



บทที่ 2

กระบวนการวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองรังสีเอกซ์

2.1 คุณสมบัติของรังสีเอกซ์

ในปี ค.ศ.1895 เรินท์เกน (Wilhelm Conrad Roentgen) ^[5] นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันกำลังทำการทดลองเกี่ยวกับรังสีแคโทดอยู่ในห้องที่มีดสนิท ในขณะที่ทำการทดลองนั้นเรินท์เกนสังเกตเห็นก้อนแร่แบเรียมแพลททินไซยาไนด์ (Barium Platinocyanide) ที่วางอยู่ไม่ห่างจากหลอดรังสีแคโทดไม่มากนักเกิดการเรืองแสงขึ้น ปกติก้อนแร่จะเกิดการเรืองแสงเมื่อถูกรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) แต่ในขณะนั้นไม่มีรังสีอัลตราไวโอเล็ตอยู่เลย เรินท์เกนจึงสรุปว่าต้องมีรังสีบางอย่างเกิดขึ้นจากหลอดรังสีแคโทด และเรียกชื่อรังสีนี้ว่า “รังสีเอกซ์ (x-rays)” หลังจากนั้นต่อมาพบว่ารังสีเอกซ์มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 0.1-100 อังสตรอม (Å) มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงและไม่เบี่ยงเบนด้วยสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก

รังสีเอกซ์มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค (wave particle duality) แล้วแต่กรณี สำหรับคุณสมบัติที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเรียกว่า “โฟตอน (photon)” ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกรังสีเอกซ์ว่า โฟตอนรังสีเอกซ์ (x-ray photon) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนของรังสีเอกซ์กับความถี่ (V) สามารถหาได้จาก

$$E = hV \quad \dots\dots\dots 2.1$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant = 6.62×10^{-34} จูล-วินาที หรือ 6.62×10^{-27} เอิร์ก-วินาที)

V คือ ความถี่ หรือมีค่าเท่ากับ c / λ

ดังนั้นจากสมการที่ 2.1 ถ้าแทนค่า V จะได้สมการความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่น (λ)

$$E = hc / \lambda \quad \dots\dots\dots 2.2$$

เมื่อ c คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงมีค่าเท่ากับ 2.99×10^8 เมตรต่อวินาที

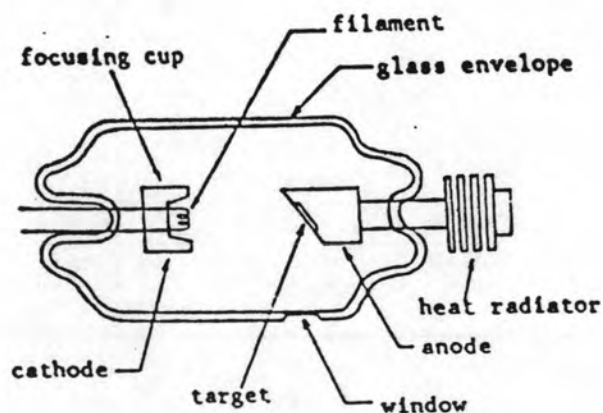
λ คือ ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

จากสมการที่ 2.2 เมื่อแทนค่าคงที่ (hc) และแปลงหน่วยความยาวคลื่นเป็นอังสตรอม ($1\text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm} = 0.0001\mu\text{m}$) พลังงานในหน่วยของกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่นได้ ดังนี้

$$E \text{ (keV)} = 12.4 / \lambda \quad \dots\dots\dots 2.3$$

2.2 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

หลังจากเรินท์เกนค้นพบรังสีเอกซ์ที่เกิดจากหลอดรังสีแคโทดแล้ว ต่อมา คูลิดจ์ (Coolidge) ได้พัฒนาหลอดรังสีเอกซ์ขึ้นมาโดยอาศัยหลักการเร่งอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากไส้หลอดให้ชนเป้าภายในหลอดสุญญากาศด้วยไฟฟ้าศักดาสูง ทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่องออกมาเรียกรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่ารังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous x-rays) หรือเบรมสตราห์ลุง (Bremsstrahlung) หลอดรังสีเอกซ์มีลักษณะโครงสร้างของหลอดทั่วไปดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างภายในของหลอดรังสีเอกซ์ [9]

โครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน คือ ^[10]

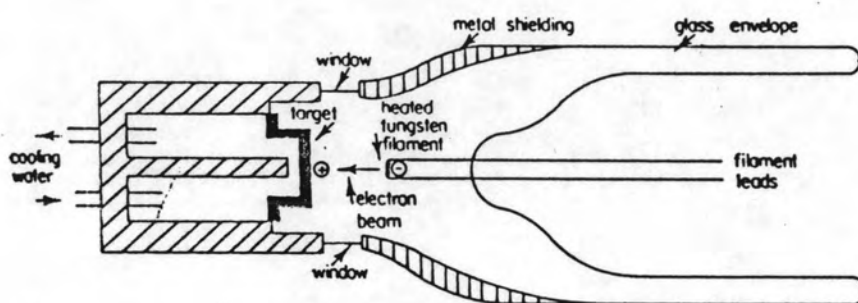
1. ภาชนะสุญญากาศแบบปิด (sealed vacuum chamber)

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดชิ้นส่วนของไส้หลอด (filament) และเป้า (target) ให้อยู่ในตำแหน่งทำงานที่เหมาะสม ภาชนะสุญญากาศทำด้วยแก้วชนิดไพเรกซ์ (pyrex) หรือ เซรามิกส์ ซึ่งทนต่อความร้อนและสภาวะสุญญากาศประมาณ 10^{-6} - 10^{-7} ทอร์ (torr) นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ

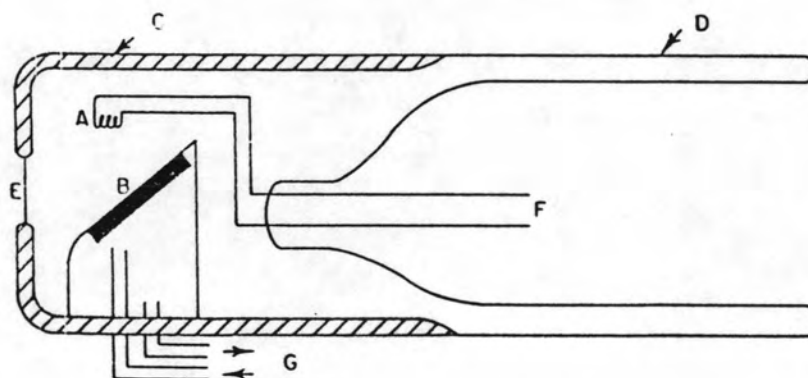
2. หน้าต่าง (window)

ส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งเป็นช่องทางออกของรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้ ซึ่งอยู่บนภาชนะสุญญากาศเรียกช่องทางออกนี้ว่า “หน้าต่าง” โดยหน้าต่างจะต้องทำให้บางมาก และมีคุณสมบัติที่ทนต่อความดันสุญญากาศเพื่อลดการสูญเสียปริมาณรังสีเอกซ์ หรือสามารถให้ความเข้มรังสีเอกซ์ทะลุผ่านหน้าต่างออกไปได้มากที่สุด สำหรับงานวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองรังสีเอกซ์นี้ต้องการผลิตรังสีเอกซ์พลังงานต่ำหน้าต่างจึงทำด้วยเบริลเลียม (beryllium) ซึ่งมีเลขอะตอมต่ำ แต่สำหรับหน้าต่างของหลอดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ จะทำด้วยแก้วไพเรกซ์ซึ่งมีส่วนผสมของ Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , B_2O_3 ^[3] ตำแหน่งหน้าต่างของหลอดรังสีเอกซ์ที่ใช้กับงานวิเคราะห์จะแบ่งตามรูปแบบโครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์ได้ 2 รูปแบบ ^[5] คือ แบบหน้าต่างข้าง (side window tube) และแบบหน้าต่างปลาย (end window tube) ดังในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.2 และ 2.3 จะเห็นว่ารูปแบบโครงสร้างของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์มีลักษณะการจัดรูปทรงที่แตกต่างกัน อันจะมีผลต่อการนำหลอดรังสีเอกซ์ทั้งสองชนิดนี้ไปใช้งาน โดยปกติหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ออกแบบสำหรับงานวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์แบบหน้าต่างข้างจะใช้ศักดาไฟฟ้าสูงประมาณ 60 กิโลโวลต์ ระหว่างไส้หลอดกับเป้าโลหะ และจะต้องอยู่ในสภาวะสุญญากาศที่สูงมาก ส่วนแบบหน้าต่างปลายจะใช้ศักดาไฟฟ้าสูงประมาณ 100 กิโลโวลต์ และกระแส 80 มิลลิแอมแปร์



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์แบบหน้าต่างข้าง

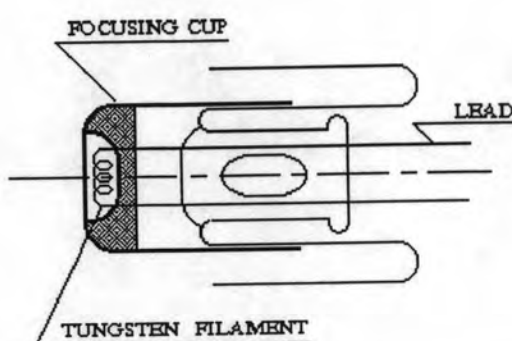


- | | | | |
|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| A. tungsten filament | B. target | C. lead shielding | D. glass envelope |
| E. window | F. filament lead | G. cooling water | |

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์แบบหน้าต่างปลาย

3. ไส้หลอด (filament) [9]

เป็นขดลวดทำด้วยทังสเตนยึดกับแก้วซึ่งเป็นฉนวนกักตาไฟฟ้าสูง ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนอิสระด้วยการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากเส้นลวดทังสเตนที่ถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า เมื่ออยู่ในสภาวะผลิตรังสีเอกซ์ไส้หลอดนี้จะเป็นขั้วลบ(cathode) ของหลอดรังสีเอกซ์ ตำแหน่งของไส้หลอดจะวางอยู่ในแอ่งของโฟกัสซิงคัพ (focusing cup) ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ต่อศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ดังแสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของไส้หลอด

4. เป้าโลหะ (target)

เป็นบริเวณที่ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอกซ์โดยขณะทำงานจะเป็นขั้วบวก (anode) ของหลอดรังสีเอกซ์มักมีรูปร่างดังในรูป 2.5 คุณสมบัติของโลหะที่ใช้ทำเป้าโลหะ มีดังนี้

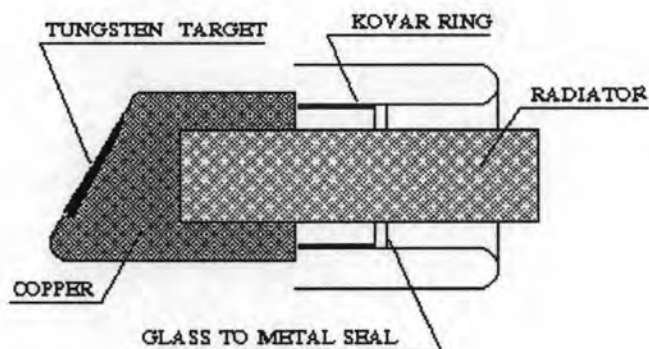
(1) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูง (high atomic number) เช่น Mo , W , Co , Cu, Ag , Rh , Ti , Pt , Au และ Sc

(2) มีจุดหลอมเหลวสูง (high melting point)

(3) มีการนำความร้อนได้ดี (high thermal conductivity)

(4) ไม่กลายเป็นไอง่ายที่ความดันต่ำ (low vapor pressure)

เป้าโลหะแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติต่างกันไป ในงานวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์นั้นจะมีการเลือกชนิดของเป้าโลหะตามความเหมาะสมของกลุ่มธาตุที่วิเคราะห์ ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของแอดโนด

ตารางที่ 2.1 การเลือกชนิดของเป้าโลหะสำหรับการวิเคราะห์แบบ EDXRF

หลอดรังสีเอกซ์ชนิด	ความเหมาะสมในการวิเคราะห์ธาตุ
เป้าโครเมียม (Cr tube)	ธาตุเบา
เป้าโมลิบดีนัม (Mo tube)	ธาตุปานกลาง และธาตุหนัก
เป้าทังสเตน (W tube)	ธาตุหนัก
เป้าทองแดง (Cu tube)	ธาตุที่ต่ำกว่าเหล็ก

ปัจจุบันผู้ผลิตเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์ มีการใช้หลอดรังสีเอกซ์ที่มีเป้าชนิดใหม่ๆ ได้แก่

หลอดชนิดเป้าสแกนเดียม (Sc tube) : มีความไวในการวิเคราะห์ธาตุเบาได้ตั้งแต่ธาตุที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 6-20 ได้ดีมาก และถ้าธาตุหนักจะเลือกใช้หลอดโครเมียม (Cr tube)

หลอดชนิดเป้าโรเดียม (Rh tube) : สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ธาตุที่มีเลขอะตอม 14 ขึ้นไปจนถึงธาตุหนัก ซึ่งสามารถใช้แทนหลอดชนิดเป้าโครเมียมและโมลิบดีนัมได้

หลอดชนิดเป้าโครเมียม/ทอง (Cr/Au tube) : เป้าโลหะนี้ถูกผลิตขึ้นโดยการเคลือบสารโครเมียมบางๆ ไว้บนทอง ซึ่งจะมีผลดีต่อการใช้งานคือถ้าศักดาไฟฟ้าต่ำจะใช้งานในช่วงเป้าโครเมียม (ส่วนเคลือบ) แต่ถ้าจะใช้ศักดาไฟฟ้าสูงจะเกิดรังสีเอกซ์พลังงานสูงจากเป้าทองซึ่งเหมาะสำหรับวิเคราะห์ธาตุหนัก

ดังนั้นจะเห็นว่าถ้าเป่าโลหะมีโลหะสองชนิดก็จะสามารถวิเคราะห์ธาตุได้ทั้งธาตุเลขอะตอมต่ำและเลขอะตอมสูงโดยใช้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์หลอดเดียวกัน

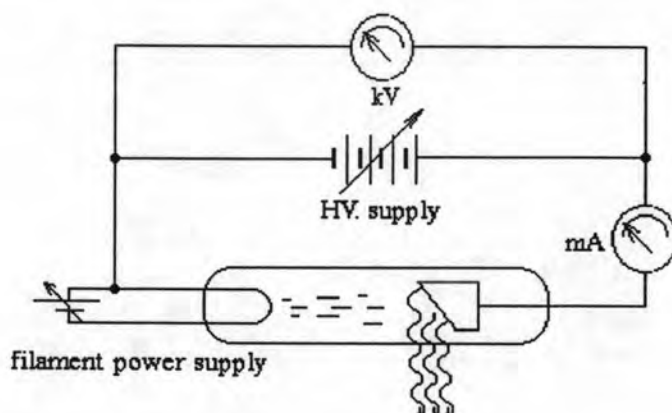
2.3 ระบบควบคุมการกำเนิดรังสีเอกซ์

หลอดรังสีเอกซ์จะมีหลักการควบคุมการกำเนิดรังสีเอกซ์ โดยอาศัยกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน^[9] คือ

ก) แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าต่ำสำหรับต้นกำเนิดอิเล็กตรอนอิสระ (filament power supply)

ข) แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง (high voltage power supply) สำหรับเร่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงสู่เป่ากำเนิดรังสีเอกซ์

ค) ระบบป้องกันความเสียหายแก่หลอดรังสีเอกซ์ ได้แก่ ระบบป้องกันความร้อนสูงเกิน ระบบป้องกันศักดาไฟฟ้าของไส้หลอดเกิน เป็นต้น



รูปที่ 2.6 วงจรเบื้องต้นของหลอดรังสีเอกซ์

ในรูปที่ 2.6 เป็นวงจรควบคุมการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์พื้นฐาน ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสองชุด คือชุดที่หนึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำสำหรับจุดไส้หลอด (filament power supply) การเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายชุดนี้จะมีผลโดยตรงต่อการควบคุมปริมาณการกำเนิดรังสีเอกซ์หรือความเข้มรังสีเอกซ์ อีกชุดหนึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงสำหรับจ่ายศักดาไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนจากไส้หลอดไปยังเป่าโลหะ หรือจากแคโทด (cathode) ไปยังแอโนด (anode) การเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้าของแหล่งจ่ายชุดนี้จะมีผลต่อการควบคุมพลังงานของอิเล็กตรอน หรือพลังงานของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องที่เกิดขึ้น

และยังมีผลต่อการเพิ่มปริมาณรังสีเอกซ์ด้วย

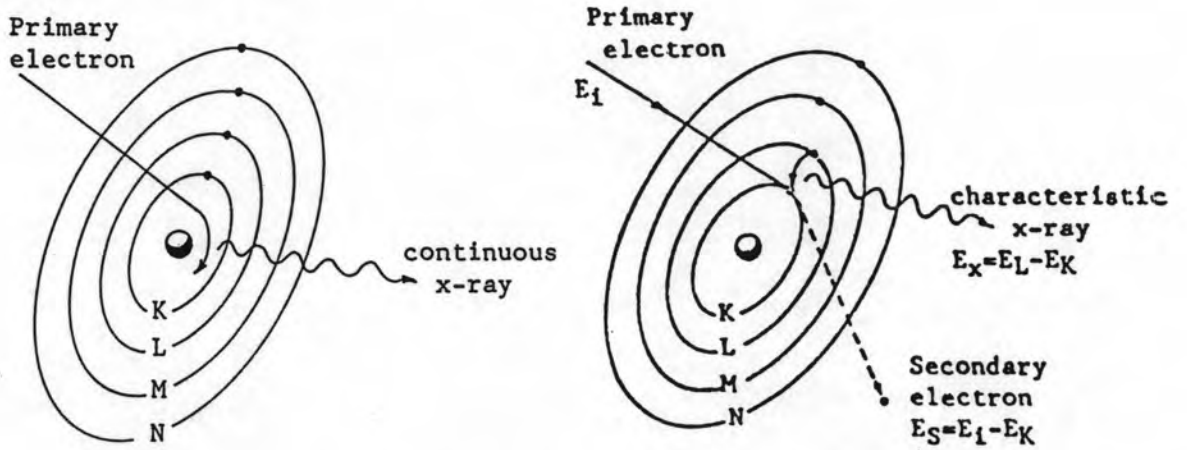
การกำเนิดรังสีเอกซ์เริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำจุดไส้หลอด ทำให้ทั้งสแตนอนและปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระจากผิวไส้หลอด เมื่อจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงให้กับขั้วไฟฟ้าของหลอดรังสีเอกซ์จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาได้รับการเร่งให้พลังงานสูงเท่ากับไฟฟ้าศักดาสูงที่จ่ายให้ เมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงนี้ชนเป้าโลหะจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่ใช้ทำเป้า ทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ 2 ชนิด ตามกระบวนการปลดปล่อยพลังงานส่วนที่เกินจากอะตอมบริเวณชั้นโคจรอิเล็กตรอน คือ

ก) รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous x-ray)

การเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องนี้เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าสู่สนามไฟฟ้าบริเวณใกล้นิวเคลียส ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสถิตย์จะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ และลดความเร็วลงพร้อมทั้งสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วและปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งเรียกรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยรังสีนี้ว่า “เบรมสตราห์ลุง (bremsstrahlung)” หรือ “รังสีขาว (white radiation)” ดังแสดงในรูป 2.7 ก โดยความเข้มของรังสีเอกซ์และความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จะกระจายอย่างต่อเนื่อง ดังสเปกตรัมในรูปที่ 2.8 ความเข้มของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเลขอะตอมของธาตุที่นำมาทำเป้าของหลอดรังสีเอกซ์

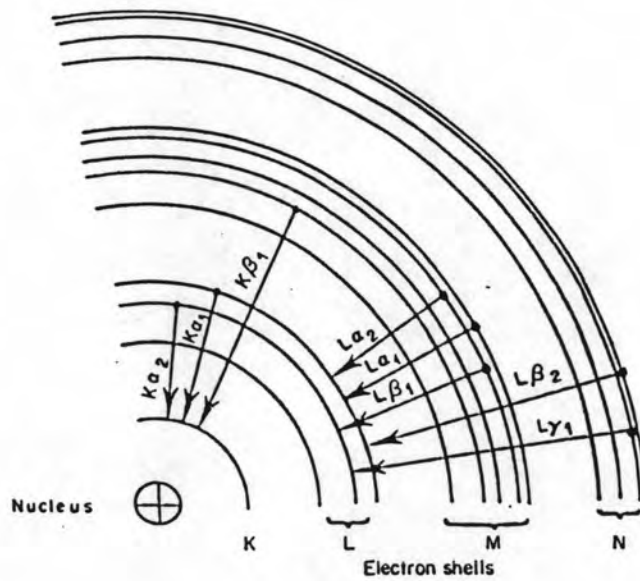
ข) รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray)

ปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว หรือรังสีเอกซ์เรือง (x-ray fluorescence) จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอน หรืออนุภาคที่มีประจุชนิดอื่น ๆ หรือโฟตอนพลังงานสูง (E) เคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K, L หรือ M และเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนในชั้นโคจรที่ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจร (binding energy, E_K) จะหลุดออกจากวงโคจร ($E_L - E_K$) เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้น ทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นและจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดไปจะลดระดับพลังงานลงมาแทนที่ในวงโคจรชั้นที่ว่างและเกิดการปลดปล่อยพลังงานส่วนที่เกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ พลังงานส่วนที่เกินนี้จะมีพลังงานเท่ากับความต่างระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนและชนิดของธาตุนั้น ๆ และจะมีพลังงานเฉพาะค่า รังสีเอกซ์ชนิดนี้จึงเรียกว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว” ดังในรูปที่ 2.7 ข และ ค ดังนั้นในกระบวนการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ถ้าพลังงานของอิเล็กตรอนสูงพอที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ สเปกตรัมของรังสีเอกซ์จากเป้าก็จะมีสเปกตรัมของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวซ้อนอยู่บนรังสีเอกซ์ต่อเนื่องด้วย ดังในรูปที่ 2.8



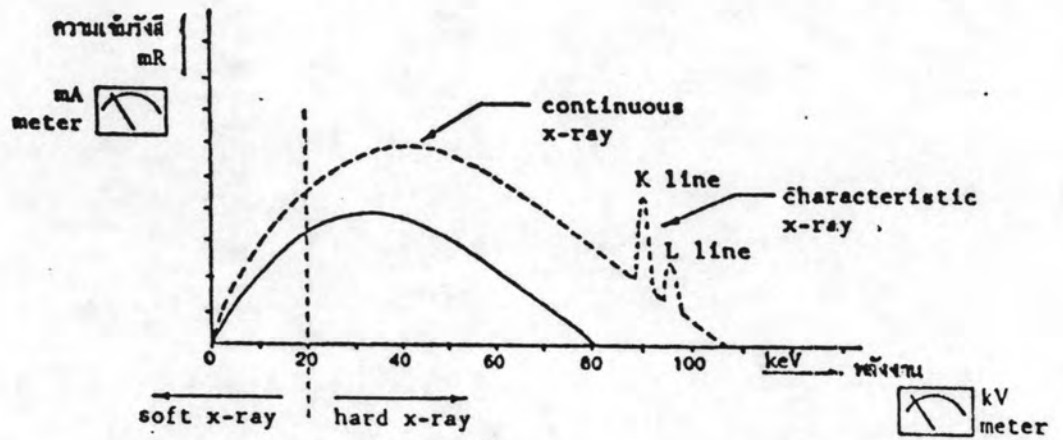
ก. อันตรกิริยาของการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

ข. อันตรกิริยาของการเกิดรังสีเอกซ์เรือง



ค. ชั้นโคจรของอิเล็กตรอนที่จะให้พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รูปที่ 2.7 อันตรกิริยาการเกิดรังสีเอกซ์บนเป้าของหลอดรังสีเอกซ์



รูป 2.8 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์จากหลอดรังสีเอกซ์

- ถ้าให้ I_{cont} คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง
- i คือ กระแสไฟฟ้าหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ที่ใช้กับหลอดรังสีเอกซ์
- V คือ ศักย์ไฟฟ้าเป็น kV
- Z คือ เลขอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป้า
- K คือ ค่าคงที่

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการความเข้มรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากหลอดรังสีเอกซ์ได้ดังนี้

$$I_{cont} = K i Z V^2 \dots\dots\dots 2.4$$

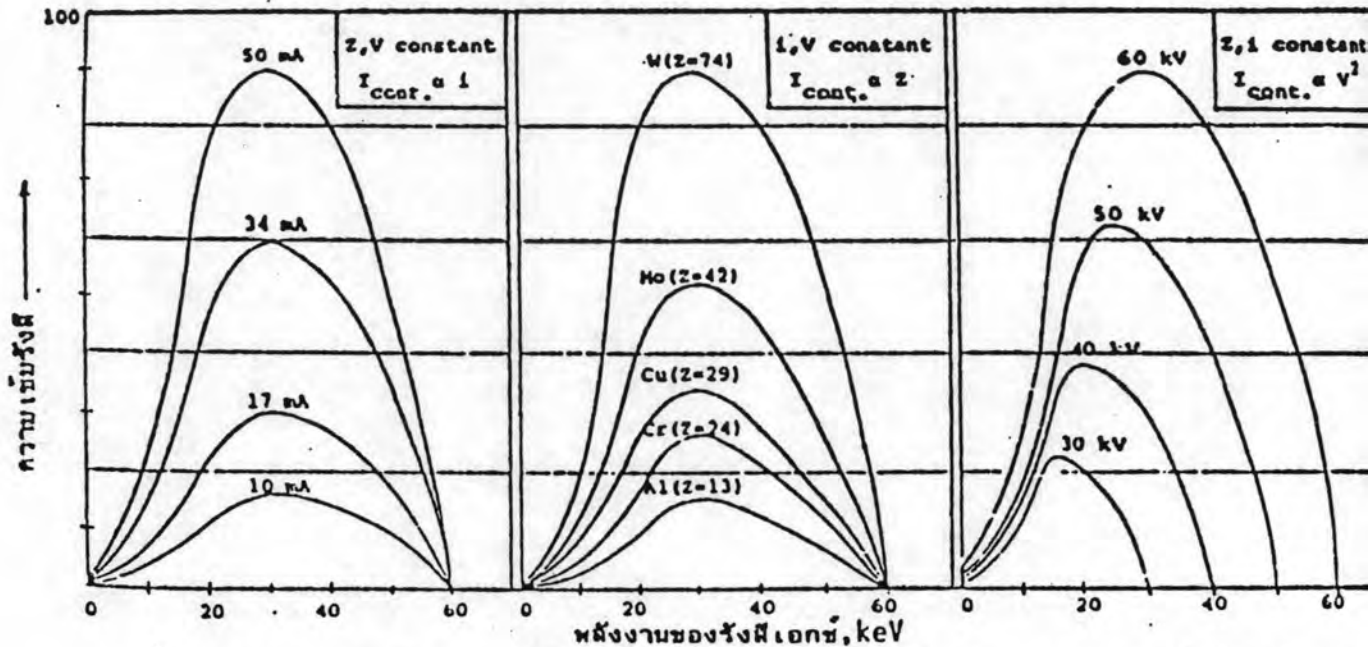
ในรูปที่ 2.9 แสดงอิทธิพลของตัวแปรตามสมการที่ 2.4 ต่อการเกิดรังสีเอกซ์ ได้แก่ อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าของแอดโนด (i) เลขอะตอมที่ใช้ทำเป้า (Z) และศักดาไฟฟ้าแรง (kV) ตามลำดับ Duane และ Hunt ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เป็นปฏิภาคกลับกับ λ_0 ^[12] ดังนี้

$$V_e = hc / \lambda_0 = E \dots\dots\dots 2.5$$

- เมื่อ E คือ พลังงานของอิเล็กตรอนมีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์
- V คือ ศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} คูโลมป์)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Plank's constant = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที)



(ก) อิทธิพลของกระแส

(ข) อิทธิพลของเลขอะตอมของเป้า

(ค) อิทธิพลของค่าความต่างศักย์

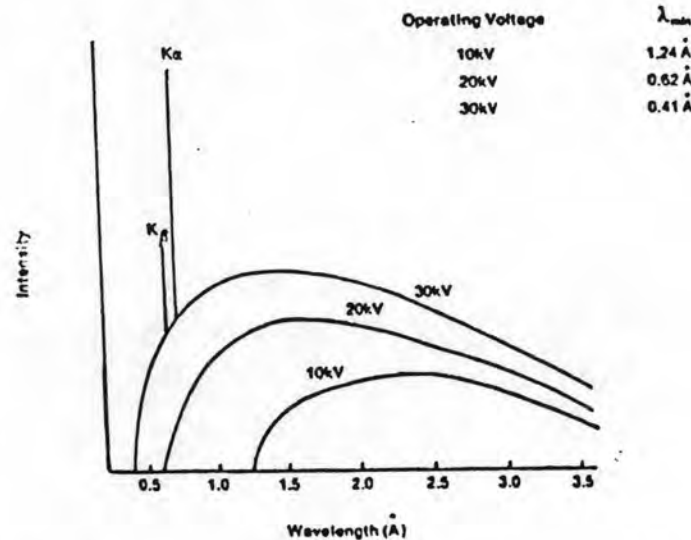
รูปที่ 2.9 สเปกตรัมแสดงอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ และเลขอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป้าต่อการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง^[10]

ผลของความต่างศักย์ (กิโลโวลต์) และกระแส (มิลลิแอมแปร์) ต่อการเกิดรังสีเอกซ์ภายในหลอดรังสีเอกซ์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลของศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อการเกิดรังสีเอกซ์

ศักดาไฟฟ้าสูง (กิโลโวลต์)	กระแส (มิลลิแอมแปร์)	
	กระแสดำ	กระแสสูง
ศักดาไฟฟ้าดำ	ความเข้มรังสีต่ำ รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ	ความเข้มรังสีสูง รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ
ศักดาไฟฟ้าสูง	ความเข้มรังสีต่ำ รังสีเอกซ์พลังงานสูง	ความเข้มรังสีสูง รังสีเอกซ์พลังงานสูง

ในรูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอกซ์จากหลอดรังสีเอกซ์ชนิดเป่าทำด้วยโมลิบดีนัมที่ผลิตออกมาใช้กับงานวิเคราะห์ธาตุ เมื่อแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าสูงที่เป่าเป็นชั้นๆ จาก 10, 20 และ 30 กิโลโวลต์ จะให้ปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.10 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องจากหลอดรังสีเอกซ์ซึ่งเป่าทำด้วยโมลิบดีนัมที่พลังงาน 10, 20 และ 30 kV

อย่างไรก็ตามปริมาณของอิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกจากไส้หลอด ไปทำอันตรกิริยากับเป่าโลหะนั้นจะเกิดอันตรกิริยาส่วนที่ทำให้มีการปลดปล่อยปริมาณรังสีเอกซ์ออกมาประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น อีก 99 เปอร์เซ็นต์ สูญเสียออกมาในรูปความร้อน ซึ่งความร้อนนี้จะถูกดูดกลืนอยู่ที่ผิวของเป่าโลหะ ดังนั้นในขณะที่ใช้งานจึงต้องมีระบบการระบายความร้อนจากเป่าโลหะเพื่อป้องกันการหลอมละลายเป็นไอภายในหลอดรังสีเอกซ์ ระบบระบายความร้อนนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีเอกซ์ ถ้าขนาดกำลังไฟฟ้าต่ำจะใช้ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ แต่ถ้าขนาดกำลังไฟฟ้าสูงระบบระบายความร้อนจะใช้น้ำหรือน้ำมัน นอกจากนี้การติดตั้งหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะต้องมีการกำบังรังสีให้รังสีเอกซ์ปฐมภูมิออกเฉพาะทิศทางการใช้งานเท่านั้นเพื่อป้องกันอันตรายจากรังสี

2.4 การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์ เป็นการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยคุณสมบัติของการเกิดรังสีเอกซ์เรืองเฉพาะระดับชั้นพลังงานของอะตอมในธาตุแต่ละชนิด

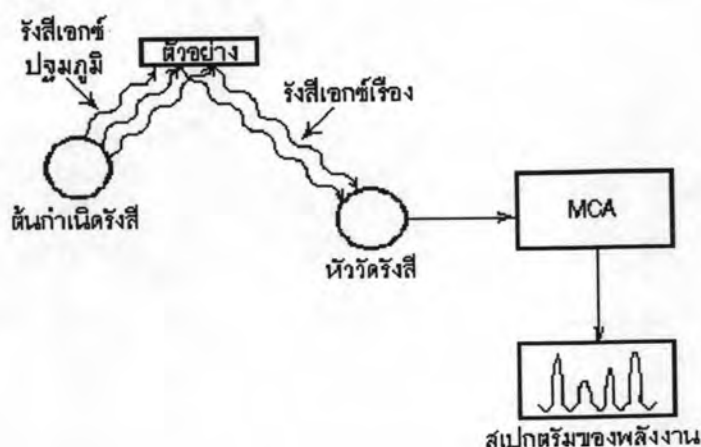
เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ การวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์เรืองที่ปลดปล่อยจากอะตอมธาตุในสารตัวอย่างโดยตรงเรียกว่า “การวิเคราะห์แบบแจกแจงพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry; EDS)” ระบบวิเคราะห์พื้นฐานประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน ดังในแผนภาพรูปที่ 2.11 ได้แก่

ก. ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (primary x-ray source) ได้แก่ ต้นกำเนิดรังสีชนิดไอโซโทปหรือต้นกำเนิดรังสีชนิดหลอดรังสีเอกซ์ ทำหน้าที่ปลดปล่อยรังสีปฐมภูมิเพื่อกระตุ้นให้อะตอมองค์ประกอบในตัวอย่างเกิดการเรืองรังสีเอกซ์

ข. หัววัดรังสีเอกซ์ (x-ray detector) ได้แก่ หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล หรือหัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำ [Si(Li), HPGe] เป็นต้น ทำหน้าที่แปรเปลี่ยนพลังงานของรังสีเอกซ์เรืองให้เป็นสัญญาณพัลส์ที่มีความสูงของพัลส์เป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์เรืองของแต่ละธาตุที่วัดได้

ค. เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (Multichannel analyzer) เป็นเครื่องมือที่ทำหน้าที่แจกแจงกลุ่มความสูงของพัลส์ที่พลังงานต่างๆ ให้เป็นสเปกตรัมของผลการวัด สำหรับใช้แปรผลวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพและปริมาณ

จากแผนภาพของระบบวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์ ในรูปที่ 2.11 เมื่อลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับอะตอมในชั้นตัวอย่างจะทำให้เกิดรังสีเอกซ์เรือง ปริมาณรังสีเอกซ์เรืองที่วัดได้จากหัววัดรังสีจะถูกส่งไปวิเคราะห์ เพื่อแจกแจงพลังงานที่เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่องและแสดงสเปกตรัมทางจอภาพ การวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณจะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากการเกิดอันตรกิริยาข้างเคียงต่างๆ ด้วย

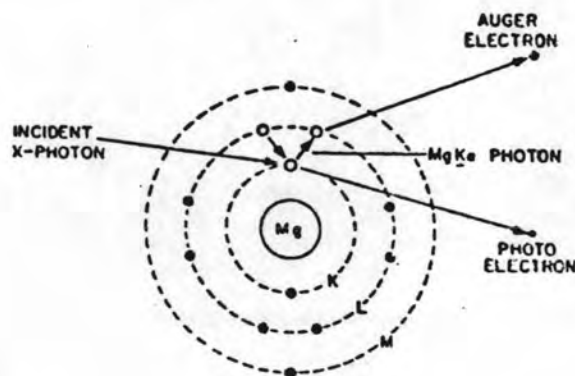


รูปที่ 2.11 แผนภาพของระบบวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีเรืองรังสีเอกซ์

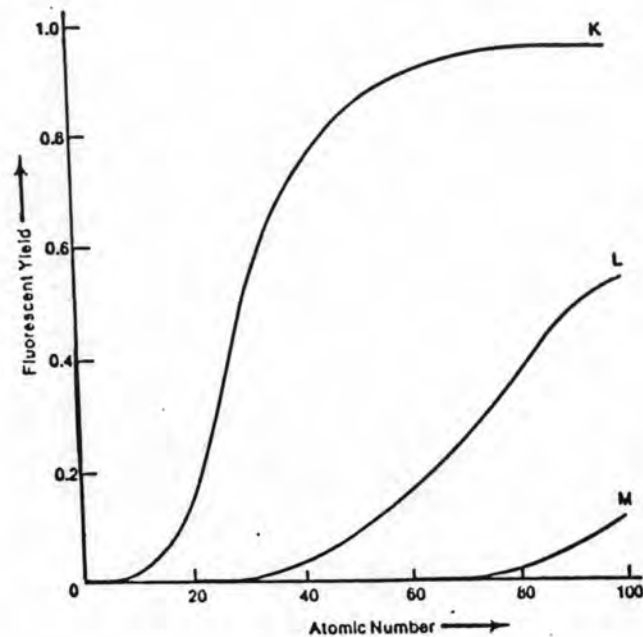
2.4.1 ยิลต์ของการเกิดรังสีเอกซ์เรืองและออเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron)

เมื่อพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับอะตอมในตัวอย่าง จะพบว่าถ้าพลังงานของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิมีพลังงานสูงกว่าค่าแอมซอร์บชันเอจ (absorption edge) ของชั้นโคจรรีอิเล็กตรอนในอะตอมใด จะมีโอกาสทำให้อิเล็กตรอนในชั้นโคจรมันหลุดออกมาจากชั้นโคจรซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)” อะตอมจะรักษาสภาวะสมดุลโดยอิเล็กตรอนในชั้นถัดไปจะลดพลังงานลงให้เท่ากับพลังงานของชั้นอิเล็กตรอนที่ว่างอยู่ด้วยการปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะระดับ พลังงานนั้นออกมาก่อนเข้าไปแทนที่เกิดการเรืองรังสีเอกซ์ขึ้น เช่น ถ้าพลังงานของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิสูงกว่าค่าแอมซอร์บชันเอจในชั้นโคจรเค (K-shell) จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอนในชั้นโคจรเคหลุดจากวงโคจร อิเล็กตรอนในชั้นถัดออกไปคือชั้นโคจรแอล (L-shell) จะลดพลังงานลงและเข้ามาแทนที่กันตามลำดับชั้น อย่างไรก็ตามรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นจากการแทนที่ในชั้นโคจรเคมีโอกาสทำอันตรกิริยาถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอนในชั้นแอล และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเรียกอิเล็กตรอนนี้ว่า “ออเจอร์อิเล็กตรอน” ดังแสดงปรากฏการณ์ในรูปที่ 2.12 การเกิดออเจอร์อิเล็กตรอนนี้มีผลให้ปริมาณรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ปฐมภูมิลดลง

การแทนที่ว่างในวงโคจรที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นภายในเวลา 10^{-9} - 10^{-16} วินาที ซึ่งอัตราการเกิดรังสีเอกซ์เรืองเฉพาะตัวต่อการเกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรเรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์ยิลต์ (fluorescent yield)” ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นตามเลขอะตอมของธาตุ และฟลูออเรสเซนซ์ยิลต์ในชั้นเคจะสูงกว่าชั้นแอล เอ็ม ตามลำดับ ฯลฯ ดังแสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ของฟลูออเรสเซนซ์ยิลต์ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 การเกิดออเจอร์อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.13 แสดงฟลูออเรสเซนซ์ยิลด์ที่ระดับวงโคจรของธาตุเลขอะตอมต่างๆ^[12]

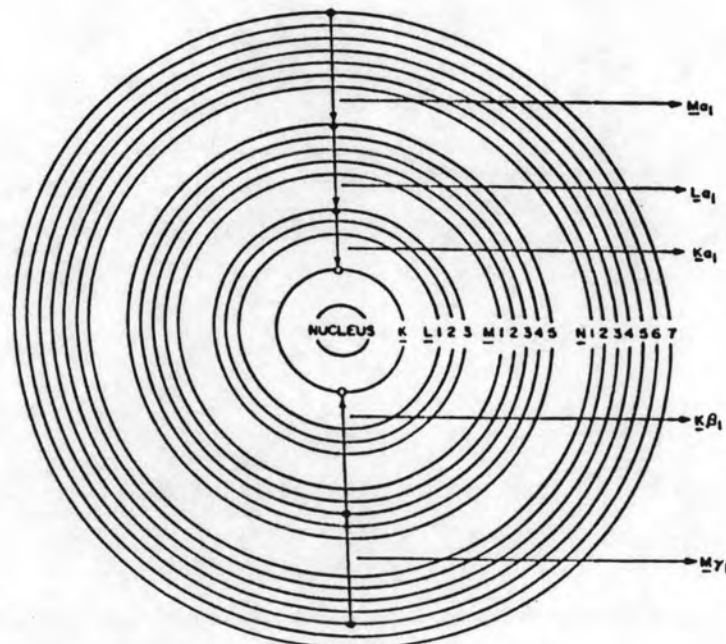
ฟลูออเรสเซนซ์ยิลด์ในชั้นโคจรวิเล็คตรอนต่างๆ ยิลด์จะสูงขึ้นเมื่อเลขอะตอมของธาตุมีค่าสูงขึ้น การที่ฟลูออเรสเซนซ์ยิลด์มีค่าน้อยกว่า 1 เนื่องจากรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในชั้นโคจรถัดออกไปในอะตอมและถูกดูดกลืนพลังงานเกิดออเจอร์อิเล็กตรอนแทนการเกิดรังสีเอกซ์เรืองนั่นเอง

โอกาสในการเปลี่ยนภาวะพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานหนึ่งมายังระดับพลังงานหนึ่งนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) กล่าวคือ การเปลี่ยนภาวะอิเล็กตรอนจะมีลักษณะคล้ายกับการสั่นของไดโพลไฟฟ้า (electric dipole)^[13] ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อสภาวะของค่าความต่างเลขควอนตัมออร์บิทัล (Δl) ต่างกันหนึ่ง และค่าของเลขควอนตัมแม่เหล็ก (m_l) ต่างกันเท่ากับศูนย์หรือหนึ่ง จึงเป็นไปตามกฎการคัดเลือก (selection rule) สำหรับสภาวะหนึ่งไปยังอีกสภาวะหนึ่งคือ $\Delta l = +1, -1$ และ $m_l = 0, +1, -1$ เท่านั้น ในโครงสร้างของอะตอมนั้นจะมีชั้นโคจรวิเล็คตรอนที่มีจำนวนระดับชั้นพลังงานต่างๆ กันไปตามคุณสมบัติเฉพาะของธาตุนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ตั้งแต่ชั้นในสุดคือ K,L,M... และชั้นย่อยของชั้นโคจร (sub shell) สามารถแจกแจงเป็นลำดับระดับพลังงานและตำแหน่งควอนตัมนับเบอร์ได้ตามตารางที่ 2.4

[11] เมื่อมีการกระตุ้นให้เกิดที่ว่างอิเล็กตรอนในชั้นโคจร อิเล็กตรอนในวงจรชั้นถัดออกไป จะมีโอกาสในการเปลี่ยนระดับพลังงานเข้ามาแทนที่ที่ว่างด้วยการปลดปล่อยรังสีเอกซ์และทำให้เกิดอนุกรมเส้นสเปกตรัม (spectrum line) รังสีเอกซ์เฉพาะระดับพลังงานของอะตอมธาตุ โดยใช้สัญลักษณ์เรียกชื่อเส้นสเปกตรัมของชั้นพลังงานต่างๆ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเรียกชื่อเส้นสเปกตรัมของการเปลี่ยนสภาวะของชั้นพลังงาน

การเปลี่ยนสภาวะ	สัญลักษณ์
L → K	$K\alpha$
M → K	$K\beta$
N → K	$K\gamma$
M → L	$L\alpha$
N → L	$L\beta$
O → L	$L\gamma$



รูปที่ 2.14 อนุกรมของเส้นสเปกตรัมรังสีเอกซ์จากการเปลี่ยนสภาวะระหว่างระดับพลังงาน

ตารางที่ 2.4 แสดงระดับของอิเล็กตรอนและตำแหน่งควอนตัมนับเบอร์

X-ray shell	No. of electron	Quantum number			s-p-d notation
		n	l	j	
K	2	1	0	1/2	1s 1/2
L I	2	2	1	1/2	2p 1/2
L II	2	2	1	1/2	2p 1/2
L III	4	2	1	3/2	2p 3/2
M I	2	3	0	1/2	3s 1/2
M II	2	3	1	1/2	3p 1/2
M II	4	3	1	3/2	3p 3/2
M IV	4	3	2	3/2	3d 3/2
M V	6	3	2	5/2	3d 5/2
N I	2	4	0	1/2	4s 1/2
N II	2	4	1	1/2	4p 1/2
N III	4	4	1	3/2	4p 3/2
N IV	4	4	2	3/2	4d 3/2
N V	6	4	2	5/2	4d 5/2
N VI	6	4	3	5/2	4f 5/2
N VII	8	4	3	7/2	4f 7/2

นอกจากนี้ในชั้นโคจรรย่อยแต่ละชั้นโคจรจะมีเลขกำกับ เช่น เส้นสเปกตรัมรังสีเอกซ์จากชั้นโคจรรย่อย MII ในชั้นโคจร M มายัง K เรียก K_{β_1} ทำนองเดียวกันรังสีเอกซ์จากชั้นโคจรรย่อย MI ในชั้น M มายัง K เรียก K_{β_2} เป็นต้น โอกาสในการเปลี่ยนชั้นพลังงานในชั้น L มา K จะสูงกว่าจาก M มา K ดังนั้นความเข้มรังสีเอกซ์ของเส้นสเปกตรัม K_{α} จะสูงกว่า K_{β} และในชั้นพลังงานย่อยของเส้นสเปกตรัม K_{α_1} จะสูงกว่า K_{α_2} เป็นต้น

ส่วนความถี่ของรังสีเอกซ์ที่แผ่ออกมาเฉพาะตัวนั้น จะสัมพันธ์กับค่าของเลขอะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้นและจะเป็นไปตามกฎของมอสเลย์ (Moseley's law) คือ ^[12]

$$\nu = 1/\lambda = K(Z - \sigma)^2 \quad \dots\dots\dots 2.6$$

เมื่อ K = ค่าคงที่ที่เกิดขึ้นบนค่าความแตกต่างสำหรับอนุกรมของแถบสเปกตรัม

σ = ค่าคงที่ของการกำบัง (shielding constant) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง

$Z =$ เลขอะตอมของธาตุ (atomic number)

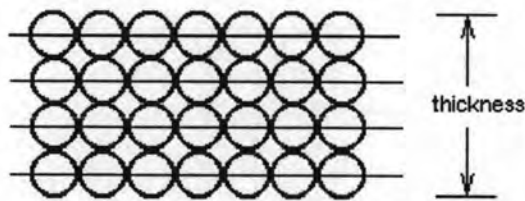
ในกรณีที่ค่าคงที่ของการกำบังรังสีมีค่าเท่ากับหนึ่ง สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$V = K(Z - 1)^2 \dots\dots\dots 2.7$$

2.4.2 การดูดกลืนพลังงานรังสีเอกซ์ปฐมภูมิในตัวอย่าง

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะประกอบด้วยอะตอมของธาตุองค์ประกอบเรียงตัวกันเป็นระนาบและชั้นเกิดเป็นชั้นความหนา ดังในรูปที่ 2.15 เมื่อรังสีเอกซ์ปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างดังในรูปที่ 2.16 จะเกิดอันตรกิริยาซึ่งมีผลต่อการเกิดรังสีเอกซ์เรือง 3 ชนิด คือ

- ก. รังสีเอกซ์ส่วนหนึ่งทะลุผ่านตัวอย่างมีความเข้มรังสีเท่ากับ $I(\lambda_0)$
- ข. รังสีเอกซ์ส่วนหนึ่งกระเจิงออกจากตัวอย่างทั้งแบบ โคฮีเรนต์ (coherent, λ_0) และอินโคฮีเรนต์ (incoherent, λ_c)
- ค. รังสีเอกซ์ส่วนที่ถูกดูดกลืนพลังงานในชั้นตัวอย่างกระตุ้นอะตอมให้เกิดรังสีเอกซ์เรือง

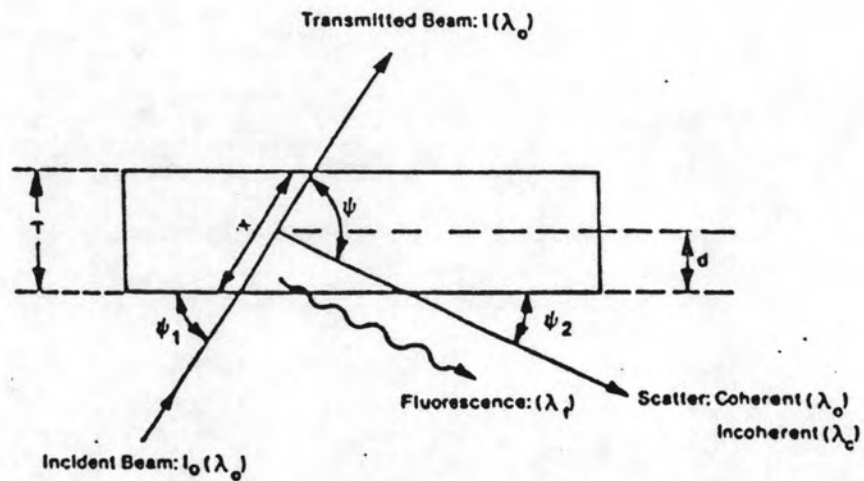


รูปที่ 2.15 แสดงการจัดเรียงตัวของระนาบอะตอมเป็นชั้นความหนา

ปริมาณรังสีเอกซ์ส่วนที่ผ่านตัวอย่างออกไป ขณะที่รังสีเอกซ์ปฐมภูมิตกกระทบผิวตัวอย่างทำมุม ψ_1 สามารถพิจารณาได้จากสมการ

$$I(\lambda_0) = I_0(\lambda_0) \exp(-\mu_m \rho x) \dots\dots\dots 2.8$$

- เมื่อ μ_m คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนปริมาณรังสีเชิงมวล
- ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง
- x คือ ระยะทางที่ลำรังสีปฐมภูมิเคลื่อนผ่าน



- T = Sample Thickness
- x = Path Length
- d = Penetration Depth
- ψ_1 = Incident Angle
- ψ_2 = Take-Off Angle
- ψ = Scattering Angle
- μ = Mass Absorption Coefficient
- ρ = Density

- Transmitted Beam Intensity: $I(\lambda_0) = I_0(\lambda_0) \exp(-\mu \rho x)$
- Incoherent Scatter Wavelength: $\lambda_c - \lambda_0 = 0.0243 [1 - \cos \psi]$
- Fluorescence Penetration Depth: $d = x \sin \psi_2$

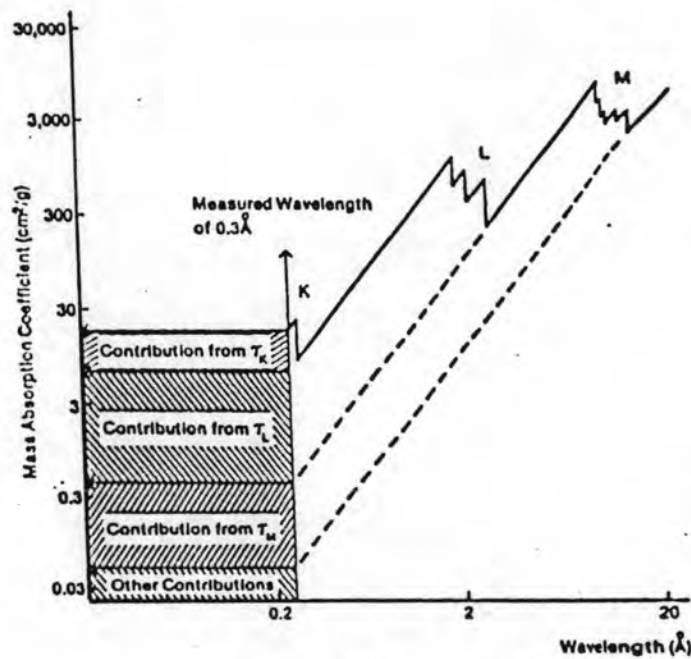
รูปที่ 2.16 การเกิดอันตรกิริยาของลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับสารตัวอย่าง

จากสมการ 2.8 จะเห็นว่าปริมาณรังสีส่วนที่ไม่ได้ทะลุผ่านชั้นตัวอย่างไป เป็นปริมาณรังสีส่วนที่ทำอันตรกิริยากับอะตอมธาตุและถูกดูดกลืนพลังงานไว้ โดยสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานเชิงมวล ซึ่งมีโอกาสที่จะลดทอนปริมาณรังสีได้จากการทำอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กตริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน แพร่โพตรดิชัน ดังนั้นตามปกติการลดทอนปริมาณรังสีเชิงมวลจึงเป็นผลรวมของโอกาสการเกิดอันตรกิริยาดังนี้

$$\mu_m = \tau + \sigma + \pi$$

- เมื่อ τ = โอกาสของการเกิดการดูดกลืนพลังงานเมื่อเกิดอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก
- σ = โอกาสของการดูดกลืนพลังงานเมื่อเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตัน
- π = โอกาสของการดูดกลืนพลังงานเมื่อเกิดแฟร์โพรดักชัน

ในกระบวนการวิเคราะห์ธาตุนั้นช่วงพลังงานที่ใช้วิเคราะห์มีโอกาสจะเกิดการดูดกลืนพลังงานจากอิทธิพลของการเกิดโฟโตอิเล็กทริกและการกระเจิงแบบคอมป์ตัน การวิเคราะห์ธาตุนั้นโดยใช้พลังงานต่ำโอกาสของการเกิดการดูดกลืนพลังงานส่วนใหญ่จะเกิดจากโฟโตอิเล็กทริก ค่าความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานเชิงมวลที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกในแต่ละชั้นพลังงานจะมีลักษณะ ดังในรูปที่ 2.17 ซึ่งเป็นตัวอย่างการแจกแจงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานเชิงมวลของแบเรียม



Total Mass Absorption Coefficient for 0.3 Å Radiation by Barium = 26 cm²/g

$$\begin{aligned}
 T_{\text{Total}} &= T_K + [T_L + T_{L_{II}} + T_{L_{III}}] + [T_{M_I} + T_{M_{II}} + T_{M_{III}} + T_{M_V}] + \text{others} \\
 &= 18 + 7.5 + 0.45 + 0.05 \\
 &= 26
 \end{aligned}$$

รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแบเรียม^[12] ในระดับชั้นเค ชั้นแอล และชั้นเอ็ม ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของรังสีเอกซ์

จากเส้นกราฟรูปที่ 2.17 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานเชิงมวลต่างๆ จะเพิ่มขึ้นตามระดับชั้นพลังงาน และจะมีบริเวณที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

มีความชันเส้นกราฟเพิ่มขึ้นและตกลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งบริเวณที่ค่าพลังงานพอดีกับการดูดกลืนพลังงานของชั้นโคจรอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า “แอมซอร์บชันเอ็ดจ์” เมื่อตัวอย่างมีองค์ประกอบธาตุหลายธาตุค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจะขึ้นกับผลรวมของปริมาณลดทอนรังสีตามสัดส่วนน้ำหนักของธาตุแต่ละชนิด (weight fraction ;w_i)^[12] คำนวณได้จากสมการ

$$\mu_m \text{ (total)} = \sum (\mu_{mi} w_i) \dots\dots\dots 2.9$$

จะเห็นว่าปริมาณรังสีเอกซ์เรืองนอกจากจะขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิแล้วยังขึ้นกับพลังงานของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิด้วย รังสีเอกซ์เรืองจะมีปริมาณสูงสุดเมื่อพลังงานของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิมีค่ามากกว่าเคแอมซอร์บเอ็ดจ์ของธาตุนั้นเล็กน้อย จากรูปที่ 2.16 ในการจัดวางอุปกรณ์การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เรืองอย่างมีประสิทธิภาพจะต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ของความลึกของรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนผ่านตัวอย่าง (depth of penetration ;d) ดังนี้

$$d = x \sin \psi_2 \dots\dots\dots 2.10$$

เมื่อ ψ_2 = มุมที่เกิดขึ้นระหว่างหัววัดรังสีกับตัวอย่าง

ถึงแม้ว่าความลึกของการทะลุผ่านจะเป็นสัดส่วนกับมุมตามสมการ 2.10 แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบคอลลิเมเตอร์ อุปกรณ์จัดวางแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ และหัววัดรังสีมักมีอุปสรรค โดยทั่วไปค่ามุม ψ_2 จะอยู่ระหว่าง 30° และ 45°^[4,11] และค่า d โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ผ่านระยะทาง x

2.4.3 ผลของความหนาของสารตัวอย่างกับปริมาณรังสีเอกซ์เรือง

จากอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับสารตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าความหนาเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรังสีเอกซ์เรือง ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างหนาและบางจึงมีผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองรังสีเอกซ์ด้วย กันน์ (Gunn) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของธาตุและความหนาของตัวอย่างซึ่งมีความหนาสม่ำเสมอตามระนาบการจัดวางอุปกรณ์ในรูปที่ 2.16 ไว้ดังนี้^[4]

$$dI = k (\text{csc} \psi_1) I_0 \exp - \{ [(\mu/\rho)_{\lambda_0} \text{csc} \psi_1 + (\mu/\rho)_{\lambda_1} \text{csc} \psi_2] \rho t \} dt \dots 2.11$$

- เมื่อ I_0 = ความเข้มของรังสีเอกซ์จากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบสารตัวอย่าง
 ψ_1 = มุมระหว่างจุดกึ่งกลางของลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับแผ่นสารตัวอย่าง
 ψ_2 = มุมระหว่างจุดกึ่งกลางของลำรังสีเอกซ์เรียงกับแผ่นสารตัวอย่างหรือมุม
 ของรังสีเอกซ์เรียงที่เคลื่อนไปยังหัววัดรังสี (the take off angle)
 λ_0, λ_f = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ และรังสีเอกซ์เรียงตามลำดับ
 μ/ρ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของสารตัวอย่าง (cm^2/g)
 ρ = ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง (g/cm^3)
 t = ความหนาของแผ่นสารตัวอย่าง (cm)
 k = ค่าคงที่

ก. สารตัวอย่างแบบบาง (thin film sample)

การเตรียมสารตัวอย่างที่บางมากจะช่วยลดผลจากการดูดกลืนและการเสริม (absorption-enhancement effect) ความเข้มรังสีเอกซ์เรียงของสารตัวอย่าง โดยพิจารณาจากสมการ 2.11 เมื่อความหนา t ของสารตัวอย่างบางมาก และ $(\mu/\rho)\lambda_0$ กับ $(\mu/\rho)\lambda_f$ มีค่าประมาณศูนย์ ในกรณีนี้สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$dI = k (\csc\psi_1) I_0 dt \quad \dots\dots\dots 2.12$$

$$\text{หรือ } \Delta I = k (\csc\psi_1) I_0 \Delta t \quad \dots\dots\dots 2.13$$

ถ้าพื้นที่ของสารตัวอย่างคงที่จะได้ว่า $\Delta N \propto \Delta t$ เมื่อ N คือ จำนวนของอะตอมที่อยู่ในสารตัวอย่าง ดังนั้นสมการที่ 2.13 จะเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังนี้

$$\Delta I = k' (\csc\psi_1) I_0 \Delta N \quad \dots\dots\dots 2.14$$

เมื่อ $k' =$ ค่าคงที่เมื่อ $\Delta N \propto \Delta t$

สมการที่ 2.14 จะเห็นว่า ΔI จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ΔN นั่นคือ

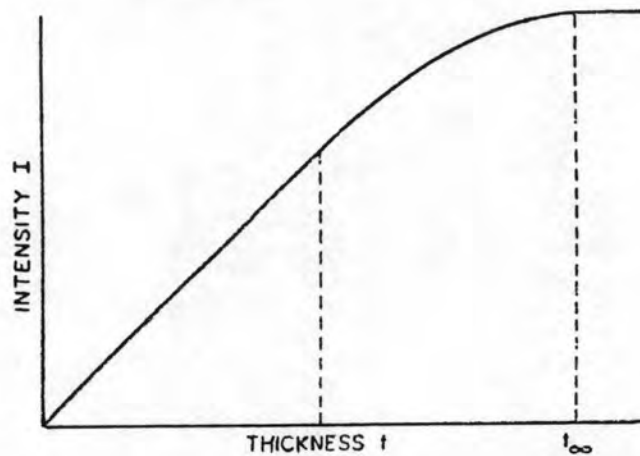
$$\Delta I \propto \Delta N$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.13 และ 2.14 สรุปได้ว่า ความเข้มของรังสีเอกซ์เรียงจากสารตัวอย่างจะแปรผันตรงกับความหนาหรือจำนวนอะตอมของสารตัวอย่างที่ต้องการ

วิเคราะห์

ข. สารตัวอย่างแบบหนา (thick sample)

เมื่อสารตัวอย่างมีความหนาเพิ่มขึ้นความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองจะเพิ่มขึ้นอย่าง เป็นสัดส่วนจนกระทั่งถึงความหนาค่าหนึ่งจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ดังแสดงในเส้นกราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนาของสารและความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองในรูปที่ 2.18



รูป 2.18 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความหนาของสารตัวอย่าง และความเข้มรังสีเอกซ์เรือง

การเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่หนึ่งจะเป็นช่วงของความหนาแบบบาง ส่วนช่วงที่ 2 ความหนาของสารตัวอย่างปานกลางซึ่งช่วงนี้ความเข้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารตัวอย่างหนาขึ้น แต่จะเห็นว่าในช่วงนี้ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟจะเริ่มไม่เป็นเส้นตรง เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นมากๆ ความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองจะเริ่มคงที่ และช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ใช้สารตัวอย่างหนาเกินความจำเป็น เพราะไม่ว่าจะให้สารตัวอย่างหนาเพิ่มขึ้นอีกก็ตาม ความเข้มรังสีเอกซ์เรืองก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีกเลย ในทางปฏิบัติถ้าพิจารณาจากกราฟและคุณสมบัติของรังสีเอกซ์แล้วนั้น ในการเตรียมสารตัวอย่างแบบบางนั้นมิได้เตรียมได้ง่ายนัก แม้ว่าจะมีผลดีในการลดการดูดกลืนและเสริมรังสีเอกซ์เรืองลงก็ตาม ส่วนการเตรียมสารตัวอย่างให้หนาอยู่ในช่วงที่ 3 จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีเอกซ์ แต่เมื่อหนามากไปจะสิ้นเปลืองสารตัวอย่างมาก จึงจำเป็นต้องหาความหนาพอดีหรือความหนาวิกฤตของสารตัวอย่าง (critical thickness) ดังนี้^[4]

$$dI_t = k (\text{csc} \psi_1) I_0 \exp - \left\{ [(\mu/\rho)_{\lambda_0} \text{csc} \psi_1 + (\mu/\rho)_{\lambda_1} \text{csc} \psi_2] \rho t \right\} dt$$

$$\text{ถ้าให้ } \bar{\mu} = [(\mu/\rho)_{\lambda_0} \text{csc}\psi_1 + (\mu/\rho)_{\lambda_1} \text{csc}\psi_2]$$

และ $I_t =$ ความเข้มของความหนาใด ๆ สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} I_t &= k I_0 (\text{csc}\psi_1) \int_0^t \exp[-(\bar{\mu}\rho t)] dt \\ &= \frac{k I_0 (\text{csc}\psi_1) [1 - \exp(-\bar{\mu}\rho t)]}{\bar{\mu}\rho} \dots\dots\dots 2.15 \end{aligned}$$

ถ้า $t \rightarrow \infty$ สมการที่ 2.11 จะเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ว่า

$$I_\infty = \frac{k I_0 \text{csc}\psi_1}{\bar{\mu}\rho} \dots\dots\dots 2.16$$

นำสมการที่ 2.15 หารด้วย 2.16 จะได้

$$I_t / I_\infty = 1 - \exp(-\bar{\mu}\rho t) \dots\dots\dots 2.17$$

จากสมการ 2.17 สามารถหาความหนาของวิกฤตได้ โดยแทนค่า $I_t = 0.999$ จะได้สมการ

$$0.999 = 1 - \exp(-\bar{\mu}\rho t)$$

หรือ

$$\begin{aligned} t_c &= \frac{\ln(1 - 0.999)}{(-\bar{\mu}\rho)} \\ t_c &= \frac{6.908}{\bar{\mu}\rho} \dots\dots\dots 2.18 \end{aligned}$$

สมการที่ 2.18 คือ สมการสำหรับคำนวณหาค่าความหนาวิกฤตของสารตัวอย่าง จะให้ประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุหลายชนิดรวมกันอยู่ในสารตัวอย่าง เนื่องจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุนั้น เป็นการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้น และแปรผันตามความเข้มข้นของธาตุที่สนใจในตัวอย่างนั้นไม่ขึ้นกับความหนา .

อย่างไรก็ตามในกรณีที่สารตัวอย่างมีธาตุอื่นเป็นส่วนประกอบ (matrix elements) ธาตุองค์ประกอบจะมีผลต่อการเรืองรังสีเอกซ์ของธาตุที่สนใจและไม่เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นจริง เรียกว่า “ผลกระทบของธาตุองค์ประกอบ” (matrix effects) ซึ่งเป็นตัวแปรที่จะต้องนำพิจารณาในการวิเคราะห์ผลด้วย

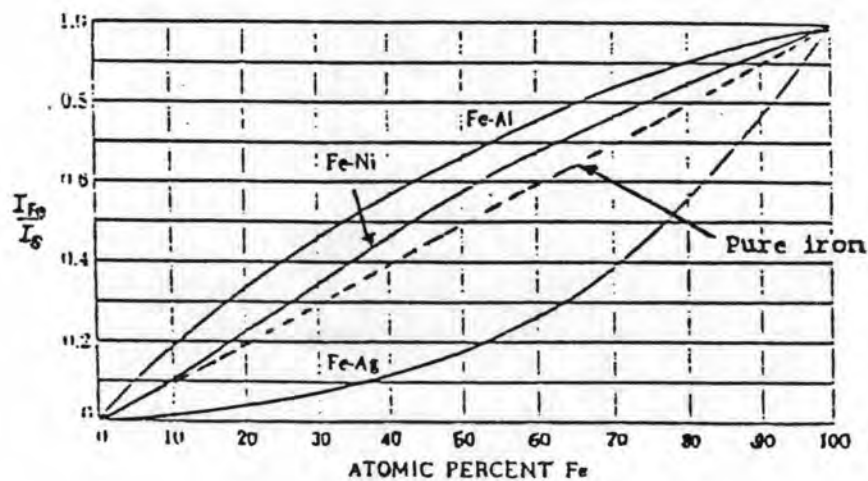
2.4.4 ผลกระทบของธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง

ธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะมีผลกระทบต่อการวิเคราะห์ธาตุที่สนใจใน 2 รูปแบบ คือ

ก) ผลจากการดูดกลืน (matrix absorption)

เมื่อสารตัวอย่างมีองค์ประกอบธาตุปนกันหลายชนิด ขณะที่รังสีเอกซ์ปฐมภูมิมีพลังงานสูงกว่าค่าแอมซอร์บชันแอดจ์ของธาตุในชั้นพลังงานใด ก็จะทำให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์ แต่ปริมาณรังสีเอกซ์เรืองของธาตุที่สนใจมีโอกาสสูญเสียไปเนื่องจากธาตุองค์ประกอบที่มีค่าการดูดกลืนพลังงานต่ำสามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุที่สนใจให้ลดน้อยลงได้

จากกราฟในรูปที่ 2.19 ถ้าเปรียบเทียบเส้นกราฟระหว่างความเข้มของ Fe K α ในเหล็กรูปของ Fe-Al กับในเหล็กรูปของ Fe-Ag จะพบว่าที่ความเข้มข้นของเหล็กเท่ากัน เหล็กที่มีองค์ประกอบในรูป Fe-Al จะให้ความเข้มของ Fe K α ออกมามากกว่าเนื่องจาก Fe-Al มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์น้อยกว่า Fe-Ag นั่นเอง



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงอัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของโลหะผสม (I_{Fe}) Fe-Ni และ Fe-Ag ต่อความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเหล็กบริสุทธิ์ (I_{Fe})

ข) ผลจากการเสริมรังสีเอกซ์ (enhancement or multiple excitation)

ผลจากการเสริมรังสีเอกซ์เกิดขึ้นจากการที่รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นจากรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ มีพลังงานสูงกว่าแอมชอร์บ์ชั้นเอ็ดจ์ของธาตุที่สนใจ รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุนั้นสามารถที่จะถูกกระตุ้นให้ธาตุที่สนใจเกิดรังสีเอกซ์เรืองได้ด้วยอีกทางหนึ่ง ปรากฏการณ์เช่นนี้จะมีผลมากในกรณีที่พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุหนึ่งมีค่าสูงกว่าแอมชอร์บ์ชั้นเอ็ดจ์ของอีกธาตุหนึ่งเล็กน้อย ดังแสดงให้เห็นในเส้นกราฟรูป 2.19 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความเข้มของ Fe K α ใน Fe-Ni กับในเหล็กบริสุทธิ์ (เส้นประ) จะเห็นว่าความเข้มของ Fe K α ใน Fe-Ni สูงกว่า ทั้งนี้เพราะผลของการเสริมรังสีเอกซ์ กล่าวคือ Ni มีค่า K แอมชอร์บ์ชั้นเอ็ดจ์ 7.477 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งพอเหมาะที่จะกระตุ้นให้เหล็กเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ เหล็กจึงเกิดรังสีเอกซ์เรืองจากการกระตุ้นของรังสีเอกซ์ 2 ทาง คือ จากรังสีเอกซ์เคของนิกเกิล และจากรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ

จากตัวอย่างผลกระทบทั้งสองแบบข้างต้นที่กล่าวมา จะเห็นว่าแม้ส่วนประกอบมีเพียงธาตุ 2 ชนิดที่ต่างกัน ก็สามารถทำให้ผลการเกิดรังสีเอกซ์เรืองเฉพาะธาตุผิดไปได้ และมีผลทำให้การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณผิดไปได้มาก จึงต้องมีการคำนวณปรับแก้ผลของความคลาดเคลื่อนเหล่านี้

2.4.5 ผลของการจัดอุปกรณ์วิเคราะห์ต่อการเกิดรังสีเอกซ์เรือง

ก. ผลจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ [2]

การปรับเปลี่ยนความไว (sensitivity) ของการกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เรืองทำได้โดยการปรับเปลี่ยนกระแสและศักดาไฟฟ้าสูงให้เหมาะสม แต่มีข้อจำกัดที่ขนาดทนกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีเอกซ์ ซึ่งในส่วนนี้จะมีผลต่ออายุการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์ด้วย ดังนั้นการเลือกใช้ศักดาไฟฟ้าสูง (kV) สำหรับงานวิเคราะห์จะมีหลักการเลือกใช้ ดังนี้

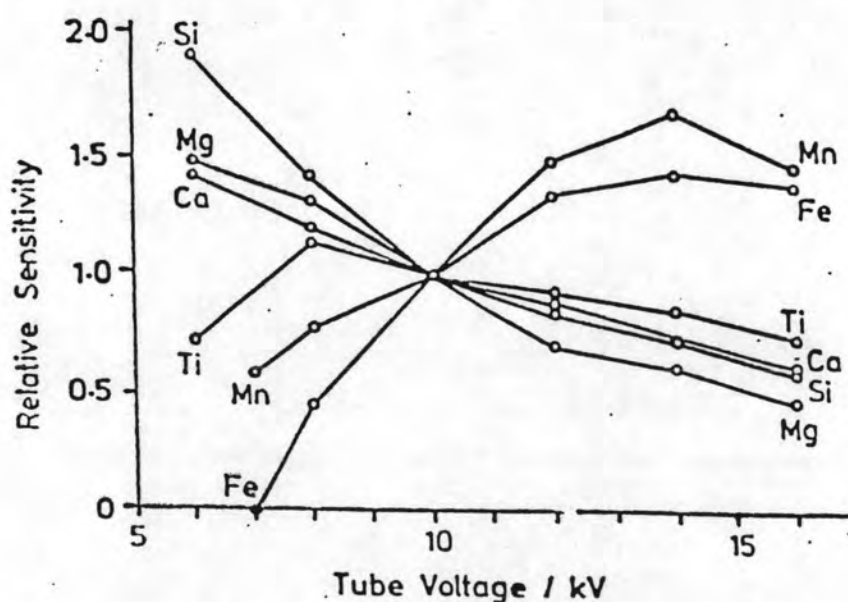
(1) การเลือกศักดาไฟฟ้าสูงให้เหมาะสมสำหรับงานวิเคราะห์ของสารตัวอย่างที่สนใจ จะต้องเลือกให้อัตราส่วนของฟีกต่อแบกกราวด์ (background) สูงสุดสำหรับธาตุต่าง ๆ ในตัวอย่าง และการเลือกศักดาไฟฟ้าสูงควรพิจารณาให้สัมพันธ์โดยตรงกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ในตัวอย่าง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นๆ ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของธาตุแต่ละธาตุในตัวอย่างและความหนาของเนื้อสาร ดังแสดงในตารางที่ 2.5 อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการปรับกระแสจะต้องพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ด้วย ถ้าปรับศักดาไฟฟ้าสูงของหลอดรังสีเอกซ์สูงค่ากระแสก็ต้องลดลงให้พอเหมาะด้วย เพื่อป้องกันความเสียหายของหลอด

ตารางที่ 2.5 ความหนาของธาตุตัวอย่างกับช่วงพลังงานที่เหมาะสม

ธาตุ	ความหนา (ไมครอน)	ช่วงพลังงานต่ำสุดของธาตุ (keV)
เซลลูโลส		2.4 - 4.0
อะลูมิเนียม	50 - 500	3.0 - 8.0
ไทเทเนียม	12.5	5.0 - 10
เหล็ก	12.5	6.5 - 12
โคบอลต์	12.5	7.0 - 12
ทองแดง	100 - 250	10 - 50
โมลิบดีนัม	50 - 125	7 - 20*
โรเดียม	50 - 125	7 - 20*
เงิน	50 - 125	7 - 20

* หมายเหตุ : เมื่อวัดคุณนิตน์โดยทั่วไปจะเลือกให้ขึ้นกับเป้าโลหะของหลอดรังสีเอกซ์

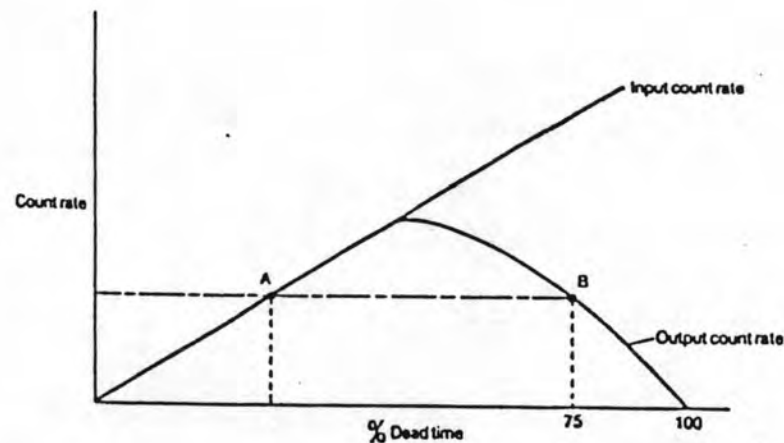
(2) คักดาไฟฟ้าสูงที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุเดี่ยว จะต้องมามีค่าค่อนข้างสูงกว่าพลังงานแอมบอร์บชั้นเอดจ์ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เล็กน้อย แต่ถ้าการวิเคราะห์ธาตุมากกว่าหนึ่งธาตุขึ้นไป คักดาไฟฟ้าสูงควรเลือกให้อยู่ในช่วงที่ดีที่สุดซึ่งสามารถให้ผลการวิเคราะห์ของแต่ละธาตุได้ ในรูปที่ 2.20 แสดงความไวของการวิเคราะห์กลุ่มธาตุเบาปนกันที่คักดาไฟฟ้าต่างกัน จะเห็นว่าความไวในการวิเคราะห์ธาตุแต่ละธาตุในตัวอย่างที่คักดาไฟฟ้าต่างกัน จะไม่เท่ากันแต่จะมีค่าคักดาไฟฟ้าหนึ่งที่เหมาะสมทำให้ความไวในการวิเคราะห์กลุ่มธาตุเท่ากัน



รูปที่ 2.20 ผลของคักดาไฟฟ้าสูงที่แอโนดต่อความไวในการวิเคราะห์ธาตุ [2]

(3) การเลือกศักดาไฟฟ้าสูงเกินไปเกินความจำเป็น ทำให้เกิดแบกกราวด์ที่ไม่ต้องการขึ้นจำนวนมากได้เนื่องจากพลังงานที่สูงกว่าค่าแอมบอริบชั้นเอ็ดจ์ของธาตุที่ชั้นพลังงานต่างๆจะเกิดขึ้น และเกิดการรบกวนการวิเคราะห์ธาตุที่สนใจทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดมาก

การปรับค่ากระแสสำหรับจุดใส่หลอดรังสีเอกซ์ (มิลลิแอมแปร์) เป็นการเพิ่มปริมาณรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ การเพิ่มขึ้นนี้เป็นผลทำให้อัตราการนับจากตัวอย่างเพิ่มขึ้นหรือความไวในการวิเคราะห์ธาตุเพิ่มขึ้น โดยปกติการปรับกระแสจะปรับให้ค่าเวลาที่สูญเสียชีวิตกับการวิเคราะห์พลังงาน (dead time) ของเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่องไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ การวิเคราะห์โดยทั่วไปถ้าค่าเวลาที่เสียไปกับการวิเคราะห์พลังงานสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ผลการวิเคราะห์จะมีค่าความผิดพลาดสูง และเกิดการสูญเสียปริมาณวัดรังสีเอกซ์เรื่องมาก ดังในรูป 2.21



รูปที่ 2.21 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับรังสีกับค่าเวลาที่เสียไปกับการวิเคราะห์พลังงาน

ข. คอลลิเมเตอร์ (collimators) ^[2]

การใช้คอลลิเมเตอร์กับการจัดระบบการวัดแบบแจกแจงพลังงานนั้น จะมีการใช้คอลลิเมเตอร์อยู่สองตำแหน่ง คือ ระหว่างหลอดรังสีเอกซ์กับตัวอย่างซึ่งจะเรียกว่าคอลลิเมเตอร์ปฐมภูมิ (primary collimators) และระหว่างตัวอย่างกับหัววัดรังสีจะเรียกว่าคอลลิเมเตอร์ทุติยภูมิ (secondary collimators) ถ้าจะเปรียบเทียบระหว่างคอลลิเมเตอร์ทั้งสองตำแหน่งนี้ คอลลิเมเตอร์ปฐมภูมิจำเป็นที่จะต้องใช้กับการจัดระบบอย่างมาก ด้วยเหตุผล 2 ประการ

1) ในกรณีที่ลํารังสีมีขนาดใหญ่ (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-3 cm.) ตัวอย่างมีความเข้มข้นสูง และมีการกระเจิงสูง ระบบวัดจะสูญเสียอัตราการนับสูงจากผลของค่าเวลาที่เสียไปกับการวิเคราะห์พลังงาน การใช้คอลลิเมเตอร์บังคับลํารังสีให้เล็กลง จะช่วยลดปริมาณรังสีที่ต้องการวัดลง

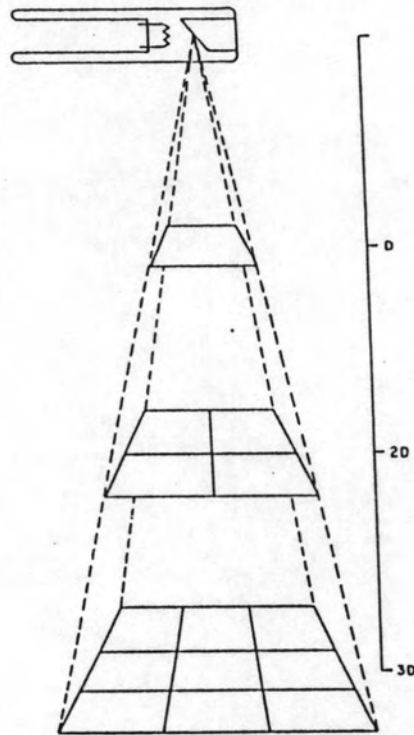
2) ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาณธาตุเฉพาะบริเวณเล็กๆ ของตัวอย่าง สามารถควบคุมพื้นที่วิเคราะห์ได้โดยการใช้คอลลิเลเตอร์ ซึ่งลํารังสีจะมีขนาดเล็กลงเป็น 1-2 มิลลิเมตร

ลํารังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่เดินทางผ่านมายังสารตัวอย่าง ซึ่งทางเดินของลํารังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิจะเป็นตามกฎกำลังสองผกผัน (Inverse square law) [4] ดังรูปที่ 2.22 จะเห็นว่ายิ่งระยะทางของลํารังสีที่เดินทางผ่านเพิ่มขึ้น ลํารังสีที่ตกกระทบจะเกิดการกระจายออกมากขึ้นและยิ่งทำให้ความเข้มแสงลดลงตามความสัมพันธ์ของสมการ

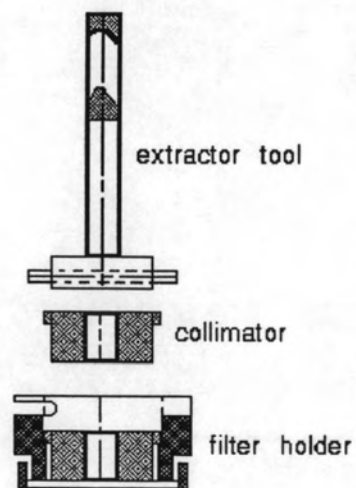
$$I_2 = I_1 (D_1)^2 / (D_2)^2 \quad \dots\dots\dots 2.19$$

เมื่อ I_1 = ความเข้มรังสีที่ระยะทาง D_1 จากต้นกำเนิดรังสี
 I_2 = ความเข้มรังสีที่ระยะทาง D_2 จากต้นกำเนิดรังสี

ส่วนประกอบของคอลลิเมเตอร์ที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.23 นี้ คอลลิเมเตอร์จะทำด้วยเหล็กกล้าเป็นรูปทรงกระบอก ด้านในของทรงกระบอกจะเป็นอะลูมิเนียมและถูกเคลือบด้วยคาร์บอน ลํารังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่ผ่านรูตรงกลางของทรงกระบอกนี้จะไม่เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเหล็กกล้าและอะลูมิเนียมแต่จะมีรังสีเฉพาะตัวของคาร์บอนเกิดขึ้น ซึ่งปกติระบบวิเคราะห์แบบแจกแจงพลังงานจะไม่สามารถวัดคาร์บอนได้ จึงเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนของพีคพลังงานของวัสดุที่ทำคอลลิเมเตอร์เข้าไปปะปนอยู่กับพีคพลังงานของสารตัวอย่าง



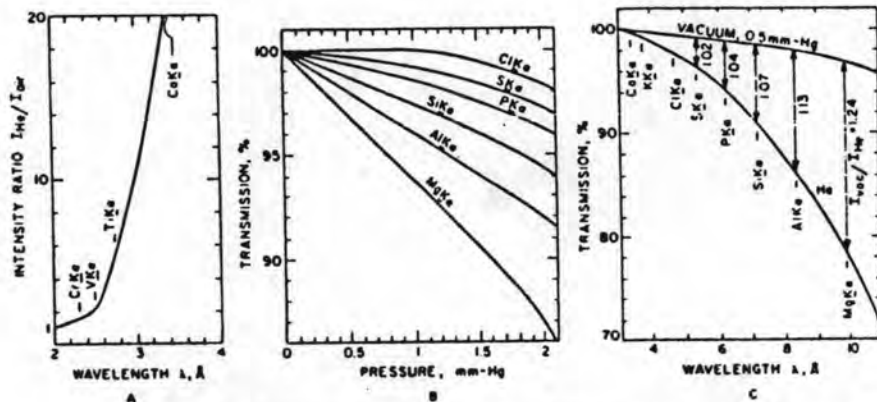
รูปที่ 2.22 กฎกำลังสองผกผัน



รูปที่ 2.23 แสดงภาพตัดขวางของคอลลิเมเตอร์

ค. ทางเดินของรังสีเอกซ์ (radiation path) [4]

รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นจากตัวอย่าง จะต้องเคลื่อนผ่านอากาศที่อยู่ระหว่างตัวอย่างและหัววัดรังสีในห้องวิเคราะห์ของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ มีผลให้เกิดการดูดกลืนพลังงานทำให้ความเข้มรังสีของธาตุที่มีพลังงานต่ำลดลงหรือหมดไป ดังนั้นเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่มีพิทักไกรวิเคราะห์ธาตุเบา จึงออกแบบให้ห้องวิเคราะห์อยู่ในสภาวะบรรยากาศของฮีเลียม (He) หรือในสภาวะสุญญากาศ (vacuum) ประมาณ 0.5 ทอร์ (torr) ถ้าบรรยากาศภายในอยู่ในสภาวะอากาศทั่วไปจะเหมาะกับการวิเคราะห์ธาตุที่มีความยาวคลื่นไม่เกิน 2.5 อังสตรอม แต่ถ้าในระบบสุญญากาศจะเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ธาตุที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 อังสตรอม และในสภาวะบรรยากาศของฮีเลียมจะเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ธาตุที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 อังสตรอม หรือ 4 อังสตรอมขึ้นไป ดังแสดงผลเปรียบเทียบใน 2.24 สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างประเภทของเหลวถ้าทำอยู่ในสภาวะสุญญากาศจะเกิดความเสียหายกับระบบ ควรจะวิเคราะห์ตัวอย่างประเภทของเหลวในสภาวะบรรยากาศของฮีเลียมดีกว่า และจะต้องใช้ภาชนะลักษณะพิเศษสำหรับตัวอย่างของเหลวอีกด้วย



Effect of radiation-path medium in the long-wavelength region. Data are for 25-cm path length. [J. H. Hoskins, *Norelco Reporter* 7, 111 (1960); courtesy of the author and Philips Electronic Instruments, Inc.] A. Transmission ratio for helium and air paths. B. Transmission for $K\alpha$ lines of elements 12-17 (Mg-Cl) as a function of pressure. C. Comparison of transmission for $K\alpha$ lines of elements 12-20 (Mg-Ca) in 0.5-mm Hg vacuum and in helium.

รูปที่ 2.24 ผลกระทบของรังสีเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางในสภาวะบรรยากาศที่แตกต่างกัน