แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 3
กัมมันตภาพรังสี

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

การค้นพบกัมมันตภาพรังสี ชนิดของรังสี การสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา การสลายตัวให้อนุภาคบีตา การสลายตัวให้อนุภาคแกมมา การสลายตัวเป็นวัฏจักรปิด หน่วยวัดปริมาณรังสี

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้ผู้ศึกษาสามารถ

1. อธิบายการค้นพบกัมมันตภาพรังสี
2. อธิบายและคำนวณค่ากัมมันตภาพรังสี
3. อธิบายและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของชนิดรังสีต่าง ๆ
4. อธิบายความสัมพันธ์ของการสลายตัวอะตอมกัมมันตภาพรังสีที่ให้อนุภาคอัลฟา บีตา และแกมมา
5. อธิบายการสลายตัวเป็นวัฏจักรปิด
6. อธิบายหน่วยวัดปริมาณรังสี

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

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

สื่อการเรียนการสอน

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

การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากพฤติกรรมการมีส่วนร่วมในห้องเรียน
2. ประเมินผลจากแบบทดสอบก่อนและหลังเรียน
3. ประเมินจากการนำเสนอรายงาน

บทที่ 3

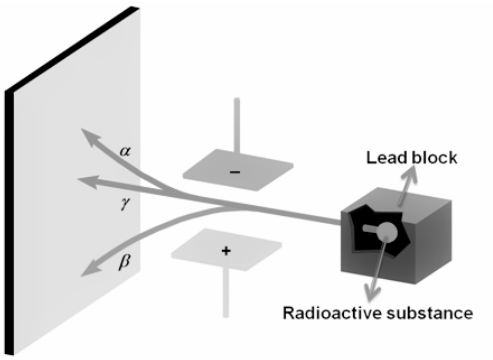
กัมมันตภาพรังสี

การค้นพบกัมมันตภาพรังสี

ในปี ค.ศ. 1895 เป็นจุดเริ่มต้นในการค้นพบสารกัมมันตรังสีโดยนักวิทยาศาสตร์ ชาวเยอรมัน ชื่อ วิลเฮล์ม เรินต์เกน (William Rontgen) และ เซอร์ วิลเลี่ยม ครุกส์ (Sir William Crooks) ซึ่งค้นพบรังสีเอกซ์ในขณะที่ศึกษารังสีแคโทด ต่อมาในปี ค.ศ. 1896 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ อองตอน อองรี เบ็กเคอเรล (Antoine Henri Becquerel) ได้ค้นพบว่ามีรังสีปลดปล่อยออกมาจากผลึกของเกลือยูเรเนียม ซึ่งรังสีดังกล่าวทำให้เกิดรอยบนฟิล์มถ่ายรูปเช่นเดียวกับแสงสว่างและยังสามารถวิ่งทะลุผ่านวัตถุที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กันได้ดี และเขาอธิบายว่ารังสีที่ปลดปล่อยออกมานี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของยูเรเนียมในผลึกของสารที่ใช้ในการพิจารณาและการพบรังสีเช่นนี้เกิดขึ้นมาจากสมบัติของยูเรเนียมเอง ต่อมาได้เรียกการแผ่รังสีแบบนี้ว่ากัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) ส่วนสารที่มีสมบัติการแผ่รังสีแบบนี้จะเรียกว่า สารกัมมันตรังสี หลังจากนั้นมีการศึกษา ค้นคว้าและทดลองเกี่ยวกับสารกัมมันตรังสีอย่างกว้างขวาง ต่อมาในปี ค.ศ. 1898 ปีแอร์และมารี คูรี (Piere & Marie Currie) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากแร่พิทช์เบลนด์และค้นพบธาตุกัมมันตรังสีที่สำคัญอีก 2 ธาตุ ที่มีอยู่ในแร่ชนิดนี้ คือ โพโลเนียม และเรเดียม นอกจากนี้ยังพบว่า รังสีที่ปลดปล่อยออกมานี้ยังสามารถทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออนได้อีกด้วย ต่อมาในปี ค.ศ. 1897 รัทเธอร์ฟอร์ด พบว่า รังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากสารกัมมันตรังสีประกอบด้วยรังสีอัลฟา ที่มีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ และรังสีบีตา มีอำนาจทะลุทะลวงที่สูงกว่า พร้อมทั้งได้อธิบายเพิ่มเติมว่า กัมมันตภาพรังสีเกิดจากการสลายตัวที่เกิดขึ้นเองของนิวเคลียสภายในอะตอม แล้วทำให้เกิดธาตุใหม่ที่มีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม ต่อมาในปี ค.ศ.1900 ปอล วียาร์ด (Paul Villard) เป็นผู้ค้นพบรังสีแกมมา ซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่าทั้งรังสีอัลฟาและรังสีบีตา รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและไม่มีประจุไฟฟ้า ดังนั้นจะไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก (นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2545) ดังภาพที่ 3.1

ภาพที่ 3.1 นักวิทยาศาสตร์ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการค้นพบกัมมันตรังสี

ที่มา: (สุพิชชา จันทรโยธา, 2559, น. 7)



ภาพที่ 3.2 การแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสี

ที่มา: (ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย, ยุทธนา ตันติรุ่งโรจน์ชัย, ทินกร เตียนสิงห์, และพรสวรรค์ อมรศักดิ์ชัย, 2555, น. 42)

ชนิดของรังสี

ในการสลายกัมมันตรังสีของนิวไคลด์ที่ไม่เสถียรหรือเรียกว่านิวไคลด์แม่ (parent nuclide) จะมีกระบวนการสลายตัวเพื่อให้เกิดความเสถียรมากขึ้นจะเรียกนิวไคลด์เหล่านั้นว่านิวไคลด์ลูก (daughter nuclide) เมื่อนิวไคลด์ลูกยังไม่เสถียรก็จะมีการสลายตัวต่อไปเรื่อย ๆ เป็นลูกโซ่จนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อเข้าสู่สภาวะมีความเสถียรภาพของนิวไคลด์ รังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากสารกัมมันตรังสีสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามอำนาจการทะลุทะลวงผ่านเข้าไปในเนื้อสสาร การทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออนและผลของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าต่อรังสีนั้น ๆ ได้ รังสีที่ได้ออกมาจากสารกัมมันตรังสีตามธรรมชาติแบ่งออกได้ 3 ชนิด (ประสงค์ เกษราธิคุณ, 2550) คือ

1. อนุภาคอัลฟา (α - Particle) โดยธรรมชาติ อนุภาคนี้จะเกิดขึ้นเมื่อกับธาตุหนักที่มีนิวไคลด์เลขเชิงอะตอมออยู่ในช่วงที่มากกว่า 82 แต่น้อยกว่า 92 ($82 < Z \leq 92$) โดยอนุภาคชนิดนี้ทำให้เกิดการเรืองแสงในสารบางชนิดและขณะที่อนุภาคอัลฟาเคลื่อนผ่านไปจะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้พลังงานและความเร็วของอนุภาคอัลฟาลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่ออนุภาคอัลฟามีความเร็วไม่มาก มักจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนแล้วทำให้กลายเป็นอะตอมที่เป็นกลาง อนุภาคอัลฟาที่ปลดปล่อยออกมาจากสารกัมมันตรังสีจะมีความเร็วในช่วง 1.4×10^7 เมตรต่อวินาที ถึง 2.2×10^7 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองพบว่า อนุภาคอัลฟาคือ นิวเคลียสของฮีเลียม มีประจุไฟฟ้า +2e และมีมวลประมาณ 4u

2. อนุภาคบีตา (β -Particle) อนุภาคชนิดนี้ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้น้อยกว่าอนุภาคอัลฟา แต่มีอำนาจการทะลุทะลวงมากกว่า จากการทดลองพบว่า อนุภาคบีตาคือ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง คือ มีความเร็วประมาณ 0.99c โดยที่ c คือความเร็วแสง

3. รังสีแกมมา (γ -ray) รังสีแกมมาสามารถทำให้เกิดการเรืองแสงและทำให้ก๊าซแตกตัวได้น้อยกว่าอนุภาคบีตา แต่มีอำนาจการทะลุทะลวงสูงกว่า ทั้งนี้เพราะรังสีแกมมาไม่มีประจุไฟฟ้าและไม่มีมวล รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 1.7×10^{-12} เมตร ถึง 4.1×10^{-10} เมตร

การสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา

อนุภาคอัลฟา (α - particle) เป็นนิวเคลียสของธาตุฮีเลียม มีสัญลักษณ์ ${}^{4}_{2}He$ อัลฟาประกอบด้วยโปรตอน 2 อนุภาคมีประจุไฟฟ้า +2e และมีมวล 4.001516 amu เท่ากับนิวเคลียสอัลฟา มักจะเกิดจากการสลายตัวของธาตุหนัก ๆ ซึ่งมีเลขเชิงอะตอมตั้งแต่ 83 (Bismuth, Bi-83) ขึ้นไป ซึ่งจะมีอัตราส่วนของนิวตรอนต่อโปรตอนสูงมากจึงเกิดความไม่เสถียร ซึ่งส่งผลให้มีแรงผลักคูลอมบ์ระหว่างโปรตอนมากขึ้น ทำให้แรงนิวเคลียร์ลดลงเมื่อโปรตอน 2 อนุภาครวมกับโปรตอน 2 อนุภาค แล้วมีพลังงานมากพอที่เอาชนะพลังงานศักย์ของนิวเคลียสได้ นิวคลีออนกลุ่มนี้จะหลุดออกจากนิวเคลียส หลังการสลายตัวให้อัลฟาแล้ว อาจจะเกิดการปลดปล่อยรังสีแกมมาตามมา ถ้าหลังจากการสลายตัวให้อัลฟาแล้วมีนิวคลีออนอยู่ในสถานะกระตุ้นนิวคลีออนจะลงมาสู่สถานะพื้นโดยการปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีแกมมา เมื่อสลายตัวแล้วจะให้ธาตุใหม่ที่มีเลขมวลน้อยลงไป 4 และเลขอะตอมน้อยลงไป 2

สมการทั่วไปของการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา แสดงได้ดังนี้

$$ {}^{A}_{z}P \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}D + {}^{4}_{2}He + Q \qquad (3.1) $$

เมื่อ

${}^{A}_{z}P$	คือ	นิวไคลด์แม่ (parent nuclide)
${}^{A-4}_{Z-2}D$	คือ	นิวไคลด์ลูก (daughter nuclide)
${}^{4}_{2}He$	คือ	อนุภาคอัลฟา
Q	คือ	พลังงานการสลายตัว (decay energy)

สำหรับการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟานั้นพลังงานของการสลายตัวจะเป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคอัลฟาและนิวไคลด์ลูก ดังสมการ (3.2)

$$Q_\alpha = E_\alpha + E_D \tag{3.2}$$

เมื่อ

E_α คือ พลังงานจลน์ของอนุภาคอัลฟา

E_D คือ พลังงานจลน์ของนิวไคลด์ลูก

ในสถานะก่อนการสลายตัว นิวไคลด์ P จะอยู่ในสภาพนิ่ง ดังนั้น จึงมีพลังงานเท่ากับ $m_P c^2$ และในสถานะหลังการสลายตัว พลังงานรวมของระบบมีค่าเท่ากับ $m_D c^2 + E_D + m_\alpha c^2 + E_\alpha$ จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน จึงเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (3.3)

$$m_p c^2 = m_D c^2 + E_D + m_\alpha c^2 + E_\alpha \tag{3.3}$$

เมื่อ $Q_\alpha = E_D + E_\alpha$ ดังนั้น สามารถคำนวณพลังงานของการสลายตัวได้จากมวลของนิวไคลด์ ดังสมการ (3.4)

$$Q_\alpha = \left(m_p - m_D - m_\alpha\right)c^2 \tag{3.4}$$

เมื่อเปลี่ยนมวลของนิวไคลด์ (m) ให้เป็นมวลของอะตอม (M) เพื่อความสะดวกในการคำนวณด้วยการแทนค่า $m = \left(M - Zm_c\right)$

$$\begin{aligned} Q_\alpha &= \left[\left(M_p - Zm_e\right) - \left\{M_D - \left(Z-2\right)m_e\right\} - m_\alpha\right]c^2 \\ &= \left\{M_p - Zm_e - M_D + Zm_e - 2m_e - m_\alpha\right\}c^2 \\ &= \left\{M_p - M_D - \left(m_\alpha + 2m_e\right)\right\}c^2 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$Q_\alpha = \left(M_p - M_D - M_{He}\right)c^2$$

เมื่อ

M_p คือ มวลของอะตอมแม่ (parent atom)

M_D คือ มวลของอะตอมลูก (daugther atom)

M_{He} คือ มวลของอะตอมฮีเลียม มีค่าเท่ากับ 4.002603 amu

ในสถานะก่อนการสลายตัว นิวไคลด์แม่อยู่นิ่ง ค่าของโมเมนตัมเชิงเส้นจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมนิวไคลด์ลูกและอนุภาคอัลฟาจะต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตรงกันข้าม ทำให้ค่าโมเมนตัมเชิงเส้นรวมมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อ P_D และ P_α เป็นโมเมนตัมเชิงเส้นของนิวไคลด์ลูกและของอนุภาคอัลฟา ดังนั้น จึงเขียนได้ว่า

$$
\begin{aligned}
P_D &= P_\alpha \\
m_D\upsilon_D &= m_\alpha\upsilon_\alpha \\
\frac{1}{2}m_D\upsilon_D^2 &= \frac{1}{2}m_\alpha\upsilon_\alpha^2\left(\frac{\upsilon_D}{\upsilon_\alpha}\right) \\
E_D &= E_\alpha\left(\frac{\upsilon_D}{\upsilon_\alpha}\right) \\
E_D &= E_\alpha\left(\frac{m_\alpha}{m_D}\right)
\end{aligned}
$$

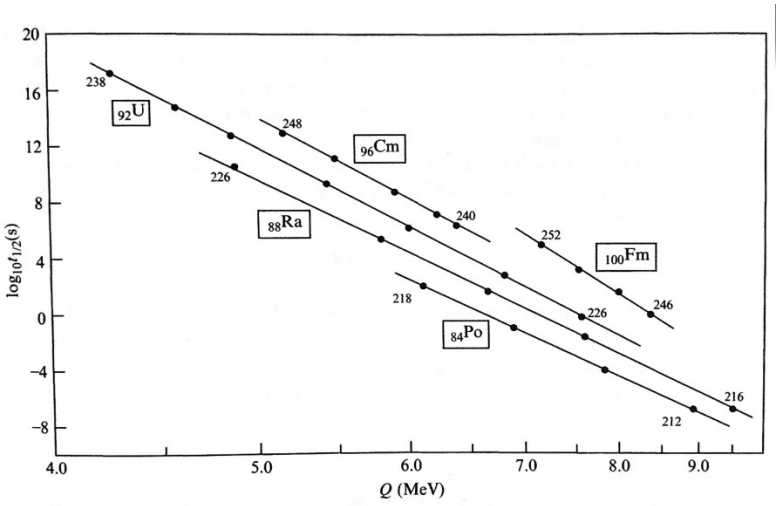
จากความสัมพันธ์ของ E_D กับ E_α นี้ เมื่อแทนค่า จะได้ความสัมพันธ์ของ Q_α และ E_α ดังนี้

$$E_\alpha = \frac{Q_\alpha}{\left(1+\frac{m_\alpha}{m_D}\right)} \qquad (3.6)$$

โดยทั่วไป อนุภาคอัลฟาจะรับพลังงานของการสลายตัวไปมากถึงประมาณ 98% ส่วนที่เหลือเพียง 2 % เป็นพลังงานของนิวไคลด์ลูก พลังงานที่นิวไคลด์ลูกรับไป แม้ว่าจะน้อย แต่มีความสำคัญเช่นกัน เช่น ในการสลายตัวที่ให้ Q = 5 MeV นิวไคลด์ลูกจะมีพลังงานในช่วง 100 keV ซึ่งอาจทำให้นิวไคลด์ลูกที่อยู่บริเวณผิวของสารกัมมันตรังสีหลุดไปได้ แต่ก็ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกล

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้อัลฟามีช่วงค่าครึ่งชีวิตกว้างจากไม่กี่วินาทีจนถึง 10^{15} ปี ในขณะที่ช่วงค่าพลังงานของอัลฟาแคบมาก โดยทั่วไป นิวไคลด์ที่มีมวลมากจะให้อัลฟาที่มีพลังงาน 5-8 MeV ขณะที่นิวไคลด์ที่มีมวลน้อยกว่าจะให้อัลฟาที่มีพลังงาน 1 - 2.5 MeV ดังภาพที่ 3.3 เช่น ^{216}Rn มีครึ่งชีวิต 45 ไมโครวินาที สลายตัวให้อัลฟาที่มีพลังงาน 8.05 MeV ส่วน ^{144}Nd มีครึ่งชีวิต 2.1×10^{15} ปี สลายตัวให้อัลฟาที่มีพลังงาน 1.83 MeV ความสัมพันธ์ส่วนกลับนี้ แสดงได้จากกฎไกเกอร์-นัตทอล (Geiger Nuttalrule) ดังสมการที่ 3.7

$$\log t_{1/2} \quad \alpha \quad \frac{1}{\log E_{\alpha}} \tag{3.7}$$



ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของอัลฟากับค่าครึ่งชีวิต

ที่มา: (Lilley, 2001, p. 85)

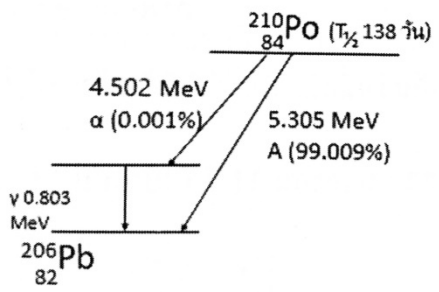
พลังงานของอัลฟาที่ปล่อยจากนิวไคลด์กัมมันตรังสี มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง (discrete) โดยมีค่าเฉพาะแต่ละนิวไคลด์ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนอนุภาคอัลฟากับพลังงาน จะได้สเปกตรัมเชิงเส้น (line spectrum)

ตารางที่ 3.1 ค่าครึ่งชีวิตและพลังงานของการสลายอนุภาคอัลฟาจากนิวไคลด์ธาตุหนัก

$\alpha - Emitter$	$E_\alpha (MeV)$	$T_{1/2}$	$\alpha - Emitter$	$E_\alpha (MeV)$	$T_{1/2}$
^{206}Po	5.22	$8.8 days$	^{236}U	4.49	$2.39x10^7\ yr$
^{208}Po	5.11	$2.90 yr$	^{238}U	4.20	$4.51x10^9\ yr$
^{210}Po	5.31	$1.38 days$	^{238}U	5.50	$86 yr$
^{212}Po	8.78	$0.30 \mu s$	^{240}Pu	5.17	$6.58x10^3\ yr$
^{214}Po	7.68	$164 \mu s$	^{242}Pu	4.90	$3.79x10^5\ yr$
^{216}Po	6.78	$0.15 s$	^{244}Pu	4.66	$8x10^7\ yr$
^{228}U	6.69	$9.1 months$	^{240}Cm	6.29	$26.8 days$
^{230}U	5.89	$20.8 days$	^{242}Cm	6.12	$163 days$
^{232}U	5.32	$72 yr$	^{244}Cm	5.80	$17.6 yr$

ที่มา: (Samuel, 2004, p. 145)

การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี นอกจากจะแสดงได้จากสมการการสลายตัวแล้ว อาจแสดงโดยใช้แบบแผนการสลายตัว ซึ่งให้ข้อมูลการสลายตัวมากกว่า โดยแบบแผนการสลายตัวจะใช้เส้นตรงเฉียงลงด้านซ้ายมีลูกศรชี้ลงจากนิวไคลด์แม่ไปยังนิวไคลด์ลูกแทนการปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาส่วนรังสีแกมมาจะแทนด้วยเส้นหยักหรือเส้นตรง ซึ่งอยู่ในแนวดิ่ง ดังภาพที่ 2.5 แสดงแบบแผนการสลายตัวของ $^{210}_{84}Po$ ที่สลายตัวให้อัลฟาที่มีพลังงาน 2 ค่า คือ 5.305 MeV และ 4.502 MeV ด้วยสัดส่วนของการสลายตัว 99.009% และ 0.001% ตามลำดับ เมื่อสลายตัวให้อนุภาคอัลฟาพลังงาน 5.305 MeV ได้ $^{206}_{82}Pb$ ซึ่งเป็นนิวไคลด์ลูกที่อยู่ในสถานะพื้น แต่เมื่อสลายตัวให้อนุภาคอัลฟาพลังงาน 4.502 MeV นิวไคลด์ลูกจะอยู่ในสถานะกระตุ้น ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าสถานะพื้น 5.305 – 4.502 = 0.803 MeV จึงปลดปล่อยรังสีแกมมา



ภาพที่ 3.4 แบบแผนการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีให้อนุภาคอัลฟา

ที่มา: (สุพิชชา จันทรโยธา, 2559, น. 25)

ตัวอย่างของนิวไคลด์สารกัมมันตรังสีที่มีการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เช่น

$$^{256}_{103}Lr \rightarrow {}^{252}_{101}Md + {}^{4}_{2}He + Q$$

$$^{231}_{91}Pa \rightarrow {}^{227}_{89}Ac + {}^{4}_{2}He + Q$$

$$^{225}_{89}Ac \rightarrow {}^{221}_{87}Fr + {}^{4}_{2}He + Q$$

$$^{221}_{87}Fr \rightarrow {}^{207}_{85}At + {}^{4}_{2}He + Q$$

$$^{185}_{79}Au \rightarrow {}^{181}_{77}Ir + {}^{4}_{2}He + Q$$

$$^{149}_{64}Gd \rightarrow {}^{145}_{62}Sm + {}^{4}_{2}He + Q$$

$$^{231}_{91}Pt \rightarrow {}^{171}_{76}Os + {}^{4}_{2}He + Q$$

ตัวอย่างที่ 3.1 จงคำนวณพลังงานที่ได้จากการสลายตัวและพลังงานจลน์ของอนุภาคอัลฟาจากการสลายตัวของ $^{232}_{90}Th$

กำหนด

$$M_{Th} = 232.03805 \ amu$$

$$M_{Rn} = 228.01337 \ amu$$

$$M_{He} = 4.00260 \ amu$$

ตอบ จากโจทย์ $$^{232}_{90}Th \rightarrow {}^{228}_{88}Rn + {}^{4}_{2}He + Q$$

$$Q_{\alpha} = \left(M_{Th} - M_{Rn} - M_{He}\right)c^2$$

ดังนั้น $$Q_{\alpha} = \left(232.03805 - 228.01337 - 4.00260\right) \times 931.5 \ MeV$$

$$= \left(22.08 \times 10^{-3}\right) \times 931.5 \ MeV$$

$$= 20.567 \ MeV$$

$$E_{\alpha} = \frac{Q_{\alpha}}{\left(1 + \frac{m_{\alpha}}{m_{D}}\right)}$$

$$= \frac{20.567}{1 + \frac{4.00260}{228.01337}}$$

$$= 20.212 \ MeV$$

ดังนั้น พลังงานที่ได้จากการสลายตัวและพลังงานจลน์ เท่ากับ 20.567 และ 20.212 MeV ตามลำดับ

การสลายตัวให้อนุภาคบีตา

การสลายตัวให้อนุภาคบีตาสามารถจำแนกได้ 3 ชนิด (ประสงค์ เกษราธิคุณ, 2550) ได้แก่

1. การสลายตัวแบบบีตาลบ หรือการสลายตัวแบบให้อิเล็กตรอน $\left(\beta^{-}\right)$
2. การสลายตัวแบบบีตาบวก หรือการสลายตัวแบบให้โพซิตรอน $\left(\beta^{+}\right)$
3. การจับอิเล็กตรอน (electron capture ; EC) หรือการที่นิวเคลียสของนิวไคล์รายละเอียดสารกัมมันตรังสีจับอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในอะตอมไว้แล้วก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น

1. การสลายตัวแบบบีตาลบ หรือการสลายตัวแบบให้อิเล็กตรอน

อนุภาคบีตา ($\beta-$particle, ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$) คือ อนุภาคอิเล็กตรอน เกิดขึ้นเมื่อนิวคลีออนภายในนิวเคลียสมีการเปลี่ยนแปลงนิวตรอนมากเกินไป โดยเปลี่ยนเป็นโปรตรอนและอิเล็กตรอนพร้อมแอนตินิวตริโน ซึ่งอนุภาคอิเล็กตรอนมีมวล 0.00055 amu มีประจุ -1e มีอำนาจทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่าง ๆ ได้ดีมากกว่าอนุภาคอัลฟา เพราะมีมวลน้อยกว่าอัลฟามาก สำหรับแอนตินิวตริโนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและมีมวลเท่ากับศูนย์

$$ {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu} \qquad (3.8) $$

การสลายตัวอนุภาคบีตาจะทำให้นิวไคลด์ลูกมีเลขเชิงอะตอมเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วยดังสมการ 3.9

$$ {}^{A}_{z}P \rightarrow {}^{A}_{Z+1}D + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu} + Q \qquad (3.9) $$

แอนตินิวตริโนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุและมีมวลเท่ากับศูนย์พลังงานการสลายตัวให้บีตา (Q_{β}-) จึงคำนวณได้ ดังนี้

$$
\begin{aligned}
Q_{\beta^-} &= \left(m_p - m_D - m_e\right)c^2 \\
&= \left[(M_P - Zm_e) - \{M_D - (Z+1)m_e\ \} - m_e\right]c^2 \\
&= \left[M_p - Zm_e - M_D + Zm_e + m_e - m_e\right]c^2 \\
Q_{\beta^-} &= \left(M_P - M_D\right)c^2 \qquad (3.10)
\end{aligned}
$$

พลังงานที่ได้จากการสลายตัวนี้ จะเป็นพลังงานของบีตาและแอนตินิวตรอนโน ซึ่งจะแบ่งกันในสัดส่วนที่ไม่แน่นอน โดยขึ้นกับทิศทางและโมเมนตัมของบีตา แอนตินิวตรอนโน และนิวไคลด์ลูก ทำให้บีตาที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของนิวไคลด์หนึ่งๆมีสเปกตรัมของพลังงานที่ต่อเนื่อง โดยมีค่าพลังงานตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่าสูงสุด $\left(0 \le E_{\beta^-} \le Q_{\beta^-}\right)$ เมื่อแอนตินิวตรอนโนไม่ได้รับพลังงาน พลังงานเฉลี่ยของบีตา มีค่า 1 ใน 3 ของค่า Q_{β^-} ซึ่งแตกต่างจากอัลฟาที่มีพลังงานเฉพาะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นอาจเขียนความสัมพันธ์การสลายตัวให้บีตาได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{\beta^-} &= E_{\beta^-} + E_v \\ \left(E_{\beta^-}\right)_{\max} &= Q_{\beta^-} = \left(E_v\right)_{\max} \end{aligned} \qquad (3.11)$$

นิวไคลด์กัมมันตรังสีอาจสลายตัวให้บีตาแต่เพียงอย่างเดียวเช่น $^{32}P, ^{14}C, ^{90}Sr, ^{90}Y$ หรือปล่อยรังสีแกมมาออกด้วย ถ้าหลังจากการสลายตัวให้บีตาแล้ว นิวไคลด์ยังอยู่ในสถานะกระตุ้น เช่น $^{20}F, ^{27}Mg$

$^{38}Cl, ^{42}K, ^{60}Co, ^{131}I, ^{203}Hg$ ดังภาพที่ 3.7 ซึ่งเป็นแผนภูมิการสลายตัวของ ^{60}Co ที่ให้อนุภาคบีตาพลังงาน 0.318 MeV จำนวน 99% ของการสลายตัวทั้งหมด ได้นิวไคลด์ลูก $\left(^{60}Ni\right)$ ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ที่มีพลังงานสูงกว่าสถานะพื้น 2.505 MeV จึงสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.173 และ1.332 MeV ตามลำดับ พลังงานสูงสุดที่ได้จากการสลายตัว $\left(Q\right)$ จึงมีค่า 0.318 + 2.505 = 2.823 MeV ^{60}Co อาจสลายตัวให้อนุภาคบีตาพลังงาน 1.491 MeV แต่มีโอกาสเกิดได้น้อยเมื่อสลายตัวแล้วนิวไคลด์ลูกยังมีพลังงานสูงกว่าสถานะพื้น 2.823 – 1.491 = 1.332 MeV จึงให้รังสีแกมมา แล้วมาสู่สถานะพื้น ในแบบแผนการสลายตัวจะใช้เส้นตรงเฉียงลงด้านขวาแทนการปลดปล่อยให้อนุภาคบีตา ส่วนการสลายตัวให้รังสีแกมมายังใช้เส้นหยักเช่นเดิม

ตัวอย่าง การสลายตัวให้อนุภาคบีตาของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

$$\begin{aligned} {}^{32}_{15}P &\rightarrow {}^{32}_{16}S + {}^{0}_{-1}e + \bar{V} \\ {}^{27}_{12}Mg &\rightarrow {}^{27}_{13}Al + {}^{0}_{-1}e + \bar{V} \\ {}^{60}_{27}Co &\rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^{0}_{-1}e + \bar{V} \\ {}^{140}_{56}Ba &\rightarrow {}^{140}_{57}La + {}^{0}_{-1}e + \bar{V} \end{aligned}$$

2. การสลายตัวแบบบีตาบวก หรือการสลายตัวแบบให้โพซิตรอน

อนุภาคโพซิตรอน (β^+ – particle, ${}^{0}_{+1}e$) คืออนุภาคอิเล็กตรอนที่มีประจุบวก มีมวล 0.00055 amu เกิดขึ้นเมื่อนิวคลีออนในนิวเคลียสมีโปรตอนมากไป โปรตอนจะเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอน พร้องทั้งให้อนุภาคโพซิตรอนและนิวตริโนออกมา ดังสมการที่ 3.12

$$ {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu \qquad (3.12) $$

การสลายตัวให้อนุภาคโพซิตรอน จำนวนทั้งหมดของนิวคลีออนจะคงเดิมและเลขอะตอมจะลดลงไป 1 ดังสมการที่ 3.13

$$ {}^{A}_{z}P \rightarrow {}^{A}_{Z-1}D + {}^{0}_{+1}e + \nu + Q \qquad (3.13) $$

การสลายตัวให้อนุภาคโพซิตรอนทำให้นิวไคลด์ลูกมีเลขเชิงอะตอมลดลง 1 หน่วยและในทำนองเดียวกับการสลายตัวให้อนุภาคบีตา พลังงานการสลายตัวให้โพซิตรอน $\left(Q_{\beta^+}\right)$ จะแบ่งกันระหว่างโพซิตรอนและนิวตรอนโน ทำให้พลังงานของโพซิตรอนมีลักษณ์ต่อเนื่อง ซึ่งคำนวณพลังงานการสลายตัว หรือพลังงานสูงสุดของโพซิตรอนได้ ดังนี้

$$
\begin{aligned}
Q_{\beta^+} &= \left(m_p - m_D - m_e\right)C^2 \\
&= \left[(M_P - Zm_e) - \{M_D - (Z-1)m_e\} - m_e\right]C^2 \\
&= \left[M_P - Zm_e - M_D + Zm_e - m_e - m_e\right]c^2 \\
Q_{\beta^+} &= (M_P - M_D - 2m_e)C^2 \qquad (3.14)
\end{aligned}
$$

จากสมการ (3.14) แสดงว่า การสลายตัวให้อนุภาคโพซิตรอนเกิดขึ้นได้ ต่อเมื่อผลต่างของ M_p และ M_D มีค่ามากกว่าพลังของ 2 อิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าเท่าเท่ากับ 0.511×2 = 1.02 MeV อนุภาคโพซิตรอนที่เกิดขึ้นจะอยู่ไม่นาน แล้วเปลี่ยนเป็น 2 โฟตอน ซึ่งแต่ละโฟตอนมีพลังงานเท่ากับ 0.511 MeV กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า แอนนิฮิเลชัน (Annihilation) (นวลฉวี รุ่งธนเกียรติคุณ, 2545)

ตัวอย่าง การสลายตัวให้อนุภาคโพซิตรอนของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

$$^{13}_{7}N \rightarrow ^{13}_{6}C + ^{0}_{+1}e + \nu$$

$$^{22}_{11}Na \rightarrow ^{22}_{10}Ne + ^{0}_{-1}e + \nu$$

$$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{0}_{+1}e + \nu$$

3. การจับอิเล็กตรอน (electron capture ; EC)

การจับอิเล็กตรอนเป็นการสลายตัวของนิวไคลด์สารกัมมันตรังสีอีกรูปแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นกับนิวไคลด์ที่มีโปรตอนมากเกินไป แต่ไม่สามารถเกิดการสลายตัวแบบบีตาบวกได้ โดยจะดึงเอาอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรที่อยู่ใกล้ ๆ มารวมกับโปรตอนแล้วเปลี่ยนไปเป็นอนุภาคนิวตรอนกับนิวตริโน ดังสมการที่ 2.17

$$^{1}_{1}p + ^{0}_{-1}e \rightarrow ^{1}_{0}n + \nu + Q \qquad (3.15)$$

สำหรับอิเล็กตรอนที่ถูกจับเข้าไปรวมกับโปรตอนภายในนิวเคลียสของนิวไคลด์สารกัมมันตรังสีมักจะเป็นอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้น K เนื่องจากอยู่ใกล้กับนิวเคลียสมากที่สุด อาจจะเรียกกระบวนการนี้ว่า การจับอิเล็กตรอนชั้นเค (K-capture) เมื่ออิเล็กตรอนชั้นในถูกจับเข้าไปรวมกับโปรตอนแล้ว อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นถัดไปจะวิ่งเข้าไปแทนที่ โดยทำการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ย่านของรังสีเอกซ์ (X-ray) (Carlos A. Bertulani, 2007) การจับอิเล็กตรอนแสดงดังสมการที่ 3.16

$$^{A}_{Z}p + ^{0}_{-1}e \rightarrow ^{A}_{Z-1}D + \nu + Q_{EC} \qquad (3.16)$$

และยังมีปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กับกระบวนการจับอิเล็กตรอน คือ การเกิดกระบวนการชนกันของรังสีเอกซ์กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรอื่น ๆ พร้อมกับเกิดถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนนั้นเพื่อเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม แล้วทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวนั้นหลุดออกไปจากอะตอม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า โอเจอร์อิเล็กตรอน (auger electron)

การสลายตัวให้รังสีแกมมา

หลังจากการสลายตัวให้รังสีหรืออนุภาคใด ๆ แล้ว หากนิวไคลด์ลูกยังอยู่ในสถานะกระตุ้น ปรากฏการณ์ที่จะตามมาคือ การปรับตัวเข้าสู่สถานะพื้น โดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นั่นคือ รังสีแกมมาหรือโฟตอน พลังงานและความถี่ของรังสีแกมมามีความสัมพันธ์ตามสมการ $E = h\nu$ ช่วงเวลาของการสลายตัวให้รังสีแกมมาสั้นมาก และแตกต่างกันแต่ละนิวไคลด์ โดยมักจะอยู่ในช่วงประมาณ 10^{-11} วินาที จึงทำให้รังสีแกมมาปล่อยออกมาพร้อม ๆ กับการสลายตัวของนิวไคลด์แม่ แต่ในบางนิวไคลด์ก็อาจจะใช้เวลามากกว่า 1 วินาที ในการปรับเข้าสู่สถานะพื้น เช่น ^{137}Cs สลายตัวให้รังสีบีตา ได้นิวไคลด์ลูก (^{137}Ba) ที่มีครึ่งชีวิต 2.55 นาที ในการปรับสู่สถานะพื้น อาจเรียกสถานะเช่นนี้ว่า สถานะอุปเสถียร (Metastable state) และใช้อักษรย่อ m กำกับไว้ที่นิวไคลด์ เช่น ^{137m}Ba หรือ นิวไคลด์ ^{99m}Tc ซึ่งสลายตัวจาก ^{99}Mo มีครึ่งชีวิตของการปรับสู่สถานะพื้นนานถึง 6.02 ชั่วโมง

ในการปรับตัวสู่สถานะพื้นนิวไคลด์อาจจะไม่ลงไปสู่สถานะพื้นทันที แต่จะปรับไปสู่สถานะกระตุ้นที่มีพลังงานระดับพลังงานต่ำลง จนถึงสถานะพื้น ทำให้รังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมามีหลายพลังงาน โดยรังสีแกมมาอาจมีพลังงานได้ตั้งแต่ระดับ eV จนถึงประมาณ 7 MeV

การสลายให้รังสีแกมมามักจะเป็นผลที่ต่อเนื่องมาจากการสลายแบบอื่น ซึ่งมีผลทำให้ระดับพลังงานของนิวเคลียสลดลงเพียงอย่างเดียว จำนวนโปรตอนยังคงเดิม จึงจัดว่าเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสแบบไอโซโทปิก (Isotropic transition) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนิวเคลียสจะคงอยู่ในสถานะกระตุ้นประมาณ10^{-10} วินาที ก่อนการปลดปล่อยรังสีแกมมาเพื่อลดพลังงานมายังสถานะที่มีพลังงานต่ำกว่า แต่ถ้าหากนิวเคลียสยังคงอยู่ในสถานะกระตุ้นได้นานมากกว่า10^{-6} วินาที สถานะกระตุ้นนั้นจะถูกจัดว่าเป็นสถานะกึ่งเสถียรและกระบวนการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสดังกล่าวจะเรียกว่าเป็นแบบไอโซเมอร์ริก (Isomeric transition)

การสลายตัวให้รังสีแกมมาไม่มีผลต่อเลขเชิงมวลและเลขเชิงอะตอมของนิวไคลด์ ก่อนและหลังการสลายตัว เพียงแต่ทำให้มีพลังงานลดลง นิวไคลด์แม่และนิวไคลด์ลูกจึงเป็นไอโซเมอร์ ดังนั้นอาจเรียกการสลายตัวให้รังสีแกมมาว่า การเปลี่ยนแปลงไอโซเมอร์ริก ซึ่งเขียนสมการการสลายตัวได้ดังนี้

$$ {}^{Am}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma \qquad (3.17) $$

^{137}Cs เป็นแหล่งรังสีแกมมาที่สำคัญเช่นเดียวกับ ^{60}Co ซึ่งสลายตัวให้อนุภาคบีตา ดังสมการ (2.18) พลังงานการสลาย (Q) มีค่าเท่ากับ 1.174 MeV จากภาพที่ 2.7 อธิบายได้ว่า 5% ของการสลายตัวนี้ ^{137}Cs ให้อนุภาคบีตาพลังงาน 1.174 MeV แล้วสู่สถานะพื้น ส่วนอีก 95% สลายตัวให้อนุภาคบีตาพลังงาน 0.512 MeV ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า พลังงานของการเปลี่ยนแปลงแบบไอโซเมอร์ริก (Q_{IT}) คำนวณได้จากผลต่างพลังงานของนิวไคลด์ในสถานะกระตุ้น E (^{Am}X) กับสถานะพื้น E (^{A}X) ดังสมการ (3.19)

$$^{137}_{55}Cs \rightarrow ^{137}_{56}Ba + \ ^{0}_{-1}e \qquad (3.18)$$

$$Q_{IT} = \text{E}(^{Am}X) - \text{E}(^{A}X) \qquad (3.19)$$

ถ้ารังสีแกมมาที่ปล่อยออกจากนิวไคลด์ชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ นิวไคลด์นั้น และรังสีแกมมามีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยว ผลักอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การเปลี่ยนภายใน (Internal conversion) โดยอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า คอนเวอร์ชันอิเล็กตรอน (Conversion electron) มีพลังงานเท่ากับผลต่างของพลังงานรังสีแกมมา พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงนั้น ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 3.20 เมื่อ E_e , E_γ และ E_B คือพลังงานของคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอน รังสีแกมมา และพลังงานยึดเหนี่ยว ตามลำดับ

$$E_e = E_\gamma - E_B \qquad (3.20)$$

$$\frac{1}{2}m\upsilon^2 = h\nu - E_B$$

จากสมการ (3.20) เห็นได้ว่า พลังงานของคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอนมีลักษณะเป็นค่าพลังงานเดียว (Monoenergetic) เมื่อนิวไคลด์มีการเปลี่ยนแปลงภายใน แต่หากตรวจวัดสเปกตรัมพลังงานของรังสี จะพบสเปกตรัมเชิงเส้น (line spectrum) ซึ่งเป็นผลเนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนภายใน และให้คอนเวอร์ชันอิเล็กตรอนออกมา เช่น การสลายตัวของ ^{137}Cs ที่ให้รังสีแกมมาเพียง 85 % ดังนั้น การเปลี่ยนภายในจึงเกิดขึ้น 95 – 85 = 10% สัดส่วนของการปล่อยรังสีแกมมาและการเปลี่ยนภายในบอกได้ด้วยค่า คอนเวอร์ชัน เรโช (Conversion ratio, α) เมื่อ α_K เป็นคอนเวอร์ชันเรโช ของ วง K ซึ่งกำหนดความสัมพันธ์ไว้ว่า

$$\alpha_K = \frac{\text{จำนวนคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอนจากวงK}}{\text{จำนวนแกมมาโฟตอนที่ปล่อย}} \quad (3.21)$$

โดยทั่วไป α_K มักมีค่าน้อยกว่า 0.1 และอิเล็กตรอนในวง K ถูกผลักออกไปได้ง่ายกว่าอิเล็กตรอนในวงที่อยู่ห่างออกไป ดังนั้น $\alpha_k < \alpha_L < \alpha_M$

รูปแบบการสลายตัวดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อันได้แก่ การสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา บีตาโพซิตรอนการจับอิเล็กตรอน และการสลายตัวให้รังสีแกมมา เป็นการเปลี่ยนแปลงของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่พบได้โดยทั่วไป

การสลายตัวเป็นวัฏจักรปิด

ในการคำนวณพลังงานการสลายตัว จำเป็นต้องทราบค่ามวลอะตอมหรือมวลของนิวไคลด์ แต่ในบางครั้งที่ยังไม่มีการวัดค่ามวลของอะตอมนั้นๆ หรือเป็นอะตอมกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตที่สั้นมากจำเป็นต้องคำนวณพลังงานการสลายตัวโดยวิธีอื่น ในกรณีที่มีการสลายตัวเป็นวัฏจักรปิด (closed cycledeay) ^{241}Pu สลายตัวให้อนุภาคอัลฟาเป็น ^{237}U ซึ่งจะสลายตัวต่อไปเป็น ^{237}Np พร้อมกับให้อนุภาคบีตา นอกจากนี้ ^{241}Pu ยังสลายตัวให้อนุภาคบีตาเป็น ^{241}Am และจะสลายตัวต่อไปเป็น ^{237}Np พร้อมทั้งให้รังสีอัลฟา การสลายตัวดังกล่าว เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$^{241}_{94}Pu \rightarrow {}^{237}_{92}U + {}^{4}_{2}He$$

$$^{241}_{94}Pu \rightarrow {}^{241}_{95}Am + {}^{0}_{-1}e$$

$$^{241}_{95}Am \rightarrow {}^{237}_{93}Np + {}^{4}_{2}He$$

$$^{237}_{92}U \rightarrow {}^{237}_{93}Np + {}^{0}_{-1}e$$

การสลายตัวเป็นวัฏจักรปิดดังกล่าว อาจใช้ในการคำนวณมวลอะตอม เช่น การสลายตัวให้อนุภาคอัลฟาของ ^{237}U เป็น ^{233}Th สามารถคำนวณพลังงานของการสลายตัวได้ หากทราบค่ามวล แต่หากไม่ทราบค่ามวลของ ^{237}U และ ^{233}Th ก็สามารถคำนวณได้ หากเป็นการสลายตัวเป็นวัฏจักรปิด เมื่อ ^{237}U สลายตัวเป็น ^{237}Np ให้อนุภาคบีตา E_{max} = 0.248 MeV พร้อมทั้งให้รังสีแกมมาพลังงาน 0.267 MeV ส่วน ^{233}Th สลายตัวเป็น ^{233}Pa ด้วยการให้อนุภาคบีตา E_{max} = 1.230 MeV และ ^{237}Np สลายตัวเป็น ^{233}Pa โดยการให้อนุภาคอัลฟาพลังงาน 4.79 MeV

การคำนวณพลังงานการสลายตัวของ $^{237}U \rightarrow {}^{233}Th$ หรือพลังงานของอนุภาคอัลฟาจากการสลายตัวตัวของ ^{237}U เมื่อทราบค่ามวลของ ^{237}Np จึงเริ่มคำนวณจากการสลายตัวของ ^{237}Np ดังนี้

จาก $Q = \left(M_{Np} - M_{Pa} - M_{He}\right)\times 931.5\ MeV$

และ $Q = E_{\alpha}\left(M_{Np} / M_{Pa}\right)\ MeV$

ถ้า $M_{Np} = 237.048030, E_{\alpha} = 4.79 MeV$ และ $M_{Np}/M_{Pa} \approx 237/233$ ดังนั้น

$$4.79(237/233) = (237.048030 - M_{Pa} - 4.002603)\times 931.5 MeV$$

$$M_{Pa} = 233.040196\ amu$$

จาก $Q = \left(M_{Th} - M_{Pa}\right)\times 931.5\ MeV$

เมื่อ Q คือ พลังงานของบีตา ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.230\ MeV$ ดังนั้น

$$1.230 = \left(M_{Th} - 233.040196\right)\times 931.5\ MeV$$
$$M_{Th} = 233.041517\ amu$$

จาก $Q = \left(M_{U} - M_{Np}\right)\times 931.5\ MeV$

เมื่อ Q คือ พลังงานของบีตารวมกับพลังงานของแกมมา

$$Q = 0.248 + 0.267 = 0.515\ MeV$$

ดังนั้น

$$M_{U} = 237.048583\ amu$$

ดังนั้น คำนวณพลังงานการสลายตัวของ $^{237}U \rightarrow {}^{233}Th$ ได้ดังนี้

จาก $Q = \left(M_{U} - M_{Th} - M_{He}\right)\times 931.5\ MeV$

$$= (237.048583 - 233.041517 - 4.002603)\times 931.5$$
$$= 4.157\ MeV$$

และ $E_{\alpha} = Q\left(M_{Th} / M_{U}\right)$

$$= 4.157(233.041517 / 237.048583)$$
$$= 4.088\,MeV$$

นอกจากการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา บีตา การจับอิเล็กตรอน และรังสีแกมมา ซึ่งเกิดกับนิวไคลด์กัมมันตรังสีโดยทั่วไปแล้ว ยังมีการสลายตัวแบบอื่นๆ แต่มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยและพบในบางนิวไคลด์กัมมันตรังสีเท่านั้น เช่น การเกิดฟิชชันขึ้นเองตามธรรมชาติ การปลดปล่อยนิวตรอนช้าและโปรตอนช้า การสลายตัวให้บีตา 2 อนุภาค และให้โปรตอน 2 อนุภาค และการสลายตัวให้อนุภาคหนัก

1. การเกิดฟิชชันขึ้นเองตามธรรมชาติ

ฟิชชันเป็นปฏิกิริยาที่นิวไคลด์แตกออกเป็นส่วน พร้อมให้อนุภาคนิวตรอน 2-3 อนุภาค โดยทั่วไป ฟิชชันเกิดขึ้นเมื่อนิวไคลด์ได้รับพลังงานกระตุ้น ซึ่งฮันน์ (Hann) และชตรัสส์มันน์ (Strassmann) เป็นผู้ค้นพบในปี ค.ศ. 1940 ตัวอย่างของการเกิดฟิชชันโดยการกระตุ้น เช่น การให้นิวตรอนทำปฏิกิริยากับ ^{235}U ได้ผลผลิตฟิชชัน คือ ^{140}Ba หรือ ^{94}Kr รวมทั้งนิวตรอน 2 อนุภาค ดังสมการที่ 3.22

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{140}_{56}Ba + {}^{94}_{36}Kr + 2{}^{1}_{0}n \qquad (3.22)$$

ในปี ค.ศ. 1942 เปตร์จัค (K.A.Petrzhak) และเฟลรอฟ (G.N. Flerov) พบว่าบางนิวไคลด์อาจเกิดฟิชชันขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยไม่ต้องกระตุ้น ซึ่งเขียนสมการการสลายตัวได้ การเกิดฟิชชันขึ้นเอง มักพบในนิวไคลด์ที่หนักๆ ($Z \geq 90$ หรือ $A \geq 230$) เช่น ^{250}Cm, ^{252}Fm และ ^{252}Cf นิวไคลด์เหล่านี้มักมีครึ่งชีวิตที่ยาว

^{235}U สลายตัวให้อนุภาคอัลฟาด้วยครึ่งชีวิต 7 x 10^{8} ปี และสลายตัวด้วยการเกิดฟิชชันขึ้นเองด้วยครึ่งชีวิต 2 x 10^{17} ปี กล่าวคือ มีโอกาสเกิดฟิชชันได้เพียง 1 ใน 200 ล้าน ในทำนองเดียวกับ ^{238}U ที่เกิดฟิชชันขึ้นเองด้วยครึ่งชีวิต 8 x 10^{15} ปี เทียบได้ว่า ^{238}U จำนวน 1 กิโลกรัม จะสลายตัวให้อัลฟา 4.5 x 10^{9} อนุภาค และเกิดฟิชชัน 70 ครั้งต่อวินาที โดยทั่วไป เมื่อนิวไคลด์มีเลขเชิงอะตอมมากขึ้น จะเกิดฟิชชันขึ้นเองได้ง่ายขึ้นด้วย เช่น $^{240}Pu\,(Z=94)$ มีครึ่งชีวิต 1.2 x 10^{11} ปี ขณะที่ $^{244}Cm\,(Z=96)$ มีครึ่งชีวิต 1.4 x 10^{7} ปี หรือ $^{252}Cf\,(Z=98)$ มีครึ่งชีวิต 66 ปี ขณะที่

$^{256}Fm\,(Z=100)$ มีครึ่งชีวิต 3 x 10^{-4} ปี บางนิวไคลด์ที่สลายตัว โดยฟิชชันแต่เพียงอย่างเดียว เช่น ^{252}Cf ซึ่งมีครึ่งชีวิต 60 วัน

2. การสลายตัวให้นิวตรอนหน่วง

นิวไคลด์ที่มีนิวตรอนมากไป **จะสลายตัว**โดยการปลดปล่อยอนุภาคบีตาได้นิวไคลด์ลูกที่มักอยู่ในสถานะกระตุ้น ที่มีพลังงานไม่เพียงพอที่จะสลายให้อนุภาค จึงปลดปล่อยพลังงานส่วนนี้ออกมาในรูปรังสีแกมมา เพื่อปรับตัวสู่สถานะพื้น ในบางกรณี เมื่อนิวไคลด์ปลดปล่อยอนุภาคบีตาแล้ว นิวไคลด์ลูกที่อยู่ในสถานะกระตุ้น มีระดับพลังงานสูงพอที่จะปลดปล่อยให้อนุภาคออกมา และเนื่องจากเป็นนิวไคลด์ที่มีนิวตรอนมากอยู่แล้ว จึงสลายตัวให้นิวตรอนออกมาอย่างรวดเร็ว อนุภาคนิวตรอนนี้ เรียกว่า นิวตรอนหน่วง ปัจจุบัน พบว่า มีประมาณ 100 นิวไคลด์ ที่สามารถสลายตัวให้นิวตรอนหน่วงได้ ซึ่งทั้งหมดเป็นผลผลิตฟิสชัน เช่น ^{87}Br และ ^{131}I

3. การสลายตัวให้โปรตอนหน่วง

การสลายตัวให้โปรตอนหน่วง (Delayed proton) มีลักษณะเช่นเดียวกับนิวตรอนหน่วง โดยเกิดขึ้นกับนิวไคลด์ที่มีโปรตอนมาก หลังการสลายตัวให้โพซิตรอน นิวไคลด์ลูกยังคงมีพลังงานเหลืออยู่มากพอ จึงสลายตัวให้โปรตอนหน่วงอย่างรวดเร็ว นิวไคลด์ที่มีสมบัติเช่นนี้ มักเกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์เช่น ^{53}Co และ ^{21}Mg ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา $^{54}Fe(P,2n)\,^{53}Co$ และ $^{24}Mg\,(P,d,2n)\,^{21}Mg$ ตามลำดับ

4. การสลายตัวให้อนุภาคหนัก

อนุภาคหนักในที่นี้ หมายถึง อนุภาคที่มีมวลมากกว่าอัลฟา เช่น ^{14}C, ^{24}Ne การสลายตัวแบบนี้เกิดกับนิวไคลด์ที่หนัก ซึ่งโดยทั่วไปจะสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา ในปี ค.ศ. 1984 โรส (Rose) และโจนส์ (Jones) พบว่า นอกจาก ^{223}Ra จะสลายตัวให้อนุภาคอัลฟาแล้ว ยังสลายตัวให้ ^{14}C พลังงาน 29.8 MeV ด้วยอัตราส่วน 10^{9} ต่อ 1 การสลายตัวให้ ^{14}C ของ ^{222}Ra และ ^{224}Ra และการสลายตัวให้ ^{24}Ne ของ ^{232}U ก็มีผู้รายงานไว้แต่เป็นการสลายที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย

หน่วยวัดปริมาณรังสี

การวัดปริมาณรังสีมีความจำเป็นและสำคัญมากในทางฟิสิกส์นิวเคลียร์เพราะจะช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับรังสีทั้งหลายได้รับทราบถึงปริมาณรังสีที่ได้รับและยังช่วยให้ผู้ใช้รังสีรู้จักป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นได้อีกด้วย นอกจากการวัดค่ากัมมันตภาพ (Activity; A) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกถึงอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์สารกัมมันตรังสีแล้ว ยังมีหน่วยวัดปริมาณรังสีที่บอกสมบัติอื่น ๆ ของรังสีอื่น เช่น หน่วยวัดปริมาณรังสีที่บอกถึงความสามารถในการก่อให้เกิดไอออน การดูดกลืนพลังงานจากรังสีโดยตัวกลาง และผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นเมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับรังสี เป็นต้น ได้มีหน่วยงานระหว่างประเทศ คือ ICRU (International Commission on Radiation Unit and Measurement) ได้กำหนดการวัดปริมาณรังสีให้เป็นมาตรฐานเดียวกันและได้กำหนดหน่วยวัดปริมาณรังสีไว้ดังต่อไปนี้ (พูนทรัพย์ มิตรสัมพันธ์, 2550)

1. หน่วยวัดค่ากัมมันตภาพ

การวัดค่ากัมมันตภาพ หรือวัดค่าความแรงของสารกัมมันตรังสี เป็นการวัดค่าของกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) ที่แสดงอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ในหน่วยของครั้งต่อวินาที (disintegration per second ; dps) หรือ คูรี (Curie; Ci) และรัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford; Rd) โดยกำหนดให้

1 คูรี หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ 3.7×10^{10} ครั้งต่อวินาที นั้นคือ

$$1Ci = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} \qquad (3.23)$$

1 รัทเธอร์ฟอร์ด หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ 10^6 ครั้งต่อวินาที จะได้ว่า

$$1 \text{ Rd} = 10^6 \text{ dps} \qquad (3.24)$$

นอกจากนี้ยังได้มีการกำหนดหน่วยสากลระบบเอสไอ (SI units) ขึ้นมาใช้ในการวัดปริมาณรังสี คือ เบ็กเคอเรล (Becquerel; Bq) เป็นหน่วยวัดค่ากัมมันตภาพ โดยที่

1 เบ็กเคอเรล หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ 1 ครั้งต่อวินาที

$$1Bq = 1 \text{ dqs} \qquad (3.25)$$

2. เอกซ์โพเชอร์ (Exposure)

เป็นการวัดปริมาณของประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออน เมื่อมีรังสีผ่านไปในตัวกลางที่เป็นอากาศ โดยที่หน่วย ICRU ได้กำหนดให้เรินต์เกน (Roentgen; R) เป็นหน่วยของเอกซ์โพเชอร์และได้กำหนดให้

ปริมาณรังสี 1 เรินต์เกน หมายถึง ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศหนัก 0.001293 กรัม (1ซม.^{3}) ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐานเกิดการแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า 1 esu

โดยส่วนใหญ่แล้ว หน่วยเรินต์เกนมักใช้กับรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ซึ่งเป็นการแสดงถึงความสามารถในการทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออนของโฟตอน

$$1R = 1esu / 0.001293\ g$$

$$= \frac{1esu}{0.001293g} \times \frac{1C}{3\times10^9 esu} \times \frac{10^3 g}{1kg}$$

$$= 2.58 \times 10^{-4}\ C/kg\ \text{ofstandard air}$$

ถ้ามีรังสีวิ่งผ่านอากาศจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นคู่ไอออนเกิดขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงจำนวนของคู่ไอออนที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนนี้ พบว่า ประจุที่เกิดขึ้นจาก 1 คู่ไอออนมีค่าเท่ากับ 4.8×10^{-10} esu และพลังงานของโฟตอน 34 eV ทำให้เกิด 1 คู่ไอออนในอากาศ ดังนั้น

$$1R = \left(\frac{1esu}{1cc\ of\ standard\ air}\right)\left(\frac{1ion\ pair}{4.8\times10^{-10}\ esu}\right)$$

$$= 2.08\times10^9\ ion\ pairs / cc\ of\ standard\ air$$

$$1\ R = \left(\frac{2{,}08\times10^9\ ion\ pairs}{0.001293\,g}\right)\left(\frac{34\ eV}{1ion\ pair}\right)\left(1.602\times10^{-12}\ erg/eV\right)$$

$$= 87.7\ erg / g\ of\ standard\ air$$

สำหรับหน่วยในระบบเอสไอ ใช้หน่วย C/kg ในการแสดงค่าเอกซ์โพเชอร์ ดังนั้น

$$1R = 2.58\times10^{-4}\ C/kg \qquad (3.26)$$

3. แอบซอร์บโดส (Absorbed dose)

แอบซอร์บโดส เป็นค่าที่ใช้วัดปริมาณพลังงานของรังสีที่ตัวกลางใดๆ ดูดกลืนไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางนั้นๆ ที่มีรังสีผ่านเข้าไป ใช้หน่วยวัดเป็น แร็ด (rad) ซึ่งย่อมาจาก radiation absorbed Dose อาจเขียนได้ว่า

แร็ด = พลังงานของรังสี /น้ำหนักของตัวกลาง

ปริมาณรังสี 1 แร็ด หมายถึง ปริมาณของรังสีที่ตัวกลางดูดกลืนพลังงานไว้ได้ 100 เอิร์กต่อกรัมของตัวกลาง

$$1\ rad \ = \ 100\ erg/g$$

หรือ

$$1\ rad \ = \ 10^{-2} \quad J/kg$$

ระบบหน่วยเอสไอ กำหนดให้จูลต่อกิโลกรัม (J/kg) หรือ เกรย์ $(gray; Gy)$ เป็นหน่วยสำหรับแอบซอร์บโดส โดยที่

$$1 \ \ J/kg \ = \ \ 1 \ \ Gy$$

จะได้ว่า

$$1 \ \text{Gy} \ = \ 100 \ \text{rad} \qquad (3.27)$$

เมื่อพิจารณาปริมาณรังสี 1 เรินต์เกน ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงาน 87.7 เอิร์ก ที่ถูกดูดกลืนไว้โดยอากาศ 1 กรัม จะเห็นได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณรังสี 1 แร็ด ดังนั้น ความสัมพันธ์ของหน่วยเอกซ์โพเซอร์และแอบซอร์บโดส จึงประมาณได้ว่า

$$1 \ \text{R} \ \approx \ 1 \ \text{rad} \qquad (3.28)$$

4. โดสอิควิวาเลนต์ (dose equivalent)

รังสีแต่ละประเภทจะถ่ายทอดพลังงานให้กับตัวกลางเท่ากันก็ตาม แต่ตัวกลางเป็นเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นจะไม่เท่ากัน เช่น นิวตรอนที่มีปริมาณ 0.01 เกรย์ ทำให้เกิดผลทางชีววิทยาได้เท่ากับรังสีแกมมาที่มีปริมาณ 0.1 เกรย์ แสดงว่านิวตรอนทำให้เกิดอันตรายได้มากว่ารังสีแกมมาถึง 10 เท่า จะเห็นได้ว่า มีความจำเป็นต้องมีหน่วยโดสอิควิวาเลนต์ เพื่อแสดงผลของรังสีทางชีววิทยาที่เกิดขึ้น

โดยทั่วไปแล้ว จะใช้หน่วย เรม (radiation equivalent dose ; rem) เป็นหน่วยของโดสอิควิวาเลนต์ มักจะใช้หน่วยวัดปริมาณรังสีนี้ในงานด้านชีววิทยาทางรังสี และด้านการป้องกันและความปลอดภัยทางรังสี โดยการพิจารณาจากค่าแอบซอร์บโดสร่วมกับปัจจัยทางชีววิทยาอันได้แก่ ค่ายังผลด้านชีวภาพสัมพัทธ์ (relative biological effectiveness ;RBE) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบผลทางชีววิทยาที่เกิดจากปริมาณรังสีเอกซ์พลังงาน 250 kV กับปริมาณรังสีอื่นๆที่ให้ผลเช่นเดียวกัน เขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\text{RBE} = \frac{Dose\ of\ \ 250\,kV\ \ X-rays\ to\ produce\ a\ certain\ biolo\,gical\ effect}{Dose\ of\ \ a\ given\ radiation\ to\ produce\ the\ same\ biolo\,gical\ effect}$$

สำหรับงานด้านความปลอดภัยและการป้องกันอันตรายจากรังสีนั้น ความเป็นอันตรายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรังสี ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับการดูดกลืนพลังงานของรังสีเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความไวต่อรังสีและการส่งผ่านพลังงานของอวัยวะหรือเนื้อเยื่อที่รับรังสีนั้นๆ หน่วยงาน ICRU ได้แนะนำให้คำนวณค่าโดสอิควิวาเลนต์จากค่าปัจจัยการแจกแจง (distribution factor; DF) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้แสดงถึงการแพร่กระจายของพลังงานของรังสีในเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่างๆและค่าปัจจัยคุณภาพ (quality factor; QF) ซึ่งจะแสดงค่าคุณภาพของรังสีชนิดต่างๆ จะเห็นว่าสามารถคำนวณค่าโดสอิควิวาเลนต์ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{dose equivalent (rem)} = \text{absorbed dose (rad)} \times \text{RBE}$$
$$= \text{absorbed dose (rad)} \times \text{DF} \times \text{QF}$$

สำหรับหน่วยสากล ได้กำหนดให้ หน่วย จูลต่อกิโลกรัม (J/kg)หรือ ซีเวิร์ต (sivert; Sv) เป็นหน่วยของค่าโดสอิควิวาเลนต์ โดยเขียนในรูปความสัมพันธ์กับหน่วย เรม ได้ดังนี้

$$1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Sv}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} \qquad (3.29)$$

ตารางที่ 3.2 สรุปหน่วยที่ใช้วัดปริมาณรังสี

หน่วยวัดปริมาณรังสี	**หน่วยเก่า**	**หน่วยระบบเอสไอ**	**ความสัมพันธ์**
Activity	Ci	Bq	1 Ci = 3.7×10^{10} Bq 1 Bq = 2.7×10^{-11} Ci
Exposure dose	R	C/kg	1 C/kg = 3876 R 1R= 2.58×10^{-4} C/kg
Absorbed dose	Rad	Gy	1 Gy = 100 rad 1 Rad = 0.01 Gy
Dose equivalent	Rem	Sv	1 Sv = 100 rem 1 rem = 0.01 Sv

ที่มา: (นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2545, น. 64)

บทสรุป

การค้นพบสารกัมมันตรังสีเริ่มจากนักวิทยาศาสตร์ได้สังเกตเห็นรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากผลึกของเกลือยูเรเนียมที่ทำให้เกิดรอยคล้ายรอยบนฟิล์มถ่ายรูป ซึ่งรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากสารกัมมันตรังสีประกอบด้วย รังสีอัลฟา ที่มีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ และรังสีบีตา มีอำนาจทะลุทะลวงที่สูงกว่า และรังสีแกมมามีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่าทั้งรังสีอัลฟาและรังสีบีตา โดยรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและไม่มีประจุไฟฟ้า การสลายตัวของอะตอมกัมมันตรังสีที่ให้อนุภาคอัลฟา เมื่อสลายตัวแล้วจะให้ธาตุใหม่ที่มีเลขมวลน้อยลงไป 4 และเลขอะตอมน้อยลงไป 2 การสลายตัวของอะตอมกัมมันตรังสีที่ให้อนุภาคบีตาสามารถจำแนกได้ 3 ชนิด คือ การสลายตัวแบบบีตาลบ หรือการสลายตัวแบบให้อิเล็กตรอน การสลายตัวแบบบีตาบวก หรือการสลายตัวแบบให้โพซิตรอน และการจับอิเล็กตรอนหรือการที่นิวเคลียสของนิวไคล์รายละเอียดสารกัมมันตรังสีจับอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในอะตอมไว้แล้วก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น สำหรับการสลายตัวให้รังสีแกมมาไม่มีผลต่อเลขเชิงมวลและเลขเชิงอะตอมของนิวไคลด์ ก่อนและหลังการสลายตัว เพียงแต่ทำให้มีพลังงานลดลง นอกจากนี้ยังมีการสลายตัวอะตอมแบบอื่น ๆ แต่มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยและพบในบางนิวไคลด์กัมมันตรังสีเท่านั้น เช่น การเกิดฟิชชันขึ้นเองตามธรรมชาติ การปลดปล่อยนิวตรอนช้า และโปรตอนช้า เป็นต้น สำหรับหน่วยวัดปริมาณรังสี สามารถบอกปริมาณรังสีในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ค่ากัมมันตภาพ ใช้บอกถึงอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์สารกัมมันตรังสี หน่วยวัดปริมาณรังสีที่บอกถึงความสามารถในการก่อให้เกิดไอออน การดูดกลืนพลังงานจากรังสีโดยตัวกลาง และผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นเมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับรังสี

คำถามท้ายบทที่ 3

1. จงอธิบายการค้นพบธาตุกัมมันตรังสี
2. จงเปรียบเทียบสมบัติของรังสีอัลฟา บีตา และแกมมา
3. จงยกตัวอย่างนิวไคลด์สารกัมมันตรังสีที่มีการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา
4. จงคำนวณพลังงานที่ได้จากการสลายตัวและพลังงานจลน์ของอนุภาคอัลฟาจากการสลายตัวของ ${}^{185}_{79}Au$
5. จงอธิบายการสลายตัวให้อนุภาคบีตาสามารถจำแนกได้กี่ชนิด อย่างไร
6. ปรากฏการณ์ใดที่เกิดกระบวนการชนกันของรังสีเอกซ์กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรอื่น ๆ พร้อมกับเกิดถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนนั้นเพื่อเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม จงเขียนภาพประกอบในการอธิบาย
7. จงอธิบายจากสมการ ${}^{59}_{29}Cu \rightarrow {}^{59}_{28}Ni + {}^{0}_{+1}e + \nu$ เป็นการสลายตัวให้อนุภาคใด
8. จงยกตัวอย่างอนุภาคที่สลายตัวให้รังสีแกมมามา 2 อนุภาค
9. จงวิเคราะห์การใช้หน่วยวัดรังสีต่าง ๆ ในการใช้งานให้มีความเหมาะสม
10. ปริมาณสารกัมมันตรังสีสลายตัวให้ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ 10 คูรี จะมีค่าเท่ากับกี่เบ็กเคอเรล

เอกสารอ้างอิง

ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย, ยุทธนา ตันติรุ่งโรจน์ชัย, ทินกร เตียนสิงห์, และ พรสวรรค์ อมรศักดิ์ชัย. (2555). **เคมี 1**. กรุงเทพฯ: แมคกรอ-ฮิล.

นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. (2545).**วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประสงค์ เกษราธิกุล. (2550). **ฟิสิกส์นิวเคลียร์.** สงขลา: มหาวิทยาลัยทักษิณ.

พูนทรัพย์ มิตรสัมพันธ์. (2550). **ฟิสิกส์นิวเคลียร์1**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี.

สุพิชชา จันทรโยธา. (2559). **การจัดการกากกัมมันตรังสี.** กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

Samuel, S. M.. (2004). **Introductory Nuclear Physics** (2nd ed**)**. British ; Wiley-VCH.