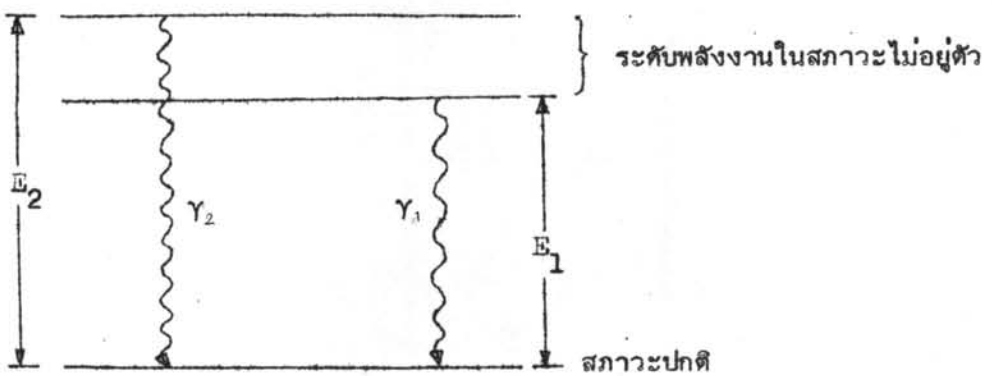
บทที่ ๒

ทฤษฎี

รังสีแกมมา

ในปฏิกิริยาต่างๆ รวมทั้งการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี นิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสภาวะไม่อยู่ตัว (excited state) มีพลังงานภายในสูงกว่าสภาวะปกติ (ground state) ภายในช่วงเวลาสั้นๆ พลังงานส่วนเกินนั้นจะถูกปล่อยออกมาในสภาพของรังสีแกมมา ตามทฤษฎีควันตัม (quantum theory of radiation) พลังงานของรังสีแกมมาถูกส่งออกมาเป็นโฟตอน (photons) ซึ่งสามารถถือว่าเป็นอนุภาคได้เช่นเดียวกัน พลังงานของโฟตอนมีค่าเท่ากับความแตกต่างของพลังงานระหว่างสภาวะที่เกิดการเปลี่ยนสภาวะของนิวเคลียสในรูปที่ ๒.๑ แสดงการเปลี่ยนสภาวะของนิวเคลียสจากสภาวะไม่อยู่ตัวสู่สภาวะปกติ ซึ่งมีพลังงานของโฟตอน E_1 และ E_2 ตามลำดับ



รูปที่ ๒.๑ การเปลี่ยนสภาวะของนิวเคลียส

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน E ของโฟตอนและความยาวคลื่น λ ได้มาจากทฤษฎีควันตัม จากสมการของแพลงค์ (Planck's equation)

$$E = h\nu = hc/\lambda \qquad \text{.....(๒.๑)}$$

เมื่อ h คือค่าคงที่ของแพลงค์ = ๖.๖๒ x ๑๐$^{-๒๗}$ เอิร์ก-วินาที

ν คือความถี่ของคลื่นเป็นวินาที $^{-๑}$

λ คือความยาวคลื่น เป็น ซม.

c คือ ความเร็วแสง = ๓.๐๐ x ๑๐^{๑๐} ซม./วินาที

เมื่อแทนค่า h และ c ลงในสมการ (๒.๑) และเปลี่ยนหน่วยพลังงานจากเอิร์กเป็น **MeV** จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{1.25 \times 10^{-10}}{E} \qquad \text{.....(๒.๒)}$$

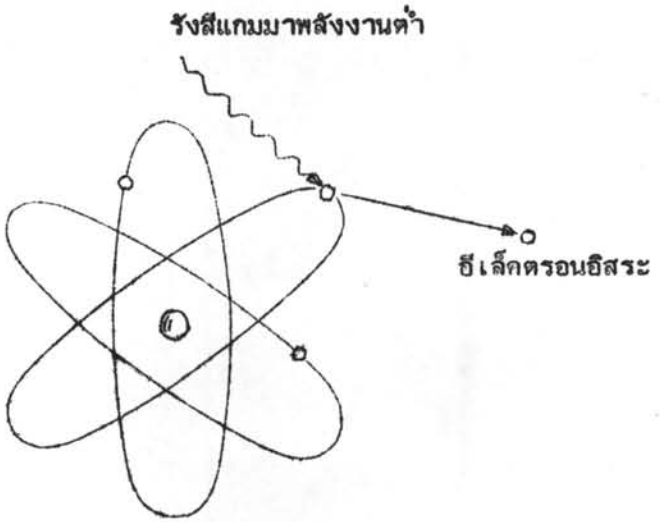
E มีหน่วยเป็น MeV

<u>ปฏิกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับวัตถุ</u> (Interaction of Gamma Rays with Matter)

แม้ว่ารังสีเอ็กซ์, เบรมส์สตราลุง (bremsstrahlung) และรังสีจากการแอนนิฮิเลชัน (annihilation radiation) จะไม่ใช่รังสีแกมมาโดยตรงก็ตาม แต่ลักษณะพื้นฐานเหมือนกันกับรังสีแกมมาในการทำปฏิกิริยากับวัตถุ เพียงแต่รังสีแกมมามีแหล่งกำเนิดมาจากนิวเคลียสเท่านั้นเอง ปฏิกิริยาที่สำคัญที่รังสีแกมมามีต่อวัตถุ มีอยู่ ๓ อย่าง คือ โฟโตอิเล็คตริคเอฟเฟคท์ (photoelectric effect), คอมพ์ตัน เอฟเฟคท์ (**Compton** effect) และแพร์ โปรดัคชัน (pair production)

๑. <u>โฟโตอีเล็คตริค เอฟเฟคท์</u> รังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของอีเล็คตรอนในวงโคจรของอะตอม จะทำปฏิกิริยากับอีเล็คตรอนตัวนั้นโดยการชนอีเล็คตรอน พร้อมกับถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อีเล็คตรอนทำให้อีเล็คตรอนตัวนั้นหลุดออกจากอะตอม เรียกว่า โฟโตอีเล็คตรอน ซึ่งมีพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานของแกมมาโฟตอนลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอีเล็คตรอนในอะตอม สำหรับโฟโตอีเล็คตรอนจะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับอนุภาคเบตาที่มีพลังงานเท่ากัน ขอบเขตการเกิดโฟโตอีเล็คตริคเอฟเฟคท์ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมา, E, และเลขอะตอม, Z ของวัตถุ (absorbing material) ซึ่งประมาณอย่างหยาบๆดังนี้

$$\text{โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตอีเล็คตริค} \simeq \text{ค่าคงที่} \times \frac{Z^n}{E^3} \qquad \ldots\ldots\ldots(๒.๓)$$



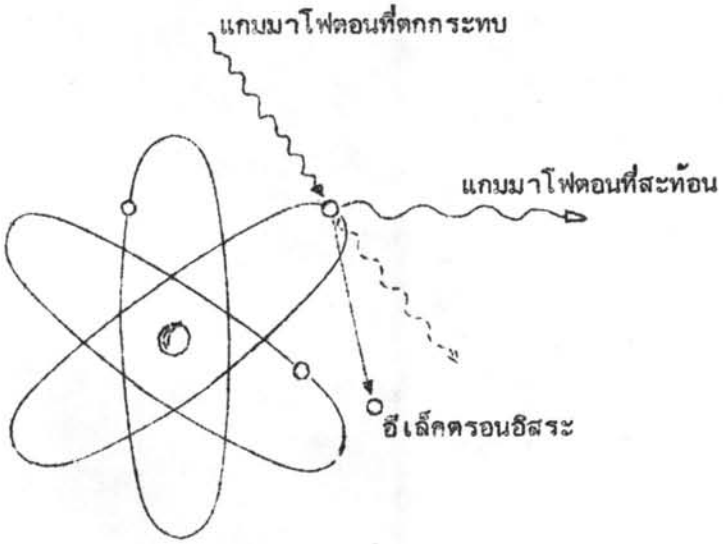
รูปที่ ๒.๒ แสดงปฏิกิริยาโฟโตอีเล็คตริค เอฟเฟคท์

เมื่อ n มีค่าตั้งแต่ ๓ สำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ถึง ๕ สำหรับรังสีแกมมาพลังงานสูง ดังนั้น จะเห็นได้ว่าโฟโตอีเล็คตริค เอฟเฟคท์ มีค่าสูงขึ้น เมื่อเลขอะตอมของวัตถุ มีค่าสูงขึ้น และที่พลังงานของรังสีแกมมามีค่าต่ำลง ในทางปฏิบัติจริงๆพบว่า การดูดกลืนรังสีแกมมาของวัตถุโดยการเกิดโฟโตอีเล็คตริค เอฟเฟคท์ (photoelectric absorption) มีความสำคัญเฉพาะรังสีแกมมาที่มีพลังงานน้อยกว่า ๑ MeV และสำหรับวัตถุที่มีเลขอะตอมสูงๆ

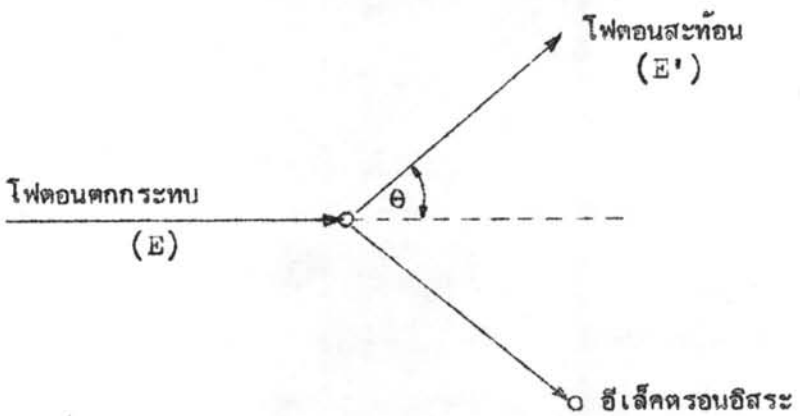
หลังจากมีอีเล็คตรอนหลุดจากอะตอมเป็นโฟโตอีเล็คตรอนแล้ว อีเล็คตรอนในวงโคจรรอบนอกตัวอื่น จะเข้าไปแทนที่พร้อมกับปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ ที่มีคุณสมบัติเฉพาะ (characteristic x-rays) ซึ่งมีพลังงานต่ำมากเมื่อเทียบกับรังสีแกมมา ส่วนใหญ่แล้วเอ็กซ์เรย์โฟตอนนี้จะไปทำให้อีเล็คตรอนในวงโคจรรอบนอก หลุดออกไปอีกตามแบบโฟโตอีเล็คตริค เอฟเฟคท์ ซึ่งเรียกว่า โอเจร์ อีเล็คตรอน (Auger electron) ทำให้เอ็กซ์เรย์โฟตอนสูญเสียพลังงานไปทั้งหมด และโอเจร์ อีเล็คตรอนก็จะสูญเสียพลังงานไปโดยปฏิกิริยาเช่นเดียวกันกับอนุภาคเบตา จะเห็นได้ว่า การเกิดโฟโตอีเล็คตริค เอฟเฟคท์ ทำให้รังสีแกมมาถูกดูดกลืนไปหมดสิ้น ในที่สุด หรืออาจจะมีรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำหลุดออกมาได้บ้างเล็กน้อย

๒. <u>คอมพ์ตัน เอฟเฟคท์</u> ในปฏิกิริยานี้ แกมมาโฟตอน ทำให้เกิดการชนแบบอีลาสติค (elastic collision) หรือการชนแบบลูกบิลเลียดกับอีเล็คตรอนในวัตถุ ซึ่งประพฤติตัวเหมือนเป็นอิสระ เพราะว่าพลังงานยึดเหนี่ยวน้อยกว่าพลังงานของโฟตอนมาก ในการชนแบบนี้ทั้งโมเมนตัมและพลังงานไม่สูญหาย พลังงานส่วนหนึ่งของโฟตอนถูกถ่ายเทให้กับอีเล็คตรอน โฟตอนที่มีพลังงานลดลงจะเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่ไป (scattered photon) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน E ของโฟตอนที่ตกกระทบ E' ของโฟตอนที่สะท้อนไป ในหน่วย MeV และ θ เป็นมุมสะท้อนได้ว่า

$$E' = \frac{0.51}{1-\cos\theta + 0.51/E} \qquad \ldots\ldots\ldots(๒.๔)$$



รูปที่ ๒.๓ แสดงการเกิดปฏิกิริยา คอมพ์ตัน สแคตเตอริง



รูปที่ ๒.๔ ปฏิกิริยา คอมพ์ตัน สแคตเตอริง ของรังสีแกมมา

ถ้ามุมสะท้อนมีค่าน้อย $\cos\theta \approx 1$ จะได้ว่า E' มีค่าประมาณ E และโฟตอนจะมีทิศทางใกล้เคียงทิศเดิม ถ้า $\theta = 90°$, $\cos\theta = 0$ ได้ว่า

$$E' = \frac{0.51\ E}{E + 0.51} < 0.51 \text{ MeV} \quad \text{.....(๒.๕)}$$

ดังนั้นโฟตอนสะท้อนเป็นมุมฉากจะมีพลังงานน้อยกว่า ๐.๕๑ MeV

เศษส่วนของพลังงานของโฟตอนตกกระทบ ที่โฟตอนสะท้อนมีเหลืออยู่สำหรับมุมสะท้อนใดๆ หาได้จากสมการ (๒.๔) เป็น

$$\frac{E'}{E} = \frac{0.51}{E(1-\cos\theta)+0.51} \quad \text{.....(๒.๖)}$$

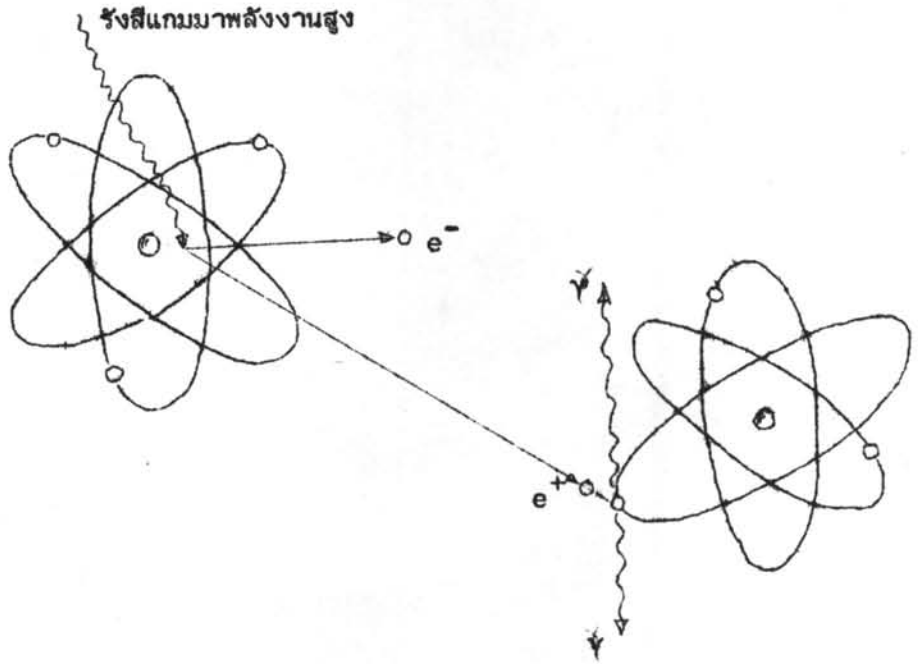
ที่ค่า θ คงที่ เศษส่วนของพลังงานนี้ จะลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบเพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่ง โฟตอนที่ตกกระทบมีพลังงานสูงขึ้นจะทำให้เศษส่วนของพลังงานที่โฟตอนสะท้อนมีเหลืออยู่ต่ำลง นั่นคือ พลังงานส่วนใหญ่ของรังสีแกมมาสูญเสียไปในปฏิกิริยาคอมพ์ตัน

เนื่องจากคอมพ์ตัน เอฟเฟคท์ เป็นปฏิกิริยา ระหว่างโฟตอน และอีเล็คตรอน ปริมาณการเกิดคอมพ์ตัน เอฟเฟคท์ จึงขึ้นอยู่กับจำนวนอีเล็คตรอนในวงโคจรของอะตอม นั่นคือ เลขอะตอมนั่นเอง เพราะฉะนั้น คอมพ์ตัน เอฟเฟคท์ จึงเป็นปฏิภาคโดยตรงกับเลขอะตอมของวัตถุ ซึ่งคล้ายกันกับโฟโตอีเล็คตริค เอฟเฟคท์ และมีความสำคัญมากขึ้นสำหรับวัสดุที่มีเลขอะตอมสูงๆ ขณะเดียวกันก็เป็นปฏิภาคกลับกับพลังงานของแกมมาโฟตอน ซึ่งประมาณได้อย่างหยาบๆว่า

$$\text{โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาคอมพ์ตัน} \simeq \text{ค่าคงที่} \times \frac{Z}{E} \quad \text{.....(๒.๗)}$$

โฟโตอีเล็คตริคและคอมพ์ตัน เอฟเฟคท์ มีความแตกต่างกันที่สำคัญคือ ในโฟโตอีเล็คตริค เอฟเฟคท์ โฟตอนถูกดูดกลืนหายไปโดยตรง ส่วนคอมพ์ตัน เอฟเฟคท์ โฟตอนถูกลดพลังงานลง และเปลี่ยนทิศทางไปเรื่อยๆ ถ้าไม่หลุดออกไปจากวัตถุในที่สุดก็จะถูกดูดกลืน เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตอีเล็คตริค ซึ่งเกิดได้ง่ายขึ้น เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำลง

๓. <u>แพร์ โปรดัคชัน</u> เมื่อแกมมาโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่า ๑.๐๒ MeV วิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอม จะถูกสนามไฟฟ้าความเข้มสูงทำลายให้หายไปพร้อมกับเกิดอีเล็คตรอน-โพสิตรอนขึ้นใหม่ ๑ คู่ เนื่องจากมวลของอีเล็คตรอนกับโพสิตรอนมีค่าเทียบเท่าพลังงาน ๑.๐๒ MeV เพราะฉะนั้น แกมมาโฟตอนต้องมีพลังงานไม่ต่ำกว่า ๑.๐๒ MeV จึงสามารถทำให้เกิดแพร์ โปรดัคชันได้ พลังงานของแกมมาโฟตอนส่วนที่เกิน ๑.๐๒ MeV ส่วนใหญ่กลายเป็นพลังงานจลน์ของอีเล็คตรอนและโพสิตรอนไป และถ่ายเทให้นิวเคลียสของอะตอมอีกเล็กน้อย



รูปที่ ๒.๕ แสดงการเกิดปฏิกิริยาแพร์-โปรดัคชัน และแอนนิฮิเลชัน

ขอบเขตของการเกิด แพร์ โปรดัคชัน โดยรังสีแกมมา ที่มีพลังงาน E MeV สัมพันธ์กับเลขอะตอม Z ของวัตถุโดย

โอกาสการเกิดปฏิกิริยา แพร์ โปรดัคชัน $\simeq$ ค่าคงที่ $XZ^2(E-1.02)$ .....(๒.๘)

นั่นคือเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของวัสดุ และพลังงานของโฟตอนส่วนที่เกินกว่า ๑.๐๒ MeV ความจริงแล้วความสัมพันธ์ข้างบนนั้นใช้ได้เฉพาะการเกิดแพร์ โปรดัคชัน ในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสเท่านั้น แต่ขบวนการนี้จะเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าของอีเล็คตรอนในวงโคจรได้ด้วย ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมเช่นกัน เนื่องจากทั้งโฟโตอีเล็คตริคและคอมพ์ตัน เอฟเฟคท์ลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น แต่แพร์ โปรดัคชันเกิดเพิ่มขึ้น สำหรับวัตถุที่มีเลขอะตอมสูง แพร์ โปรดัคชัน จะเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญที่สุด โดยเฉพาะเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงกว่า ๕ MeV

เช่นเดียวกันกับโฟโตอีเล็คตริค เอฟเฟคท์, แพร์โปรดัคชัน ทำให้แกมมา โฟตอนถูกดูดกลืนหายไป อีเล็คตรอนและโพสิตรอนที่เกิดขึ้นบางตัว จะรวมกันเองหรือโพสิตรอนรวมตัวกับอีเล็คตรอนตัวอื่นให้ แอนนิฮิเลชัน เรดิเอชัน (annihilation radiation) ประกอบด้วยโฟตอน ๒ ตัว ที่มีพลังงานตัวละ ๐.๕๑ MeV อย่างไรก็ตาม โฟตอนเหล่านี้มีพลังงานต่ำ และกระจัดกระจายออกไปรอบๆทุกทิศทางทำให้ปริมาณรังสีที่พุ่งต่อไปข้างหน้าน้อยลง ในทางปฏิบัติเช่นการคำนวณกำบังรังสี สามารถสมมุติว่า โฟตอนถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์ในแพร์ โปรดัคชัน

<u>การลดของรังสีแกมมา</u> (Attenuation of Gamma Rays)

เมื่อรังสีแกมมาวิ่งผ่านเข้าไปในสสาร ความเข้มของรังสีแกมมาจะลดลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียล เนื่องจากการสูญเสียความเข้มของรังสีในความหนา dx ของวัตถุที่จุดใดๆใน

วัตถุ เป็นปฏิภาคโดยตรง กับความเข้มของรังสีที่จุดนั้น และความหนาของวัตถุที่รังสีผ่านไป นั่นคือ

$$dI = -\mu I dx \qquad \text{หรือ} \quad \frac{dI}{I} = -\mu dx \qquad \text{.....(๒.๙)}$$

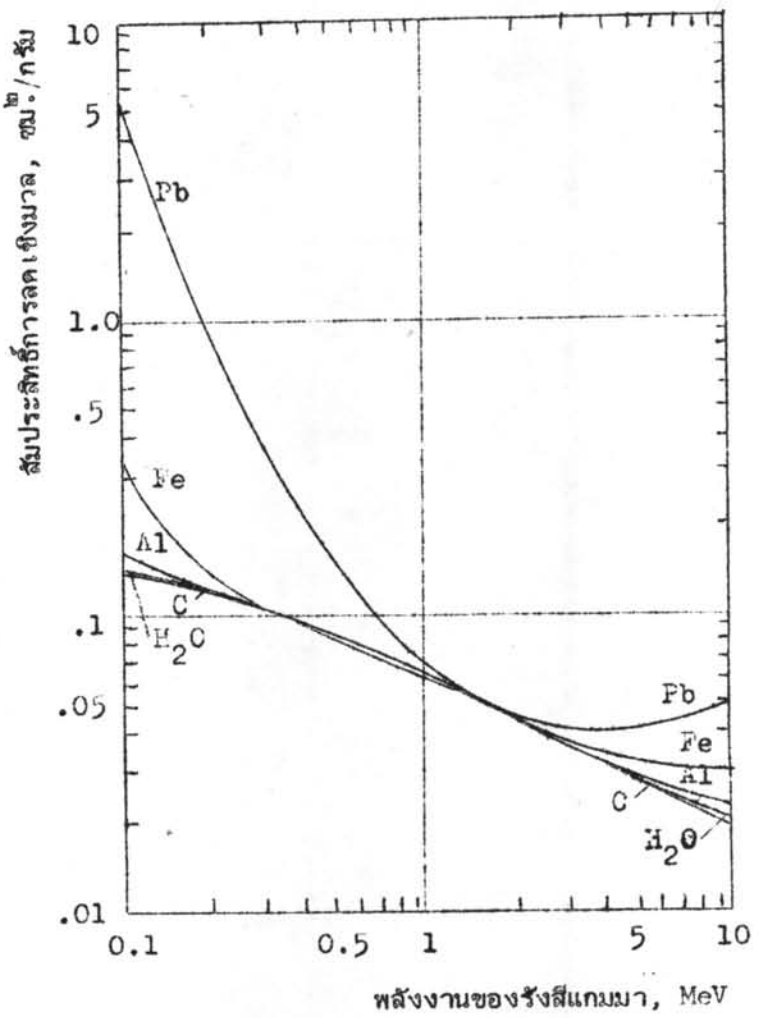
เมื่อ I เป็นความเข้มของรังสีในหน่วย โฟตอน/ซม.^{๒} - วินาที และค่าคงที่ μ ปกติใช้หน่วย ซม.$^{-๑}$ ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้นตรง (linear attenuation coefficient) ของวัตถุ ถ้ารังสีแกมมาพลังงานเดียว (monoenergetic gamma rays) ที่เป็นลำขนานแคบๆมีความเข้ม I_o วิ่งผ่านวัตถุหนา x ซม. ค่าความเข้ม I_x ของรังสีที่ผ่านทะลุไปได้ ได้จากการอินทีเกรต (integration) สมการ (๒.๙) คือ

$$I_x = I_o e^{-\mu x} \qquad \text{.....(๒.๑๐)}$$

หรือ $$\log \frac{Ix}{I_o} = -0.4343\ \mu x \qquad \text{.....(๒.๑๑)}$$

ควรคำนึงไว้ว่า ถ้า μ เป็น **สัมประสิทธิ์การลดของรังสี รวม** ซึ่งรวมทั้งสแคตเตอริง (คอมพ์ตัน เอฟเฟคท์) และ เอ็บซอบชัน (โฟโตอิเล็คตริค และ แพร์ โปรดัคชัน เอฟเฟคท์) สมการ (๒.๑๑) ใช้ได้เฉพาะรังสีแกมมาที่เป็นลำขนานแคบๆเท่านั้น ถ้าไม่มีการสแคตเตอร์ของโฟตอน สมการนี้ ก็สามารถใช้ได้กับรังสีที่มีลำขนานที่มีขนาดกว้างได้ด้วย

ถ้าสัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้นตรงในหน่วย ซม.$^{-๑}$ ถูกหารด้วย ρ ซึ่งเป็นความหนาแน่นของวัตถุในหน่วย กรัม/ซม.^{๓} ได้ค่า μ/ρ ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดเชิงมวล (mass attenuation coefficient) ในหน่วย ซม.^{๒}/กรัม ค่าสัมประสิทธิ์นี้น่าสนใจเป็นพิเศษในช่วงพลังงาน ๐.๑ ถึง ๑๐ MeV สำหรับธาตุเบาๆ และ ๐.๒ ถึง ๓ MeV สำหรับ



รูปที่ ๒.๖ สัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลของสารบางชนิด (1)

ธาตุที่มีเลขมวลปานกลาง ซึ่งคอมพ์ตัน เอฟเฟคท์ มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากจำนวนอีเล็คตรอนที่มีอยู่ในสสารจำนวนหนึ่งมีค่าโดยประมาณว่าเป็นปฏิภาคโดยตรงกับมวล ดังนั้นปฏิกิริยา คอมพ์ตัน จึงเปลี่ยนแปลงไปตามมวล จะเห็นได้ว่าในช่วงพลังงานจำเพาะช่วงหนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์การลดเชิงมวล μ/ρ ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่รังสีแกมมาทำปฏิกิริยาด้วย ดังในรูปที่ ๒.๖ เมื่อหารและคูณด้วยยกกำลังในสมการ (๒.๑๐) ด้วย ρ ได้ว่า

$$I_x = I_o e^{-(\mu/\rho)(x\,\rho)} \qquad \text{.....(๒.๑๒)}$$

นั่นคือ ตัวประกอบด้วยกกำลังตัวแรกคือ สัมประสิทธิ์การลดเชิงมวล ส่วนตัวที่สองเป็นความหนาแน่นต่อหน่วยพื้นที่ (areal density) ของวัตถุในหน่วย กรัม/ซม.^{2} จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่สัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลมีค่าเท่ากันสำหรับวัสดุต่างๆ ค่าความหนาแน่นต่อหน่วยพื้นที่ที่ดูดกลืน รังสีได้ปริมาณหนึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของวัตถุเลย หรืออีกนัยหนึ่งความหนาของวัตถุที่ใช้ดูดกลืนรังสีแกมมาได้ในอัตราส่วนเดียวกัน เป็นปฏิภาคกลับกับความหนาแน่นของวัตถุนั้น

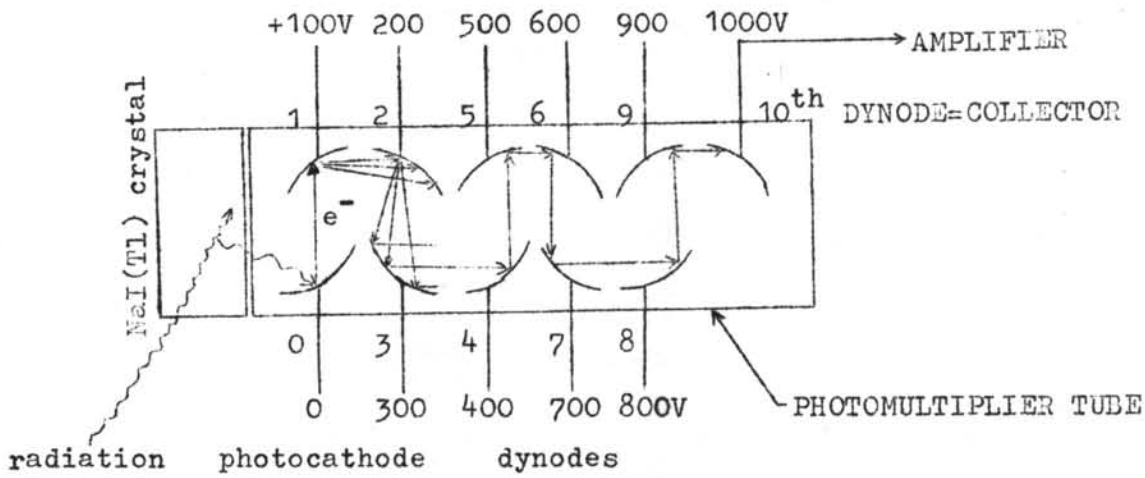
005337

<u>หัววัดรังสีแกมมา ชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดด์</u>

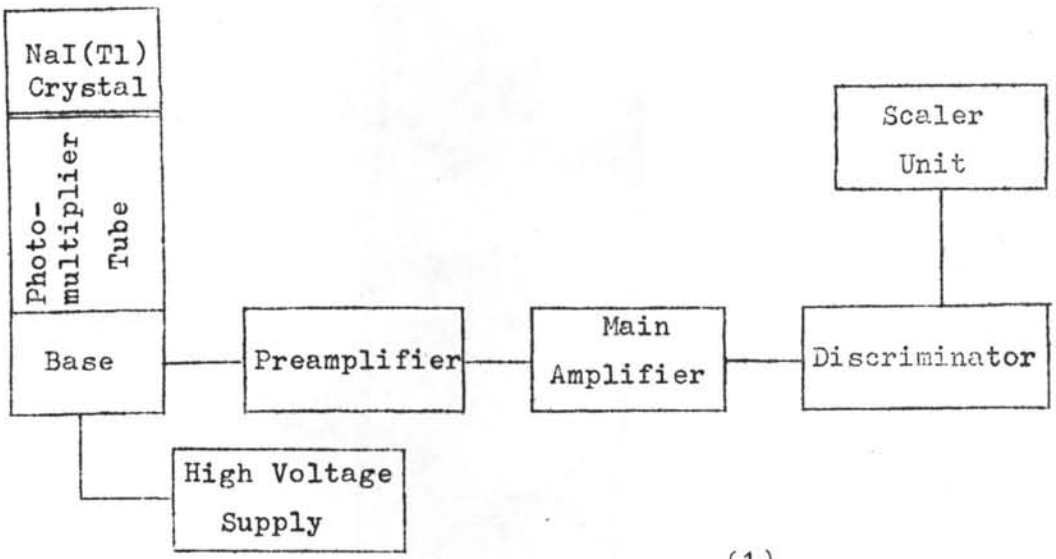
เป็นหัววัดรังสีแบบเรืองแสง (scintillation detector) ชนิดหนึ่งประกอบขึ้นด้วย ผลึก NaI (Tl) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีแกมมาที่เข้าไปให้กลายเป็นแสง และหลอดทวีคูณ (photomultiplier tube) ซึ่งทวีคูณอีเล็คตรอนทุติยภูมิ ที่เกิดจากแสงตกลงบนโฟโตคาโถด ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าที่เอาท์พุท

เมื่อรังสีแกมมาวิ่งผ่านเข้าไปในผลึก NaI (Tl) จะทำให้อะตอมภายในผลึกถูกเอ็กไซท์ แล้วกลับสภาวะปกติอย่างรวดเร็ว พร้อมกับปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปโฟตอน

i 17817626



รูปที่ ๒.๗ หัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) (1)



รูปที่ ๒.๘ วงจรของหัววัดรังสีแกมมาแบบเรืองแสง (1)

ของแสง โฟตอนนี้จะวิ่งไปชนโฟโตคาโถดในหลอดทวีคูณ ซึ่งเป็นสารประเภทไวต่อแสงมากทำให้อีเล็คตรอนหลุดออกมาหนึ่งตัวต่อหนึ่งโฟตอนตามปฏิกิริยาโฟโตอีเล็คตริค อีเล็คตรอนนี้จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ประมาณ ๑๐๐ โวลท์ ให้เคลื่อนที่ไปชน แผ่นโลหะที่เรียกว่า ไดโนด แผ่นที่ ๑ ทำให้มี อีเล็คตรอนหลุดออกมาประมาณ ๔ -๕ ตัว อีเล็คตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์เท่าเดิม ทำให้วิ่งไปชนไดโนดแผ่นถัดไป และเกิดอีเล็คตรอนเพิ่มขึ้น ๔-๕ เท่า ทุกครั้ง หลังจากผ่านไดโนด ๑๐ - ๑๕ แผ่น แล้ววิ่งเข้าแอโนด เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า (current pulse) ที่สามารถวัดได้ง่ายและสะดวก เพราะเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ที่มีความแรงพอสมควร

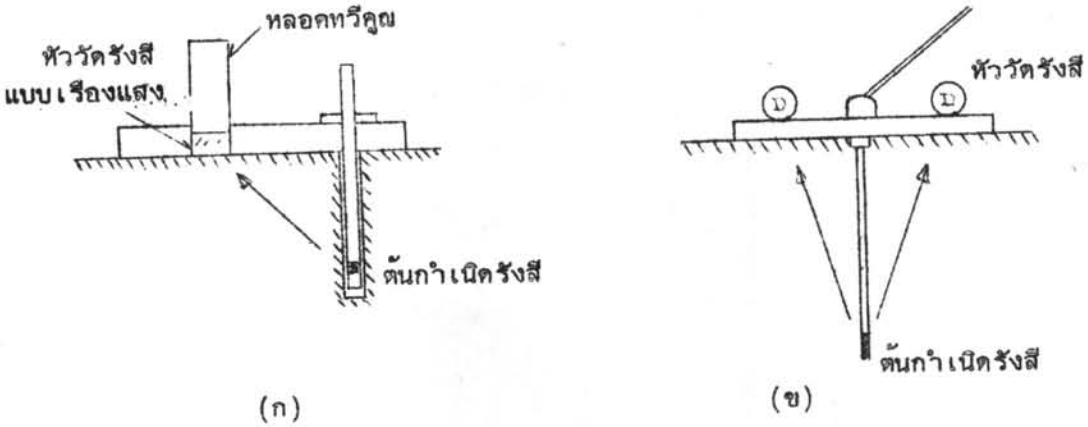
สัญญาณที่ได้นี้สามารถนำไปเข้าเครื่องนับรังสีแบบธรรมดาที่วัดเฉพาะปริมาณของรังสี หรือเข้าเครื่องนับรังสีที่สามารถวิเคราะห์แยกแยะทั้งปริมาณและพลังงานของรังสีได้ เช่น เครื่องวิเคราะห์รังสีแบบช่องเดี่ยว (single channel analyser, SCA) หรือเครื่องวิเคราะห์รังสีแบบหลายช่อง (multichannel analyser, MCA) ซึ่งใช้ประกอบกับรูปปรับเทียบ ก็สามารถวัดรังสีได้ทั้งปริมาณและพลังงาน

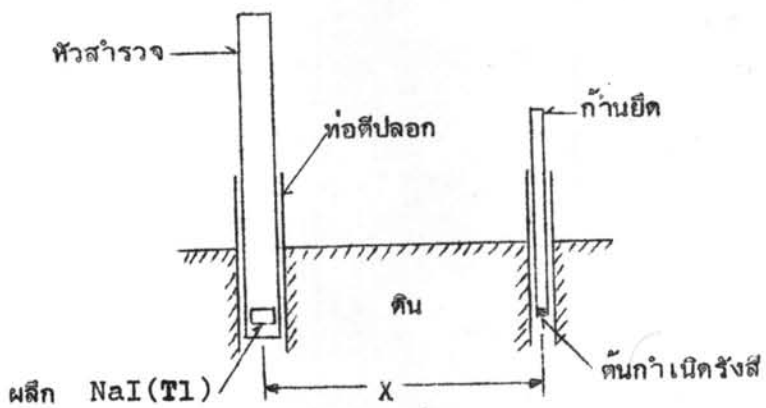
<u>เครื่องมือวัดความหนาแน่นของดินด้วยวิธีนิวเคลียร์</u> (Nuclear Density Gauge)

มี ๒ แบบใหญ่ๆ คือ แบบส่งผ่านรังสี (transmission gauge) และแบบรังสีสะท้อนกลับ (backscatter gauge)

๑. <u>แบบส่งผ่านรังสี</u> อาศัยหลักการเกิดการลดของรังสีแกมมา เมื่อวิ่งผ่านสสารหรือดิน ซึ่งทำให้ความเข้มของรังสีลดลงมากน้อย ขึ้นกับความหนาแน่นของดินบริเวณนั้น

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย





รูปที่ ๒.๙ ตัวอย่างการจัดเครื่องมือวัดความหนาแน่นของดินโดยวิธีส่งผ่านรังสี

จาก $$I_x = \frac{I_o}{x^2} e^{-\mu x} \quad \text{.....(๒.๑๓)}$$

$$= k_1 e^{-(\mu/\rho)(\rho x)}$$

ได้ว่า $$I_x = k_1 e^{-k_2 \rho} \quad \text{.....(๒.๑๔)}$$

เมื่อ I_o เป็นความเข้มของรังสีจากต้นกำเนิด

I_x เป็นความเข้มของรังสีที่ผ่านดินเข้าหัววัดรังสี

μ/ρ เป็นสัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลของดิน ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับรังสีที่มีพลังงานค่าหนึ่ง

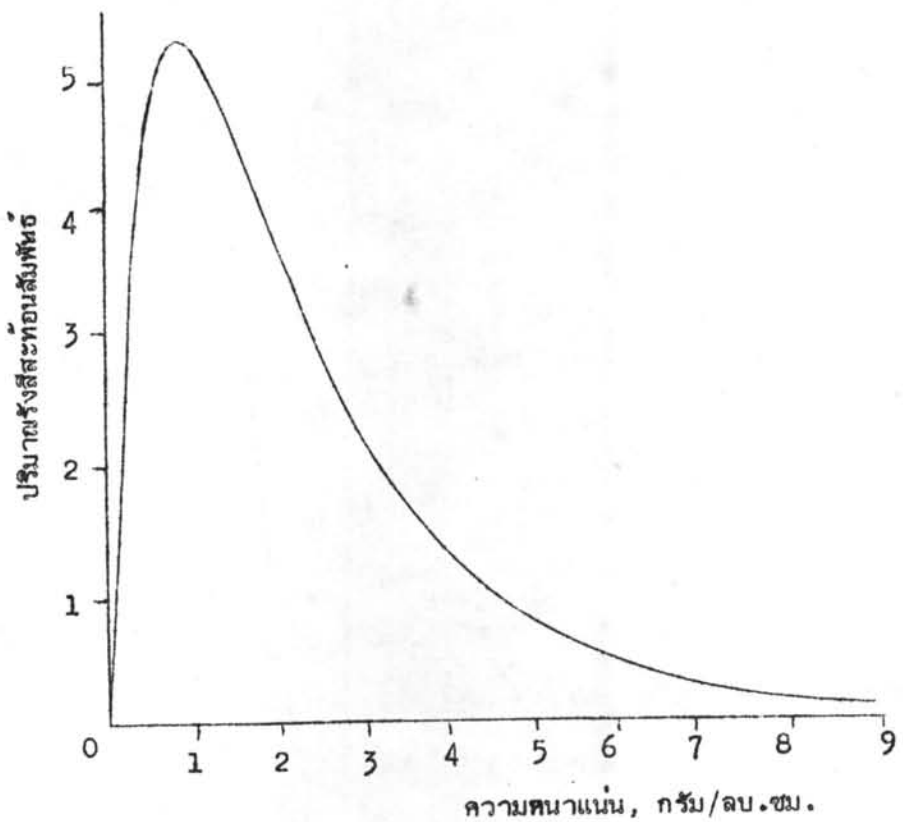
x เป็นระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี หรือความหนาของดินนั่นเอง

ρ เป็นค่าความหนาแน่นของดิน

๒. <u>แบบรังสีสะท้อนกลับ</u> เมื่อรังสีแกมมาถูกส่งผ่านเข้าไปในดิน หรือสสาร จะมีปฏิกิริยาที่สำคัญเกิดขึ้น ๒ ประเภท คือ สแคตเตอริง และ การดูดกลืน ปฏิกิริยา คอมพ์ตันสแคตเตอริง ทำให้รังสีแกมมากระจัดกระจายออกไปในทิศทางต่างๆ และพลังงานถูกลดลงตามสมการ (๒.๔) ส่วน**การดูดกลืน** เกิดจาก**การที่**โฟตอนถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอะตอมของสสาร แล้วตัวมันหมดสิ้นไป ซึ่งมีอยู่๒ปฏิกิริยา คือ โฟโตอิเล็คตริค และแพร์โปรดัคชัน

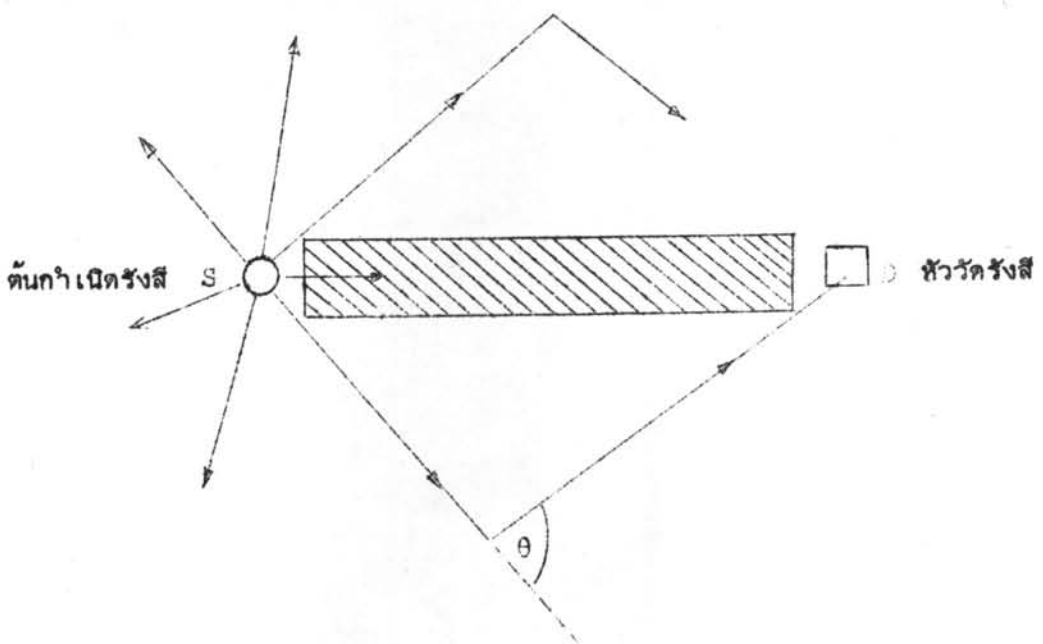
ในเครื่องวัดความหนาแน่นของดินแบบรังสีสะท้อนกลับ ใช้รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดส่งผ่านเข้าไปในดิน ทำให้เกิดสแคตเตอริง แล้ววัดปริมาณรังสีที่สะท้อนกลับมาได้ โดยที่ความหนาแน่นของดินมีผลต่อปฏิกิริยาระหว่างรังสีกับดิน คือ ถ้าดินมีความหนาแน่นมาก จะทำให้เกิด

ปฏิกิริยา สแคเตอริงมาก และการดูดกลืนก็เกิดขึ้นมาก ทำให้รังสีที่สะท้อนกลับ ถูกดูดกลืนหายไปมากด้วย หรือถ้าดินมีความหนาแน่นน้อย จะเกิดสแคตเตอริ่งน้อย แต่การดูดกลืนก็น้อยตามไปด้วย โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของดินกับความเข้มของรังสีสะท้อนกลับ จะมีลักษณะดังรูปที่ ๒.๑๐



รูปที่ ๒.๑๐ ลักษณะรูปปรับเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีสะท้อนกลับและความหนาแน่นของสสาร[1]

๒.๑ <u>การพิจารณาทางทฤษฎี</u> เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับดินในช่วงพลังงาน ๐.๒ - ๓ MeV จะเห็นว่าปฏิกิริยาหลัก คือ คอมพ์ตัน สแคตเตอริง และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในการวิจัยครั้งนี้ใช้ซีเซียม-๑๓๗ เป็นต้นกำเนิดรังสีแกมมา ซึ่งมีพลังงาน ๐.๖๖๒ MeV ปฏิกิริยา แพร์ โปรดักชันไม่เกิดขึ้น สามารถประมาณได้ว่าการลดของรังสี เนื่องมาจากคอมพ์ตัน สแคตเตอริง อย่างเดียว ทั้งนี้หมายถึงการพิจารณาเฉพาะรังสีแกมมาที่ยังมีพลังงานสูงอยู่ ไม่รวมถึงรังสีที่เกิดสแคตเตอริงหลายครั้ง จนพลังงานต่ำลงและเกิดปฏิกิริยาโฟโตอีเล็คตริคในที่สุด และพิจารณาเฉพาะการเกิดปฏิกิริยากับอะตอมของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของดินโดยทั่วไป



รูปที่ ๒.๑๑ หลักการของเครื่องวัดแบบรังสีสะท้อนกลับ

พิจารณาต้นกำเนิดรังสี S และหัววัดรังสี D ซึ่งวางอยู่ในดิน โดยมีกำบังรังสีกั้นอยู่ระหว่างกลาง ดังรูปที่ ๒.๑๑ จะเห็นได้ว่ารังสีแกมมาจากต้นกำเนิด S แผ่กระจายออกทุกทิศทุกทาง แต่ไม่สามารถวิ่งเข้าสู่หัววัดรังสี D ได้โดยตรง เพราะมีกำบังรังสีกั้นอยู่ รังสีส่วนอื่นที่แผ่กระจายเข้าไปในดินจะเกิด สแคตเตอริง ทำให้มีรังสีหลังสแคตเตอร์บางส่วนมีทิศวิ่งไปทางหัววัดรังสี D แต่เนื่องจากบริเวณนั้นเป็นดินทั้งหมด รังสีเหล่านี้จึงเกิดการลดไปบ้าง ก่อนเข้าสู่หัววัดรังสีได้ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น ๒ ขบวนการใหญ่ๆ คือ

๒.๑.๑ <u>การเกิดสแคตเตอริงของรังสีจากต้นกำเนิด</u> ทำให้มีรังสีแกมมาบางส่วนมีทิศวิ่งไปทางหัววัดรังสี ซึ่งจะเรียกว่า รังสีสะท้อนเพื่อความสะดวก

๒.๑.๒ <u>การลดของรังสีสะท้อน</u> หลังจากเกิดสแคตเตอริงครั้งแรก แล้วรังสีสะท้อนที่มีทิศทางไปสู่หัววัดรังสี ก็ไม่สามารถไปถึงหัววัดรังสีได้หมด เนื่องจากเกิดการลดของรังสีกับดินที่ขวางกั้นอยู่ ซึ่งมีปฏิกิริยาคอมพ์ตัน สแคตเตอริง เป็นหลักนั่นเอง เมื่อพิจารณาเฉพาะรังสีที่ยังมีพลังงานสูงอยู่

ขบวนการที่เกิดขึ้นทั้งสองมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเลขอะตอมตามสมการ (๒.๗) คือ

$$\text{โอกาสเกิดปฏิกิริยาคอมพ์ตัน} \simeq \text{ค่าคงที่} \times \frac{Z}{E}$$

เมื่อพิจารณารังสีแกมมาที่มีพลังงานค่าหนึ่งโดยเฉพาะจะได้ว่าการเกิด สแคตเตอริง เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความหนาแน่นของอีเล็คตรอนบริเวณนั้น และสำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ จำนวนอีเล็คตรอนมีความสัมพันธ์กับมวลโดย $\frac{Z}{A} \simeq ๐.๕$ (ยกเว้นไฮโดรเจน) ดังนั้น กล่าวได้ว่าการเกิดสแคตเตอริงเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความหนาแน่นของมวลนั่นเอง

สำหรับธาตุที่พบโดยทั่วไปในดิน $\frac{Z}{A} \simeq 0.5$ แต่ในกรณีของไฮโดรเจน $\frac{Z}{A} = 1$ ดังนั้นเมื่อดินมีความชื้น จะทำให้ค่า $\frac{Z}{A}$ โดยเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ ๒.๒ อย่างไรก็ดี เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบเพียงส่วนน้อย เนื่องจากมีมวลน้อย จึงทำให้ค่า $\frac{Z}{A}$ เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเอง ตัวอย่างเช่น ดินที่มีความชื้นถึง ๕๐% จะทำให้เกิดปฏิกิริยาคอมพ์ตัน สแคตเตอริง เพิ่มขึ้นจากดินแห้งเพียง ๓% เท่านั้นเอง จึงสามารถประมาณได้ว่า ความชื้นก็เหมือนมวลของดินธรรมดาเช่นกัน

ตารางที่ ๒.๑ แสดงอัตราส่วน $\frac{Z}{A}$ ของสารบางชนิด (6)

สาร	A	Z/A
O	16.0	0.500
N	14.007	0.500
C	12.011	0.499
Ca	40.08	0.499
S	32.06	0.499
Si	28.086	0.498
Mg	24.312	0.495
K	39.102	0.487
Al	26.98	0.482
Na	23.0	0.479
Cl	35.45	0.479
Fe	55.85	0.466
Ba	137.34	0.407
SiO_2	-	0.499
$CaCO_3$	-	0.500
$CaMg(CO_3)_2$	-	0.499

ตารางที่ ๒.๒ ผลของความชื้นในดินต่อค่า $\frac{Z}{A}$ เฉลี่ย[3]

ความชื้น	Z/A เฉลี่ย
10%	0.5056
20%	0.5112
30%	0.5162
40%	0.5220
50%	0.5280

ขบวนการทั้งสองดังกล่าวข้างต้น คือ ๒.๑.๑ และ ๒.๑.๒ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ขึ้น ๒ อย่างที่สำคัญคือ

ก. <u>กรณีความหนาแน่นต่ำ</u> ปริมาณรังสีที่วัดได้จากหัววัดรังสีจะขึ้นอยู่กับขบวนการแรกเป็นหลัก นั่นคือ ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดสแคตเตอริงเพิ่มขึ้น ปริมาณรังสีที่วัดได้จะเพิ่มด้วย

ข. <u>กรณีความหนาแน่นปานกลางและสูง</u> เนื่องจากขบวนการแรกคือ สแคตเตอริงครั้งแรกของรังสีจากต้นกำเนิดเกิดขึ้นมากเกินพอ ปริมาณรังสีที่วัดได้จะแปรตามขบวนการที่สองเป็นหลัก คือ ดินที่มีความหนาแน่นมากทำให้เกิดการลดของรังสีมาก จึงวัดรังสีสะท้อนกลับได้น้อย

ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ สามารถสังเกตได้ชัดเจนจากรูปที่ ๒.๑๐ ซึ่งได้มาจากการทดลอง

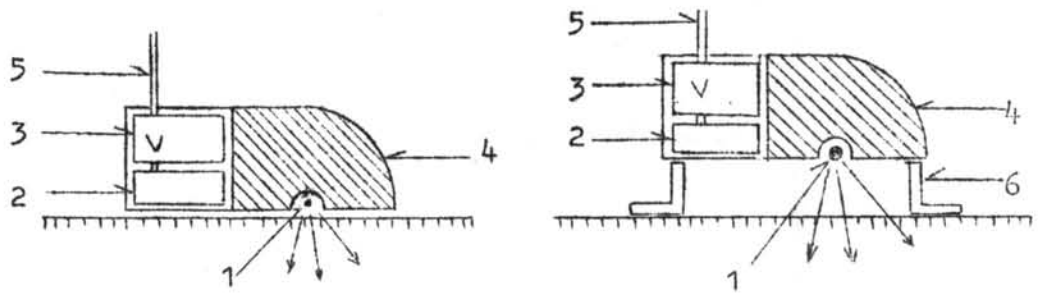
๒.๒ ตัวอย่างการจัดเครื่องมือ ในเครื่องมือที่ใช้หลักการของรังสีสะท้อนกลับ ต่างก็คล้ายคลึงกัน คือ มีต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีวางไว้ด้วยกันโดยมีกำบังรังสีคั่นอยู่ตรงกลาง ในเครื่องมือแบบนี้จะมีอยู่ ๒ ประเภท ตามลักษณะการใช้งาน คือ ใช้วัดบนผิวพื้นดินและชนิดที่ใช้วัดใต้ผิวดิน

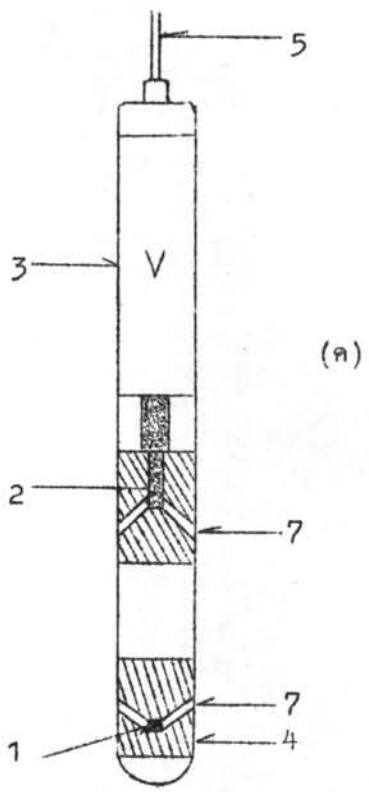
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับดิน

ดิน ในทางวิศวกรรม หมายถึง กรวด (gravel) ทราย (sand) ทรายเม็ดปน (silt) และดินเหนียว (clay) หรือส่วนผสมของสิ่งเหล่านี้ ซึ่งอาจเป็นพวกที่มีและไม่มีความเชื่อมแน่น ดินเกิดจากเม็ดของแร่ธาตุต่างๆ มารวมกัน แต่สามารถแยกให้ออกจากกันได้โดยวิธีง่ายๆ เช่น การนำไปละลายน้ำ เป็นต้น ส่วนหิน เป็นการรวมตัวของเม็ดแร่ธาตุต่างๆ แต่มีแรงยึดเกาะกันแน่น และถาวรมากจนไม่สามารถแยกออกจากกันได้โดยวิธีง่ายๆ เหมือนกับดิน

ดินเกิดจากการผุกร่อนของหินต่างๆ โดยธรรมชาติทั้งจากอิทธิพลของดินฟ้าอากาศ ความกดดัน การเปลี่ยนแปลงทางเคมี ทำให้คุณสมบัติของดินในแต่ละแห่งไม่ค่อยเหมือนกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติเกิดขึ้นตลอดเวลา การผุกร่อนจึงไม่มีวันสิ้นสุด ดังนั้นการตกตะกอนทับถมกันจึงเกิดขึ้นตลอดเวลา ทำให้ชั้นดินแต่ละชั้นแตกต่างกันไป ดินชั้นล่างๆมักแข็งและมีความแน่นตัวกว่าดินชั้นบนถัดขึ้นมา ดินอาจเกิดจากการสลายตัวของพวกพืชและสัตว์ที่ล้มตายทับถมกันเป็นเวลานาน ดินประเภทนี้จะมีสารอินทรีย์สูงและมีความหนาแน่นต่ำ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานวิศวกรรม โดยทั่วไปดินประกอบด้วยธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ อาจมีธาตุเหล็ก แคลเซียม โซเดียม โปแตสเซียม และแมกนีเซียมผสมอยู่บ้างเล็กน้อย ส่วนดินที่เกิดจากสารอินทรีย์นั้นจะมีธาตุคาร์บอนอยู่มาก

โครงสร้างทางด้านวิศวกรรมส่วนใหญ่หรือทั้งหมดต้องทำการก่อสร้างบนดินแทบทั้งสิ้น





1. ต้นกำเนิดรังสีแกมมา
2. หัววัดรังสี
3. ภาคขยายส่วนหน้า
4. ตะกั่วกำบังรังสี
5. สายเคเบิล
6. ช่องว่างของอากาศ
7. ตัวปิบรังสี

รูปที่ ๒.๑๒ ตัวอย่างการจัดเครื่องมือวัดความหนาแน่นของดิน โดยวิธีรังสีสะท้อนกลับ

ฉะนั้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่วิศวกรผู้ออกแบบและช่างก่อสร้างจะต้องทราบถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมในด้านต่างๆของดิน ทั้งที่อยู่บนผิวระดับดินและส่วนที่อยู่ลึกต่ำจากผิวระดับดิน