

## บทที่ 7

### ฟิสิกส์นิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี

(Physics nuclear and radioactivity)

#### 7.1 บทนำ

ปี ค.ศ. 1896 จุดกำเนิดของวิชาฟิสิกส์นิวเคลียร์เมื่อนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส อ็องตวน อ็องรี เบคเคอเรล (Antoine Henri Becquerel) ได้ค้นพบกัมมันตภาพรังสีในสารประกอบยูเรเนียม ทำให้นักวิทยาศาสตร์ทำการศึกษารายละเอียดของธาตุกัมมันตรังสี โดยเฉพาะ โครงสร้างนิวเคลียร์ ในทันที โดยเออร์เนสต์ รัทเทอร์ฟอร์ด ได้แสดงให้เห็นว่ารังสีที่แผ่ออกมาจากสารกัมมันตรังสีมีอยู่สามชนิดคือ รังสีแอลฟา เบตา และแกมมา โดยจำแนกตามธรรมชาติของประจุไฟฟ้าและความสามารถในการทะลุทะลวงสสารและการทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออน ในปี ค.ศ. 1911 รัทเทอร์ฟอร์ด ฮันส์ ไกเกอร์ และเออร์เนสต์ มาร์สเดน ได้ทำการทดลองการกระเจิงของอนุภาคแอลฟา ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่านิวเคลียสของอะตอมสามารถที่จะจำลองให้เป็นจุดมวลและจุดประจุ และมวลของอะตอมส่วนใหญ่รวมกันอยู่ในนิวเคลียส การศึกษาต่อมาได้ค้นพบการมีอยู่ของแรงนิวเคลียร์ช่วงสั้น ซึ่งออกแรงกระทำกันระหว่างอนุภาคที่มีระยะทางห่างกันน้อยกว่า  $10^{-14}$  เมตร โดยประมาณ และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อระยะทางมากขึ้น ในระหว่างศตวรรษใหม่นี้ การประยุกต์ฟิสิกส์นิวเคลียร์ได้มีผลกระทบมหาศาลต่อพลเมืองโลก บางอย่างเป็นผลดี บางอย่างก่อให้เกิดความหายนะ ทุกอะตอมมีนิวเคลียสประจุบวก ความหนาแน่นสูงมากอยู่ที่ตรงกลาง นิวเคลียสมีขนาดเล็กกว่าขนาดโดยรวมของอะตอมมาก แต่มีมวลเกือบทั้งหมดของอะตอม เราจะดูสมบัติทั่วไปที่สำคัญของนิวเคลียส ปฏิกริยาและคุณสมบัติต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในนิวเคลียส แบบจำลองแรงนิวเคลียร์ มวลเชิงอะตอมและพลังงาน ทั้งนี้ยังรวมถึงการศึกษาโครงสร้างภายในและการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสด้วย ความเสถียรหรือไม่เสถียรของนิวเคลียสจะพิจารณาจากแรงนิวเคลียร์ดึงดูดกันระหว่างโปรตอนและนิวตรอน และอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตกันระหว่างโปรตอน นิวเคลียสที่ไม่เสถียรสลายตัว เปลี่ยนเป็นโครงสร้างอื่นโดยกระบวนการสลายแบบต่างๆ ปฏิกริยานิวเคลียร์ที่เปลี่ยนโครงสร้างนี้อาจเกิดขึ้นได้เองโดยการชนนิวเคลียสด้วยอนุภาคหรือนิวเคลียสอื่นได้ ปฏิกริยา

สองแบบที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือ การแบ่งแยกตัวและการหลอม สำหรับในบทนี้เราจะมาศึกษาพฤติกรรมเหล่านี้กัน

## 7.2 ส่วนประกอบของนิวเคลียส (Components of a nucleus)

โครงสร้างของอะตอมของธาตุหนึ่งนั้นจะประกอบไปด้วยนิวเคลียส และอิเล็กตรอนที่โคจรรอบๆ นิวเคลียส ซึ่งภายในนิวเคลียสนั้นจะประกอบไปด้วยโปรตอนที่มีประจุเป็นบวกและนิวตรอนที่เป็นกลาง เราเรียกทั้งสองอย่างรวมกันว่าเรียกว่านิวไคลด์ หรือนิวคลีออน นิวเคลียสทั้งหมดประกอบด้วยอนุภาคทั้งสองชนิด ยกเว้นเฉพาะนิวเคลียสของไฮโดรเจนธรรมดาซึ่งมีโปรตอนเพียงตัวเดียว มวลทางนิวเคลียร์สามารถวัดได้ด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ และโดยการวิเคราะห์ปฏิกิริยานิวเคลียร์ โปรตอนมีขนาดใหญ่กว่าอิเล็กตรอน 1836 เท่าโดยประมาณ และมวลของโปรตอนเกือบจะเท่ากับมวลของนิวตรอน หน่วยของมวลอะตอม (atomic mass unit)  $u$  ถูกนิยามขึ้นโดยกำหนดให้มวลอะตอมเดี่ยวของไอโซโทป  $^{12}\text{C}$  นั้นมีค่าเท่ากับ  $12 u$  เมื่อ  $1 u$  เท่ากับ  $1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg}$  สำหรับองค์ประกอบของนิวไคลด์เราสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้ ถ้าให้

Z	แทนเลขเชิงอะตอม ซึ่งจะหมายถึงจำนวนโปรตอน
N	แทนจำนวนนิวตรอน
X	คือสัญลักษณ์ของธาตุ
A	คือเลขมวล หรือเลขนิวคลีออน เป็นผลรวมของจำนวนโปรตรอนและนิวตรอนในนิวเคลียสอะตอม

จะเขียนสัญลักษณ์นิวเคลียสของอะตอมของธาตุได้คือ  ${}^A_Z X$

เลขนิวคลีออนหรือเลขมวล A คือผลบวกของจำนวนโปรตอน Z กับจำนวนนิวตรอน N

$$A = Z + N \quad (7-1)$$

เรียกนิวเคลียสชนิดหนึ่ง ๆ ที่มีค่าของทั้ง Z และ N จำเพาะค่าหนึ่งว่านิวไคลด์ นิวไคลด์ เป็นการรวมกันอย่างเฉพาะเจาะจงของเลขอะตอมและเลขมวลซึ่งเป็นตัวแทนของนิวเคลียส ตัวอย่างเช่น เหล็ก  ${}^{56}\text{Fe}$  มีเลขมวล 56 และเลขอะตอม 26 ดังนั้น นิวเคลียสของเหล็กจะประกอบไปด้วยโปรตอน 26 ตัว และนิวตรอน 30 ตัว เพื่อไม่ให้มีความสับสน จึงตัดตัวห้อย Z เนื่องจากสัญลักษณ์ทางเคมีสามารถใช้เพื่อกำหนด Z ได้อยู่เสมอ เหล็กจึงเขียนได้เป็น  ${}^{56}\text{Fe}$  หรือ iron-56 หรือ Fe-56 ก็ได้ อีกด้วย

ตัวอย่างที่ 7.1 จงหาจำนวนอิเล็กตรอนและ นิวตรอนที่อยู่ใน  ${}^4\text{He}$

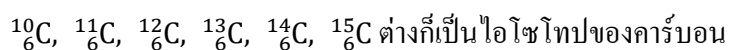
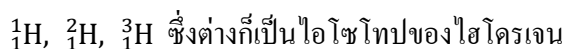
วิธีทำ เมื่อพิจารณาจากสัญลักษณ์ของธาตุนั้นจะได้ เลขมวลคือ 4 และเลขอะตอมคือ 2 ดังนั้นจะมีจำนวนนิวตรอนเท่ากับ  $4 - 2 = 2$  นิวตรอน และเนื่องจากธาตุนั้นมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือมีประจุบวกเท่ากับประจุลบ

คำตอบ จำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับนิวตรอนคือเท่ากับ 2

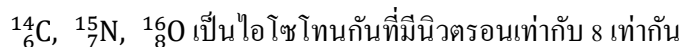
### 7.3 ประเภทของนิวไคลด์ (Types of nuclide)

เพื่อพิจารณาลักษณะของนิวไคลด์ชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจากความเหมือนกันและความแตกต่างกันแล้วจัดกลุ่ม สามารถพิจารณาประเภทต่างๆของนิวไคลด์ได้เป็น 3 ประเภท คือ

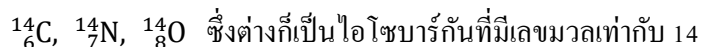
1. ธาตุที่เป็นไอโซโทปกัน หมายถึงนิวไคลด์ของธาตุชนิดเดียวกันที่มีเลขเชิงอะตอมเหมือนกัน แต่มีค่านิวตรอนและเลขมวลต่างกัน เช่น



2. ธาตุที่เป็นไอโซโทนกัน หมายถึงนิวไคลด์ของธาตุต่างชนิดกันแต่มีจำนวนนิวตรอนเท่ากัน เช่น



3. ธาตุที่เป็นไอโซบาร์ หมายถึงนิวไคลด์ของธาตุต่างชนิดกันที่มีเลขมวลเท่ากัน นั่นคือผลรวมของเลขอะตอมและนิวตรอนมีค่าเท่ากันนั่นเอง เช่น



ตัวอย่างที่ 7.3 จงหามวลนิวเคลียร์ของไอโซโทปนี้ในหน่วยมวลอะตอมและหน่วยกิโลกรัมของ  ${}^{12}\text{C}$  เมื่อกำหนดให้มวลอะตอมในตารางธาตุรวมมวลของอิเล็กตรอนไว้ด้วย โดยระบุไว้ว่าเท่ากับ 12 uพอดี

วิธีทำ  ${}^{12}\text{C}$  หมายความว่า  $A = 12, Z = 6$

$$\text{มวลของอิเล็กตรอน 6 ตัว} = 6 (0.0005486 \text{ u})$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.003\,291\,6\text{ u} \\
 \text{มวลนิวเคลียร์ของ } ^{12}\text{C} &= 12.000\text{ u} - 0.003\,291\,6\text{ u} \\
 &= 11.9967\text{ u} \\
 &= (11.9967\text{ u})(1.6606 \times 10^{-27}\text{ kg/u}) \\
 &= 1.9922 \times 10^{-26}\text{ kg}
 \end{aligned}$$

คำตอบ มวลนิวเคลียร์ของไอโซโทป 0.003 291 6 u หรือ  $1.9922 \times 10^{-26}$  กิโลกรัม

#### 7.4 แรงภายในนิวเคลียส (Nuclear force)

โดยทั่วไปแล้วภายในนิวเคลียสนั้นประกอบไปด้วยโปรตอน และนิวตรอนที่อยู่ใกล้ชิดกัน เนื่องจากนิวตรอนมีความเป็นกลางทางไฟฟ้าคือมีประจุเป็นลบแต่โปรตอนที่มีประจุบวกซึ่งเมื่ออยู่ด้วยกันแล้วจะต้องเกิดแรงผลักรังสีที่น่าสนใจคือทำไมโปรตอนที่มีประจุบวกเหมือนกันจึงยึดติดอยู่ด้วยกันได้ภายในนิวเคลียสโดยที่ไม่เกิดแรงผลักรังสี นั่นแสดงว่าต้องมีแรงอีกแรงหนึ่งซึ่งเป็นแรงที่พยายามยึดเหนี่ยวนิวเคลียสไว้ด้วยกันโดยแรงดังกล่าวนี้สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุบวกได้

เมื่อพิจารณามวลทั้งหมดของนิวเคลียสแล้วนำมาเปรียบเทียบกับ ผลรวมของนิวตรอนกับโปรตอนแล้ว ตามหลักความเป็นจริงจะต้องมีค่าเท่ากับมวลของนิวเคลียส แต่ในความเป็นจริงแล้วปรากฏว่ามวลของนิวเคลียสมีค่าน้อยกว่าผลรวมของนิวตรอนและโปรตอนที่อยู่ในนิวเคลียสนั้น ซึ่งมวลที่หายไปนี่เองที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงาน และพลังงานนี่เองที่เป็นพลังงานที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคต่างๆที่อยู่ภายในนิวเคลียสให้อยู่ด้วยกัน ซึ่งสามารถเอาชนะแรงที่เกิดจากประจุได้ โดยมวลพร้อมสามารถหาได้จากสมการ

$$m = (Zm_p + Nm_n) - m_A \quad (7-2)$$

เมื่อ	Z	คือ จำนวนโปรตอน
	N	คือ จำนวนนิวตรอน
	m	คือ มวลพร่อง (Mass Defect)
	$m_p$	คือ มวลของโปรตอน
	$m_n$	คือ มวลของนิวตรอน
	$m_A$	คือ มวลของนิวเคลียส

นั่นก็คือสรุปได้ว่าพลังงานที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคต่างๆที่อยู่ภายในนิวเคลียสให้อยู่ด้วยกัน ก็คือพลังงานที่เกิดจากผลต่างของมวลที่หายไประหว่างผลรวมของมวลโปรตอนและนิวตรอนกับมวล

ของนิวเคลียสนั่นเอง โดยเรียกค่าผลต่างของมวลนี้ว่า มวลพร่องโดยในสวนของมวลพร่องนี้ได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานตามสมการ

$$E = mc^2 \quad (7-3)$$

เมื่อ  $E$  คือ พลังงาน

$m$  คือ มวลพร่องหรือส่วนพร่องมวล

$c$  คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $2.9979 \times 10^8$  m/s

แรงนิวเคลียร์มีลักษณะเฉพาะ ข้อแรกไม่ขึ้นกับประจุ นิวตรอนถูกยึดเหนี่ยวเช่นเดียวกับโปรตอน และการยึดเหนี่ยวเหมือนกันทั้งคู่ ข้อที่สองมีพิสัยสั้นอยู่ในระดับขนาดนิวเคลียร์ นั่นคือ  $10^{-15}$  m แต่ภายในพิสัยของมัน แรงนิวเคลียร์แรงกว่าแรงไฟฟ้ามาก มิฉะนั้นนิวเคลียสจะไม่มีวันเสถียรได้ มันคงจะดีถ้าเขียนสมการง่าย ๆ อย่างกฎของนิวตันของความโน้มถ่วงหรือกฎของคูโลมบ์สำหรับแรงนี้ได้

สำหรับหน่วยของมวลนิวเคลียสเนื่องจากเป็นหน่วยที่มีขนาดเล็กมากจึงได้กำหนดหน่วยขึ้นมาหน่วยหนึ่ง คือ หน่วยมวลเอกภาพ (u) หรือ unit mass

$$\text{โดย} \quad 1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}$$

ดังนั้นจึงอาจเขียนพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างนิวเคลียสได้ดังสมการ

$$E = (Zm_p + Nm_n - m_A) \times 931.494 \text{ MeV} / \text{u} \quad (7-4)$$

นั่นก็คือเมื่อพิจารณาจากสมการข้างบนแล้ว ถ้าให้มวลมีหน่วยเป็นกิโลกรัม และให้ความเร็วแสงที่สุญญากาศมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที จะได้พลังงานมีหน่วยเป็นจูล แต่ถ้าให้หน่วยของมวลคือหน่วยเอกภาพ จะได้พลังงานเป็นหน่วยของอิเล็กตรอน โวลต์ โดยที่มวลพร่องหนึ่งหน่วยมวลมีค่าเท่ากับ 931.5 MeV ในการคำนวณหาค่าส่วนมวลพร่องหรือพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสอาจจะใช้มวลของโปรตอนแทนมวลของนิวเคลียสและใช้มวลอะตอมไฮโดรเจนแทนมวลของโปรตอนได้ เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 1 มีน้ำหนักอะตอมเฉลี่ย 1.00794 u

ตัวอย่างที่ 7.4 กำหนดให้มวลอะตอมของคาร์บอนที่เป็นกลางมีค่าเท่ากับ 12 u มวลอะตอมของไฮโดรเจนที่เป็นกลางคือ 1.0078 u และมวลของนิวตรอนมีค่าเท่ากับ 1.0058 u จงหาขนาดของมวลพร้อมและหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสในหน่วย MeV ของไอโซโทปคาร์บอน  $^{12}\text{C}$

วิธีทำ มวล 6 โปรตอนเท่ากับ มวลอะตอมไฮโดรเจน 6 มวล

$$= 6 \times 1.0078$$

$$= 6.0468 \text{ u}$$

มวลของนิวตรอน 6 มวล

$$= 6 \times 1.0058$$

$$= 6.0522 \text{ u}$$

จะได้ผลรวมของมวลนิวตรอนและโปรตอนมีค่าเท่ากับ

$$6.0468 \text{ u} + 6.0522 \text{ u} = 12.0990 \text{ u}$$

ดังนั้น ได้ส่วนพร้อมของมวลมีค่าเท่ากับ

$$12.0990 \text{ u} - 12.000 \text{ u} = 0.0990 \text{ u}$$

คำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสจาก

$$\text{ส่วนพร้อมมวลภายใน u} \times 931$$

$$= (0.0990) (931)$$

$$= 92.17 \text{ MeV}$$

คำตอบ มวลพร้อม 0.0990 u และพลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 92.17 เมกะอิเล็กตรอน โวลต์

ตัวอย่างที่ 7.5 โคบอลต์-60 ปล่องรังสีแกมมาตัวหนึ่งมีพลังงาน 1.33 MeV ถ้ามวลนิวเคลียสลดลงเป็นเศษส่วนเท่าไรในกระบวนการนี้

วิธีทำ จาก  $E = mc^2$

$$(1.33 \times 10^6 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = (m)(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$\text{จะได้มวลพร้อม} \quad m = \frac{(1.33 \times 10^6 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}$$

$$\text{ให้} \quad \Delta m = 2.364 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

$$\text{และจากมวลนิวเคลียสได้} \quad m = (60)(1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})$$

$$\text{ดังนั้นสัดส่วนมวล} \quad \frac{\Delta m}{m} = \frac{2.364 \times 10^{-30} \text{ kg}}{(60)(1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})}$$

$$= 2.4 \times 10^{-5}$$

คำตอบ มวลนิวเคลียร์ลดลงเป็นสัดส่วนเท่ากับ  $2.4 \times 10^{-5}$

### 7.5 สมบัติของนิวเคลียส (Characteristics of nucleus)

จากที่รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) ได้ค้นพบว่านิวเคลียสมีรัศมีเล็กกว่าอะตอมหลายหมื่นเท่า หลังการทดลองเดิมของรัทเทอร์ฟอร์ดเอิร์นสท์ที่ได้ทำการทดลองยิงอนุภาคแอลฟา (นิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม) ไปที่แผ่นโลหะบาง และพบว่าอนุภาคนี้สามารถวิ่งผ่านได้เป็นจำนวนมาก แต่จะมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นอนุภาคที่กระเจิงไปจากแนวเดิมหรือสะท้อนกลับทางเดิมได้ ก็มีการทดลองการกระเจิงเพิ่มเติมอีกหลายการทดลองโดยใช้โปรตอน อิเล็กตรอน และนิวตรอน พลังงานสูง การทดลองเหล่านี้ ประจวบกันในอะตอมถูกดึงให้มารวมกันอยู่ในรูปของทรงกลมขนาดเล็กซึ่งเรียกว่า นิวเคลียส และสามารถแสดงการรัศมีทรงกลมของนิวเคลียสได้เป็น  $R$  ซึ่งไม่มากไปกว่า  $10^{-14}$  m โดยประมาณ เนื่องจากปกติแล้วระยะทางในฟิสิกส์นิวเคลียร์นั้นเป็นระยะทางที่สั้นมาก ดังนั้นหน่วยของความยาวที่สะดวกต่อการใช้งานบ่อย ๆ จึงอยู่ในหน่วยของเฟมโตเมตร (fm) หรือบางครั้งเรียกว่า เฟอร์มิ (fermi) ให้ค่าเป็น 1 fm ซึ่งเท่ากับ  $10^{-15}$  m ในช่วงเวลาหลังการทดลองการกระเจิงของอนุภาคของรัทเทอร์ฟอร์ดเป็นต้นมา มีการทดลองจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่านิวเคลียสที่ขึ้นกับจำนวนนิวคลีออน (นิวตรอนและโปรตอน) ที่เราเรียกจำนวนนี้ว่า เลขมวล  $A$  หรือเลขนิวคลีออน โดยสามารถหารรัศมีเฉลี่ยของนิวเคลียสส่วนมากได้ด้วยสมการ

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (7-5)$$

โดยที่  $R_0$  คือค่าคงตัวที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับ  $1.2 \times 10^{-15}$  m

ให้เลขมวล  $A$  เป็นเลขจำนวนเต็มที่ใหญ่ที่สุดกับมวลนิวเคลียสในหน่วยมวลเชิงอะตอม ( $u$ ) (มวลโปรตอนและมวลนิวตรอนมีค่าประมาณ 1  $u$  ทั้งคู่) สำหรับความหนาแน่นของนิวเคลียส ถ้าให้  $V$  คือปริมาตรของทรงกลมมีค่าเท่ากับ  $4\pi R^3/3$  ดังนั้นสมการ (7-4) แสดงว่าปริมาตรของนิวเคลียสเป็นสัดส่วนกับ  $A$  การหาร  $A$  (มวลโดยประมาณในหน่วย  $u$ ) ด้วยปริมาตรให้ความหนาแน่นโดยประมาณและทำให้  $A$  หักล้างกันไป ดังนั้นทุกนิวเคลียสมีความหนาแน่นเท่ากันโดยประมาณ ความจริงนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเข้าใจโครงสร้างนิวเคลียส ตัวอย่างที่ 7.6 นิวเคลียสของธาตุชนิดหนึ่งมีเลขมวล 56 จงหารรัศมี มวล โดยประมาณ และความหนาแน่นโดยประมาณของนิวเคลียส

วิธีทำ จากสมการ (7-5)  $R = R_0 A^{1/3}$   
 $= (1.2 \times 10^{-15} \text{ m})(56)^{1/3}$   
 $= 4.6 \times 10^{-15} \text{ m}$

ธาตุใด ๆ จะมีมวลเท่ากับเลขมวล A คูณด้วย  $u$  ดังนั้นมวลมีค่าประมาณ  
 $m = (56)(1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})$   
 $= 9.3 \times 10^{-26} \text{ kg}$

ปริมาตรทรงกลม คือ

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi (4.6 \times 10^{-15} \text{ m})^3$$

$$= 4.1 \times 10^{-43} \text{ m}^3$$

ค่าความหนาแน่น  $\rho$  คำนวณได้จาก

$$\rho = \frac{m}{V} \approx \frac{9.3 \times 10^{-26} \text{ kg}}{4.1 \times 10^{-43} \text{ m}^3}$$

$$= 2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

คำตอบ นิวเคลียสของธาตุนี้มีมวล  $9.3 \times 10^{-26}$  กิโลกรัม ความหนาแน่น  $2.3 \times 10^{17}$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตัวอย่างที่ 7.7 กำหนดให้รัศมีของคาร์บอนอะตอมเท่ากับ  $0.075 \text{ nm}$  จงหาอัตราส่วนระหว่าง

ปริมาตรของนิวเคลียสของ  $^{12}\text{C}$  ต่อปริมาตรของอะตอมของ  $^{12}\text{C}$

วิธีทำ จากสมการ (7-4)  $R = R_0 A^{1/3}$   
 รัศมีของนิวเคลียสของ  $^{12}\text{C}$   $= (1.2 \times 10^{-15} \text{ m})(12)^{1/3}$   
 $= 2.747 \times 10^{-15} \text{ m}$

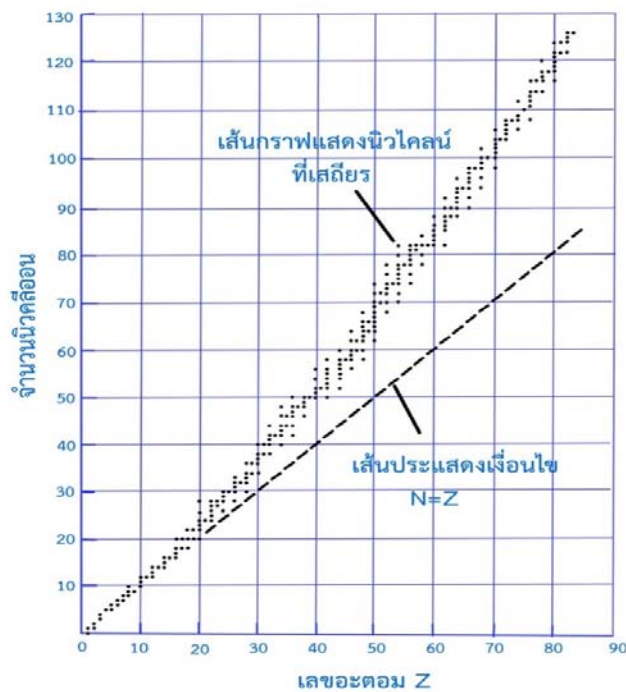
$$\frac{\text{ปริมาตรของนิวเคลียส}}{\text{ปริมาตรของอะตอม}} = \frac{\frac{4}{3} \pi (2.747 \times 10^{-15} \text{ m})^3}{\frac{4}{3} \pi (0.075 \times 10^{-9} \text{ m})^3}$$

$$= 4.9 \times 10^{-14}$$

คำตอบ อัตราส่วนปริมาตรของนิวเคลียสเท่ากับ  $4.9 \times 10^{-14}$

## 7.6 เสถียรภาพนิวเคลียร์ (Stability of nucleus)

แรงผลักรวมระหว่างกลุ่มของโปรตอนที่อยู่รวมกันอยู่ในนิวเคลียสซึ่งแรงผลักรวมนี้มีค่ามากนั้นอาจคาดได้ว่าจะทำให้นิวเคลียสแตกออกจากกัน แต่เนื่องจากมันไม่ได้เกิดขึ้นจริง ดังนั้นจึงต้องมีแรงต้านดึงดูดให้โปรตอนรวมกันอยู่ได้ภายในนิวเคลียส นั่นคือแรงนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระยะสั้นมาก แรงนิวเคลียร์นี้ยังกระทำอันตรกิริยาระหว่างคู่ของนิวตรอนและระหว่างนิวตรอนกับโปรตอนด้วย โดยแรงนิวเคลียร์จะแรงกว่าแรงผลักรวมภายในนิวเคลียส ดังนั้นนิวเคลียสจึงยังคงตัวอยู่ได้ แรงนิวเคลียร์เป็นอิสระจากประจุไฟฟ้า เป็นแรงที่เกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาระหว่างโปรตอน-โปรตอน โปรตอน-นิวตรอน และนิวตรอน-นิวตรอน จะเหมือนกันทุกกรณี ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับแรงผลักรวมที่เพิ่มขึ้นมาจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตอนกับโปรตอน จากการทดลองเรื่องการกระเจิงและการศึกษาพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียร์ ช่วงสั้นๆของแรงนิวเคลียร์นี้แสดงได้ดังภาพที่ 7.1



ภาพที่ 7.1 แสดงกราฟระหว่างจำนวนนิวตรอน  $N$  กับเลขอะตอม  $Z$  ของนิวเคลียสที่เสถียร

จากภาพที่ 7.1 แรงนิวเคลียร์ส่งผลให้มีนิวเคลียสที่เสถียรประมาณ 270 ชนิด ส่วนนิวเคลียสอื่น ๆ จำนวนเป็นร้อยก็สามารถถูกสังเกตพบได้แต่นิวเคลียสเหล่านั้นไม่เสถียร จากกราฟระหว่างเลขนิวตรอนกับเลขอะตอม ของกลุ่มนิวเคลียสที่เสถียร นิวเคลียสที่เสถียรจะแทนด้วยจุดสีดำ ซึ่งมี

แนวช่วงแคบ ๆ ที่เรียกว่า เส้นของเสถียรภาพ จะสังเกตเห็นว่า นิวเคลียสเบาที่เสถียรจะมีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนนิวตรอน ซึ่งก็คือ  $N = Z$  และยังสังเกตได้ว่านิวเคลียสหนักที่เสถียร จำนวนนิวตรอนจะมากกว่าจำนวนโปรตอน ซึ่งมีค่า  $Z = 20$  ขึ้นไป ทำให้เส้นของเสถียรภาพเบนออกจากเส้นที่แสดง  $N = Z$  ขึ้นไปทางด้านบน การเบี่ยงเบนนี้อธิบายได้ว่า เมื่อเราสังเกตพบจำนวนโปรตอนเพิ่มขึ้น จะทำให้ความแรงของแรงคูลอมบ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มที่ทำให้นิวเคลียสแยกออกจากกัน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีนิวตรอนมากขึ้น เพื่อให้ นิวเคลียสยังคงอยู่ในสถานะที่เสถียร เพราะว่ามีนิวตรอนทำให้เกิดได้เฉพาะแรงนิวเคลียร์ดึงดูด แต่ท้ายที่สุดแล้วแรงคูลอมบ์ซึ่งเป็นแรงผลักระหว่างโปรตอนจะไม่สามารถถูกชดเชยด้วยการเพิ่มจำนวนนิวตรอนให้มากขึ้นได้ ซึ่งจุดนี้เป็นจุดที่มี  $Z = 83$  หมายความว่า ธาตุที่มีโปรตอนมากกว่า 83 จะมีนิวเคลียสที่ไม่เสถียร

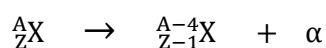
## 7.7 สารกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

ในปี ค.ศ. 1896 เฮนรี เบคเคอเรล ได้ค้นพบว่า รังสีที่ผลึกของเกลือยูเรเนียมปล่อยออกมา โดยไม่มีการกระตุ้นจากภายนอกเป็นรังสีชนิดใหม่ซึ่งเกิดขึ้นเอง ต่อมาได้เรียกรังสีนี้ว่า กัมมันตภาพรังสี ต่อมา มารีคูรี ได้รายงานการค้นพบธาตุกัมมันตรังสี สองชนิดคือ พอลอเนียมและเรเดียม นอกจากนี้จากการทดลองจำนวนมากชี้ให้เห็นว่ากัมมันตภาพรังสีตามที่เรากล่าวถึงอยู่ในขณะนี้ เป็นผลจากการสลาย หรือการแตกสลายของนิวไคลด์ที่ไม่เสถียรนั่นเอง

การเกิดกัมมันตภาพรังสี เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งของธาตุบางชนิดที่มีอยู่ตามธรรมชาติ สามารถที่จะแผ่รังสีออกมาได้เองโดยไม่ต้องมีการกระตุ้นหรือให้พลังงานซึ่งจะแตกต่างจากธาตุทั่วไปที่ต้องมีการกระตุ้นจึงจะมีการแผ่รังสี

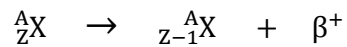
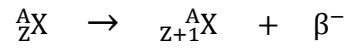
การแผ่รังสีเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภายในของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี การที่นิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ เรียกว่าการสลายตัวของธาตุกัมมันตภาพรังสี สำหรับสารกัมมันตภาพรังสีสามารถแผ่รังสีได้ 3 ชนิดคือ

1. รังสีแอลฟา (Alpha decay) เมื่อมีการแผ่รังสีชนิดนี้ออกมา จะทำให้ได้อนุภาคที่เป็นนิวเคลียสของฮีเลียม  ${}^4_2\text{He}$  ออกมา ดังสมการข้างล่าง

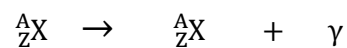


2. รังสีบีตา (Beta decay) เป็นการปล่อยอนุภาคที่เป็นอิเล็กตรอนหรือโพซิตรอนออกมา โดยที่โพซิตรอนเป็นอนุภาคที่มีลักษณะคล้ายกับอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าเป็น  $+e$  และเพื่อชี้ให้เห็นถึงความคล้าย และความแตกต่างกันจึงใช้สัญลักษณ์  $\beta^-$  แทนอิเล็กตรอน

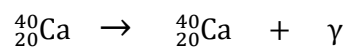
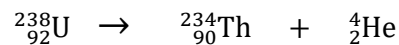
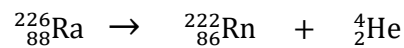
และ  $\beta^+$  แทนโพซิตรอน ดังสมการข้างล่าง



2. รังสีแกมมา (Gamma decay) ซึ่งเป็นรังสีที่มีโฟตอนพลังงานสูงเกิดจากนิวไคลด์สลายตัวทำให้มวลหรือประจุเปลี่ยนแปลง ดังสมการข้างล่าง

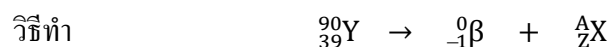


ตัวอย่างการแผ่รังสีของสารกัมมันตภาพรังสี



รังสีทั้ง 3 ชนิดนี้ สามารถตรวจสอบได้โดยการปล่อยให้เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก รังสีแกมมาจะไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก เนื่องจากไม่มีประจุ นอกจากนี้อำนาจทะลุทะลวงยังต่างกันด้วย รังสีแอลฟามีมวลมากความเร็วน้อยจึงทะลุทะลวงได้น้อย รังสีแกมมามีความเร็วเท่าแสงสามารถทะลุทะลวงได้มาก ในการกั้นรังสีแกมมาจึงต้องใช้ตะกั่วแผ่นหนา ๆ

ตัวอย่างที่ 7.10 ธาตุกัมมันตรังสี  ${}^{90}_{39}\text{Y}$  ปล่อยอนุภาคบีตาออกมาตัวหนึ่ง ถามว่าไอโซโทปผลิตภัณฑ์เป็นอะไร



$$90 = 0 + A, A = 90; 39 = -1 + Z, Z = 39 + 1 = 40$$

จากตารางธาตุ  $Z = 40$  คือ ธาตุเซอร์โคเนียม ดังนั้น ไอโซโทปผลิตภัณฑ์ คือ เซอร์โคเนียม-90

คำตอบ ดังนั้น จะได้ธาตุ  ${}^{90}_{40}\text{Zr}$

ตัวอย่างที่ 7.11 พลูโทเนียม-246,  $^{246}_{94}\text{Pu}$  ปล่อยอนุภาคเบตาออกมา 2 ตัวอนุภาคแอลฟา 2 ตัว และรังสีแกมมาหลายตัวตามกันมา จงหาไอโซโทปผลิตภัณฑ์คืออะไร

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad & ^{246}_{94}\text{Pu} \rightarrow 2\text{}^0_{-1}\beta + 2\text{}^4_2\alpha + n\text{}^0_0\gamma + \text{}^A_Z\text{X} \\ & 246 = 0 + 8 + 0 + A, \quad A = 246 - 8 = 238 \\ & 94 = -2 + 4 + 0 + Z, \quad Z = 94 - 2 = 92 \end{aligned}$$

จากตารางธาตุ  $Z = 92$  คือ ยูเรเนียม

คำตอบ ดังนั้น ไอโซโทปผลิตภัณฑ์ คือ ยูเรเนียม-238

### 7.8 ครึ่งชีวิต (Half life)

ครึ่งชีวิตของกัมมันตภาพรังสีหมายถึง เมื่อช่วงเวลาผ่านไปเท่ากับครึ่งชีวิตของธาตุหรือสารนั้นๆ แล้วจะทำให้ธาตุหรือสารนั้นเหลืออยู่ครึ่งหนึ่ง เช่น สารตัวอย่างกัมมันตรังสีคาร์บอน อยู่  $x$  อะตอมแล้ว โดยสารกัมมันตรังสีคาร์บอนนี้มีครึ่งชีวิตเท่ากับ 5,730 ปี เพราะฉะนั้นแล้วเมื่อเวลาผ่านไป 5,730 ปีก็จะเหลือคาร์บอนนี้อยู่ครึ่งหนึ่งของอะตอมเดิมที่มีอยู่นั่นคือเท่ากับ  $\frac{x}{2}$  อะตอม และเมื่อเวลาผ่านไปอีก 5,730 ปี ก็จะเหลืออะตอมของคาร์บอนนี้อยู่  $\frac{x}{4}$  อะตอม เป็นอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่เหลืออะตอมของคาร์บอนนี้อีกเลย กระบวนการสลายตัวในธรรมชาติเกิดขึ้นแบบสุ่มและสามารถที่จะอธิบายได้ด้วยการคำนวณเชิงสถิติสำหรับสารกัมมันตรังสีที่มีขนาดอยู่ในระดับมหภาคที่ประกอบไปด้วยนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีจำนวนมาก สำหรับสารที่มีนิวเคลียสจำนวนมาก อัตราของกระบวนการสลายตัวที่เกิดเฉพาะในแต่ละสารตัวอย่างจะแปรผันตรงกับจำนวนของนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในขณะนั้น ถ้า  $N$  คือจำนวนของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีที่ยังไม่สลายตัวที่ขณะหนึ่ง อัตราการเปลี่ยนแปลง  $N$  ตามเวลา คือ

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (7-6)$$

เมื่อ

$\frac{dN}{dt}$  คือ อัตราการสลายตัว

$N$  คือ จำนวนนิวเคลียสเริ่มต้น

$\lambda$  คือ ค่าคงตัวของการสลายตัว

จากสมการ

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

จะได้

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (7-7)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ จะได้

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

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t - 0 \quad (7-8)$$

จะได้

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (7-9)$$

เมื่อค่าคงตัว  $N_0$  แสดงถึงจำนวนของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี ที่ยังไม่สลายตัวที่เวลา  $t=0$  สมการ (7-9) แสดงให้เห็นว่าจำนวนของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีที่ยังไม่สลายตัวในสารตัวอย่างที่พิจารณาจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามเวลา กราฟระหว่าง  $N$  และ  $t$  แสดงดังภาพที่ 7.2 แสดงถึงการสลายตัวในธรรมชาติ

ต่อมากำหนดให้  $R$  คือ อัตราการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสี หรือกัมมันตภาพ มีหน่วยเป็น Decays / s หรือ Decay / hr หรือ Decays / yr

ดังนั้น

$$R = \left| \frac{dN}{dt} \right| = N_0 \lambda e^{-\lambda t}$$

ให้

$$R_0 = N_0 \lambda \quad (7-10)$$

เมื่อ  $R_0$  คือ ค่าอัตราการสลายตัวเริ่มต้นของกัมมันตภาพรังสี

$N_0$  คือ ค่าจำนวนนิวไคลด์เริ่มต้น

ดังนั้น

$$R = R_0 e^{-\lambda t} \quad (7-11)$$

กำหนดให้

$$N = \frac{N_0}{2}$$

เมื่อ

$$t = T_{1/2}$$

ดังนั้น

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (7-12)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (7-13)$$

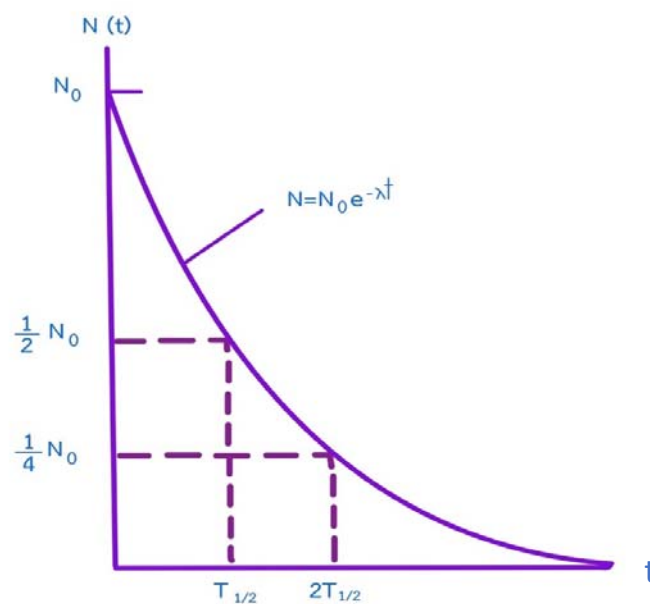
หรือ

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (7-14)$$

หน่วยของกัมมันตภาพรังสีที่ใช้อยู่บ่อยครั้งคือ คูรี (Ci) กำหนดให้เป็น

$$1 \text{ Ci} \equiv 3.7 \times 10^{10} \text{ decays/s}$$

ค่านี้เป็นหน่วยดั้งเดิมที่ถูกกำหนดขึ้น เพราะมันเป็นการประมาณค่าการเปล่งกัมมันตภาพรังสีของธาตุเรเดียม 1 g ส่วนหน่วยในระบบ SI ของกัมมันตภาพรังสีคือ เบคเคอเรล (Bq) 1 Bq = 1 decay/s



ภาพที่ 7.2 แสดงกราฟอัตราการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสี

ตัวอย่างที่ 7.8 ธาตุกัมมันตภาพรังสีชนิดหนึ่งมีครึ่งชีวิตเท่ากับ 3.8 วัน จงหาค่าคงตัวของการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสีนี้

วิธีทำ จากสมการ

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

จะได้ค่าคงตัวการสลายตัวเท่ากับ

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

$$\begin{aligned}\text{เมื่อแทนค่าครึ่งชีวิตลงไปจะได้ } \lambda &= \frac{0.693}{3.8 \times 86400} \\ &= 2.1 \times 10^{-6} \text{ ต่อวินาที}\end{aligned}$$

คำตอบ ค่าคงตัวของสลายตัวเท่ากับ  $2.1 \times 10^{-6}$  ต่อวินาที

ตัวอย่างที่ 7.9 ที่เวลา  $t=0$  ตัวอย่างของธาตุกัมมันตรังสีจำนวนของ  $^{11}\text{C}$  อยู่ 3.5 ไมโครกรัม ซึ่งมีครึ่งชีวิต 20.4 นาที (ก) จงหาจำนวนนิวเคลียส  $N_0$  ในสารตัวอย่างที่เวลา  $t=0$  (ข) อัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่างนี้ในตอนเริ่มต้นและหลังจากเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมงมีค่าเท่าใด

วิธีทำ (ก) มวลโมเลกุลของ  $^{11}\text{C}$  อยู่ที่ประมาณ 11 กรัมต่อโมล

หาจำนวนโมลของ  $^{11}\text{C}$  บริสุทธิ์ในสารตัวอย่าง 3.5  $\mu\text{g}$

$$n = \frac{3.5 \times 10^{-6} \text{ g}}{11 \text{ g/mol}} = 3.18 \times 10^{-7} \text{ โมล}$$

หาจำนวนของนิวเคลียสที่ยังไม่สลายตัวของ  $^{11}\text{C}$  บริสุทธิ์ในปริมาณเท่านี้

$$\begin{aligned}N_0 &= (3.18 \times 10^{-7} \text{ โมล})(6.02 \times 10^{23} \text{ นิวไคลด์ต่อโมล}) \\ &= 1.92 \times 10^{17} \text{ นิวไคลด์}\end{aligned}$$

คำตอบ จำนวนนิวเคลียสในสารตัวอย่างเท่ากับ  $1.92 \times 10^{17}$  นิวไคลด์

(ข) หาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของสาร

$$\begin{aligned}R_0 &= N_0 \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} N_0 \\ &= \frac{0.693}{20.4 \text{ min}} \left( \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) (1.92 \times 10^{17}) \\ &= (5.66 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1})(1.92 \times 10^{17}) \\ &= 1.09 \times 10^{14} \text{ แบคเคอเรล}\end{aligned}$$

จากสมการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา  $R = R_0 e^{-\lambda t}$

$$\begin{aligned}&= (1.09 \times 10^{14} \text{ Bq}) e^{-(5.66 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1})(2.88 \times 10^4 \text{ s})} \\ &= 8.96 \times 10^6 \text{ แบคเคอเรล}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ที่เวลา } t = 8 \text{ ชั่วโมง} & \\ &= 2.88 \times 10^4 \text{ วินาที}\end{aligned}$$

คำตอบ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่เวลา 8 ชั่วโมง เท่ากับ  $2.88 \times 10^4$  วินาที

สำหรับครึ่งชีวิตและชนิดของการแผ่รังสีของธาตุบางชนิดแสดงดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ค่าครึ่งชีวิตและชนิดของการแผ่รังสีของธาตุบางชนิด

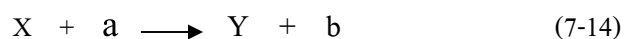
นิวเคลียส	ครึ่งชีวิต	นิวเคลียสเสถียร
ยูเรเนียม ( $^{238}_{92}U$ )	$4.47 \times 10^9$ ปี	$^{206}_{82}Pb$
แอกทีเนียม ( $^{235}_{92}U$ )	$7.04 \times 10^8$ ปี	$^{207}_{82}Pb$
ทอเรียม ( $^{232}_{90}Th$ )	$1.41 \times 10^{10}$ ปี	$^{208}_{82}Pb$

ที่มา: Serway, R.A, Mose, C.J, Moyer C.A., 2005

## 7. 9 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์คือ ปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อนิวเคลียสของอะตอมโดยจะเกิดปฏิกิริยานี้ในโครงสร้างระดับนิวเคลียส ปฏิกิริยานิวเคลียร์อาจเป็นการสลายของนิวเคลียส กัมมันตรังสี หรือการยิงอนุภาคที่มีพลังงานสูงเข้าชนนิวเคลียสดังเช่นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส รัทเทอร์ฟอร์ด เป็นบุคคลแรกที่สังเกตพฤติกรรมของปฏิกิริยาดังกล่าว ในปี ค.ศ. 1991 ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคในช่วงปี ค.ศ. 1930 เป็นต้นมา ด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงของเครื่องเร่งอนุภาคและตัวตรวจจับอนุภาคในแต่ละวัน เครื่องยิงอนุภาคแฮดรอนขนาดใหญ่ (Large Hadron Collider) ในยุโรปสามารถที่จะเร่งอนุภาคให้มีพลังงานถึง 14000 GeV อนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้ถูกใช้เพื่อสร้างอนุภาคชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ช่วยให้เข้าใจและไขปริศนาของนิวเคลียสได้

พิจารณานิวเคลียสของธาตุ X ถูกยิงด้วยอนุภาค a ทำให้เกิดนิวเคลียสของธาตุใหม่ คือธาตุ Y และมีการปล่อยอนุภาค b ออกมา โดยเขียนเป็นสมการได้คือ

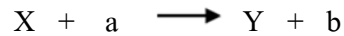


ปฏิกิริยาดังกล่าวเขียนได้เป็นสัญลักษณ์คือ



โดยทั่วไปของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผลรวมของโปรตอน และนิวตรอน ทั้งก่อนและหลังจากเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีค่าเท่ากันเสมอ

สำหรับการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้นจะพบว่า ผลรวมของมวลก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยานั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะมีมวลบางส่วนหายไปหรือเพิ่มขึ้น ซึ่งมวลที่หายไปหรือเพิ่มขึ้นนี้ก็จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานที่เกิดขึ้นนั่นเอง ถ้าให้  $Q$  แทนค่าพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ สำหรับปฏิกิริยา



เราสามารถหาพลังงานที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

$$Q = (M_a + M_x - M_b - M_y)c^2 \quad (7-16)$$

เมื่อ  $Q$  คือ พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา

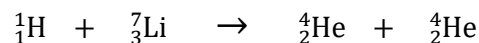
$M_a$  คือ มวลของธาตุ  $a$

$M_x$  คือ มวลของธาตุ  $x$

$M_b$  คือ มวลของธาตุ  $b$

$M_y$  คือ มวลของธาตุ  $y$

ตัวอย่างเช่น พิจารณาปฏิกิริยาของ  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  ตัวแปร  $p$  แทน โปรตอน ซึ่งก็คือ นิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจน ดังนั้นเราสามารถเขียนปฏิกิริยานี้ในรูปของเทอมที่ขยายแล้วได้เป็น

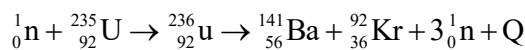


ค่า  $Q$  สำหรับปฏิกิริยานี้คือ 17.3 MeV สำหรับค่าพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้เราสามารถหาได้จากค่าคิวโดยถ้าพลังงานที่ได้มีค่าเป็นบวก แสดงว่ามีพลังงานเกิดขึ้นในรูปของพลังงานจลน์เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ในกรณีที่ค่าคิวหรือพลังงานที่ได้มีค่าเป็นลบเรียกปฏิกิริยาชนิดนี้ว่า ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) เพื่อที่จะให้ระบบโคดเคียวเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมปฏิกิริยาดูดกลืนพลังงานจะไม่เกิดขึ้นจนกว่าอนุภาคที่ยิงใส่นิวเคลียสจะมีพลังงานจลน์มากกว่าค่าคิว พลังงานน้อยที่สุดที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเรียกว่า พลังงานขีดเริ่ม

### 7.9.1 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน

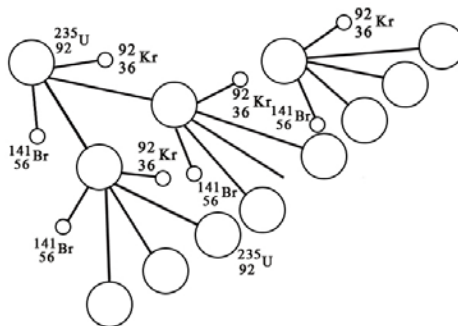
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (Fission reaction) หรือปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัวของนิวเคลียส คือ กระบวนการที่เกิดจากการยิงนิวตรอน ไปยังนิวเคลียสของอะตอมหนัก ซึ่งผลจากการยิงนั้นจะทำให้ นิวเคลียสแยกออกจากกันเป็นสองส่วนที่เกือบเท่ากัน สำหรับในปฏิกิริยานี้จะมีมวลบางส่วนหายไป กลายเป็นพลังงานออกมา ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานออกมาแล้ว ผลจากการเกิดปฏิกิริยานี้ยังทำให้เกิดนิวตรอนขึ้นมาใหม่อีก 2 – 3 ตัว ซึ่งนิวตรอนที่เกิดขึ้นมาใหม่นี้จะวิ่งด้วยความเร็วสูง และจะวิ่ง ไปชนนิวเคลียสของอะตอมอื่นอีกต่อไป ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาลักษณะเป็นลูกโซ่ ผลของการ เกิดปฏิกิริยานี้จะทำให้ได้พลังงานเป็นจำนวนมาก

สำหรับตัวอย่างของปฏิกิริยาแบ่งแยกนี้พิจารณาการยิงนิวตรอนไปยังนิวเคลียสของ  $^{235}_{92}\text{U}$  ซึ่งจะให้นิวเคลียสเกิดการแยกตัวออกเป็นสองส่วน คือเกิดนิวเคลียสของแบเรียม (Ba) และคริปทอน (Kr) ดังสมการ



โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีค่า  $Q = 200 \text{ MeV}$  ซึ่งจากปฏิกิริยาถือว่าเป็นพลังงานที่มีค่าสูงมาก สามารถที่จะลำดับการแยกตัวได้ดังนี้

- 1 นิวเคลียสแบ่งแยกตัวก่อนหนึ่ง ( $^{235}\text{U}$ ) จับกับนิวตรอน
- 2 ผลของการจับนิวตรอนทำให้นิวเคลียสก่อนนั้น ไปอยู่ ณ สถานะกระตุ้นสถานะหนึ่ง เป็น  $^{236}\text{U}$  โดยมีการสั่นอย่างรุนแรง อันเนื่องจากพลังงานส่วนเกินที่มีในขั้นนี้
- 3 นิวเคลียสก่อนดังกล่าวจะบิดเบี้ยว ในขณะที่เดียวกัน แรงผลักระหว่างโปรตอนต่างๆ ซึ่งในแต่ละส่วนมีการแบ่งแยก ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวยิ่งขึ้น
- 4 ในที่สุดนิวเคลียสก่อนนี้ก็แบ่งแยกออกเป็นสองชิ้น โดยมีนิวตรอนจำนวนหนึ่งเกิดขึ้น ในกระบวนการนี้ด้วย ดังภาพที่ 7.3



ภาพที่ 7.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เป็นแบบลูกโซ่

เนื่องจากระบวนการแบ่งแยกนิวเคลียสนั้น ในการเกิดปฏิกิริยาแต่ละครั้ง จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ต่อกันไปเรื่อยๆ ต่อเนื่อง ถ้าไม่มีวิธีควบคุมให้นิวตรอนนี้ช้าลง ก็ย่อมที่จะมีพลังงานเกิดขึ้นอย่างมหาศาล จนทำให้เกิดการระเบิดอย่างรุนแรงได้ ซึ่งหลักการของปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชันนี้เอง ที่เป็นหลักการเบื้องต้นในการผลิตระเบิดนิวเคลียร์ และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์การแบ่งแยกตัว ที่ใช้ธาตุยูเรเนียมเป็นสารตั้งต้นปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชันจะให้น้ำเกิดความร้อนกลายเป็นไอและผ่านเข้าไปในตัวปั่นไฟทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบที่หล่อเย็นเพื่อนำน้ำนั้นไหลเวียนกลับไปยังเตาปฏิกรณ์ได้

ตัวอย่างที่ 7.8 ครึ่งชีวิตของ  $^{90}\text{Sr}$  ประมาณ 28 ปี หรือ  $8.8 \times 10^8 \text{ s}$  ถ้ามี  $^{90}\text{Sr}$  จำนวน 1 g มีกี่อะตอม ค่าคงตัวของการสลายตัวเป็นเท่าไร และ  $^{90}\text{Sr}$  จำนวนนี้สลายตัวทำไรต่อวินาที (เมื่อสตรอนเชียม-90 นี้เป็นผลผลิตฟิชชันกัมมันตรังสีจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิชชัน) วิธีทำ 1 โมล มี  $6.02 \times 10^{23}$  อะตอม ดังนั้น  $^{90}\text{Sr}$  90 กรัม มีจำนวนเท่ากับ  $6.02 \times 10^{23}$  อะตอม

$$\text{การสลายตัว จำนวน } 1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg} \text{ มีเท่ากับ } \frac{6.02 \times 10^{23}}{90} = 6.69 \times 10^{21} \text{ อะตอม}$$

$$\text{จาก } T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

$$\text{ดังนั้นค่าคงตัวของการสลายตัว } \lambda = \frac{0.693}{8.8 \times 10^8} = 7.88 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{จาก อัตราการสลายตัว } \frac{dN}{dt} = \lambda N$$

$$= (6.69 \times 10^{21})(7.88 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1})$$

$$= 5.27 \times 10^{12} \text{ ต่อวินาที}$$

คำตอบ ค่าคงตัวของการสลายตัวเท่ากับ  $7.88 \times 10^{-10}$  ต่อวินาที และมีอัตราการสลายตัว  $5.27 \times 10^{12}$  ต่อวินาที

ตัวอย่างที่ 7.9 วัดกัมมันตภาพของ  $^{14}\text{C}$  ในวัตถุโบราณชิ้นหนึ่งได้เท่ากับ  $2.8 \times 10^7$  เบคเคอเรล ครึ่งชีวิตของ  $^{14}\text{C}$  มีค่าเท่ากับ 5,730 ปี

(ก) จงหาค่าคงตัวของการสลายตัวในหน่วยต่อวินาที

(ข) จงหาค่ากัมมันตภาพเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ปี

$$\text{วิธีทำ (ก) จาก } \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.693}{(5730\text{y})(315 \times 10^7 \text{s/y})} \\
 &= 3.84 \times 10^{-12} \text{ ต่อวินาที}
 \end{aligned}$$

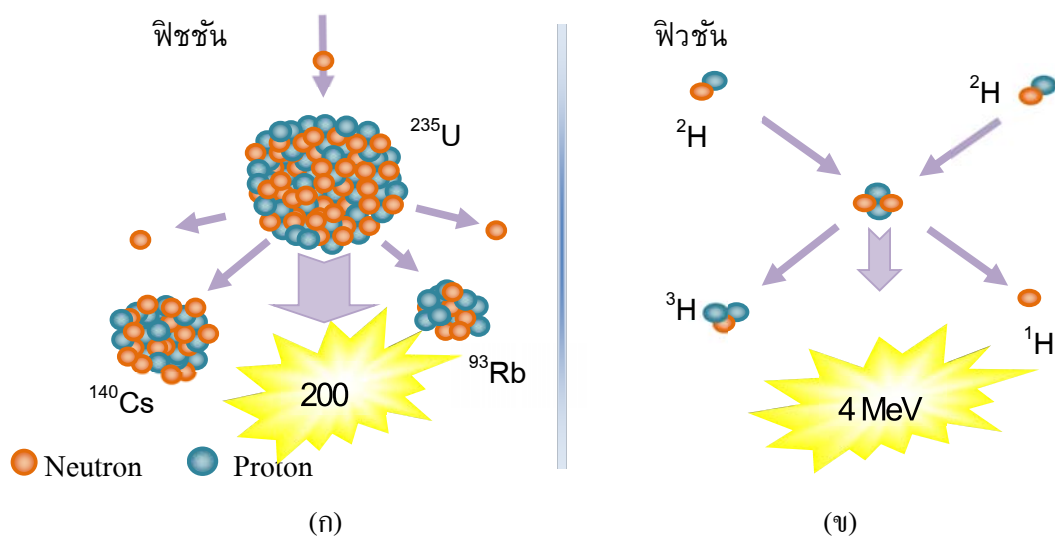
คำตอบ ค่าคงตัวของกาการสลายตัวเท่ากับ  $3.84 \times 10^{-12}$  ต่อวินาที

$$\begin{aligned}
 \text{(จ) จาก } N &= N_0 e^{-\lambda t} \\
 &= (2.8 \times 10^7 \text{ Bq}) \exp(-(3.84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1})(3.15 \times 10^{10} \text{ s})) \\
 &= 2.5 \times 10^7 \text{ แบคเคอเรล}
 \end{aligned}$$

คำตอบ ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ  $2.5 \times 10^7$  แบคเคอเรล

### 7.9.2 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (Fusion reaction) หรือปฏิกิริยาการหลอมรวมกันของนิวเคลียส นั้น เป็นกระบวนการที่เป็นส่วนกลับของปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชัน นั่นคือเป็นกระบวนการที่ นิวเคลียสเบาตั้งแต่สองก้อนมาหลอมรวมกันกลายเป็นนิวเคลียสที่มีมวลที่หนักขึ้น ซึ่งก็จะทำให้ มวลที่เกิดก่อนและหลังปฏิกิริยามีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดมวลพร่องซึ่งจะเป็นตัวทำให้เกิดพลังงาน ขึ้นมานั่นเอง โดยการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันแสดงดังภาพที่ 7.4 (ก) สำหรับปฏิกิริยาหลอม นิวเคลียสนี้ เป็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่บริเวณดวงอาทิตย์ซึ่งจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ โดยลักษณะปฏิกิริยาจะเป็นปฏิกิริยาคายพลังงานเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน กับปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันแสดงดังภาพที่ 7.4 (ข)



ภาพที่ 7.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ (ก) ฟิชชัน (ข) ฟิวชัน

## 7.10 การประยุกต์ใช้งานพลังงานนิวเคลียร์ (Application of nuclear energy)

ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้พลังงานนิวเคลียร์ ในด้านต่างๆ มากมายตัวอย่าง ได้แก่

### 1. ด้านการแพทย์

ในทางการแพทย์นั้นมีการนำ เอสาธกัมมันตรังสี และรังสีมาใช้ในการตรวจวินิจฉัยและรักษาโรค ทำให้การวินิจฉัย และรักษาโรคของแพทย์ เป็นไปอย่างถูกต้อง และรวดเร็ว ตัวอย่างเช่น

- การรักษาโรคมะเร็งด้วยโคบอลต์-60
- อนุภาคทองคำ-198 ใช้ในการรักษามะเร็งผิวหนัง
- ลวดแทนทาลัม-182 ใช้ในการรักษามะเร็งปากมดลูก
- ไอโอดีน-131 ใช้ตรวจวินิจฉัยและรักษาโรคคอพอก และในรูป Labeled compound ใช้

ตรวจวิเคราะห์การทำงานของไต ระบบโลหิต

- เทคนิเชียม-99 m ใช้ตรวจทางเดินน้ำดี ไต ต่อม้ำเหลือง
- แทลเลียม-201 ใช้ตรวจสภาพหัวใจเมื่อทำงานเต็มที่ ตรวจสภาพการไหลของโลหิต

เลี้ยงหัวใจ และตรวจสภาพกล้ามเนื้อหัวใจ

- แกลเลียม-67 ใช้ตรวจการอักเสบต่างๆ ที่เป็นหนอง เช่น ในช่องท้อง ตรวจมะเร็งในต่อม้ำเหลือง

- อินเดียม-111 ใช้ติดสลาเคมีคเลือดขาว ตรวจหาแหล่งอักเสบของร่างกาย ตรวจการอุดตันของไขสันหลัง ตรวจมะเร็งเต้านม รังไข่ ลำไส้

อีกตัวอย่างหนึ่งคือ เทคนิคการวินิจฉัยทางการแพทย์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเรียกว่า MRI หรือ การสร้างภาพด้วยเรโซแนนซ์แม่เหล็ก ที่อาศัยพื้นฐานของนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ เนื่องจากอะตอมสองในสามของร่างกายมนุษย์เป็นไฮโดรเจน MRI ใช้งานได้อย่างดีสำหรับการส่องมองดูเนื้อเยื่อภายในร่างกาย โดยเนื้อเยื่อจะถูกจัดให้อยู่ภายในขดลวดโซลินอยด์ขนาดใหญ่ซึ่งจ่ายสนามแม่เหล็กแต่ขนาดของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามที่วางตลอดในร่างกายของเรา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนาม อะตอมไฮโดรเจนในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายจะมีพลังงานการแยกระหว่างสถานะสปินทั้งสองสถานะแตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณเรโซแนนซ์สามารถที่จะนำมาใช้เพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของโปรตอน จากนั้นคอมพิวเตอร์จะช่วยวิเคราะห์ข้อมูลของตำแหน่งสำหรับการสร้างออกมาเป็นภาพได้

### 2. ด้านอุตสาหกรรม

มีการใช้เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่นการใช้วัดกัมมันตรังสี และเทคนิคทางรังสี ซึ่งเรียกว่า เทคนิคเชิงนิวเคลียร์ เป็นการนำพลังงานปรมาณูมาใช้ สำหรับประเทศไทย ได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในกิจการต่างๆ ตัวอย่างดังต่อไปนี้

- ใช้วัดระดับของไหล สารเคมีต่าง ๆ ในขบวนการผลิตในโรงงานเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยรังสีแกมมา
- ใช้ตรวจสอบระดับเศษไม้ในหม้อหนึ่งภายใต้ความดันสูง ในการผลิตไม้อัดแผ่นเรียบ ด้วยรังสีแกมมา
- ควบคุมการไหลผ่านของส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์
- วัดความหนาแน่นของน้ำปูนกับเส้นใยหิน ในขบวนการผลิตกระเบื้องกระดาด
- วัดความหนาแน่นในการคัดสินแร่ในทะเล เพื่อคำนวณหาปริมาณแร่ทีุ่ดผ่าน
- วัดและควบคุมความหนาแน่นของน้ำโคลนที่จะใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ส่งน้ำใต้ดิน

### 3. ด้านการเกษตร

มีการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การกำจัดศัตรูพืช การปรับปรุงพันธุ์ การเก็บถนอมรักษาผลผลิตให้สามารถเก็บไว้ได้เป็นเวลานาน ไม่ให้เสียหาย เป็นต้น ตัวอย่างเช่นการใช้สารกัมมันตภาพรังสีฉายลงไปที่เนื้อหมูหมัก เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และจุลินทรีย์บางชนิด ทำให้เนื้อหมูไม่เน่าเสีย และยังคงคุณค่าทางอาหารไว้ได้ ทั้งนี้การควบคุมดูแลสภาพอาหารและความปลอดภัยอยู่ภายใต้การดูแลของกระทรวงสาธารณสุข ผู้บริโภคจึงสามารถไว้วางใจในการรับประทานอาหารเหล่านี้ได้นั่นเอง ตัวอย่างอื่นๆ ที่มีใช้ในประเทศไทยที่มีการเกษตรเป็นอาชีพหลักของประชากร โครงการใช้นิวเคลียร์เทคโนโลยี เพื่อส่งเสริมกิจการเกษตร เช่น

- การใช้เทคนิคนิวเคลียร์วิเคราะห์ดิน เพื่อการจำแนกพื้นที่ปลูก ทำให้ทราบว่า พื้นที่ที่ศึกษาเหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชชนิดใด ควรเพิ่มปุ๋ยชนิดใดลงไป
- เทคนิคการสะกดรอยด้วยรังสีใช้ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซึมแร่ธาตุ และปุ๋ยคอกต้น ไม้ และพืชเศรษฐกิจต่างๆ เพื่อการปรับปรุงการใช้ปุ๋ยให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น
- การฉายรังสีแกมมาเพื่อฆ่าแมลงและไข่ในเมล็ดพืช ซึ่งเก็บไว้ในยุ้งฉาง และภายหลังจากบรรจุในภาชนะเพื่อการส่งออกจำหน่าย
- การใช้เทคนิครังสีเพื่อการขยายพันธุ์สัตว์เลี้ยง และการเพิ่มอาหารนม อาหารเนื้อ ในโค และ กระบือ
- การนำเทคนิคทางรังสีด้านอุทกวิทยา ในการเสาะหาแหล่งน้ำสำหรับการเกษตร
- การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีอปรังสี วิเคราะห์สารตกค้างในสิ่งแวดล้อมจากการใช้ยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่าแมลง ซึ่งมีความสำคัญต่อผู้บริโภค เป็นต้น

### 4. ด้านสิ่งแวดล้อม

พลังงานนิวเคลียร์ มีส่วนเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมใน 2 ด้านคือในด้านการรักษาและพัฒนาสภาพของสิ่งแวดล้อมให้ดีขึ้น อีกด้านหนึ่งคือ การตรวจตรา และควบคุมปริมาณรังสีที่มีอยู่ใน

ธรรมชาติหรือสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อมวลมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตโดยทั่วไป ประโยชน์ของพลังงานนิวเคลียร์ในด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่

- การใช้รังสีแกมมาฆ่าเชื้อโรคต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจากชุมชน และจากโรงพยาบาล เพื่อป้องกันโรคระบาด
- การใช้รังสีแกมมาฆ่าเชื้อโรคในขยะและตะกอน แล้วนำกลับมาทำเป็นปุ๋ยต่อไป
- การใช้รังสีอิเล็กตรอน ในการกำจัดก๊าซอันตราย (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) จากปล่องควันโรงงานอุตสาหกรรม และการเผาถ่านหิน
- การใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์วิเคราะห์สารพิษต่างๆ ในดิน พืช อากาศ น้ำ และอาหาร
- การวัดปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อม เช่น ที่อยู่อาศัย และสถานที่ทำงาน เป็นต้น

### 7.11 บทสรุป

นิวเคลียร์ฟิสิกส์คือการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในนิวเคลียสหรือในอะตอมของธาตุที่ประกอบไปด้วยโปรตอน นิวตรอนและอิเล็กตรอน โดยภายในนิวเคลียสประกอบไปด้วยนิวตรอนและโปรตอนที่ยึดกันอยู่ด้วยแรงที่เกิดจากมวลพ่อง นิวเคลียสมีความเสถียรเพราะแรงนิวเคลียร์ระหว่างนิวคลีออนที่ยึดเหนี่ยวให้นิวเคลียสยังคงตัวอยู่ได้ แรงระยะสั้นนี้ครอบคลุมแรงผลัไฟฟ้าคูลอมบ์ที่ระยะทางน้อยมาก และแรงไม่ขึ้นอยู่กับการประจุไฟฟ้า นิวเคลียสของธาตุเบาที่เสถียรจะมีจำนวนของโปรตอนและนิวตรอนในปริมาณที่เท่ากัน นิวเคลียสของธาตุหนักที่เสถียรจะมีจำนวนนิวตรอนมากกว่าโปรตอน นิวเคลียสที่มีความเสถียรมากที่สุดจะมีทั้งค่า Z และ N ที่เป็นเลขคู่ ความแตกต่างระหว่างผลรวมของมวลของทุกนิวคลีออนและมวลที่แท้จริงของนิวคลีออน เมื่อนำไปคูณกับ  $c^2$  จะได้พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส สารกัมมันตภาพรังสีคือสารที่มีการสลายตัวให้อนุภาค แอลฟา เบตาและแกมมาอยู่ตลอดเวลา โดยไม่ต้องมีการกระตุ้นเหมือนสารอื่น ปฏิกิริยานิวเคลียร์คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการรวมตัว หรือการแบ่งแยกกันของธาตุ ซึ่งมวลของอนุภาคที่ทำปฏิกิริยาก่อนและหลังทำปฏิกิริยาไม่เท่ากันทำให้เกิดมวลพ่องที่ส่งผลให้เกิดพลังงานออกมาในลักษณะเป็นลูกโซ่ ถ้าสารกัมมันตภาพรังสีประกอบด้วยนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีจำนวน  $N_0$  ที่เวลา  $t = 0$  จำนวนนิวเคลียสที่เหลืออยู่  $N$  หลังจากเวลาผ่านไป  $t$  คือ  $N = N_0 e^{-\lambda t}$  ในการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา ปฏิกิริยานิวเคลียร์สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อนิวเคลียสของอะตอมเป้าหมาย ถูกยิงด้วยอนุภาคชนิดหนึ่งผลจากการชนกันของอนุภาคจะทำให้เกิดนิวเคลียสที่เกิดใหม่ และอนุภาคอีกชนิดหนึ่งปลดปล่อยออกมา

## แบบฝึกหัด

1. จงหาจำนวน A, Z, e, p, n ของธาตุ  $X_9^{20}$  [คำตอบ 20, 9, 9, 9, 11]
2. นิวเคลียสของ  $^{226}_{88}\text{Ra}$  เมื่อสลายตัวได้ธาตุใหม่คือ  $^{222}_{86}\text{Rn}$  จะให้รังสีอะไรออกมา [คำตอบ แอลฟา]
3. เริ่มต้นมีธาตุ X อยู่ 20 g เมื่อผ่านไป 10 วัน เหลืออยู่ 5 g ธาตุ X มีครึ่งชีวิตเท่าไร [คำตอบ 5 วัน]
4. อะลูมิเนียม -28 แตกตัวให้อนุภาคเบตา ตอนแรกวัดกัมมันตภาพของสารนี้ได้ 0.01664 คูรี แต่เมื่อเวลาผ่านไป 9.24 ชั่วโมง อัตราการสลายตัวเหลือเพียง 0.00104 คูรี ดังนั้นเวลาครึ่งชีวิตของอะลูมิเนียมคือเท่าไร [คำตอบ 2.32 ชั่วโมง]
5. จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวของ  $^{107}_{47}\text{Ag}$  ซึ่งมีมวลเท่ากับ 106.905 u [คำตอบ 915 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์]
6. เรเดียม -226 มีเวลาครึ่งชีวิต 1620 ปี ถ้าจะให้อัตราการสลายตัวเป็น 20,000 ต่อวินาที จะต้องใช้มวลของเรเดียมเท่าไร [คำตอบ  $5.54 \times 10^{-7}$  กรัม]
7. ในการทดลองระเบิดปรมาณูลูกหนึ่งซึ่งใช้  $^{235}_{92}\text{U}$  ทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้พลังงานทั้งสิ้น  $9.632 \times 10^{13}$  จูล หลังการเกิดระเบิด อยากทราบว่ามวลจะหายไปทั้งสิ้นกี่กิโลกรัม [คำตอบ  $1.07 \times 10^{-3}$  กิโลกรัม]
8. จงหานิวเคลียสที่ถูกต้องที่ควรเติมลงในวงเล็บ (.....) ในปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้ [คำตอบ อยู่ในภาคผนวก]
  - ก.  $^{10}_5\text{B} + ^4_2\text{He} \rightarrow (\text{.....}) + ^1_1\text{H}$
  - ข.  $(\text{.....}) + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{35}_{17}\text{Cl} + ^1_1\text{H}$
  - ค.  $^{23}_{11}\text{Na} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^1_1\text{H} + (\text{.....})$
  - ง.  $^7_3\text{Li} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^8_4\text{Be} + (\text{.....})$

## เอกสารอ้างอิง

- ก่องกัญจน์ ภัทรากาญจน์ และชนกกาญจน์ ภัทรากาญจน์. (2554). ฟิสิกส์ 2 ตัวอย่างและโจทย์ พร้อม  
คำเฉลย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เชิญโชค ศรขวัญ และคณะ. (2546). ฟิสิกส์ทั่วไป 2 General Physics II 2<sup>nd</sup> ed. กรุงเทพมหานคร :  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2551). ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 3. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดุกะซัน จำกัด  
ทวี ฉิมน้อย และมนู เฟื่องฟูง. (2541). ฟิสิกส์พื้นฐานระดับมหาวิทยาลัย 1.กรุงเทพมหานคร:  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- วิฑูร ชื่นวชิรศิริ และวีระชัย สิริพันธ์วรารักษ์. (2550). ฟิสิกส์เบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร:  
มหาวิทยาลัยมหิดล.
- อนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ ทบวงมหาวิทยาลัย. (2543). ฟิสิกส์ เล่ม2.  
กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- Crummett P. & Bwestern. (1994). University Physics. USA : Wm. C. Brown.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2005). Fundamentals Physics. (7th ed.). USA: John Wiley  
and Sons.
- Serway, R.A., Moses, C.J., & Moyer, C.A. (2005). Modern Physics 3<sup>rd</sup> ed. California:  
Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). Physics for Scientists and Engineers with Modern  
Physics 9<sup>th</sup> ed. Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). College Physics 10<sup>th</sup> ed. Stamford: Cengage  
Learning.
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed.  
Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). Sear's & Zemansky's University Physics with  
Modern Physics 14<sup>th</sup> ed. Essex: Pearson Education Limited.