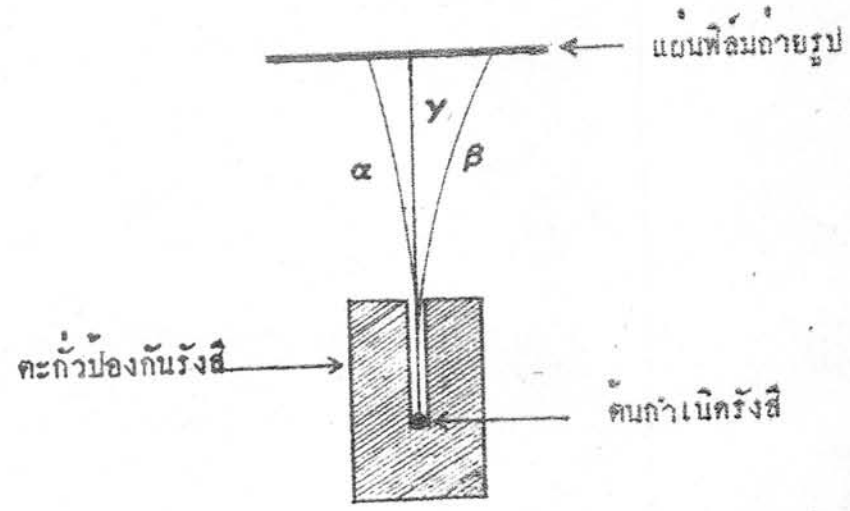




2.1 กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

ในปี ค.ศ. 1896 เบคเคอเรล (Becquerel) ได้ค้นพบว่าผลึกของเกลือยูเรเนียมสามารถส่งรังสีซึ่งมีความสามารถทะลุทะลวง เช่นเดียวกับรังสีเอกซ์ สามารถทำให้เกิดจุดดำบนฟิล์มถ่ายภาพ และสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการนำไฟฟ้าในแก๊ส ต่อมาในปี ค.ศ. 1898 มาดามคูรี (Curies) ได้ค้นพบธาตุกัมมันตรังสี คือธาตุโพลonium (Polonium) และธาตุเรเดียม (Radium) ซึ่งกำลังแรง (Activity) ของธาตุเรเดียมที่วัดจากความเข้มของรังสีที่ส่งออกมา พบว่ามีมากกว่าหนึ่งล้านเท่าของธาตุยูเรเนียม ต่อมา รัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford) สามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดลองในสนามแม่เหล็กว่ามีรังสี 3 ชนิด ในธรรมชาติที่ถูกส่งออกมาจากธาตุกัมมันตรังสี ซึ่งในการทดลองดังกล่าวลำของรังสีถูกส่งออกมาจากชิ้นเล็ก ๆ ของธาตุกัมมันตรังสีซึ่งวางอยู่ในร่องยาวคานกลางสุดของกอนตะกั่วป้องกันรังสี โดยแผ่นฟิล์มถ่ายภาพถูกวางที่ระยะพอประมาณเหนือกอนตะกั่ว ดังรูป 2.1 และใส่สนามแม่เหล็กอย่างอ่อนเข้าไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของรูป ภายหลังเมื่อนำแผ่นฟิล์มถ่ายภาพไปล้าง พบว่ามีจุดเกิดขึ้น 2 จุด บนแผ่นฟิล์ม จุดแรกอยู่ในตำแหน่งตรงกับร่องยาวที่บรรจุธาตุกัมมันตรังสี ส่วนอีกจุดหนึ่งเกิดไปทางด้านขวา นักวิทยาศาสตร์ลงความเห็นว่า ตำแหน่งที่ไม่เบี่ยงเบนไป เกิดจากรังสีที่เรียกว่ารังสีแกมมา (γ -rays) ส่วนตำแหน่งของจุดอีกจุดหนึ่งที่คอนไปทางขวาเกิดจากรังสีซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าลบ ซึ่งเรียกว่ารังสีเบตา (β -rays) ถ้าเพิ่มสนามแม่เหล็กให้มีความมากขึ้นในตำแหน่งเดิม จะพบว่าจุดที่ไม่เบี่ยงเบนแต่เดิมนั้นจะมีจุดเบี่ยงเบนไปทางซ้ายมืออีก ซึ่งต่อมานักวิทยาศาสตร์ก็ทราบว่า จุดที่ไม่เบี่ยงเบนมาทางซ้ายเกิดจากรังสีที่เป็นประจุไฟฟ้าบวก ซึ่งเรียกว่า รังสีอัลฟา (α -rays) แต่การเพิ่มสนามแม่เหล็กให้มีความมากจะทำให้



รูปที่ 2.1 แสดงทิศทางของรังสีทั้ง 3 ชนิดในสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบ

รังสีเบตาเบี่ยงออกไปจากแผ่นฟิล์มถ่ายภาพ ดังนั้นการเพิ่มสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงจะเป็นการแสดงให้เห็นว่า มวลของรังสีอัลฟา มีขนาดใหญ่กว่ามวลของรังสีเบตามาก เปรียบเทียบได้จากรูปที่ 2.1

กัมมันตภาพรังสีทั้ง 3 ชนิดนี้ ไม่สามารถจะถูกส่งออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีทุกชนิดได้ ธาตุบางชนิดสามารถส่งรังสีอัลฟา หรือรังสีเบตาได้เพียงอย่างเดียว ในขณะที่รังสีแกมมาจะเกิดควบคู่ไปกับรังสีอัลฟา และรังสีเบตา หรือรังสีชนิดใดชนิดหนึ่ง กำลังแรงของกัมมันตภาพรังสีเหล่านี้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์หรือทางเคมีของธาตุที่ส่งรังสีออกมา เช่นการเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือทำปฏิกิริยาทางเคมีกับธาตุที่ไม่ใช่สารกัมมันตรังสี ซึ่งมาตามคูรี ได้แสดงให้เห็นว่ากำลังแรงของแก๊สยูเรเนียม แปรผันโดยตรงกับปริมาณของยูเรเนียมในแก๊ส ซึ่งแสดงว่า กัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดมาจากอะตอมของธาตุ และจากหลักปรีนซิเปิล ออฟ ดูอัลลิตี (Principle of duality) ถือว่ารังสีที่ส่งออกมาจากกัมมันตรังสีมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และอนุภาค จึง

อาจเรียก รังสีอัลฟา รังสีเบตา และ รังสีแกมมา ว่า อนุภาคอัลฟา อนุภาคเบตา และอนุภาคแกมมา ได้เช่นเดียวกัน

2.1.1 รังสีอัลฟา (Alpha rays) คือรังสีที่เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก จากการทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด ในปี ค.ศ. 1909 โดยการปล่อยรังสีอัลฟาเข้าไปซึ่งในขวดแก้วแล้วปิดให้สนิท ทิ้งไว้ แล้วนำมาตรวจสอบภาคหลังปรากฏว่าสิ่งที่อยู่ในขวดนั้นแทนที่จะเป็นรังสีอัลฟา กลับกลายเป็นแก๊สฮีเลียม จึงรู้กันว่ารังสีอัลฟาที่มีประจุไฟฟ้าบวก ก็คือ นิวเคลียสของอะตอมของธาตุฮีเลียม นั่นเอง โดยที่รังสีอัลฟามีประจุไฟฟ้าบวก จึงดึงดูดเอาอิเล็กตรอนเข้ามา ทำให้ตัวเองกลายเป็นอะตอมของธาตุฮีเลียมไป

รังสีอัลฟาเคลื่อนไหวด้วยความเร็วสูง ประมาณ 1.4×10^7 ถึง 2.2×10^7 เมตร/วินาที หรือประมาณ 1/10 ของความเร็วแสง เนื่องจากรังสีอัลฟามีมวลใหญ่และมีความเร็วสูง จึงสามารถวิ่งชนโมเลกุลอื่นที่ขวางหน้าให้กระเด็นออกนอกทางได้ แต่อย่างไรก็ดี กำลังทะลุทะลวงของรังสีอัลฟาอ่อนกว่ารังสีชนิดอื่น เพราะว่าเมื่อกระทบกระดาษหนาที่ทะลุผ่านออกไปไม่ได้ และสามารถเคลื่อนที่ไปในอากาศได้เพียง 3.842 ซม. ด้วยเหตุที่รังสีอัลฟามีมวลใหญ่และมีความเร็วสูงดังที่กล่าวแล้วนั้น จึงสามารถทำให้เกิดการ ไอออไนซ์เซชัน (Ionization) อย่างรุนแรงในแก๊สที่รังสีวิ่งผ่าน ทำให้สูญเสียพลังงานไปอย่างรวดเร็ว

2.1.2 รังสีเบตา (Beta rays) คือรังสีซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ จากการศึกษาลักษณะการเคลื่อนไหวของรังสีเบตา ทำให้รู้ว่ารังสีเบตาก็คืออิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ เหมือนกับอิเล็กตรอนที่วิ่งวนรอบนิวเคลียสในโครงสร้างของอะตอม และอิเล็กตรอนจากแสงแคโทด (Cathode rays) นั่นเอง ต่างกันที่รังสีเบตาเกิดออกมานิวเคลียสของอะตอม ถึงแม้จะมีลักษณะเหมือนกันก็ตาม รังสีเบตานั้นมีความเร็วสูงมากเกือบเท่าความเร็วของแสง จึงมีกำลังทะลุทะลวงผ่านไปในตัววัตถุได้มากกว่ารังสีอัลฟา แต่มีความสามารถทำให้เกิด ไอออไนซ์เซชัน ได้น้อยกว่ารังสีอัลฟา กังวลการทดลองที่ใดกระทำมาแล้ว คือ รังสีอัลฟามีพลังงานจลน์ 3 MeV มีระยะเคลื่อนที่ในอากาศประมาณ 2.8 ซม. และสามารถทำให้เกิดไอออนตามระยะทางที่วิ่งผ่านประมาณ 4000

ไอออน แพร์/มม. (Ion pairs/mm.) สำหรับรังสีเบตาที่มีพลังงานจลน์ 3 MeV มีระยะที่เคลื่อนที่ไปในอากาศมากกว่า 1000 ซม. และทำให้เกิดไอออนตามระยะทางที่วิ่งผ่านเพียง 4 ไอออน แพร์/มม.

2.1.3 รังสีแกมมา (Gamma rays) เป็นรังสีที่ไม่เบี่ยงเบนโดย

สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก เป็นรังสีชนิดที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับคลื่นแสงสว่างและรังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมาเกิดจากนิวเคลียสของอะตอม ไม่มีประจุไฟฟ้า แต่มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง และมีกำลังทะลุทะลวงสูงมาก ประมาณ 10 ถึง 100 เท่าของรังสีเบตาและมีความสามารถทำให้เกิด ไอโอไนซ์ เซชัน เมื่อเปรียบเทียบกับกันอย่างหยาบ ๆ ระหว่างรังสีอัลฟา รังสีเบตาและรังสีแกมมาแล้ว จะมีค่าประมาณ 10,000 ต่อ 100 ต่อ 1

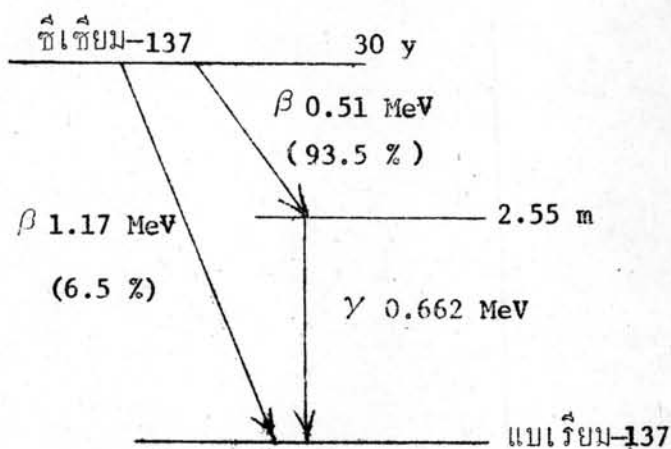
2.2 ต้นกำเนิดรังสี (Radioactive Source)

หมายถึงต้นกำเนิดที่ให้กับมันภาพรังสี ต้นกำเนิดรังสีนี้แบ่งออกได้ 2 พวก คือ

2.2.1 ต้นกำเนิดรังสีที่พบในธรรมชาติ ได้แก่สารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นมา และพบอยู่ในธรรมชาติ เช่น โปแตสเซียม-40 ทอเรียม และ ยูเรเนียม

2.2.2 ต้นกำเนิดรังสีที่มนุษย์ผลิตขึ้นมา คือ เรกิโอนิวไคลด์ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่าง ๆ เช่น ปฏิกิริยา (n, γ) ปฏิกิริยา (n,p) และปฏิกิริยาการแตกตัว ฯลฯ เป็นต้น ต้นกำเนิดรังสีเหล่านี้ได้แก่ โคลบอลต์-60 สตรอนเทียม-90 และ อเมริเชียม-241 เป็นต้น

สำหรับในการวิจัยเรื่องนี้ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา ชนิด ซีเซียม-137 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากปฏิกิริยาการแตกตัว ซีเซียม-137 สลายตัวให้รังสีแกมมา และรังสีเบตา ทั้งนี้การสลายตัวรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงผังการสลายตัวของซีเซียม-137

2.3 ปฏิกริยาระหว่างรังสีกับวัตถุ (Interactions of Radiations with Matter)

เนื่องจากในการวิจัยเลือกไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิด ซีเซียม-137 ซึ่งสลายตัวให้ทั้งรังสีเบตา และรังสีแกมมา จึงจะกล่าวเพียงปฏิกริยาระหว่างรังสีเบตา และรังสีแกมมา ที่มีต่อวัตถุเท่านั้น

2.3.1 ปฏิกริยาระหว่างอนุภาคเบตากับวัตถุ (Interactions of Beta Particles with Matter) ถ้ามีอนุภาคเบตาวิ่งออกจากต้นกำเนิดรังสี เข้าชนวัตถุ จะเกิดปฏิกริยาภายในอะตอมของวัตถุ ดังนี้

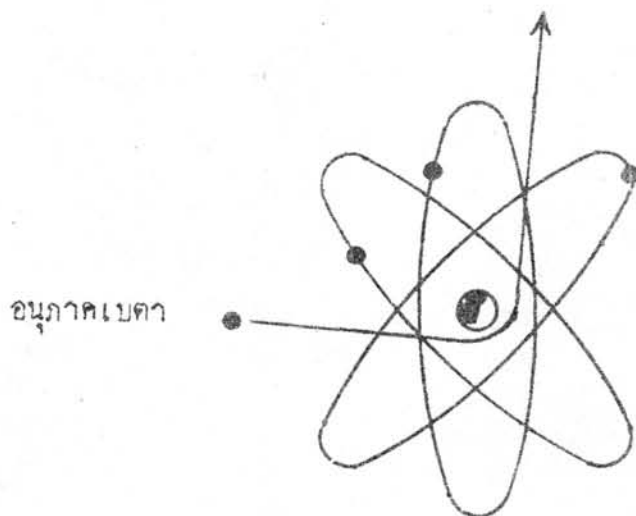
1) ปฏิกริยาระหว่างอนุภาคเบตากับนิวเคลียส

Interactions of Beta Particle with Nuclei) เป็นปฏิกริยาชนิดอีลาสติก

สแคเตอร์ริง (Elastic Scattering) อนุภาคเบตาที่วิ่งเข้าหานิวเคลียส และวิ่งออกจากนิวเคลียส ไม่เสียพลังงานเลย เพียงแต่ทิศทางของอนุภาคเปลี่ยนไปเท่านั้น ปฏิกริยานี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า รัทเธอร์ฟอร์ด สแคเตอร์ริง (Rutherford Scattering)

ซึ่งใช้อธิบายการสะท้อนกลับ (Back Scattering) ของอนุภาคเบตาเมื่อวิ่งชนวัตถุ

ดังรูปที่ 2.3

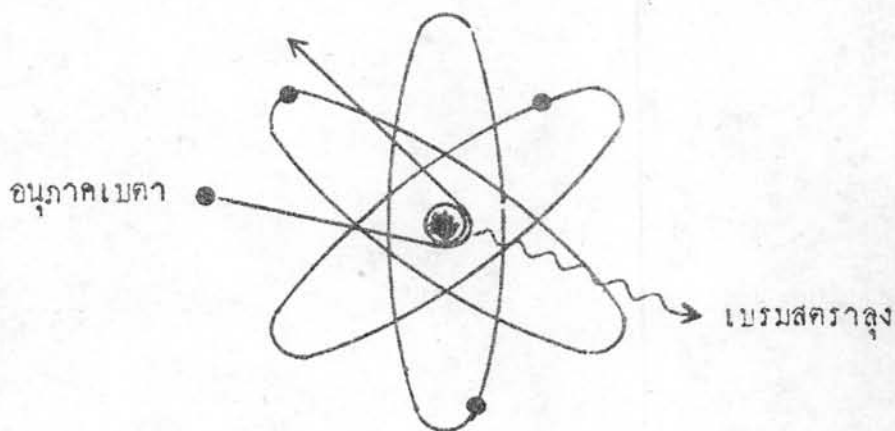


รูปที่ 2.3 แสดงรัศมีเซอร์ฟอรัค สแคเตอร์ริง ของอนุภาคเบตา

ในขณะที่อนุภาคเบตาวิ่งออกจากรังนิวเคลียส จะถูกสนามไฟฟ้าบริเวณนิวเคลียส ซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าบวกดึงดูด จนอนุภาคเบตามีความเร็วลดลง การวิ่งช้าลงนี้ทำให้สูญเสียพลังงานในตัวเองไปบ้าง พลังงานที่สูญเสียไปจะออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Photon) ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า เบรม สตราลุง (Bremsstrahlung) ดังรูปที่ 2.4

2) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคเบตากับอิเล็กตรอนในอะตอม

(Interactions of Beta Particle with Orbital Electron) เมื่ออนุภาคเบตาวิ่งเข้าไปในอะตอม นอกจากจะเกิดรัศมีเซอร์ฟอรัค สแคเตอร์ริง เนื่องจากนิวเคลียสแล้ว ยังมีโอกาสจะเกิดปฏิสัมพันธ์กับอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียสอีกด้วย กล่าวคือ เมื่ออนุภาคเบตาวิ่งเข้าใกล้อิเล็กตรอนในวงโคจรจะเกิดปฏิสัมพันธ์หรือแรงผลัก ถ้าแรงผลักนี้เกิดขึ้นไม่มาก อิเล็กตรอนในวงโคจรจะได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น (Excited) กระโดดขึ้นไปในวงโคจรอื่นที่มีพลังงานสูงกว่าเพียงชั่วขณะหนึ่ง แล้วสทพลังงานตัวเองกลับไปสู่ตำแหน่งเดิม



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดเบรมสตราลุง

(Ground state) โดยการคายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Photon) ออกมาซึ่งเรียกกันว่า แคนแรกเตอริสติก เอ็กซ์เรย์ (Characteristics X-rays) ขบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า เอกไซค์เตชัน (Excitation) พลังงานของแคนแรกเตอริสติก เอ็กซ์เรย์ นี้คำนวณได้จากสมการ

$$E_{\text{Photon}} = h\nu = E_{\text{excited}} - E_{\text{ground}} \quad \text{----(2.1)}$$

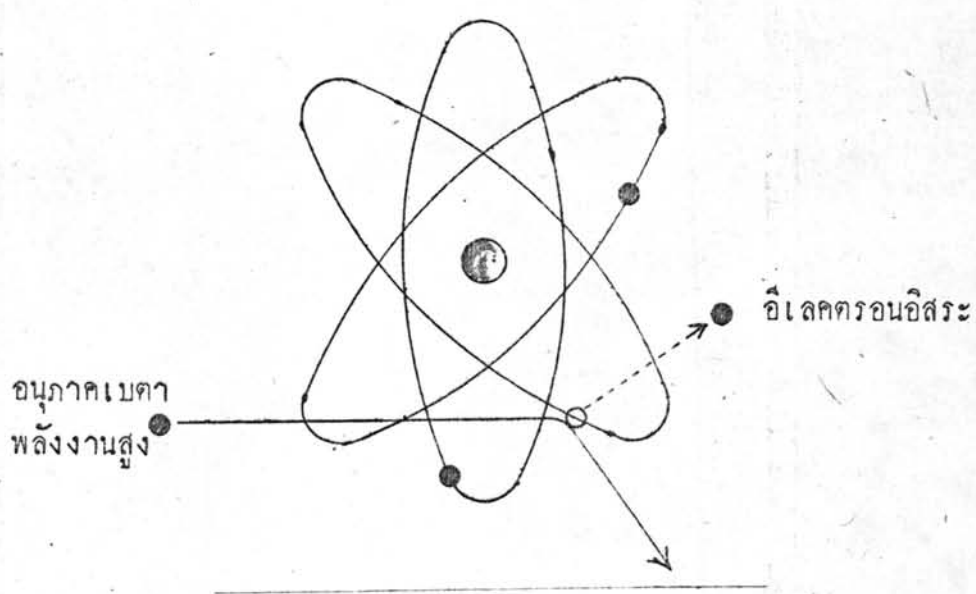
เมื่อ

$$\begin{aligned} E_{\text{Photon}} &= \text{พลังงานของแคนแรกเตอริสติก เอ็กซ์เรย์} \\ h &= \text{ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck Constant)} \\ &= 6.626 \times 10^{-34} \text{ Joule-sec.} \\ \nu &= \text{ความถี่ของแคนแรกเตอริสติก เอ็กซ์เรย์} \end{aligned}$$

$$E_{excited} = \text{พลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจรที่ได้รับเพิ่ม}$$

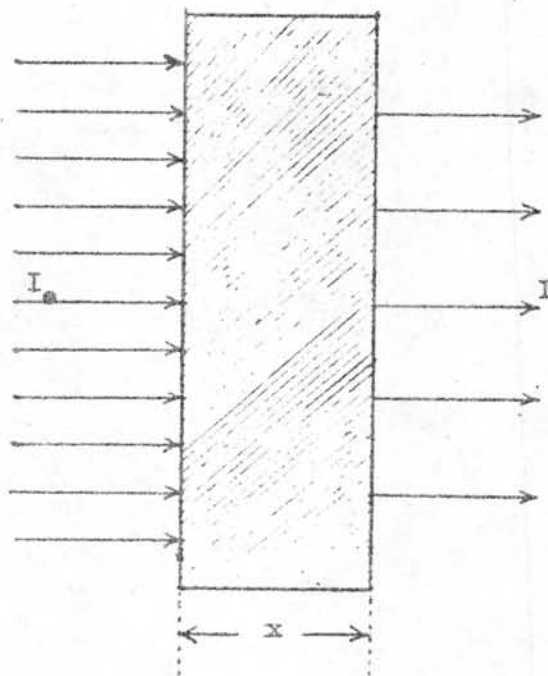
$$E_{ground} = \text{พลังงานเดิมของอิเล็กตรอนในวงโคจร}$$

ในกรณีที่อนุภาคเบตามีพลังงานสูง เมื่อวิ่งเข้าใกล้อิเล็กตรอนในวงโคจร จะเกิดปฏิกิริยาหรือแรงผลักรุนแรงมาก จนทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรได้รับพลังงานเพิ่มจนกระเด็นหลุดจากวงโคจรออกนอกอะตอม กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อะตอมจะกลายเป็นไอออนบวก ขบวนการนี้เรียกว่า ไอออไนซ์เซชัน (Ionization) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดไอออไนซ์เซชัน

3) การดูดกลืนอนุภาคเบตาของวัตถุ (Absorption of beta particles in matter) การดูดกลืนอนุภาคเบตาของวัตถุ จะขึ้นกับระยะทางในการเดินทางของอนุภาคเบตาในวัตถุ จากรูปที่ 2.6 กำหนดให้กลุ่มอนุภาคเบตามีความเข้มของรังสี I_0 วัสดุที่หนามาก อนุภาคเบตาบางส่วนจะถูกดูดกลืนเหลือเพียง I จะสังเกตว่าปริมาณของอนุภาคเบตาที่ถูกดูดกลืนไปจะลดลง เป็นเอกซ์โปเนนเชียล ฟังก์ชัน (Exponential Function) ของค่าความหนาแน่น และแผนแอบซอร์เบอร์ (Absorber) ความหนา x



รูปที่ 2.6 แสดงการดูดกลืนของอนุภาคเบตา ที่วิ่งผ่านแผนแอบซอร์เบอร์ ความหนาแน่น ρ และวิ่งไปได้ระยะทาง x

ซึ่งหลักการดูดกลืนอนุภาคเบตา สอดคล้องกับการดูดกลืนแสงเมื่อผ่านตัวกลาง ดังนั้นจะให้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อธิบายการดูดกลืนรังสีเบตาได้จากสมการ

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

เขียนใหม่เป็น

$$\ln \frac{I_0}{I} = \mu x \quad \text{----- (2.2)}$$

เมื่อ I_0 = ความเข้มของอนุภาคเบตาที่วิ่งเข้าชนแผ่นแอบซอบเบอร์
 I = ปริมาณอนุภาคเบตาที่วิ่งออกจากแผ่นแอบซอบเบอร์
 x = ระยะทางที่อนุภาคเบตาวิ่งผ่านแผ่นแอบซอบเบอร์
 μ = ค่าลิเนียร์แอบซอบชัน โคอэффициีเชียน (Linear Absorption Coefficient) (ชม. $^{-1}$)

เนื่องจากความแรงของรังสีแปรผันโดยตรงกับความเข้มของรังสี ดังนั้นสมการการดูดกลืนอนุภาคเบตาจะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\ln \frac{R_0}{R} = \mu x \quad \text{----- (2.3)}$$

เมื่อ

R_0 = ความแรงของอนุภาคเบตาที่วิ่งเข้าชนแผ่น แอบซอบเบอร์ (คูรี)
 R = ความแรงของอนุภาคเบตา ที่วิ่งออกจากแผ่นแอบซอบเบอร์ (คูรี)

ค่า μ ไม่คงที่ขึ้นกับลักษณะการวางตัวของรังสีว่าจะอยู่ใกล้หรือไกลจากต้นกำเนิดรังสีเท่าไร
 ค่า μ นี้นิยมใช้ร่วมกับความหนาแน่น (ρ) คือ $\frac{\mu}{\rho}$ ซึ่งเรียกว่าแมสแอบซอบชัน โคอэффициีเชียน (Mass Absorption Coefficient) มีหน่วยเป็น ชม.²/กรัม เมื่อความหนาแน่น (ρ) มีหน่วยเป็น กรัม/ชม.³

2.3.2 ปฏิกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับวัตถุ (γ-ray Interactions with matter) เมื่อรังสีแกมมาวิ่งเข้าชนวัตถุปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการชนมีหลายชนิด แต่ที่สำคัญและเป็นที่น่าสนใจมีอยู่ 3 ชนิด คือ ปฏิกิริยาเนื่องจากโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ (Photoelectric effect) แพร่ โพรคักชัน (Pair Production) และ คอมพตัน เอฟเฟกต์ (Compton effect)

1) ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ ในปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ รังสีแกมมาที่วิ่งเข้าชนอะตอมของวัตถุ จะสูญเสียพลังงานไปจนหมด พลังงานทั้งหมดจะถูกถ่ายให้อิเล็กตรอนในวงโคจร จนอิเล็กตรอนได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น และหลุดออกไปจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้อะตอมอยู่ในสภาพที่เป็นไอออน และจะเกิดการแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไป ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดแคแรคเตอร์ิสติก เอกซ์เรย์ (Characteristic X-rays) และ ออเจอร์ อิเล็กตรอน (Auger Electron) ได้ดังรูปที่ 2.7

กำหนดให้ภาคตัดขวาง (Cross-section) คออะตอมสำหรับปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ แทนด้วยสัญลักษณ์ σ_{Pe} และ I เป็นความเข้มของรังสีแกมมาที่ตกกระทบบนแผ่นวัตถุ ซึ่งมีจำนวนอะตอม N $\frac{\text{อะตอม}}{\text{ซม.}^3}$ ดังนั้นจำนวนการชนของรังสีแกมมา ต่อแผ่นวัตถุ และทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ จะมีค่า $IN\sigma_{Pe}$ ครั้ง/ซม.³ - วินาที

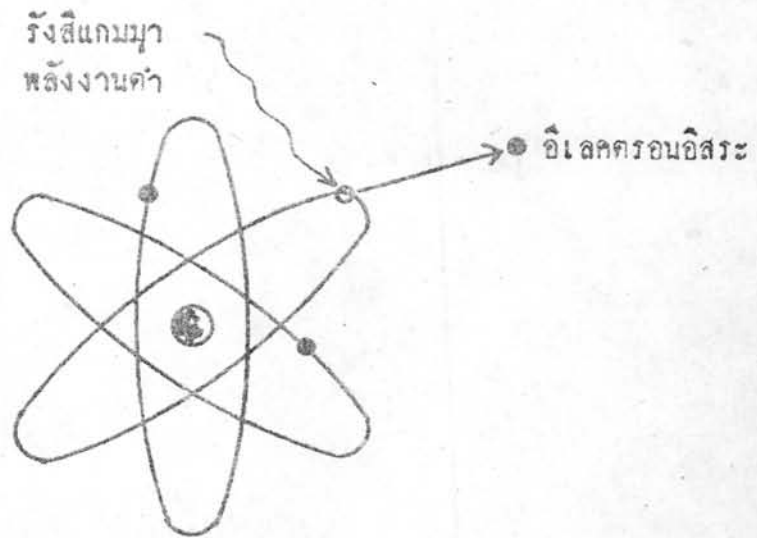
นั่นคือ

$$\text{จำนวนการชนของรังสีแกมมาต่อแผ่นวัตถุ} = IN\sigma_{Pe}^1 \text{ ครั้ง/ซม.}^3 \text{ - วินาที}$$

----- (2.4)

002044

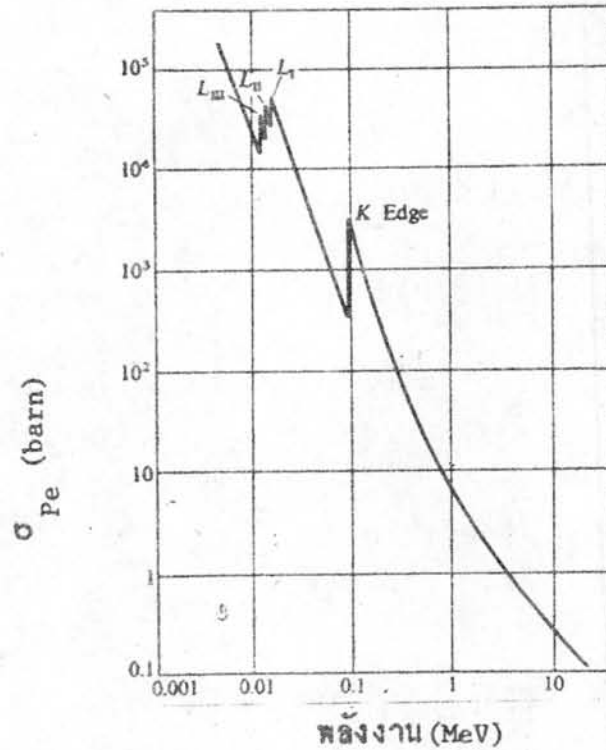
¹ Harvey, B.G. : Introduction To Nuclear Physics And Chemistry, 2 nd ed. (New Jersey : Prentice-Hall, Inc 1969) P.241-244.



รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยา โฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์

ค่า σ_{Pe} ขึ้นกับพลังงาน E ของรังสีแกมมาที่ตกกระทบ และขึ้นกับค่าอะตอมมิกนัมเบอร์ (Z , Atomic number) ของอะตอม รูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึงค่า σ_{Pe} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ E ค่า σ_{Pe} จะมีค่าสูงเมื่อพลังงาน E มีค่าต่ำกว่า 1 MeV

จากรูป 2.8 จะสังเกตได้ว่าค่า σ_{Pe} ไม่ต่อเนื่อง เมื่อพลังงาน E มีค่าน้อยลงที่ตำแหน่ง เค-เอจ (K-edge) แสดงว่ารังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำกว่า 0.1 MeV จะไม่ทำให้อิเล็กตรอน เค-เชลล์ (K-shell) หลุดจากวงโคจรได้ แต่จะทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรต่อไป คือจาก แอล-เชลล์ (L-shell) หลุดออกจากวงโคจรแทน และทำให้ค่า σ_{Pe} มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ แอล-เชลล์ ยังแบ่งเป็นเอจ (edge) ย่อย L_I L_{II} และ L_{III} ซึ่งกำหนดค่าพลังงานสูงสุดของรังสีแกมมา ที่จะทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรหลุดออก ดังแสดงในรูป 2.8



รูปที่ 2.8¹ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ภาคตัดขวางเนื่องจากปฏิกิริยา
โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric cross section) และ
พลังงานของรังสีแกมมา

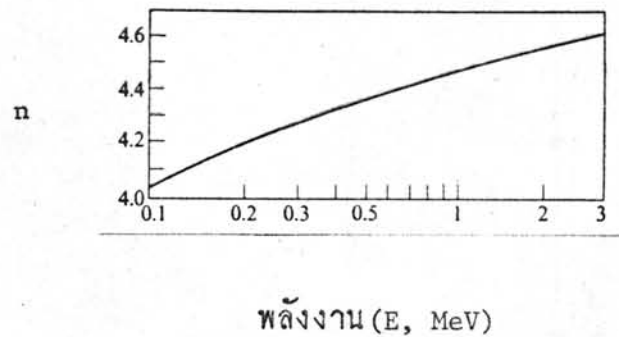
¹ Lamarsh, J.R. : Introduction To Nuclear Engineering

(New York : Addison - Wesley Publishing Co, 1975) P.76.

นักวิทยาศาสตร์พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางเนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric cross section) พลังงานของรังสีแกมมาที่วิ่งชนอะตอม และค่าอะตอมมิกนัมเบอร์ของอะตอมนั้นมีดังนี้

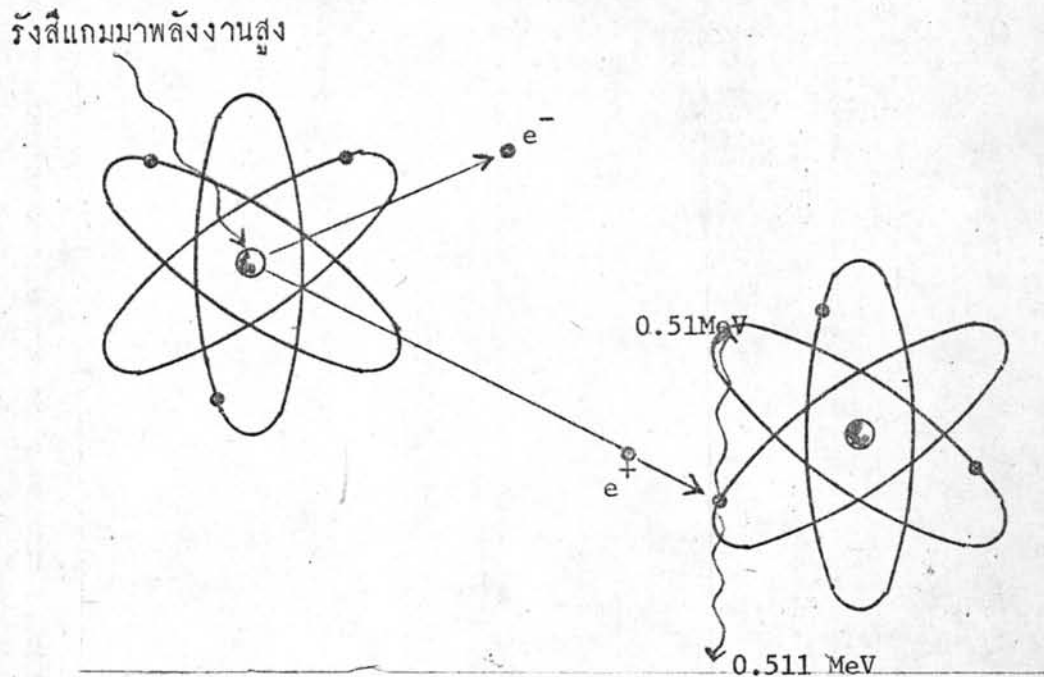
$$\sigma_{Pe} \propto \frac{Z^n}{E^3} \quad \text{-----(2.5)}$$

เมื่อ n มีความสัมพันธ์กับพลังงานของรังสีแกมมา E ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ n และพลังงานของรังสีแกมมา

2) ปฏิกิริยาแปรโพรมิตซ์ ในขบวนการนี้รังสีแกมมาที่วิ่งเข้าไปในอะตอมจะหายไป และจะเกิดคู่อิเล็กตรอน ประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าบวก ที่เรียกว่าโพสิตรอน (Positron) และอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ (Negatron) ขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.10

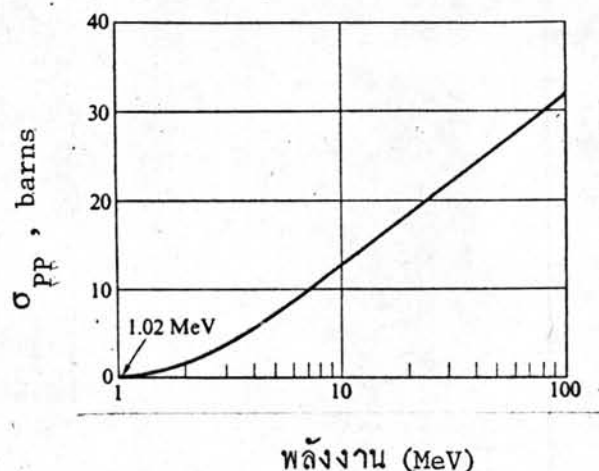


รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดปฏิกิริยา แพร่ โพรคักชัน

ปฏิกิริยา แพร่ โพรคักชัน นี้จะเกิดได้สำหรับรังสีแกมมา ซึ่งมีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV ขึ้นไป ดังรูปที่ 2.11

กำหนดให้ค่าภาคตัดขวางเนื่องจากปฏิกิริยา แพร่ โพรคักชัน (Pair production cross section) แทนด้วยสัญลักษณ์ σ_{pp} เมื่อพิจารณาจากรูป 2.11 จะพบว่าค่า σ_{pp} จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อรังสีแกมมาที่วิ่งเข้าไปในอะตอมมีพลังงานมากขึ้น การเกิด แพร่ โพรคักชัน นี้จะเกิดเนื่องจากรังสีแกมมาวิ่งเข้าไปในบริเวณสนามคูลอมบ์ (Coulomb field) ที่เกิดขึ้นบริเวณนิวเคลียสเท่านั้น ไม่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนในวงโคจรแต่อย่างใด นักวิทยาศาสตร์พบความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ_{pp} และค่าอะตอมมิก นัมเบอร์ (Z) ว่า

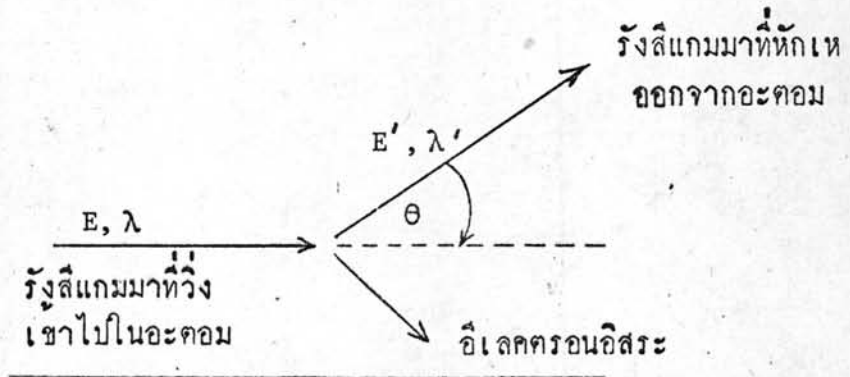
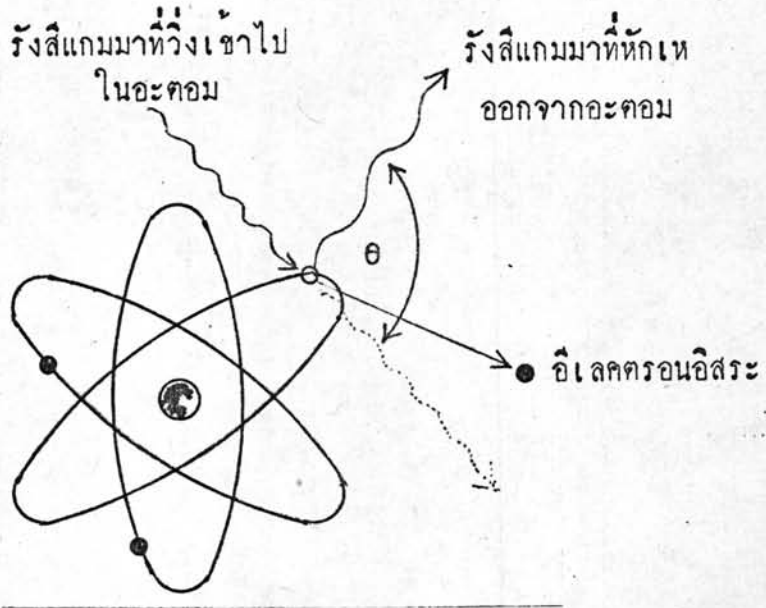
$$\sigma_{pp} \propto Z^2 \quad \text{-----(2.6)}$$



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวาง เนื่องจาก
ปฏิกิริยา แพร่ โพรคักชัน (Pair Production Cross
Section) ของตะกั่ว และพลังงานของรังสีแกมมา

เมื่อรังสีแกมมา ซึ่งมีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV วิ่งเข้าไปในอะตอม ทำให้เกิด แพร่ โพรคักชัน ได้คืออิเล็กตรอนและโพสิตรอน แล้วจะแบ่งพลังงานที่เหลือจาก 1.02 MeV ให้ อิเล็กตรอน และโพสิตรอน มีพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่โดยตนเอง อิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าไปในอะตอม และอาจจะวิ่งเข้าหานิวเคลียส หรืออิเล็กตรอนในวงโคจร ทำให้เกิดปฏิกิริยา ไอออไนเซชัน (Ionization) หรือ เอกซ์ไซเคชัน (Excitation) ขึ้น ส่วนโพสิตรอน เมื่อวิ่งผ่านเข้าไปในอะตอมพลังงานจะลดลง เมื่อพบกับอิเล็กตรอนในอะตอมอนุภาคทั้งสอง ชนิดนี้จะเกิดปฏิกิริยากันหายไป กลายเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Photon) 2 คลื่นวิ่งออกจากกันในทิศทางตรงกันข้าม แต่ละคลื่นมีพลังงาน 0.511 MeV ขบวนการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีชื่อเรียกว่า แอนโนอิลเลชัน เรดิเอชัน (Annihilation Radiation)

3) ปฏิกิริยาคอมพตัน เอฟเฟกต์ ปฏิกิริยานี้บางทีเรียกว่า คอมพตัน สแคตเตอริง (Compton Scattering) เกิดจากเมื่อรังสีแกมมาวิ่งเข้าไปในอะตอมชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรวงนอกรอกจากนิวเคลียส อิเล็กตรอนในวงโคจร



รูปที่ 2.12 แสดงการเกิดปฏิกิริยา คอมป์ตัน สแคเตอร์ริง

ที่ถูกชน จะรับพลังงานส่วนหนึ่งของรังสีแกมมา จนหลุดออกจากอะตอมกักรูปที่ 2.12 รังสีแกมมาที่วิ่งเข้าชนอิเล็กตรอนมีพลังงาน E และมีความยาวช่วงคลื่น λ ภายหลังจากการชนทิศทางของรังสีแกมมาจะเบี่ยงเบนไปจากแนวทางเดิมเป็นมุม θ และพลังงานบางส่วนจะถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนจนตัวเองเหลือพลังงานเพียง E' น้อยกว่าเดิม แต่มีความยาวช่วงคลื่นมากกว่าเดิมเป็น λ'

โดยอาศัยกฎการคงตัวของพลังงาน และโมเมนตัม (Law of Conservation of Energy and Momentum) จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีแกมมา E และ E' ได้ดังนี้

$$E' = \frac{E E_e}{E(1 - \cos \theta) + E_e} \quad \text{-----(2.7)}$$

เมื่อ E_e คือ เรสต์ แมส เอเนอร์ยี (Rest mass energy) ของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $m_e c^2$

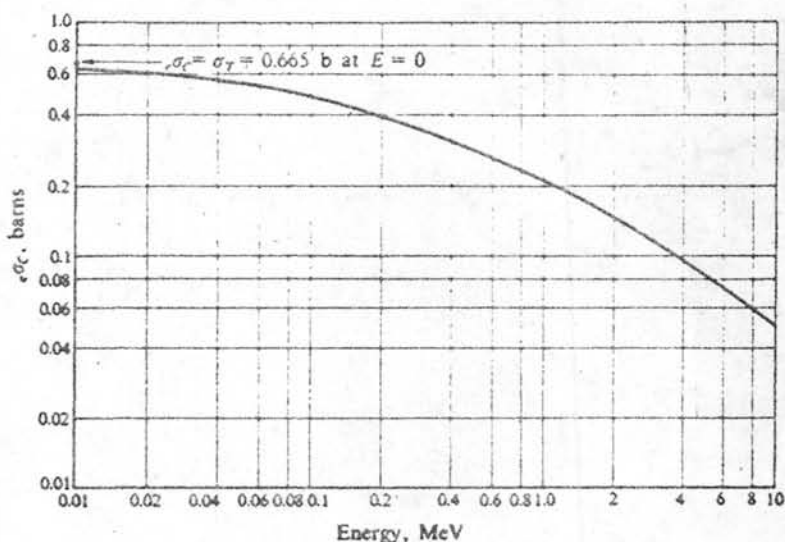
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } E_e &= m_e c^2 \\ &= 0.511 \text{ MeV} \end{aligned} \quad \text{-----(2.8)}$$

จากสมการ (2.7) จะเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของความยาวช่วงคลื่น λ และ λ' ได้ดังนี้

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta) \quad \text{-----(2.9)}$$

$$\text{เมื่อ } \lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2.426 \times 10^{-10} \text{ ซม.}$$

ค่า λ_c เรียกว่าความยาวช่วงคลื่นคอมพตัน (Compton Wavelength) ในปฏิกิริยาคอมพตัน สแคเตอร์ริง รังสีแกมมาจะวิ่งชนอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียว จึงสามารถที่จะกำหนดค่าภาคตัดขวางเนื่องจากปฏิกิริยาคอมพตัน สแคเตอร์ริง ของอิเล็กตรอนหนึ่งตัว (σ_e , Compton cross section per electron) ได้



รูปที่ 2.13¹ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวาง เนื่องจากปฏิกิริยา
คอมพ์ตัน สแคตเทอริง ของอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ($e\sigma_c$, Compton
cross section per electron) และพลังงานของรังสีแกมมา

จากรูปที่ 2.13 จะแสดงให้เห็นว่า $e\sigma_c$ มีความสัมพันธ์กับพลังงานของรังสี
แกมมา ที่วิ่งเข้าไปชนอิเล็กตรอนในวงโคจร โดยที่ค่า $E \gg E_e$ $e\sigma_c$ จะแปร
ผกผันกับ E และค่าภาคตัดขวางเนื่องจากปฏิกิริยาคอมพ์ตัน สแคตเทอริง คอหึ่งอะตอม
(σ_c , Compton cross section per atom) จะคำนวณได้จาก เอาจำนวนอะตอมมีค
นัมเบอร์ (Z) คูณด้วย $e\sigma_c$
ดังนั้น

$$\sigma_c = Z e\sigma_c \quad \text{---(2.10)}$$

¹ Lamarsh, J.R. : Introduction to Nuclear Engineering
(New York : Addison - Wesley Publishing Co., 1975) P.80.

ในทางปฏิบัติ ปัญหาเกี่ยวกับปฏิกิริยา คอมพัตัน สแคเตอร์ริง มีมาก เช่นในการป้องกันรังสีแกมมา ปฏิกิริยาชนิดอื่นเช่นปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ และปฏิกิริยาแพร์ โพรคักชัน เกิดจากรังสีแกมมาวิ่งหายไปโดยอะตอม และไม่ปรากฏขึ้นอีก แต่ปฏิกิริยา คอมพัตัน สแคเตอร์ริง รังสีแกมมาที่เบี่ยงเบนไปจากการชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจร ยังสามารถวิ่งเข้าชนส่วนอื่นของอะตอมได้อีก ทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ และ คูเกอร์ อิเล็กตรอนขึ้นอีก เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ และยังเกิดปฏิกิริยาแอนโนฮิลเลชัน ต่อจากปฏิกิริยา แพร์ โพรคักชัน ที่เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีแกมมาที่เบี่ยงเบนไปจากปฏิกิริยา คอมพัตัน สแคเตอร์ริง

4) แอทเทนนูเอชัน โคเอฟฟิเชียนต์ (Attenuation Coefficients) ในการวิ่งชนวัตถุของรังสีแกมมา จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ แพร์ โพรคักชัน และคอมพัตัน สแคเตอร์ริง โดยมีค่าภาคตัดขวางรวมต่อหนึ่งอะตอม (σ , Total cross section per atom)

$$\text{เมื่อ } \sigma = \sigma_{Pe} + \sigma_{PP} + \sigma_c \quad \text{-----}(2.11)$$

ค่า σ มีชื่อเรียกที่ถูกต้อง คือ ภาคตัดขวางจุลภาครวมต่อหนึ่งอะตอม (Total microscopic cross section per atom) ซึ่งจะหาภาคตัดขวางมหภาครวมต่อหนึ่งอะตอม (Σ , Total macroscopic cross section) โดยการคูณ σ ด้วยความหนาแน่นอะตอม N และโดยทั่วไปค่าภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) ของรังสีแกมมา นิยมเรียกกันว่า แอทเทนนูเอชัน โคเอฟฟิเชียนต์ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ μ

$$\text{ดังนั้น } \mu = N\sigma = \mu_{Pe} + \mu_{PP} + \mu_c \quad \text{-----}(2.12)$$

เมื่อ μ คือค่า แอทเทนนูเอชัน โคเอฟฟิเชียนต์ รวม (Total Attenuation Coefficient)

และ μ_{Pe} μ_{PP} และ μ_c คือค่าแอทเทนนูเอชัน โคเอฟฟิเชียนต์ ของปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ แพร์ โพรคักชัน และคอมพัตัน สแคเตอร์ริง หน่วยของ μ ใช้

หน่วยเดียวกับค่าภาคตัดขวางมหภาค (Σ) คือ ซม.⁻¹ แต่อย่างไรก็ดี ค่า แอทเทนนูเอชัน โคออปทิเชียน นิยมทำให้อยู่ในรูปของ $\frac{\mu}{\rho}$ เมื่อ ρ คือค่าความหนาแน่นของวัตถุที่รังสีแกมมาวิ่งเข้าชนเทอม $\frac{\mu}{\rho}$ เรียกว่า แมสแอทเทนนูเอชัน โคออปทิเชียน ดังนั้นสมการ (2.12) จะเขียนใหม่เป็น

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu_{Fe}}{\rho} + \frac{\mu_{PP}}{\rho} + \frac{\mu_c}{\rho} \quad \text{-----}(2.13)$$

เมื่อ μ มีหน่วยเป็น ซม.⁻¹ และ ρ มีหน่วยเป็น กรัม/ซม³

ดังนั้น $\frac{\mu}{\rho}$ จะมีหน่วยเป็น ซม.²/กรัม

จากรูป 2.14 แสดงถึงค่าแมสแอทเทนนูเอชันโคอปทิเชียน ของตะกั่วจะสังเกตได้ว่าค่า σ_{Fe} และ σ_c มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มพลังงานของรังสีแกมมา และค่า σ_{PP} จะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น จากรูปจะสังเกตได้ว่าปฏิกิริยาคอมพัตตัน สแคเตอร์ริง จะเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วงพลังงาน 0.5 - 5 MeV

ที่พลังงานของรังสีแกมมาทำให้เกิดปฏิกิริยา คอมพัตตัน สแคเตอร์ริงมากที่สุด

$$\frac{\mu}{\rho} \approx \frac{\mu_c}{\rho} = \frac{N\sigma_c}{\rho} \quad \text{-----}(2.14)$$

N คือ ความหนาแน่นอะตอม (Atom density)

$$N = \frac{\rho N_A}{M}$$

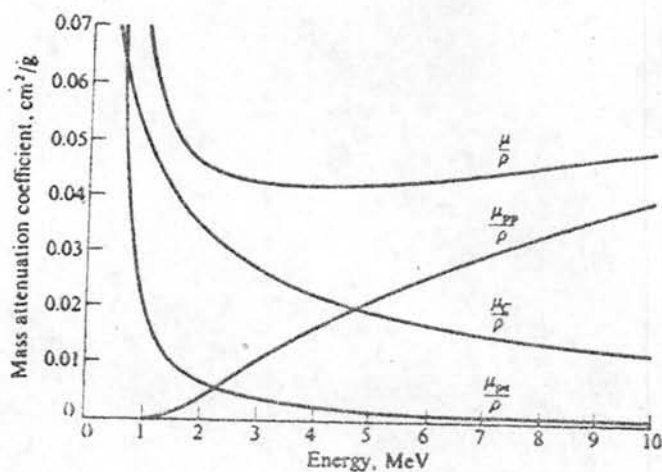
เมื่อ N_A คืออโวกาโดร์ นัมเบอร์ (Avogadro's Number)

และ M คือค่าน้ำหนักอะตอมเป็นกรัม

$$\text{ดังนั้น } \frac{\mu}{\rho} \approx \frac{N_A \sigma_c}{M} = N_A \left(\frac{Z}{M}\right) \sigma_{ec} \quad \text{-----}(2.15)$$

โดยแทนค่า σ_c จากสมการ (2.10)

โดยพิจารณาจากรายงาจะสังเกตพบว่า นอกจากธาตุไฮโดรเจนและธาตุหนักมาก ๆ อัตราส่วนระหว่าง $\frac{Z}{M}$ มีค่าประมาณ $\frac{1}{2}$ จึงทำให้ค่า $\frac{\mu}{\rho}$ สำหรับสารทุกชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.14¹ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า แมส แอทเทนชูนีชัน
โคเอฟฟิเชียน ของตะกั่ว และพลังงานของรังสี
แกมมา

¹ Lamarsh, J.R. : Introduction to Nuclear Engineering.
(New York: Addison - Wesley Publishing Co., 1975) P.81.

สำหรับสารแต่ละชนิด ดังรูปที่ 2.15 และตารางแสดงค่า $\frac{\mu}{\rho}$ ตามตารางประกอบที่ 2.1
ในกรณีที่วัสดุหลายชนิดผสมกัน ค่า μ รวมของสารดังกล่าวจะมีค่า

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n \quad \text{----- (2.16)}$$

เมื่อ $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ เป็นค่า แอตเทนนูเอชัน โคออปฟีเซียน ของสารแต่ละชนิดที่
มาผสมกัน จึงไม่ยากที่จะคำนวณค่า แมสแอตเทนนูเอชัน รวม (Total Mass Attenuation
Coefficient) จากค่าแมสแอตเทนนูเอชัน โคออปฟีเซียน ของสารแต่ละชนิดได้ ดัง
สมการ (2.17)

$$\frac{\mu}{\rho} = 0.01 \left[w_1 \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_1 + w_2 \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_2 + \dots + w_n \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_n \right] \quad \text{----- (2.17)}$$

เมื่อ w_1, w_2, \dots, w_n เป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของสารแต่ละชนิด สมการ
(2.17) สามารถใช้ได้กับรังสีแกมมาทุกค่าพลังงาน นอกจากนี้ค่าแอตเทนนูเอชัน โคออป-
ฟีเซียน (μ) ยังมีค่าเท่ากับโอกาสต่อหนึ่งหน่วยระยะทางที่รังสีแกมมาจะเกิดการชนในตัว
กลาง (Medium) ดังสมการ (2.18)

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad \text{----- (2.18)}$$

เมื่อ λ คือระยะทางที่รังสีแกมมาวิ่งไปก่อนจะเกิดการชนกับตัวกลาง
กำหนดให้ I_0 เป็นความเข้มของรังสีแกมมาที่มีพลังงานชนิดเดียววิ่งเข้าชนเป้า
ซึ่งมีความหนา x ดังนั้นความเข้มของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านเป้าออกไปจะคำนวณได้จาก
สมการ (2.19)

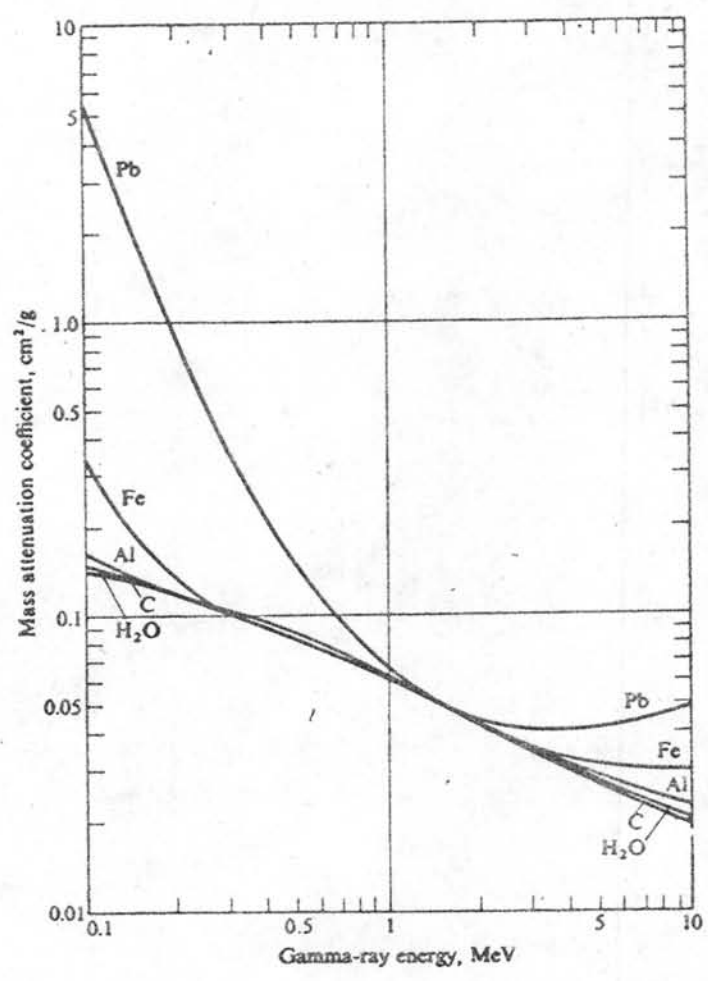
$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \text{----- (2.19)}$$

เขียนในเทอมของ Mass Attenuation จะได้

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) (\rho x)} \quad \text{----- (2.20)}$$

เทอม ρx มีหน่วยเป็น กรัม/ซม.²

ค่าแมสแอตเทนนูเอชัน ($\frac{\mu}{\rho}$) ของสารแต่ละชนิดจะเปิดค่าได้จาก ตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.15¹ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า แมส แอทเทนชันแอนด์ โคเอฟิเชียน ของธาตุบางชนิด และพลังงานของ รังสีแกมมา

¹ Lamarsh, J.R. : Introduction to Nuclear Engineering (New York : Addison - Wesley Publishing Co., 1975) P.84.

ตารางที่ 2.1¹

แสดงค่า แมส แอทเทนชัน (μ) ของสารในหน่วย ซม.²/กรัม
แต่ละพลังงานของรังสีแกมมา

Material	Gamma-Ray Energy, MeV																	
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2	3	4	5	6	8	10
H	.295	.265	.243	.212	.189	.173	.160	.140	.126	.113	.103	.0876	.0691	.0579	.0502	.0446	.0371	.0321
Be	.132	.119	.109	.0945	.0847	.0773	.0715	.0628	.0565	.0504	.0459	.0394	.0313	.0266	.0234	.0211	.0180	.0161
C	.149	.134	.122	.106	.0953	.0870	.0805	.0707	.0636	.0568	.0518	.0444	.0356	.0304	.0270	.0245	.0213	.0194
N	.150	.134	.123	.106	.0955	.0869	.0805	.0707	.0636	.0568	.0517	.0445	.0357	.0306	.0273	.0249	.0218	.0200
O	.151	.134	.123	.107	.0953	.0870	.0806	.0708	.0636	.0568	.0518	.0445	.0359	.0309	.0276	.0254	.0224	.0206
Na	.151	.130	.118	.102	.0912	.0833	.0770	.0676	.0608	.0546	.0496	.0427	.0348	.0303	.0274	.0254	.0229	.0215
Mg	.160	.135	.122	.106	.0944	.0860	.0795	.0699	.0627	.0560	.0512	.0442	.0360	.0315	.0286	.0266	.0242	.0228
Al	.161	.134	.120	.103	.0922	.0840	.0777	.0683	.0614	.0548	.0500	.0432	.0353	.0310	.0282	.0264	.0241	.0229
Si	.172	.139	.125	.107	.0954	.0869	.0802	.0706	.0635	.0567	.0517	.0447	.0367	.0323	.0296	.0277	.0254	.0243
P	.174	.137	.122	.104	.0928	.0846	.0780	.0685	.0617	.0551	.0502	.0436	.0358	.0316	.0290	.0273	.0252	.0242
S	.188	.144	.127	.108	.0958	.0874	.0806	.0707	.0635	.0568	.0519	.0448	.0371	.0328	.0302	.0284	.0266	.0255
Ar	.188	.135	.117	.0977	.0867	.0790	.0730	.0638	.0573	.0512	.0468	.0407	.0338	.0301	.0279	.0266	.0248	.0241
K	.215	.149	.127	.106	.0938	.0852	.0786	.0689	.0618	.0552	.0505	.0438	.0365	.0327	.0305	.0289	.0274	.0267
Ca	.238	.158	.132	.109	.0965	.0876	.0809	.0708	.0634	.0566	.0518	.0451	.0376	.0338	.0316	.0302	.0285	.0280
Fe	.344	.183	.138	.106	.0919	.0828	.0762	.0664	.0595	.0531	.0485	.0424	.0361	.0330	.0313	.0304	.0295	.0294
Cu	.427	.206	.147	.108	.0916	.0820	.0751	.0654	.0585	.0521	.0476	.0418	.0357	.0330	.0316	.0309	.0303	.0305
Mo	1.03	.389	.225	.130	.0998	.0851	.0761	.0648	.0575	.0510	.0467	.0414	.0365	.0349	.0344	.0344	.0349	.0359
Sn	1.58	.563	.303	.153	.109	.0886	.0776	.0647	.0568	.0501	.0459	.0408	.0367	.0355	.0355	.0358	.0368	.0383
I	1.83	.648	.339	.165	.114	.0913	.0792	.0653	.0571	.0502	.0460	.0409	.0370	.0360	.0361	.0365	.0377	.0394
W	4.21	1.44	.708	.293	.174	.125	.101	.0763	.0640	.0544	.0492	.0437	.0405	.0402	.0409	.0418	.0438	.0465
Pt	4.75	1.64	.795	.324	.191	.135	.107	.0800	.0659	.0554	.0501	.0445	.0414	.0411	.0418	.0427	.0448	.0477
Tl	5.16	1.80	.866	.346	.204	.143	.112	.0824	.0675	.0563	.0508	.0452	.0420	.0416	.0423	.0433	.0454	.0484
Pb	5.29	1.84	.896	.356	.208	.145	.114	.0836	.0684	.0569	.0512	.0457	.0421	.0420	.0426	.0436	.0459	.0489
U	10.60	2.42	1.17	.452	.259	.176	.136	.0952	.0757	.0615	.0548	.0484	.0445	.0440	.0446	.0455	.0479	.0511
Air	.151	.134	.123	.106	.0953	.0868	.0804	.0706	.0655	.0567	.0517	.0445	.0357	.0307	.0274	.0250	.0220	.0202
NaI	1.57	.568	.305	.155	.111	.0901	.0789	.0657	.0577	.0508	.0465	.0412	.0367	.0351	.0347	.0347	.0354	.0366
H ₂ O	.167	.149	.136	.118	.106	.0966	.0896	.0786	.0706	.0630	.0575	.0493	.0396	.0339	.0301	.0275	.0240	.0219
Concrete	.169	.139	.124	.107	.0954	.0870	.0804	.0706	.0635	.0567	.0517	.0445	.0363	.0317	.0287	.0268	.0243	.0229
Tissue	.163	.144	.132	.115	.100	.0936	.0867	.0761	.0683	.0600	.0556	.0478	.0384	.0329	.0292	.0267	.0233	.0212

¹ Lamarsh, J.R. Introduction to Nuclear Engineering

(New York Addison - Wesley Publishing Co., 1975) P.82.

5) พลังงานที่ถูกดูดกลืน (Energy Deposition) สำหรับการคำนวณหาพลังงานของรังสีแกมมา ที่ถูกดูดกลืนในตัวกลาง จะพิจารณาจากความหนาแน่นในการเกิดปฏิกิริยา (Total collision density) ที่ตำแหน่งใด ๆ ที่มีปริมาณความเข้มของรังสี ϕ วิ่งเข้าไปจน ถึงสมการ (2.21)

$$F = I \mu \quad \text{-----(2.21)}$$

เมื่อ

F = ความหนาแน่นในการเกิดปฏิกิริยา (Total collision density)

มีหน่วยเป็น $\frac{\text{โฟตอน}}{\text{ซม.}^3 \cdot \text{วินาที}}$ ($\frac{\text{Photon}}{\text{cm}^3 \cdot \text{sec}}$)

I = ความเข้มของรังสีแกมมา มีหน่วยเป็น $\frac{\text{โฟตอน}}{\text{ซม.}^2 \cdot \text{วินาที}}$

μ = ค่าแอทเทนนูเอชัน โคเอฟฟิเชียนท์ รวม (Total Attenuation Coefficient) ของตัวกลาง เนื่องจากปฏิกิริยา โฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ และแพร์โพรดักชัน มีหน่วยเป็น ซม.⁻¹

ให้ E เป็นพลังงานของรังสีแกมมา ดังนั้นพลังงานของรังสีแกมมาซึ่งถูกดูดกลืนในตัวกลาง จะมีค่าดังสมการ (2.22)

$$EF = E I \mu \quad \text{-----(2.22)}$$

เมื่อ E เป็นพลังงานของรังสีแกมมา มีหน่วยเป็น MeV พลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนี้เนื่องมาจากปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ และปฏิกิริยา แพร์ โพรดักชัน สำหรับปฏิกิริยา คอมพ์ตัน สแคตเทอริง พลังงานของรังสีแกมมา บางส่วนถ่ายเทให้เป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ถูกชนหลุดกระเด็นจากวงโคจร

กำหนดให้ T เป็นพลังงานจลน์เฉลี่ยของอิเล็กตรอน ดังนั้นพลังงานโดยเฉลี่ยที่ถูกดูดกลืนโดยปฏิกิริยาคอมพ์ตัน สแคตเทอริง จะมีค่าดังสมการ (2.23)



$$\text{พลังงานโดยเฉลี่ยที่ถูกดูดกลืน} = \bar{I} I \mu_c \quad \text{-----(2.23)}$$

เมื่อ μ_c = ค่าคอมพัตัน แอทเทนนูเอชัน โคเอฟฟิเชียน

กำหนดให้ μ_{ca} เป็นค่า คอมพัตัน แอมซอบชัน โคเอฟฟิเชียน

ดังนั้นสมการ (2.23) จะเขียนใหม่ในเทอมของ μ_{ca} ได้ดังสมการ (2.24)

$$\text{พลังงานโดยเฉลี่ยที่ถูกดูดกลืน} = E I \mu_{ca} \quad \text{-----(2.24)}$$

นี่คือพลังงานทั้งหมดที่ถูกดูดกลืน เนื่องจากปฏิกิริยา โฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ ปฏิกิริยา แพร่ โพรคักชัน และปฏิกิริยา คอมพัตัน สแคเตอร์ริง จะคำนวณได้ดังสมการ (2.25)

$$\begin{aligned} W &= E I (\mu_{Pe} + \mu_{PP} + \mu_{ca}) \\ &= E I \mu_a \quad \text{-----(2.25)} \end{aligned}$$

$$\text{เมื่อ} \quad \mu_a = \mu_{Pe} + \mu_{PP} + \mu_{ca}$$

W = พลังงานทั้งหมดที่ถูกดูดกลืนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

ปริมาณ $\frac{\mu_a}{\rho}$ เรียกว่า แมสแอมซอบชัน โคเอฟฟิเชียน มีค่าประกอบตามตารางที่ 2.2

ดังนั้นพลังงานทั้งหมดของรังสีแกมมาที่ถูกดูดกลืนในวัตถุ จะมีค่า

$$W = \frac{E I \mu_a}{\rho} \quad \text{-----(2.26)}$$

เทอม $I E$ มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความเข้มของพลังงาน (Energy Intensity) หรือกลุ่มของพลังงาน (Energy Flux)

มีหน่วยเป็น $\frac{\text{พลังงานของโฟตอน}}{\text{ซม.}^2 \cdot \text{วินาที}}$ ($\frac{\text{Photon energy}}{\text{cm}^2 \cdot \text{second}}$)

ตารางที่ 2.2¹

แสดงค่า แมส แอ็บซอร์ชัน ($\frac{\mu_a}{\rho}$) ของสารในหน่วย $\frac{\text{cm}^2}{\text{กรัม}}$ แต่ละพลังงาน
ของรังสีแกมมา

Material	Gamma-Ray Energy, MeV																	
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.50	2	3	4	5	6	8	10
H	.0411	.0487	.0531	.0575	.0589	.0591	.0590	.0575	.0557	.0533	.0509	.0467	.0401	.0354	.0318	.0291	.0252	.0255
Be	.0183	.0217	.0237	.0256	.0263	.0264	.0263	.0256	.0248	.0237	.0227	.0210	.0183	.0164	.0151	.0141	.0127	.0118
C	.0215	.0246	.0267	.0288	.0296	.0297	.0296	.0289	.0280	.0268	.0256	.0237	.0209	.0190	.0177	.0166	.0153	.0145
N	.0224	.0249	.0267	.0288	.0296	.0297	.0296	.0289	.0280	.0268	.0256	.0236	.0211	.0193	.0180	.0171	.0158	.0151
O	.0233	.0252	.0271	.0289	.0296	.0297	.0296	.0289	.0280	.0268	.0257	.0238	.0212	.0195	.0183	.0175	.0163	.0157
Na	.0289	.0258	.0266	.0279	.0283	.0284	.0284	.0276	.0268	.0257	.0246	.0229	.0207	.0194	.0185	.0179	.0171	.0168
Mg	.0335	.0276	.0278	.0290	.0294	.0293	.0292	.0285	.0276	.0265	.0254	.0237	.0215	.0203	.0194	.0188	.0182	.0180
Al	.0373	.0283	.0275	.0283	.0287	.0286	.0286	.0278	.0270	.0259	.0248	.0232	.0212	.0200	.0192	.0188	.0183	.0182
Si	.0435	.0300	.0286	.0291	.0293	.0290	.0290	.0282	.0274	.0263	.0252	.0236	.0217	.0206	.0198	.0194	.0190	.0189
P	.0501	.0315	.0292	.0289	.0290	.0290	.0287	.0280	.0271	.0260	.0250	.0234	.0216	.0206	.0200	.0197	.0194	.0195
S	.0601	.0351	.0310	.0301	.0301	.0300	.0298	.0288	.0279	.0268	.0258	.0242	.0224	.0215	.0209	.0206	.0206	.0206
Ar	.0729	.0368	.0302	.0278	.0274	.0272	.0270	.0260	.0252	.0242	.0233	.0220	.0206	.0199	.0195	.0195	.0194	.0197
K	.0909	.0433	.0340	.0304	.0298	.0295	.0291	.0282	.0272	.0261	.0251	.0237	.0222	.0217	.0214	.0212	.0215	.0219
Ca	.111	.0489	.0367	.0318	.0309	.0304	.0300	.0290	.0279	.0268	.0258	.0244	.0230	.0225	.0222	.0223	.0225	.0231
Fe	.225	.0810	.0489	.0340	.0307	.0294	.0287	.0274	.0261	.0250	.0242	.0231	.0224	.0224	.0227	.0231	.0239	.0250
Cu	.310	.107	.0594	.0368	.0316	.0296	.0286	.0271	.0260	.0247	.0237	.0229	.0223	.0227	.0231	.0237	.0248	.0261
Mo	.922	.294	.141	.0617	.0422	.0348	.0315	.0281	.0263	.0248	.0239	.0233	.0237	.0250	.0262	.0274	.0296	.0316
Sn	1.469	.471	.222	.0873	.0534	.0403	.0346	.0294	.0268	.0248	.0239	.0233	.0243	.0259	.0276	.0291	.0316	.0339
I	1.726	.557	.260	.100	.0589	.0433	.0366	.0303	.0274	.0252	.0241	.0236	.0247	.0265	.0283	.0299	.0327	.0353
W	4.112	1.356	.631	.230	.121	.0786	.0599	.0426	.0353	.0302	.0281	.0271	.0287	.0311	.0335	.0355	.0390	.0426
Pt	4.645	1.556	.719	.262	.138	.0892	.0666	.0465	.0375	.0315	.0293	.0280	.0296	.0320	.0343	.0365	.0400	.0438
Tl	5.057	1.717	.791	.285	.152	.0972	.0718	.0491	.0393	.0326	.0301	.0288	.0304	.0326	.0349	.0354	.0406	.0446
Pb	5.193	1.753	.821	.294	.156	.0994	.0738	.0505	.0402	.0332	.0306	.0293	.0305	.0330	.0352	.0373	.0412	.0450
U	9.63	2.337	1.096	.392	.208	.132	.0968	.0628	.0482	.0383	.0346	.0324	.0332	.0352	.0374	.0394	.0443	.0474
Air	.0233	.0251	.0268	.0288	.0296	.0297	.0296	.0289	.0280	.0268	.0256	.0238	.0211	.0194	.0181	.0172	.0160	.0153
NaI	1.466	.476	.224	.0889	.0542	.0410	.0354	.0299	.0273	.0253	.0242	.0235	.0241	.0254	.0268	.0281	.0303	.0325
H ₂ O	.0253	.0278	.0300	.0321	.0328	.0330	.0329	.0321	.0311	.0298	.0285	.0264	.0233	.0213	.0198	.0188	.0173	.0165
Concrete	.0416	.0300	.0289	.0294	.0297	.0296	.0295	.0287	.0278	.0272	.0256	.0239	.0216	.0203	.0194	.0188	.0180	.0177
Tissue	.0271	.0282	.0293	.0312	.0317	.0320	.0319	.0311	.0300	.0288	.0276	.0256	.0220	.0206	.0192	.0182	.0168	.0160

¹ Lamarsh, J.R. : Introduction to Nuclear Engineering

(New York : Addison - Wesley Publishing Co., 1975) P.86.

2.4 การหาความหนาแน่นของสารโดยวิธีนิวเคลียร์

ใช้หลักการทะลุผ่าน และการสะท้อนของรังสีแกมมาต่อวัตถุที่มาขวางกัน วัตถุที่มีความหนาแน่นน้อยปริมาณรังสีที่วัดจากหัววัดรังสีจะวัดค่าได้มาก วัตถุใดที่มีความหนาแน่นมาก ปริมาณรังสีที่วัดจากหัววัดรังสีจะวัดค่าได้น้อย โดยพิจารณาได้จากสมการ (2.20)

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)(\rho x)}$$

เขียนใหม่โคสมการ

$$\ln \frac{I_0}{I} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) (\rho x) \quad \text{----- (2.27)}$$

เมื่อ

- I_0 = ปริมาณรังสีเริ่มต้นก่อนจะวิ่งเข้าไปในวัตถุ มีค่าคงที่
- I = ปริมาณรังสีสุดท้ายที่วิ่งออกจากวัตถุเข้าหัววัดรังสี มีค่าคงที่
- $\frac{\mu}{\rho}$ = ค่าแมสแอทเทนชันของวัตถุ มีค่าคงที่สำหรับวัตถุแต่ละชนิด
- x = ระยะทางที่รังสีแกมมาวิ่งผ่าน หรือความหนาของแอบซอร์เบอร์ (Absorber Thickness) ซึ่งเป็นค่าที่
- ρ = ค่าความหนาแน่นของแอบซอร์เบอร์

จากสมการ (2.27) รวมเทอมคงที่ไว้ด้วยกัน

$$\text{ดังนั้น } \ln \frac{I_0}{I} = \text{constant } (\rho)$$

$$\text{หรือ } \frac{I_0}{I} \propto e^{\rho} \quad \text{----- (2.28)}$$

จากสมการ (2.28) แสดงว่า ถ้าวัตถุมีความหนาแน่นมาก ค่า $\frac{I_0}{I}$ จะมีค่ามากขึ้นตาม แต่ I_0 มีค่าคงที่ ดังนั้น I ที่ทะลุผ่านหรือสะท้อนจากวัตถุออกมายังหัววัดรังสีย่อมมีค่าน้อย ในทำนองเดียวกันที่วัตถุมีความหนาแน่นน้อย $\frac{I_0}{I}$ จะมีค่าน้อยลงตาม เนื่องจาก I_0 มีค่าคงที่ จึงแสดงว่าปริมาณรังสี I ที่ทะลุผ่านหรือสะท้อนออกมา ต้องมีค่าเกือบเท่า I_0

ดังนั้นในการวัดความหนาแน่นของสารโดยวิธีนิวเคลียร์ จึงใช้สมการ (2.20) เป็นหลัก และมีการจัดลักษณะของเครื่องมือหลายชนิด ดังนี้

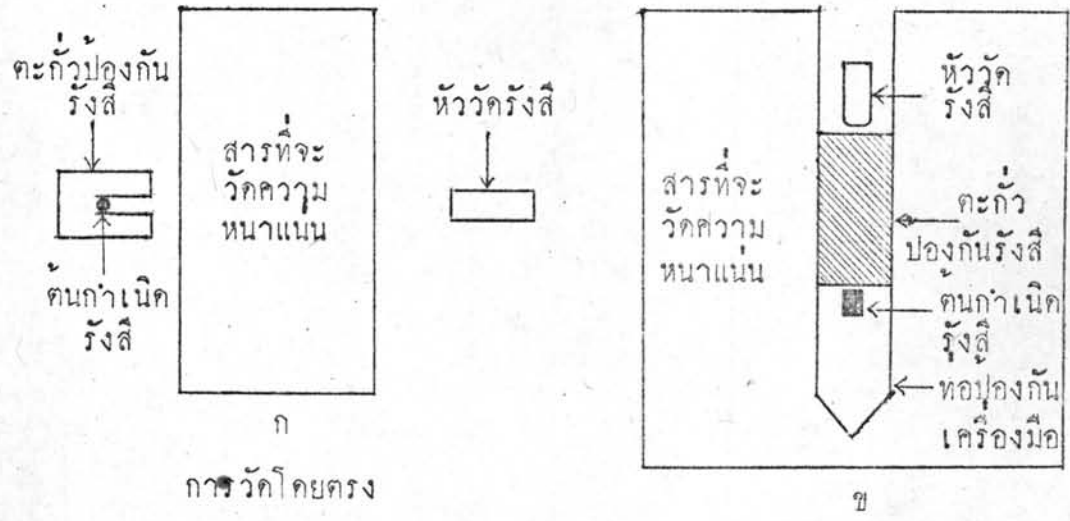
ลักษณะแรก หัววัดรังสีจะวัดปริมาณรังสีซึ่งทะลุผ่านสารที่จะวัดค่าความหนาแน่นโดยตรง ดังรูปที่ 2.16 ก. สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของสารได้เลย โดยใช้สมการ (2.20) แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะสมสำหรับใช้วัดความหนาแน่นของสารบางชนิด เช่นการวัดความหนาแน่นของผิวหินสำหรับการสร้างถนน

ลักษณะที่สอง ระหว่างต้นกำเนิดรังสีแกมมาและหัววัดรังสี กันด้วยตะกั่วสำหรับป้องกันรังสี การจกเครื่องมือสามารถจกได้ทั้งในสาร และวางบนสาร สำหรับการจกเครื่องมือลักษณะนี้ปริมาณรังสีที่วัดได้จากหัววัดรังสีจะวัดรังสีที่สะท้อนมาจากสารได้มากกว่ารังสีที่จะทะลุผ่านตะกั่วโดยตรง ดังรูปที่ 2.16 ข. และรูปที่ 2.16 ค.

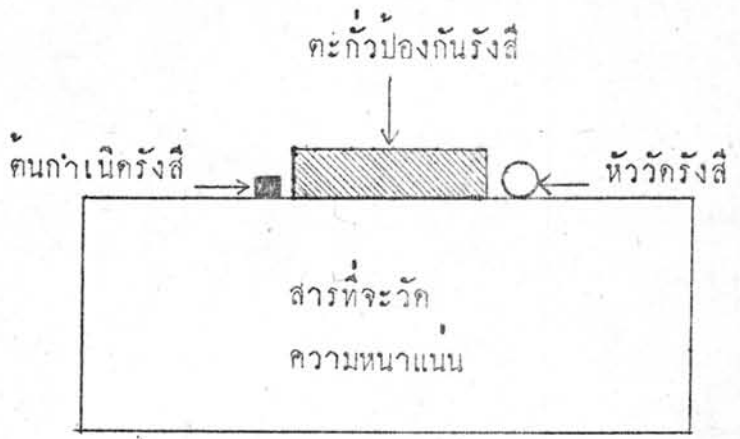
จากรูปที่ 2.16 ข. ต้นกำเนิดรังสี หัววัดรังสีและตะกั่วป้องกันรังสี บรรจุในหลอดบางใสไว้ในหลุม ซึ่งเจาะลึกจากผิวหิน กรณีนี้รังสีจะสะท้อนจากสาร รอบตัวไปเข้าหัววัดรังสี จากรูปที่ 2.16 ค. รังสีจะสะท้อนจากสารด้านล่างไปเข้าหัววัดรังสีโดยไม่ต้องทำลายผิวหน้าของสาร วิธีการนี้จึงเป็นที่สนใจในการใช้เครื่องมือ ซึ่งจัดในลักษณะนี้วัดความหนาแน่นของผิวหินในการสร้างถนน หรือการก่อสร้างทั่วไป

2.4.1 เครื่องมือวัดความหนาแน่นชนิดวัดที่ผิว (Surface gauge)

โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.16 ค. ต้นกำเนิดรังสีแกมมา ซีเซียม-137 ที่ใช้ในการวิจัยจะส่งรังสีเบตา และรังสีแกมมาออกมาทุกทิศทาง รังสีเบตาและรังสีแกมมา ส่วนหนึ่งจะทะลุผ่านเข้าไปในสารที่จะวัดความหนาแน่น รังสีเบตามีอำนาจในการทะลุทะลวงไม่ก็จะถูกกูดกสิ้นหายไปในสารหมด เหลือแต่เพียงรังสีแกมมาเท่านั้นที่จะวิ่งเข้าไปในสารและก่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ ปฏิกิริยาคอมพตัน สแคตเตอริง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากที่สุด และเป็นหลักในการวิจัยนี้ก็คือปฏิกิริยาคอมพตัน สแคตเตอริง ดังกล่าวมาแล้วในตอนต้น สำหรับหัววัดรังสีที่จะใช้วัดปริมาณรังสีสะท้อนจากสารที่ไซกันทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิด คือ หัววัดรังสีไกเกอร์แบบมีหน้าต่างด้านข้าง (Side Window Geiger Detector) สำหรับวัดเฉพาะรังสีแกมมา กล่าวคือเป็นหัววัดชนิดผนังหน้าต่างสำหรับกันรังสีเบตาที่จะทะลุ



การวัดในสาร



การวัดบนสาร

รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะเบื้องต้นของการจิกเครื่องมือสำหรับวัดความหนาแน่นของสาร

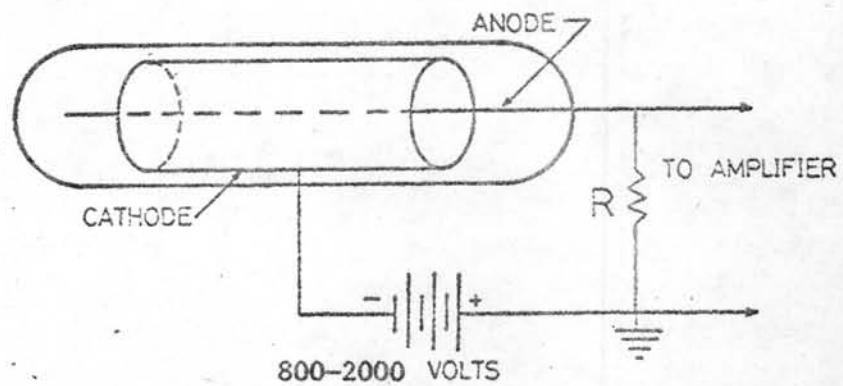
I16682415

ผ่านเข้าไปภายในหัววัด หัววัดอีกชนิดหนึ่งคือหัววัดชนิดโซเดียมไอโอไดน์ - ทัลเลียม NaI (Tl) หัววัดชนิดนี้มีความไวต่อรังสีแกมมา ถึงรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

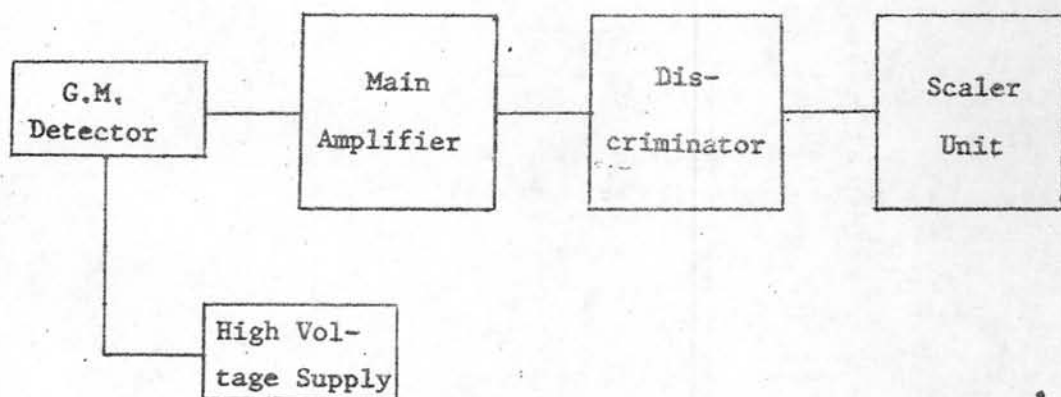
1) หัววัดรังสีชนิดไกเกอร์ (Geiger - Mueller detector)

หัววัดชนิดนี้ใช้กันแพร่หลายที่สุด ซึ่งรัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford) และไกเกอร์ (Geiger) เป็นผู้ออกแบบในปี ค.ศ.1908 ต่อมาไกเกอร์ และ มิลเลอร์ (Mueller) ร่วมกันปรับปรุงให้ดีขึ้น นิยมเรียกกันสั้น ๆ ว่า หลอด จี.เอ็ม. (G.M. detector) หรือ หลอดไกเกอร์ (Geiger detector) ลักษณะของเครื่องมือประกอบด้วยขั้วบวกแอโนด (Anode) มีลวดโลหะเส้นตรงเป็นแกนกลางล้อมรอบด้วยขั้วลบ แคโทด (Cathode) เป็นโลหะรูปทรงกระบอกทั้งขั้วบวก และขั้วลบ บรรจุอยู่ในหลอดแก้วบางเพื่อให้รังสีทะลุผ่านได้ง่าย นอกจากนี้ในหลอดแกวยังบรรจุแก๊สความดันต่ำ (ประมาณ 10 เซนติเมตรของปรอท) เช่น ไฮโดรเจน หรือ อาร์กอนผสมกับไอสารประกอบอินทรีย์บางชนิด เช่น แอลกอฮอล์บรรจุอยู่ด้วย ทุกรูปประกอบที่ 2.17 ศักภาพไฟระหว่างขั้วบวก และลบ มีค่าตั้งแต่ 800-2000 โวลท์ จะทำให้โลหะรูปทรงกระบอกซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ มีศักภาพเป็นลบ มาก ๆ เมื่อเทียบกับลวดโลหะแกนกลางซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วบวก แต่เนื่องจากแก๊สที่บรรจุอยู่เป็นตัวนำที่เลว จึงยังไม่มีกระแสไหลในวงจรความต้านทาน R

ในการวัดรังสีทุกครั้ง ศักภาพไฟของเครื่องมือต้องปรับให้สูงพอจนทำให้แก๊สที่บรรจุอยู่ในหลอดเกือบจะนำไฟฟ้า ศักภาพไฟที่เหมาะสมนี้เรียกว่า โอเปอเรตติ้ง โวลเตจ (Operating Voltage) ของหลอดไกเกอร์ กล่าวคือ ถ้ามีอะไรมากระตุ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้แก๊สแตกตัว ภายในหลอด และจะนำไฟฟ้าได้เมื่อมีรังสีชนิดใดชนิดหนึ่งผ่านเข้ามาในหลอด รังสีจะแยกอะตอมของแก๊สออกเป็นอิเล็กตรอนกับไอออนบวก อิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าที่สูงมากภายในหลอดบังคับให้วิ่งไปยังแกนกลาง คือ ขั้วบวก ส่วนไอออนบวกจะถูกดึงไปยังขั้วลบรูปทรงกระบอกที่ล้อมอยู่โดยรอบ อิเล็กตรอนตัวแรกที่เกิดขึ้นขณะที่ถูกบังคับให้วิ่งไปยังแอโนด จะวิ่งเข้าชนอะตอมของแก๊สให้หลุดออกเป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวกคู่ใหม่ ยิ่งความต่างศักภาพสูงมากเพียงไร การชนก็จะเกิดขึ้นบ่อยครั้ง และจากอิเล็กตรอนเดิมเพียงตัวเดียวจะไปทำให้เกิดอิเล็กตรอนอื่น ๆ หลุดออกเป็น



รูปที่ 2.17 แสดงภาพภายในของหัววัดรังสีชนิดไกเกอร์



รูปที่ 2.18 แสดงผังวงจรของระบบหัววัดรังสีชนิดไกเกอร์

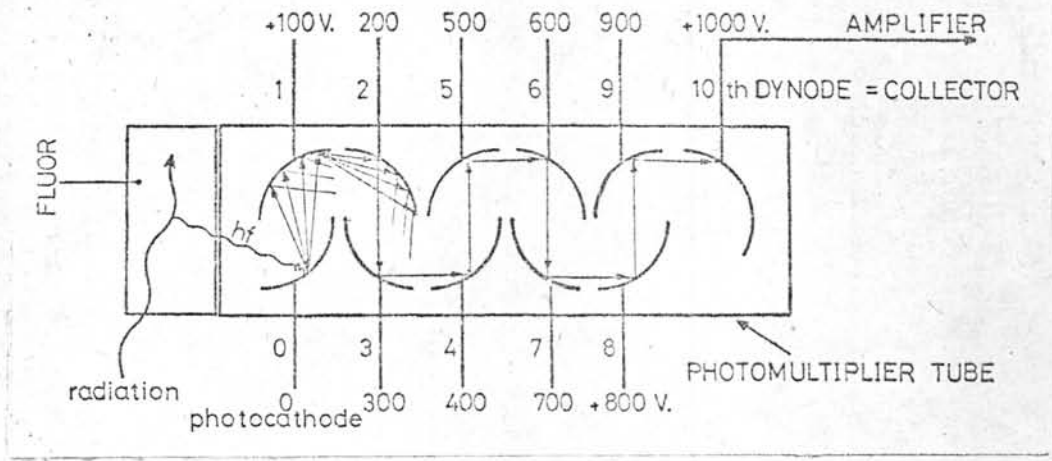
จำนวนมากวิ่งตรงไปยังขั้วบวก เรียกกระบวนการนี้ว่าแก๊สมัลติพลีเคชัน (Gas Multiplication) หรือ อีเลคตรอน อวาแลนซ์ (Electron Avalanche) ซึ่งเกิดขึ้นรวดเร็วมากจากการเคลื่อนที่ของอีเลคตรอนเข้าขั้วบวก จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทาน R เกิดเป็นโวลต์เตจัน พัลส์ (Voltage Pulse) ขึ้นที่ R (คือ เกิดความต่างศักย์ค่ามากที่ R ขั้วบวกเคียวก็หมดไป) สัญญาณโวลต์เตจัน พัลส์ นี้จะถูกส่งไปยังแอมพลิไฟด์ (Amplifier) ขยายให้มีขนาดเพิ่มขึ้น และอาจส่งต่อเข้าเครื่องนับจำนวน (Counter) หรือเข้าเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อดูลักษณะของพัลส์ (Pulse) ได้ การที่กระแสที่ผ่านความต้านทาน R เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นจำนวนมากนั้น ทำให้โวลต์เตจันคร่อม R มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวงจรจากแบตเตอรี่มีค่าคงที่ ผลก็คือโวลต์เตจัน หรือความต่างศักย์ระหว่างขั้วบวก กับขั้วลบ จะลดลงอย่างรวดเร็ว จนในที่สุดแก๊สไม่สามารถจะนำไฟฟ้าได้ และอีเลคตรอนอวาแลนซ์จะสิ้นสุดลงทันที กระแสจะหยุดไหลในวงจรมี ดังนั้นการต่อความต้านทาน อย่างอนุกรมเข้าในวงจรของหลอดจึงช่วยหยุดการไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อรังสีผ่านหลอดไปเรียบร้อยแล้ว เรียก R ว่า เควนชิ่ง รีซิสเตอร์ (Quenching Resistor)

หัววัดรังสีชนิดไกเกอร์นี้ ออกแบบไว้สำหรับการวัดรังสีอัลฟา เบตา และ แกมมา ตลอดจนรังสีเอกซ์ ส่วนมากนิยมออกแบบสร้างหัววัดรังสีชนิดไกเกอร์ สำหรับวัดรังสีเบตา และรังสีแกมมาเท่านั้น เพราะการออกแบบหลอดหัววัดรังสีให้บางพอที่รังสีอัลฟาจะทะลุผ่านเข้าไปได้นั้นทำได้ยาก จึงนิยมใช้หัววัดรังสีชนิดอื่นวัดรังสีอัลฟาแทน สำหรับผังวงจรของระบบหัววัดรังสีชนิดไกเกอร์ ดูรูปประกอบที่ 2.18

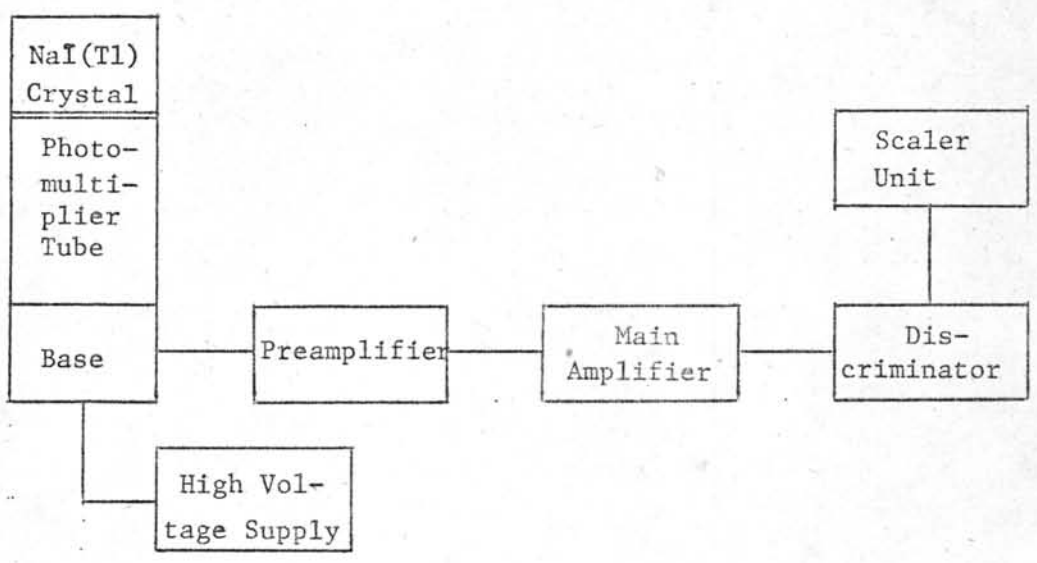
2) หัววัดรังสีชนิดเรืองแสง (Scintillation Detector)

หัววัดรังสีชนิดเรืองแสงนี้เป็นหัววัดรังสีที่มีความไวสูง อาศัยหลักดั้งเดิมเมื่อครั้งนักวิทยาศาสตร์ค้นพบสารกัมมันตรังสี กล่าวคือ เมื่อกัมมันตภาพรังสี เช่น รังสีอัลฟาตกกระทบสารบางชนิด เช่น ZnS (Zinc sulfide) ที่ฉาบไว้บนฉาก จะเกิดเรืองแสงขึ้น ณ จุดที่รังสีมากระทบ ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า ชินทิลเลชัน (Scintillation) อันที่จริงชินทิลเลชันเกิดจากอีเลคตรอนที่เอ็กไซต์ สเตตซ์ (Excited States) กลับคืนสู่กราวด์ สเตตซ์

(Ground state) ในอะตอม กล่าวคือ เมื่อรังสีผ่านไปในสสารแล้ว นอกจากจะเกิด ไอไอไนซ์เซชัน (Ionization) แล้วยังเกิด เอ็กไซท์เตชัน (Excitation) ของอะตอม ด้วย อิเล็กตรอนที่เอ็กไซท์ สเตตซ์จะกลับคืนสู่กราวนด์ สเตตซ์ในเวลาต่อมาด้วย การ ปลดปล่อยพลังงานทั้งในรูปโฟตอน (Photon) ของแสงเรียกว่าฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) แสงที่ออกมาคือแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescent light) สสาร ที่ให้แสงชนิดนี้ออกมา เรียกว่าฟลูอออร์ (Fluor) หรือซินทิลเลเตอร์ (Scintillator) เช่น ซินซ์ ซัลไฟด์ (Zinc sulfide) โซเดียมไอโอไดน์ (Sodium iodide) แอนทราซีน (Anthracene) สสารประกอบอินทรีย์และพลาสติกหลายชนิด เป็นต้น แสงที่เปล่งออกมา จากสารเหล่านี้มีความถี่ต่าง ๆ กัน ส่วนมากอยู่ในบริเวณน้ำเงิน หรือม่วง โฟตอนที่เกิดขึ้น ในซินทิลเลเตอร์ หรือสารประเภทฟลูอออร์ เมื่อมีรังสีผ่านจะผ่านไปยังหลอดโฟโตมัลติ- พลาย (Photomultiplier tube) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะประเภทโฟโตเซนซิติ (Photosensivity) กล่าวคือ มีเวอค ฟังก์ชัน (Work function) ต่ำ เรียกว่าโฟโตแคโทด (Photocathode) และเมื่อมีโฟตอนมากระทบจะเกิดโฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟกต์ ทำให้ อิเล็กตรอนหลุดออกจากแผ่นโลหะนั้น อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเพียง 1 ตัว/โฟตอนจะถูกเร่ง ด้วยสนามไฟฟ้าจากความต่างศักย์ประมาณ 100 โวลต์ ให้เคลื่อนที่ต่อไปชนแผ่นโลหะแผ่น ต่อไป เรียกว่าไดโนด (Dynode) และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาประมาณ 4-5 ตัว อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งต่อไปยังไดโนด แผ่นที่ 2 ด้วยความต่างศักย์เดียวกัน ประมาณ 100 โวลต์ อิเล็กตรอนที่ชนไดโนดแต่ละตัวจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอื่นหลุดออกมา 4-5 ตัวเสมอ เนื่องจากไดโนดมีประมาณ 10-15 แผ่น ดังนั้นจากโฟตอนเดิมเพียง 1 ตัว ทำให้เกิด อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็นจำนวนมาก เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าวิ่งเข้าสู่คอลเลคเตอร์ (Collector) ของหลอด กระแสนี้มีขนาดมากพอที่จะวัดได้โดยง่าย ดังรูปประกอบที่ 2.19 หัววัดซินทิลเลชันสามารถวัดได้ทั้งจำนวนและพลังงานของรังสีที่วิ่งมากระทบซึ่งใช้ งานได้ก็มาก สำหรับผังวงจรของระบบหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง รูปประกอบที่ 2.20



รูปที่ 2.19 แสดงภาพภายในของหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง



รูปที่ 2.20 แสดงผังวงจรของหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง

2.4.2 ปริมาณรังสีที่วัดได้โดยหัววัดรังสี (Scattered gamma rays)

ปริมาณรังสีแกมมาที่สะท้อนออกจากสารที่จะวัดความหนาแน่นสามารถวัดได้โดยใช้หัววัดรังสีชนิดไกเกอร์ และหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง ซึ่งมีผังวงจรของระบบหัววัดรังสี ดังรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.20 ปริมาณรังสีสะท้อนที่วัดได้อ่านค่าจากเครื่องวัดรังสีเป็น cpm ดังนั้น จากสมการ (2.20) จะเขียนสมการสอดคล้องได้ใหม่เป็น

$$(cpm)_f = (cpm)_i \cdot e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)(\rho x)} \quad \text{----- (2.29)}$$

เมื่อ

- $(cpm)_f$ = ปริมาณรังสีแกมมาที่สะท้อนออกมาจากสาร ที่จะวัดค่าความหนาแน่น
- $(cpm)_i$ = ปริมาณรังสีแกมมาที่ออกจากต้นกำเนิดรังสี และวิ่งเข้าไปในสารที่จะวัดความหนาแน่น
- $\frac{\mu}{\rho}$ = ค่าแมสแอทเทนนูเอชัน โคอэффициเซียน ของสารที่จะวัดความหนาแน่น
- x = ระยะทางที่รังสีแกมมาวิ่งผ่าน
- ρ = ค่าความหนาแน่นของสาร

สมการที่ (2.29) สามารถนำไปใช้คำนวณปริมาณรังสีที่สะท้อนออกมาจากสารที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เท่านั้น สำหรับสารที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันประกอบด้วยธาตุหลายชนิด (Heterogeneous) สมการที่ใช้คำนวณปริมาณรังสีสะท้อน ยังใช้เหมือนกันกับสมการที่ (2.29) ต่างกันที่ค่าแมสแอทเทนนูเอชัน โคอэффициเซียน ต้องนำจากสมการ (2.17) มาใช้แทน กล่าวคือ

$$(cpm)_f = (cpm)_i e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)(\rho x)}$$

เมื่อ

$$\frac{\mu}{\rho} = 0.01 \left[w_1 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1 + w_2 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2 + \dots + w_n \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_n \right] \quad \text{----- (2.30)}$$

เมื่อ w_1, w_2, \dots, w_n คือจำนวนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุที่ประกอบอยู่ในสารที่จะวัดความหนาแน่นโดยที่

$$\rho = \text{ความหนาแน่นรวมของสาร}$$

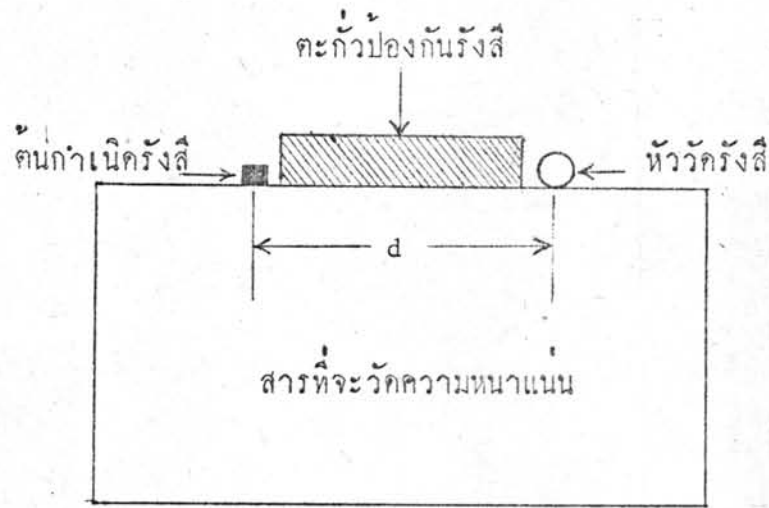
ในทางปฏิบัติ การวัดปริมาณรังสีสะท้อนจากสารที่จะวัดความหนาแน่น แล้วนำไปแทนค่าในสมการ (2.29) และสมการ (2.30) เพื่อคำนวณค่าความหนาแน่นจะเสียเวลามาก และยังมีปัญหาที่จะต้องทราบค่าแมสแอทเทนชูน์ของสารทุกชนิดที่จะวัดความหนาแน่นด้วย จึงมีอีกวิธีหนึ่งที่จะวัดความหนาแน่นของสารโดยการสร้างรูปเปรียบเทียบ (Calibration curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของสาร และปริมาณรังสีที่สะท้อนจากสาร ซึ่งวัดโดยหัววัดรังสีเพื่อใช้วัดความหนาแน่นของสารใด ๆ ใดที่เห็นอย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องคำนวณค่าจากสมการ (2.29) หรือสมการ (2.30) การสร้างรูปเปรียบเทียบนี้มีวิธีการเตรียมการเป็นลำดับ ดังนี้

1) การจักระยะทางระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี

เป็นการเลือกตำแหน่งเหมาะสมที่หัววัดรังสี จะวัดปริมาณรังสีที่สะท้อนจากต้นกำเนิดรังสีได้มากที่สุด โดยใช้วิธีไทรอัล แอนด์ เออเรอร์ (Trial and error) ดังรูปที่ 2.21 ให้ d เป็นระยะทางระหว่างต้นกำเนิดรังสี และหัววัดรังสี ซึ่งวางอยู่บนสารที่จะวัดความหนาแน่น โดยการเลื่อนหัววัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสี แล้ววัดปริมาณรังสีสะท้อน (cpm) ที่แต่ละตำแหน่งก็จะได้ระยะทางที่เหมาะสมที่สุด สำหรับหัววัดรังสีที่จะวัดปริมาณรังสีได้มากที่สุด ในการวัดปริมาณรังสีที่ตำแหน่งให้ระวางรังสีแกมมาที่จะวิ่งทะลุโดยตรง (Directed Transmission) จากต้นกำเนิดรังสีไปยังหัววัดรังสีด้วย

2) ความหนาแน่นสูงสุดของสารที่จะนำมาวัดความหนาแน่น

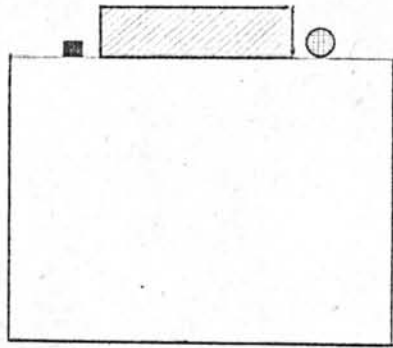
(Saturation Thickness) สารที่จะนำมาวัดค่าความหนาแน่น จะต้องทราบค่าความหนาแน่นสูงสุด หรือความจุที่เหมาะสมของภาชนะที่จะบรรจุสารเสียก่อน สารที่มีความหนาแน่นสูงสุดหรือสารที่บรรจุในภาชนะที่มีความจุพอเหมาะ จะสามารถสะท้อนรังสีซึ่งวัดโดยหัววัดรังสีได้ค่าใกล้เคียงกัน ในทางทฤษฎีการหาความหนาแน่นพอเหมาะนี้จะทำได้โดยสร้างภาชนะที่มีความจุต่างกันโดยความจุของภาชนะที่เพิ่มขึ้น เพิ่มขึ้นทางด้านหนาของวัตถุ กล่าวคือพื้นที่หน้าตัดคงที่



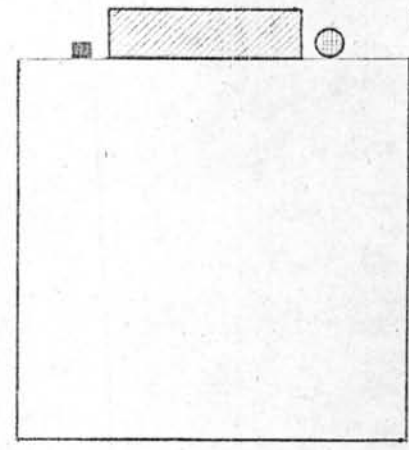
รูปที่ 2.21 แสดงการหาระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเน็กรังสี และหัววัดรังสี

แต่ความหนาเปลี่ยน ดังรูปที่ 2.22 และความจริงของภาชนะที่สร้างขึ้นนี้ควรสร้างอย่างน้อยที่สุด 5 ความจุ

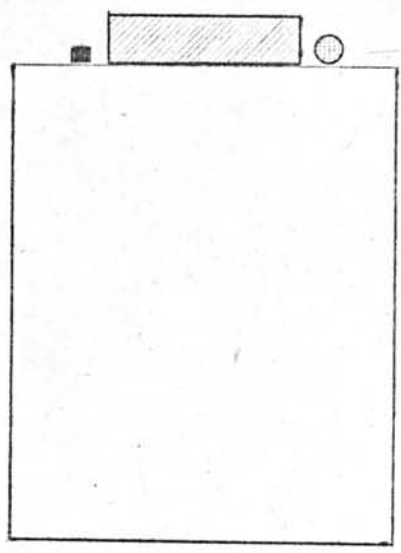
แต่ในทางปฏิบัติลักษณะการจัดเครื่องมือเพื่อหาความหนาพอเหมาะของสาร จะทำได้โดยการสร้างภาชนะใหม่พื้นที่หน้าตัดของภาชนะเปลี่ยนค่าไปตามความหนาของภาชนะ ดังรูปที่ 2.23 แล้วนำไปวัดปริมาณรังสีที่สะท้อนจากสารแสดงดังรูปที่ 2.24 เนื่องจากภาชนะที่มีความจุพอเหมาะ สำหรับสารที่จะนำมาวัดความหนาแน่น คือ ภาชนะบรรจุสารที่มีความจุน้อยที่สุด ซึ่งให้ปริมาณรังสีสะท้อนมีค่าใกล้เคียงกันโดยไม่ว่าจะเพิ่มความหนาอีกเท่าไร ปริมาณรังสีสะท้อนจะวัดได้ค่าคงเดิม ยกเว้นสารที่มีค่าออตอมมิกนัมเบอร์มาก ๆ สารแต่ละชนิดที่นำมาวัดความหนาแน่นอาจจะมีค่าความหนาสูงสุดสำหรับวัดปริมาณรังสีสะท้อนเท่ากัน หรือต่างกันก็ได้ขึ้นกับชนิดของธาตุที่ประกอบภายในสาร จากการพิจารณาปริมาณรังสี ที่สะท้อนจากสารซึ่งบรรจุในภาชนะแต่ละความจุจะกำหนดได้ว่าสารที่จะนำมาวัดความหนาแน่นแต่ละชนิด จะบรรจุในภาชนะที่มีความหนาสูงสุดเท่าไร



ก



ข



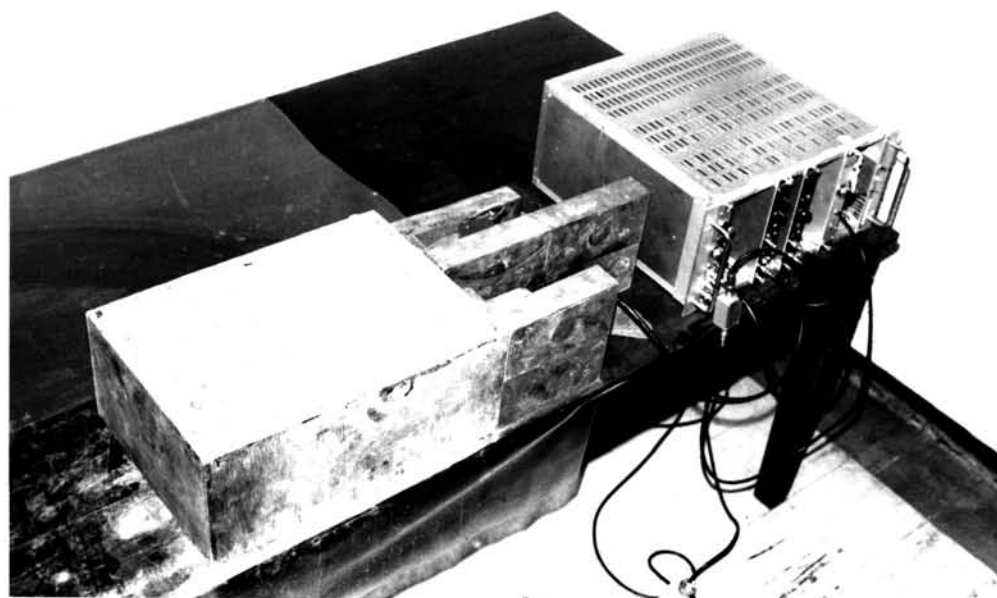
ค

- ต้นกำเนิดรังสี
- หัววัดรังสี
- ▨ ตะกั่วป้องกันรังสี
- สารที่จะวัดความหนาแน่นบรรจุในภาชนะที่มีความจุไม่เท่ากัน

รูปที่ 2.22 แสดงการหาค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมสำหรับสารที่จะนำมาวัดค่าความหนาแน่น



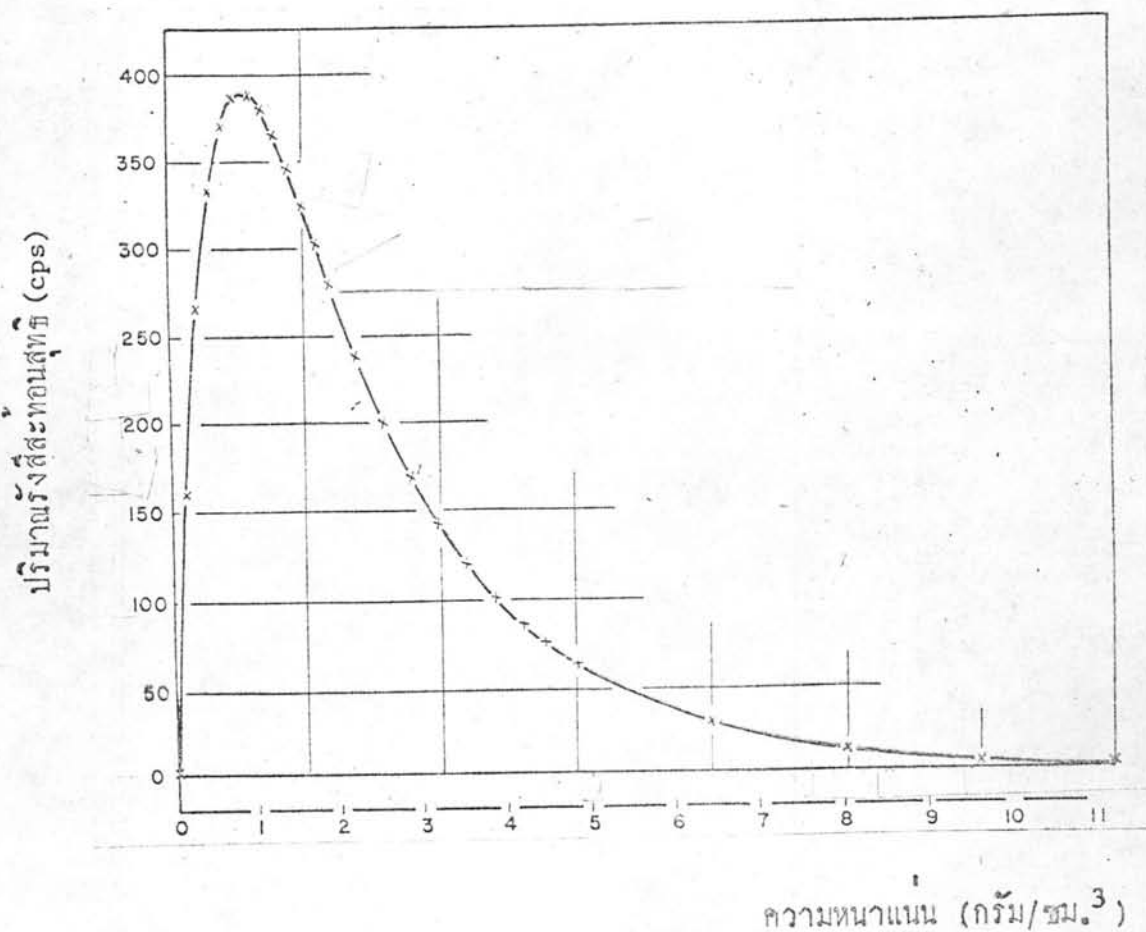
รูปที่ 2.23 ภาชนะที่ใช้สำหรับบรรจุสารเพื่อจะหาความหนาสูงสุด
ของสารที่จะนำมาวัดความหนาแน่น



รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะการจักเครื่องมือเพื่อวัดรังสีสะท้อนจากสาร
เพื่อหาความหนาพอเหมาะของสาร

3) การสร้างรูปเปรียบเทียบ (Calibration Curve)

นำสารแต่ละชนิดที่ทราบค่าความหนาแน่น บรรจุในภาชนะที่มีความจุพอเหมาะแล้ววัดปริมาณรังสีสะท้อน ค่าความหนาแน่นของสาร และปริมาณรังสีที่สะท้อนจากสาร สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ได้ ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และปริมาณรังสีสะท้อนจากสาร ที่วัดความหนาแน่น