บทที่ 3

หฤษฎีการดูดกลืนรังสีของวัสดุ

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ผ่านเข้าไปในวัสดุใดก็ตามจะทำให้อิเล็คตรอนภายในวัสดุนั้นเกิดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่นี้ขึ้นกับพลังงานของรังสี รังสีพลังงานต่ำ ๆ จะทำให้อิเล็คตรอนที่อยู่วงนอก ๆ เท่านั้นหลุดจากอะตอม ถ้าพลังงานสูงขึ้นโอกาสที่จะทำให้อิเล็คตรอนในวงในหลุดก็มีมากขึ้น โฟตอนพลังงานสูงมาก ๆ จะสามารถเข้าไปในนิวเคลียสได้ การชนให้อิเล็คตรอนหลุดนี้เกิดขึ้นได้ 3 วิธี ได้แก่ กระบวนการที่โฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจร(Photoelectric Process) กระบวนการคอมพ์ตัน (Compton Process) และการผลิตอิเล็คตรอนคู่(Pair Production) โดยวิธีการทั้ง 3 นี้ พลังงานของโฟตอนที่ทะลุผ่านออกมาจะลดน้อยลง จำนวนโฟตอนที่ทะลุออกมาก็ลดน้อยลง ฉะนั้นปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านออกมาจึงลดน้อยลงด้วย

3.1 การดูดกลืนแบบเลขยกกำลัง (Exponential Absorption)

จำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนอยู่ในวัสดุจะแปรโดยตรงกับความหนาและจำนวนโฟตอนทั้งหมด ฉะนั้นถ้า N เป็นจำนวนโฟตอนที่ผ่านเข้าไปในวัสดุ, ΔN เป็นจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนไว้ในวัสดุ และ ΔX เป็นความหนาของวัสดุ สามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าเหล่านี้ได้ดังนี้

$$\Delta N = -\mu N \Delta X \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ μ เป็นตัวคงที่ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามเส้น (Linear Absorption Coefficient) เครื่องหมายลบแสดงว่า เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นจำนวนโฟตอนในลำรังสีจะลดลง ถ้าเปลี่ยน ΔN เป็น dN และ ΔX เป็น dX แล้วโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$N = N_0 e^{-\mu X} \qquad (3\text{-}2)$$

เมื่อ N_0 เป็นจำนวนโฟตอนที่กระทบวัสดุ และ N เป็นจำนวนโฟตอนที่เหลืออยู่หลังจากลำกระแสโฟตอนเจาะเข้าไปในวัสดุเป็นระยะทาง X

ถ้าคิดจำนวนโฟตอนต่อหน่วยพื้นที่ผิวตั้งฉากกับลำกระแสโฟตอนต่อหน่วยเวลา จะแทนค่า N ในความสัมพันธ์นี้ด้วยค่า I ความเข้มของลำกระแสโฟตอน ทำให้ได้ความสัมพันธ์ใหม่

$$I = I_o e^{-\mu x} \qquad (3-3)$$

เมื่อ I_o เป็นความเข้มของลำรังสีที่กระทบผิววัสดุ และ I เป็นความเข้มที่ระยะ x ภายในวัสดุ

ถ้า x' เป็นความหนาของแผ่นวัสดุที่ขวางลำรังสีจากสมการ (3-3) จะได้

$$T = \frac{I'}{I_o} \times 100$$
$$= 100\, e^{-\mu x'} \qquad (3-3ก)$$

ค่า T มีชื่อเรียกว่า เปอร์เซนต์การทะลุผ่าน (Percent of Transmission) ของแผ่นวัสดุนั้น

ฉะนั้น การดูดกลืนรังสีจะอยู่ในลักษณะเลขยกกำลัง

ถ้า $x_{\frac{1}{2}}$ เป็นความหนาที่สามารถลดปริมาณรังสีลงเหลือเพียงครึ่งเดียว เราเรียกความหนา $x_{\frac{1}{2}}$ นี้ว่า ความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า H.V.L. ฉะนั้น

$$H.V.L. = \frac{0.693}{\mu} = x_{\frac{1}{2}} \qquad (3-4)$$

3.2 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามมวล อะตอม และอิเล็คตรอน (Mass, Atomic , Electronic Absorption Coefficient)

ค่า μ ดังกล่าวในข้อ 3.1 นั้นเป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่อหน่วยความยาวซึ่งนิยมใช้ต่อเซนติเมตร หรือ ซม.$^{-1}$ ตัวเลขนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ ในบางกรณี ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่อหน่วยมวลจะมีประโยชน์มากกว่า

C00133

$$I = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho}(\rho x)} = I_0 e^{-\mu_\rho m} \qquad (3\text{-}5)$$

เมื่อ m เป็นมวลของวัสดุต่อหน่วยระยะทางที่ลำรังสีผ่าน และ $\frac{\mu}{\rho} = \mu_\rho$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามมวล มีหน่วยเป็น ซม.^{2}/กรัม เมื่อ ρ คือค่าความหนาแน่นของวัสดุในหน่วย กรัม/ซม.^{3}

เนื่องจากการดูดกลืนขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมและอิเล็คตรอนของวัสดุ จึงอาจหาค่าสัมประสิทธิ์ให้มีส่วนสัมพันธ์กับจำนวนอะตอมและอิเล็คตรอนได้โดยทำนองเดียวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามมวลดังต่อไปนี้ ถ้าให้ N เป็นตัวเลขอะโวกาโดร (Avogadro Number), A เป็นน้ำหนักอะตอม และ Z เป็นตัวเลขอะตอม (Atomic Number) ในหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตรมีจำนวน $\frac{N}{A}\rho$ อะตอม และ $\frac{N}{A}\rho Z$ อิเล็คตรอน

ฉะนั้นการดูดกลืนตามเส้น	=	μ	ซม.$^{-1}$
การดูดกลืนตามมวล	=	$\frac{\mu}{\rho}$	ซม.^{2} กรัม$^{-1}$
การดูดกลืนตามอะตอม	=	$\frac{\mu}{\rho}\frac{A}{N}$	ซม.^{2} อะตอม$^{-1}$
การดูดกลืนตามอิเล็คตรอน	=	$\frac{\mu}{\rho}\frac{A}{N}Z$	ซม.^{2} อิเล็คตรอน$^{-1}$

กระบวนการดูดกลืนรังสี

3.3 การดูดกลืนรังสีแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจร (Photoelectric Process)

การดูดกลืนแบบนี้เกิดขึ้นโดยการที่โฟตอนที่มีพลังงานไม่สูงนักวิ่งไปชนอิเล็คตรอนในอะตอมให้หลุดจากอะตอม โดยคายพลังงานทั้งหมดให้อิเล็คตรอนตัวนั้น อิเล็คตรอนที่หลุดจากวงโคจรนี้เรียกว่า โฟโตอิเล็คตรอน (Photoelectron) ซึ่งจะมีพลังงานจลน์เท่ากับ

$$T = h\nu - \phi \qquad (3\text{-}6)$$

เมื่อ T เป็นพลังงานของโฟโตอิเล็คตรอน $h\nu$ เป็นพลังงานของโฟตอนที่มาชน และ ϕ เป็นพลังงานยึดอิเล็คตรอน (Binding Energy) หรือพลังงานที่ต้องใช้ไปในการทำให้อิเล็คตรอนหลุดเป็นอิเล็คตรอนอิสระในวัสดุ การชนแบบนี้จะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงกว่าϕ สำหรับอะตอมโดด ถ้าโฟตอนมีพลังงานต่ำ จะทำให้อิเล็คตรอนในวงนอก ๆ เท่านั้นหลุดได้ ส่วนอิเล็คตรอนในวงโคจรเค (K-Shell) และวงโคจรแอล (L-Shell) ซึ่งเป็นวงในสุดและรองในสุด ต้องใช้พลังงานสูงจึงจะทำให้หลุดได้

หลังจาก โฟโตอิเล็คตรอนหลุดจากวงใน ๆ อิเล็คตรอนในวงนอก ๆ จะ กระโดดเข้ามาแทนที่ โดยคายพลังงานในรูปรังสี ในลักษณะรังสีความถี่เฉพาะ (Characteristic Radiation) หรือเรียกว่า รังสีทุติยภูมิ (Secondary Radiation) ปฏิกริยารวมมีผลเสมือนกับว่าพลังงานของโฟตอนทั้งหมดไม่ได้ถูกดูดกลืนอยู่ในวัสดุ เพราะมีโฟตอนซึ่งเป็นรังสีทุติยภูมิทะลุผ่านออกมา รังสีทุติยภูมินี้มีพลังงานเท่ากับพลังงานยึดอิเล็คตรอนของโฟโตอิเล็คตรอนซึ่งขึ้นอยู่กับตัวเลขอะตอม เช่น ทังสเตนมีพลังงานยึดอิเล็คตรอนในวงโคจรเค 70,000 อิเล็คตรอนโวลต์ โฟตอนที่เป็นรังสีทุติยภูมิก็จะมีพลังงานจำนวนนี้เช่นกัน ซึ่งสูงพอที่จะทะลุผ่านทังสเตนออกมาได้ ส่วนสารที่มีพลังงานยึดอิเล็คตรอนเพียง 500 อิเล็คตรอนโวลต์ รังสีทุติยภูมิจะมีพลังงานต่ำ ไม่สามารถทะลุผ่านเนื้อสารออกมาได้ จึงถือว่าพลังงานทั้งหมดถูกดูดกลืนไว้ หรือเป็นการดูดกลืนที่แท้จริง ซึ่งได้แก่ เนื้อเยื่อ (Tissue) ซึ่งประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่

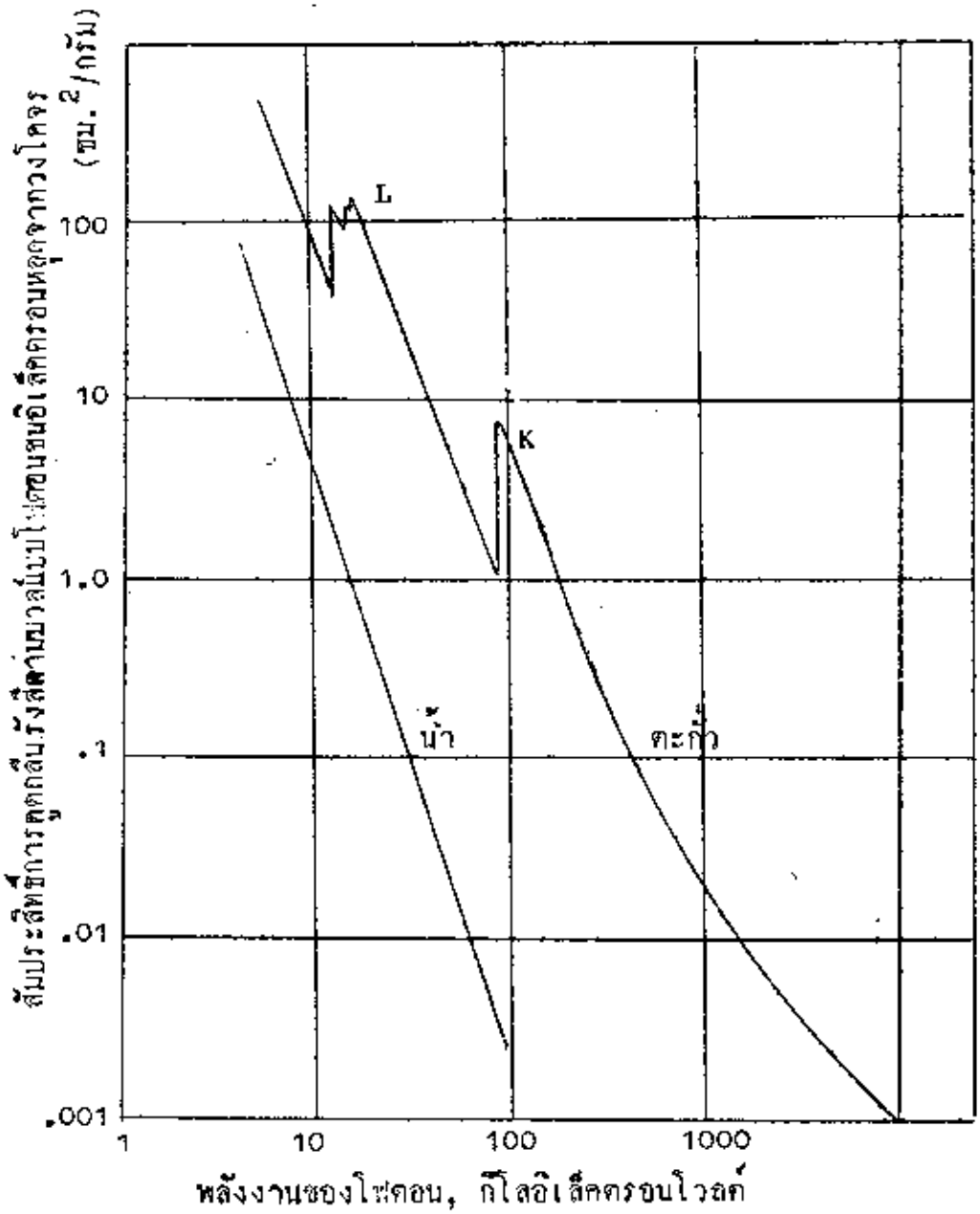
การเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนรังสีแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจร อาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. การเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนรังสีแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจร เมื่อเทียบกับพลังงาน

รูปที่ 3-1[1] แสดงลักษณะสัมประสิทธิ์ความยาวของการดูดกลืนแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจาก

---

[1] Harold Elford Johns, The Physics of Radiology Charles C Thomas Illinois. 1964 , หน้า 49



รูปที่ 3–1 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีตามมวลโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจรของน้ำ และตะกั่วที่ค่าพลังงานต่าง ๆ กันของโฟตอน

วงโคจร (τ/ρ) เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่าง ๆ กัน, τ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามเส้นเนื่องจากกระบวนการดูดกลืนรังสีแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจร เมื่อเปรียบเทียมระหว่างน้ำซึ่งมีตัวเลขอะตอมต่ำและตะกั่วซึ่งมีตัวเลขอะตอมสูง จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของน้ำมีค่าสูงถึง 4.35 ซม.^{2}/ กรัม ที่ 10 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์ ที่ 60 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์มีค่าเพียง 0.013 ซม.^{2}/กรัม และที่ 100 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์มีค่าน้อยมากจนตัดทิ้งได้ แสดงว่า เมื่อค่าพลังงานของโฟตอนสูงขึ้น สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าพิจารณาพลังงานที่ 10 และ 20 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์ ค่าสัมประสิทธิ์ลดลงจาก 4.35 เป็น 0.475 ซม.^{2}/กรัม หรือประมาณ 9 เท่า ซึ่งแสดงผลใกล้เคียงกับทฤษฎี[2]ที่กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงนี้แปรผกผันกับกำลังสามของพลังงาน เส้นกราฟที่แสดงการดูดกลืนรังสีของน้ำเป็นเส้นตรงบนสเกลล็อกทั้งสองแกน (Log-Log Scale) แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับ $\frac{1}{E^n}$ เมื่อ E เป็นพลังงานของโฟตอน และ n เป็นความเอียง (Slope) ของเส้น ในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 3

กราฟแสดงการดูดกลืนรังสีของตะกั่วซับซ้อนกว่า เพราะตะกั่วมีค่าตัวเลขอะตอมสูง การดูดกลืนของรังสีตะกั่วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 88 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์ เนื่องจากการชนของโฟตอนที่พลังงานนี้ไปทำให้อิเล็คตรอนวงที่-เคหลุดออกไป หลังจากนี้การดูดกลืนรังสีลดลงทันทีได้เป็นกราฟรูปฟันเลื่อย ในทำนองเดียวกันที่ 13– 15 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์ก็ทำให้อิเล็คตรอนวงที่แอลหลุดออกไปได้ฟันเลื่อยอีกชุดหนึ่ง จากตำแหน่งฟันเลื่อยหรือ Absorption Edge นี้ แสดงให้เห็นว่า การดูดกลืนรังสีแบบนี้จะเกิดมากที่สุดเมื่อโฟตอนมีพลังงานเท่ากับพลังงานยึดอิเล็กตรอนของวงนั้น ๆ ความเอียงของเส้นกราฟของตะกั่วมีค่าประมาณ 3 เช่นกัน จึงสรุปได้ว่า การดูดกลืนรังสีแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจรจะแปรผกผันกับกำลังสามของพลังงาน

2. การเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนรังสีแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจรกับตัวเลขอะตอม

จากรูปที่ 3–1 แสดงให้เห็นว่าการดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่งเหนือพลังงานฟันเลื่อย

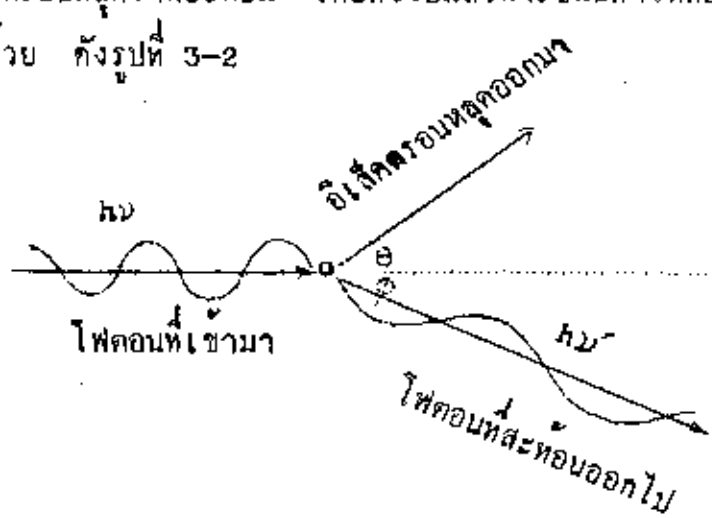
---

[2] ดูแหล่งที่แล้ว, หน้า 150

(Absorption Edge) ของอิเล็คตรอนชั้นที่เคของตะกั่วเทียบกับของน้ำ มีค่าเป็น 1300 เท่าของน้ำ ถ้ามาพิจารณาตัวเลขอะตอมของตะกั่วคือ 82 และตัวเลขอะตอมเฉลี่ยของน้ำคือ 7.42 อัตราส่วนของกำลังสามของเลขจำนวนนี้ เป็น 1221:1 สรุปได้ว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีจะแปรโดยตรงกับกำลังสามของตัวเลขอะตอม

3.4 การดูดกลืนรังสีแบบคอมพ์ตัน (Compton Process)

คอมพ์ตันพบว่าการชนของโฟตอนกับอิเล็คตรอนมีได้อีกแบบหนึ่ง คือเมื่อโฟตอนชนอิเล็คตรอนในวงนอก ๆ นั้น จะไม่คายพลังงานทั้งหมดให้แต่จะเสียพลังงานไปบางส่วนเท่านั้น ทำให้อิเล็คตรอนหลุดจากอะตอม โดยทั่วไปแล้วการชนนี้ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูปที่ 3–2



รูปที่ 3–2 แสดงการชนของโฟตอนและอิเล็คตรอนแบบคอมพ์ตัน

การชนแบบคอมพ์ตันนี้จะเกิดมากกับอิเล็คตรอนที่อยู่วงนอก ๆ ถ้าโฟตอนมีพลังงาน $h\nu$ มุมที่สะท้อนโฟตอนออกไปหลังจากชนกับอิเล็คตรอนแล้วมีค่าเป็น ϕ เมื่อเทียบกับทิศทางการเคลื่อนที่เดิม ถ้า θ เป็นมุมที่อิเล็คตรอนหลุดออกเทียบกับทิศทางเดิมของโฟตอน โฟตอนที่สะท้อนออกมามีพลังงานเหลือเพียง $h\nu'$ เราเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$h\nu = h\nu' + E \qquad (3\text{-}7)$$

เมื่อ E เป็นพลังงานของอิเล็คตรอนที่หลุดออกไปมีค่าเท่ากับ $mc^2 - m_0c^2$ โดยที่ m เป็นมวลขณะวิ่ง และ m_0 เป็นมวลขณะหยุดนิ่งของอิเล็คตรอน c เป็นความเร็วของแสง เนื่องจากโมเมนตัมและพลังงานก่อนและหลังการชนต้องเท่ากัน จึงได้ว่า

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c}\cos\phi + \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\cos\theta \qquad (3\text{-}8)$$

$$0 = \frac{h\nu'}{c}\sin\phi - \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\sin\theta \qquad (3\text{-}9)$$

$$h\nu = h\nu' + m_0c^2\left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right] \qquad (3\text{-}10)$$

จากสมการ (3-8), (3-9) และ (3-10) จะได้ว่า

$$h\nu' = h\nu\left\{\frac{1}{1+\alpha(1-\cos\phi)}\right\} \qquad (3\text{-}11)$$

และ $$E = \frac{h\nu\alpha(1-\cos\phi)}{1+\alpha(1-\cos\phi)} \qquad (3\text{-}12)$$

เมื่อ $$\alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2} = \frac{h\nu}{0.511}$$ ล้านอิเล็คตรอนโวลต์

จะเห็นว่า ถ้ามุม ϕ มีค่า 180° คือโฟตอนสะท้อนกลับในทิศทางเดิม อิเล็กตรอนจะรับพลังงานสูงที่สุดที่เรียกว่า E_{max} และโฟตอนที่สะท้อนกลับมีพลังงานต่ำที่สุดคือ $h\nu'_{min}$.

$$E_{max.} = \frac{h\nu\, 2\alpha}{1+2\alpha} \qquad (3\text{-}13)$$

$$h\nu'_{min} = \frac{h\nu\, 1}{1+2\alpha} \qquad (3\text{-}14)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าโฟตอนวิ่งไปชนแบบเฉียด ๆ กับอิเล็คตรอน อิเล็กตรอนหลุดออกมาทำมุม $\theta = 90^{\circ}$ และโฟตอนวิ่งต่อไปโดยไม่เปลี่ยนทิศทาง $\phi = 0$ ในกรณีนี้ $E = 0$ และ $h\nu = h\nu'$ คืออิเล็คตรอนไม่ได้รับพลังงานจากโฟตอนเลย

การชนแบบคอมพ์ตันนี้จึงมีทั้งการดูดกลืนที่แท้จริง คือ พลังงานส่วนที่สูญเสียให้กับอิเล็คตรอน และส่วนที่สะท้อน คือ โฟตอนที่สะท้อนออกมา ดังนั้น สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบคอมพ์ตันจึงแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนและสัมประสิทธิ์การกระจาย

1. สัมประสิทธิ์การกระจายแบบคอมพ์ตัน (Scattering Coeffient)

Klein และ Nishina [3] ได้คำนวณและให้สูตรว่า จำนวนโฟตอนที่สะท้อนออกมาด้วยมุม 1 หน่วยมุมตัน (Solid Angle) เขียนได้เป็น

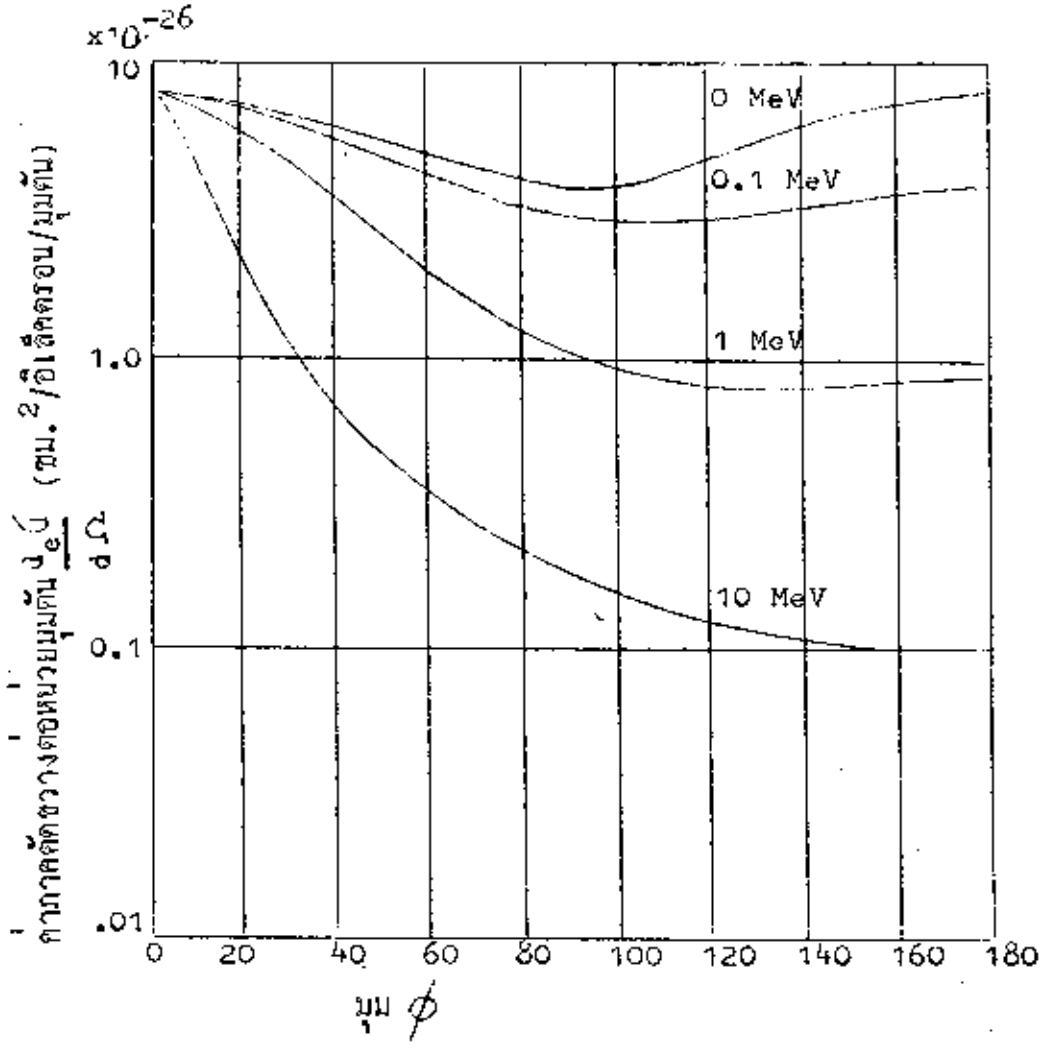
$$\frac{d_e\sigma}{d\Omega} = \frac{e^4}{2m_o c^4}(1+\cos^2\phi)\left\{\frac{1}{1+\alpha(1-\cos\phi)}\right\}^2\left\{1+\frac{\alpha^2(1-\cos\phi)^2}{1+\alpha(1-\cos\phi)(1+\cos^2\phi)}\right\} \qquad (3\text{-}15)$$

เมื่อ $_e\sigma$ เป็นค่ามาตรฐานของอิเล็คตรอนหรือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามอิเล็คตรอน ตัวอักษรย่ออื่น ๆ มีความหมายเหมือนเดิม

รูปที่ 3-3 เป็นกราฟของสมการ (3-15) ที่ค่า ϕ ต่าง ๆ โดยให้พลังงานของโฟตอนเป็น 0, 0.1 1.0 และ 10 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ ๆ เช่นที่ 0 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ มุมที่โฟตอนสะท้อนออกมาโดยมีค่า $\frac{d_e\sigma}{d\Omega}$ น้อยที่สุดได้แก่มุม 90° ใกล้

---

[3] ดูแหล่งที่แล้ว หน้า 172



รูปที่ 3-3 ค่าภาคตัดขวางต่อหน่วยมุมตัน $\frac{d\sigma_e}{d\Omega}$ ที่มุม ϕ ต่าง ๆ ของโฟตอนที่ตกกระทบด้วยพลังงาน 0, 0.1, 1 และ 10 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์

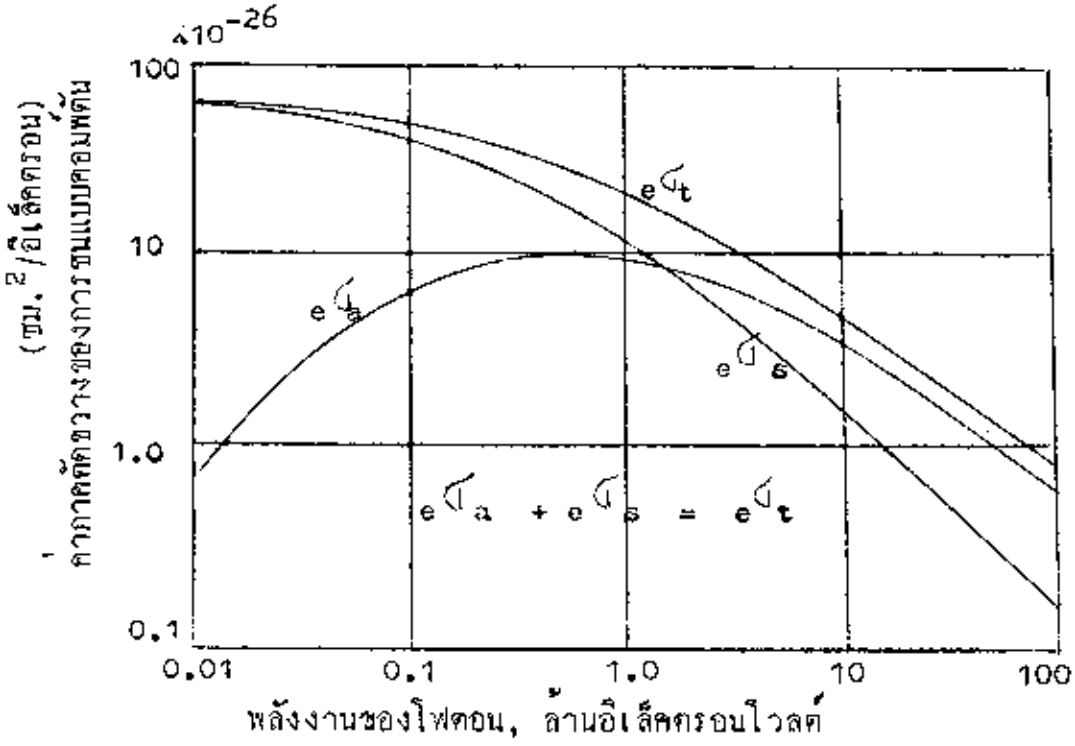
2.สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวมแบบคอมพ์ตัน (Total Compton Absorption Coefficient

เนื่องจากการดูดกลืนแบบคอมพ์ตันมีทั้งส่วนที่ดูดกลืนและสะท้อนดังกล่าวมาแล้ว ฉะนั้น ถ้าให้ $_e\sigma_a$ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่เหนี่ยวนำตามอิเล็คตรอน และ $_e\sigma_s$ เป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตามอิเล็คตรอน สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวมตามอิเล็คตรอนแบบคอมพ์ตัน $_e\sigma_t$ เขียนได้เป็น

$$_e\sigma_t = {}_e\sigma_a + {}_e\sigma_s \qquad (3\text{-}16)$$

ในกรณีที่โฟตอนมีพลังงานน้อย ๆ $_e\sigma_t$ มีค่าเกือบเท่า $_e\sigma_s$ และในกรณีโฟตอนมีพลังงาน

สูงมาก ๆ $_{e}\sigma_{t}$ มีค่าใกล้เคียง $_{e}\sigma_{a}$ ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3–4



รูปที่ 3–4 ค่า $_{e}\sigma_{a}$, $_{e}\sigma_{s}$ และ $_{e}\sigma_{t}$ ที่ค่าพลังงานต่าง ๆ ของโฟตอน

3. การเปลี่ยนแปลงผลของการชนแบบคอมพ์ตันกับค่าตัวเลขอะตอม

เนื่องจากกระบวนการชนแบบคอมพ์ตันเกิดขึ้นกับอิเล็คตรอนในวงนอก ๆ ซึ่งมีค่าพลังงานยึดอิเล็คตรอนน้อยมาก เมื่อเทียบกับพลังงานของโฟตอน จึงไม่ขึ้นกับค่า Z วัสดุทุกชนิดมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบคอมพ์ตันตามอิเล็คตรอนเท่า ๆ กัน และเนื่องจากจำนวนอิเล็คตรอนต่อกรัมของวัสดุทุกชนิดมีเกือบเท่ากัน การดูดกลืนตามมวลจึงมีค่าใกล้เคียงกันด้วย

เราอาจสรุปได้ว่า การดูดกลืนแบบคอมพ์ตันเกี่ยวข้องกับอิเล็คตรอนอิสระ จะลดลงเมื่อ

---

[4] Gerald J. Hine Rudiation Dosimetry Academic Press Inc. New York 1956. , หน้า 66

พลังงานของโฟตอนมากขึ้น การชนแบบนี้มีทั้งส่วนที่ดูดกลืนและสะท้อน โดยเฉลี่ยแล้วพลังงานที่ถูกดูดกลืนจะมากเมื่อโฟตอนมีพลังงานมากเช่นกัน

3.5 การดูดกลืนรังสีแบบผลิตอิเล็คตรอนคู่ (Pair Production)

โฟตอนที่มีพลังงานสูงมาก ๆ โอกาสที่จะเข้าไปใกล้กับนิวเคลียสย่อมมีมากขึ้น เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานสูงเกินกว่า 1.02 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ ผ่านเข้าไปใกล้นิวเคลียสในบริเวณที่สนามแรงของนิวเคลียสส่งไปถึง โฟตอนตัวนั้นจะสลายไป เกิดโพซิตรอน (Positron) โพสิตรอนมีคุณสมบัติทุกอย่างเหมือนอิเล็คตรอนแต่มีประจุไฟฟ้าบวก การชนแบบนี้ เรียกว่า การผลิตอิเล็คตรอนคู่ (Pair Production) การที่พลังงานของโฟตอนต้องมากกว่า 1.02 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์เพราะพลังงานในขณะหยุดนิ่งของอิเล็คตรอน 1 ตัวมีค่า 0.51 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ ฉะนั้นการผลิตอิเล็คตรอนคู่จึงต้องการพลังงานมากกว่า 2 เท่า ของมวลของอิเล็คตรอนขณะหยุดนิ่ง ส่วนพลังงานที่เหลือนั้น อิเล็คตรอนและโพสิตรอนจะรับไปเป็นพลังงานจลน์ตัวละเท่า ๆ กัน เขียนความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานต่าง ๆ ได้ดังนี้

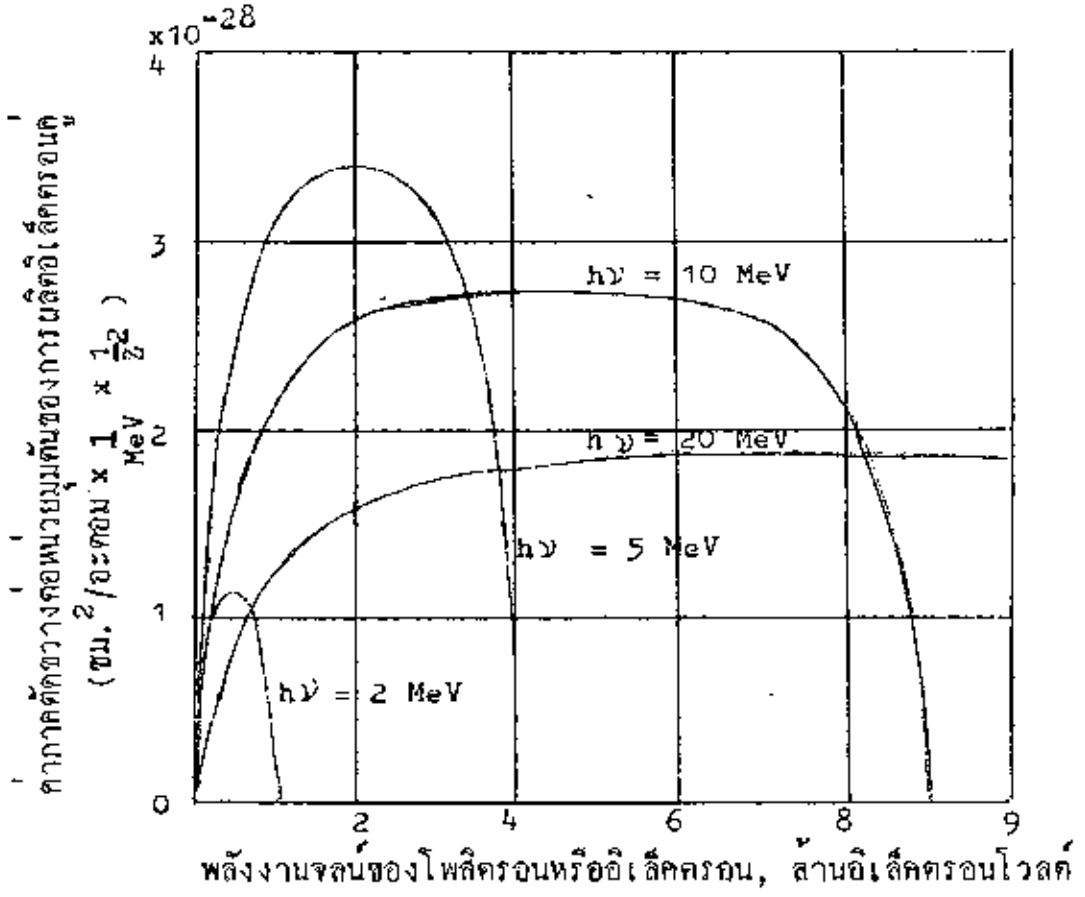
$$h\nu = 1.02 + E_+ + E_- \qquad (3\text{-}17)$$

เมื่อ E_+ และ E_- เป็นพลังงานจลน์ที่โพสิตรอนและอิเล็คตรอนได้ไปเท่า ๆ กัน

รูปที่ 3-5[5] แสดงค่าภาคตัดขวางต่อมุมตันของการผลิตอิเล็คตรอนคู่ แกนดิ่งเป็นแกนค่าภาคตัดขวางต่อล้านอิเล็คตรอนโวลต์ต่ออะตอมหารด้วย Z^2 แกนระนาบเป็นค่าพลังงานจลน์ของอิเล็คตรอนหรือโพสิตรอนที่เกิดขึ้น จะเห็นว่าเส้นโค้งมีลักษณะสมนัยกัน (Symmetry) เมื่อคิดจากตำแหน่งที่มีพลังงานประมาณ $(h\nu - 1.02)/2$ ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ กราฟของเส้นของโฟตอนที่มีพลังงานน้อย ๆ มีลักษณะเป็นยอดสูง และค่อย ๆ กว้างขึ้นเมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มขึ้น แสดงว่าจำนวนอิเล็คตรอนที่เกิดและมีพลังงานในช่วงต่าง ๆ มีมากขึ้น

---

[5] ดูแหล่งที่แล้ว หน้า 72



รูปที่ 3–5 พลังงานจลน์ของอิเล็คตรอนหรือโพสิตรอนที่ได้รับ ขณะผลิตอิเล็คตรอนคู่ เมื่อโฟตอนมีพลังงาน 2,5,10 และ20 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งจะเป็นสัมประสิทธิ์รวมของการผลิตอิเล็คตรอนคู่

ค่าภาคตัดขวางรวมของการผลิตอิเล็คตรอนคู่

เมื่อผลิตอิเล็คตรอนคู่แล้ว โพสิตรอนที่เกิดจะวิ่งไประหว่างอะตอมอื่น ๆ การวิ่งจะช้าลงทุกทีเพราะสูญเสียพลังงานไปให้กับอิเล็คตรอนตัวอื่น ๆ จนในที่สุด เมื่อมีพลังงานน้อยมากจนเกือบมีค่าเท่ากับศูนย์จะรวมกับอิเล็คตรอนอิสระตัวที่อยู่ใกล้ที่สุด แล้วสลายไปเกิดเป็นโฟตอนสองตัวมีพลังงานตัวละ 0.51 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ เรียกว่าการสลายของโพสิตรอน (Positron Annihilation) โฟตอนทั้งสองจะวิ่งไปในทิศตรงกันข้าม จึงแบ่งสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีแบบผลิตอิเล็คตรอนออกไปเป็นสองส่วนคือ ส่วนหนึ่งเกี่ยวกับการเปลี่ยนโฟตอนไปเป็นมวล เป็นการดูดกลืนรังสีแบบผลิตอิเล็คตรอนคู่ อีกส่วนหนึ่งนั้นเกี่ยวกับการเกิดโฟตอน

หลังจากการสลายของโฟสิตรอน ถ้าให้ E เป็นพลังงานของโฟตอนที่ทำให้ผลิตอิเล็คตรอนคู่ พลังงานที่ถูกดูดกลืนไว้จะมีค่า E-1.02 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ อัตราส่วนพลังงานที่ถูกดูดกลืนไว้มีค่า $\frac{E-1.02}{E}$ ถ้า π_a เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานรังสีที่แท้จริงของการผลิตอิเล็คตรอนคู่ จะได้

$$\pi_a = \pi \left(\frac{E - 1.02}{E}\right) \qquad (3\text{-}18)$$

โดยที่ π เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวมแบบผลิตอิเล็คตรอนคู่

การผลิตอิเล็คตรอนคู่จะเพิ่มขึ้นช้า ๆ เมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มขึ้นจาก 1.02 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ ซึ่งการดูดกลืนแบบอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้วจะลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มขึ้น ฉะนั้นในช่วงที่โฟตอนมีพลังงานสูง ๆ การชนจะเป็นแบบผลิตอิเล็คตรอนคู่เสียเป็นส่วนใหญ่ ค่าภาคตัดขวางของการเกิดแบบนี้แปรเป็นปฏิภาคตรงกับค่าเลขอะตอมกำลังสอง[6]

3.6 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวม (Total Absorption Coefficient)

เมื่อลำรังสีผ่านเข้าไปในวัสดุ การชนแบบต่าง ๆ ทั้งสามดังกล่าวแล้วข้างต้นย่อมเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน แต่การชนของโฟตอนและอิเล็คตรอนแต่ละครั้งย่อมต้องเป็นแบบใดแบบหนึ่งแต่แบบเดียวเท่านั้น และจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ดังได้อธิบายมาแล้ว ฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวมตามเส้นของลำรังสีคือค่า μ จึงเป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนทั้ง 3 แนบดังนี้

$$\mu = \tau + \sigma + \pi \qquad (3\text{-}19)$$

เมื่อ τ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามเส้นของการชนแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจร, σ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามเส้นของการชนแบบคอมพ์ตันและ π เป็นสัมประสิทธิ์

---

[6] Johns แหล่งเดียวกับข้างต้น, หน้า 160

การดูดกลืนตามเส้นของการชนแบบผลิตอิเล็คตรอนคู่

และถ้าให้ μ_a เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวมที่แท้จริงอย่างเดียวไม่รวมที่สะท้อนออกมา

$$\mu_a = \sigma_a + \sigma_b + \pi_a \qquad (3\text{-}20)$$

ตารางที่ 3–1[7] แสดงการดูดกลืนรังสีในน้ำโดยแสดงจำนวนอิเล็คตรอนที่เกิดจากการชนทั้ง 3 แบบ ในรูปอัตราส่วนของการชนแต่ละแบบเทียบกับอิเล็คตรอนที่ถูกชนทั้งหมดจะเห็นว่าที่ 20 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์อิเล็คตรอนที่ถูกชนแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจรมีถึง 70% และที่เหลือเกิดจากการชนแบบคอมพ์ตัน ที่พลังงานประมาณ 26 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์การชนแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจรและคอมพ์ตันเกือบเท่า ๆ กัน ที่ 100 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์การชนเป็นแบบคอมพ์ตันถึง 99% จากพลังงาน 100 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์จนถึง 1 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ การชนเป็นแบบคอมพ์ตันอย่างเดียว เมื่อพลังงานสูงกว่านี้การชนแบบคอมพ์ตันจะลดลง ในขณะเดียวกันการชนแบบผลิตอิเล็คตรอนคู่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ที่ 24 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์การชนแบบคอมพ์ตันและผลิตอิเล็คตรอนคู่จะเท่า ๆ กัน และที่พลังงานสูงกว่านี้การชนส่วนใหญ่เกิดจากการผลิตอิเล็คตรอนคู่เท่านั้น

สำหรับวัสดุทั่ว ๆ ไป พอสรุปได้ว่าพลังงานของโฟตอนเมื่อชนกับอะตอมจะเกิดการชนแบบต่าง ๆ มากน้อยดังต่อไปนี้

0 ถึง 50 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์ การชนส่วนใหญ่เป็นแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจร

---

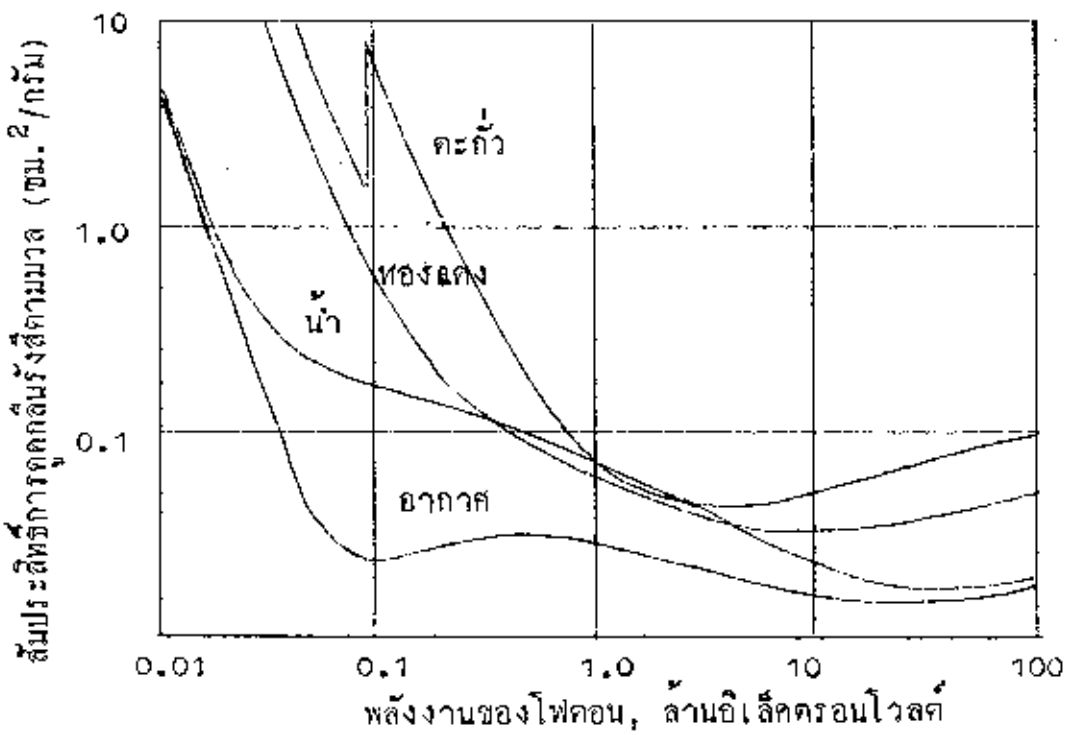
[7] ดูแหล่งที่แล้ว, หน้า 164

60 ถึง 90 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์ การชนมีทั้งแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจร และคอมพ์ตัน

200 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์ ถึง 2 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ การชนเป็นแบบคอมพ์ตันอย่างเดียว

5 ถึง 10 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ การชนเป็นแบบผลิตอิเล็คตรอนคู่เสียส่วนใหญ่

ตั้งแต่ 10 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ขึ้นไป การชนเป็นแบบผลิตอิเล็คตรอนคู่อย่างเดียว



รูปที่ 3-6 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามมวลที่ค่าพลังงานต่าง ๆ ของโฟตอนของ อากาศ น้ำ ทองแดงและตะกั่ว

รูปที่ 3-6[8] แสดงให้เห็นว่า ที่ค่าพลังงานต่ำ ๆ คือ ต่ำกว่า 0.1 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์

[8] ดูแหล่งที่แล้ว, หน้า 161

ตารางที่ 3–1

ความสำคัญสัมพัทธ์ของการดูดกลืนรังสีชนิดต่างๆแบบในน้ำ

พลังงานของโฟตอน	จำนวนสัมพัทธ์ของอิเล็คตรอน (%)		
	โฟโตอิเล็คตรอน $\frac{\tau\,(100)}{\tau+\sigma+\pi}$	คอมพ์ตัน $\frac{\sigma\,(100)}{\tau+\sigma+\pi}$	อิเล็คตรอนคู่ $\frac{\pi\,(100)}{\tau+\sigma+\pi}$
10 กิโลอิเล็คตรอนโวลต์	95	5	0
20 " "	70	30	0
26 " "	50	50	0
30 " "	39	61	0
40 " "	20	80	0
50 " "	11	89	0
57 " "	8	92	0
60 " "	7	93	0
80 " "	3	96	0
100 " "	1	99	0
150 " "	0	100	0
200 " "	0	100	0
400 " "	0	100	0
1 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์	0	100	0
2 " "	0	99	1
4 " "	0	94	6
6 " "	0	88	12
8 " "	0	83	17
10 " "	0	77	23
15 " "	0	65	35
20 " "	0	56	44
24 " "	0	50	50
50 " "	0	29	71
100 " "	0	16	84

วัสดุที่มีค่า Z สูงจะดูดกลืนได้ดีกว่าวัสดุที่มีค่า Z ต่ำมาก ทั้งนี้เพราะในช่วงพลังงานต่ำ ๆ เช่นนี้ การดูดกลืนรังสีเป็นแบบโฟตอนชนอิเล็คตรอนหลุดจากวงโคจรเสียส่วนใหญ่ ซึ่งการดูดกลืนรังสีตามมวลขึ้นอยู่กับค่า Z^3 ดังกล่าวมาแล้วในข้อ 3.3 ถ้าโฟตอนมีพลังงานสูงมากขึ้นคือจาก 0.1 ถึง 10 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีตามมวลของวัสดุทั้งสี่จะแตกต่างกันน้อยลงทุกทีจนกระทั่งเกือบเท่ากัน อธิบายได้ว่าเป็นเพราะการดูดกลืนรังสีส่วนใหญ่เป็นแบบคอมพ์ตันซึ่งไม่ขึ้นกับค่า Z พลังงานที่สูงกว่า 10 ล้านอิเล็คตรอนโวลต์ การดูดกลืนเป็นแบบผลิตอิเล็คตรอนคู่อย่างเดียว ซึ่งแปรโดยตรงกับ Z ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามมวลจึงปรากฏให้เห็นอีกแต่น้อยกว่าในช่วงพลังงานต่ำ ๆ

สำหรับช่วงพลังงาน 50-120 กิโลโวลต์ที่ใช้ในการทดลองนี้ กระบวนการดูดกลืนแบบคอมพ์ตันเป็นกระบวนการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่สำคัญที่สุด

การสูญเสียพลังงานในวัสดุ

พลังงานที่อิเล็คตรอนรับจากโฟตอนขณะเกิดการชนตามแบบต่าง ๆ ดังกล่าวมาแล้วข้างต้นจะสูญเสียไปให้กับอิเล็คตรอนตัวอื่น ๆ ที่อยู่ในเส้นทางเดินและกลายเป็นพลังงานความร้อนในที่สุด การชนของอิเล็คตรอนกับอิเล็คตรอนในวงโคจรเกิดขึ้นได้ 3 แบบ แบบที่หนึ่งเกิดโดยการที่อิเล็คตรอนชนอิเล็คตรอนในวงนอก ๆ ของอะตอมหลุด ทำให้อะตอมนั้นกลายเป็นประจุไฟฟ้าบวก ซึ่งเรียกว่าทำให้อะตอมแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า (Ionization) แบบที่สองเกิดโดยการที่อิเล็คตรอนวิ่งเข้าไปชนอิเล็คตรอนในวงใน ๆ เช่นวงที่ เค หรือ แอล ให้กระโดดไปอยู่วงนอก ๆ เรียกว่า (Excitation) ซึ่งเมื่ออิเล็คตรอนตัวอื่น ๆ กระโดดเข้ามาแทนที่จะคายพลังงานในรูปรังสีหรือความร้อน แบบสุดท้ายเกิดโดยการที่อิเล็คตรอนไปทำลายแรงยึดระหว่างอะตอมในโมเลกุล (Breaking of Molecular Bonds)

อิเล็คตรอนที่รับพลังงานสูง ๆ อาจวิ่งเข้าไปใกล้นิวเคลียสของอะตอมของวัสดุนั้นแล้วปล่อยพลังงานในรูปรังสีเอกซ์ที่เรียกว่า เบรมสตราลุง (Bremsstrahlung) กล่าวคืออิเล็คตรอนที่เข้าไปใกล้นิวเคลียสจะเกิดแรงดึงดูดเข้าไปหานิวเคลียส แต่เนื่องจากพลังงานของอิเล็คตรอนสูงกว่าแรงดึงดูดมากจึงเพียงแต่ทำให้อิเล็คตรอนเบนทิศการเคลื่อนที่เข้าหานิวเคลียสเท่านั้น และเสียพลังงานบางส่วนออกมาในรูปรังสีดังกล่าว จึงคล้ายกับเกิดรังสี

สะท้อนขึ้น รังสีสะท้อนนี้จะทำหน้าที่เหมือนโฟตอนตัวที่เจาะเข้าไปในวัสดุ กล่าวคือไปชนอิเล็ค-ตรอนตัวอื่น ๆ ให้หลุดจากวงโคจร ซึ่งอิเล็คตรอนที่หลุดนี้ก็จะไปชนอิเล็คตรอนตัวอื่นๆ ต่อไปอีก ส่วนพลังงานที่เหลือของโฟตอนก็สูญเสียไปให้กับอิเล็คตรอนในอะตอมอื่น ๆ เป็นวัฏจักรดังตารางที่ 3-2[9] และในที่สุดก็จะเปลี่ยนไปในรูปความร้อน การที่อิเล็คตรอนจำนวนมากมายถูกชนหลุดจากอะตอมทำให้โครงสร้างของอะตอมหรือโมเลกุลเหล่านั้นเปลี่ยนไป ถ้าวัสดุที่กล่าวมานี้เป็นเนื้อเยื่อหรือร่างกาย สิ่งที่มีชีวิต การเปลี่ยนแปลงทางระบบเคมีจะเป็นเหตุให้เกิดการผิดปรกติหรือทำลายระบบทางชีววิทยาในที่สุด โดยปรกติแล้ววัฏจักรจะเกิดขึ้นประมาณ 30 ครั้งก่อนที่โฟตอนจะเสียพลังงานทั้งหมดให้อิเล็คตรอนในรูปพลังงานจลน์

---

[9] ดูแหล่งที่แล้ว, หน้า 137

ตารางที่ 3-2

วัฏจักรการสูญเสียพลังงานของโฟตอนในสิ่งมีชีวิต