บทที่ 2

ทฤษฎีทั่วไปของการดูดกลืนรังสีเอกซ์เมื่อผ่านวัตถุ

เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปในวัตถุใดก็ตาม จะไปชนอีเล็คตรอนภายในวัตถุนั้นให้กระเด็นออกจากวงโคจร (orbits) ของอะตอมหรือโมเลกุลและเกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ในขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำออกมาด้วย การชนให้อีเล็คตรอนหลุดออกจากวงโคจรนี้เกิดขึ้นได้ 3 วิธี คือ แบบโฟโตอีเล็คตริก (Photoelectric effect) แบบคอมพ์ตัน (Compton effect) และแบบผลิตอีเล็คตรอนคู่ (Pair production)

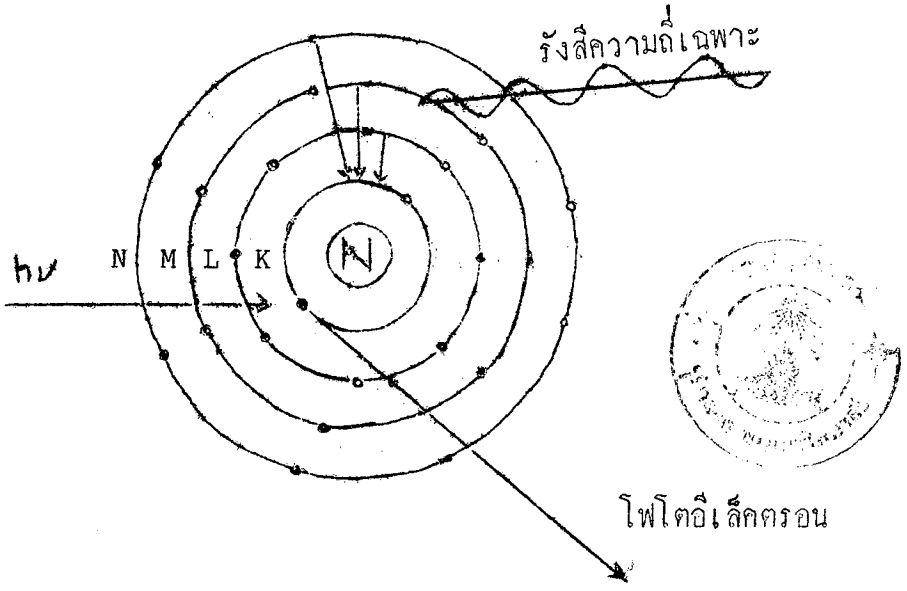
2.1 การชนแบบโฟโตอีเล็คตริก (Photoelectric effect)

การชนแบบนี้รังสีเอกซ์จะถ่ายเทพลังงานให้แก่อีเล็คตรอนตัวที่ชนกระเด็นออกจากวงโคจรจนหมดสิ้น อีเล็คตรอนที่หลุดออกมานี้เรียกโฟโตอีเล็คตรอน (Photoelectron) พลังงานของรังสีเอกซ์ส่วนที่เหลือจากการทำให้อีเล็คตรอนหลุดออกมาจะกลายเป็นพลังงานจลน์ (kinetic energy) ของอีเล็คตรอนไป ตามสูตร

$$K.E. = h\nu - \phi \qquad (2-1)$$

เมื่อ K.E. เป็นพลังงานจลน์ของโฟโตอีเล็คตรอน $h\nu$ เป็นพลังงานของรังสีเอกซ์ และ ϕ เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของอีเล็คตรอน (Binding energy)

พลังงานจลน์ของโฟโตอีเล็คตรอนขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ชน แต่อย่างไรก็ตามโฟโตอีเล็คตรอนที่หลุดออกมา จะเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัตถุเกิดการชนครั้งต่อ ๆ มาจนกว่าจะหยุดหรือหลุดออกมาจากวัตถุ การชนครั้งต่อ ๆ มาก็จะทำให้เกิดมีอีเล็คตรอน (Secondary electrons) และรังสีเอกซ์ (Secondary radiation)ออกมาอีก การชนแบบนี้จะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงกว่าค่า ϕ และมีโอกาสที่จะเกิดการชนอีเล็คตรอนในวงโคจรด้านในของอะตอมมากกว่าด้านนอก ดังรูป (2 - 1)



รูปที่ 2 - 1 แสดงการชนแบบโฟโตอีเล็คตริก

หลังจากโฟโตอีเล็กตรอนหลุดจากวงในแล้ว อีเล็คตรอนในวงนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจะกระโดดเข้ามาแทนที่ พร้อมกับคายพลังงานในรูปรังสี ในลักษณะรังสีความถี่เฉพาะ (Characteristic X-radiation) ออกมา และจะถูกดูดกลืนในเนื้อวัตถุเช่นเดียวกับรังสีเอกซ์ที่เข้ามา

ดังนั้นการชนแบบนี้รังสีเอกซ์จะคายพลังงานทั้งหมดในเนื้อวัตถุ ขอบเขตของการกั้นรังสีเอกซ์เนื่องจากการชนแบบนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้ามา และเปอร์เซนต์ของการเกิดการชนแบบโฟโตอีเล็คตริก ซึ่งเปอร์เซนต์ของการชนแบบนี้ก็ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์และค่า Z (Atomic number) ของวัตถุที่ถูกชน ถ้าวัตถุที่มีค่า Z สูงโอกาสการชนแบบโฟโตอีเล็คตริกก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่จะเกิดการชนแบบอื่นขึ้นแทนที่ดังจะกล่าวต่อไป

2.2 <u>การชนแบบคอมพ์ตัน (Compton effect)</u>

การชนแบบนี้รังสีเอกซ์จะถ่ายเทพลังงานให้แก่อีเล็คตรอนในอะตอมหรืออีเล็คตรอนอิสระแต่เพียงบางส่วน โดยปกติพลังงานที่ยึดเหนี่ยว (Binding energy) อีเล็คตรอนให้อยู่รอบ ๆ

อะตอมมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ถ่ายเทให้เนื่องจากการชน โดยเฉพาะอิเล็คตรอนที่อยู่รอบนอก ๆ (Outer most shell) ดังนั้นการชนแบบนี้ก็เป็นผลให้อิเล็คตรอนหลุดจากอะตอมได้ ซึ่งเราเรียกว่าคอมพ์ตันอิเล็คตรอน (Compton electron) มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับโฟโตอิเล็คตรอน

เมื่อเกิดการชนแบบนี้ขึ้นก็จะเป็นผลให้รังสีเอกซ์ที่ตกกระทบส่วนหนึ่งมีพลังงานลดลงและเกิดการเปลี่ยนทิศทางขึ้นกลายเป็นรังสีสะท้อน (Scattered radiation) ดังรูปที่ 2 - 2 ซึ่งเราอาจหาความสัมพันธ์ของพลังงานและทิศทางของรังสีสะท้อนกับอิเล็คตรอนตัวที่หลุดออกมาได้ดังนี้

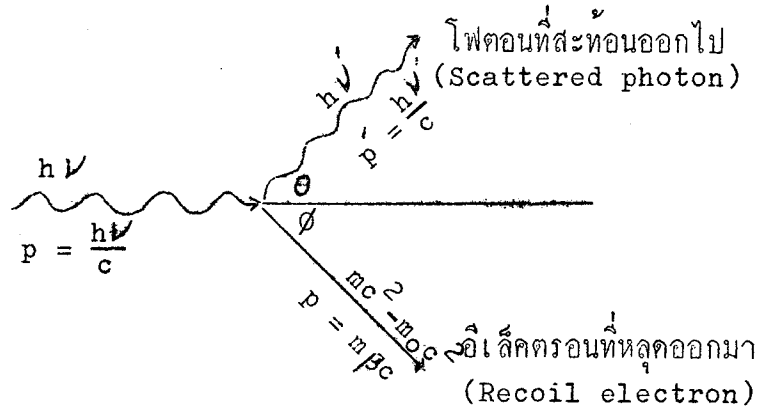
เนื่องจากอิเล็คตรอนมีความเร็วสูงมาก การคำนวณจึงต้องใช้กฎของความเร็วสัมพัทธ์ คือ

$$m = m_o(1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}} \qquad (2 - 2)$$

และ $$T = (m - m_o)c^2 = m_o c^2\left[(1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}} - 1\right] \qquad (2 - 3)$$

ในเมื่อ m เป็นมวลของอิเล็คตรอนขณะมีความเร็ว v, m_o เป็นมวลของอิเล็คตรอนขณะหยุดนิ่ง T เป็นพลังงานจลน์ และ β เป็นอัตราส่วนของความเร็วของอิเล็คตรอนกับความเร็วของแสง ($\frac{v}{c}$)

ถ้า $h\nu$ เป็นพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบ $h\nu'$ เป็นพลังงานของโฟตอนที่สะท้อนออกมา เนื่องจากพลังงานและโมเมนตัมก่อนและหลังการชนต้องเท่ากันจะได้สมการ



รูปที่ 2 - 2 แสดงการชนของโฟตอนและอิเล็คตรอนแบบคอมพ์ตัน

$$h\nu = h\nu' + T \qquad (2-4)$$

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c}\cos\theta + mv\cos\phi \qquad (2-5)$$

$$0 = \frac{h\nu'}{c}\sin\theta - mv\sin\phi \qquad (2-6)$$

จากสมการ (2-4) ถึง (2-6) จะได้ว่า

$$h\nu' = \frac{m_o c^2}{m_o c^2/h\nu + 1 - \cos\theta} \qquad (2-7)$$

$$T = \frac{(h\nu)^2(1-\cos\theta)}{m_o c^2 + h\nu(1-\cos\theta)} \qquad (2-8)$$

สำหรับมุม θ และ ϕ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\cot\phi = -(1 + h\nu/m_o c^2)\tan\frac{\theta}{2} \qquad (2-9)$$

จะเห็นได้ว่าถ้ามุม θ เข้าใกล้ศูนย์ และที่พลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบมีค่าน้อย ($h\nu \ll m_o c^2$) ค่าพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบเกือบเท่ากับค่าพลังงานของโฟตอนสะท้อน ($h\nu \sim h\nu'$) ถ้าพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบ มีค่ามาก สมการ (2-7) จะได้เป็น

$$h\nu' = \frac{m_o c^2}{1 - \cos\theta} \qquad (2-10)$$

ซึ่งแสดงว่าค่าพลังงานของโฟตอนสะท้อนขึ้นอยู่กับมุมสะท้อนเท่านั้นไม่ขึ้นกับค่าพลังงานเดิมของมันเลย

สรุปแล้วจะได้ว่าการชนแบบคอมพ์ตันนั้นขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ และจำนวนอีเล็คตรอนต่อหน่วยปริมาตรของวัตถุที่กั้นรังสี แต่ไม่ขึ้นกับค่า Z (atomic number) ของวัตถุ

2.3 แบบที่ทำให้เกิดอีเล็คตรอนคู่ (Pair production)

เมื่อโฟตอนของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงกว่า 1.02 Mev ผ่านเข้าไปในสนามไฟฟ้าที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียสของอะตอม โฟตอนตัวนั้นอาจสลายไปเป็นอีเล็คตรอน - โพสิตรอนคู่ (electron-positron pair) โพสิตรอนมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับอีเล็คตรอนแต่มีประจุบวก นั่นคือเกิดการเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นมวลของสาร ซึ่งในทำนองเดียวกันก็สามารถ

รวมอีเล็คตรอนและโพสิตรอน (ซึ่งเป็นมวล) เข้าด้วยกัน กลายเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งเราเรียกว่า Annihilation-radiation พลังงานของโฟตอนที่เกิดขึ้นอย่างน้อยต้องเท่ากับ 1.02 Mev เนื่องจากอนุภาคแต่ละตัวมีมวลเทียบเท่ากับพลังงาน 0.51 Mev สมการการเกิดอีเล็คตรอนคู่อาจเขียนได้เป็น

$$h\nu = T_+ + T_- + 2m_0c^2 \qquad (2-11)$$

เมื่อ T_+ และ T_- เป็นพลังงานจลน์ของโพสิตรอนกับอีเล็คตรอน กล่าวคือถ้าพลังงานของโฟตอนมากกว่า 1.02 Mev ส่วนที่เหลือจะเป็นพลังงานจลน์ของอีเล็คตรอนและโพสิตรอน

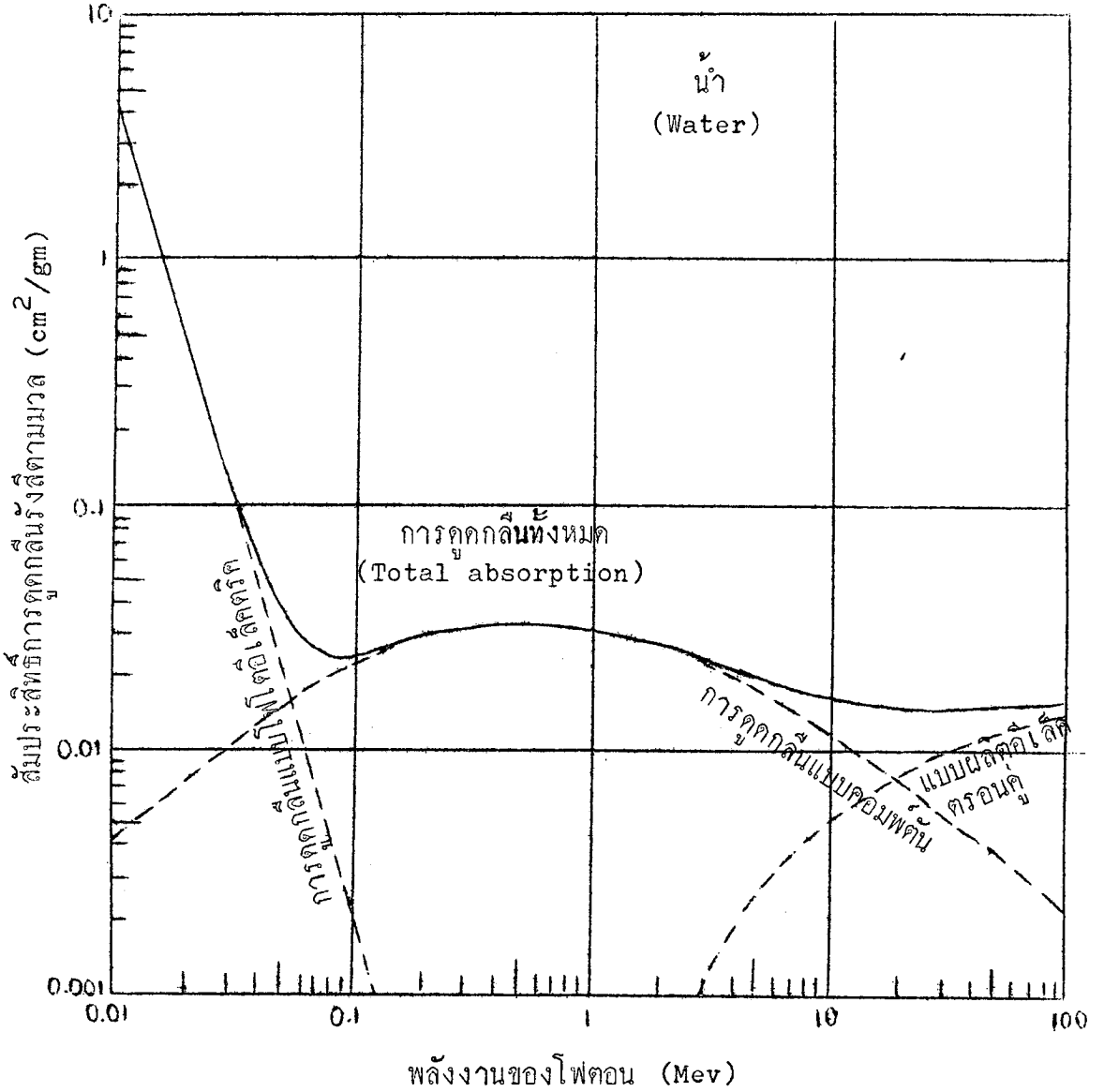
จะเห็นได้ว่าขบวนการเช่นนี้สามารถกั้นรังสีเอกซ์ได้เมื่อผ่านวัตถุ การเกิดอีเล็คตรอนคู่จะเพิ่มตามพลังงานของรังสีเอกซ์และค่า Z ของวัตถุที่กั้นรังสี

รูปที่ 2-3 แสดงการดูดกลืนรังสีในน้ำตามแบบทั้ง 3 ที่กล่าวมาแล้วในช่วงพลังงานโฟตอนต่าง ๆ จะเห็นว่าที่พลังงานต่ำกว่า 0.05 Mev ส่วนใหญ่จะเกิดการดูดกลืนแบบโฟโตอีเล็คตริก และตั้งแต่ 0.05-20 Mev ส่วนมากจะเป็นแบบคอมพ์ตัน แต่ตั้งแต่ 20 Mev ขึ้นไปส่วนใหญ่จะเป็นแบบการเกิดอีเล็คตรอนคู่

2.4 การดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Absorption of X-radiation)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ารังสีเอกซ์เมื่อผ่านวัตถุจะทำให้เกิดปฏิกริยาได้ 3 แบบ แต่ละแบบต่างก็ทำให้สูญเสียพลังงานไปในเนื้อวัตถุทั้งสิ้น พลังงานที่สูญเสียจะกลายเป็นพลังงานความร้อนไปในที่สุด สำหรับการชนแบบโฟโตอีเล็คตริคนั้นพลังงานรังสีเอกซ์จะสูญเสียไปในเนื้อวัตถุทั้งหมด เป็นการดูดกลืนรังสีที่สมบูรณ์ ส่วนการชนแบบอื่นรังสีเอกซ์จะสูญเสียพลังงานไปเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยเฉพาะการเกิดอีเล็คตรอนคู่จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อรังสีเอกซ์มีพลังงานสูงมาก สำหรับรังสีเอกซ์ในช่วงวินิจฉัยโรคนั้นมีพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดอีเล็คตรอนคู่ได้ ดังนั้นจะไม่กล่าวถึงการดูดกลืนแบบนี้

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการดูดกลืนรังสีไว้แต่ก็จะมีบางส่วนของรังสีที่ทะลุผ่านไปโดยไม่ชนกับอีเล็คตรอนในอะตอมเลย หรือบางส่วนเป็นรังสีสะท้อนก็อาจผ่านออกมาจากเนื้อวัตถุได้



รูปที่ 2 – 3 แสดงการดูดกลืนรังสีในน้ำเนื่องจากการชนของรังสีโฟตอนในแบบต่าง ๆ ที่พลังงานต่าง ๆ กัน

ส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีได้ดีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับ :-

2.4.1 ตัวเลขอะตอมของวัตถุที่กั้นรังสี (Atomic number of the absorber)

การดูดกลืนรังสีของสารไม่ขึ้นอยู่กับภาวะของสารว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ซ แต่ขึ้นอยู่กับตัวเลขอะตอม (atomic number) หรืออาจกล่าวอย่างคร่าว ๆ ได้ว่าสารที่หนักกว่าจะสามารถดูดกลืนรังสีได้ดีกว่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีแปรโดยตรงกับกำลังสามของตัวเลขอะตอมโดยประมาณ

ในร่างกายมีส่วนประกอบของสารต่าง ๆ ที่สำคัญ คือ:-

ไฮโดรเจน (Hydrogen)	=	H (Z = 1)
คาร์บอน (Carbon)	=	C (Z = 6)
ไนโตรเจน (Nitrogen)	=	N (Z = 7)
ออกซิเจน (Oxygen)	=	O (Z = 8)
แคลเซียม (Calcium)	=	Ca(Z = 20)

เนื่องจากในกระดูกมีส่วนประกอบของแคลเซียมสูง ดังนั้นการดูดกลืนรังสีในกระดูกจึงมากกว่าในเนื้อเยื่อส่วนอื่นของร่างกาย ซึ่งมีค่าตัวเลขอะตอมเฉลี่ยประมาณ 7 ใกล้เคียงกับค่าตัวเลขอะตอมของน้ำ

2.4.2 ความหนาแน่นของสาร (Density of the substance)

ความหนาแน่นหมายถึงมวลต่อหน่วยปริมาตร ถ้าปริมาตรเป็นลูกบาศก์เซ็นติเมตร มวลจะมีหน่วยเป็นกรัม ถ้าจำนวนอะตอมในหนึ่งหน่วยปริมาตรมีมาก การดูดกลืนรังสีก็จะมากด้วยและเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความหนาแน่น (density หรือ concentration) ของสาร ในร่างกายจะพบว่าอวัยวะมีช่องว่างสำหรับอากาศอยู่มาก เช่น ปอด ลำไส้ เป็นต้น ถึงแม้ว่าอากาศจะมีค่าตัวเลขอะตอมเฉลี่ยประมาณ 7 เท่ากับเนื้อ - เยื่อ ส่วนอื่น ๆ เช่นกล้ามเนื้อ (ยกเว้นกระดูก) แต่ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.001293 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ซึ่งน้อยกว่าเนื้อเยื่อส่วนอื่นที่มีความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ 1 กรัม ต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร (หรือ

004840

เท่ากับน้ำ)

อิทธิพลของตัวเลขอะตอมกับความหนาแน่นจะเห็นได้ชัดถ้านำมาเปรียบเทียบดูการดูดกลืนรังสีของกระดูกและเนื้อเยื่อส่วนอื่น เนื่องจากตัวเลขอะตอมของกระดูกมีค่าประมาณ 14 และของเนื้อเยื่อส่วนอื่นมีค่าประมาณ 7 และความหนาแน่นของกระดูกเท่ากับ 1.85 เท่าของเนื้อเยื่อส่วนอื่น

ดังนั้นการดูดกลืนรังสีของกระดูกมากกว่าเนื้อเยื่อส่วนอื่น

$$= \left(\frac{14}{7}\right)^3 \times 1.85$$

$$= 15 \quad \text{เท่า}$$

2.4.3 <u>ความหนาของวัตถุที่กั้นรังสี (Thickness of the absorber)</u>

วัตถุชนิดเดียวกันที่มีความหนามากกว่าย่อมสามารถกั้นรังสีได้ดีกว่า จำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนอยู่ในวัตถุจะแปรโดยตรงกับความหนาและจำนวนโฟตอนทั้งหมด ถ้า N เป็นจำนวนโฟตอนที่ผ่านเข้าไปในวัตถุ dN เป็นจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนไว้ในวัตถุ และ dx เป็นความหนาของวัตถุ

$$\therefore \quad -dN \propto Ndx$$

$$-dN = \mu Ndx \qquad (2-12)$$

เมื่อ μ เป็นตัวคงที่ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามเส้น (Linear Absorption Coefficient) มีหน่วยเป็น (เซ็นติเมตร)$^{-1}$ เครื่องหมายลบแสดงว่าเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นจำนวนโฟตอนในลำรังสีจะลดลง จากสมการ (2-12) จะได้ว่า

$$N = N_o e^{-\mu x} \qquad (2-13)$$

เมื่อ N_o เป็นจำนวนโฟตอนที่กระทบวัตถุ และ N เป็นจำนวนโฟตอนที่เหลืออยู่หลังจากลำแสงโฟตอนเจาะเข้าไปในวัตถุเป็นระยะทาง x

ถ้าคิดจำนวนโฟตอนต่อหน่วยพื้นที่ผิวตั้งฉากกับลำแสงโฟตอนต่อหน่วยเวลา จะแทน N

i 17393061

ในความสัมพันธ์นี้ด้วยค่า I ซึ่งเป็นความเข้มของลำแสงโฟตอน ทำให้ได้ความสัมพันธ์ใหม่

$$I = I_o e^{-\mu x} \qquad (2 - 14)$$

เมื่อ I_o เป็นความเข้มของลำรังสีที่กระทบผิววัตถุ และ I เป็นความเข้มที่ระยะ x ภายในวัตถุ

เนื่องจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสียังขึ้นกับความหนาแน่นของวัตถุ ดังนั้นในทางฟิสิคส์จึงมีสัมประสิทธิ์อีกค่าคือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามมวล (Mass absorption coefficient) ซึ่งก็คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามเส้น (μ) หารด้วยค่าความหนาแน่น (ρ) ของวัตถุที่กั้นรังสี มีหน่วยเป็นตารางเซ็นติเมตรต่อกรัม

สมการ (2 - 13) และ (2 - 14) ใช้ได้กับรังสีที่มีค่าพลังงานค่าเดียว (Monochromatic radiation) และกับวัตถุที่มีความหนาน้อย ๆ เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติพอจะอนุโลมใช้ได้กับวัตถุที่มีความหนามากหน่อย และรังสีมีพลังงานหลายค่า (Heterogeneous radiations) ได้

2.4.4 <u>ความแรงของรังสี (Hardness of the radiation)</u>

รังสีที่มีพลังงานน้อย (ความยาวช่วงคลื่นมาก) จะถูกดูดกลืนได้มากกว่ารังสีที่มีพลังงานสูง (ความยาวช่วงคลื่นน้อย) ดังนั้นรังสีที่มีพลังงานมากโอกาสที่จะทะลุผ่านก็มากด้วย

การดูดกลืนรังสีเอกซ์ในวัตถุเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกำลังสามของความยาวช่วงคลื่น (Wavelength) ถ้าเราเปรียบเทียบการดูดกลืนของรังสีเอกซ์ที่ความยาวช่วงคลื่นที่ทราบค่าในกระดูกกับในเนื้อเยื่อส่วนอื่นของร่างกายจะได้ผลดังนี้ :-

ความหนา (Layer)	0.3 Å (40 KV)	0.5 Å (25 KV)
1 ซม. ของเนื้อเยื่อส่วนอื่น	รังสีเอกซ์ผ่านไปได้ 77%	รังสีเอกซ์ผ่านไปได้ 61%
1 ซม. ของเนื้อเยื่อกระดูก	รังสีเอกซ์ผ่านไปได้ 24%	รังสีเอกซ์ผ่านไปได้ 0.4%

2.5 สรุปผลเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบวัตถุ (Summary)

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบวัตถุจะทะลุผ่านไปได้มากน้อยเพียงไรขึ้นอยู่กับการดูดกลืนและการสะท้อนของวัตถุ

ถ้าวัตถุมีตัวเลขอะตอมและความหนาแน่นมาก การดูดกลืนรังสีแบบโฟโตอิเล็คตริกจะมากกว่าการสะท้อน

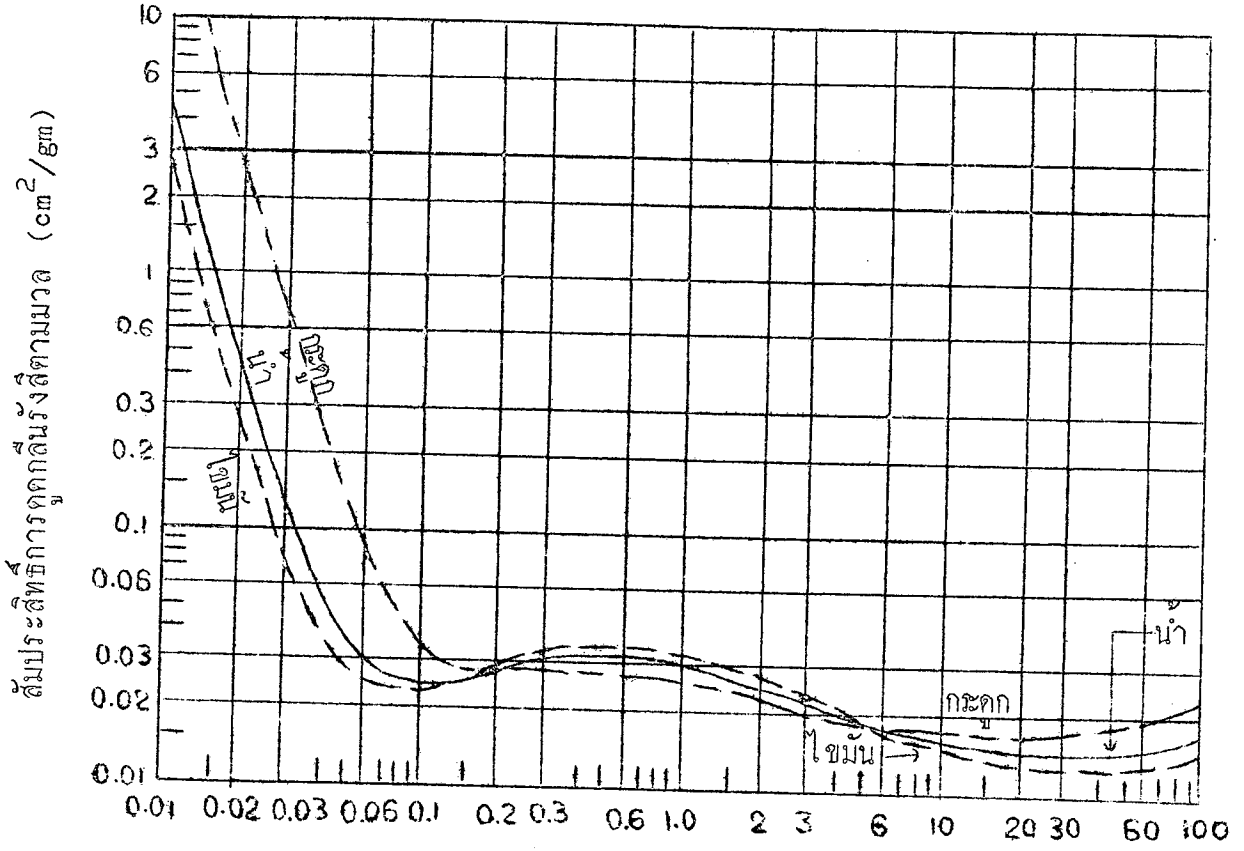
ถ้าพลังงานของรังสีเอกซ์สูง (Hard radiation)การดูดกลืนของวัตถุจะน้อยลงในขณะเดียวกันการสะท้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพลังงานของรังสีน้อย (Soft radiation) รังสีส่วนมากจะถูกดูดกลืนในเนื้อวัตถุมากกว่าการสะท้อน ดังรูป (2 - 3) การดูดกลืนของรังสีเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกำลังสามของความยาวช่วงคลื่น

รูปที่ 2 - 4 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามมวลของน้ำ (ซึ่งใช้แทนกล้ามเนื้อในร่างกาย) ไขมัน และกระดูก จะเห็นว่ากระดูกสามารถดูดกลืนรังสีได้ดีกว่าส่วนอื่นของร่างกายในช่วงพลังงานต่ำ ๆ ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้กับรังสีเอกซ์วินิจฉัย

2.6 การวัดค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ (The quality of X-radiation)

เนื่องจากรังสีเอกซ์มีพลังงานหลายค่าเป็นสเปคตรัม (Spectrum) หรือเป็นพวก Heterogeneous radiation ดังนั้นการที่จะวัดค่าพลังงานของรังสีเอกซ์โดยตรงให้ออกมาในหน่วยของอีเล็คตรอนโวลท์ (eV) จึงเป็นเรื่องลำบาก เขาจึงนิยมวัดพลังงานของรังสีเอกซ์ออกมาในรูปของความหนาครึ่งค่า (Half Value Thickness)หรือเรียกย่อ ๆ ว่า H.V.T.

H.V.T. ของวัตถุใดคือค่าความหนาของวัตถุนั้นเมื่อนำไปกั้นรังสีเอกซ์แล้วสามารถลดปริมาณรังสีลงเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม สำหรับรังสีเอกซ์ในช่วงตั้งแต่ 150 KV ลงมานิยมวัดเป็น H.V.T.ของอลูมิเนียม และรังสีเอกซ์ในช่วงตั้งแต่ 150 KV ขึ้นไปนิยมวัดเป็น H.V.T. ของทองแดง รังสีที่มีค่าพลังงานเหมือนกันจะได้ค่า H.V.T.ออกมาเท่ากันเสมอ ตาราง 2 - 1



รูปที่ 2 – 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตามมวลกับพลังงานของโฟตอนของน้ำ, ไขมัน, และกระดูก

แสดงความสัมพันธ์ของค่า H.V.T. เป็น มม.อลูมิเนียม และ มม.ของทองแดงที่ค่าพลังงานต่าง ๆ เป็น Mev ค่าความหนาที่กั้นให้ปริมาณรังสีลดลงเหลือเพียง 25% เรียกว่าค่า H.V.T. ที่ 2 (2^{nd} H.V.T.) และค่าความหนาที่กั้นให้ปริมาณรังสีลดลงเหลือ $12\frac{1}{2}$% เรียกว่าค่า H.V.T. ที่ 3 (3^{rd} H.V.T.) อัตราส่วนของค่า H.V.T. ที่ 1 ต่อ H.V.T. ที่ 2 ใช้สำหรับดู Homogeneity ของรังสีเอกซ์ และเรียกว่า "Degree of homogeneity"

ในกรณีของรังสีที่มีค่าพลังงานเพียงค่าเดียว (Monochromatic radiation) ค่าของ H.V.T. ที่หนึ่งต้องเท่ากับค่า H.V.T. ที่สอง และเท่ากับค่า H.V.T.ที่สาม แต่สำหรับรังสีเอกซ์ซึ่งเป็น Heterogeneous radiation ค่าของ H.V.T. ต่าง ๆ ดังกล่าวไม่เท่ากัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในการดู Homogeneity ของรังสีเอกซ์ ถ้าค่าของ Degree of homogeneity เข้าใกล้ 1 มากเพียงไร แสดงว่ารังสีเอกซ์มีความเป็น Homogeneous มากขึ้นเพียงนั้น

ตารางที่ 2-1[1]

แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานของโฟตอนกับความหนาครึ่งค่า

พลังงานของโฟตอน (Mev)	ความหนาครึ่งค่าเป็น มม.ของอลูมิเนียม	ความหนาครึ่งค่าเป็น มม.ของทองแดง
0.026	1.5	0.041
0.029	2.0	0.059
0.033	3.0	0.10
0.039	4.0	0.15
0.043	5.0	0.20
0.048	6.0	0.26
0.056	8.0	0.39
0.062	9.5	0.50
0.082	15.0	1.00

[1]Depth Dose Table for Use in Radiotherapy, British Journal of Radiology (Supplement No. 10, 1961)pp. 89.

2.7 ค่ากิโลโวลท์ของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (KV peak and KV effective)

พลังงานของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วหลอดของเครื่องกำเนิดรังสี (X-ray tube) ซึ่งมีค่าเป็นกิโลโวลท์ (KV) ถ้าเราใส่ค่าความต่างศักย์มาก รังสีเอกซ์ก็จะมีพลังงานมาก ในกรณีของกระแสตรง (direct current) ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้ว (electrode) ของกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ แต่ในกระแสสลับ (alternating current) ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วมีค่าไม่คงที่ ในเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ค่าความต่างศักย์สูงสุดเราเรียกเป็น KVp (Kilovolt peak) ซึ่งจะตรงกับค่าความต่างศักย์เฉลี่ย (KV_{eff}) คูณด้วยค่า 1.4 กล่าวคือ

$$KVp = 1.4 \times KV_{eff} \qquad (2 - 15)$$

หรือ

$$KV_{eff} = 0.7\ KVp \qquad (2 - 16)$$

ค่า KV_{eff} นี้ ใช้สำหรับคำนวณอัตรากำลังของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (Thermal loading of the tube)

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากรังสีเอกซ์เป็นพวก Heterogeneous energies ค่าความต่างศักย์สูงสุด ที่เราใส่เข้าไประหว่างขั้วหลอดหมายถึงค่าพลังงานสูงสุดของรังสีเอกซ์เท่านั้น ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วค่าพลังงานเฉลี่ยของรังสีเอกซ์มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่าความต่างศักย์ที่เราใส่เข้าไปเท่านั้น.