หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 2

รังสีเอ็กซ์ และเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นรังสีที่พบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ เริงเก็นซ์ (Roentgen) ในปี ค.ศ. 1895 รังสีเอ็กซ์มีคุณสมบัติดังนี้

1. เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีความยาวช่วงคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.01-100 อังสโตรม (Angstrom) จึงไม่สามารถมองเห็นได้ มีอำนาจทะลุทะลวงสูง
2. เป็นรังสีที่ไม่ประจุไฟฟ้า และไม่สามารถที่จะถูกเบี่ยงเบนโดยสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าใด ๆ ได้
3. รังสีเอ็กซ์เกือบทั้งหมดมีพลังงานเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous) กล่าวคือ รังสีเอ็กซ์ประกอบด้วยรังสีที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันมาก
4. รังสีเอ็กซ์ออกจากหลอดเป็นเส้นตรง และบานออกจากจุดโฟกัส
5. รังสีเอ็กซ์เคลื่อนที่ด้วยอัตราความเร็วเช่นเดียวกับแสงสว่าง (186,000 ไมล์ต่อวินาที หรือ 3×10^{10} ซ.ม. ต่อวินาทีในสูญญากาศ)
6. รังสีเอ็กซ์ทำให้โมเลกุลของแกสเกิดการแตกตัวเป็นอิออนได้
7. ทำให้ผลึกบางชนิดเกิดการเรืองแสงได้
8. รังสีเอ็กซ์ไม่สามารถถูกโฟกัสโดยเลนซ์ได้
9. รังสีเอ็กซ์มีผลทำให้ฟิล์มดำได้
10. รังสีเอ็กซ์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางชีววิทยาได้
11. ทำให้เกิดรังสีทุติยภูมิ และรังสีสะท้อนได้

2.1 หลอดรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เกิดจากการที่วัตถุถูกชนโดยอิเลคตรอนที่มีความเร็วสูงหลอดรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ประกอบด้วยขั้วอะโนด และคาโทด โดยอยู่ภายในหลอดแก้วสูญญากาศ ปกติขั้วอะโนดเป็นแท่งทองแดงที่มีชิ้นโลหะทังสเตนเล็ก ๆ ปะติดอยู่ ขั้วคาโทดประกอบด้วยไส้หลอดทำด้วยลวดทังสเตนวางอยู่ในช่องที่เรียกว่า Focussing Cup เมื่อไส้หลอด-

ถูกทำให้ร้อน อิเลคตรอนจะหลุดออกมาอยู่รอบ ๆ ไส้หลอด เนื่องจากทังสเตนมีจุดหลอมเหลวสูง (3370° ซ) จึงนิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเลคตรอนในหลอดรังสีเอ็กซ์ ถ้าเราให้ค่าความต่างศักย์สูง ๆ ระหว่างขั้วอะโนด และคาโทด โดยขั้วอะโนดเป็นขั้วบวก ขั้วคาโทดเป็นขั้วลบ อิเลคตรอนจากขั้วคาโทดจะวิ่งด้วยความเร่งผ่านหลอดสูญญากาศเมื่ออิเลคตรอนที่วิ่งด้วยความเร็วสูง ถูกทำให้หยุดในทันทีทันใดโดยเป้าอะโนดจะทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์และความร้อนขึ้นมา พลังงานส่วนใหญ่ของอิเลคตรอน (กว่า 99%) จะกลายเป็นความร้อน มีเพียงไม่ถึง 1% กลายเป็นรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นการระบายความร้อนออกจากขั้วอะโนดจึงมีความสำคัญมาก มิฉะนั้นขั้วอะโนดจะถูกความร้อนละลายได้

2.2 ชนิดของหลอดรังสีเอ็กซ์

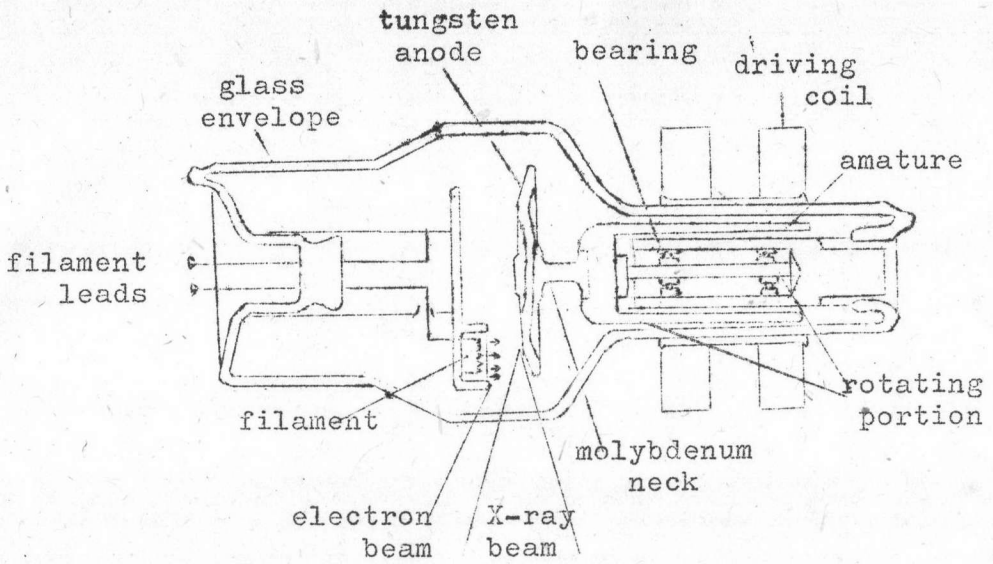
หลอดรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในทางการแพทย์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.2.1 หลอดรังสีเอ็กซ์สำหรับวินิจฉัยโรค หลอดรังสีเอ็กซ์ชนิดนี้ใช้ในวงการแพทย์เพื่อวินิจฉัยโรค จึงจำเป็นที่จะต้องผลิตรังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มสูง แต่ใช้เวลาในการผลิตสั้น ๆ ดังนั้นหลอดรังสีเอ็กซ์ชนิดนี้จึงมีค่า กระแสไหลผ่านหลอดสูง มีค่าตั้งแต่30 มิลลิแอมแปร์จนถึง 1000 มิลลิแอมแปร์ ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วของหลอดปกติใช้ไม่เกิน 120 กิโลโวลท์

2.2.2 หลอดรังสีเอ็กซ์สำหรับรักษาโรค หลอดรังสีเอ็กซ์ชนิดนี้ใช้เพื่อรักษาโรคเวลาที่ใช้ครั้ง ๆ หนึ่ง ใช้เป็นเวลานาน ๆ ติดต่อกัน ค่าของกระแสไหลผ่านหลอดต่ำมักจะไม่เกิน 30 มิลลิแอมแปร์ เนื่องจากการใช้หลอดรังสีเอ็กซ์ชนิดนี้ครั้งหนึ่ง ๆ ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีระบบระบายความร้อนที่ดี ค่ากิโลโวลท์ใช้ตั้งแต่ 10 กิโลโวลท์ขึ้นไปจนถึงหลายเม็กกะโวลท์

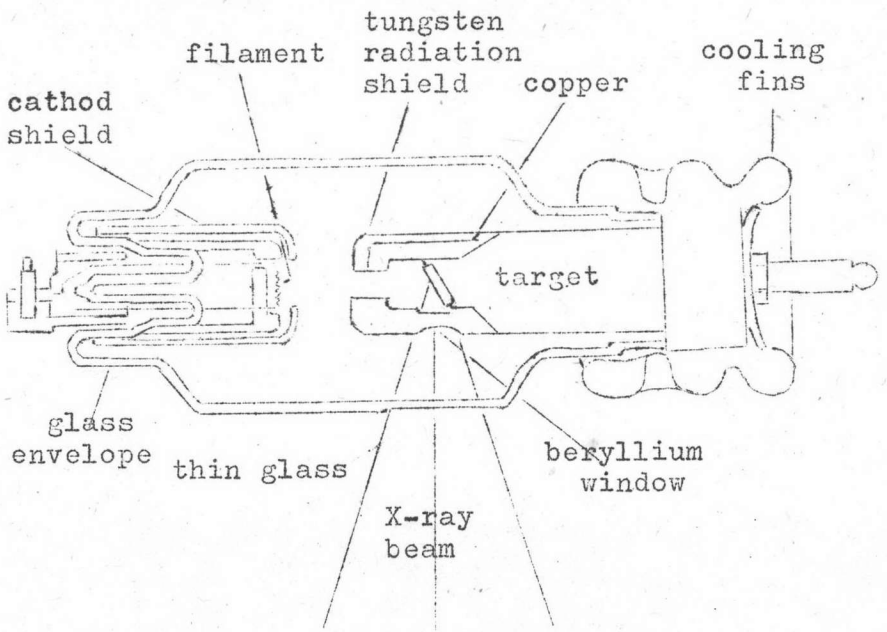
2.3 ขบวนการเกิดรังสีเอ็กซ์

2.3.1 อันตรกริยาของอิเลคตรอน เมื่ออิเลคตรอนมีความเร็วสูงวิ่งผ่านเข้าไปในวัตถุ พลังงานของอิเลคตรอนจะสูญหายไปได้ 2 ทางคือ 1. สูญหายไปเนื่องจากการชน 2. สูญหายไป เนื่องจากการเกิดรังสี การสูญหายของพลังงานของอิเลคตรอน เนื่องจาก



หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

รูปที่2-1.1 แสดงหลอดรังสีเอ็กซ์วินิจฉัยโรค



รูปที่2-1.2 แสดงหลอดรังสีเอ็กซ์รักษาโรค

การชนจะเกี่ยวกับอิเลคตรอนรอบนอกของอะตอมของวัตถุที่ถูกชน ส่วนการสูญหายของพลังงานของอิเลคตรอนเนื่องจากเกิดรังสีจะเกี่ยวข้องกับนิวเคลียสของอะตอมของธาตุที่ถูกชน

ในหลอดรังสีเอ็กซ์พลังงานส่วนใหญ่ของอิเลคตรอนที่กลายเป็นความร้อนเนื่องจากการทำให้อะตอมเกิดการเอกซิเตชั่น (excitation) และไอออนไนเซชั่น (ionization) เอกซิเตชั่นเกิดจากการชนอิเลคตรอนที่อยู่รอบนอกของอะตอม ซึ่งพลังงานที่เสียให้อิเลคตรอนมีเพียงไม่กี่อิเลคตรอนโวลท์ ถ้าอะตอมที่ชนเป็นพวกแกส อิเลคตรอนที่ถูกชนจะกลับสู่สภาพเดิม และจะคายพลังงานออกมาในรูปของแสง ถ้าเป็นพวกของแข็งพลังงานที่คายออกมาจะอยู่ในรูปของความร้อนในการเกิดไอออนไนเซชั่น พลังงานของอิเลคตรอนที่หลุดออกไปนั้นจะกลายเป็นความร้อนในที่สุด

2.3.1.1 พลังงานของอิเลคตรอนที่สูญหายไปเนื่องจากการชน อัตราของพลังงานที่สูญหายไปโดยวิธีนี้มีหน่วยเป็น $MeV/gm/cm^2$ สำหรับโลหะหนักๆ เช่น ตะกั่ว หรือทังสะเตน พลังงานที่สูญหายไปโดยวิธีนี้จะเป็นครึ่งหนึ่งที่สูญหายไปในน้ำ[1] ทั้งนี้เนื่องจากอิเลคตรอนในโลหะหนักๆ จะถูกยึดโดยนิวเคลียสและโลหะหนักๆ จะมีจำนวนอิเลคตรอนต่อกรัมน้อย

2.3.1.2 พลังงานของอิเลคตรอนที่สูญหายไปเนื่องจากการเกิดรังสี หรืออาจจะเรียกอีกหนึ่งอย่างได้ว่า พลังงานของอิเลคตรอนที่สูญหายไปเนื่องจากการเกิดเบรมสตราลุง (Bremsstrahlung) พลังงานของอิเลคตรอนที่สูญเสียโดยวิธีนี้จะมีความสัมพันธ์กับประจุของนิวเคลียส ในทางทฤษฎี พลังงานที่สูญเสียไปต่ออะตอมจะขึ้นอยู่กับประจุของนิวเคลียสยกกำลังสอง แต่เนื่องจากแต่ละอะตอมประกอบด้วย Z อิเลคตรอน จะได้ว่าพลังงานที่สูญเสียไปต่ออิเลคตรอนแปรเปลี่ยนตาม Z พลังงานของอิเลคตรอนน้อย การสูญเสียของอิเลคตรอนจะเป็นแบบการชนมากกว่าการสูญเสียพลังงานของอิเลคตรอนแบบเกิดเบรมสตราลุง ถ้าพลังงานของอิเลคตรอนมาก การเกิดแบบ

---

1. Johns, Harold Elfort and Cunningham, John Robert. 1969. The Physics of Radiology. Illinois : Charles C. Thomas pp. 48

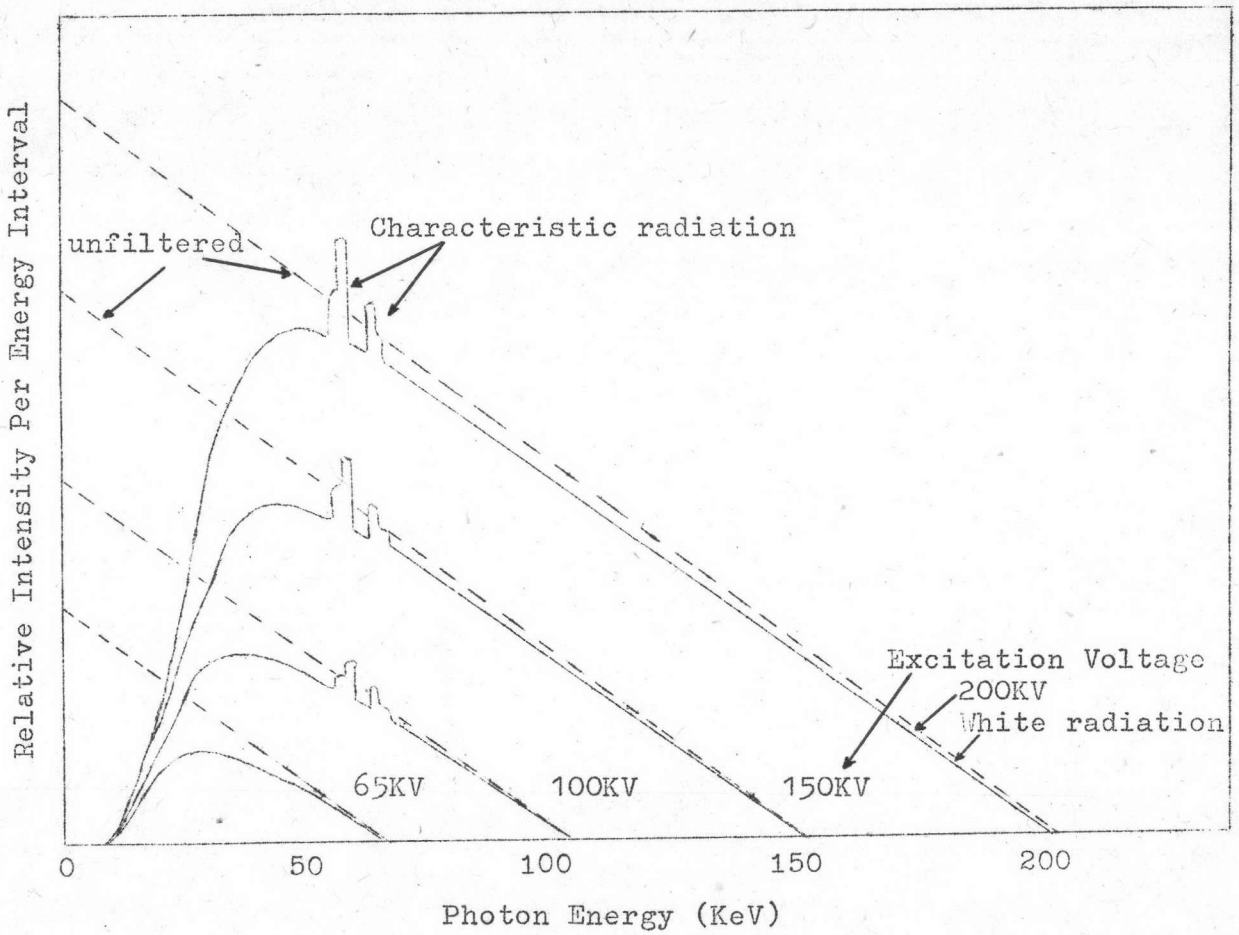
หลังมากกว่าแบบแรกเช่นตะกั่ว[1] พลังงานของอิเลคตรอนเพิ่มขึ้นจาก 1.0 MeV ถึง 100 MeV เสียพลังงานแบบเกิดเบรมสตราลุงจะเพิ่มมากกว่า 100 เท่า ที่ 100 MeV การเสียพลังงานแบบชนในตะกั่วจะมีค่าประมาณ 1% ของการเสียพลังงานแบบเกิดเบรมสตราลุง

ที่พลังงานต่ำ การชนของอิเลคตรอนส่วนใหญ่จะชนกันแบบเอกซิเตชิกับอิออนไนเซชั่น ดังนั้นพลังงานส่วนใหญ่จะปรากฏออกมาในรูปของความร้อน ประสิทธิภาพของการผลิตรังสีเอ็กซ์ต่ำ 100 keV รังสีเอ็กซ์จะเกิดออกมาน้อยกว่า 1% ถ้าอิเลคตรอนมีพลังงานสูงโดยเฉพาะวัตถุที่ทำเป็นเป้ามีเลขอะตอม Z สูงด้วยเช่น ทังสะเตน หรือตะกั่ว พลังงานเกือบทั้งหมดของอิเลคตรอนจะกลายเป็นรังสีมีเพียงส่วนน้อยที่กลายเป็นความร้อน

รังสีเอ็กซ์ที่เกิดออกมาจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

2.3.2 รังสีเฉพาะ (Characteristic Radiation) รังสีเอ็กซ์ชนิดนี้เป็นลักษณะเฉพาะของโลหะที่ใช้ทำเป็นเป้า โลหะที่ใช้เป็นเป้าต่างกัน พลังงานของรังสีเฉพาะจะไม่เท่ากัน เกิดขึ้นเนื่องจากอิเลคตรอนมีพลังงานสูงพอไปชนอิเลคตรอนที่อยู่ในอะตอมหลุดออกไป อิเลคตรอนที่อยู่วงนอกจะวิ่งเข้าไปบรรจุภายในวงที่ว่างแล้วจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน

2.3.3. เบรมสตราลุง เบรมสตราลุงเป็นชนิดของรังสีเอ็กซ์ชนิดหนึ่ง เกิดขึ้นโดยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบวิ่งด้วยความเร็วสูงวิ่งเฉียดนิวเคลียส จะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกกับประจุลบขึ้นมา ซึ่งจะทำให้ทางเดินของประจุลบเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง การเปลี่ยนแปลงทิศทางของประจุลบจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานออกมาจำนวนหนึ่งซึ่งจะออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อัตราพลังงานของรังสีที่ออกมาจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับการเปลี่ยนความเร็วยกกำลังสอง (หรือเท่ากับความเร่งยกกำลังสอง) หมายความว่าเบรมสตราลุงที่แผ่ออกมาจะมีพลังงานต่อเนื่องกันตั้งแต่พลังงานต่ำจนถึงพลังงานสูงสุด ซึ่งเท่ากับพลังงานจลน์เริ่มต้นของอิเลคตรอน เนื่องจากเบรมสตราลุงเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ ดังนั้นเป้าที่มีเลขอะตอมสูงจะทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ได้มากกว่าเป้าที่มีเลขอะตอมต่ำ ส่วนของพลังงานของอิเลคตรอนที่เปลี่ยนไปเป็นโฟตอนมีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่2-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับพลังงานของโฟตอน เมื่ออิเลคตรอนวิ่งเข้าชนเป้าด้วยพลังงาน 65,100,150และ 200 กิโลโวลท์ เส้นไข่ปลาได้จากการคำนวนสมการ (2-2) เส้นหนักเป็นรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านการกรองด้วยอลูมิเนียมหนา 1 มม.

$$f = 3.5 \times 10^{-4} Z E \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อ f = ส่วนของพลังงานของอิเลคตรอนที่เปลี่ยนไปเป็นโฟตอน

Z = เลขอะตอมของเป้า

E = พลังงานสูงสุดของอิเลคตรอนที่วิ่งชนเป้า มีหน่วยเป็น MeV

สำหรับความเข้มของโฟตอนที่เกิดออกมาจะมีสมการดังต่อไปนี้

$$I = C Z (E_{max} - E) \qquad (2\text{-}2)$$

เมื่อ I = ความเข้มของโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ E

E_{max} = พลังงานสูงสุดของโฟตอนที่ออกมาซึ่งเท่ากับพลังงานสูงสุดของอิเลคตรอนที่ชนเป้า

Z = เลขอะตอมของเป้า

C = ค่าคงที่

2.4 ความยาวคลื่นต่ำสุด

เนื่องจากโฟตอนที่ออกมาจะมีพลังงานตั้งแต่ต่ำสุดจนถึงสูงสุดซึ่งเท่ากับพลังงานของอิเลคตรอนที่วิ่งชนเป้า พลังงานสูงสุดของโฟตอน หมายถึงมีความยาวคลื่นต่ำสุด

ใน ค.ศ. 1915 ดวน (Duane) และ ฮันท์ (Hunt) แสดงให้เห็นว่าค่าต่ำสุดขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วของหลอดรังสีเอ็กซ์อย่างเดียว

ให้ e = เป็นประจุของอิเลคตรอน

V = เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วของหลอดรังสีเอ็กซ์

งานทั้งหมดที่อิเลคตรอน 1 ตัว ซึ่งมีประจุ e เปลี่ยนค่าความต่างศักย์V จะเท่ากับผลคูณ eV ซึ่งงานทั้งหมดนี้ก็คือพลังงานจลน์ของอิเลคตรอนในการวิ่งจากไส้หลอดไปยังเป้า ถ้าอิเลคตรอนถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับเป้าแล้วได้โฟตอนออกมา 1 ตัว มีพลังงาน $h\nu$ โดย

$$eV = h\nu \qquad (2\text{-}3)$$

h คือ ค่าคงตัวของแพลงค์

ν คือ ความถี่ของโฟตอน

ตัวอย่างเช่น ถ้าความต่างศักย์ระหว่างขั้วของหลอดรังสีเอ็กซ์มีค่า 60 กิโลโวลท์ จะได้ว่ารังสีเอ็กซ์ที่ออกมามีพลังงาน ($h\nu$) สูงสุด มีค่าเท่ากับ 60 กิโลโวลท์ จาก $\nu = \frac{c}{\lambda}$ (เมื่อ c = ความเร็วแสงและ λ เป็นความยาวช่วงคลื่น) แทนค่าลงในสมการ (2-3) จะได้

$$eV = \frac{hc}{\lambda}$$

เนื่องจากรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานสูงสุดจะมีค่า $\lambda = \lambda_{min}$ จะได้ว่า

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV} \qquad (2\text{-}4)$$

สมการ (2 - 4) เรียกว่าสมการของ ดวน-ฮันท์ แทนค่า h, c, e ลงในสมการ (2 - 4) จะได้ว่า

$$\lambda_{min} = \left(\frac{12400}{V}\right) \ ^{o}A \qquad (2\text{-}5)$$

ตัวอย่างเช่น ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของหลอดรังสีเอ็กซ์มีค่าเท่ากับ 70 กิโลโวลท์ จะได้ว่า λ_{min} มีค่า

$$\lambda_{min} = \frac{12400}{70000} = 0.18 \ ^{o}A$$

จากสมการ (2 = 5) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่ากิโลโวลท์จะทำให้ค่า λ_{min} ลดลง นั่นคือรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจะมีค่าพลังงานสูงสุดเพิ่มขึ้น

2.5 ประสิทธิภาพของหลอดรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากรังสีเอ็กซ์เกิดจากการถ่ายเทพลังงานของอิเลคตรอนให้กับวัตถุที่ทำเป็นเป้าพลังงานบางส่วนกลายเป็นความร้อน ถ้ายิงวัตถุต่อเนื่องตลอดไป โลหะที่ใช้ทำเป็นเป้าจะร้อนขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดอาจจะทำให้เป้าหลอมละลายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนออกจากเป้า

ในช่วงที่ใช้งานทางด้านรังสีวินิจฉัยโรค ศักย์ที่ใช้ประมาณ 40ถึง120 กิโลโวลท์ ประมาณ 1% หรือน้อยกว่าของพลังงานทั้งหมดที่ให้กับหลอดจะกลายเป็นรังสีเอ็กซ์ ส่วนที่เหลือ 99% หรือมากกว่าจะปรากฏในรูปของความร้อน

ประสิทธิภาพของการเกิดรังสีเอ็กซ์ขึ้นอยู่ 2 อย่างคือ 1. โลหะที่ใช้ทำเป็นเป้า 2. ความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอ็กซ์ ความสัมพันธ์ของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมากับโลหะ

ที่ใช้ทำเป็นเป้าที่มีเลขอะตอม Z , ความต่างศักย์ของหลอดกระแสที่ไหลผ่านหลอด มีความสัมพันธ์เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Px = k\ Z\ I\ V^2 \qquad (2\text{-}5)$$

เมื่อ Px = กำลังของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาในหน่วยวัตต์

Z = เลขอะตอมมิคของวัตถุที่ใช้ทำเป็นเป้า

I = ค่า rms (root mean square) ของกระแสหลอดรังสีเอ็กซ์ หน่วยแอมแปร์

V = ค่า rms (root mean square) ของความต่างศักย์หลอดรังสีเอ็กซ์ หน่วยโวลท์

k = ตัวเลขใดๆ

จากการทดลองได้ค่า[2] $k = 1.4 \times 10^{-9}$ / volt ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด ค่า k จะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ที่ใช้ว่าเป็นแบบ 3 เฟสหรือ 1 เฟส ด้วย

ถ้าเอาเวลาที่ใช้คูณกับกำลังที่ออกมา เราจะได้พลังงานทั้งหมดที่ออกมามีหน่วยเป็น วัตต์วินาที หรือ จูล และจะได้ว่า ประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละมีค่า

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมา}}{\text{กำลังของอิเลคตรอนจากคาโทดวิ่งเข้าชนเป้า}} \times 100\% \qquad (2\text{-}6)$$

เมื่อกำลังของอิเลคตรอนที่วิ่งมาจากคาโทดวิ่งเข้าชนเป้า = (หน่วยวัตต์) = VI ค่า V และ I จะต้องคิดในรูปของ rms แทนค่าลงในสมการ 2-6)

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{k\ Z\ IV^2}{IV} \times 100 \ \%$$

$$= (k\ Z\ V \times 100) \ \%$$

$$\text{หรือประสิทธิภาพ} = (K\ Z\ V) \ \% \qquad (2\text{-}7)$$

เมื่อ $K = 100\ k = 100 \times 1.4 \times 10^{-9}/\text{volt}$

$$= 1.4 \times 10^{-7}/\text{volt}$$

---

2 : Arthus Ridgway, Water Thumm. 1968. The Physics of Medical Radiography. Addison-Wesley Publishing Company pp. 237

ตัวอย่างเช่น หลอดรังสีเอ็กซ์ประกอบด้วยโลหะทังสะเตนเป็นเป้ามีค่า - ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของหลอดรังสีเอ็กซ์ 100 กิโลโวลท์ หาประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละได้ว่า

เนื่องจากค่า 100 กิโลโวลท์ ที่ตั้งบนเครื่องควบคุมรังสีเอ็กซ์นั้นเป็นค่า kilovolt peak จากสมการ (2-7) ค่า V ต้องเป็นค่า rms ดังนั้น $V = 0.707 \times 10^5$ $= 7.07\ 10^4$ โวลท์ จาก

ประสิทธิภาพ = (KZV) %

$= (1.4 \times 10^{-7}/\text{volt}) (74) (7.07 \times 10^4 \text{ volts})$ %

= 0.732 %

นั่นคือประสิทธิภาพในการเกิดรังสีเอ็กซ์มีค่า 0.732 %

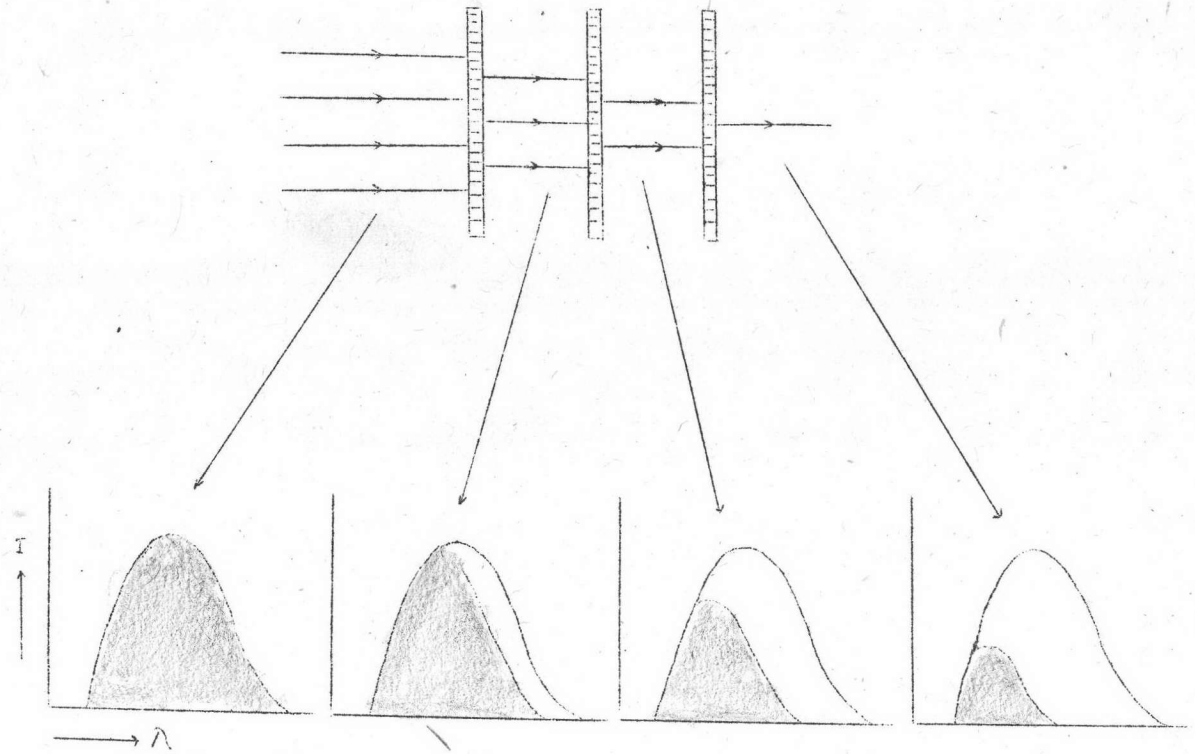
2.6 คุณภาพของรังสีเอ็กซ์

คุณภาพของรังสีเอ็กซ์นิยามด้วยค่าฮาล์ฟวาลิวแลเยอร์ (Half Value Layer) หรือเรียกย่อๆ ว่า H.V.L. ค่า H.V.L. หมายความว่าเป็นค่าความหนาของ - วัตถุที่ทำให้ปริมาณรังสีเริ่มต้นลดลงเหลือ ครึ่งหนึ่ง

ค่า H.V.L. เป็นค่าหยาบในการกำหนดคุณภาพของรังสีเอ็กซ์ เนื่องจาก - H.V.L. ไม่สามารถบอกจำนวนและพลังงานของโฟตอนที่มีอยู่ในลำรังสีได้ การกำหนดค่าคุณภาพของรังสีที่สมบูรณ์นั้น จะต้องบอกจำนวนของพลังงานที่มีอยู่ในแต่ละช่วงพลังงาน (energy interval) ได้ ดังรูปที่ (2-2) แต่ในทางด้านวงการแพทย์การใช้ค่า H.V.L. พอเพียงที่จะใช้งานได้ เพราะผลทางชีววิทยาของเซลล์สิ่งมีชีวิตที่มีต่อรังสีเอ็กซ์ ไม่ไวต่อคุณภาพของรังสีเอ็กซ์ มากนัก

เนื่องจากรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous) ดังนั้น ลำรังสีจึงประกอบด้วยความยาวคลื่นแตกต่างกัน เมื่อใส่ตัวกรองขวางลำรังสีไว้ จะทำ - ให้รังสีช่วงที่มีคลื่นยาวถูกดูดกลืนโดยตัวกรอง ช่วงคลื่นที่สั้นจะผ่านพ้นออกมา และถ้าใส่ตัวกรองให้หนาขึ้น รังสีเอ็กซ์ที่มีช่วงคลื่นสั้นๆ จะทะลุออกมาได้เท่านั้น สเปคตรัมที่ออกมาจะมียอดย้ายไปทางช่วงคลื่นที่สั้น รังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจะมีพลังงานเฉลี่ย สูงขึ้น ดังนั้นการใส่ตัวกรองขวางลำรังสีเอ็กซ์ จะทำให้รังสีเอ็กซ์ที่ออกมามีค่า H.V.L. เพิ่มขึ้น นั่นคือค่า -

พลังงานเฉลี่ยของรังสีเอ็กซ์จะมีค่ามากขึ้น เมื่อใส่ตัวกรอง(filter) มากขึ้นดังรูปที่ (2-3)



รูปที่ 2-3 แสดงผลของตัวกรองที่มีต่อพลังงานเฉลี่ยของรังสีเอ็กซ์

การใส่ตัวกรองหนามาก ๆ ไม่ได้ทำให้รังสีเอ็กซ์ที่เหลืออยู่มีพลังงานมากกว่าค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วหลอดรังสีที่ใช้

ค่าพลังงานเอฟเฟคตีฟ (Effective energy) หรือค่าพลังงานเฉลี่ยของรังสีเอ็กซ์แบบวิวิธพันธ์ใด ๆ หมายถึง ค่าพลังงานค่าเดียว ซึ่งถ้านำไปใช้คำนวณการถูกดูดกลืนโดยตัวกรองแล้ว จะให้ปริมาณการถูกดูดกลืนที่ถูกต้องของรังสีวิวิธพันธ์นั้น โดยทั่วไปนิยมเปรียบเทียบกับพลังงานรังสีแกมม่าที่มีค่า H.V.L. เท่ากับพลังงานรังสีเอ็กซ์นั้น สำหรับค่าพลังงานเอฟเฟคตีฟกับค่าH.V.Lได้แสดงในตารางที่[3] 2-1 และรูปที่[3] 2-4

---

3. British Journal of Radiology. Supplement No. 11. 1972. Central Axis Depth Dose Data for Use in Radiotherapy.

ตารางที่ 2-1

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า พลังงานเอฟเฟคตีฟ กับค่า H.V.L.

พลังงานเอฟเฟคตีฟ (keV)	H.V.L. มม.อลูมิเนียม	H.V.L. มม.ทองแดง
26	1.5	0.041
29	2.0	0.059
33	3.0	0.10
39	4.0	0.15
43	5.0	0.20
48	6.0	0.26
56	8.0	0.39
62	9.5	0.50
-	10.0	0.54
82	15.0	1.00

002223

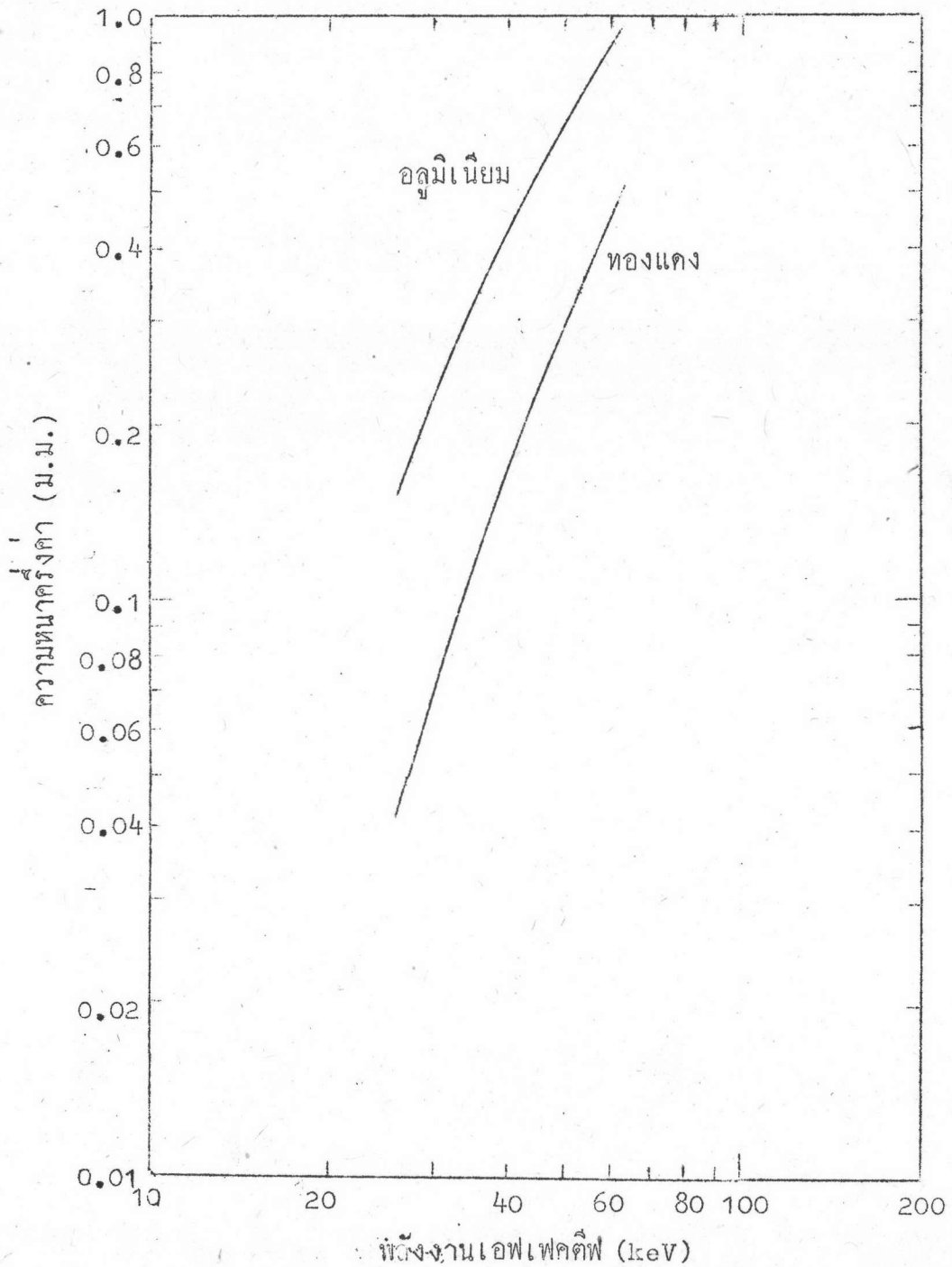
อัตราปริมาณของรังสีเอ็กซ์ขึ้นอยู่กับสาเหตุ 4 ประการ คือ

2.6.1 ความต่างศักย์ การเพิ่มค่า กิโลโวลท์ ระหว่างขั้วของหลอดรังสีเอ็กซ์จะทำให้อัตราปริมาณรังสีและพลังงานของรังสีเอ็กซ์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เกิดเนื่องจากความเร็วของอิเลคตรอนที่ผ่านจากขั้วคาโทดไปยังขั้วอะโนดเพิ่มขึ้น การเพิ่มของอัตราปริมาณรังสีเอ็กซ์จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วของหลอด [4] ยกกำลัง 2 ถึง 4 และยังขึ้นกับค่าความหนาของตัวกรองที่ใช้

2.6.2 กระแส ถ้าเพิ่มกระแสที่ไส้หลอดมากขึ้นจะทำให้ปริมาณของอิเลคตรอนที่ออกจากไส้หลอดต่อวินาทีในหลอดรังสีเอ็กซ์เพิ่มขึ้นด้วย นั่นคือทำให้กระแสไฟฟ้าในหลอดรังสีเอ็กซ์เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ปริมาณรังสีเอ็กซ์ต่อวินาทีเพิ่มขึ้น ปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่เกิดออกมาจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่ามิลลิแอมแปร์ โดยที่แฟคเตอรอื่น ๆ คงที่ การเปลี่ยนค่ามิลลิแอมแปร์ไม่มีผลทำให้คุณภาพของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาเปลี่ยนแปลงไป

---

4. Plaats, G.J. Van Der. 1961. Medical X-ray Technique, 2nd ed. Eindhoven : Centrex Publishing Company pp. 358



รูปที่2–4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่ากับค่าพลังงานเฉลี่ยของรังสีเอ็กซ์ สำหรับตัวกรองอลูมิเนียมและทองแดง

2.6.3 ระยะทาง เนื่องจากอัตราปริมาณของรังสีจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะระยะทางที่ห่างจากจุดกำเนิดรังสี ในกรณีที่จุดกำเนิดรังสีมีขนาดเล็กจนถือว่าเป็นจุด อัตราปริมาณรังสีที่จุดใด ๆ จะเป็นปฏิภาคกลับกับระยะทางจากจุดกำเนิดรังสียกกำลังสอง ดังสมการ

$$I \propto \frac{1}{d^2}$$

ที่จุดต่าง ๆ อัตราปริมาณของรังสีจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_1}{d_2}^2$$

เมื่อ I_1 = อัตราปริมาณรังสีที่ระยะทาง d_1

I_2 = อัตราปริมาณรังสีที่ระยะทาง d_2

2.6.4 ตัวกรอง อัตราปริมาณรังสีจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดความหนาของตัวกรองที่ใช้ การใช้ตัวกรองที่หนาและมีเลขอะตอมสูงจะทำให้อัตราปริมาณรังสีลดลงมาก แต่รังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจะมีค่า พลังงานเอฟเฟคตีฟสูงขึ้นด้วย เนื่องจากตัวกรองจะตัดเอารังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานต่ำออกไป ดังนั้นจึงเหลือแต่รังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานสูงผ่านออกมา