

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อนุกรมยูเรเนียม (Uranium Series)

อนุกรมนี้เริ่มจากยูเรเนียม-238 (U-238) แล้วไปสิ้นสุดที่ตะกั่ว-206 (Pb-206) ซึ่งเป็นนิวไคลด์ที่เสถียรการสลายตัวแต่ละครั้งจะให้อนุภาคแอลฟาหรือรังสีออกมาได้แก่ อนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา และรังสีแกมมา อนุกรมยูเรเนียมนี้มีธาตุยูเรเนียม-238 เป็น Parent ซึ่งมีอายุยาวที่สุดคือ มีครึ่งชีวิต (half life) 4.5×10^9 ปี มีการสลายตัว 14 ชั้น โดยปล่อยอนุภาคบีตา 6 ครั้ง และอนุภาคแอลฟา 8 ครั้ง นิวไคลด์กัมมันตรังสีทุกตัวในอนุกรมนี้ เมื่อตรวจสอบว่าเลขมวลมีค่า $4n+2$ เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็ม การสลายตัวของอนุกรมนี้สรุปดังแสดงในรูปที่ 2.1 [1]

เรเดียม-226 เป็นนิวไคลด์หนึ่งในอนุกรมยูเรเนียม-238 มีครึ่งชีวิตประมาณ 1620 ปี สลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 186 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (4%) และสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา กลายเป็นเรดอน-222 และสลายตัวต่อไปเรื่อย ๆ ดังแผนภูมิการสลายตัว นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เป็น นิวไคลด์ลูก (Daughter) ของเรเดียม-226 ตัวที่น่าสนใจคือ บิสมัท-214 (Bi-214) ที่ครึ่งชีวิต 27 นาที สลายตัวให้รังสีแกมมาหลายพลังงานที่สำคัญได้แก่ 609 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (43%) และอีกตัวหนึ่งคือตะกั่ว-214 (Pb-214) ซึ่งมีครึ่งชีวิต 20 นาที สลายตัวให้รังสีแกมมาหลายพลังงานที่สำคัญได้แก่ 352 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (35%)

2.2 กฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีไม่ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสภาพแวดล้อมภายนอก นิวเคลียส หากแต่ว่าการสลายตัวนี้เป็นไปตามหลักทางสถิติในส่วนที่เกี่ยวข้องกับโอกาส อัตราการสลายตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของอะตอมที่มีอยู่ กล่าวได้ว่า [11]

$$-dN/dt = \lambda N \quad (2.1)$$

เมื่อ dN/dt = อัตราการสลายตัว (disintegration rate)

λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)

N = จำนวนอะตอมที่มีอยู่ ณ เวลา t ใดๆ

ถ้า N_0 = จำนวนอะตอมที่มีอยู่ ที่เวลา $t = 0$

เมื่อแก้สมการที่ 2.1 แล้วจะได้

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (2.2)$$

เมื่อสารกัมมันตรังสีลดปริมาณลงครึ่งหนึ่งจากที่มีอยู่เดิม จะเรียกช่วงเวลานี้ว่า ครึ่งชีวิต (half life) ของสารนั้น

จากสมการที่ (2.2)

$$N_0 / 2 = N_0 \exp(-\lambda t_{1/2})$$

$$t_{1/2} = 0.693 / \lambda \quad (2.3)$$

$$t_{1/2} = \text{ครึ่งชีวิต (half life)}$$

2.3 ภาวะสมดุลกัมมันตรังสี

สารกัมมันตรังสีซึ่งสลายตัวอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งอาจเกิดภาวะสมดุลขึ้นได้ แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

2.3.1 ภาวะสมดุลทรานเซียนต์ (Transient equilibrium)

เกิดขึ้นเมื่อครึ่งชีวิตของสาร A มากกว่าครึ่งชีวิตของสาร B มาก นั่นคือค่าคงที่ของการสลายตัวของ B มากกว่าค่าคงที่การสลายตัวของ A ดังนั้น

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{\lambda_B - \lambda_A}{\lambda_A}$$

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B - \lambda_A N_B$$

$$A_A = A_B - \lambda_A N_B$$

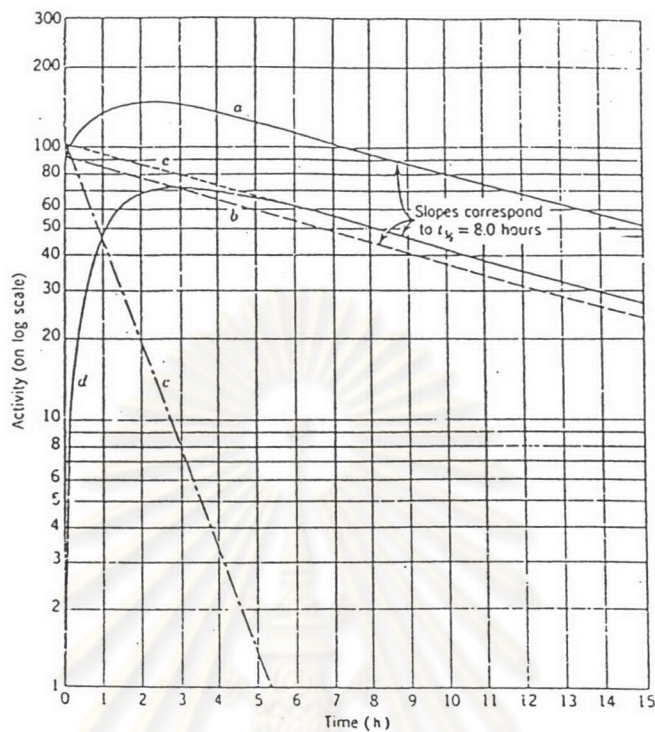
เนื่องจาก $\lambda_B > \lambda_A$ ดังนั้นเมื่อเกิดภาวะสมดุล อัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพของสาร A กับสาร B จะน้อยกว่า 1 เสมอ ในภาวะนี้สาร B จะสลายตัวเหมือนว่ามีครึ่งชีวิตเท่ากับครึ่งชีวิตของสาร A สาร B เกิดจากสาร A ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.2

จากจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป อัตราส่วนกัมมันตภาพของสาร A และ B จะมีค่าคงที่เรียกช่วงเวลานี้ว่า สารทั้งสองเกิดภาวะสมดุลทรานเซียนต์

U-238 Decay Series

Isotope	Half-life	Gamma energy(keV)
U238	4.468 x 10 ⁹ years	----
Th234	24.1 days	63.3 (4.47%) 92.38 (2.60%) 92.80 (2.56%)
Pa234m	1.17 minutes	765 (0.207%) 1001 (0.59%)
Pa234	6.75 hours	100 (50%) 700 (24%) 900 (70%)
U234	2.47 x 10 ⁵ years	53.2 (0.123%)
Th230	8.0 x 10 ⁴ years	67.7 (0.373%)
Ra226	1602 years	186.2 (3.50%)
Rn222	3.823 days	510 (0.076%)
Po218	3.05 minutes	-----
Pb214	26.8 minutes	53.2 (1.1%) 242.0 (7.46%) 295.2 (19.2%) 351.9 (37.1%) 785.9 (1.09%)
At218	2 seconds	-----
Bi214	19.7 minutes	609.3 (46.1%) 768.4 (4.89%) 806.2 (1.23%) 934.1 (3.16%) 1120.3 (15.0%) 1238.1 (5.92%) 1377.7 (4.02%) 1408.0 (2.48%) 1509.2 (2.19%) 1764.5 (15.9%)
Po214	164 microsec	799 (0.014%)
Tl210	1.3 minutes	296 (80%) 795 (100%) 1310 (21%)
Pb210	21 years	46.5 (4.05%)
Bi210	5.01 days	-----
Po210	138.4 days	803 (0.0011%)
Pb206	Stable	-----

รูปที่ 2.1 อนุกรมยูเรเนียม



รูปที่ 2.2 กราฟสมมูลกัมมันตรังสีแบบทรานเซียนต์

2.3.2 ภาวะสมดุลเชกูลาร์ (Secular equilibrium)

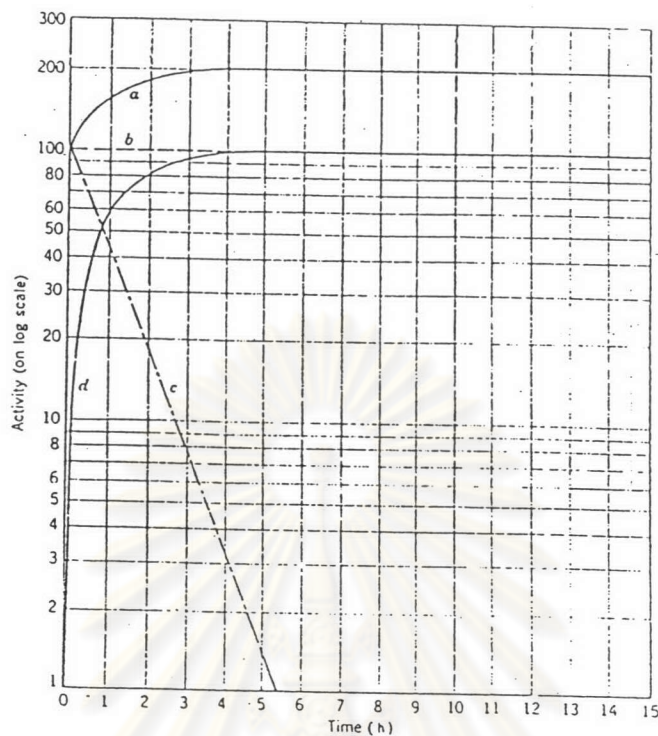
ภาวะสมดุลเชกูลาร์เกิดเมื่อ ครึ่งชีวิตของสาร A มากกว่าครึ่งชีวิตของสาร B มาก ๆ ดังนั้น ค่าคงที่ของการสลายตัวของสาร A น้อยกว่าค่าคงที่ของการสลายตัวของสาร B ดังนั้น

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B$$

$$A_A = A_B$$

เมื่อเกิดภาวะสมดุลเชกูลาร์ กัมมันตภาพของสาร A จะเท่ากับกัมมันตภาพของสาร B ในช่วงเวลานี้เหมือนกับว่าสาร B สลายตัวโดยมีครึ่งชีวิตเหมือนสาร A ดังรูปที่ 2.3

เรเดียม-226 (Ra-226) มีครึ่งชีวิต 1620 ปี สลายตัวเป็นเรดอน-222 (Rn-222) ซึ่งมีครึ่งชีวิต 3.8 วัน เมื่อผ่านไป 28 วัน จะเกิดภาวะสมดุลเชกูลาร์ขึ้น กัมมันตภาพของเรเดียม-226 จะเท่ากับกัมมันตภาพของเรดอน-222 ตลอดเวลา [1]



รูปที่ 2.3 กราฟสมดุลกัมมันตรังสีแบบเชดูลาร์

2.4 รังสีแกมมา

เป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ไม่มีมวล ไม่มีประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสงรังสีแกมมาเกิดขึ้นจากนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความถี่ของคลื่นและความยาวคลื่นเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ [4]

$$E = h\nu \quad (2.4)$$

$$E = hc/\lambda \quad (2.5)$$

เมื่อ E คือ พลังงานของรังสีแกมมา (eV)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant = 4.136×10^{-15} eV.s)

ν คือ ความถี่ของคลื่น (sec^{-1})

c คือ ความเร็วแสง (2.9979×10^{10} cm/s)

λ คือ ความยาวคลื่น (cm)

เมื่อนิวเคลียสอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) ภายหลังจากปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือการสลายตัวให้รังสีแอลฟา บีตาและกระบวนการอื่น ๆ ที่จะกล่าวต่อไป การลดระดับพลังงานของนิวคลีออนลงสู่สถานะพื้น (ground state) จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเรียกว่ารังสีแกมมา ถ้าให้สถานะเริ่มต้นนิวเคลียสมีระดับพลังงาน E_i เป็นสถานะกระตุ้น และ E_f เป็นสถานะสุดท้าย ถ้าสถานะสุดท้ายเป็นสถานะพื้น การลดระดับพลังงานจะสิ้นสุดลง แต่ถ้าสถานะสุดท้ายยังเป็นสถานะกระตุ้นอยู่ การลดระดับพลังงานก็จะเกิดขึ้นอีกจนกระทั่งเป็นสถานะพื้น พลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะเริ่มต้นกับพลังงานของสถานะสุดท้าย ดังนี้

$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f \quad (2.6)$$

2.5. อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

การสูญเสียพลังงานของรังสีแกมมาเมื่อผ่านสสาร จะแตกต่างกับอนุภาคที่มีประจุเพราะอนุภาคที่มีประจุจะสูญเสียพลังงานไปเนื่องจากอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของอะตอมรังสีแกมมาสามารถทะลุผ่านตัวกลางไปได้ไกลโดยไม่มีปฏิกิริยา และอาจไม่สูญเสียพลังงานเลยก็ได้ และเมื่อใดก็ตามที่เกิดการปะทะกับอิเล็กตรอนในอะตอมก็อาจสูญเสียพลังงานไปทั้งหมดและถูกจับไว้หรืออาจสูญเสียพลังงานไปเพียงบางส่วนและหักเหออกมาด้วยความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป จึงกล่าวได้ว่ารังสีแกมมาไม่ได้มีพิสัยจำเพาะ (specific range) ที่แน่นอนเหมือนอนุภาคที่มีประจุ อันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่มีต่อสสารสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ คือ

2.5.1 โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric effect)

เกิดเมื่รังสีแกมมาชนโดยตรงกับอะตอมของตัวกลาง และถ่ายทอดพลังงานทั้งหมด (E_γ) ให้แก่อิเล็กตรอนในวงโคจร และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา (Photoelectron) ด้วยพลังงานจลน์ E_0 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $E_\gamma - E_b$ เมื่อ E_b คือพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อ $E_\gamma > E_b$ หรือกล่าวได้ว่าปฏิกิริยานี้มีค่าเริ่มต้น (Threshold) เท่ากับ E_b เนื่องจากมีโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) หลุดออกมาจะทำให้เกิดช่องว่างในวงโคจร อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นถัดไปจะเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดรังสีเฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) ปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดขึ้นมากเมื่อพลังงานของแกมมามีค่าต่ำกว่า 200 keV โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์จะแปรผันกับ $Z^5 / E_\gamma^{3.5}$ เมื่อ Z คือเลขอะตอม

2.5.2 แพร่โปรดักชัน(Pair production)

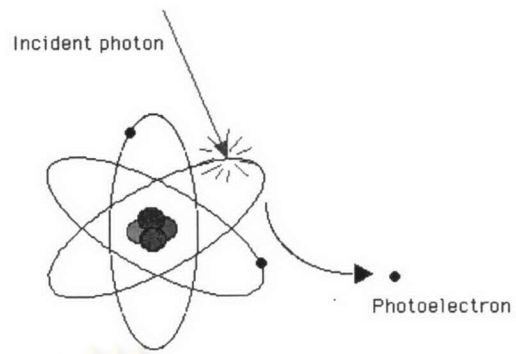
รังสีแกมมาพลังงานสูง ๆ อาจถูกดูดกลืนเมื่อทำปฏิกิริยากับสนามไฟฟ้า (coulombic field) ของนิวเคลียส ทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนเกิดขึ้น เรียกว่าแพร่โปรดักชัน (Pair production) ปฏิกิริยานี้เป็นตัวอย่างของการเปลี่ยนพลังงานไปเป็นมวล ดังนั้นพลังงานเริ่มต้นของรังสีแกมมาจะต้องมีค่าอย่างน้อย 1.022 MeV ถ้ารังสีแกมมาที่ทำให้เกิดแพร่โปรดักชันมีค่ามากกว่า 1.022 MeV พลังงานส่วนที่เหลือจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน และโพสิตรอน โพสิตรอนที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนแล้วทำให้เกิด แอนนิฮิเลชัน คือการเกิดโฟตอน 2 ตัวที่มีพลังงานเท่ากันแต่ละ 0.511 MeV เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งเป็นตัวอย่างการเปลี่ยนมวลไปเป็นพลังงาน โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันโดยตรงกับ Z^2

2.5.3 การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน(Compton scattering)

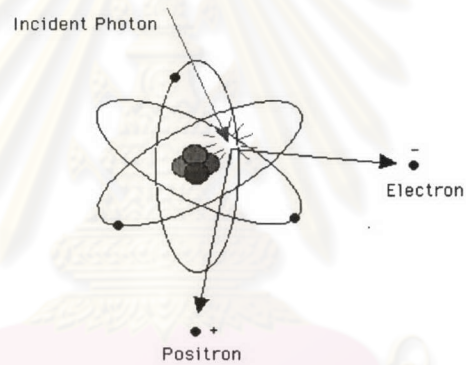
การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน(Compton scattering) หรือการกระเจิงโคฮีเรนท์ (incoherent scattering) เป็นการชนแบบยืดหยุ่น(elastic collision) เกิดเมื่อรังสีแกมมาชนโดยตรงกับอะตอมของตัวกลางและถ่ายทอดพลังงานบางส่วนให้แก่อิเล็กตรอนในวงโคจร อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะมีพลังงานจลน์เท่ากับผลต่างของพลังงานรังสีแกมมาที่เข้ามาและพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน รังสีแกมมาจะสูญเสียพลังงานบางส่วน ทำให้มีพลังงานลดลงและมีทิศทางเปลี่ยนไป ปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดขึ้นมากเมื่อพลังงานแกมมามีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 MeV โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับ Z/E

2.5.4 การกระเจิงแบบโคฮีเรนท์ (Coherent scattering)

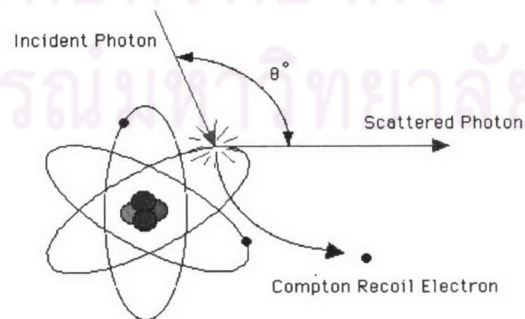
การกระเจิงแบบโคฮีเรนท์ (Coherent scattering) หรือการกระเจิงแบบรียเลย์ (rayleigh scattering) เกิดจากการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ซึ่งไม่มีการสูญเสียพลังงานของรังสี การเกิดอันตรกิริยาเช่นนี้ พลังงานของรังสีเอกซ์หลังเกิดการชนกับอะตอมของตัวกลางยังคงมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนเกิดการชน โดยมีเพียงการเปลี่ยนแปลงทิศทางของรังสีเอกซ์ภายหลังการชนเท่านั้น ปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดขึ้นมากเมื่อพลังงานของแกมมามีค่าต่ำกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน พลังงานอยู่ต่ำกว่า 0.1 MeV ผลรวมของการเกิดอันตรกิริยาในตัวกลางจากปรากฏการณ์ดังกล่าว รวมเรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสี (linear attenuation coefficient, μ)



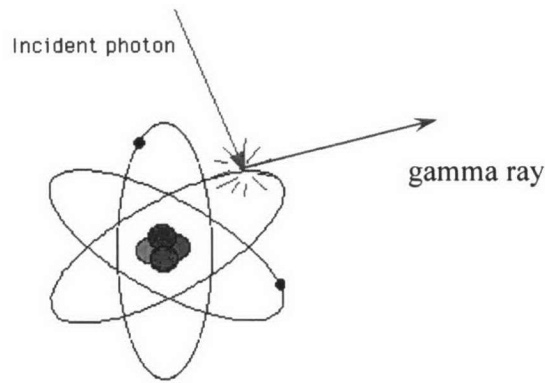
รูปที่ 2.4 แผนภาพการเกิดปฏิกิริยา โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์



รูปที่ 2.5 แผนภาพการเกิดปฏิกิริยา แพร่โปรดักชัน



รูปที่ 2.6 แผนภาพการเกิดปฏิกิริยา การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน



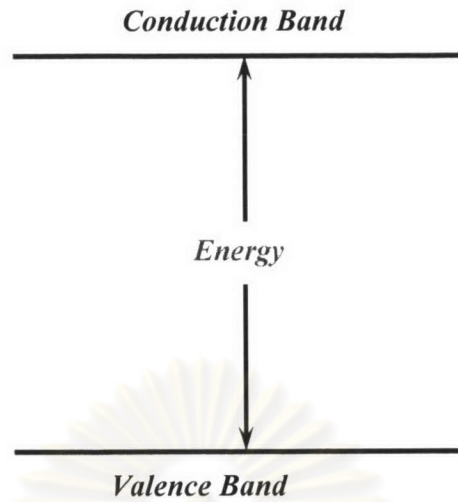
รูปที่ 2.7 แผนภาพการเกิดปฏิกิริยา การกระเจิงแบบ โคฮีเรนซ์

2.6. การวัดพลังงานรังสีแกมมา

เนื่องจากการวัดพลังงานรังสีแกมมาเราไม่สามารถวัดได้โดยตรง ทั้งนี้เป็นเพราะรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ดังนั้นเราจึงต้องทำการวัดพลังงานรังสีทางอ้อม โดยที่อาศัยอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสารคือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ คอมป์ตันเอฟเฟกต์และการเกิดแพร์โพดักชัน ซึ่งมีความสำคัญมาก ส่วนการเกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่นหรือแบบโคฮีเรนซ์ มีความสำคัญในช่วงพลังงานต่ำ ๆ จนถึง 100 keV อิเล็กตรอนที่ยึดเกาะ (bond) อย่างเหนียวแน่นกับธาตุนั้น มักเกิดการกระเจิงแบบนี้ แต่ค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบโคฮีเรนซ์มีค่าน้อยกว่าภาคตัดขวางของโฟโตอิเล็กทริกมากดังที่ได้กล่าวมา [2]

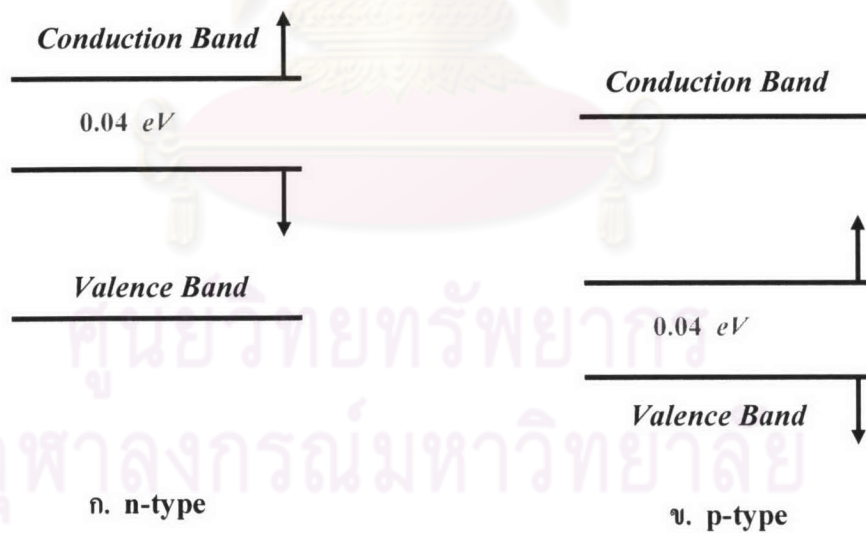
2.6.1. หัววัดรังสีแบบกึ่งตัวนำ

โลหะกึ่งตัวนำ เป็นธาตุที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่ำอยู่ระหว่างโลหะและอโลหะ นำไฟฟ้าได้น้อยกว่าโลหะแต่มากกว่าอโลหะ ธาตุพวกนี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 4 การจับบอนด์ (bond) เป็นแบบโควาเลนต์ (covalent) ธาตุพวกนี้ได้แก่ ธาตุซิลิกอน (silicon, Si) และธาตุเจอร์มาเนียม (germanium, Ge) เป็นต้น โดยปกติแถบพลังงานของธาตุพวกนี้แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.8 แผนภาพแถบพลังงานปกติของธาตุซิลิกอนเขียนตามแกนของพลังงานของอิเล็กตรอน

ช่วงพลังงานตรงช่วง gap มีค่าเท่ากับ 1.1 eV สำหรับซิลิกอน และเท่ากับ 0.66 eV สำหรับเจอร์มาเนียม



รูปที่ 2.9 แผนภาพ n-type และ p-type ของพวกโลหะกึ่งตัวนำ

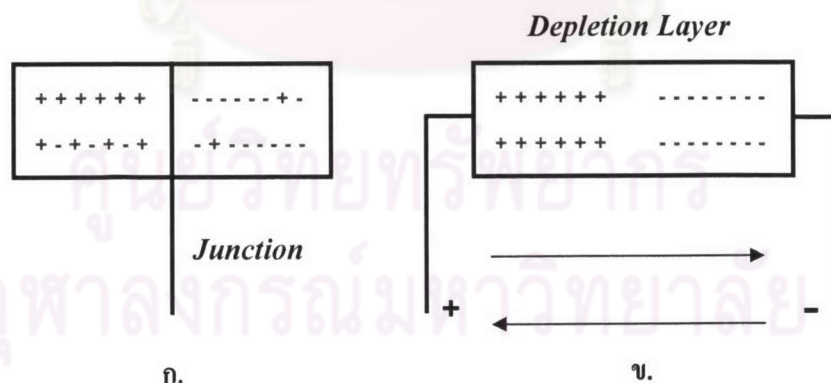
ถ้านำเอาธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเป็น 5 (เช่น อาเซนิก, แอนติโมนี, ฟอสฟอรัส เป็นต้น) จำนวนน้อย ๆ เติมหรือแทรกเข้าไประหว่างอะตอมของธาตุซิลิกอน จะมีอิเล็กตรอนที่เหลือจากการจับคู่อยู่ 1 ตัว ทำให้ธาตุซิลิกอนนี้เป็นตัวนำให้อิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น ช่องว่างระหว่างคอนดักชันแบนด์กับวาเลนซ์แบนด์จะลดลงเหลือ 0.04 eV สำหรับซิลิกอน และ 0.01 eV สำหรับเจอร์มาเนียม ซิลิกอนที่มีอิเล็กตรอนเหลือนี้เรียกว่าเป็นพวกที่ให้อิเล็กตรอน (donor) หรือ (n-type semiconductor) ดังในรูปที่ 2.9

กรณีที่เติมธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 (เช่น โบรอน แกลเลียม) ลงไปในผลึกธาตุซิลิกอนเล็กน้อย จะทำให้ผลึกขาดอิเล็กตรอน ทำให้เป็นพวกที่รับอิเล็กตรอนได้ (acceptor) ความสามารถที่รับอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า โฮล (hole) ซึ่งคล้ายกับประจุไฟฟ้าบวก พวกซิลิกอนแบบนี้เรียกว่า p-type semiconductor มีช่องว่าง 0.04 eV ถัดจากวาเลนซ์แบนด์ขึ้นมา สำหรับซิลิกอน และ 0.01 eV สำหรับเจอร์มาเนียม

2.6.2 หลักการวัดรังสีของผลึกของธาตุพวกโลหะกึ่งตัวนำ

เมื่อเอาผลึก n-type และ p-type ต่อกันดังรูปที่ 2.9 จะมีการกระจายอิเล็กตรอนและโฮลบางส่วนผ่านรอยต่อ (junction)

เมื่อต่อศักดาไฟฟ้าบวกเข้าที่ปลาย n-type และศักดาไฟฟ้าลบเข้าที่ปลาย p-type อิเล็กตรอนและโฮลจะไปออกันอยู่ที่ปลาย n-type และ p-type ตามลำดับ ทำให้มีช่องว่างตรงรอยต่อ เรียกว่าดีเพลชันเลเยอร์ (depletion layer) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับฉนวน



ก.

ข.

รูปที่ 2.10 แผนภาพ n-p type ของโลหะกึ่งตัวนำ

ดังนั้นเมื่อรังสีเข้ามาที่ดีเพทชันเลเยอร์ จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล แล้วต่างวิ่งไปที่โฮลและอิเล็กตรอนอยู่ ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าตามขนาดรังสี แล้วส่งเป็นสัญญาณต่อไปยังอุปกรณ์ช่วยทางอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

2.6.3. ข้อดีของหัววัดแบบโลหะกึ่งตัวนำ

2.6.3.1. วัดได้ละเอียดมาก ในการทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้น ใช้พลังงานเพียง 3.5 eV/pair เท่านั้นเมื่อเทียบกับก๊าซซึ่งต้องใช้ถึง 36 eV/pair

2.6.3.2. มีความไวในการวัดสูง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในหัววัดนั้นประมาณ 1500 ซม² ต่อโวลต์ต่อวินาที และของโฮลมีความไว 500 ซม² ต่อโวลต์ต่อวินาที เวลาที่วิ่งในหัววัดเพียง 10⁻⁸ วินาทีต่อการวัดหนึ่งครั้ง

2.6.3.3. มีกำลังแยกช่วงพลังงาน (Energy Resolution) สูงสามารถแยกพลังงานรังสีแกมมาได้ละเอียดมาก

2.6.4 หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (Hyperpure Germanium Detector, HPGe)

เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้งานวิจัยครั้งนี้ มีหัววัดเป็นผลึกโลหะกึ่งตัวนำของ Ge ซึ่งเป็นแบบ p-n junction ทำมาจาก p-type ของเจอร์มาเนียมที่มีคุณภาพสูงมาก โครงสร้างอะตอมของเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูงต้องการอุณหภูมิต่ำ ๆ เพื่อที่จะรักษาให้ผลึกหัววัดอยู่ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องมีระบบทำความเย็นและถังเก็บไนโตรเจนเหลว หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูงที่ใช้เป็นแบบกระบอกแกนร่วม (cylinder coaxial)



รูปที่ 2.11 ภาพลักษณะต่างๆของหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง

2.7 การวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อม

การวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมสามารถแบ่งได้เป็น การวัดรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Gamma-Rays Measurement) และการวัดรังสีแกมมาในพื้นที่จริง (In-Situ Gamma-Rays Measurement) โดยหลักการแล้วการวัดปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อมนั้น มาจากการวัดกลุ่มตัวอย่าง นั่นคือเมื่อทำการวัดเมื่อใด กลุ่มตัวอย่างที่ถูกวัดนั้นจะเป็นตัวแทนของสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ ณ ขณะนั้น [12]

2.7.1 การวัดปริมาณเรเดียมในสิ่งแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ

การวัดปริมาณรังสีแกมมาของตัวอย่างของสิ่งแวดล้อมในห้องปฏิบัติการในช่วงเวลาที่กำหนด เป็นวิธีที่ง่ายและเพราะเป็นงานสั้น ๆ พื้นที่เล็ก ๆ และการวัดอยู่ภายใต้การควบคุมของสภาวะในห้องปฏิบัติการ การเปรียบเทียบตัวอย่างของสิ่งแวดล้อมกับสารมาตรฐานทำได้ง่ายเพราะมีระบบการวัดที่เหมือนกันจึงสามารถเปรียบเทียบกันได้เลยโดยตรง ส่วนเรื่องของการเตรียมตัวอย่าง (sample preparation) นั้นโดยปกติตัวอย่างที่จะนำมาวัด จะต้องมีการเตรียมเพื่อให้อยู่ในรูปลักษณะเดียวกันเช่น มีขนาดเดียวกัน มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ มีผิวหน้าเรียบ มีความหนาใกล้เคียงกัน โดยต้องไม่หนากว่าความหนาวิกฤต และในขณะเดียวกันตัวอย่างจะต้องนำกลับมาใช้ได้อีก สำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็งและต้องการวัดรังสีแกมมา ปกติจะวัดโดยตรง ซึ่งอาจมีการเตรียมตัวอย่างล่วงหน้าเพียงเล็กน้อย เตรียมตัวอย่างให้มีขนาดพอเหมาะกับหัววัด ส่วนภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างนั้นจะต้องทำด้วยสารที่มีเลขอะตอมต่ำ ๆ เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับเข้าไปในหัววัดอีก เพราะรังสีที่สะท้อนกลับอาจจะไปรบกวนฟิคที่พลังงานต่ำกว่า ในการวัดตัวอย่างเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์มากที่สุดนั้น มีหลักการทั่ว ๆ ไปที่ต้องคำนึงถึงคือ

- ชนิดของหัววัด
- กัมมันตรังสีของตัวอย่าง
- จำนวนตัวอย่างที่จะวัด
- เวลาที่ใช้วัด
- ความยากง่ายในการเตรียมตัวอย่าง

2.7.2 การวัดปริมาณเรเดียมในดิน ณ พื้นที่

การวัดปริมาณเรเดียมในดิน ณ พื้นที่ มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้หัววัดรังสีชนิดโซเดียมไอโอไดด์ ทำการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 352 และ 609 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ที่ปลดปล่อยจากตะกั่ว-214 และ บิสมัท - 214 ซึ่งเป็นนิวไคลด์ลูกของ เรเดียม - 226 หัววัดโซเดียมไอโอไดด์ มีประสิทธิภาพในการวัดสูง สามารถวัดได้ในระยะเวลาอันสั้น แต่มีข้อเสียคือ ค่า resolution ค่อนข้างต่ำ หรืออาจทำการวัดรังสีแอลฟาจากก๊าซเรดอน-222 แล้วนำค่าที่ได้กลับมาวิเคราะห์หาเป็นปริมาณเรเดียม - 226 ก็ได้เช่นเดียวกัน

แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง การการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 186 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ปลดปล่อยจากเรเดียม - 226 โดยตรง ซึ่งจะช่วยให้สะดวกในการวิเคราะห์เนื่องจากสามารถทำการวิเคราะห์ได้ในทันทีโดยไม่ต้องเสียเวลารอเพื่อให้ equilibrium และหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูงสามารถทำการแยกแยะพลังงานได้ดี ทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการวิเคราะห์น้อย

2.8 การปรับแก้ค่าการดูดกลืนรังสีในดิน

ในการวัดรังสีแกมมาพลังงานต่ำจากตัวอย่างที่มีปริมาตร จะมีการดูดกลืนรังสีในตัวเอง ทำให้ความเข้มรังสีที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่แท้จริง ขั้นตอนทำการปรับแก้ผลการวัดรังสีให้ถูกต้อง เมื่อแกมมาผ่านสสาร จะทำให้ความเข้มข้นรังสีลดลง เป็นไปตามสมการ

$$\frac{-dS}{dx} = \mu S \quad (2.6)$$

เมื่อ S = ความเข้มของรังสีแกมมาต่อหน่วยปริมาตรที่สามารถทะลุผ่านออกมาจากวัสดุ

S_0 = ความเข้มของรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุต่อหน่วยปริมาตร

μ = สัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation coefficient) เชิงเส้นของรังสีซึ่งขึ้นกับค่าพลังงานของรังสีแกมมา และชนิดของตัวดูดกลืน

x = ความหนาของวัสดุ

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.6) จะได้

$$S = S_0 e^{-\mu x} \quad (2.7)$$

ถ้าให้ a คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

A คือ ความเข้มรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่างที่มีพื้นที่หน้าตัด a ความหนา x

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\begin{aligned}
 A &= \int_0^x S_0 a e^{-\mu x} dx \\
 &= \left[\frac{S_0 a (1 - e^{-\mu x})}{\mu} \right]_0^x \\
 &= \frac{A_0 (1 - e^{-\mu x})}{\mu x} \\
 \frac{A_0}{A} &= f \\
 &= \frac{(1 - e^{-\mu x})}{\mu x}
 \end{aligned}$$

- A = ค่าความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านไปถึงผิวหน้าตัวอย่าง (ค่าที่วัดได้)
 A_0 = ค่าความเข้มรังสีที่ถูกต้อง
 f = ค่า self absorption factor

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย