

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 กฎการสลายตัวของนิวไคลด์

นิวไคลด์ที่มีการสลายตัวเรียกว่า “นิวไคลด์กัมมันตรังสี” (radioactive nuclide) สารที่มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรียกว่า “สารกัมมันตรังสี” ปรากฏการณ์ที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีสลายตัวให้อนุภาคหรือรังสี เช่น แอลฟา บีตา หรือแกมมาออกมาเรียกว่า “กัมมันตภาพรังสี” (radioactivity)

นิวเคลียสของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพของนิวเคลียสอยู่ตลอดเวลาเพื่อที่จะกลายเป็นนิวเคลียสที่เสถียร การที่นิวเคลียสของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเปลี่ยนสภาพเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่และมีการปล่อยพลังงานในรูปกัมมันตภาพรังสีชนิดต่าง ๆ นั้น เรียกว่า “การสลาย” (decay) นิวเคลียสกัมมันตรังสีเริ่มต้นเรียกว่า “นิวเคลียสแม่” (parent) และนิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นเรียกว่า “นิวเคลียสลูก” (daughter) นิวเคลียสลูกที่ได้จากการสลายตัวอาจจะเสถียรหรือไม่เสถียรก็ได้ ถ้าไม่เสถียรก็จะมี การสลายตัวต่อไปจนกว่าจะได้นิวเคลียสตัวสุดท้ายที่เสถียร

การสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น อัตราการสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะแปรผันตามกับจำนวนนิวเคลียสหรืออะตอมที่มีอยู่เดิมในขณะนั้น

ถ้าให้ N เป็นจำนวนอะตอมที่มีอยู่ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง

อัตราการสลายตัว คือ

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

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.1)$$

เมื่อ λ เป็นค่าคงตัวของการสลายตัว (decay constant) หน่วย วินาที⁻¹, ชั่วโมง⁻¹ ให้ N_0 เป็นจำนวนอะตอมที่มีอยู่เดิมเมื่อเริ่มต้น $t = 0$ จะได้

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

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

สมการ (2.2) เรียกว่า “กฎของการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี” (Law of radioactive decay) (พงศกร, 2539)

2.2 การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

2.2.1 การสลายให้รังสีแกมมา (gamma decay)

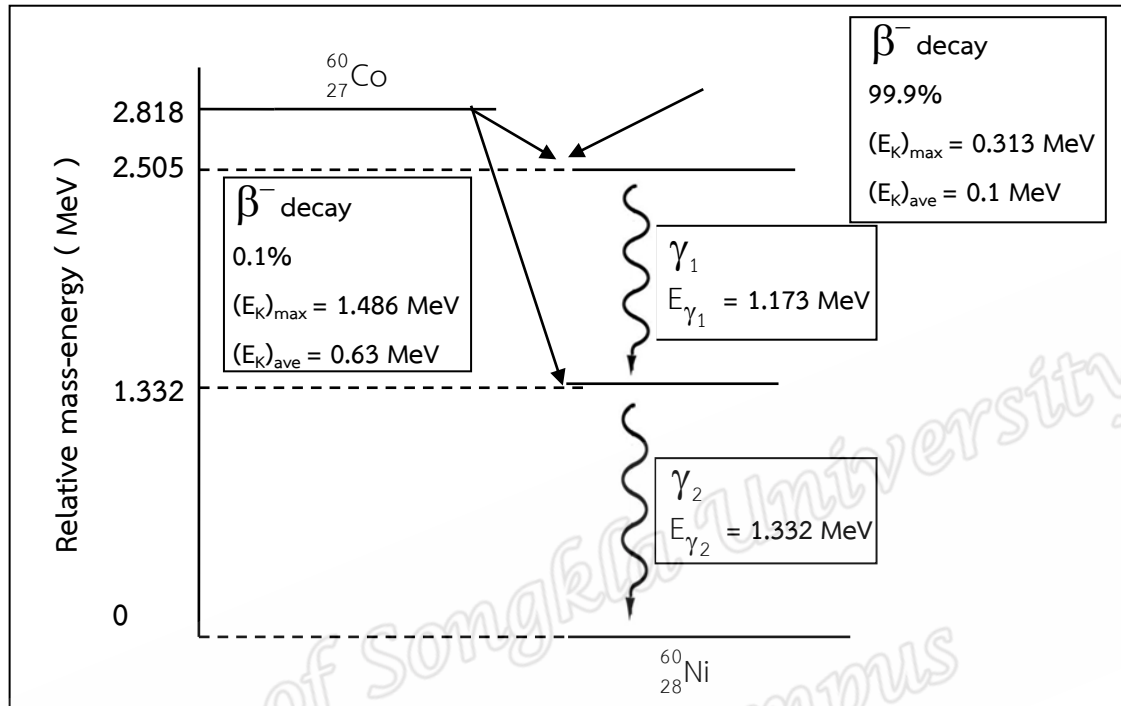
การสลายให้รังสีแกมมา เป็นการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน (photon) จากนิวไคลด์ที่อยู่ในสถานะกระตุ้นลงสู่สถานะพื้น (ground state) มักจะเกิดขึ้นหลังจากการสลายให้รังสีแอลฟาหรือรังสีบีตาแล้ว ช่วงเวลาของการสลายให้รังสีแกมมานี้มีสั้นมาก คือน้อยกว่า 10^{-12} วินาที การส่งรังสีแกมมาอาจจะมีหลายขั้นตอน ทำให้ได้รังสีแกมมาหลายพลังงาน และพลังงานของรังสีแกมมาอาจจะมีค่าตั้งแต่อิเล็กตรอนโวลต์ จนถึงเมกะอิเล็กตรอนโวลต์

การสลายให้รังสีแกมมาไม่มีผลต่อเลขมวล และเลขเชิงอะตอมของนิวไคลด์แม่ แต่ทำให้ได้นิวไคลด์ลูกมีพลังงานลดลง (สมการที่ 2.3) อาจเรียกการสลายให้รังสีแกมมาว่าการเปลี่ยนแปลงไอโซเมอร์ (isomeric transition)

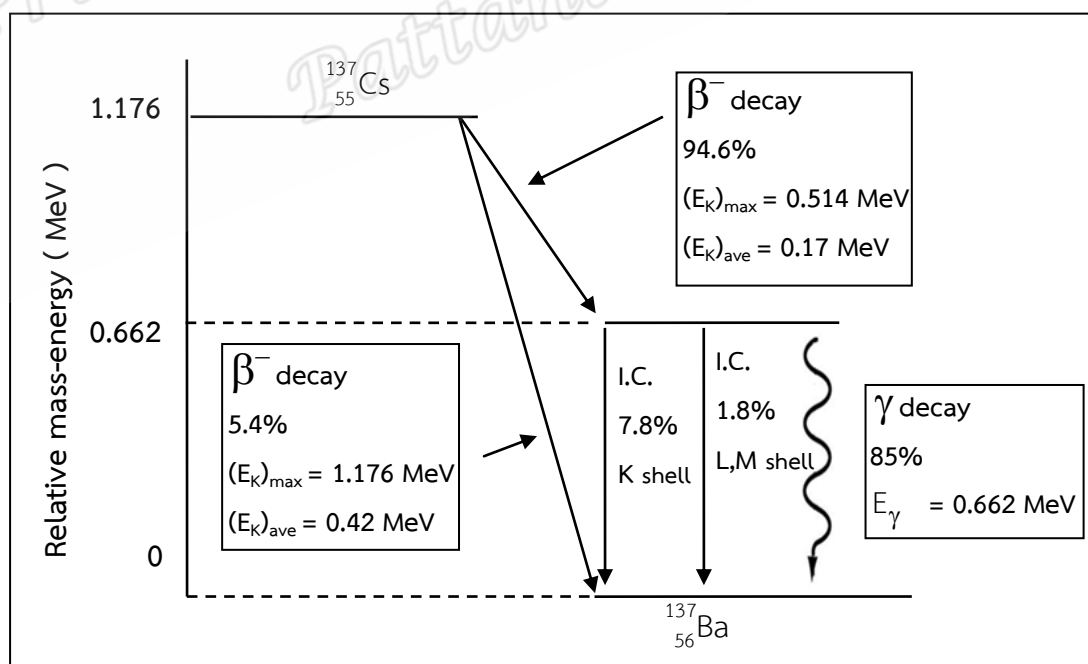


Co-60 และ Cs-137 เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มักถูกนำมาใช้เป็นแหล่งของรังสีแกมมาในงานนิวเคลียร์เทคนิคทั้งในด้านการแพทย์ การเกษตร และอุตสาหกรรม Co-60 สลายให้บีตาแล้วปรับจากสถานะกระตุ้นลงสู่สถานะพื้นโดยให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.173 และ 1.332 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ นิวไคลด์ลูกที่อยู่ในสถานะพื้น คือ Ni-60 (ภาพที่ 2.1) ส่วน Cs-137 นั้น สลายให้บีตาพลังงาน 1.174 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เป็นนิวไคลด์ลูกของ Ba-137 ในสถานะพื้น และยังคงสลายให้บีตาพลังงาน 0.512 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พร้อมให้รังสีแกมมาพลังงาน 0.662 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นนิวไคลด์ลูกในสถานะพื้น (ภาพที่ 2.2)

การสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทำให้มีการเปลี่ยนแปลงนิวคลีออนและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสี และยังมี การสลายของนิวไคลด์รูปแบบอื่นๆอีก แต่มีโอกาสดเกิดน้อยมาก และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ไม่มากนักในด้านนิวเคลียร์เทคนิค (นวลฉวี, 2545)



ภาพที่ 2.1 แผนภาพพลังงานการสลายของ Co-60



ภาพที่ 2.2 แผนภาพพลังงานการสลายของ Cs-137

2.3 กัมมันตภาพรังสี

ให้ A เป็นอัตราการสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสี หรือ “กัมมันตภาพ” หรือ “ความแรงรังสี” (activity) จะได้

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

$$A = \lambda N \quad (2.4)$$

กัมมันตภาพหรือความแรงรังสีมีหน่วยเป็น “จำนวนครั้งของการสลายตัวต่อวินาที” (disintegration per second, dps) หรือ คูรี (Curie, Ci) ปัจจุบันใช้หน่วย SI คือ “เบ็กเคอเรล” (Becquerel, Bq)

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$$

(สิริพร, 2550)

2.4 ครึ่งชีวิต

ถ้าให้ $T_{1/2}$ เป็นช่วงเวลาที่อะตอมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสลายไปครึ่งหนึ่ง และเรียกช่วงเวลานี้ว่า “ครึ่งชีวิต” (half life)

จากสมการ (2.2) จะได้

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda t}$$

$$-\lambda T_{1/2} = \ln(1/2) = -0.693$$

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.5)$$

(พงศกร, 2539)

2.5 หน่วยของรังสีและกัมมันตภาพรังสี

2.5.1 หน่วยของกัมมันตภาพรังสี

เนื่องจากเรเดียมเป็นสารกัมมันตรังสีตัวแรกที่รู้จักและนำมาใช้งาน ดังนั้นกัมมันตภาพรังสีจึงใช้หน่วยเป็นคูรีเป็นหน่วยเริ่มต้น โดยกำหนดอยู่ในเทอมของอัตราการสลายตัว ซึ่งเกี่ยวข้องกับมวล 1 กรัมของเรเดียม การที่จะวัดให้ได้อัตราการสลายตัวที่แน่นอนนั้นยากมาก ดังนั้นจึงได้ตกลงยอมรับค่าการสลายตัว 3.7×10^{10} อะตอมต่อวินาทีต่อกรัมของเรเดียมเป็นค่าความแรงรังสี 1 คูรี แม้ว่าในตอนเริ่มแรกจะใช้กับเรเดียมเท่านั้น แต่ต่อมาได้นำไปใช้กับสารกัมมันตรังสีอื่นๆอีกด้วย เช่น ขนาด 1 คูรี ของซัลเฟอร์-35 ที่ก่อให้เกิดการสลายตัว 3.7×10^{10} อะตอมต่อวินาที

ในปัจจุบันนี้การวัดความแรงรังสี พัฒนามาใช้หน่วยใหม่ในระบบ SI ได้ใช้หน่วยเป็น “เบ็กเคอเรล” (Becquerel) สัญลักษณ์ย่อว่า “Bq” โดยที่

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

ความสัมพันธ์ของหน่วยในระบบเก่าและใหม่ดังนี้

1 เมกะคูรี (MCi)	=	$3.7 \times 10^{16} \text{ dps}$	=	10^6 Ci
1 คูรี (Ci)	=	$3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$		
1 มิลลิคูรี (mCi)	=	$3.7 \times 10^7 \text{ dps}$	=	10^{-3} Ci
1 ไมโครคูรี (μCi)	=	$3.7 \times 10^4 \text{ dps}$	=	10^{-6}

2.5.2 หน่วยของรังสี

หน่วย หมายถึง ชื่อเฉพาะที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้บอกขนาด และปริมาณสิ่งต่างๆ โดยหน่วยของรังสี และกัมมันตภาพรังสีสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 หน่วยต่างๆของรังสี

ปริมาณ	หน่วยเดิม	หน่วยใหม่
รังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed dose)	แรด (Rad)	เกรย์ (Gy)
รังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว (Exposure)	เรินท์เกน (R)	คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg)
รังสีสมมูล (Dose equivalent)	เรม (Rem)	ซีเวิร์ต (Sv)

ที่มา: (สิริพร, 2550)

2.6 การสลายตัวแบบต่อเนื่อง

การสลายต่อเนื่อง (Chain disintegration) เป็นการสลายตัวต่อกัน นิวเคลียส A สลายตัวเป็นนิวเคลียส B นิวเคลียส B สลายตัวเป็นนิวเคลียส C และนิวเคลียส C สลายต่อไปเป็นเช่นนี้เรื่อยๆ จนกว่าจะได้นิวเคลียสเสถียร ซึ่งในขั้นตอนนี้จะพิจารณาการสลายตัวของนิวเคลียส A เป็นนิวเคลียส B และนิวเคลียส B สลายตัวให้นิวเคลียส C เป็นนิวเคลียสที่เสถียร เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ที่เวลาเริ่มต้น $t=0$ A มีจำนวนอะตอมเท่ากับ N_A^0
 เมื่อเวลาผ่านไป t A มีจำนวนอะตอมเท่ากับ N_A
 B มีจำนวนอะตอมเท่ากับ N_B
 C มีจำนวนอะตอมเท่ากับ N_C
 จำนวนอะตอม A ที่เวลา t จะได้

$$N_A = N_A^0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

จำนวนอะตอมของ B ที่มีอยู่ต่อวินาทีเท่ากับอัตราการเกิด B ลบด้วยอัตราการสลายของ B แต่อัตราการเกิดของ B เท่ากับอัตราการสลายของ A จะได้

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \quad (2.7)$$

แทน N_A ในสมการ (2.7) จะได้

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t} - \lambda_B N_B$$

$$\frac{dN_B}{dt} + \lambda_B N_B = \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t} \quad (2.8)$$

$e^{\lambda_B t}$ คูณสมการ (2.8) จะได้

$$\frac{dN_B}{dt} e^{\lambda_B t} + \lambda_B N_B e^{\lambda_B t} = \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t} e^{\lambda_B t}$$

$$e^{\lambda_B t} dN_B + \lambda_B N_B e^{\lambda_B t} dt = \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t} e^{\lambda_B t} dt$$

$$d(N_B e^{\lambda_B t}) = \lambda_A N_A^0 e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} dt$$

$$\int d(N_B e^{\lambda_B t}) = \int \lambda_A N_A^0 e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} dt$$

$$N_B e^{\lambda_B t} = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} + C \quad (2.9)$$

ในการหาค่าคงที่ของ C จะใช้เงื่อนไข ในเวลาเริ่มต้นไม่มีอะตอมลูกในระบบ $t=0 \rightarrow N_B = N_B^0$

แทนค่าในสมการ (2.9) จะได้

$$0 = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} + C$$

$$C = -\frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (2.10)$$

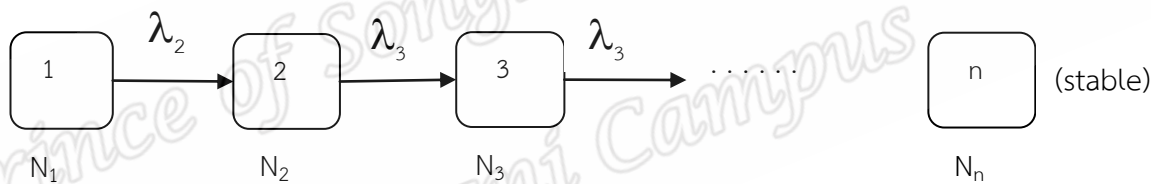
แทนค่า C ในสมการ (2.9) จะได้

$$N_B e^{\lambda_B t} = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} - \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A}$$

$$N_B e^{\lambda_B t} = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} [e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} - 1] \tag{2.11}$$

$$N_B = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} [e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}]$$

ในกรณีที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีการสลายตัวต่อเนื่องที่มีผลผลิตนิวไคลด์กัมมันตรังสีตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไปจนถึง n ดังแผนผังในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แผนผังการสลายของสารกัมมันตรังสีแบบต่อเนื่อง
ที่มา: (พงศกร, 2539)

สมการที่ใช้หาจำนวนอะตอมของธาตุ n ภายใต้ง่อนไข $N_1^0 = N_2^0 = N_3^0 = \dots = N_n^0 = 0$ เป็นไปตามสมการ

$$N_n = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t} \tag{2.15}$$

โดย

$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{(n-1)} N_1^0}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)}$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{(n-1)} N_1^0}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)}$$

$$C_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{(n-1)} N_1^0}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{(n-1)} - \lambda_n)}$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนอะตอม (กัมมันตภาพ) ของธาตุต่างๆในอนุกรม เป็นดังนี้

$$\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

.

.

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n$$

จากสมการ 2.15 จะได้ว่า

$$N_3 = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t} \quad (2.16)$$

โดย

$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots N_1^0}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)}$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_1^0}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)}$$

$$C_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_1^0}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

แทนค่า C_1, C_2, C_3 ในสมการ 2.16 จะได้

$$N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_1^0 e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} + \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_1^0 e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + C_n \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_1^0 e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

2.7 สมดุลกัมมันตภาพรังสี

ธาตุกัมมันตรังสีที่มีการสลายอย่างต่อเนื่อง ถ้านิวเคลียสแม่มีครึ่งชีวิตยาวกว่านิวเคลียสลูก จะมีโอกาสที่เกิดสมดุลกัมมันตรังสี

2.7.1 สมดุลกัมมันตภาพรังสีแบบถาวร (Secular Equilibrium)

สมดุลกัมมันตภาพรังสีแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อครึ่งชีวิตของนิวเคลียสแมื่อยาวกว่าครึ่งชีวิตของนิวเคลียสลูกมากกว่าประมาณ 10^4 เท่าหรือมากกว่า

เริ่มต้นให้มีเฉพาะนิวเคลียสแม่ A อย่างเดียว แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดนิวเคลียสลูก B เพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกัน B ก็สลายต่อไปเป็น C

$$\text{อัตราการเกิด B} = \lambda_A N_A = \lambda_A (N_A^0 e^{-\lambda_A t}) \quad (2.17)$$

$$\text{อัตราการเกิดสลาย} = \lambda_B N_B \quad (2.18)$$

เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของ B จะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการสลายตัวของ B ไปเป็น C เพิ่มขึ้นด้วย ในที่สุดจะถึงจุดที่อัตราการเกิดของ B เท่ากับอัตราการสลายตัวของ B ไปเป็น C เรียกสถานะนี้ว่า “สมดุลกัมมันตภาพรังสี” คือสมการ (2.17) เท่ากับสมการ (2.18)

$$\lambda_B N_B = \lambda_A (N_A^0 e^{-\lambda_A t}) \quad (2.19)$$

เนื่องจากครึ่งชีวิตของ A มากกว่าครึ่งชีวิตของ B มาก ดังนั้น λ_A มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ λ_B ดังนั้น $e^{-\lambda_A t} \rightarrow 1$ สมการ (2.19) จะเป็น

$$\lambda_B N_B = N_A^0 \lambda_A \quad (2.20)$$

$$\frac{N_B}{N_A^0} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} \quad (2.21)$$

แต่เนื่องจาก $e^{-\lambda_A t} \rightarrow 1$ ดังนั้น $N_A = N_A^0$ สมการ (2.21) จะเป็น

$$\lambda_B N_B = \lambda_A N_A \quad (2.22)$$

ในกรณีการสลายตัวแบบต่อเนื่องที่มีนิวเคลียสแม่มีครึ่งชีวิตยาวมากๆ เมื่อเทียบกับนิวเคลียสลูก เราสามารถเขียนสมการ (2.22) ได้เป็น

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B = \lambda_C N_C = \dots = \lambda_n N_n$$

จากสมการ (2.22) ถ้าให้ A_A และ A_B เป็นกัมมันตภาพรังสีของนิวเคลียสแม่และนิวเคลียสลูกตามลำดับ จะได้

$$A_A = \lambda_A N_A = \lambda_B N_B = A_B \quad (2.23)$$

กัมมันตภาพรังสีรวมขณะและหลังสมดุลกัมมันตภาพรังสีแบบถาวร คือ

$$A_{\text{total}} = 2A_A \quad (2.24)$$

2.7.2 สมดุลกัมมันตภาพรังสีแบบชั่วคราว (Transient Equilibrium)

การสมดุลในกรณีนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อนิวเคลียสแม่ A มีครึ่งชีวิตยาวกว่านิวเคลียสลูก B แต่ไม่มากนัก

ถ้าเริ่มต้นเมื่อเวลา $t = 0$ ไม่มีนิวเคลียสลูก B อยู่เลยจากสมการ (2.25)

$$N_B = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} [e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}] \quad (2.25)$$

เนื่องจาก $\lambda_A < \lambda_B$ เมื่อ t มีค่ามากๆ $e^{-\lambda_B t}$ จะเข้าใกล้ศูนย์เร็วกว่า $e^{-\lambda_A t}$ ดังนั้น จะได้สมการ (2.26)

$$N_B = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} e^{-\lambda_A t} \quad (2.26)$$

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A \quad (2.27)$$

$$\frac{N_B}{N_A} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (2.28)$$

ในขณะที่เดียวกันอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของนิวเคลียสลูกกับกัมมันตภาพรังสีของนิวเคลียสแม่จะมีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

$$\frac{dN_B / dt}{dN_A / dt} = \frac{\lambda_B N_B}{\lambda_A N_A} \quad (2.29)$$

แทนค่า $\frac{N_B}{N_A}$ จากสมการ (2.28) จะได้

$$\frac{dN_B / dt}{dN_A / dt} = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (2.30)$$

จะเห็นว่าทั้งสมการ (2.27) และ (2.29) ต่างแสดงว่า $\frac{N_B}{N_A}$ และ $\frac{dN_B / dt}{dN_A / dt}$

มีค่าคงตัว

จากสมการ (2.26) คูณด้วย λ_B จะได้

$$\lambda_B N_B = \frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} N_A \quad (2.31)$$

เนื่องจาก $\frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A}$ เป็นค่าคงตัว สมการ (2.31) จะได้

$$\lambda_B N_B \propto N_A$$

หมายความว่า หลังจากสมดุลกัมมันตภาพรังสี กัมมันตภาพรังสีของ B จะลดลงด้วยครึ่งชีวิตของ A

2.7.3 กรณีไม่เกิดสมดุลกัมมันตภาพรังสี (No Equilibrium)

กรณีนิวเคลียสแม่มีครึ่งชีวิตสั้นกว่านิวเคลียสลูกจะไม่มีโอกาสเกิดสมดุลกัมมันตภาพรังสี เนื่องจากนิวเคลียสแม่จะสลายหมดไปก่อน เหลือแต่นิวเคลียสลูกจึงสลายด้วยครึ่งชีวิตขิงนิวเคลียสลูกอย่างเดียว เวลาที่กัมมันตภาพรังสีของนิวเคลียสลูกจะมีค่าสูงสุด

2.8 อนุกรมกัมมันตรังสี

เมื่อนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่เป็นต้นกำเนิดรังสีมีการสลายตัวต่อเนื่อง จนได้นิวเคลียสสุดท้ายที่เสถียร การสลายตัวเป็นลำดับนี้เรียกว่า “อนุกรมกัมมันตรังสี” (radioactivity series) อนุกรมกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติมีทั้งหมด 4 อนุกรม แต่ละอนุกรมจะมีการสลายตัวตามลักษณะเฉพาะของอนุกรมนั้น อนุกรมทั้ง 4 มีดังนี้

- 1) อนุกรมทอเรียม (Thorium series) ได้แก่ นิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีเลขมวลเท่ากับ $4n$
- 2) อนุกรมเนปทูเนียม (Neptunium series) ได้แก่ นิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีเลขมวลเท่ากับ $4n+1$
- 3) อนุกรมยูเรเนียม (Uranium series) ได้แก่ นิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีเลขมวลเท่ากับ $4n+2$
- 4) อนุกรมแอกทิเนียม (Actinium series) ได้แก่ นิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีเลขมวลเท่ากับ $4n+3$

เมื่อ n คือเลขจำนวนเต็มบวก (พงศกร, 2539)

2.9 ไอโซโทป

ในการศึกษาการสลายของธาตุกัมมันตรังสี พบว่านิวเคลียสของธาตุบางกลุ่มที่มีเลขอะตอมเท่ากันแต่เลขมวลต่างกัน เช่น กลุ่มของยูเรเนียม ซึ่งมี U-234 U-235 และ U-238 นิวเคลียสในกลุ่มของยูเรเนียมมีเลขอะตอมเท่ากันคือ 92 แต่มีเลขมวลต่างกัน เราเรียกนิวเคลียสที่มีจำนวนโปรตอนเท่ากัน แต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกันนี้ว่าเป็นไอโซโทป (isotopes) ของธาตุเดียวกัน

ไอโซโทปของธาตุหนึ่งอาจมีทั้งที่เสถียร คือ ไม่มีการสลายตัวต่อไป เรียกว่า ไอโซโทปเสถียร (stable isotope) และไอโซโทปที่ไม่เสถียร เรียกว่า ไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotopes) เช่น ไอโซโทปของตะกั่วมี 5 ชนิด ซึ่งแบ่งออกเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี 2 ชนิด คือ Pb-210 และ Pb-214 ไอโซโทปเสถียรอีก 3 ชนิด คือ Pb-206, Pb-207 และ Pb-208 (สิริพร, 2550)

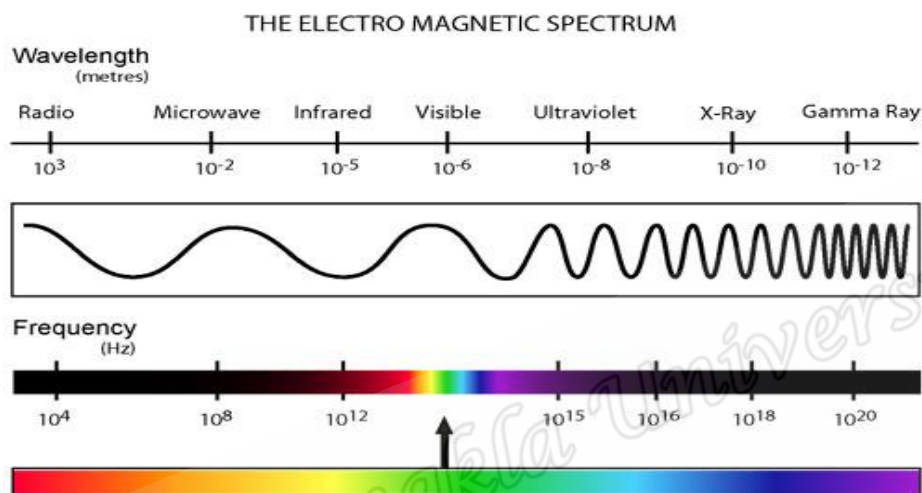
2.10 สมบัติของรังสีแกมมา

2.10.1 รังสีแกมมา

รังสี (radiation) หมายถึง พลังงานที่แผ่ออกจากต้นกำเนิดรังสีในรูปคลื่นซึ่งอนุภาครังสีจำแนกได้เป็นหลายประเภทจะขึ้นอยู่กับต้นกำเนิด พลังงานของรังสี และรูปของพลังงาน เป็นต้น เมื่อพิจารณาการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ของอะตอมหรือโมเลกุล ในอะตอมที่เป็นกลางจำนวนอนุภาคอิเล็กตรอนจะเท่ากับโปรตอน เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากพอที่จะเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสได้ อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ส่วนอะตอมที่ขาดอิเล็กตรอนจะเป็นไอออนบวก ผลของการแตกตัวเป็นไอออนจะได้คู่อิออน (ion pair) คือ อิเล็กตรอนกับไอออนบวก แต่หากอิเล็กตรอนได้รับพลังงานไม่มากพอที่จะหลุดออกจากอะตอมได้ ก็จะมีพลังงานสูงเกินกว่าระดับปกติในสถานะพื้น (ground state) ไปสู่สถานะกระตุ้น (excited state) จากนั้นอิเล็กตรอนจะกลับมาอยู่สถานะพื้นเช่นเดิม โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ รังสีเอกซ์นั่นเอง

หากพิจารณาความสามารถของรังสีในการทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนสามารถจำแนกรังสีได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) รังสีไม่ก่อไอออน (non-ionizing radiation) เป็นรังสีที่มีพลังงานต่ำในช่วง $10^{-2} - 10^2$ อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อเข้าชนกับตัวกลาง จึงไม่สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางแตกตัวเป็นไอออนได้ รังสีประเภทนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน ดังภาพที่ 2.4 เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) อินฟราเรด (infrared) แสงสว่าง



ภาพที่ 2.4 สเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: (สุรศักดิ์, 2555)

2) รังสีก่อไอออน (ionizing radiation) เป็นรังสีที่มีพลังงานอยู่ในช่วง อิเล็กตรอนโวลต์ – เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อเข้าชนกับตัวกลาง สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางนั้นแตกตัวเป็นไอออน รังสีประเภทนี้จำแนกได้เป็น

(1) รังสีอนุภาค (particulate radiation) เป็นลำอนุภาคที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมักจะเกิดขึ้นจากการสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสี เช่น อนุภาคแอลฟา บีตา

(2) รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) เป็นพลังงานที่แผ่ออกมาในรูปของคลื่น โดยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เช่น รังสีแกมมา รังสีเอกซ์

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถจำแนกโดยความยาวคลื่นและความถี่ รังสีที่มีความยาวคลื่นสั้น ความถี่สูง ก็จะมีพลังงานสูง (ตารางที่ 2.2) เป็นรังสีก่อไอออน เช่น รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ ส่วนจำพวกรังสีที่มีความยาวคลื่นยาว ความถี่ต่ำ ก็จะมีพลังงานต่ำและเป็นรังสีไม่ก่อไอออน เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต อินฟราเรด แสงสว่าง

ตารางที่ 2.2 สมบัติของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า	ความยาวคลื่น (Angstroms)	ความถี่ (Hz)	พลังงาน (eV)
วิทยุ	$>10^9$	$<3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
ไมโครเวฟ	$10^9 - 10^6$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
อินฟราเรด	$10^6 - 700$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
แสงสว่าง	$7000 - 4000$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
อัลตราไวโอเล็ต	$4000 - 10$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
รังสีเอกซ์	$10 - 0.1$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
รังสีแกมมา	<0.1	$> 3 \times 10^{19}$	$>10^5$

ที่มา: (นวลฉวี, 2545)

2.11 รังสีแกมมา (Gamma rays)

รังสีแกมมาเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีอำนาจการทะลุทะลวงมากกว่ารังสีแอลฟาและบีตา การปลดปล่อยรังสีแกมมาจะไม่ทำให้อะตอมและมวลอะตอมเปลี่ยนแปลง ส่วนไอโซโทปรังสีที่ปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาหรือบีตา มักปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาด้วย ซึ่งพลังงานของรังสีแกมมาจะขึ้นอยู่กับความถี่รังสี การสลายตัวของไอโซโทปรังสีสามารถจำแนกได้โดยพิจารณาจากความถี่ของรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมา และรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็สามารถจำแนกประเภทได้ตามความยาวคลื่นและความถี่ ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงาน ดังนี้

$$\begin{aligned}
 E &= h\nu \\
 &= \frac{hc}{\lambda}
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

เมื่อ	E	คือ	พลังงาน
	h	คือ	ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.6252×10^{-34} จูล.วินาที
	ν	คือ	ความถี่
	λ	คือ	ความยาวคลื่น
	c	คือ	ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

ในปี ค.ศ. 1900 นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ ปอล วีลาร์ (Paul Villard) ค้นพบ รังสีแกมมาในขณะที่กำลังศึกษาแร่ยูเรเนียม และแสดงให้เห็นว่ารังสีแกมมาไม่มีประจุ เนื่องจากไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก ต่อมาในปี ค.ศ. 1914 รัทเทอร์ฟอร์ด และเอ็ดเวิร์ด อันดราเด (Edward Andrade) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้แสดงว่า รังสีแกมมาเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสามารถวัดความยาวคลื่นได้โดยการเบี่ยงเบนผ่านผลึก พบว่า มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง $10^{-11} - 10^{-14}$ เมตร โดยทั่วไป รังสีแกมมาจะเกิดขึ้นหลังจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีสลายตัวให้รังสีอื่นและยังคงอยู่ในสถานะกระตุ้น จึงจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมา

2.11.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

รังสีแกมมาหรืออาจเรียกรวมว่า โฟตอน (photon) หมายถึง กลุ่มของพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อันตรกิริยาของโฟตอนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พลังงานของโฟตอน เลขมวลของสสาร โฟตอนอาจเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอน นิวเคลียส หรือสนามไฟฟ้าของนิวเคลียส ซึ่งอาจเป็นทั้งการชนแบบยืดหยุ่น และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ส่วนอันตรกิริยาที่จะเกิดกับนิวเคลียสของสสารนั้น โฟตอนจะต้องมีพลังงานสูงมาก ซึ่งรังสีแกมมาจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีพลังงานไม่สูงพอ จึงไม่เกิดอันตรกิริยานี้ อันตรกิริยาโฟตอนที่สำคัญ ได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect) และแพร์โปรดักชัน (Pair production)

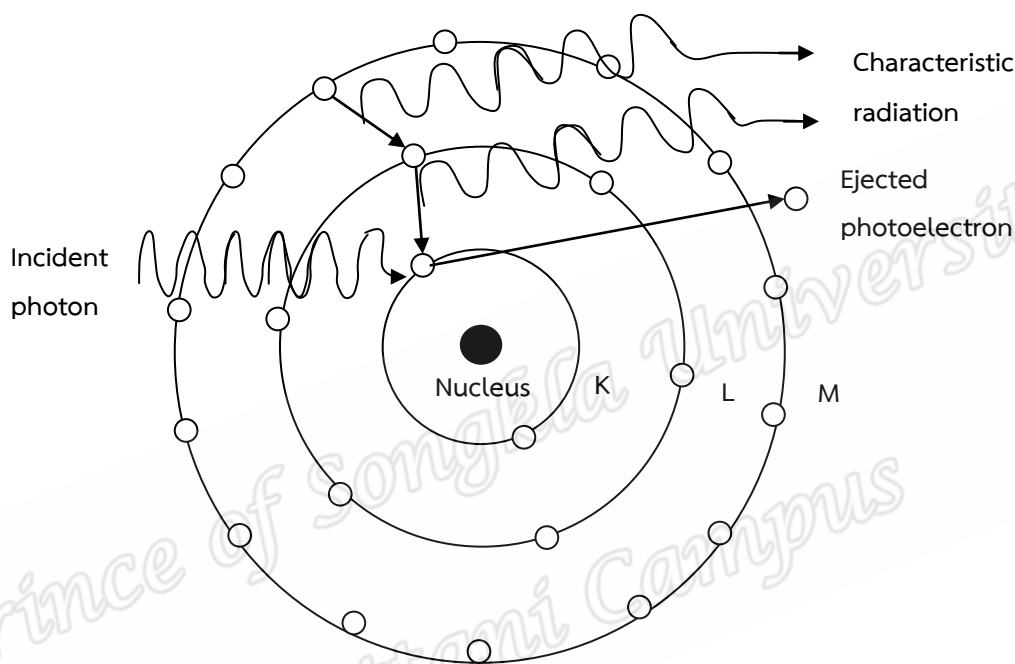
2.11.1.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect)

ไฮน์ริช แฮทซ์ (Heinrich Hertz) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน เป็นผู้พบปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ในปี ค.ศ. 1887 ซึ่งปรากฏการณ์เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนกระทบสสารแล้วถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน หากพลังงานที่ถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงนั้น อิเล็กตรอนจะหลุดออกจะอะตอมได้ (ภาพที่ 2.5) เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) โดยมีพลังงานจลน์เท่ากับผลต่างของพลังงานโฟตอนกับพลังงานยึดเหนี่ยว

เนื่องจากการเกิดโฟโตอิเล็กตรอน ขึ้นอยู่กับพลังงานของโฟตอนที่ต้องมีไม่น้อยกว่าเว็ร็กฟังก์ชันของสสารนั้น ความถี่ต่ำสุดของโฟตอนที่สามารถทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนในสสารใดๆได้ เรียกว่า ความถี่ขีดเริ่ม (threshold frequency) ซึ่งพลังงานจลน์และจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้น และจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของโฟตอนเพิ่มขึ้น

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนี้ มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากเมื่อโฟตอนพลังงานต่ำทำ

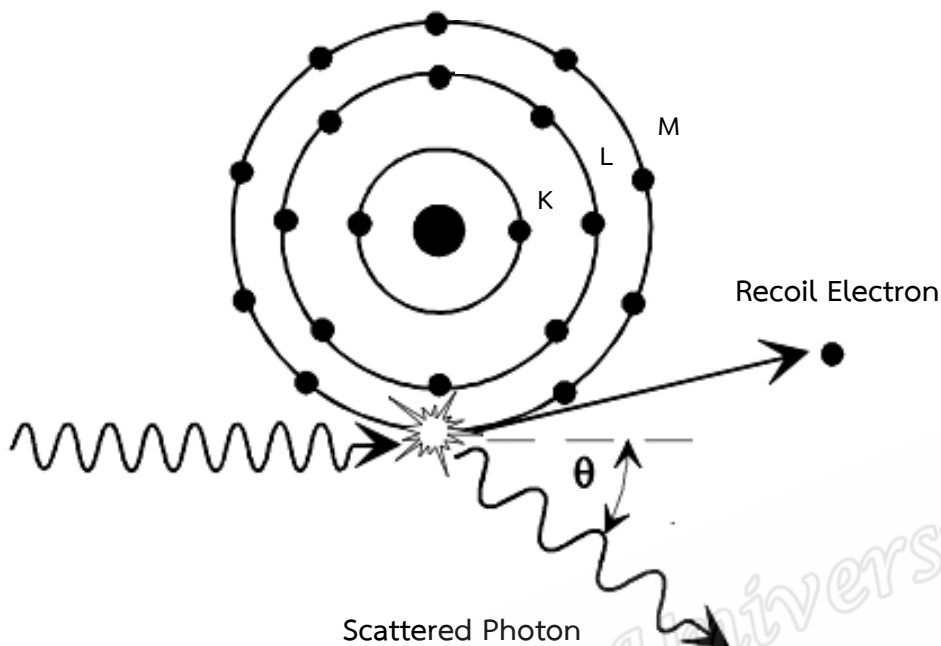
อันตรกิริยากับสสารที่มีเลขเชิงอะตอมสูง เมื่อโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมของสสารแล้ว ก็ จะเกิดคู่อิออนขึ้น เช่นเดียวกับการแตกตัวเป็นคู่อิออน โฟโตอิเล็กตรอนมีสมบัติเช่นเดียวกับอนุภาค ปีตา ซึ่งจะทำอันตรกิริยาต่อไปได้อีก สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานสูง โฟโตอิเล็กตรอนจะมีทิศทาง การเคลื่อนที่ในแนวเดียวกับโฟตอนและจะทำมุมกับแนวการเคลื่อนที่ของโฟตอน เมื่อโฟตอนมี พลังงานต่ำ



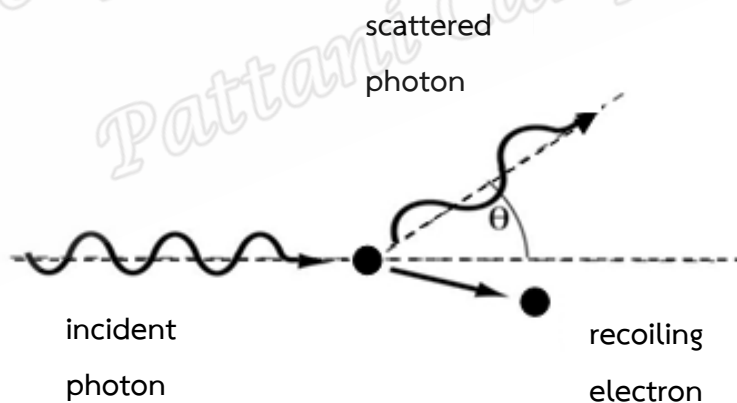
ภาพที่ 2.5 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

2.11.1.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect)

อาร์เทอร์ ฮอลลี คอมป์ตัน (Arthur Holly Compton) พบปรากฏการณ์คอมป์ตัน ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1922 ปรากฏการณ์นี้โฟตอนจะเข้าชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของสสารแบบ ยึดหยุ่น โฟตอนก็จะสูญเสียพลังงานให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมไปใน ทิศทางทำมุม Φ กับทิศทางเคลื่อนที่เดิมของโฟตอน (ภาพที่ 2.6) เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปนี้ว่า คอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron) ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานลดลงจะกระเจิงออกจากอะตอม ในมุม θ (ภาพที่ 2.7) ปรากฏการณ์นี้จะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การกระเจิงคอมป์ตัน (Compton scattering) ความยาวคลื่นของโฟตอนที่กระเจิงออกไปเพิ่มขึ้นตามค่ามุมกระเจิง (θ) ดังสมการ 2.33



ภาพที่ 2.6 ปรัชการณคอมบัตัน



ภาพที่ 2.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของแกมมาฟotonจากปรัชการณคอมบัตัน

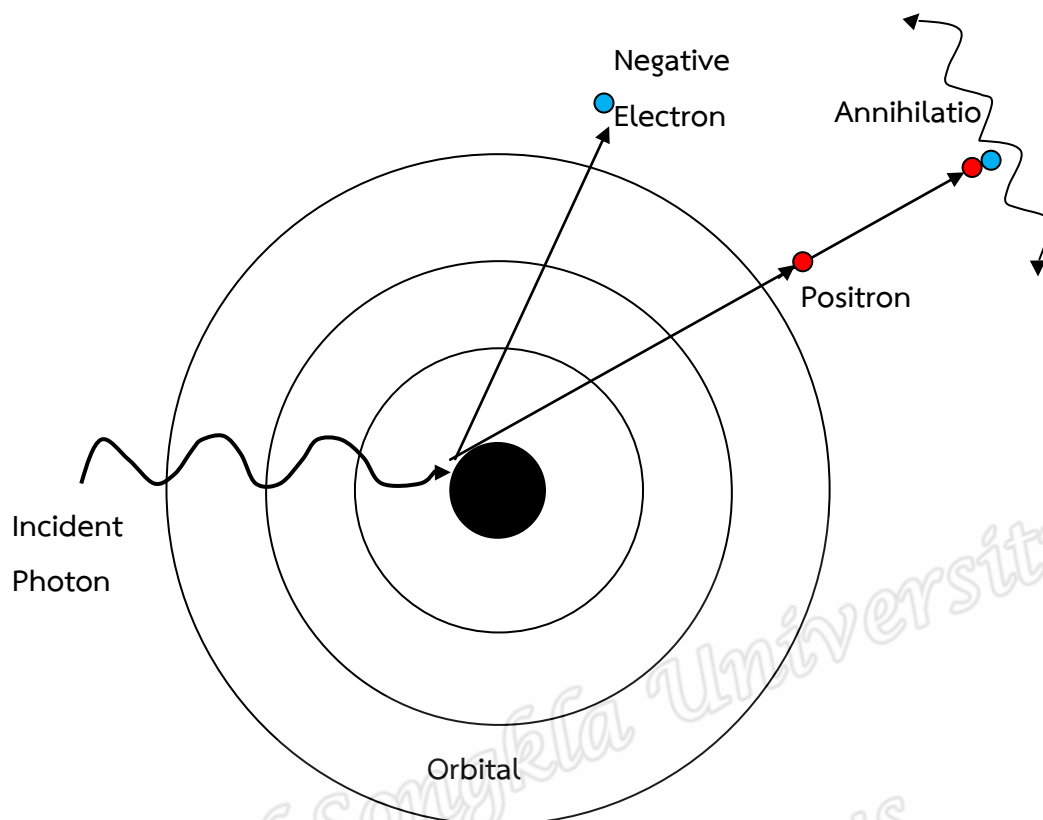
$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) \tag{2.33}$$

เมื่อ $\Delta\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของโฟตอนที่เพิ่มขึ้น หรือ ความยาวคลื่นคอมป์ตัน (Compton wavelength)
h	คือ	ค่าคงตัวของพลังค์
m	คือ	มวลของอิเล็กตรอน
c	คือ	ความเร็วแสง

อันตรกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูง (0.5-3.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) ถ้าโฟตอนที่กระเจิงออกไปมีพลังงานมากพอ ก็อาจเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้ต่อไป ในส่วนของคอมป์ตันอิเล็กตรอนนั้นจะมีพลังงานเท่ากับพลังงานของโฟตอนที่กระทบ ลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนและพลังงานของโฟตอนที่กระเจิง ซึ่งหากคอมป์ตันอิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์มากพอก็อาจจะทำอันตรกิริยาต่อไปอีกเช่นเดียวกับอนุภาคบีตา

2.11.1.3 แพร่โปรดักชัน (Pair production)

แพร่โปรดักชัน ค้นพบครั้งแรกโดย แพททริก แบล็กเกต (Patrick Blackett) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ อันตรกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อโฟตอนพลังงานสูงผ่านเข้าใกล้นิวเคลียส พลังงานของโฟตอนจะเปลี่ยนเป็นอนุภาคอิเล็กตรอนและโพสิตรอน (ภาพที่ 2.8) เนื่องจากมวลของอิเล็กตรอนรวมกับมวลของโพสิตรอนแล้วเทียบเท่าพลังงาน 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นโฟตอนจะต้องมีพลังงานอย่างน้อย 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ หากพลังงานมากกว่า 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานส่วนที่เกินนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน



ภาพที่ 2.8 การเกิดเพอร์โพรตักชันและแอนนิฮิเลชัน

เพอร์โพรตักชันอาจจะเกิดที่สนามของอิเล็กตรอนในอะตอม โดยโฟตอนจะผลักให้อิเล็กตรอนออกไปพร้อมกับเปลี่ยนพลังงานเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอน ดังนั้น จึงมีอิเล็กตรอน 2 อนุภาคและโพสิตรอน 1 อนุภาค หลุดออกจากอะตอม จึงเรียกระบวนการนี้ว่า ทริเปิลต์โพรตักชัน (triplet production) เกิดได้กับโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่า 2.04 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นสามารถทำอันตรกิริยาต่อไปได้อีก ประหนึ่งเป็นอนุภาคบีตา ที่อาจทำให้อะตอมใกล้เคียงแตกตัวเป็นคูโอออนหรืออยู่ในสถานะกระตุ้น ส่วนโพสิตรอนจะรวมกับอิเล็กตรอนตัวอื่น แล้วเปลี่ยนเป็น 2 โฟตอน ที่มีพลังงาน 0.511 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (พลังงานที่เทียบเท่ากับมวลอิเล็กตรอน 1 อนุภาค) ดังภาพที่ 2.8 เรียกระบวนการนี้ว่า การเกิดแอนนิฮิเลชัน (annihilation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีผลตรงกันข้ามกับเพอร์โพรตักชัน

เพอร์โพรตักชันมีโอกาสเกิดได้มากขึ้น เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้น และมีโอกาสเกิดเพิ่มมากขึ้นอีก เมื่อทำอันตรกิริยากับสสารที่มีเลขมวลอะตอมสูง ซึ่งพลังงานของโฟตอนและเลขอะตอมของสสาร เป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ปรากฏการณ์คอมป์ตัน และเพอร์โพรตักชัน

โฟตอนอาจทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอน โดยมีการสูญเสียพลังงาน ซึ่งเป็นการชนกันแบบยืดหยุ่น โฟตอนจะกระเจิงออกไปโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น เรียกว่า การกระเจิงอาพันธ์ (coherent scattering) หรือการกระเจิงเรย์ลี (Rayleigh scattering) จะมีโอกาสเกิดเพิ่มเมื่อเลขอะตอมของสสารเพิ่มขึ้น

2.11.2 การแตกตัวเป็นไอออนจำเพาะ

คอมป์ตัน และทริปเปลตโปรดักชัน มีผลให้สสารเกิดคู่อิออน ด้วยการผลักให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป หากมีพลังงานมากพอ อิเล็กตรอนเหล่านี้ก็สามารถทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนทุติยภูมิต่อไป ในทำนองเดียวกัน โฟตอนจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน ก็อาจเกิดคอมป์ตันหรือโฟโตอิเล็กทริกได้อีก เช่นเดียวกับอิเล็กตรอนและโพซิตรอนจากแพร์โปรดักชันที่จะเกิดอันตรกิริยาต่อไป คู่อิออนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากอันตรกิริยาของโฟตอน ที่มาจากการแตกตัวทุติยภูมิ และเนื่องจากเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงทำให้โฟตอนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนจำเพาะต่ำ มีค่า LET ต่ำ และมีพิสัยยาว

สาระสำคัญของอันตรกิริยาของรังสีแกมมา กับสสาร

- 1) โฟตอนทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนและนิวเคลียสของสสาร ส่งผลให้โฟตอนถูกดูดกลืน หรือกระเจิงด้วยอันตรกิริยาต่างๆ ดังตารางที่ 2.7 ส่วนในตัวกลางจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนและการกระตุ้นด้วย
- 2) คู่อิออนที่เกิดขึ้นโดยโฟตอนส่วนใหญ่มาจากการแตกตัวเป็นไอออนทุติยภูมิเป็นหลัก
- 3) โฟตอนมีการแตกตัวเป็นไอออนจำเพาะต่ำกว่า และการถ่ายโอนพลังงานเชิงเส้นต่ำกว่า แต่พิสัยยาวกว่าอนุภาคแอลฟาและบีตา
- 4) เมื่อเทียบกับอนุภาคแอลฟาและบีตาแล้ว โฟตอนเป็นอันตรายมากกว่ามาก เมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายนอกร่างกาย แต่เป็นอันตรายน้อยกว่ามากเมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายในร่างกาย

ตารางที่ 2.3 การตูดกลืนและการกระเจิงของโฟตอนที่เกิดจากอันตรกิริยาต่างๆ

อันตรกิริยากับ	การตูดกลืน	การกระเจิง
อิเล็กตรอน	ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	การกระเจิงอาพันธ์ (ยืดหยุ่น)
สนามไฟฟ้าของนิวเคลียส	แพร็พอร์ทักชัน	ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (ไม่ยืดหยุ่น)
นิวเคลียส	ปฏิกิริยานิวเคลียร์	-

ที่มา: (นวลฉวี, 2545)

2.12 กาวัดรังสี

โดยทั่วไป งานวิจัยทั่วไปที่ใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ จะต้องเกี่ยวข้องกับการวัดรังสี ซึ่งจะให้ข้อมูลต่างๆของนิวคลีอิดกัมมันตรังสี เช่น กัมมันตภาพ ประเภทของรังสี ครึ่งชีวิต และพลังงาน นอกจากนี้ ยังสามารถระบุได้ว่า เป็นนิวคลีอิดกัมมันตรังสีจากธาตุอะไร และมีปริมาณมากน้อยเพียงใด เป็นหลักการของการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณโดยเทคนิคทางนิวเคลียร์ เครื่องวัดรังสีมีหลายประเภท โดยมีหลักการทำงานที่แตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพในการวัดรังสีแตกต่างกัน ด้วย ความรู้ด้านการวัดรังสี จะช่วยให้สามารถเลือกใช้เครื่องวัดรังสีได้อย่างเหมาะสม ดำเนินการวัดและวิเคราะห์ข้อมูลได้ถูกต้อง นอกจากนี้ การตรวจวัดรังสีจะช่วยให้เกิดความมั่นใจว่า มีความปลอดภัยจากการทำงานที่เกี่ยวข้องกับกัมมันตภาพรังสี

2.12.1 หลักการวัดรังสี

ในการศึกษาวิจัยด้านนิวเคลียร์ รวมทั้งการใช้ประโยชน์จากนิวเคลียร์เทคโนโลยีส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการตรวจวัดกัมมันตรังสีทั้งสิ้น มักเรียกกันสั้นๆว่า การวัดรังสี (radiation detection) โดยรังสีในที่นี้ หมายถึง รังสีแกมมา และอนุภาคอื่น และการวัดรังสีนี้ก็หมายรวมถึง การตรวจหาและการวัดด้วย เนื่องจากรังสีเป็นสิ่งที่มนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ด้วยประสาทสัมผัสทั้งห้า จำเป็นจะต้องใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่สามารถตรวจหาแหล่งกัมมันตรังสี และวัดกัมมันตภาพหรือปริมาณรังสี ซึ่งเรียกว่า เครื่องวัดรังสี (radiation detector) อาจมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการทำงานและวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น เครื่องนับรังสี (radiation counter) มาตรฐานรับรังสีหรือมาตร

ปริมาณรังสี (dosimeter, dosemeter) เครื่องสำรวจรังสี (survey meter) เมื่อรังสีกระทบสสารหรือตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยาต่างๆ เช่น การแตกตัวเป็นคู่อิออนการกระตุ้น ส่งผลให้ตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลง เช่น เกิดคู่อิออน เกิดโฟตอน เกิดปฏิกิริยาเคมี ที่สามารถตรวจวัดได้ และใช้เป็นที่บอกถึงการสลายตัวและปริมาณรังสีที่กระทบตัวกลาง กล่าวได้ว่า การวัดรังสีเป็นวิธีการทางอ้อม โดยการวัดผลจากอันตรกิริยาของรังสีกับตัวกลาง ดังนั้น ระบบการวัดรังสีจึงประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ 2 ส่วน คือ หัววัดรังสี (detector) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางรับรังสีและเกิดอันตรกิริยาต่างๆขึ้น ส่วนที่สอง เป็นชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วัดและแสดงผล ซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดผลที่เกิดจากอันตรกิริยา เช่น จำนวนคู่อิออน ซึ่งจะถูกละเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า หลังจากการนับหรือการวิเคราะห์สัญญาณแล้ว จึงแสดงผลเป็นตัวเลข เสียง หรือภาพ

เมื่อกกล่าวถึงการวัดรังสี ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพียงเพื่อการวัดกัมมันตภาพเท่านั้น แต่การวัดรังสีอาจให้ข้อมูลสมบัติอื่นๆของรังสีและสารกัมมันตรังสีด้วย เช่น

- ชนิดของรังสี เช่น รังสีแอลฟา บีตา หรือแกมมา
- จำนวนของรังสีที่สลายจากแหล่งกำเนิดต่อหน่วยเวลา หรือกัมมันตภาพ
- พลังงานของรังสี
- ปริมาณรังสี

ดังนั้น เครื่องวัดรังสีจึงสามารถจำแนกได้เป็นหลายประเภท ตามลักษณะการใช้งาน เช่น

2.12.1.1 เครื่องนับรังสี (counter, radiation counter) ทำหน้าที่ เพื่อวัดกัมมันตภาพ โดยตรวจนับจำนวนหรือผลที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของรังสีกับหัววัด เช่น เครื่องนับรังสีไกเกอร์ (Geiger counter) เครื่องนับรังสีแบบสัดส่วน (proportional counter)

2.12.1.2 สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) ทำหน้าที่ เพื่อวัดกัมมันตภาพและพลังงานของรังสี เช่น แกมมาสเปกโตรมิเตอร์ (gamma spectrometer) แอลฟาสเปกโตรมิเตอร์ (alpha spectrometer)

2.12.1.3 มาตรฐานปริมาณรังสี (dosimeter) ทำหน้าที่ เพื่อวัดปริมาณรังสีจากพลังงานของรังสีที่ถ่ายเทให้กับหัววัด เช่น มาตรฐานปริมาณรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (thermoluminescence dosimeter, TLD) ฟิล์มแบดจ์ (film badge)

2.12.2 หัววัดรังสี

หัววัดรังสีเป็นส่วนที่รับรังสีและส่วนที่เกิดอันตรกิริยาขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัด ในที่นี้จะขอกล่าวถึงหลักการการทำงานของหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำโดยสังเขปดังต่อไปนี้

2.12.2.1 หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ (semiconductor detector)

หัววัดชนิดนี้ผลิตจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน (silicon, Si) เจอร์เมเนียม (germanium, Ge) ซึ่งอะตอมจะมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน (valence electron) เท่ากับ 4 โครงสร้างของผลึกจะเกิดขึ้นจากการยึดตัวกันของอิเล็กตรอนโดยพันธะโคเวเลนต์ (covalence bond) ผลึกของสารกึ่งตัวนำที่เจือปนด้วยธาตุในหมู่ที่ 5 เช่น ฟอสฟอรัส เรียกว่า สารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (n-type semiconductor) ส่วนสารกึ่งตัวนำที่เจือปนด้วยธาตุใน หมู่ที่ 3 เช่น โบรอน เรียกว่า สารกึ่งตัวนำแบบพี (p-type semiconductor) หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำมีหลายประเภท จะขึ้นอยู่กับการผลิต แต่มีพื้นฐานจากการใช้สารกึ่งตัวนำแบบเอ็นและแบบพีเช่นเดียวกัน เมื่อรังสีกระทบหัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำจะเกิดการแตกตัวได้คู่อิเล็กตรอน - โฮล (electron - hole) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสี หัววัดรังสีชนิดนี้ใช้วัดรังสีได้หลายชนิด และมีประสิทธิภาพดีในการวัดพลังงานของรังสี

นอกจากเครื่องวัดรังสีที่หัววัดมีหลักการการทำงานที่แตกต่างกัน ดังที่กล่าวมาแล้วยังมีเครื่องวัดรังสีชนิดอื่นๆอีก ส่วนใหญ่มักใช้เป็นมาตรฐานรังสี เช่น

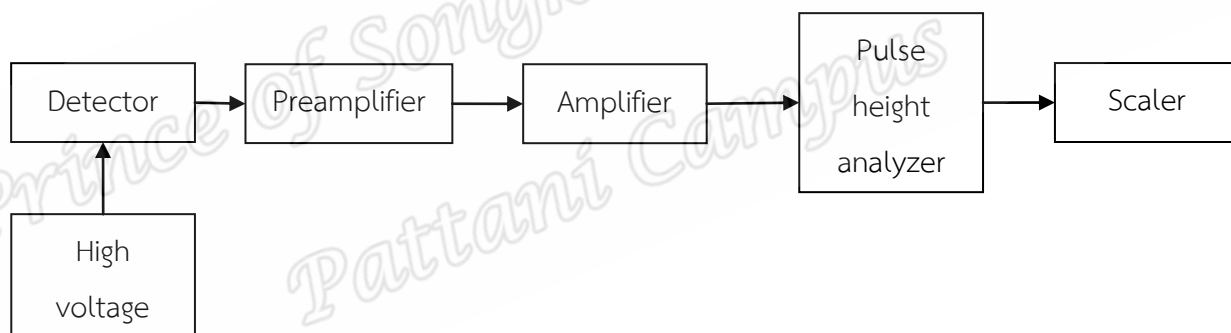
มาตรฐานรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TLD) ที่อาศัยปรากฏการณ์เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เกิดขึ้นเมื่อวัสดุบางชนิดรับรังสีแล้วอะตอมจะอยู่ในสถานะกระตุ้น และเมื่อได้รับความร้อนก็จะเปล่งแสงด้วยการให้โฟตอนแล้วกลับเข้าสู่สถานะพื้น จำนวนโฟตอนที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณรังสี วัสดุที่มีสมบัติการเปล่งแสงเมื่อได้รับความร้อนเช่นนี้จะเรียกว่า วัสดุเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (thermoluminescent material) เช่น LiF , CaSO_4 , CaF_2 , $\text{Li}_2\text{B}_2\text{O}_7$ ในการใช้งาน เมื่อ TLD รับรังสีแล้ว จะต้องนำมาวัดความเข้มแสงที่เปล่งออกมา ด้วยการให้ความร้อนและปรับเทียบเป็นปริมาณรังสีต่อไป โดยทั่วไป มักใช้ TLD ในการวัดปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อม หรือใช้เป็นเครื่องวัดรังสีประจำตัวบุคคล เพราะสามารถวัดปริมาณรังสีได้ในวงกว้าง ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

ฟิล์มแบดจ์ นิยมใช้เป็นเครื่องมือวัดรังสีประจำตัวบุคคล ซึ่งใช้ตรวจวัดรังสีแกมมา รังสีเอกซ์ รังสีบีตา และนิวตรอนช้า หลักการวัดรังสีของฟิล์มแบดจ์มาจากการเกิดภาพแฝงบน

แผ่นฟิล์มและเมื่อได้รับรังสีแล้ว จะประเมินค่าปริมาณรังสีที่ได้จากความดำที่ปรากฏบนฟิล์ม เมื่อผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม องค์ประกอบที่สำคัญของฟิล์มแบดจ์ คือ แผ่นฟิล์มวัดรังสีซึ่งจะคล้ายๆกับฟิล์มที่ใช้ในการเอกซเรย์ฟัน และบรรจุฟิล์มที่ถูกออกแบบเป็นพิเศษ โดยมีแผ่นกรองรังสีที่มีความหนาต่างๆกันติดอยู่ ซึ่งเป็นวัสดุกันรังสีที่จะผ่านเข้าไปกระทบฟิล์มในแต่ละส่วน ข้อดีของฟิล์มแบดจ์ คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา พกติดตัวได้สะดวก ราคาถูก บันทึกรังสีได้หลายชนิดบนฟิล์มแผ่นเดียวกัน อ่านซ้ำ และเก็บไว้เป็นหลักฐานได้ แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก

2.12.2.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับเครื่องวัดรังสี

เครื่องวัดรังสีประกอบด้วยส่วนที่เป็นหัววัด และส่วนที่เป็นชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ทำหน้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้า รับสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัด ตกแต่งและขยายสัญญาณ แสดงผลการวัด เป็นต้น ดังภาพที่ 2.9 ที่แสดงแผนภาพอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระบบการวัดรังสีอย่างง่าย



ภาพที่ 2.9 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระบบการวัดรังสี

ที่มา: (นวลฉวี, 2545)

2.12.2.3 แหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าแรงสูง

แหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (high voltage supply, HV) ทำหน้าที่ ให้ศักย์ไฟฟ้าแก่หัววัดรังสี สามารถปรับค่าให้เหมาะสมสำหรับหัววัดแต่ละหัววัด สำหรับหัววัดรังสีชนิดบรรจุแก๊สและหัววัดรังสีชนิดแสงวับ แหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าควรปรับค่าระหว่าง 0 – 3,000 โวลต์ และให้กระแสได้อยู่ในช่วง 0.10 มิลลิแอมแปร์

2.12.2.4 วงจรขยายส่วนหน้า

วงจรขยายส่วนหน้า (preamplifier) เป็นอุปกรณ์ที่ต่อกับหัววัด ประจุไฟฟ้าของคู่อิออนที่เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีกระทบหัววัดจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ (pulse) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงขนาดของปริมาณอย่างใดอย่างหนึ่งในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งโดยทั่วไปสัญญาณพัลส์จากหัววัดมักจะอยู่ในรูปของความต่างศักย์ (voltage) ที่มีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากนั้นส่งต่อไปยังวงจรถ่ายขยายส่วนหน้า ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณพัลส์ให้เคลื่อนที่ต่อไปได้สะดวก โดยไม่เกิดการเพี้ยนหรือสูญหาย วงจรขยายส่วนหน้ามักถูกติดตั้งไว้ใกล้หัววัดมากที่สุด

2.12.2.5 วงจรขยาย

วงจรขยาย (amplifier) เป็นส่วนที่รองรับสัญญาณพัลส์จากวงจรถ่ายขยายส่วนหน้า แล้วนำมาปรับแต่งรูปสัญญาณ เพื่อป้องกันการทับซ้อนกันของสัญญาณ พร้อมทั้งขยายขนาดของสัญญาณพัลส์ให้ใหญ่ขึ้น ให้เหมาะสำหรับการคัดเลือกและการวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณต่อไป วงจรขยายจะมีกำลังขยายค่อนข้างสูง แตกต่างกันในแต่ละเครื่องและสามารถปรับค่าได้

2.12.2.6 อุปกรณ์คัดเลือกและวิเคราะห์ความสูงสัญญาณพัลส์

การคัดเลือกสัญญาณพัลส์ เพื่อต้องการตัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากระบบการนับ เช่น สัญญาณรบกวน สัญญาณจากรังสีพื้นหลังพลังงานต่ำ หลักการทำงานทั่วไปจะใช้การเปรียบเทียบความสูงของสัญญาณพัลส์กับค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน หรือระดับดิสคริมิเนเตอร์ (discriminator level) ถ้าสัญญาณพัลส์ที่เข้ามามีความสูงมากกว่าระดับดิสคริมิเนเตอร์ที่ตั้งไว้ ก็จะเกิดสัญญาณออก (output signal) ถ้าสัญญาณพัลส์ที่เข้ามามีความสูงต่ำกว่า ก็จะไม่เกิดสัญญาณออก ในส่วนการวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณพัลส์ จะบันทึกจำนวนของสัญญาณพัลส์ที่มีความสูงต่างๆ เพื่อแสดงสเปกตรัมของรังสีที่ตรวจวัด อุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงสัญญาณพัลส์ (pulse height analyzer, PHA) สามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ

1) อุปกรณ์วิเคราะห์ช่องเดียว (single channel analyzer, SCA) ซึ่งประกอบด้วย 2 ดิสคริมิเนเตอร์ คือ

- ดิสคริมิเนเตอร์ระดับบน (upper level discriminator, ULD)
- ดิสคริมิเนเตอร์ระดับล่าง (lower level discriminator, LLD)

การแยกระดับความสูงของสัญญาณพัลส์ใน SCA จะอาศัยการเปรียบเทียบความสูงของสัญญาณพัลส์กับค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่ถูกกำหนดไว้ด้วย ULD และ LLD ความแตกต่างของระดับ ULD และ LLD เรียกว่า หน้าต่าง (window) ซึ่งจะใช้เลือกช่วงสัญญาณที่ต้องการวัด ปกติจะ

ให้หน้าต่างกว้างประมาณ 0.2 – 0.3 โวลต์ ถ้าสัญญาณเข้ามีความสูงอยู่ในหน้าต่างหรืออยู่ในช่วงระหว่าง ULD และ LLD จะได้สัญญาณออกจาก SCA ส่วนสเปกตรัมพลังงานรังสีจะได้อาจจากการนับจำนวนสัญญาณออกที่ความกว้างของหน้าต่างต่างๆกันในเวลาเท่ากัน แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณออกกับระดับ LLD ดังนั้น SCA จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมนักในการวัดสเปกตรัม เพราะไม่สะดวก รวมทั้งความสามารถในการวิเคราะห์ต่ำ และใช้เวลานานจึงไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ไอโซโทปที่มีครึ่งชีวิตสั้น

2) อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (multichannel analyzer, MCA) MCA มีขีดความสามารถสูงกว่า SCA มาก ทั้งในด้านความเร็ว การเก็บข้อมูล ความละเอียดของการแสดงระดับพลังงาน สามารถบันทึกข้อมูลจำนวนรังสีแต่ละระดับพลังงานที่ไปกระทบหัววัดได้โดยอัตโนมัติ แล้วแสดงสเปกตรัมที่จอแสดงผล โดยไม่จำเป็นต้องนำข้อมูลไปเขียนกราฟ MCA

สัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสีที่ผ่านวงจรขยายแล้ว จะเป็นสัญญาณเข้าของวงจรและเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog to digital converter, ADC) ความสูงของสัญญาณแอนะล็อกจะถูกตรวจวัด แล้วเปลี่ยนเป็นกลุ่มของสัญญาณดิจิทัลที่มีขนาดมาตรฐานจำนวนต่างๆกัน จากนั้นส่งข้อมูลไปยังวงจรเลือกตำแหน่งช่อง (channel address register) เพื่อเลือกตำแหน่งช่องในหน่วยความจำที่ให้ตรงกับจำนวนกลุ่มสัญญาณดิจิทัล วงจรบันทึกข้อมูล (data register) ทำหน้าที่บันทึกจำนวนครั้งของสัญญาณที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งช่อง ข้อมูลที่อยู่ในหน่วยความจำจะถูกส่งไปแสดงผล เป็นสเปกตรัมพลังงานรังสีตลอดเวลาที่เครื่องกำลังทำงานอยู่ และอาจจะแสดงผลไปยังอุปกรณ์ที่เชื่อมโยงกับระบบ เช่น เครื่องพิมพ์ เครื่องเขียนกราฟ

2.12.3 เครื่องนับ

เครื่องนับ (counter) หรือสเกลเลอร์ (scaler) เป็นอุปกรณ์ที่รับสัญญาณจากวงจรคัดเลือกและสามารถวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณพัลส์ เพื่อบันทึกจำนวนสัญญาณที่เกิดขึ้น และแสดงผลการวัดรังสีโดยทั่วไปจะมีวงจรตั้งเวลา (timer) ควบคุมเวลาการบันทึกสัญญาณ และแสดงผลเป็นจำนวนนับต่อหน่วยเวลาได้

2.13 เครื่องวัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ

การทำงานของเครื่องวัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ มีหลักการคล้ายกับการแตกตัวเป็นคู่อิออนของแก๊สในหัววัดรังสีชนิดบรรจุแก๊ส เมื่อรังสีกระทบหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำแล้ว จะเกิดคู่อิเล็กตรอน – โฮล ที่ทำให้เกิดสัญญาณพัลส์เช่นเดียวกับคู่อิออน จากนั้นสัญญาณพัลส์จะผ่านเข้าสู่

วงจรรขยายสัญญาณ วงจรคัตเลือกและวิเคราะห์สัญญาณ แล้วแสดงผลโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมต่อไป

ข้อดีของหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำนี้ อยู่ที่มีความหนาแน่นและมีอำนาจการหยุดยั้ง (stopping power) สูง จึงมีประโยชน์มากในการวัดอนุภาคที่มีประจุ เช่น อนุภาคแอลฟา และบีตา ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีพิสัยสั้น ทำให้หัววัดประเภทสารกึ่งตัวนำนี้มีขนาดเล็กมาก โดยอาจมีความหนาไม่กี่ปริมาณ มิลลิเมตร จนถึงประมาณ 7.5 เซนติเมตร ข้อดีอีกประการหนึ่ง คือ มีความสามารถในการแยกพลังงานสูง และดีกว่าหัววัด NaI(Tl) ประมาณ 20 เท่า ดังนั้น หัววัดสารกึ่งตัวนำจึงเป็นที่นิยมใช้มากในงานสเปกโทรเมทรี

2.13.1 สมบัติของสารกึ่งตัวนำ

ความสามารถในการนำไฟฟ้าของสาร ซึ่งจำแนกเป็น สารตัวนำ (conductor) สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) และฉนวน (insulator) อธิบายได้โดยทฤษฎีแถบพลังงาน (band theory) ที่กล่าวว่า อิเล็กตรอนของสารจะอยู่ในแถบ (band) พลังงานเป็นลำดับชั้นจนถึงชั้นบนสุด เรียกว่า แถบเวเลนซ์ (valence band) ซึ่งเหนือขึ้นไปเป็นแถบการนำ (conduction band) ที่โดยทั่วไปไม่มีอิเล็กตรอนระหว่างแถบพลังงานทั้งสองเรียกว่า แถบต้องห้าม (forbidden band) หรือ แถบช่องว่าง (band gap) ความกว้างของแถบช่องว่างของสารที่เป็นฉนวนจะกว้างกว่าสารกึ่งตัวนำ ส่วนสารที่เป็นตัวนำ เช่น พวกละหะ แถบเวเลนซ์และแถบการนำจะอยู่ซ้อนกัน

เมื่ออิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ได้รับพลังงานมากพอ จะข้ามแถบต้องห้ามไปยังแถบการนำ เรียกว่า เกิดการกระตุ้น (excitation) ของอิเล็กตรอน ทำให้ตำแหน่งเดิมของอิเล็กตรอนนั้นว่างลง เรียกว่า โฮล (hole) กล่าวได้ว่า พลังงานที่ได้รับทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล (electron-hole pair) คล้ายกับการแตกตัวเป็นคู่อิออนในตัวกลางที่เป็นแก๊ส โดยที่โฮลจะทำหน้าที่คล้ายประจุบวก ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้ในสนามไฟฟ้า แต่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลจะแสดงถึงการนำไฟฟ้าของสารนั้น และโอกาสที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำนั้น ขึ้นอยู่กับความกว้างของแถบต้องห้าม และพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับ สารที่มีแถบต้องห้ามกว้าง อิเล็กตรอนจะมีโอกาสข้ามไปยังแถบการนำได้น้อย แสดงว่ามีสมบัติในการนำไฟฟ้าต่ำ เช่น สารที่เป็นฉนวน อิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงจะข้ามไปยังแถบการนำได้ ส่วนในสารกึ่งตัวนำนั้น จะใช้พลังงานน้อยกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับในตัวกลางที่เป็นแก๊ส เมื่อเกิดคู่อิออนแล้ว อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าประจุบวกมาก แต่ในสารกึ่งตัวนำความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลจะไม่

แตกต่างกันมากนัก โดยสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ คือ ซิลิคอน (silicon, Si) และเจอร์มาเนียม (germanium, Ge) ซึ่งสมบัติของ Si และ Ge แสดงในตารางที่ 2.4

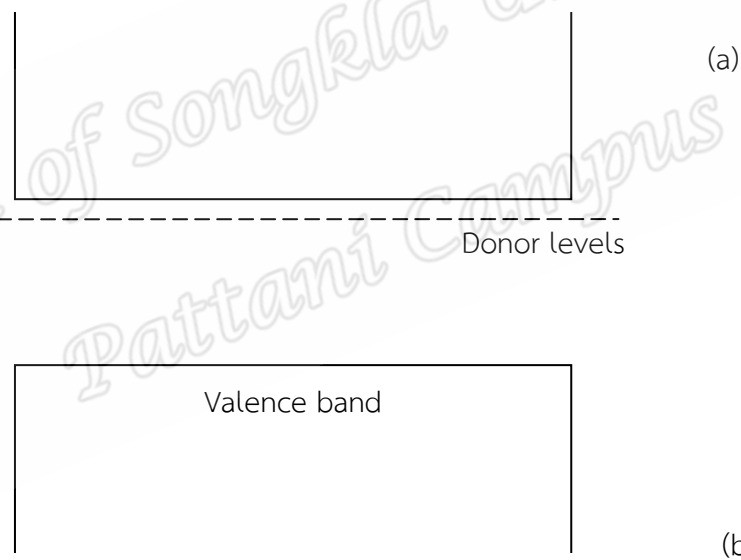
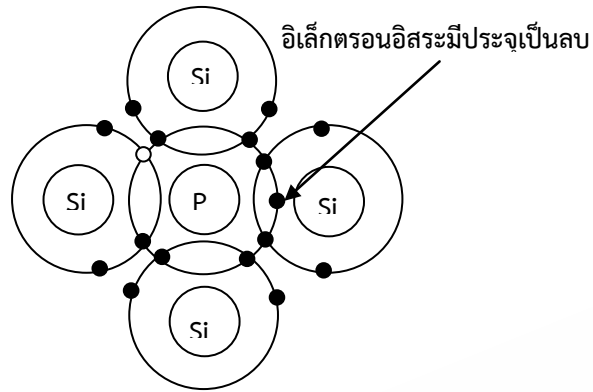
ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของ Si และ Ge

สมบัติ	Si	Ge
Atomic number	14	32
Atomic weight	28.09	72.64
Stable isotope mass number	28, 29, 30	70, 72, 73, 74, 76
Density (300 K), g/cm ³	2.33	5.33
Dielectric constant	12	16
Bandgap energy (300 K), cm ²	1.115	0.665
Electron mobility (300 K), cm ² /V.s	1350	3900
Hole mobility (300 K), cm ² /V.s	480	1900
Energy per electron-hole pair (80 K), eV	3.76	2.96

ที่มา: (นวลฉวี, 2545)

เมื่อเกิดการกระตุ้นในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ จำนวนของอิเล็กตรอนในแถบการนำจะเท่ากับจำนวนโฮลในแถบเวเลนซ์ สารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเช่นนี้ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก (intrinsic semiconductor) ซึ่งมีโอกาสเป็นไปได้น้อยมาก เพราะโดยทั่วไปแล้วสารกึ่งตัวนำจะมีสารอื่นๆ (impurity) เจือปนอยู่บ้าง ส่งผลทำให้สมบัติของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนไป เช่น ผลึกของ Si ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ 4 โดยเวเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 4 ของอะตอมของ Si จะจับกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (covalence bond) และเกิดโครงสร้างเป็นเตตระฮีดรัล (tetrahedral structure) นอกจากนั้นจะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระเหลืออยู่เลย ถ้าในผลึกของ Si มีสารเจือปนเป็นธาตุในหมู่ 5 ซึ่งมี 5 เวเลนซ์อิเล็กตรอน (pentavalence) เช่น ฟอสฟอรัส (phosphorus, P) สารหนู (arsenic, As) พลวง (antimony, Sb) สารเจือปนเหล่านี้จะเข้าไปแทรกในผลึกของ Si โดยอิเล็กตรอนของสารเจือปนจะจับกับอิเล็กตรอนของ Si แล้วยังคงเหลืออิเล็กตรอนว่างอยู่ 1 อิเล็กตรอน อยู่ติดกับอะตอมอย่างหลวมๆ และจะหลุดออกจากสารกึ่งตัวนำได้ง่าย ดังภาพที่ 2.10 (a) สารเจือปนประเภทนี้เรียกว่า สารเจือปนผู้ให้ (donor impurity) หรืออะตอมผู้ให้ (donor atom) เนื่องจากพร้อมที่จะให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป อิเล็กตรอนของอะตอมผู้ให้ที่มีมากเกินไปนั้นจะอยู่ในแถบช่องว่าง ตำแหน่งที่ใกล้กับแถบการนำ เรียกว่า ระดับผู้ให้ (donor level) ดังภาพที่ 2.10 (b) อิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนที่เป็นอิสระจากอะตอมหนึ่งและไปยังอีกอะตอมหนึ่ง ถ้าให้สนามไฟฟ้ากับผลึกนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่

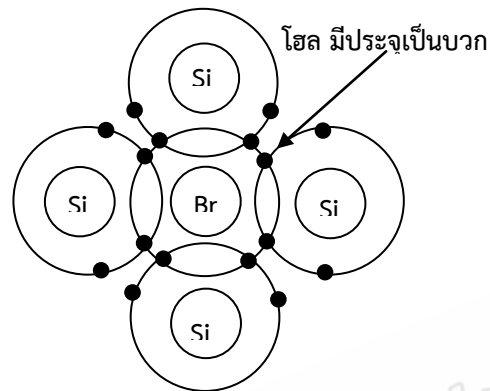
ไปทางซ้ายบวก สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมเป็นผู้ให้ ซึ่งทำให้ผลึกมีประจุลบนี้ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (n-type semiconductor)



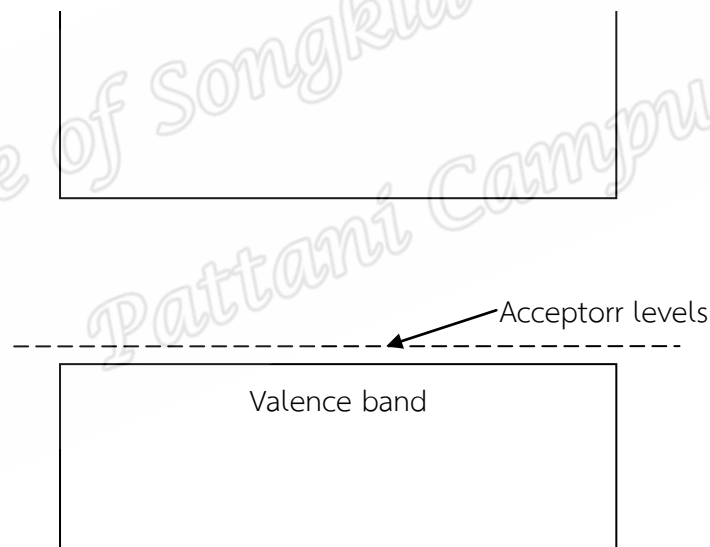
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างผลึกของ Si ที่มี P เป็นสารเจือปน (a) ซึ่งทำให้เกิดระดับผู้ให้ (b)

ถ้าสารเจือปนในผลึกสารกึ่งตัวนำเป็นธาตุในหมู่ที่ 3 ที่มี 3 เวเลนซ์อิเล็กตรอน เช่น โบรอน (boron, B) อะลูมิเนียม (aluminium, Al) อินเดียม (indium, In) แกลเลียม (gallium, Ga) เวเลนซ์อิเล็กตรอนของสารเจือปนประเภทนี้ จะจับกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ แล้วยังเหลืออิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่อยู่อีก 1 อิเล็กตรอน ดังภาพที่ 2.11 (a) ตำแหน่งที่ขาดอิเล็กตรอนนั้นก็คือ โฮล จะมีระดับพลังงานในแถบช่องว่างใกล้กับแถบเวเลนซ์ เรียกว่า ระดับผู้รับ (acceptor level) ดังภาพ

ที่ 2.11 (b) อิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์จะเข้ามาแทนที่ได้ง่าย เมื่อเกิดการแทนที่โฮลของอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่องแล้ว คล้ายกับว่ามีการเคลื่อนที่ของโฮล และเมื่อให้สนามไฟฟ้ากับผลึกนี้โฮลจะเคลื่อนที่ไปยังซ้าย ผลึกของสารกึ่งตัวนำที่มีโฮลนี้ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำแบบพี (p-type semiconductor)



(a)



(b)

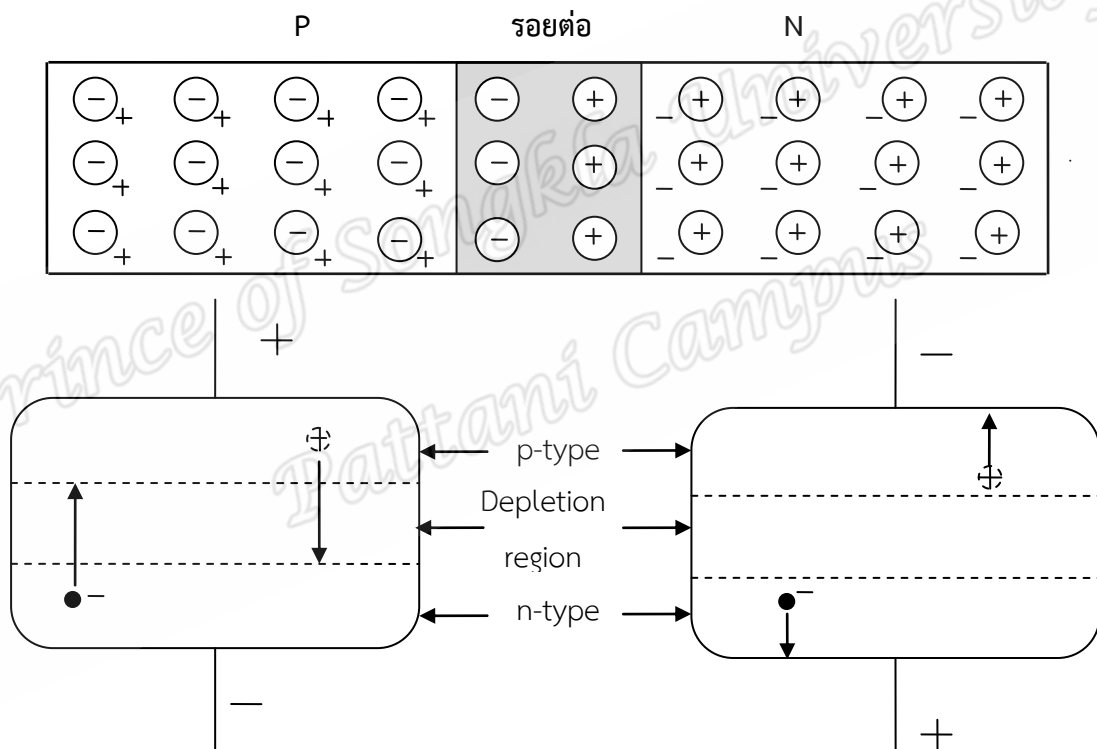
ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของ Si ที่มี B เจือปน (a) ซึ่งทำให้เกิดระดับผู้รับ (b)

นอกจาก Si และ Ge แล้ว ยังมีสารอื่นที่นิยมนำมาใช้เป็นหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ เช่น CdSe, CdTe, Hgl₂

เมื่อผลึกสารตัวนำแบบพีมาต่อแบบเอ็น เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) ที่บริเวณรอยต่อนั้น ดังภาพที่ 2.12 (บน) อิเล็กตรอนของผลึกแบบเอ็นจะรวมกับโฮล ของผลึกแบบพี และเกิดบริเวณที่มีสภาพเป็นกลาง เรียกว่า บริเวณการพร่อง (depletion region) ถ้าให้ศักย์ไฟฟ้า

หรือไบแอส (bias) กับผลึกที่มีรอยต่อพี - เอ็น โดยผลึกแบบพี ให้เป็นขั้วบวก และผลึกแบบเอ็นให้เป็นขั้วลบ เรียกว่า ไบแอสทางตรง (forward bias) ดังภาพที่ 2.12 (a) โฮลจากผลึกแบบพีจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ และอิเล็กตรอนจากผลึกแบบเอ็นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ทำให้บริเวณการพ่องแคบลง

เมื่อไบแอสกลับทาง (reverse bias) ดังภาพที่ 2.12 (b) คือ การต่อขั้วลบให้กับผลึกแบบพี และต่อขั้วบวกให้กับผลึกแบบเอ็น ซึ่งโฮลจากผลึกแบบพีจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ ส่วนอิเล็กตรอนจากผลึกแบบเอ็นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ทำให้บริเวณการพ่องกว้างขึ้น และเมื่อได้รับพลังงาน เช่น พลังงานจากรังสี จะเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า การให้ไบแอสกลับทางจะทำให้บริเวณการพ่องกว้างขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งวิธีการนี้เป็นหลักการพื้นฐานของหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ



(a) Forward bias

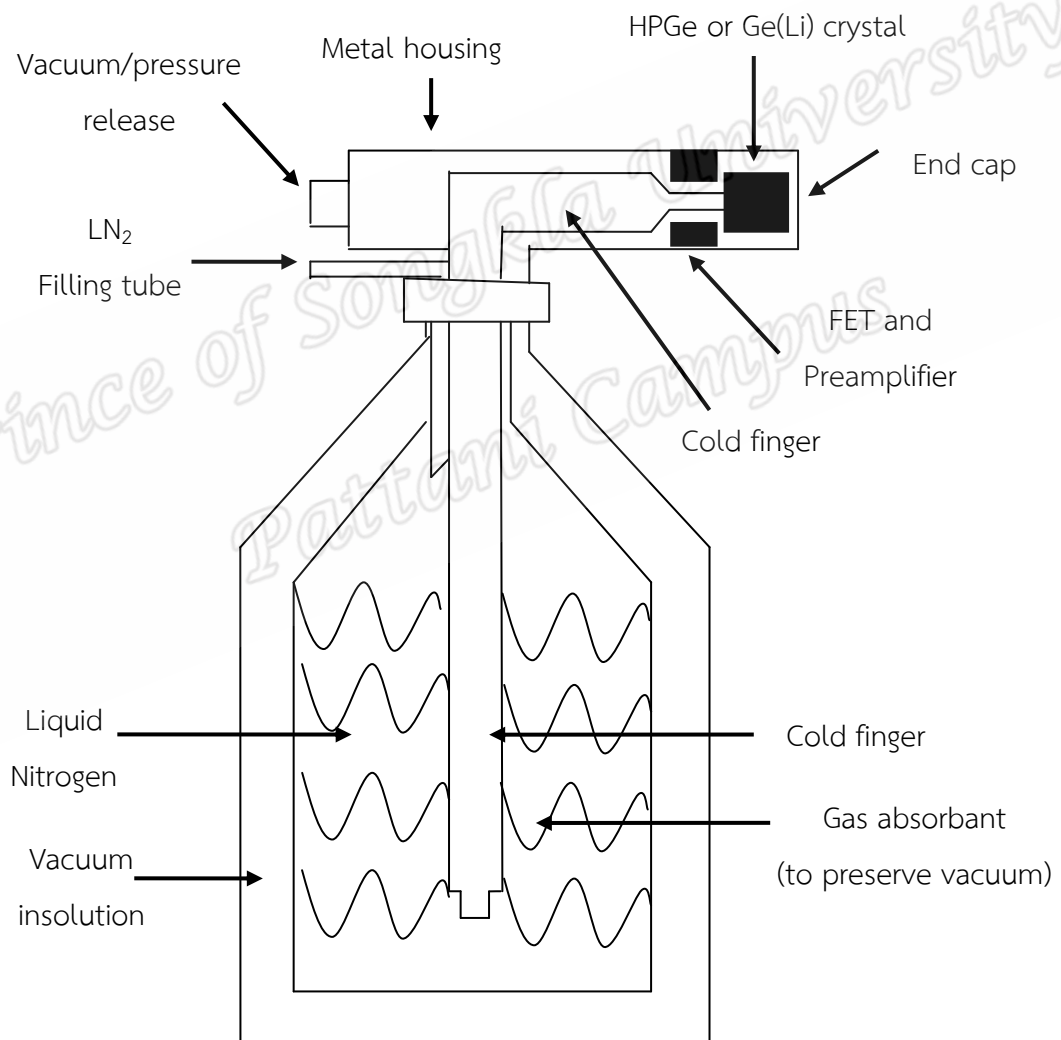
(b) Reverse bias

ภาพที่ 2.12 รอยต่อพี - เอ็น ที่เกิดจากอิเล็กตรอนของผลึกแบบเอ็นร่วมกับโฮลของผลึกแบบพี (บน)

การให้ไบแอสทางตรงกับรอยต่อพี - เอ็น ทำให้บริเวณพ่องแคบลง (a) และการให้ไบแอสกลับทาง จะทำให้บริเวณการพ่องนั้นกว้างขึ้น (b)

2.13.2 หัววัดรังสีเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe)

หัววัดรังสีเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (high purity germanium detector, HPGe) หรือ อินทรินซิกเจอร์มาเนียม (germanium intrinsic) จะใช้ผลึกของเจอร์มาเนียมที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยมีสารเจือปนน้อยกว่า 10^{10} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งไม่จำเป็นต้องแพร่ Li เข้าไปแทนที่สารเจือปน และสามารถเก็บได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ยังคงทำงานที่อุณหภูมิจนไนโตรเจน โดยหัววัดจะติดอยู่ที่ถังไนโตรเจนเหลว ดังภาพที่ 2.13 แบบของหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูงที่มีอยู่ทั่วไป คือ เพลนนาร์ (planar) โคแอกเซียล (coaxial) และเวลไทป์ (well type)



ภาพที่ 2.13 หัววัด Ge(Li) หรือ HPGe ที่มีแกนหัววัดต่อเข้ากับถังบรรจุไนโตรเจนเหลว

HPGe แบบเพลนเนอร์มีความหนาประมาณ 5-15 มิลลิเมตร เหมาะสำหรับวัดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาพลังงานต่ำ (3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ – 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) หน้าต่างมักทำจากโบรอนที่มีความหนาประมาณ 0.3 ไมโครเมตร ส่วน HPGe แบบโคแอกเซียลนั้น แขนกกลางจะเป็นช่องว่าง หากทำจากสารกึ่งตัวนำแบบพี (p-type HPGe coaxial detector) หน้าต่างมักทำจากลิเทียม ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงถึง 25 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และสามารถวัดรังสีแกมมาที่มีพลังงานในช่วง 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ – 10 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ หากเป็นหัววัดที่ทำจากสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (n-type HPGe coaxial detector) หน้าต่างมักเป็นโบรอน เหมาะสำหรับวัดรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ – 10 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับหัววัด HPGe แบบเวลท์ป์ เหมาะสำหรับการวัดรังสีแกมมา ตอนกลางของหัววัดจะมีลักษณะเป็นหลุม ไว้ใส่ตัวอย่างที่ต้องการวัดรังสี ทำให้มีจ็อยเมทรี 4π ซึ่งให้ประสิทธิภาพการวัดสูง

ในงานสเปกโทรเมทรี จะใช้วงจรวิเคราะห์แบบหลายช่องที่ต่อเข้ากับระบบของหัววัดเพื่อแสดงสเปกตรัมของพลังงาน เมื่อโฟตอนสูญเสียพลังงานไปบางส่วนในหัววัด เนื่องจากการกระเจิงคอมป์ตัน ทำให้เกิดคอมป์ตันพีคที่มีขนาดกว้างในสเปกตรัมตำแหน่งที่ต่ำกว่าโฟโตพีค อัตราส่วนของโฟโตพีคต่อคอมป์ตันพีคมีค่าค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 5:1) สำหรับหัววัดชนิดแสงวับเมื่อเทียบกับหัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำที่มีค่าสูง เช่น หัววัด HPGe แบบโคแอกเซียลมีค่าได้สูงถึง 60:1 ด้วยเหตุนี้ หัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำจึงมีความสามารถแยกพลังงานของรังสีได้ดีกว่าหัววัดชนิดแสงวับ อีกทั้งการผลิตคู่อิเล็กตรอน – โฮล ในสารกึ่งตัวนำนั้นก็ใช้พลังงานต่ำ เช่น ใน Si จะใช้ 3.61 อิเล็กตรอนโวลต์ และใน Ge จะใช้ 2.96 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่สำหรับหัววัดชนิดแสงวับต้องใช้พลังงานประมาณ 30 อิเล็กตรอนโวลต์ ในการผลิตคู่อิออน ดังนั้น สเปกตรัมของรังสีจากหัววัดสารกึ่งตัวนำ จึงแสดงรายละเอียดได้ดีกว่าหัววัดชนิดแสงวับมาก

ในงานวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคนิวเคลียร์ นิยมใช้หัววัดรังสีทั้ง 3 ชนิด อันได้แก่ หัววัดรังสีชนิดแสงวับ ชนิดบรรจุแก๊ส และชนิดสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ ยังมีเครื่องวัดรังสีชนิดอื่นๆอีก เช่น มาตรฐานปริมาณรังสีเคมี (chemical dosimeter) มาตรฐานปริมาณรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (thermoluminescence dosimeter, TLD) มาตรฐานปริมาณรังสีฟิล์มแบดจ์ (film badge dosimeter) และเครื่องวัดแทรกเอทซ์ (track-etch detector) การใช้เครื่องวัดรังสีที่เหมาะสมเป็นเรื่องสำคัญมากในการวิเคราะห์โดยเทคนิคนิวเคลียร์ เพราะนิวไคลด์กัมมันตรังสีสลายให้รังสีและพลังงานที่เฉพาะ ซึ่งจะแตกต่างกันไปของแต่ละนิวไคลด์ และแต่ละเครื่องวัดรังสีนั้นก็ก็มีสมบัติและประสิทธิภาพในการวัดรังสีแต่ละชนิดแตกต่างกันด้วย

2.14 ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดรังสี

ในส่วนการวัดรังสีนั้น อัตราการนับรังสี (count rate) ที่ได้จากเครื่องวัดจะไม่เท่ากับการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้นจริงๆ ทั้งนี้ เนื่องจากปัจจัยหลายประการ เช่น ระบบการวัดรังสี ธรรมชาติของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ชนิดและขนาดของหัววัด บางปัจจัยจะมีผลให้อัตราการนับรังสีต่ำลง บางปัจจัยส่งผลให้อัตราการนับรังสีเพิ่มขึ้น ดังนั้น ในการวัดรังสีนั้นจะต้องทราบว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อการวัดรังสี แล้วทำการปรับแก้ คำนวณให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง

2.14.1 แบนกราวด์

แบนกราวด์ (background) หรือพื้นหลัง เป็นค่าการนับรังสีที่ได้จากรังสีพื้นหลัง (background radiation) ซึ่งจะเน้นรังสีในสิ่งแวดล้อม แบนกราวด์ได้จากการวัดรังสีในขณะที่ไม่มีความยาวสารกัมมันตรังสีใดๆในเครื่องวัด มีผลให้ได้ค่าการนับสารกัมมันตรังสีเพิ่มขึ้น ค่าแบนกราวด์ที่ตรวจวัดได้มีแหล่งมาจาก

- 1) รังสีคอสมิก (cosmic radiation)
- 2) นิวไคลด์กัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม เช่น ^{232}Th , ^{238}U จากพื้นโลก ^{14}C , ^{40}K จากร่างกายของเราเอง รวมทั้งวัสดุสิ่งของรอบๆกายของเรา
- 3) นิวไคลด์กัมมันตรังสีจากอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ เช่น นาฬิกา
- 4) นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เก็บ หรืออยู่ใกล้ๆหัววัด
- 5) นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เปราะเปื้อนอุปกรณ์ เครื่องมือรังสี โต๊ะ เก้าอี้ ฯลฯ
- 6) ฝุ่นกัมมันตรังสี

ในระบบการวัดรังสีใดๆนั้น อาจทำให้ค่าแบนกราวด์ลดลงได้โดยใช้เครื่องกำบังรังสีหรือใช้วงจรแอนติโคอิดินซิเดนซ์ (anticoincidence)

2.14.2 รีซอลวิงไทม์

ในการวัดรังสีนั้น เมื่อรังสีตกกระทบหัววัดจะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า หัววัดต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งที่จะส่งผ่านสัญญาณนั้นไปสู่วงจรอื่นๆต่อไป ซึ่งหากมีรังสีผ่านเข้ามาอีก หัววัดจะยังไม่สามารถตอบสนองและทำการวัดได้ จะทำให้การวัดรังสีได้ค่าอัตรานับน้อยกว่าค่าความเป็นจริง การสูญเสียอัตรานับนี้ไป เรียกว่า โคอิดินซิเดนซ์ลอส และช่วงเวลาน้อยที่สุดที่หัววัดสามารถบันทึกผลการวัดรังสีได้อีก เรียกว่า รีซอลวิงไทม์ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันในแต่ละหัววัด เช่น เครื่องนับรังสีไกเกอร์มีค่า

100-1000 วินาที และเครื่องนับรังสีแบบสัดส่วนมีค่า 5-50 มิลลิวินาที ส่วนหัววัด NaI(Tl) มีค่าต่ำ น้อยกว่า 1 มิลลิวินาที เมื่อเราทราบค่ารีซอลวิงใหม่แล้ว สามารถคำนวณอัตรานับจริงได้ดังสมการ

$$R = \frac{r}{1 - \tau} \quad (2.21)$$

2.14.3 ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี

ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีจะแตกต่างกัน จะขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัดประเภทของ รังสีและพลังงานของรังสี เช่น หัววัดไกเกอร์มีประสิทธิภาพเกือบร้อยละ 100 สำหรับรังสีแอลฟา ประมาณร้อยละ 96 สำหรับรังสีบีตา และประมาณร้อยละ 1 สำหรับรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ พลังงานสูง ส่วนหัววัดชนิดแสงวับและชนิดสารกึ่งตัวนำนั้น มีประสิทธิภาพแตกต่างกันไปตามประเภท ของรังสี พลังงาน และขนาดของหัววัด

2.14.4 ส่วนของรังสีที่สลาย

โดยทั่วไป นิวไคลด์กัมมันตรังสีสลายให้รังสีที่มีพลังงานหลายค่า และการสลายให้ รังสีแกมมานั้นจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการสลายให้รังสีอื่น เช่น แอลฟา และบีตาแล้ว ดังนั้น รังสีที่ทำ การตรวจวัดอาจจะเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการสลาย เช่น ประมาณร้อยละ 95 ของการสลาย ^{137}Cs ให้ รังสีบีตาที่พลังงาน 0.512 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ แล้วได้นิวไคลด์ที่ยังอยู่ในสถานะกระตุ้นที่จะสลาย ต่อไป ซึ่งโดยร้อยละ 90 จะให้รังสีแกมมาที่พลังงาน 0.662 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และร้อยละ 10 จะ สลายโดยการเปลี่ยนแปลงภายใน ส่วนของรังสีแกมมาที่สลายจาก ^{137}Cs เท่ากับ $0.95 \times 0.9 = 0.85$

2.14.5 การกระเจิง

รังสีที่สลายออกจากแหล่งกำเนิดทุกทิศทุกทางนั้น บางส่วนรังสีอาจชนกับภาชนะ รองรับแหล่งกำเนิดรังสีแล้วจะสะท้อนกลับเข้าสู่หัววัด เรียกว่า การกระเจิงกลับ (backscatter) หรือ รังสีอาจชนกับวัสดุที่อยู่ใกล้กับหัววัด เช่น เครื่องกำบังรังสี แล้วสะท้อนเข้าสู่หัววัด และในกรณีหลังนี้ เรียกว่า การกระเจิงด้านข้าง (side scatter) เหตุการณ์ดังกล่าว มีผลให้อัตรานับรังสีเพิ่มขึ้น แสดง

โดยค่าร้อยละการกระเจิงกลับ (% backscatter, %B) และปัจจัยการกระเจิงกลับ (backscatter factor, B)

ปัจจัยการกระเจิงกลับ มีค่าเปลี่ยนไปตามพลังงานและชนิดของรังสี และยังขึ้นอยู่กับเลขเชิงอะตอม ความหนาแน่นและความหนาของวัสดุรองรับอีกด้วย ปัจจัยการกระเจิงกลับจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อไม่มีการกระเจิงกลับเลย และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงที่ระดับอิ่มตัว (saturation level) สำหรับรังสีปีตา ความหนาของวัสดุที่ทำให้เกิดการกระเจิงอิ่มตัวนั้น จะมีค่าเท่ากับ $1/3$ ของพิสัยของปีตาในวัสดุนั้น

การใช้วัสดุรองรับที่มีเลขเชิงอะตอมต่ำ จะช่วยให้การกระเจิงกลับลดลง เช่น การวัดตัวอย่างสารกัมมันตรังสีที่สลายให้อนุภาคปีตา ควรใช้อะลูมิเนียมที่เป็นวัสดุรองรับมากกว่าทองแดงหรือเหล็ก ส่วนการกระเจิงที่เกิดขึ้นเนื่องจากเครื่องกำบังรังสีนั้น อาจแก้ไขโดยการเพิ่มระยะทางระหว่างหัววัดกับเครื่องกำบังรังสี หรืออาจใช้วัสดุที่มีเลขเชิงอะตอมต่ำ เช่น พลาสติกกันหรือบุระหว่างหัววัดกับเครื่องกำบังรังสี

2.14.6 การดูดกลืนโดยตัวกลาง

ตัวกลางต่างๆที่อยู่ระหว่างตัวอย่างสารกัมมันตรังสีกับหัววัด เช่น อากาศ หน้าต่างของหัววัด จะดูดกลืนรังสีไปบางส่วน ในการดูดกลืนรังสีเช่นนี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานและชนิดของรังสีหรือวัสดุที่มีความหนาตั้งแต่ 6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถดูดกลืนแอลฟาไว้ได้ทั้งหมด ดังนั้น การวัดรังสีแอลฟาด้วยหัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำนั้น จึงต้องทำในสภาพสุญญากาศ แต่ถ้าเป็นรังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่า 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ สามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัดได้โดยไม่ถูกดูดกลืนเลย กล่าวได้ว่า ปัจจัยของการดูดกลืนมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับรังสีปีตานั้น ปัจจัยการดูดกลืนจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางระหว่างตัวอย่างจากแหล่งกำเนิดรังสีกับหัววัด ถ้าหากหัววัดมีหน้าต่างบางหรือไม่มีหน้าต่างเลย การดูดกลืนรังสีจะมีค่าลดลง

2.14.7 การดูดกลืนตัวเอง

รังสีที่สลายออกจากต้นกำเนิดบางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยแหล่งกำเนิดรังสีเอง เรียกว่า การดูดกลืนตัวเอง (self absorption) ในขณะที่ปริมาตรของสารตัวอย่างคงที่เมื่อกัมมันตภาพเพิ่มขึ้น หรือความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีเพิ่มขึ้นนั่นเอง อัตรานับรังสีที่ตรวจวัดได้จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสูญเสียอัตรานับจากการดูดกลืนตัวเองคงที่ แต่ถ้าปริมาตรของตัวอย่างเพิ่มขึ้นโดยที่ กัมมันตภาพรวมไม่ได้เพิ่มขึ้น อัตรานับรังสีที่วัดได้จะลดลง เนื่องจากการดูดกลืนตัวเองเพิ่มขึ้น

และขณะที่กัมมันตภาพจำเพาะคงที่ ในกรณีที่ปริมาตรของสารตัวอย่างเพิ่มขึ้น หรือกัมมันตภาพรวมเพิ่มขึ้น อัตรานับจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกที่ปริมาตรเพิ่มขึ้น จนกระทั่งตัวอย่างมีความหนาอนันต์ (infinite thickness) อัตรานับจะคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการดูดกลืนตัวเองที่เพิ่มขึ้น เพราะความหนาเพิ่มขึ้น ถูกชดเชยด้วยกัมมันตภาพของสารตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น

ในการวัดรังสีแต่ละครั้ง บางปัจจัยอาจไม่มีอิทธิพลต่อการวัด หากได้เตรียมสารตัวอย่างและมีระบบการวัดที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม การวัดรังสีที่ต้องการทราบกัมมันตภาพของสารตัวอย่างนั้นจำเป็นต้องใช้สารมาตรฐานที่ทราบค่ากัมมันตภาพและเป็นนิวไคลด์ชนิดเดียวกันกับตัวอย่าง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวัด สารมาตรฐานอาจมีสถานะเป็นของเหลวหรือของแข็งก็ได้ มีการระบุกัมมันตภาพที่แน่นอนและวันที่ตรวจวัด หากเป็นของเหลวจะต้องระวังการระเหยของสารละลาย เพราะจะทำให้กัมมันตภาพจำเพาะเปลี่ยนขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบของสารมาตรฐานสารตัวอย่าง หากมีความแตกต่างกันจะทำให้การดูดกลืนและปัจจัยการกระเจิงแตกต่างกันด้วย ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณค่ากัมมันตภาพของตัวอย่างต่อไป (นวลฉวี, 2545)

Prince of Songkla University
Pattani Campus