# บทที่ ๓

## กัมมันตภาพรังสี

อะตอมประกอบด้วย โปรตอน นิวตรอน และอิเลคตรอน ซึ่งอยู่ใน Orbit ในอะตอม ${}_{Z}X^{A}$ A และ Z จะเป็นตัวแสดงถึงจำนวนอนุภาคในอะตอม มีธาตุที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติอยู่ 92 ชนิด ดังนั้น ธาตุเหล่านี้จะมี Atomic Number เรียงกันไปตั้งแต่ 1-92 ค่าประมาณของ Atomic Masses ซึ่งเป็นตัวเลขจำนวนเต็มหรือที่เรียกว่า Mass Number จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อ Atomic Number เพิ่มขึ้น

ในนิวเคลียสของแต่ละธาตุ จำนวนโปรตอน และนิวตรอน จะต้องมีค่าจำกัดจำนวนหนึ่ง จึงจะทำให้ธาตุนั้นอยู่ในลักษณะอยู่ตัว (Stable) เมื่อโปรตอน และนิวตรอนมีค่าต่างจากค่าจำกัดจำนวนนี้ก็จะไม่อยู่ตัว

Nuclear Stability แรงที่เกิดขึ้นในนิวเคลียสมีอยู่ 2 พวก คือ

1. แรงระหว่างประจุไฟฟ้า เป็นแรงผลักระหว่างโปรตอนกับโปรตอน
2. Nuclear Force เป็นแรงดึงดูดกันระหว่างนิวตรอนและนิวตรอน

จะเห็นว่าแรงทั้งสองชนิดนี้เกี่ยวข้องกับจำนวนโปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียส ดังนั้น จำนวนโปรตอนและนิวตรอนจะต้องมีอัตราส่วนจำกัดค่าหนึ่งจึงจะทำให้อะตอมนั้นอยู่ตัว

ธาตุใน Periodic Table ที่มี Atomic Number น้อย ๆ มีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเกือบเท่ากัน (คือ $n:p \approx 1$) จะอยู่ตัว, ณะที่ Atomic Number ของธาตุเพิ่มขึ้นจนเกิน 20 ค่าของ n:p ก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยเหมือนกัน , และเมื่อ Atomic Number เท่ากับ 83 คือ บิสมัธ ค่าของ n:p มากกว่า 1.5 ในท้าย ๆ Periodic Table ธาตุที่อยู่เหนือบิสมัธจะไม่อยู่ตัว ความอยู่ตัวของนิวเคลียสนอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าของ n:p แล้วยังขึ้นกับค่าอื่น ๆ

อีกในทางควันตัม เมคานิคส์ ความอยู่ตัวขึ้นอยู่กับ Binding Energy ด้วย

ดังนั้น นิวเคลียสจะไม่อยู่ตัว ถ้าค่าของ n:p ไม่อยู่ในช่วงที่จะทำให้มันอยู่ตัว สารที่มีนิวเคลียสไม่อยู่ตัวเรียกว่า สารกัมมันตภาพรังสี ซึ่งมันจะพยายามทำให้นิวเคลียสของมันอยู่ตัวด้วยการสลายตัวส่งกัมมันตภาพรังสีออกมา

นอกจากนี้ยังมีสารกัมมันตภาพรังสีอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นจากการยิงอนุภาคนิวตรอนหรือโปรตอนเข้าไปในนิวเคลียสที่อยู่ตัว สารกัมมันตภาพรังสีทวกนี้ เรียกว่า สารกัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น

## กัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ

<u>ประวัติและการค้นพบ</u> มีรายงานเป็นหลักฐานฉบับแรกเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ เมื่อปี 1896 ซึ่งเขียนโดย Henry Becquerel เขาพบว่าแร่ยูเรเนียมสามารถทำให้ฟิล์มถ่ายรูปดำได้เช่นเดียวกับรังสีเอกซ์ เขากล่าวว่าแร่ยูเรเนียม จะส่งรังสีซึ่งมีกำลังทะลุทะลวงมากเช่นเดียวกับรังสีเอกซ์ออกมา การที่ธาตุในธรรมชาติสามารถส่งรังสีออกจากตัวเองได้ เรียกว่า ธาตุนั้นเป็นกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ ต่อมาพบว่า มีธาตุหลายชนิดที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับยูเรเนียม ที่สามารถส่งรังสีออกจากตัวเองได้ ได้แก่ธาตุซึ่งมี Atomic Number เกิน 83 ขึ้นไป ต่อมาวิชาวิทยาศาสตร์เจริญขึ้น ได้มีเครื่องมือที่จะใช้วัดกัมมันตภาพรังสีมากขึ้น จากการทดลองของ Rutherford ในปี ค.ศ. 1903 พบว่า สารกัมมันตภาพรังสีจะส่งรังสีออกมา 3 ชนิด คือ แอลฟ่า บีตา และแกมม่า

<u>ชนิดของรังสีที่ส่งออกมาจากสารกัมมันตภาพรังสี</u>

1. รังสี แอลฟ่า
2. รังสี บีตา
3. รังสี แกมม่า

**รังสีแอลฟ่า** (Alpha)

เป็นอนุภาค (Particle) อนุภาคแอลฟ่า คือ นิวเคลียสของฮีเลี่ยม ซึ่งประกอบไปด้วยโปรตอน 2 ตัว และนิวตรอน 2 ตัว ดังนั้น แอลฟ่าจึงมีมวลมาก คือ 4.00380 a.m.u. หรือ $6.6 \times 10^{-24}$ กรัม เนื่องจากมันมีโปรตอน 2 ตัว ดังนั้นมันจึงมีประจุเป็น +2 Electronic Charge หรือ $+9.606 \times 10^{-10}$ esu. (ซึ่งประจุของโปรตอนมีค่าเท่ากับประจุของอีเลคตรอน) เพราะว่าแอลฟ่ามีประจุมากคือ +2 ดังนั้นเมื่อมันวิ่งไปในอากาศ มันจะ Ionize อากาศ ทำให้เกิด Ion Pair มาก จึงทำให้มันหมดพลังงานไปเร็ว ด้วยเหตุนี้ Range ของแอลฟ่าในอากาศจึงสั้นมากราว ๆ 2 - 3 เซ็นติเมตร ถ้าเราทราบพลังงานของแอลฟ่า เราก็สามารถคำนวณหา Range ของมันได้จากสูตรต่อไปนี้คือ

$$R = 0.318\, E^{3/2}$$

005412

ซึ่ง R = Range มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

E = พลังงานแอลฟ่าเป็น Mev.

ในการที่จะทำให้เกิด Ion Pair ในอากาศ แต่ละคู่ จะต้องใช้พลังงานประมาณ 35 ev. และไม่ขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคแอลฟ่า Specific Ionization หรือจำนวน Ion Pair ต่อหนึ่งหน่วยความยาวเป็นปฏิภาคกลับกับ ความเร็วของอนุภาค และใน 1 เซนติเมตรจะมีอิออนเป็นจำนวนพัน ๆ คู่ Range ของแอลฟ่าสามารถวัดได้ด้วย Stopping Power ของสารที่มันผ่านไปซึ่งมีสูตรหา Stopping Power ดังนี้

$$S \approx 0.563 \frac{Z}{(Z+10)^{\frac{2}{3}}}$$

---

๗ Rex. B. Purcell, Lecture Note on Nuclear Instrumentation, ( Physics Department , Chulalongkorn University , 1960 ) , หน้า ๓

i 17910624

S = Stopping Power ที่ N.T.P.
(เหมือนกับ R ซึ่งเป็น Range ในอากาศนั่นเอง)
Z = Atomic Number ของสารที่แอลฟ่าผ่านไป

**รังสีบีตา** (Beta)

อนุภาคบีตาเป็นอิเลคตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบที่ออกมาจากนิวเคลียส ดังนั้น บีตาก็ควรมีคุณสมบัติเหมือนอิเลคตรอน คือมีมวลน้อยมาก เท่ากับ 0.0005468 a.m.u. มีประจุไฟฟ้าเท่ากับประจุของอิเลคตรอน คือ -1 Electronic Charge หรือ $-4.803 \times 10^{-10}$ esu. เพราะว่ามันมีประจุน้อยกว่าแอลฟ่า เพราะฉะนั้น Range ของมันในอากาศจึงยาวกว่า Range ของแอลฟ่า และอาจมี Range ในอากาศหลายเซ็นติเมตร

**รังสีแกมม่า** (Gamma)

รังสีแกมม่าจัดอยู่ในพวกรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง มีประจุเท่ากับ 0 หน่วย Specific Ionization ที่ทำให้เกิดขึ้นโดยแกมม่ามีค่า $\frac{1}{100}$ เท่า ของค่าที่ทำให้เกิดโดยอิเลคตรอนที่มีพลังงานเท่ากัน

รังสีแกมม่านี้มีพลังงานน้อยมากกว่า 100 Kev. การที่จะทำให้เกิด Ion Pair แต่ละคู่มันจะเสียพลังงาน 32.5 ev. ในทางปฏิบัติ Range ของรังสีแกมม่ายาวกว่า Range ของรังสีบีตามาก รังสีแกมม่าที่พลังงานต่ำเมื่อมันชนอะตอมแล้ว มันจะไปชนถูกอิเลคตรอนที่อยู่ในวงนอก ๆ ของอะตอม สำหรับรังสีแกมม่าที่มีพลังงานมากขึ้นเรื่อย ๆ ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Photoelectric Effect, Compton Effect, Pair Production ตามลำดับ และท้ายที่สุดถ้าพลังงานมากพอจะทำให้เกิด Photonuclear Reaction

Positron

อนุภาคโปสิตรอน เหมือนกับบีตาทุกอย่าง แต่แตกต่างกันที่มีประจุเป็นบวกเท่านั้น เพราะฉะนั้น โปสิตรอน ก็คืออิเลคตรอนบวกที่มีความเร็วสูง ซึ่ง

เกิดขึ้นภายในนิวเคลียส

<u>นิวตริโน</u> (Neutrino)

นิวตริโนเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง คือไม่มีประจุไฟฟ้า และมีมวลนิ่ง (Rest Mass) น้อยมากจนถือได้ว่ามีมวลนิ่งเป็นศูนย์ เกิดขึ้นในขบวนการ $\beta$- Decay และ $\mu$- Decay ก่อนจะมีการค้นพบนิวตริโน สิ่งที่ทำให้นักฟิสิกส์งงกันแปลกใจก็คือ ในขบวนการ $\beta$- Decay มีพลังงานส่วนหนึ่งหายไป ต่อมา Fermi ได้ตั้งทฤษฎีเกี่ยวกับเรื่อง $\beta$- Decay และสรุปว่า ในขบวนการนี้จะต้องมีอนุภาคซึ่งไม่มีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย อนุภาคที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวรับเอาพลังงานส่วนที่หายไปในขบวนการ $\beta$- Decay นั้นไปทำให้ตัวมันเกิดมีพลังงานจลน์ขึ้น เขาให้ชื่ออนุภาคซึ่งเป็นกลางนั้นว่า นิวตริโน ($\nu$) และต่อมาอีกไม่นานก็มีผู้ค้นพบอนุภาคนิวตริโน และอนุภาคแอนไทของมัน คือ แอนไทนิวตริโน ($\bar{\nu}$) ตามลำดับ อนุภาคนิวตริโน และแอนไทนิวตริโน จัดอยู่ในหมวก Lepton เช่นเดียวกับ $e^-$ $e^+$ $\mu^-$ และ $\mu^+$ ในปฏิกริยานิวเคลียร์ที่มี Lepton เกี่ยวข้องด้วยต้องเป็นไปตามกฎ Lepton Number Conservation

ปัจจุบันนี้นักฟิสิกส์มีความรู้ในเรื่องอนุภาคมูลฐานอย่างกว้างขวาง และพบว่านิวตริโน มี 4 ตัวคือ นิวตริโนที่เกิดจาก $\beta$-Decay เรียกว่าอีเลคตรอนนิวตริโน ($\nu_e$) ส่วนที่เกิดจาก $\mu$-Decay เรียกว่ามิวออนนิวตริโน ($\nu_\mu$) และอนุภาคแอนไทของมัน คือ $\bar{\nu}_e$ และ $\bar{\nu}_\mu$ ตามลำดับ ดังนั้น ในปัจจุบัน อนุภาคมูลฐานจึงมีรวมทั้งสิ้น 34 ตัว อนุภาคตัวสุดท้ายที่ค้นพบคือ $\bar{\Xi}^\circ$(Anti-Xi-Zero) พบโดยคณะนักฟิสิกส์ 13 ท่านแห่งมหาวิทยาลัย Yale และ Brookhaven National Laboratory เมื่อเดือนสิงหาคม ค.ศ. 1963 นับตั้งแต่นักฟิสิกส์กลุ่มนี้ค้นพบอนุภาคมูลฐานตัวที่ 34 แล้ว ที่ Brookhaven และที่ศูนย์วิจัยอนุภาคที่มีพลังงานสูงทั่วโลกกำลังตรวจหาอนุภาคตัวใหม่ คือ Negative Omega อยู่อย่างแข็งขัน

<u>Internal Conversion</u>

เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียสที่อยู่ใน Excited State กลับ

เข้าสู่ Ground State โดยการส่งรังสีแกมม่าออกมา เมื่อรังสีแกมม่าไปชนอิเลคตรอนที่วิ่งอยู่ใน Orbit ที่ใกล้ ๆ นิวเคลียสก็จะทำให้อิเลคตรอนนั้นกระเด็นออกมา อิเลคตรอนตัวที่หลุดออกมาเรียกว่า Conversion Electron ถ้าเกิดที่ K-Sheel เรียก K-Conversion ถ้าเกิดที่ L-Shell เรียก L-Conversion

Transmutation

เมื่อธาตุกัมมันตภาพรังสีสลายตัว ให้ $\alpha$, $\beta^-$, $\beta^+$ หรือ K-Capture จะเกิดมีการเปลี่ยนแปลงขึ้น (Transmutation) ส่วนที่เหลือจากการสลายตัวเรียกว่า "Daughter Product" ซึ่งจะกลายเป็นธาตุใหม่ที่มีคุณสมบัติทางเคมีไม่เหมือนธาตุเดิม "Parent"

นิวเคลียสที่ส่งแอลฟ่าออกมานั้น Daughter Product จะมี Atomic Number ลดลง 2, ส่วน Mass Number ลดลงไป 4 ตัวอย่างเช่นการสลายตัวของเรเดียม ซึ่งเมื่อส่งแอลฟ่าออกมาแล้ว ผลที่เหลือจะได้ เรดอน ดังแสดงในสมการ

$$_{88}Ra^{226} \longrightarrow {}_{86}Rn^{222} + {}_{2}He^{4}$$

ในกรณีของพวกที่สลายตัวให้บีตา นิวเคลียสของ Parent จะส่งประจุลบออกมา ดังนั้น ผลที่เหลือคือ Daughter Product จะมีประจุบวกเพิ่มขึ้น 1 ตัวและ Atomic Number จะเพิ่มขึ้น 1 แต่ว่า Mass Number ไม่เปลี่ยนแปลงตัวอย่างเช่น

$$_{82}Pb^{214} \longrightarrow {}_{83}Bi^{214} + {}_{-1}e^{0} + \bar{\nu}$$

สำหรับพวกที่สลายตัวให้ โปสิตรอน นิวเคลียสของมันจะส่งประจุบวกออกมา ทำให้ผลที่เหลือคือ Daughter มีประจุบวกน้อยลงไป 1 ตัว Atomic

Number ลดลงไป 1 ตัว Mass Number ไม่เปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น

$$_{28}Ni^{57} \longrightarrow {}_{27}Co^{57} + {}_{1}e^{0} + \gamma$$

พวก K - Capture เป็นแบบหนึ่งของการสลายตัว ดังนั้น การเกิด Transmutation ก็แบบเดียวกับในกรณีของพวกที่สลายตัวให้โปสิตรอน

$$_{28}Ni^{57} + {}_{-1}e^{0} \longrightarrow {}_{27}Co^{57} + \gamma$$

ผลของการสลายตัวจะทำให้เกิด Transmutation ส่วนนิวเคลียสที่เหลืออยู่ จะอยู่ในสภาพะ Excited State ซึ่งนิวเคลียสที่อยู่ในลักษณะอย่างนี้ มันจะส่งรังสีแกมม่าออกมา จนกระทั่งถึง Ground State ตัวอย่างของการแปลงตัวที่กล่าวมาแล้วทุกอันจะมีรังสีแกมม่าเกิดขึ้นด้วยเสมอ มีธาตุกัมมันตภาพรังสีอยู่จำนวนไม่น้อยเหมือนกันที่สามารถสลายตัวโดยไม่ส่งรังสีแกมม่าออกมา

## อนุกรมของกัมมันตภาพรังสี

(Radioactive Series)

เมื่อธาตุกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ เกิด Transmutation ขึ้น Daughter Product จะกลายเป็นธาตุใหม่ และคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของธาตุใหม่ จะต่างออกไปจากธาตุเดิม ปรากฏการณ์อย่างนี้เป็นปรากฏการณ์ทางนิวเคลียร์

ในทางปฏิบัติได้แบ่งธาตุกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติทุกชนิด ซึ่งมี Atomic Number จาก 81 ถึง 92 ออกเป็น 3 พวก คือ

1. อนุกรมธอเรียม (Thorium Series) เขียนแทนด้วย 4n
2. อนุกรมยูเรเนียม (Uranium Series) เขียนแทนด้วย 4n + 2

3. อนุกรมแอคตินียม (Actinium Series) เขียนแทนด้วย 4n + 3

น้ำหนักอะตอมของธอเรียมเท่ากับ 232 ซึ่งเท่ากับ 4 x 58 พวกธาตุกัมมันตภาพรังสี เมื่อมันสลายตัวให้ แอลฟา ยอดที่เหลือจะมีน้ำหนักอะตอมลดลงไป 4 ถ้าธาตุนั้นสลายตัวให้รังสีแกมม่า น้ำหนักอะตอมของธาตุที่เกิดใหม่จะคงเดิม อันนี้เอง สมาชิกของธาตุใน อนุกรมธอเรียม จึงเขียนแทนด้วย 4n ซึ่ง n คือเลขใด ๆ ที่มีค่าตั้งแต่ 58 (ธอเรียม) ถึง 52 (ธอเรียม D .)

ในทำนองเดียวกัน สมาชิกของพวกอนุกรมยูเรเนียม จึงเขียนแทนด้วย 4n + 2 และอนุกรมแอคตินียม เขียนแทนด้วย 4n + 3

จากนี้ จะเห็นได้ว่า ไม่มีกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติของธาตุใดที่มีน้ำหนักอะตอม เขียนแทนด้วย 4n + 1 ดังนั้น ในปี 1923 A.S. Russell ซึ่งเป็นนักเคมีชาวอังกฤษ ผู้มีความคิดไกลเกี่ยวกับ อนุกรมของกัมมันตภาพรังสี จึงได้ให้ข้อเสนอแนะว่า ควรจะมีอนุกรมของธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมแทนด้วย 4n + 1 ซึ่งต่อมาเราก็ทราบว่า มีอนุกรมของ 4n + 1 จริง แต่ว่าได้จากการประดิษฐ์ขึ้นจากการที่ค้นพบธาตุใหม่ซึ่งมี Atomic Number มากกว่า 92 ที่สามารถมีไอโซโทป หลายชนิด อนุกรมนี้เรียกว่า อนุกรมเนพจูเนียม "Neptunium Series" End Product ของอนุกรมนี้เป็น บิสมัธ (Bismuth) ธรรมดา ซึ่งมีน้ำหนักอะตอม 209 สำหรับ อนุกรมยูเรเนียม และ อนุกรมแอคตินียมนั้น End Product ก็คือตะกั่วซึ่งไม่เป็นกัมมันตภาพรังสี

เชื่อกันว่า อนุกรมเนพจูเนียมนี้ เคยเกิดขึ้นในธรรมชาติครั้งหนึ่งแล้วแต่ได้สาปสูญไปเนื่องจาก เวลาชีวิตครึ่งสั้นมาก เวลาชีวิตครึ่งของเนพจูเนียม $^{237}$ มีค่าเท่ากับ $2.20 \times 10^{6}$ ปี ซึ่งถือว่ายาวที่สุดในอนุกรม (4n + 1) โดยคาดคะเนว่าโลกเรามีอายุ $2.2 \times 10^{9}$ ปี อนุกรมเนพจูเนียมที่มีในธรรมชาติจึงได้สลายตัวกลายเป็นบิสมัธหมดแล้ว

ในปี ค.ศ. 1940 E.M. Mcmillan และ R.H. Abelson ได้ค้นพบธาตุที่ได้จากการประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งมี Atomic Number 93 Mass Number 239 อันเกิดจาก Uranium$^{239}$ สลายตัวรังสีบีตาออกไป ดังสมการ

$$_{92}U^{239} \longrightarrow {}_{93}Np^{239} + {}_{-1}e^{0} + \bar{\nu}$$

ธาตุที่ได้จากการสลายตัวของ $_{92}U^{239}$ เรียกว่า เนพจูเนียม ตามอย่างชื่อดาวเนพจูน ( Neptune ) ซึ่งดาวเนพจูนอยู่ถัดไปจากดาวยูเรนัส ( Uranus) ในระบบสุริยะ ต่อมาในไม่ช้าก็ค้นพบ ไอโซโทป ของ เนพจูเนียม $^{239}$ โดยการยิง ยูเรเนียมออกไซด์ ด้วย ดิวทีเรียม ดังสมการ

$$_{92}U^{238} + {}_{1}H^{2} \longrightarrow {}_{93}Np^{238} + 2\ {}_{0}n^{1}$$

## ธาตุกัมมันตภาพรังสีที่ไม่ได้อยู่ในอนุกรม

จากการวิจัยอย่างละเอียดและถูกต้อง ปรากฏว่า สารส่วนมากมีกัมมันตภาพรังสีประกอบอยู่ด้วยเล็กน้อย กัมมันตภาพรังสีที่เป็นส่วนประกอบจำนวนเล็กน้อย ซึ่งมีอยู่ในเนื้อสารนั้น บางคนอาจคิดว่าเกิดมาจากการส่งรังสีของธาตุใดธาตุหนึ่งที่อยู่ในอนุกรมใด ๆ ของอนุกรมกัมมันตภาพรังสี แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า บางทีพวกธาตุเบา ๆ ก็เป็นธาตุกัมมันตภาพรังสีอย่างอ่อน ๆ เหมือนกัน ดังตาราง (7) ที่แสดงไว้หน้า 30

ในปัจจุบันยังไม่มีหลักฐานยืนยันว่า นิวไคลด์ของธาตุในตาราง (7) เกี่ยวข้องกับอนุกรมหนึ่งอนุกรมใดเลย ดังนั้น ธาตุแต่ละตัวเหล่านี้จึงไม่มีอนุกรมและเกิดขึ้นเองในธรรมชาติ

## กัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นเอง

(Artificial Radioactivity)

Curie และ Joliot เป็นผู้พบกัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นเอง ขณะที่เขาทั้งสองกำลังศึกษาผลที่เกิดจากการยิงอนุภาค แอลฟา เข้าไปในนิวเคลียส

ที่เบา ๆ เมื่อยิงอนุภาค แอลฟ่า จากโพโลเนียม (Polonium) เข้าไปในนิว-เคลียสของ โบรอน แมกนีเซียม, และ อลูมิเนียม ปรากฏว่า ได้โปรตอนและนิวตรอนออกมา คือเกิดปฏิกริยา ( $\alpha$ , p ) และ ( $\alpha$ , n ) นอกจากนี้ยังมีอิเลคตรอนบวก หรือ โปสิตรอน เกิดขึ้นด้วย

Curie และ Joliot ได้สังเกตเห็นว่าพวกที่ให้ โปสิตรอนนั้นเป็นพวกธาตุเบา ๆ ซึ่งใช้เป็นเป้า (Target) เมื่อธาตุเบา ๆ ถูกยิงด้วยอนุภาค แอลฟ่า มันก็จะส่งโปสิตรอนออกมาเรื่อย ๆ และถึงแม้ว่าจะเลิกยิงอนุภาคแอลฟ่าแล้วก็ตาม ก็ยังคงมีโปสิตรอนออกมาอีก อัตราการส่งโปสิตรอนนั้นลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลา จนในที่สุดเป็น o และเมื่อเขียนกราฟระหว่างอัตราการส่ง โปสิตรอนกับเวลา (หลังจากเลิกยิงด้วยอนุภาคแอลฟ่าแล้ว) จะได้ Exponential Curve เช่นเดียวกับกรณี $\beta$ - Decay ของ Natural Radionuclide และ Activity ก็สามารถคำนวณหาได้จากสูตร ดังนี้ คือ

$$A = A_o e^{-\lambda t}$$

$A_o$ = Activity เดิม

$A$ = Activity หลังจากที่สลายตัวไปแล้ว ในเวลา $t$

$\lambda$ = ค่าคงตัว (Decay Constant)

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

ในเมื่อ $T_{\frac{1}{2}}$ = เวลาชีวิตครึ่ง

โบรอน แมกนีเซียม และอลูมิเนียมซึ่งใช้เป็นเป้านั้น มีเวลาชีวิตครึ่ง 14, $2\frac{1}{2}$ และ $3\frac{1}{4}$ นาที ตามลำดับ

Curie และ Joliot อธิบายว่า นิวเคลียสที่เกิดจาก ( $\alpha$ , n ) Reaction ในแต่ละกรณีนั้น ไม่อยู่ตัว มีสลายตัวโดยส่งโปสิตรอนออกมาปฏิกริยาทางนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้น ตามคำอธิบายของ Curie มีดังต่อไปนี้

(a) $_5B^{10} + _2He^4 \longrightarrow \left[ {}_7N^{14} \right] \longrightarrow {}_7N^{13} + {}_0n^1$

$$_{7}N^{13} \longrightarrow {}_{6}C^{13} + {}_{1}e^{0} \; ; \; T_{\frac{1}{2}} = 14 \text{ นาที}$$

(b) $$_{13}Al^{27} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow \left[{}_{15}P^{31}\right] \longrightarrow {}_{15}P^{30} + {}_{0}n^{1}$$

$$_{15}P^{30} \longrightarrow {}_{14}Si^{30} + {}_{1}e^{0} \; ; \; T_{\frac{1}{2}} = 3\tfrac{1}{4} \text{ นาที}$$

ต่อมาภายหลังทราบว่า เวลาชีวิตครึ่งของ $_{7}N^{13}$ และ $_{15}P^{30}$ เป็น 10 นาที และ $2\frac{1}{3}$ นาที มากกว่าที่จะเป็น 14 และ $3\frac{1}{4}$ นาที ดังสมการข้างบน

จากการทดสอบสมการข้างบนนี้ ทางเคมีพบว่าธาตุที่เกิดใหม่เป็น ธาตุกัมมันตภาพรังสี แสดงว่า เราสามารถประดิษฐ์ธาตุกัมมันตภาพรังสีจากธาตุธรรมดาได้ ธาตุกัมมันตภาพรังสีที่ประดิษฐ์ขึ้นซึ่งเกิดจากปฏิกริยาของ (n, $\gamma$), (n, p), (n, $\alpha$) และ (d, p) จะสลายตัวให้ $e^{-}$ ดังนี้

$$_{49}In^{115}(n, \gamma)\ _{49}In^{116} \; ; \; _{49}In^{116} \longrightarrow {}_{50}Sn^{116} + {}_{-1}e^{0}, \; T_{\frac{1}{2}} = 13 \text{ วินาที}$$

$$_{7}N^{14}(n, p)\ _{6}C^{14} \; ; \; _{6}C^{14} \longrightarrow {}_{7}N^{14} + {}_{-1}e^{0}, \; T_{\frac{1}{2}} = 5568 \text{ ปี}$$

$$_{13}Al^{27}(n, \alpha)\ _{11}Na^{24} \; ; \; _{11}Na^{24} \longrightarrow {}_{12}Mg^{24} + {}_{-1}e^{0}, \; T_{\frac{1}{2}} = 15 \text{ ชั่วโมง}$$

$$_{15}P^{31}(d, p)\ _{15}P^{32} \; ; \; _{15}P^{32} \longrightarrow {}_{16}S^{32} + {}_{-1}e^{0}, \; T_{\frac{1}{2}} = 14.5 \text{ วัน}$$

ส่วนพวกที่ได้จากปฏิกริยา (p, $\gamma$), (p, n), ($\alpha$, n), (d, n) และ ($\gamma$, n) จะสลายตัวให้ โปสิตรอนออกมาดังนี้

$$_{6}C^{13}(p, \gamma)\ _{7}N^{13} \; ; \; _{7}N^{13} \longrightarrow {}_{6}C^{13} + {}_{1}e^{0}, \; T_{\frac{1}{2}} = 10 \text{ นาที}$$

$$_{28}Ni^{58}(p,n)_{29}Cu^{58};\ _{29}Cu^{58} \longrightarrow {}_{28}N^{58} + {}_{+1}e^{0};\ T_{\frac{1}{2}} = 2.6 \text{ วินาที}$$

$$_{7}N^{14}(\alpha,n)_{9}F^{17};\ _{9}F^{17} \longrightarrow {}_{8}O^{17} + {}_{1}e^{0};\ T_{\frac{1}{2}} = 70 \text{ วินาที}$$

$$_{7}N^{14}(d,n)_{8}O^{15};\ _{8}O^{15} \longrightarrow {}_{7}N^{15} + {}_{1}e^{0};\ T_{\frac{1}{2}} = 2.1 \text{ นาที}$$

$$_{15}P^{31}(\gamma,n)_{15}P^{30};\ _{15}P^{30} \longrightarrow {}_{14}Si^{30} + {}_{1}e^{0};\ T_{\frac{1}{2}} = 2.5 \text{ นาที}$$

Transuranium Elements

ปฏิกริยาที่ทำให้เกิด Artificial Radionuclei ที่ดีที่สุดก็ คือ Radiative Capture of Neutron (หรือ $(n,\gamma)$ Reaction ซึ่งจะให้ธาตุที่เป็น Electron Emitter ในปี ค.ศ. 1934 Fermi ได้ให้ข้อเสนอแนะว่าเราสามารถจะประดิษฐ์ธาตุซึ่งมีประจุมากกว่า 92 ได้ด้วยการยิงยูเรเนียมด้วยนิวตรอน

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow \left[{}_{92}U^{239}\right] \longrightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma$$

ถ้ายูเรเนียม 239 สลายตัวให้อิเลคตรอนออกมา ก็จะทำให้เกิดธาตุซึ่งมี $z = 93$ ซึ่งสมัยก่อน ๆ ไม่ทราบว่ามันคืออะไร จากการทดลองในสมัยแรก ๆ นั้น แสดงว่า เมื่อ ยูเรเนียม ถูกยิงด้วย นิวตรอน จะมี $\beta$ - Activity เกิดขึ้น 4 ชนิดด้วยกัน หนึ่งในจำนวนนี้ได้แก่ ยูเรเนียม $^{239}$ ซึ่งจะสลายตัวให้อิเลคตรอนออกมา แล้วเกิดธาตุซึ่งมี $z = 93$ ธาตุที่มี $z$ มากกว่า 92 เรียกว่า "Transuranium Element"

ในระหว่างปี 1931-1939 ได้มีผู้ที่พยายามจะพิสูจน์ (Identify) พวก Transuranium Element แต่ปรากฏว่าพิสูจน์ได้ยาก การวิจัยเกี่ยวกับเรื่องที่ทำให้เกิด นิวเคลียร์ ฟิสชั่น (Nuclear Fission) ทำให้สามารถศึกษา

และประดิษฐ์พวก Transuranium Element ใหม่ ๆ ได้ ในปี ค.ศ. 1940 ได้มีผู้พิสูจน์ให้เห็นว่า การยิงด้วยนิวตรอนช้า (Slow neutron) ทำให้เกิด ไอโซโทป ใหม่ของ ยูเรเนียม $^{239}$ มีเวลาชีวิตครึ่ง 23 นาที เป็นตัวส่ง อีเลคตรอน (Electron Emitter) มันจะสลายตัวเป็น ไอโซโทป อันใหม่ ซึ่งมี Z = 93 เวลาชีวิตครึ่ง 2-3 วัน และ เป็นตัวส่งอีเลคตรอน เช่นเดียว กัน เรียกว่า "เนพจูเนียม" แล้วจะสลายตัวให้อีเลคตรอนต่อไป เกิด พลูโตเนียม (Plutonium Z = 94) ซึ่งมีประโยชน์ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู ได้เป็นอย่างดี

ตาราง 3

๔

The Uranium Series

| Radioelement | Corresponding Element | Symbol | Radiation | Half Life |
|---|---|---|---|---|
| Uranium I | Uranium | $U^{238}$ | $\alpha$ | $4.51 \times 10^{9}$ yr. |
| Uranium $X_1$ | Thorium | $Th^{234}$ | $\beta$ | 24.1 days |
| Uranium $X_2$ | Protactinium | $Pa^{234}$ | $\beta$ | 1.18 min. |
| Uranium II | Uranium | $U^{234}$ | $\alpha$ | $2.48 \times 10^{5}$ yr. |
| Ionium | Thorium | $Th^{230}$ | $\alpha$ | $8.0 \times 10^{4}$ yr. |
| Radium | Radium | $Ra^{226}$ | $\alpha$ | $1.62 \times 10^{3}$ yr. |
| Ra Emanation | Radon | $Rn^{222}$ | $\alpha$ | 3.82 days |
| Radium A 99.98% \| 0.02% | Polonium | $Po^{218}$ | $\alpha$ and $\beta$ | 3.05 min. |
| Radium B | Lead | $Pb^{214}$ | $\beta$ | 26.8 min. |
| Astatine-218 | Astatine | $At^{218}$ | $\alpha$ | 2 sec. |
| Radium C 99.96% \| 0.04% | Bismuth | $Bi^{214}$ | $\beta$ and $\alpha$ | 19.7 min. |
| Radium C' | Polonium | $Po^{214}$ | $\alpha$ | $1.6 \times 10^{-4}$ sec. |
| Radium C'' | Thallium | $Tl^{210}$ | $\beta$ | 1.32 min. |
| Radium D | Lead | $Pb^{210}$ | $\beta$ | 19.4 yr. |
| Radium E ~100% $2 \times 10^{-4}$% | Bismuth | $Bi^{210}$ | $\beta$ and $\alpha$ | 5.0 days |
| Radium F | Polonium | $Po^{210}$ | $\alpha$ | 138.4 days |
| Thallium-206 | Thallium | $Tl^{206}$ | $\beta$ | 4.20 min. |
| Radium G (End Product) | Lead | $Pb^{206}$ | Stable | -- |

๔ Samuel Glasstone, Sourcebook on Atomic Energy, ( 2nd. Ed. New Jersey. D. Van Nostrand Co., Inc. 1960), หน้า ๑๓๓

ตาราง 4

The Actinium Series

| Radioelement | Corresponding Element | Symbol | Radation | Half Life |
|---|---|---|---|---|
| Actinouranium | Uranium | $U^{235}$ | $\alpha$ | $7.13\times10^{8}$ yr. |
| Uranium Y | Thorium | $Th^{231}$ | $\beta$ | 25.6 hr. |
| Protactinium | Protactinium | $Pa^{231}$ | $\alpha$ | $3.43\times10^{4}$ yr. |
| Actinium 98.8% \| 1.2% | Actinium | $Ac^{227}$ | $\beta$ and $\alpha$ | 21.8 yr. |
| Radioactinium | Thorium | $Th^{227}$ | $\alpha$ | 18.4 days |
| Actinium K | Francium | $Fr^{223}$ | $\beta$ | 21 min. |
| Actinium X | Radium | $Ra^{223}$ | $\alpha$ | 11.7 days |
| Ac Emanation | Radon | $Rn^{219}$ | $\alpha$ | 3.92 sec. |
| Actinium A ~100% \| $\sim5\times10^{-4}$% | Polonium | $Po^{215}$ | $\alpha$ and $\beta$ | $1.83\times10^{-3}$ sec. |
| Actinium B | Lead | $Pb^{211}$ | $\beta$ | 36.1 min. |
| Astatine-215 | Astatine | $At^{215}$ | $\alpha$ | $\sim10^{-4}$ sec. |
| Actinium C 99.7% \| 0.3% | Bismuth | $Bi^{211}$ | $\alpha$ and $\beta$ | 2.16 min. |
| Actinium C' | Polonium | $Po^{211}$ | $\alpha$ | 0.52 sec. |
| Actinium C'' | Thallium | $Tl^{207}$ | $\beta$ | 4.76 min. |
| Actinium D (End Product) | Lead | $Pb^{207}$ | Stable | -- |

---

๙ เรื่องเดียวกัน หน้า ๑๓๕

ตาราง 5

[๑๐] The Thorium Series

| Radioelement | Corresponding Element | Symbol | Radiation | Half Life |
|---|---|---|---|---|
| Thorium | Thorium | $Th^{232}$ | $\alpha$ | $1.39 \times 10^{10}$ yr. |
| Mesothorium I | Radium | $Ra^{228}$ | $\beta$ | 6.7 yr. |
| Mesothorium II | Actinium | $Ac^{228}$ | $\beta$ | 6.13 hr. |
| Radiothorium | Thorium | $Th^{228}$ | $\alpha$ | 1.91 yr. |
| Thorium X | Radium | $Ra^{224}$ | $\alpha$ | 3.64 days |
| Th Emanation | Radon | $Rn^{220}$ | $\alpha$ | 52 sec. |
| Thorium A | Polonium | $Po^{216}$ | $\alpha$ | 0.16 sec. |
| Thorium B | Lead | $Pb^{212}$ | $\beta$ | 10.6 hr. |
| Thorium C 66.3% \| 33.7% | Bismuth | $Bi^{212}$ | $\beta$ and $\alpha$ | 60.5 min. |
| Thorium C' | Polonium | $Po^{212}$ | $\alpha$ | $3 \times 10^{-7}$ sec. |
| Thorium C'' | Thallium | $Tl^{208}$ | $\beta$ | 3.1 min. |
| Thorium D (End Product) | Lead | $Pb^{208}$ | Stable | — |

[๑๐] เรื่องเดียวกัน หน้า ๑๓๔

ตาราง 6

The Neptunium Series[๑๑]

| Element | Symbol | Radiation | Half Life |
|---|---|---|---|
| Plutonium | $Pu^{241}$ | $\beta$ | 13.2 yr. |
| ↓ Americium | $Am^{241}$ | $\alpha$ | 462 yr. |
| ↓ Neptunium | $Np^{237}$ | $\alpha$ | $2.20 \times 10^{6}$ yr. |
| ↓ Protactinium | $Pa^{233}$ | $\beta$ | 27.4 days |
| ↓ Uranium | $U^{233}$ | $\alpha$ | $1.62 \times 10^{5}$ yr. |
| ↓ Thorium | $Th^{229}$ | $\alpha$ | $7.34 \times 10^{3}$ yr. |
| ↓ Radium | $Ra^{225}$ | $\beta$ | 14.8 days |
| ↓ Actinium | $Ac^{225}$ | $\alpha$ | 10.0 days |
| ↓ Francium | $Fr^{221}$ | $\alpha$ | 4.8 min. |
| ↓ Astatine | $At^{217}$ | $\alpha$ | $1.3 \times 10^{-2}$ sec. |
| ↓ Bismuth | $Bi^{213}$ | $\beta$ and $\alpha$ | 47 min. |
| 98% ↓ Polonium | $Po^{213}$ | $\alpha$ | $4.2 \times 10^{-6}$ sec. |
| 2% ↓ Thallium | $Tl^{209}$ | $\beta$ | 2.2 min. |
| ↓ Lead | $Pb^{209}$ | $\beta$ | 3.32 hr. |
| Bismuth (End Product) | $Bi^{209}$ | Stable | — |

[๑๑] เรื่องเดียวกัน หน้า ๑๓๖

ตาราง 7

Naturally Occurring Radioelement

| Isotope | Half-Life (yrs.) | Type of Emission | Energy (Mev.) |
|---|---|---|---|
| $_{19}K^{40}$ | $1.25 \times 10^{9}$ | Beta | 1.33 |
| | | Gamma | 1.46 |
| $_{37}Rb^{87}$ | $5.0 \times 10^{10}$ | Beta | 0.275 |
| $_{62}Sm^{147}$ | $1.3 \times 10^{11}$ | Alpha | 2.18 |
| $_{71}Lu^{176}$ | $2.4 \times 10^{10}$ | Beta | 0.43 |
| | | | 0.089 |
| | | Gamma | 0.203 |
| | | | 0.306 |
| $_{75}Re^{187}$ | $5 \times 10^{10}$ | Beta | 0.008 |
| | | Gamma | 0.134 |