉลี่ยของนิวเคลียส

r_0 คือ ค่าคงตัวเท่ากับ 1.2×10^{-15} เมตร

A คือ เลขมวลหรือเลขแสดงจำนวนนิวคลีออน

ความยาวขนาด 10^{-15} เมตรเท่ากับ 1 เฟมโตเมตร (femtometre) แต่บางครั้งเรียกว่า 1 แฟร์มี (Fermi) เพื่อเป็นเกียรติแก่นักฟิสิกส์ชาวอิตาลี เอนโกแฟร์มี (Enrico Fermi) ผู้ประดิษฐ์เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

1fm = 1F = 10^{-15} m

จากสมการ (2.7) ขนาดของนิวเคลียสขึ้นกับจำนวนนิวคลีออน ถ้ามีจำนวนนิวคลีออนมาก ขนาดนิวเคลียสจะใหญ่ โดยยังคงมีขนาดนิวเคลียสของธาตุพื้นฐานคือ ไฮโดรเจนเป็นอีกองค์ประกอบ

จากสมการ 2.7 สามารถพิจารณาหาปริมาตรของนิวเคลียสได้ดังนี้

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$V = \frac{4}{3}\pi r_0^3 A \qquad (2.8)$$

ความหนาแน่นของนิวเคลียส จะได้

$$\rho = \frac{M}{V}$$

$$= \frac{A(1.67\times10^{-27}\,kg}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A}$$

$$\rho = \frac{3(1.67\times10^{-27}\,kg}{4\pi r_0^3} \qquad (2.9)$$

จากสมการ 2.9 เห็นได้ว่า ความหนาแน่นของนิวเคลียสของธาตุใดๆ มีค่าคงตัวและเท่ากันหมด ประมาณ 2.3×10^{17} กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{3u}{4\pi r_0^3} \qquad (2.10)$$

ตัวอย่างที่ 2.2 จงหาความหนาแน่นของนิวเคลียสของ $^{7}_{4}Be$

<u>ตอบ</u> $\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A}$

จาก $M = A(1.67\times10^{-27}\,kg)$

$$\therefore \quad \rho = \frac{7\left(1.67\times10^{-27}\ kg\right)}{\frac{4}{3}\pi\left(1.2\times10^{-15}\ m\right)^3(7)}$$

$$\rho = 2.3\times10^{17}\ kg/m^3$$

ความหนาแน่นของนิวเคลียส $^{7}_{4}Be$ เท่ากับ 2.3×10^{17} กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

แรงนิวเคลียร์

ภายในนิวเคลียสมีแรงไฟฟ้าเกิดขึ้น เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคโปรตอน ยิ่งจำนวนโปรตอนมีมากขึ้นก็จะทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสูงขึ้น ทั้งนี้ ภายในนิวเคลียสมีอนุภาคโปรตอนและนิวตรอน ซึ่งเป็นนิวคลีออนที่สามารถอยู่รวมกันได้ภายใต้แรงดึงดูดที่สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาคโปรตอนได้ ซึ่งแรงนี้มีชื่อเรียกว่าแรงนิวเคลียร์

ในปี ค.ศ.1935 นักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ ฮิเดกิ ยูกาวา (Hideki Yukawa) ได้เสนอแนวความ คิดว่าแรงนิวเคลียร์ควรมีกำเนิดมาจากการแลกเปลี่ยนอนุภาคสนามในทำนองเดียวกันกับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและอนุภาคนี้จะต้องสามารถอยู่ได้ในบริเวณแคบๆ ภายในนิวเคลียสได้ เรียกชื่ออนุภาคชนิดนี้ว่า “ไพมีซอนหรือไพออน (π-meson หรือ pion) ” ซึ่งมีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ π^o π^+ และ π^- โดยไพออนทั้ง 3 ชนิดมีประจุเป็นกลางทางไฟฟ้า ประจุบวกและประจุลบ ตามลำดับ อนุภาคเหล่านี้จะส่งไปมาระหว่างนิวคลีออนที่อยู่ใกล้กัน การที่อนุภาคจะเป็นนิวตรอนหรือโปรตอนขึ้นอยู่กับอนุภาคมีซอนที่อยู่บริเวณรอบ ๆ โดยแรงระหว่างนิวคลีออนเกิดขึ้นได้ เนื่องจากการแลกเปลี่ยนอนุภาคมีซอน ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ (พัฒนสุข ชำนินอก, 2555)

1. แรงระหว่างอนุภาคโปรตอนกับนิวตรอน

$n \rightarrow p + \pi^-$ อธิบายได้ว่า เมื่อเปลี่ยนจากอนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคโปรตอน เป็นการให้อนุภาคมีซอนประจุลบออกไป

$p + \pi^- \rightarrow n$ อธิบายได้ว่า เมื่ออนุภาคโปรตอนรับอนุภาคมีซอนประจุลบเข้ามาก็จะกลับไปเป็นอนุภาคนิวตรอน

$p \rightarrow n + \pi^+$ อธิบายได้ว่า เมื่ออนุภาคโปรตอนให้อนุภาคมีซอนประจุบวกก็จะกลายเป็นอนุภาคนิวตรอน

$n + \pi^+ \rightarrow p$ อธิบายได้ว่า เมื่ออนุภาคนิวตรอนรับอนุภาคมีซอนประจุบวกก็จะกลายเป็นอนุภาคโปรตอน

2. แรงระหว่างอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนและนิวตรอนกับนิวตรอน

$p \rightarrow p' + \pi^0$ และ $n \rightarrow n' + \pi^0$ อธิบายได้ว่า เกิดการแลกเปลี่ยนอนุภาคมีซอนที่เป็นกลางระหว่างคู่นั้น ๆ

สำหรับเครื่องหมาย (prime) แสดงว่านิวคลีออนเปลี่ยน “สภาวะ” ไปจากเดิม การแลกเปลี่ยนอนุภาคมีซอนจะเกิดขึ้นได้ทั้งแรงดูดหรือแรงผลัก ถ้าต่างฝ่ายต่างแย่งอนุภาคจากอีกฝ่ายหนึ่งก็จะเกิดแรงดึงดูดขึ้น แต่ถ้าต่างฝ่ายต่างให้อนุภาคออกไปก็จะเกิดแรงผลัก การแลกเปลี่ยนอนุภาคมีซอนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อนิวคลีออนอยู่ห่างกันไม่เกิน $9 \times 10^{-15}\ m$

ลักษณะสำคัญของแรงนิวเคลียร์

จากการศึกษาทดลองยิงอนุภาคโปรตอนไปยังอนุภาคโปรตอนแล้วทำให้เกิดการกระเจิง (p-p scattering) การทดลองยิงอนุภาคนิวตรอนไปยังอนุภาคโปรตอนแล้วทำให้เกิดการกระเจิง (n-p scattering) และการทดลองยิงอนุภาคนิวตรอนไปยังนิวตรอนแล้วทำให้เกิดการกระเจิง (n-n scattering) ช่วยทำให้ทราบถึงลักษณะของพลังงานศักย์และแรงนิวเคลียร์ได้ ดังผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวแล้วข้างต้นต่อไปนี้

1. จากการทดลองพบว่าการกระเจิงแบบ n-p และการกระเจิงแบบ n-n ให้ผลที่เหมือนกัน แสดงว่า แรงนิวเคลียร์ไม่เกี่ยวข้องกับประจุไฟฟ้า (charge-independent force) แรงนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นเป็นแรงพิสัยสั้น (short range force) สามารถคำนวณค่ารัศมีของแรงนิวเคลียร์ได้ประมาณ 2×10^{-15} เมตร ถ้าอนุภาคที่ยิงเข้าไปกับอนุภาคที่เป็นเป้าอยู่ห่างกันมากกว่าระยะนี้จะไม่มีแรงนิวเคลียร์เกิดขึ้นระหว่างกันเลย แรงนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงดึงดูด ดังแสดงลักษณะของแรงนิวเคลียร์ โดยที่ค่าพลังงานศักย์ (p) ที่สอดคล้องกับแรงนิวเคลียร์มีค่าน้อยกว่าศูนย์ (มีค่าเป็นลบ)

2. เมื่อพิจารณาผลการทดลองการกระเจิงแบบ p-p พบว่าได้ผลการทดลองใกล้เคียงกันกับผลที่ได้ในข้อ 1 แต่มีความแตกต่างตรงที่ในกรณีนี้จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากแรงคูลอมบ์ (coulomb potential) เข้ามารวมอยู่ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคโปรตอนที่วิ่งเข้ามาและอนุภาคโปรตอนที่เป็นเป้าต่างก็มีประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแรงผลักระยะไกลอันเนื่องมาจากแรงคูลอมบ์ดังกล่าวนี้ และกลายเป็นแรงนิวเคลียร์ที่เป็นแรงดึงดูดในระยะใกล้เข้ามา จะเห็นได้ว่า ในกรณีนี้จะมีแรงคูลอมบ์เข้ามารวมอยู่ด้วย มีผลทำให้ค่ารัศมีของแรงเพิ่มมากขึ้นเป็น 3×10^{-15} เมตร โดยประมาณ และพิจารณาต่อไปว่าถ้าหักลบค่าของแรงคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทดลองดังกล่าวนี้ออกไป พบว่า จะได้ผลกระเจิงแบบ p-p เหมือนกับการกระเจิงแบบ n-p และการกระเจิงแบบ n-n ในหัวข้อ 1 ทุกประการ ด้วยเหตุนี้เอง สามารถสรุป ได้ว่าแรงนิวเคลียร์เป็นแรงระหว่างนิวคลีออนโดยตรงและจะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องประจุไฟฟ้าเลย

3. เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองการกระเจิงแบบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าแรงนิวเคลียร์จะมีแกนผลัก (Repulsive core) แสดงว่านิวคลีออนที่อยู่ในนิวเคลียสจะไม่สามารถเข้ามาอยู่ใกล้กันน้อยกว่าระยะของแกนผลักนี้ได้ เนื่องจากจะทำให้แรงนิวเคลียร์กลายเป็นแรงผลัก

4. นอกจากนี้ยังพบว่าแรงนิวเคลียร์ขึ้นอยู่กับค่าสปินของโมเมนตัมเชิงมุม (spin angular momentum) ของนิวคลีออนด้วย เช่น ถ้าทิศทางของการสปินของนิวคลีออนสวนทางกันจะทำให้แรงนิวเคลียร์มีค่าอ่อนลง

5. แรงนิวเคลียร์ไม่เป็นแรงศูนย์กลาง (central force) โดยสมบูรณ์ แต่จะขึ้นอยู่ตำแหน่งของสปินสัมพัทธ์กับเส้นตรงที่เชื่อมต่อนิวคลีออนทั้งสอง

ต่อมามีการค้นพบอนุภาคมีซอนในรังสีคอสมิค และสามารถผลิตอนุภาคมีซอนในห้องปฏิบัติการได้โดยการยิงนิวเคลียสด้วยอนุภาคพลังงานสูง มวลของอนุภาคมีซอนสามารถประมาณได้จากหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนบอร์ก (Arthur, 2003) ดังสมการที่ 2.11

$$\Delta E \bullet \Delta t \approx \bar{h} \tag{2.11}$$

โดยที่

$$\bar{h} = 6.626 \times 10^{-34} \ J.s$$

เมื่อกำหนดพลังงานมีขนาดเท่ากับพลังงานมวลนิ่งของอนุภาคมีซอนและความเร็วของอนุภาคมีซอนที่เคลื่อนที่ไปยังอีกนิวคลีออนหนึ่งมีขนาดเท่ากับความเร็วแสง ถ้า R เป็นระยะทางที่นิวคลีออนในนิวเคลียสอยู่ห่างกันมากที่สุดจะได้ว่า

$$\left(m_0 c^2\right)\left(\frac{R}{c}\right) \approx \bar{h}$$

$$m_0 \approx \frac{\bar{h}}{Rc}$$

โดยแรงนิวเคลียร์จะเกิดขึ้นในช่วงระยะประมาณ 1.4×10^{-15} m เมื่อแทนค่าในสมการจะได้ว่า ค่ามวลของอนุภาคมีซอนมีค่าประมาณ 2.8×10^{-28} kg หรือมีมวลขนาดประมาณ 275 เท่าของอิเล็กตรอน

สมบัติของแรงนิวเคลียร์

จากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์สามารถสรุปสาระสำคัญของแรงนิวเคลียร์ได้ ดังนี้

1. แรงนิวเคลียร์ต้องมีค่ามากกว่าแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) ซึ่งเกิดขึ้นภายในนิวเคลียส มิฉะนั้นแล้วนิวไคลด์จะไม่คงสภาพอยู่ได้

2. แรงนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นระหว่างนิวคลีออนเป็นอันตรกิริยาแบบแรงและเป็นแรงที่มากที่สุดที่พบในธรรมชาติ

3. แรงนิวเคลียร์เป็นแรงพิสัยใกล้ คือ เกิดแรงในระยะสั้นในระดับเฟมโตเมตร (10^{-5}) เป็นช่วงของแรงผลัก เรียกว่า แกนของแรงผลัก (Repulsive core) ผลของแรงผลักนี้ ทำให้นิวคลีออนไม่รวมตัวกัน และแรงนิวเคลียร์จะเป็นศูนย์เมื่อระยะห่างมากกว่านี้ เนื่องจากไม่มีแรงนิวเคลียร์มาเปลี่ยนค่าสนามคูลอมบ์ และการแลกเปลี่ยนอนุภาคมีซอนจะเกิดขึ้นได้เมื่อนิวคลีออนอยู่ห่างกันไม่เกิน 9×10^{-15} m ถ้าระยะมากกว่านี้จะไม่มีการแลกเปลี่ยนอนุภาคมีซอนหรือไม่มีแรงนิวเคลียร์เกิดขึ้น

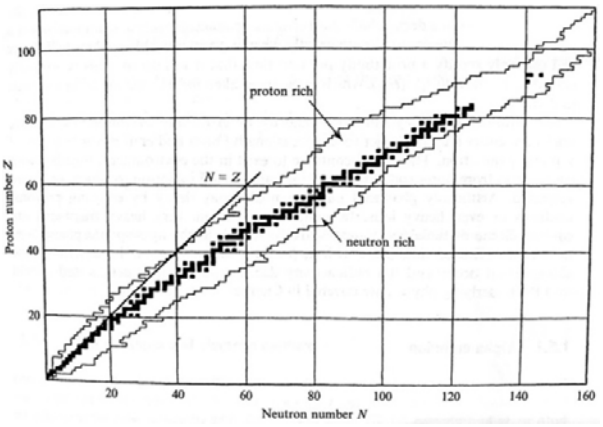
4. แรงนิวเคลียร์เป็นแรงดึงดูดไม่ขึ้นกับชนิดของประจุไฟฟ้า จึงทำให้นิวคลีออนรวมอยู่ด้วยกันได้ดังนั้น แรงระหว่างโปรตอนกับโปรตอน นิวตรอนกับนิวตรอน หรือโปรตอนกับนิวตรอน ถ้าไม่คิดแรงคูลอมบ์แล้วจะให้ผลไม่แตกต่างกัน

5. แรงนิวเคลียร์เป็นแรงที่มีสมบัติอิ่มตัว (saturation property) ความสามารถของแรงนิวเคลียร์ที่กระทำต่ออนุภาคตัวอื่น ๆ จะถึงจุดอิ่มตัว เมื่อนิวคลีออนตัวนั้นถูกล้อมรอบด้วยนิวคลีออนตัวอื่น ๆ อย่างสมบูรณ์ นิวคลีออนที่อยู่ถัดไปจะไม่ถูกแรงนิวเคลียร์ของนิวคลีออนตัวนั้นกระทำ

เสถียรภาพของนิวเคลียส

เสถียรภาพของนิวเคลียสขึ้นอยู่กับพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน นิวเคลียสที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนสูงจะมีเสถียรภาพสูง นิวเคลียสบางตัวเสถียรขณะที่บางนิวเคลียสไม่เสถียร เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงตัวเอง เพื่อแยกออกเป็นสองส่วนหรือมากกว่านั้น การเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การสลายตัว ตัวอย่างของนิวเคลียสไม่เสถียรที่เกิดขึ้นในธรรมชาติคือ ยูเรเนียม ${}^{238}_{92}U$ จะปล่อยอนุภาคแอลฟา ${}^{4}_{2}He$ ออกมาเพื่อกลายเป็น ${}^{234}_{90}Th$ และ ${}^{234}_{90}Th$ ไม่เสถียรเช่นกัน จะสลายตัวต่อไป สุดท้ายของการสลายตัวในอนุกรมนี้ ได้นิวเคลียสที่เสถียรของ ${}^{206}_{82}Pb$

การพิจารณาความเสถียรหรือความไม่เสถียรของนิวเคลียสใดนิวเคลียสหนึ่งจะดูจากแรงดึงดูดของแรงนิวเคลียร์ ซึ่งมีศักย์เป็นค่าลบและแรงผลักระหว่างโปรตอนซึ่งมีศักย์เป็นบวก พบว่าสำหรับนิวเคลียสที่เสถียรพลังงานศักย์รวมต้องเป็นค่าลบ นิวเคลียสจะต้องมีพลังงานรวมต่ำกว่า เมื่อเป็นนิวคลีออนแยกกัน และพลังงานยึดเหนี่ยวจะถูกกำหนดให้เป็นลบของพลังงานศักย์ค่านี้ ดังนั้นพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสที่เสถียรต้องเป็นบวก มิฉะนั้นแล้วมันสามารถสลายตัวได้



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนิวตรอนและจำนวนโปรตอนของธาตุที่เสถียร
ที่มา: (Lilley, 2001, p.13)

จากภาพที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่านิวไคลด์ที่เป็นธาตุเบา *(Z < 20)* จะมีเสถียรภาพและจะเสถียรภาพมากที่สุดเมื่อ Z = N ดังแสดงในตารางที่ 2.1 นั่นคือ ธาตุที่มีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนนิวตรอน เช่น ${}^{4}_{2}He$ และ ${}^{16}_{8}O$ มีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนนิวตรอนในสัดส่วน 1 : 1 สำหรับธาตุหนัก *(Z > 20)* นิวเคลียสที่เสถียรจะมีจำนวนนิวตรอนมากกว่าจำนวนโปรตอน เช่น ${}^{220}_{88}Ra$ มี N : Z = 1.5 ทั้งนี้ เมื่อเลขอะตอมเพิ่มมากขึ้นจะเกิดแรงผลักจากแรงคูลอมบ์มากขึ้นด้วย

และเพื่อลดผลของแรงผลักนี้ จึงต้องทำให้มีแรงระหว่างนิวคลีออนหรือแรงนิวเคลียร์เพิ่มขึ้น โดยจำเป็นต้องให้มีนิวตรอนเพิ่มขึ้นจนเป็นผลทำให้มีสัดส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนที่เหมาะสม นิวเคลียสที่เสถียรจะอยู่บนเส้นเสถียรภาพ (line of stability) นิวเคลียสบนแต่ละข้างของเส้นเสถียรภาพมีมวลมากกว่าและสลายตัวให้อิเล็กตรอนหรือโปรตอน เพื่อจะกลายเป็นนิวเคลียสที่เสถียร สำหรับนิวเคลียสที่มีมวลมาก ๆ อาจจะสลายให้อนุภาคแอลฟา และนิวเคลียสบางตัวก็มีการแตกตัวเองเพื่อจะกลายเป็นนิวเคลียสที่เสถียร

สำหรับนิวเคลียสที่อยู่บนเส้นเสถียรภาพจะมีโปรตอนมาก (proton rich) และจะสลายตัวให้โพซิตรอน (อนุภาคบีตาบวก) ในทางกลับกันนิวเคลียสที่อยู่ใต้เส้นเสถียรภาพจะมีนิวตรอนมาก (neutron rich) และจะสลายให้อิเล็กตรอน (อนุภาคบีตาลบ)

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนจำนวนนิวตรอนต่อโปรตอนในบางนิวเคลียสที่เสถียร

ธาตุ	${}^{2}_{1}H$	${}^{12}_{6}C$	${}^{20}_{10}Ne$	${}^{40}_{20}Ca$	${}^{90}_{40}Zr$	${}^{150}_{60}Nd$
Z	1	6	10	20	40	60
N	1	6	10	20	50	90
N : Z	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.50

บทสรุป

แบบจำลองอะตอมของดอลตัน เป็นแบบจำลองอะตอมแรกที่ได้กล่าวถึงการมีอยู่ของสาร แต่ละชนิดว่าประกอบด้วยอนุภาคเล็ก ๆ เรียกว่าอะตอม ซึ่งแบ่งแยกไม่ได้ ทำให้เกิดใหม่หรือสูญหายไปไม่ได้ อะตอมของธาตุชนิดเดียวกันมีสมบัติเหมือนกันและแตกต่างจากอะตอมของธุาตอื่น สารประกอบเกิดจากการรวมตัวกันของอะตอมของธาตุต่างชนิดกันด้วยอัตราส่วนของจำนวนอะตอมคงที่เป็นเลขลงตัวน้อย ๆ และโมเลกุลของสารประกอบชนิดเดียวกันมีสมบัติเหมือนกัน และ แตกต่างจากโมเลกุลของสารประกอบอื่น และได้สนับสนุนกฎทางวิทยาศาสตร์ ได้แก่ กฎทรงมวลของสสาร กฎสัดส่วนคงที่ และกฎสัดส่วนพหุคูณ นอกจากนี้ได้มีการทดลองเกี่ยวกับการเกิดกระแสไฟฟ้าในหลอดสุญญากาศ โดยใช้หลอดรังสีแคโทดที่นำกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซที่มีความดันต่ำและความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง และมีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและได้ค้นพบอิเล็กตรอน โปรตอนและนิวตรอน โดยประจุไฟฟ้าของโปรตอนและอิเล็กตรอนปริมาณ 1 อนุภาค มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} C และขนาดของนิวเคลียสขึ้นอยู่กับจำนวนนิวคลีออนที่รวมกันอยู่ในนิวเคลียสนั้น นิวเคลียสของธาตุทุกชนิดจะมีความหนาแน่นเท่ากันหมดประมาณ 2.3×10^{17} กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และการที่นิวคลีออนภายในนิวเคลียสสามารถอยู่รวมกันได้ โดยสามารถชนะแรงผลักทางไฟฟ้าจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคโปรตอน อันเนื่องมาจากภายในนิวเคลียสมีแรงนิวเคลียร์

คำถามท้ายบทที่ 2

1. จงอธิบายทฤษฎีอะตอมของดอลตันและทฤษฎีดังกล่าวสนับสนุนกฎทางวิทยาศาสตร์ใดบ้าง
2. จงอธิบายการทดลองที่ค้นพบอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน
3. จงแสดงวิธีการคำนวณในการหาค่าประจุของอิเล็กตรอนจากการทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน
4. นิวเคลียสของธาตุ ${}^{7}_{3}Li$ มีรัศมีเป็นกี่เท่าของนิวเคลียสของไฮโดรเจน
5. จงหารัศมีนิวเคลียสของ ${}^{4}_{2}He$
6. จงหาปริมาตรนิวเคลียสของ ${}^{14}_{7}N$
7. ถ้านิวเคลียสของธาตุ A มีปริมาตรเป็น 3 เท่าของนิวเคลียสธาตุ B และ 4 เท่าของนิวเคลียสธาตุ C จงหาอัตราส่วนของเลขมวล A : B : C
8. จงอธิบายความหมายของแรงนิวเคลียร์ ลักษณะของแรงนิวเคลียร์ พร้อมอธิบายเหตุผลที่ว่าทำไมจึงมีแรงนิวเคลียร์ภายในนิวเคลียสของอะตอมของสสารใดๆ
9. จงอธิบายว่าเพราะเหตุใด นิวเคลียสเบาๆ ที่เสถียรส่วนใหญ่ จึงมีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนนิวตรอน แต่ถ้าเป็นนิวเคลียสของธาตุหนักที่เป็นนิวเคลียสจึงมีจำนวนนิวตรอนมากกว่าจำนวนโปรตอนเสมอ พร้อมวาดภาพประกอบ
10. จงบอกสมบัติของแรงนิวเคลียร์

เอกสารอ้างอิง

พัฒนสุข ชำนินอก. (2555). **ฟิสิกส์นิวเคลียร์ 1**. มหาสารคาม : มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.พูน ทรัพย์ มิตรสัมพันธ์. (2550). ฟิสิกส์นิวเคลียร์1. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี.

อัญชุลี ฉวีราช สมศักดิ์ ศิริไชย และ นิศากร ทองก้อน. (2553). **เคมี 1**. กรุงเทพฯ: เจเอสที.

Arthur, B. (2003). **Concepts of Modern Physics (6th ed.).** NewYork : McGraw Hill

Chemdemos, ออนไลน์ หลอดรังสีแคโทด สืบค้นจาก https://chemdemos.uoregon.edu/demos/Cathode-Ray-Tube-Classroom-Activity วันที่สืบค้น 3 กรกฎาคม 2560.

Lilley, J. (2001). **Nuclear Physics Principles and Applications.** England: John Wiley & Sons.

Raymond, C., & Ken, A. G. (2003). **Chemistry.** New York: McGraw Hill.

Serway, R. A., Moses, C. J., & Moyer, C. A. (2005). **Modern Physics (3 rd ed.)**. U.S.A.: Thomson Learning.