บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 แหล่งกำเนิดของกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ

แหล่งกำเนิดของกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ สามารถแบ่งออกเป็น 2 แหล่งใหญ่ ๆ คือ

2.1.1 รังสีคอสมิก (Cosmic radiation) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.1.1.1 รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (Primary cosmic radiation) คือรังสีคอสมิกที่อยู่เหนือชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก โดยส่วนหนึ่งมีแหล่งกำเนิดจากนอกระบบสุริยะจักรวาล และอีกส่วนหนึ่งเกิดบนผิวของดวงอาทิตย์ รังสีคอสมิกประกอบด้วย โปรตอน 87% อนุภาคแอลฟา 11% นิวเคลียสหนัก 1% อิเล็กตรอน 1% เมื่อรังสีคอสมิกปฐมภูมิวิ่งเข้ามาถึงชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก ส่วนใหญ่จะเกิดอันตรกิริยากับชั้นบรรยากาศในระยะ 200-300 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรแรก เกิดเป็นรังสีคอสมิกทุติยภูมิ

2.1.1.2 รังสีคอสมิกทุติยภูมิ (Secondary cosmic radiation) คือรังสีคอสมิกที่เกิดจากรังสีคอสมิกปฐมภูมิเกิดอันตรกิริยากับชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก ซึ่งประกอบด้วย อนุภาคนิวตรอน โปรตอน และอิเล็กตรอน ปริมาณรังสีจากรังสีคอสมิก จะแปรผันตามระดับความสูง (Altitude)

2.1.2 กัมมันตรังสีที่ปะปนอยู่พื้นผิวโลก (Terrestial radionuclides) ธาตุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติบนพื้นผิวโลก มีอยู่ประมาณ 340 ธาตุ ในจำนวนนั้น 70 ธาตุ เป็นธาตุกัมมันตรังสี แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการเกิด คือ

2.1.2.1 กัมมันตรังสีดั้งเดิม (Primodial radionuclides) คือกัมมันตรังสีที่มีมาพร้อมการเกิดโลก ได้แก่ Uranium-238, Uranium-235, Thorium-232 และ Potassium-40

2.1.2.2 กัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิก (Cosmogenic radionuclides) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาของรังสีคอสมิก ได้แก่ Tritium-3, Beryllium-7, Carbon-14 และ Argon-37

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 สารกัมมันตรังสี

2.2.1 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารกัมมันตรังสีชนิดนั้น แต่ละนิวเคลียสในสารกัมมันตรังสีมีโอกาสที่สลายตัวต่อหนึ่งหน่วยเวลาเท่ากัน

อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีต่อวินาที เรียกว่า "กัมมันตภาพหรือความแรงของสารกัมมันตรังสี (Activity)" จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$A = -\frac{dN}{dt} \qquad ...(2.1)$$

เมื่อ A คือ ความแรงของสารกัมมันตรังสี

N คือ จำนวนอะตอม

t คือ เวลาที่สารกัมมันตรังสีสลายตัว

2.2.2 สมการการสลายตัว

สำหรับความแรงของสารกัมมันตรังสีที่ปรากฏ เมื่อเวลาผ่านไป t เป็นไปตามสมการ

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \qquad ...(2.2)$$

เมื่อ A_0 คือ ความแรงของสารกัมมันตรังสี เมื่อเริ่มพิจารณา t = 0

A(t) คือ ความแรงของสารกัมมันตรังสี เมื่อเวลา t

λ คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Decay constant) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละสารกัมมันตรังสี

เมื่อสารกัมมันตรังสีเดิมสลายไป โดยการส่งอนุภาคแอลฟา เบตา หรือแกมมาออกมา เป็นผลให้มีสารกัมมันตรังสีใหม่เกิดขึ้น ความแรงของสารกัมมันตรังสีจึงเป็นสัดส่วนกับจำนวนอะตอมที่สลายตัวได้ในหนึ่งหน่วยเวลา เขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$A = \lambda N \qquad ...(2.3)$$

และสมการ (2.2) อาจเขียนได้ดังนี้

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \qquad ...(2.4)$$

จากสมการ (2.1) (2.3) และ(2.4) จะได้

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N \qquad ...(2.5)$$

เครื่องหมายลบ แสดงว่า จำนวนอะตอมจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป

2.2.3 ครึ่งชีวิต (Half life)

ครึ่งชีวิต หมายถึง เวลาที่อะตอมของสารกัมมันตรังสีใช้ในการสลายตัว เพื่อให้ปริมาณเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม

อัตราส่วนของจำนวนอะตอมเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ 1 ครึ่งชีวิตต่อจำนวนอะตอมเดิม คือ

$$\frac{N(t)}{N_0} = \frac{1}{2}$$

จากสมการ (2.4) จะได้ ;

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$\ln 2 = \lambda t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad ...(2.6)$$

เมื่อ $t_{1/2}$ คือ ค่าครึ่งชีวิต

2.2.4 หน่วยวัดความแรงของสารกัมมันตรังสี

ความแรงของสารกัมมันตรังสีหรือกัมมันตภาพ เป็นหน่วยกัมมันตรังสีที่แสดงอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี โดยมี คูรี (Curie: Ci) และรัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford: Rd) เป็นหน่วยแสดงค่ากัมมันตภาพ โดยกำหนดว่า

1 คูรี หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 3.7×10^{10} ครั้งต่อวินาที

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

1 รัทเธอร์ฟอร์ด หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 10^6 ครั้งต่อวินาที

$$1\ Rd = 10^6 dps$$

สำหรับหน่วยสากล (International System Units: SI units) กำหนด เบ็กเคอเรล (Becquerel: Bq) เป็นหน่วยแสดงค่ากัมมันตภาพ

1 เบ็กเคอเรล หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 1 ครั้งต่อวินาที

$$1\ Bq = 1\ dps$$

2.2.5 ความแรงรังสีจำเพาะ (Specific activity)

เป็นค่าที่บอกถึงความเข้มข้นของความแรงของสารกัมมันตรังสี ซึ่งหมายถึง ความแรงของสารกัมมันตรังสีต่อหน่วยน้ำหนักของธาตุกัมมันตรังสี ตัวอย่างหน่วยของความแรงรังสีจำเพาะ เช่น คูรีต่อกรัม (Ci/g) หรือ เบ็กเคอเรลต่อกรัม (Bq/g)

2.3 รังสีแกมมา

2.3.1 การสลายตัวให้รังสีแกมมา

การสลายตัวให้รังสีแกมมา เกิดขึ้นหลังจากการสลายตัวให้รังสีหรืออนุภาคใด ๆ แล้ว หากนิวไคลด์ลูกยังอยู่ในสถานะกระตุ้น นิวไคลด์นั้นจะต้องปรับตัวเข้าสู่สถานะพื้น โดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นั่นก็คือ รังสีแกมมาหรือโฟตอน พลังงานและความถี่ของรังสีแกมมามีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$h\nu = |E_f - E_i| \quad \ldots (2.7)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์

ν คือ ความถี่ของพลังงานรังสีแกมมา

E_i คือ พลังงานเริ่มต้น

E_f คือ พลังงานสุดท้าย

การสลายตัวให้รังสีแกมมาไม่มีผลต่อเลขมวล และเลขอะตอมของนิวไคลด์ก่อนและหลังการสลายตัว แต่มีผลให้ค่าพลังงานลดลง นิวไคลด์แม่และนิวไคลด์ลูกจึงเป็นไอโซเมอร์ อาจเรียกการสลายตัวให้รังสีแกมมาได้ว่า "การเปลี่ยนแปลงไอโซเมอริก (Isomeric transition)"

2.3.2 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้ามาในหัววัด จะเกิดอันตรกิริยากับสสาร และมีการถ่ายเทพลังงานให้แก่อะตอมหรือโมเลกุลอย่างต่อเนื่อง รูปแบบของอันตรกิริยามีหลายแบบ ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 3 แบบ ที่มีผลและมีส่วนนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการวัดรังสี ดังนี้

2.3.2.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric effect)

กระบวนการที่โฟตอนเกิดอันตรกิริยากับอะตอม และมีการถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนที่วิ่งรอบนิวเคลียสของอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนตัวนั้นหลุดออกไปภายนอกอะตอม เรียกว่า "โฟโตอิเล็กตรอน" โดยที่พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน (E_c)มีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานของรังสีแกมมา ($h\nu$) กับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนขณะอยู่ที่วงรอบนิวเคลียส (E_b) ดังสมการ

$$E_c = h\nu - E_b \quad \ldots (2.8)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์

ν คือ ความถี่ของพลังงานรังสีแกมมา

โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก จะแปรตามค่าเลขอะตอมยกกำลังสี่ และแปรผกผันกับพลังงานรังสียกกำลังสาม

2.3.2.2 การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering)

เป็นกระบวนการที่โฟตอนเกิดอันตรกิริยากับอะตอม โดยวิ่งชนอิเล็กตรอนที่วิ่งรอบนิวเคลียสของอะตอม แล้วถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนตัวนั้นไม่หมด นั่นคือพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกถ่ายเทให้อิเล็กตรอนตัวที่ถูกชนแล้วกระเด็นออกไป และพลังงานส่วนที่เหลือจะเป็นโฟตอนที่มีความยาวคลื่นมากกว่าเดิมและทิศทางก็เปลี่ยนไปจากเดิมด้วย เขียนสมการได้ดังนี้

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1+\left[\left(\frac{h\nu}{m_0c^2}\right)(1-\cos\theta)\right]} \qquad ...(2.9)$$

เมื่อ $h\nu$ คือ พลังงานเดิมของรังสีแกมมา

$h\nu'$ คือ พลังงานของรังสีแกมมาที่กระเจิงออกมา

θ คือ มุมที่รังสีแกมมาเบนไปจากแนวเดิมที่เข้ามา

m_0 คือ มวลของอิเล็กตรอนในสภาพหยุดนิ่ง

c คือ ความเร็วแสง

2.3.2.3 การเกิดอิออนคู่ (Pair production)

เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนที่ตกกระทบมีพลังงานมากกว่า 1.022 MeV ในกระบวนการนี้พลังงานของโฟตอนจะถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน คือ โพสิตรอนและอิเล็กตรอน ขึ้นแทน พลังงานที่ใช้ในการเกิดโพสิตรอนและอิเล็กตรอนแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ 0.511 MeV ส่วนพลังงานที่เหลือจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของโพสิตรอนและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเสถียร แต่โพสิตรอนที่เกิดขึ้นจะมีอายุสั้น เมื่อสูญเสียพลังงานจลน์หมดจะวิ่งไปรวมกับอิเล็กตรอน (ซึ่งมีอยู่ทั่วไป) กลายเป็นรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.511 MeV จำนวน 2 ตัว วิ่งในทิศตรงข้ามกัน กระบวนการนี้เรียกว่า "แอนนิฮิเลชั่น (Annihilation)" โอกาสในการเกิดอิออนคู่ จะแปรตามเลขอะตอมยกกำลังสอง

2.3.4 การลดทอนของรังสีแกมมา (The attenuation of gamma-ray)

เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ทำให้ความเข้มของรังสีแกมมาลดลง ปริมาณรังสีที่ผ่านออกมาจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล กำหนดให้ลำรังสีแกมมาความเข้ม I ตกกระทบบนแผ่นที่มีความหนา x เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$dI = -\mu I dx$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad \ldots(2.10)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของรังสีแกมมาก่อนผ่านความหนา x

I คือ ความเข้มของรังสีแกมมาหลังจากผ่านความหนา x

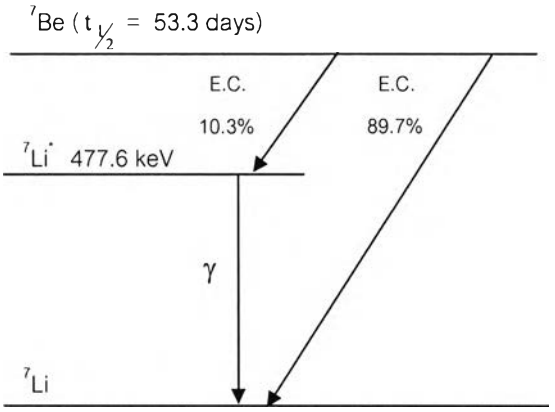
μ คือ สัมประสิทธิ์ของการลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)

2.4 เบริลเลียม-7 (Beryllium-7)

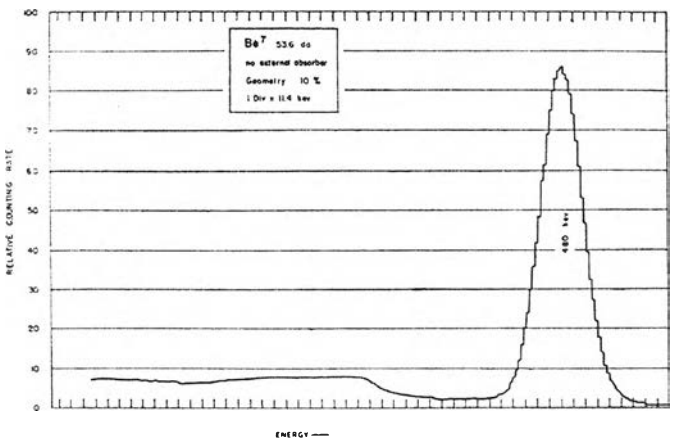
เบริลเลียม-7 เป็นสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและปะปนอยู่ที่พื้นผิวโลก ซึ่งเกิดจากรังสีคอสมิกที่มีพลังงานสูงผ่านเข้ามาสู่ชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก ทำปฏิกิริยาแบบ Spallation กับไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอน ในบริเวณชั้น Stratosphere ตอนล่างและชั้น Troposphere ตอนบน ผลของปฏิกิริยานี้ทำให้มีนิวไคลด์แตกออกมาเป็นส่วน ๆ นิวไคลด์บางส่วนเป็นสารกัมมันตรังสี นั่นก็คือ เบริลเลียม-7

เบริลเลียม-7 เป็นสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวแบบ Electron capture ปล่อยรังสีแกมมา 10.3% ที่พลังงาน 477.6 keV กลายเป็นลิเทียม-7 สมการการสลายตัวของเบริลเลียม-7 เป็นดังนี้

$$^{7}_{4}\mathrm{Be} \xrightarrow{\text{E.C.}} {}^{7}_{3}\mathrm{Li} \qquad \ldots(2.11)$$



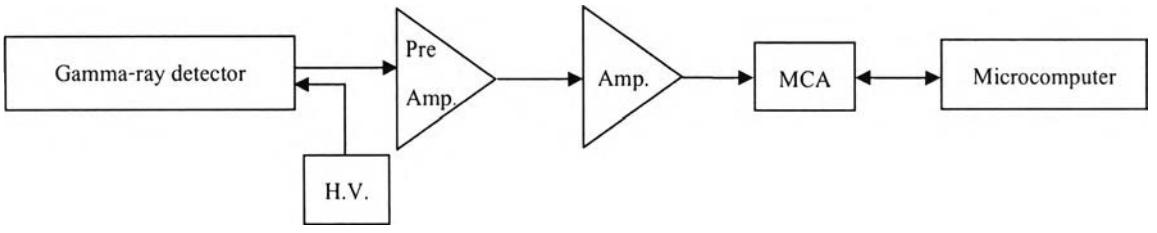
รูปที่ 2.1 แผนผังการสลายตัวของเบริลเลียม-7 [5]



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของเบริลเลียม-7 [5]

2.5 ระบบการวัดรังสีแกมมา (Gamma-ray spectrometer)

วิธีแกมมาสเปกโตรเมตรีในการวิจัยนี้ ใช้หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทัลเลียม) [Sodium Iodide (Thallium) detector: NaI(Tl)] ซึ่งเป็นหัววัดชนิดซินทิลเลชัน (Scintillation detector) และหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง ซึ่งเป็นหัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector) เพื่อวัดรังสีแกมมาของเบริลเลียม-7



รูปที่ 2.3 แผนภาพระบบการวัดรังสีแกมมาสเปกโตรเมตรี

2.6 การวัดปริมาณรังสีแกมมาในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม

สำหรับการวิจัยนี้ จะทำการวัดปริมาณรังสีแกมมาในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมที่ห้องปฏิบัติการ จึงสามารถควบคุมสภาวะต่าง ๆ ในการวัดรังสีได้ และทำการเปรียบเทียบตัวอย่างสิ่งแวดล้อมกับสารมาตรฐานได้โดยง่าย เพราะมีระบบการวัดรังสีที่เหมือนกัน

ในการเตรียมตัวอย่างสิ่งแวดล้อม โดยปกติตัวอย่างที่นำมาวัดรังสี จะต้องอยู่ในรูปแบบและขนาดที่เหมาะสมต่อการวัด และตัวอย่างต้องมีรูปลักษณะเดียวกันคือ มีขนาดเดียวกัน มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ มีผิวหน้าเรียบ และมีความหนาใกล้เคียงกัน แต่ต้องไม่หนากว่าความหนาวิกฤติ [4]