

บทที่ 15

เอกซ์เรย์ สเปกโกรสโคปี

X-Ray Spectroscopy

สเปกโกรสโคปีรังสีเอกซ์คล้ายกับสเปกโกรสโกปีเชิงแสง การวิเคราะห์โดยรังสีเอกซ์ใช้หลักการวัด การปล่อย (เปล่ง) การดูดกลืน การกระเจิง พลุอօเรสเซนซ์ และการเลี้ยวเบนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีนี้ใช้ทำคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์

หลักการพื้นฐาน Fundamental principles

รังสีเอกซ์เป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น รังสีเอกซ์เกิดจากอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงสุดลดความเร่งหรือเกิดจากอิเล็กทรอนิกแ罈นซิชันของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสุด รังสีเอกซ์มีช่วงความยาวคลื่นจาก 10^{-5} ถึง 100 อังสตروم ช่วงที่ใช้วิเคราะห์ 0.1 ถึง 25 อังสตروم ($1 \text{ อังสตروم} = 0.1 \text{ นาโนเมตร} = 10^{-10} \text{ เมตร}$)

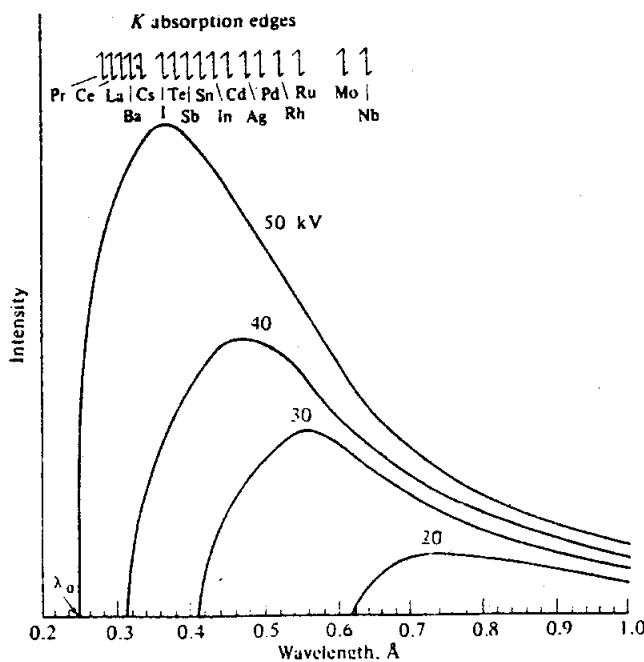
การปล่อยรังสีเอกซ์ (Emission of X-Ray)

รังสีเอกซ์ได้จากการวิธีต่าง ๆ สามวิธี (1) ใช้ลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงระดมยิงโลหะที่ใช้เป็นเป้า (2) ใช้ลำรังสีเอกซ์ชุดแรกฉายไปที่สารเพื่อให้เกิดลำรังสีเอกซ์ฟลุอօเรสเซนซ์ ชุดที่สอง (3) ได้จากการบวนการสุญญากาศของสารกัมมันตรังสีให้รังสีเอกซ์

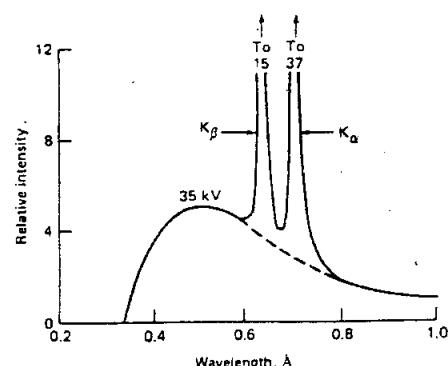
แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ให้สเปกตรัมแบบต่อเนื่องและแบบเส้น คล้ายกับรังสีอัลตราไวโอลেตและวิสิเบิล รังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องเรียกวิรังสีขาว (white radiation) หรือเบรมสตราhlung (Bremstrahlung) เบรมสตราhlungเกิดจากความหน่วงของอนุภาค

สเปกตร่าต่อเนื่องจากแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (Continuous Spectra from Electron Beam Sources) หลอดรังสีเอกซ์ให้สเปกตร้าแบบต่อเนื่อง เมื่อให้กระแสกับหลอด แคโทด จะร้อนและให้อิเล็กตรอนออกมานะ อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยจากแคโทดที่ร้อนจะถูกเร่งผ่านศักย์สูงที่ใส่คร่อมระหว่างเป้าและแคโทด เมื่ออิเล็กตรอนชนเป้า อิเล็กตรอนเหล่านี้จะลดความเร่งและ

หยุดนิ่งอย่างเร็ว โดยอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนจะถ่ายโอนพลังงานลงให้แก่อะตอมที่ใช้เป็นเป้า ส่วนหนึ่งของพลังงานลงจะถูกปล่อยออกมารีบกับรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องในช่วงความยาวคลื่นกว้างดังรูป 15-1 โดยมีความเข้มเป็นแถบกว้างและมีเส้นสเปกตรราหันอยู่บนแถบสเปกตรัมนี้ดังรูป 15-2 (เส้นสเปกตรานี้เกิดจากอิเล็กตรอนที่วิ่งชนป่าจะะลุเข้าไปชนอิเล็กตรอนวงในสุดของเป้า ทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดหลุดออกมานะ เป้าจึงไม่เสียร อิเล็กตรอนที่อยู่วงดัดไปจะวิ่งเข้าไปแทนที่ พร้อมกับให้รังสีเอกซ์แบบเส้น)



รูป 15-1 การกระจายรังสีแบบต่อเนื่องจากทดลองรังสีเอกซ์ ตัวเลขบนเคอร์ฟบอกค่าศักย์ที่ใช้เร่ง



รูป 15-2 เส้นสเปกตรัมของทดลองรังสีเอกซ์ที่มีเป้าเป็นโนลิบดีนัม

สเปกตรัมรังสีเอกซ์ในรูป 15-2 ที่ขึ้นจำกัดความยาวคลื่นสั้น λ_0 ขึ้นกับศักย์ที่ใช้เร่ง V แต่ไม่ขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำเป้า ดังนั้น λ_0 ที่ได้จากเป้าโมลิบเดียมที่ได้รับศักย์ 35 กิโลโวลต์ มีค่าเท่ากับ λ_0 ที่ได้จากเป้าหังส滕ที่ใช้ศักย์เท่ากัน

รังสีต่อเนื่อง ได้จากลำอิเล็กตรอนที่เกิดจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนในลำอิเล็กตรอนกับอะตอมของวัสดุที่ใช้เป็นเป้า การชนแต่ละครั้งอิเล็กตรอนจะลดความเร็วให้ไฟฟ่อนในรูปพลังงานรังสีเอกซ์ออกมา พลังงานของไฟฟ่อนรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานจนน์ของอิเล็กตรอนก่อนและหลังการชน ปกติ อิเล็กตรอนในลำลดความเร็วโดยการชนเป็นชุด (หลายครั้ง) พลังงานจนน์ที่ลดลงจากการชนแต่ละครั้งจึงมีค่าต่างกันเล็กน้อย ดังนั้น พลังงานของไฟฟ่อนรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมีปรับเป็นช่วงพลังงาน โดยพลังงานสูงสุดของไฟฟ่อนรังสีเอกซ์ที่ได้เกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนเพียงครั้งเดียวแล้วเหลือพลังงานจนน์เป็นศูนย์ จากปรากฏการณ์นี้จึงเขียนเป็นสมการได้

$$E = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = Ve \quad \dots\dots(15.1)$$

ผลคูณของศักย์ที่ใช้เร่งกับประจุบนอิเล็กตรอน (พลังงานจนน์ของอิเล็กตรอนในลำรังสี) h ค่าคงที่ของพลังค์ c ความเร็วแสง v , ความถี่สูงสุดของรังสีเกิดที่ศักย์ V λ_0 ขึ้นจำกัดความยาวคลื่นตำแหน่งสุดของรังสีเป็นอังสตรอม สมการนี้เรียกว่ากฎดาวน์ฮันต์ (Duane-Hunt law) เมื่อแทนค่าคงที่ต่าง ๆ ลงในสมการ 15-1

เมื่อ

E เป็นอิเล็กตริก

$$E = \frac{6.624 \times 10^{-34} \times 2.998 \times 10^{10}}{\lambda_0}$$

เมื่อ

E เป็นอิเล็กตรอนโวลต์และ λ เป็นอังสตรอม

$$E = \frac{6.624 \times 10^{-34} \times 2.998 \times 10^{10}}{1.6024 \times 10^{-12} \times \lambda_0 \times 10^{-8}}$$

$$E = \frac{12,398}{\lambda_0} = Ve$$

$$\lambda_0 = \frac{12,398}{Ve} \quad \dots\dots(15.2)$$

สมการ 15.1 ใช้หาค่าคงที่ของพลังค์

ตัวอย่าง จงคำนวณขีดจำกัดความยาวคลื่นสั้นของหลอดรังสีเอกซ์ที่ทำงานที่ 50 กิโลโวลต์

$$V = \frac{12.400}{50 \times 10^3}$$

$$= 0.248 \text{ อังสตรอม}$$

จงหาศักย์ต่ำสุดที่ต้องใช้เพื่อให้หลอดรังสีเอกซ์กระตุ้นเส้นต่อไปนี้ $Wl\alpha$, $CuK\alpha$ และ $PbK\alpha$

จากสมการ	$V = \frac{12.400}{\lambda}$
สำหรับ $Wl\alpha$	$V = \frac{12.400 \text{ โวลต์}}{1.025 \text{ อังสตรอม}} = 12.1 \text{ กิโลโวลต์}$
สำหรับ $CuK\alpha$	$V = \frac{12.400 \text{ โวลต์}}{1.380 \text{ อังสตรอม}} = 8.99 \text{ กิโลโวลต์}$
สำหรับ $PbK\alpha$	$V = \frac{12.400 \text{ โวลต์}}{0.141} = 87.7 \text{ กิโลโวลต์}$

เส้นスペกตราจำเพาะจากแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (Characteristic line spectra from electron beam sources) เมื่ออิเล็กตรอนชนเป้าโนลิบเด็นมจะให้เส้นスペกตราที่มีความเข้มสูงที่ความยาวคลื่น 0.63 และ 0.71 อังสตรอม (63 และ 71 พิโภเมตร) นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของเส้นที่มีความยาวคลื่นในช่วง 4 ถึง 6 อังสตรอม

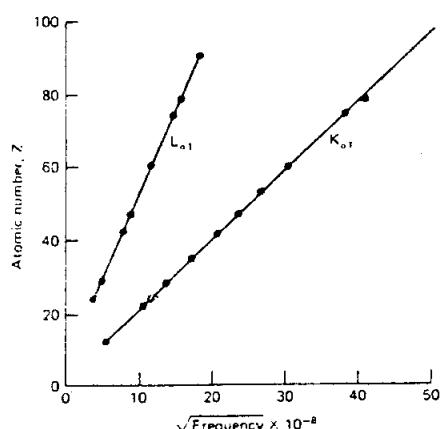
ราดูทุกชนิดที่มีน้ำหนักอะตอมมากกว่า 23 มีสมบัติคล้ายกับโนลิบเด็นม เส้นスペกตรา.rang siseokzที่ได้ไม่ซับซ้อนเหมือนกับเส้นอัลตราไวโอลেต เส้นスペกตราที่ได้มีสองอนุกรมอนุกรมที่มีความยาวคลื่นสั้นเรียกวอนุกรม K (K series) อีกอนุกรมหนึ่งมีความยาวคลื่นยาวเรียกวอนุกรม L (L series) ราดูที่มีเลขอะตอมน้อยกว่า 23 ให้เส้นスペกตราเฉพาะอนุกรม K ดังตาราง 15-1

ตาราง 15-1 ความยาวคลื่นสีเส้นเปล่งออกที่มีความเข้มข้นมากของธาตุบางธาตุ

ธาตุ	เลข อะตอม	อนุกรม K		อนุกรม L	
		α_1	β_1	α_1	β_1
Na	11	11.909	11.617		
K	19	3.742	3.454		
Cr	24	2.290	2.085	21.714	21.323
Rb	37	0.926	0.829	7.318	7.075
Cs	55	0.401	0.355	2.892	2.683
W	74	0.209	0.184	1.476	1.282
U	92	0.126	0.111	0.911	0.720

スペクトราังสีเอกซ์เกิดเมื่อศักย์ที่ใช้เร่งมีค่ามากกว่าศักย์ที่ใช้กระตุ้น ศักย์ที่ใช้ต้องเพิ่มขึ้นเมื่อธาตุมีเลขอะตอมเพิ่มขึ้น ถ้าศักย์ที่ใช้เร่งมีค่าน้อยกว่าศักย์ที่ใช้กระตุ้นจะไม่เห็นเส้นスペกตรา เช่น ศักย์ที่ใช้กระตุ้นโมลิบดีนัมมีค่าสูงกว่า 50 กิโลโวลต์ ถ้าศักย์ที่ใช้เร่ง (พลังงานจากลำอิเล็กตรอนที่ใช้ชน) โมลิบดีนัมมีค่า 70 กิโลโวลต์จะเห็นเส้นスペกตราดังรูป 15-2 แต่ถ้าศักย์ที่ใช้เร่งมีค่า 50 กิโลโวลต์จะไม่เห็นเส้นスペกตราแต่จะเห็นเป็นแบบแบบต่อเนื่อง ดังรูป 15-1

รูป 15-3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของรากที่สองของความถี่ของเส้น (K หรือ L) กับเลขอะตอมของธาตุที่มีต่ออนุกรม K หรือ L คุณสมบัตินี้พบโดย H.G.S. Moseley 1914



รูป 15-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกกับเลขอะตอม

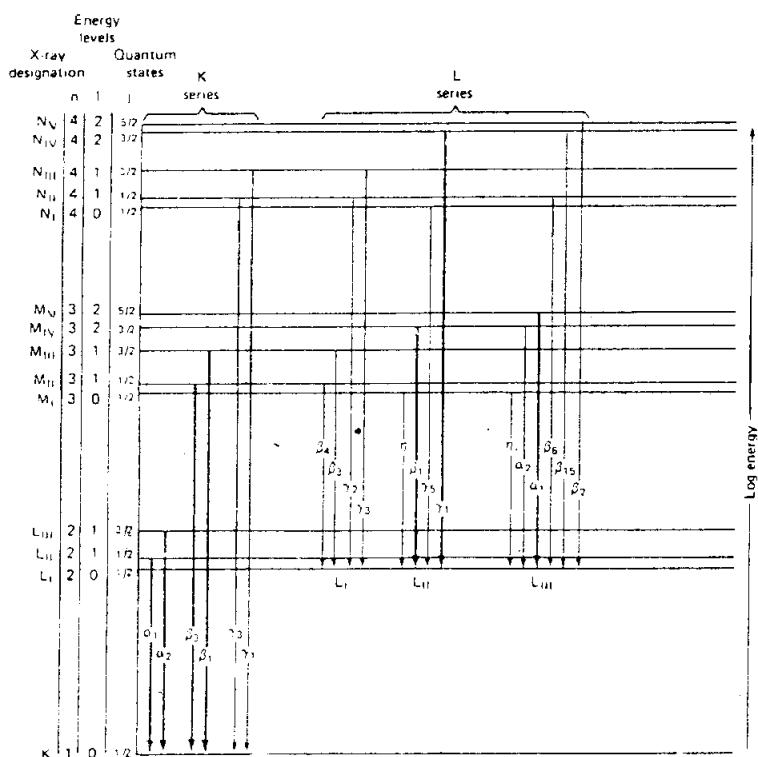
สเปกตรารังสีเอกซ์มักเกิดจากการแพรนซิชันทางไฟฟ้าของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสุด ความยาวคลื่นสั้nonุกรม K (K รังสีเอกซ์) เกิดเมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงสุดจากแคโทดชนนิวเคลียสของอะตอมที่ใช้เป็นเป้าและทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในสุดหลุดออกจาก (วง K, n = 1) เกิดเป็นไอออนที่อยู่ในสถานะกระตุ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในสุดหลุดออกมาก (วง K, n = 1) ไปแทนที่พร้อมกับปล่อยพลังงานออกมานะ (รังสีเอกซ์อนุกรม K) ถ้าอิเล็กตรอนวง L หลุดออกมานะและอิเล็กตรอนวง M วิ่งเข้าไปแทนที่จะปล่อยพลังงานออกมานะ (รังสีเอกซ์ อนุกรม L) อนุกรม K จะพบก่อนอนุกรม L (ความยาวคลื่นต่ำกว่า) ผลต่างของพลังงานที่เกิดจากการแพรนซิชัน α_1 และ α_2, β_1 และ β_2 มีค่าน้อยมาก ถ้าใช้อุปกรณ์ที่มีการแยกไม่ดีพลังงานนี้จะไม่แยกออกจากกันดังรูป 15-2

รูป 15-4 ผลต่างของพลังงานระหว่างระดับเพิ่มขึ้นเมื่อธาตุมีเลขอะตอมเพิ่มขึ้นหรือมีประจุในนิวเคลียสเพิ่มขึ้น อนุกรม K จึงพบที่ความยาวคลื่นสั้นที่สุด ผลของประจุในนิวเคลียสที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องเพิ่มศักย์ที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นด้วย เส้นรังสีเอกซ์ไม่ขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของธาตุ เพราะว่าการแพรนซิชันของเส้นเหล่านี้เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนไม่เกี่ยวกับพันธะ ตำแหน่งของเส้นรังสีเอกซ์ของโลหะที่บริสุทธิ์ โลหะชัลไฟด์หรือโลหะออกไซด์จะอยู่ที่เดียวกัน

เส้นสเปกตราฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescent line spectra) อาจได้จากการให้พลังงาน (อาบรังสี) แก่ธาตุหรือส่วนหนึ่งของสารประกอบโดยใช้พลังงานแบบต่อเนื่องจากหลอดรังสีเอกซ์ซึ่งจะกล่าวในตอนหลัง

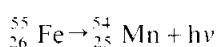
แหล่งกำเนิดกัมมันตรังสี (Radioactive sources) รังสีเอกซ์ได้จากการบวนการสลาย (decay) ของสารกัมมันตรังสีมีสองแบบ รังสีแกรมมาซึ่งคล้ายกับรังสีเอกซ์เพราะเกิดจากปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนที่อยู่ในไกลนิวเคลียส นิวเคลียสที่ให้แอลfa (α) และบีตา (β) แล้วตัวนิวเคลียสจะอยู่ในสถานะกระตุ้น นิวเคลียสนี้จะกลับสู่สถานะพื้นโดยการเปล่งรังสีแกรมมา (ให้พลังงานออกมานะ) การจับอิเล็กตรอน (Electron capture) หรือ K แคปเจอร์ อิเล็กตรอนวง K ถูกจับโดยนิวเคลียสเกิดเป็นธาตุใหม่ที่มีเลขอะตอมลดลงหนึ่ง เมื่อเกิดการจับอิเล็กตรอนวง K อิเล็กตรอนวงนอก L จะวิ่งเข้าไปแทนที่ได้เส้นรังสีเอกซ์ อิเล็กตรอนแคปเจอร์ที่เกิดจากการจับอิเล็กตรอนในวง L หรือ M มีโอกาสสน้อย ครึ่งชีวิตของการบวนการ K แคปเจอร์มีค่าจากสองสามนาทีถึงหลายพันปี

ตาราง 15-2 เป็นรังสีเอกซ์ที่ได้จากไฮโซโทปกัมมันตรังสี



รูป 15-4 แผนภูมิรังสีเอกซ์ของกระบวนการเก็บรังสีของไฮโซโทปกัมมันตรังสี แสดงที่มีความเข้มมากที่สุดและคงลักษณะการรังสี

ไฮโซโทปกัมมันตรังสีเป็นแหล่งให้รังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว เช่น เหล็ก -55 เมื่อเกิดการจับอิเล็กตรอนจากวง K (K capture) ให้เส้น $K\alpha$ ของแมงกานีสที่ความยาวคลื่น 2.1 อังสตرومซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดวิธีการวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบฟลูออเรสเซนซ์และการดักกลืน



ตาราง 15-2 ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ใช้กับการวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบการกระจายพลังงาน (Energy dispersive)

ไอโซโทป กัมมันตรังสี	ครึ่งชีวิต ปี	ชนิดของการถ่าย	รังสีที่เปล่งออกมา
⁵⁵ Fe	2.7	การจับอิเล็กตรอน	Mn K รังสีเอกซ์
¹⁰⁹ Cd	1.3	การจับอิเล็กตรอน	Ag K รังสีเอกซ์, แคมมา 88 กิโล- อิเล็กตรอนโวลต์
¹²⁵ I	0.16	การจับอิเล็กตรอน	Te K รังสีเอกซ์, แคมมา 35 กิโล- อิเล็กตรอนโวลต์
³ H/Zr	12.3	การให้ β	เบรเมสตราอยู่ 3-12 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์
¹⁴⁷ Pm/Al	2.6	การให้ β	เบรเมสตราอยู่ 10-50 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์
²⁴¹ Am	458	การให้ α	Np L รังสีเอกซ์, แคมมา 26 และ 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์
¹⁵³ Gd	0.65	การจับ e ⁻	Eu K รังสีเอกซ์, แคมมา 97 และ 103 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์
⁵⁷ Co	0.74	การจับ e ⁻	Fe K รังสีเอกซ์, แคมมา 14, 122, 136 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์
²⁴² Cm	17.6	การจับ e ⁻	Pu L รังสีเอกซ์
²³⁸ Pu	86.4	การจับ e ⁻	U I. รังสีเอกซ์

ตัวอย่าง จงพิจารณาเรื่องที่ว่าของอะตอมบอร์มีนที่เกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนวงในสุด K พลังงานที่ต้องใช้ในการดึงอิเล็กตรอนจากวง K ต้องมากกว่าพลังงาน K แอบซอร์ปชัน เออดจ์ที่ 0.918 อังสตروم

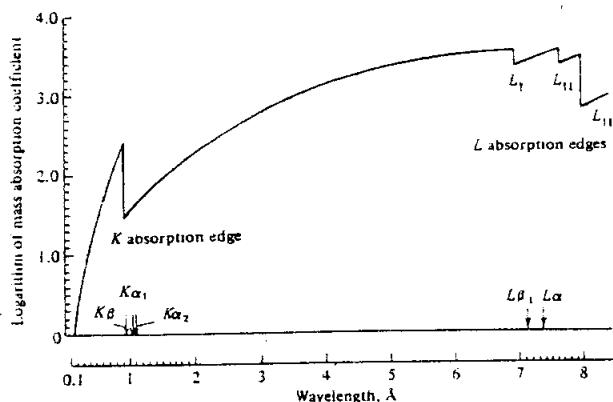
$$V = \frac{12,398}{0.918} = 13,475 \text{ โวลต์}$$

ความยาวคลื่น K แอบซอร์ปชันเออดจ์สั้นกว่าความยาวคลื่นที่ได้จากเส้น K _{β_1} 0.934 อังสตرومเกิดจากอิเล็กตรอนวง M วิ่งเข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนวง K ที่หายไป เส้น K _{α_1} , K _{α_2} อยู่ใกล้กันมากจึงเห็นพีคเป็นดับเล็ตและพีคที่ 1.048 และ 1.053 อังสตروم พีคนี้เกิดจาก

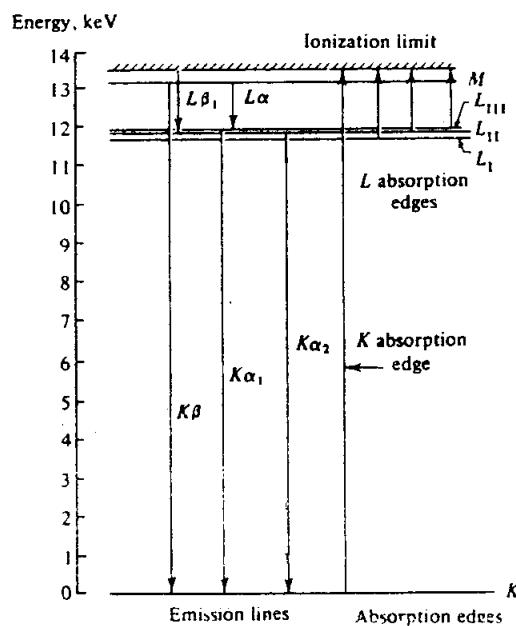
อิเล็กตรอนวง L ที่มีพลังงานต่างกันเล็กน้อยวิ่งมาแทนที่อิเล็กตรอนวง K ที่หายไป ดังนั้น เส้น K_{α_1} หาได้จากผลต่าง $K_{edge} - L_{edge} K_{\alpha_1}$ หรือ $L_{III edge}$ ของไบร์มีน มีค่าเส้นスペกトラที่ได้จากการดูดกลืนและการเปล่งรังสีแสดงไว้ในรูป 15-5 และรูป 15-6

$$K_{\alpha_1} = 13,475 - 1,522$$

$$= 11,953 \text{ โวลต์}$$



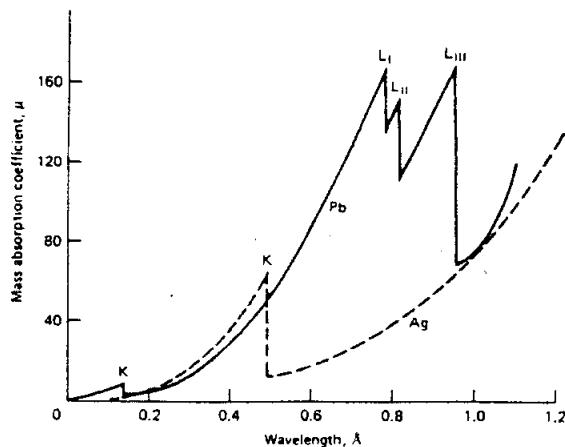
รูป 15-5 การดูดกลืนรังสีเอกซ์ของไบร์มีน เส้นที่ได้จากการเปล่งอนุกรม K และ L แทนค่าวัยถุก่อการ



รูป 15-6 ระดับพลังงานของไบร์มีน (เลขอะตอม 35) การแทรกชิ้นให้การดูดกลืนที่ไม่ต่อเนื่องกับเส้นที่ได้จากการเปล่งรังสี

การดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Absorption of X-rays)

เมื่อลำรังสีเอกซ์ช่วงแคบผ่านเข้าไปในวัสดุที่เป็นชั้นบาง ๆ ความเข้มของลำรังสีนี้จะลดลงเนื่องจากเกิดการดูดกลืน และการกระเจิง ผลเนื่องจากการกระเจิงมีน้อยตัดทิ้งได้ รูป 15-7 สเปกตรัมดูดกลืนของธาตุตะกั่วและเงินคล้ายกับสเปกตรัมเปล่งออก สเปก



รูป 15-7 สเปกตรัมดูดกลืนรังสีเอกซ์ของตะกั่วและเงิน

ตัวอย่างดูดกลืนของรังสีเอกซ์มีเพียงสองสามพื้นที่ ความยาวคลื่นของพื้นที่มีค่าเฉลี่ยนี้ขึ้นกับชนิดของธาตุแต่ไม่ขึ้นกับสภาพทางเคมี สเปกตรัมดูดกลืนรังสีเอกซ์ เห็นได้ชัดและไม่ต่อเนื่องเรียก แอบซอร์ปชันแอดจ์ (absorption edge) แอบซอร์ปชันแอดจ์เป็นบริเวณความยาวคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนมากสุด แอบซอร์ปชันแอดจ์ลดลงทันทีเมื่อความยาวคลื่นเปลี่ยนไปเล็กน้อย

กระบวนการดูดกลืน (The absorption process) การดูดกลืนของรังสีเอกซ์เกิดจากพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนที่มีค่ามากพอก่อนอิเล็กตรอนวงในสุดหลุดออกจากทำให้เกิดไอนอนในสถานะกระตุ้น โอกาสของการดูดกลืนมีค่าสูงสุดเมื่อพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับพลังงานที่ต้องใช้ในการดึงอิเล็กตรอนจากวงในสุดของอะตอม (พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากมีค่าเป็นศูนย์)

รูป 15-7 สเปกตรัมดูดกลืนของตะกั่วมีสีฟ้า พื้นแรกเกิดที่ความยาวคลื่น 0.14 อังสตروم พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนค่าหนึ่งที่มีค่าเท่ากับความยาวคลื่นนี้จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากวง K (มีพลังงานสูงสุด) ของตะกั่ว เมื่อพันความยาวคลื่นช่วงนี้ (โฟโตอิเล็ก-

ตอรอนมีความยาวคลื่นมากกว่า 0.14 อังสตรอม) พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนจะไม่เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากวง K หลุด การดูดกลืนลดลงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 0.14 อังสตรอม เพราะโอกาสที่อิเล็กตรอนของวง K และโฟโตอิเล็กตรอนจะเกิดอันตรกิริยากันมีน้อย 例外-ชอร์เบนช์จึงลดลงที่ละน้อย ซึ่งนี้พลังงานคงที่ของโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนที่ชนลดลง

พีคที่มีความยาวคลื่นมากเกิดจากอิเล็กตรอนจากวง L ของตะกั่วหลุดออกจาก อิเล็กตรอนที่วง L มีสามชุด (P_x, P_y, P_z) แต่ละระดับมีพลังงานต่างกันจึงพบสามพีค นอกจากนี้อาจพบพีคที่เกิดจากอิเล็กตรอนวง M หลุดออกจากโดยจะพบพีคนี้ที่ความยาวคลื่นมากกว่าสองพีคที่กล่าวมา

รูป 15-7 K 例外-ชอร์ปชันเอดจ์ของเงินเกิดที่ 0.485 อังสตรอม พีคของเงินเกิดที่ความยาวคลื่นมากกว่าพีคของตะกั่วเนื่องจากเงินมีเลขอะตอมน้อยกว่าตะกั่ว

สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวล (The Mass Absorption Coefficient) กว้างของเบียร์ใช้กับการดูดกลืนรังสีเอกซ์โดย

$$\ln \frac{P_0}{P} = \mu X$$

X ความหนาสารตัวอย่างเป็นเซนติเมตร P_0 และ P กำลังของลำรังสีเอกซ์ที่ชนและผ่านออกม μ สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงเส้น ราดูแต่ละชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงเส้นจำเพาะ เมื่อต้องการใช้สมการนี้จะจัดสมการนี้ในรูป

$$\ln \frac{P_0}{P} = \mu_m \rho X \quad \dots\dots(15.3)$$

ρ ความหนาแน่นสารตัวอย่าง μ_m สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวล (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม) ค่านี้ไม่เขียนกับสภาพทางเคมีและกายภาพของธาตุ เช่นสัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของไบร์มีนในแก๊ส HBr มีค่าเท่ากับของแข็งโซเดียมไบร์เมต

สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลขึ้นกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์และอะตอมที่ดูดกลืน

$$\mu_m = CZ^4 \lambda^3 \frac{N_A}{A} \quad \dots\dots(15.4)$$

N_A เลขอะโว加โดร A น้ำหนักอะตอม C ค่าคงที่ในช่วง例外-ชอร์ปชันเอดจ์ที่สนใจ สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลไม่เขียนกับสภาพทางกายภาพและทางเคมีของสาร การดูดกลืน

เชิงมวลของสารประกอบหรือของผสมหลายชนิดที่มีในสารตัวอย่าง เขียนเป็นสมการได้

$$\mu_m = W_A\mu_A + W_B\mu_B + W_C\mu_C \quad \dots\dots(15.5)$$

μ_m สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของสารตัวอย่างหนึ่งที่มีเศษส่วนน้ำหนัก W_A , W_B และ W_C ของธาตุ A, B และ C, μ_A , μ_B และ μ_C เป็นสัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของธาตุต่าง ๆ ที่มีในสารตัวอย่าง

ตัวอย่าง จงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของกรดเบนโซอิกที่ K_{a_1} รังสีเอกซ์โดยใช้เส้นของทองแดง 154 อังสตรอม ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนมีค่า 4.52, 0.48 และ 11.1 ตามลำดับเมื่อใช้เส้นของทองแดงเช่นกัน ร้อยละขององค์ประกอบของกรดเบนโซอิก C = 0.689, O = 0.262, H = 0.019 สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของกรดนี้คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} (\mu/\rho)_T &= 0.689 \times 4.52 + 0.262 \times 11.1 + 0.019 \times 0.48 \\ &= 6.03 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อกรัม} \end{aligned}$$

ตัวอย่าง ตัวอย่างน้ำมันชนิดหนึ่ง 3.00 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำมาใส่ในเซลล์หนา 0.25 เซนติเมตร ตัวอย่างมีตะกั่วเตตราเอทิลในอัตรา 4% และมีความหนาแน่น 0.720 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดูดกลืน 0.75 เส้น K_a ของ Cu จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ถ้าสัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวล ($\mu_m = \mu/\rho$) ของเส้น K_a Cu สำหรับตะกั่ว คาร์บอนและไฮโดรเจนมีค่า 230 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม 4.52 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และ 0.48 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม จงหาร้อยละของตะกั่วเตตราเอทิลในสารตัวอย่าง

คำนวณ μ_m ของสารประกอบทั้งสองที่มีในสารตัวอย่าง สูตรตะกั่วเตตราเอทิล Pb (CH₂CH₃)₄ น้ำหนักโมเลกุล 323.4

$$W_{Pb} = \frac{207.2}{323.4} = 0.6407$$

$$W_C = \frac{8 \times 12.011}{323.4} = 0.2971$$

$$W_H = \frac{20 \times 1.008}{323.4} = 0.06234$$

μ_m ของตะกั่วเตตราเอทิล

$$\mu_m = 230 \times 0.641 + 4.52 \times 0.297 + 0.48 \times 0.062$$

$$= 149 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อกรัม}$$

สูตรอ็อกเทน $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{CH}_3$ น้ำหนักโมเลกุล 114.23

$$W_C = \frac{8 \times 12.011}{114.23} = 0.8412$$

$$W_H = \frac{18 \times 1.008}{114.23} = 0.1588$$

μ_m ของอ็อกเทน

$$\mu_m = 4.52 \times 0.8412 + 0.48 \times 0.159$$

$$= 3.88 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อกรัม}$$

หา μ_m ของสารตัวอย่าง

$$P/P_0 = e^{-\mu_m X}$$

$$\log \frac{100}{25} = \frac{\mu_m(s) 0.720 \times 0.250}{2.303}$$

$$\mu_m(s) = 7.70 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อกรัม}$$

ให้ W เป็นเศษส่วนโดยน้ำหนักตะกั่วเตตราเอทิลในสารตัวอย่าง

$$\mu_m(s) = \mu_m(\text{TEL})W + \mu_m(\text{O})(1 - W)$$

$$7.70 = 149W + 3.88(1 - W)$$

$$W = 0.0264$$

สารตัวอย่างมีตะกั่วเตตราเอทิลร้อยละ 2.64

รังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence)

เมื่อมีการดูดกลืนของรังสีเอกซ์ทำให้ไอออนในสถานะพื้นกระโดดไปสู่สถานะกระตุ้นที่ไม่เสถียร ไอออนนี้จะกลับสู่สถานะพื้นโดยการแทรนซิชันของอิเล็กตรอนจากระดับที่มีพลังงานมากกว่า เช่น ไอออนในสถานะกระตุ้นของตะกั่วเกิดเมื่อตะกั่วดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 0.14 อังสตรอม ทำให้อิเล็กตรอนวง K ของตะกั่วหลุดเกิดเป็นไอออนในสถานะกระตุ้นซึ่งไม่เสถียรอุบัติร้ายหนึ่ง ไอออนในสถานะกระตุ้นนี้กลับสู่สถานะพื้นโดยการเปล่งรังสีเอกซ์ (ฟลูออเรสเซนซ์) ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับความยาวคลื่นที่เกิดจากไอออนที่ถูกกระตุ้นโดยการยิงด้วยอิเล็กตรอน ความยาวคลื่นของเส้นฟลูออเรสเซนซ์ที่ออกมามีค่ามากกว่าความยาวคลื่นของแอบซอร์ปชันแอ็ดจ์ การดูดกลืนต้องใช้พลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจาก (เกิดการแตกตัวเป็นไอออน) ส่วนเส้นที่เกิดจากการเปล่งรังสีเอกซ์เป็นการแทรนซิชันของอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานสูงกลับสู่ระดับพลังงานต่ำภายในอะตอม เช่น K แอบซอร์ปชันแอ็ดจ์ของเงินเกิดที่ 0.485 อังสตรอม อนุกรม K ที่เปล่งเกิดที่ 0.497 และ 0.559 อังสตรอม เมื่อฟลูออเรสเซนซ์ถูกกระตุ้นโดยลำรังสีจากหลอดรังสีเอกซ์ ศักย์ที่ใช้กระตุ้นธาตุที่สนใจต้องมีค่ามากกว่าปกติ (สั้นกว่า ...) เพื่อให้เกิดการดูดกลืนได้ ไอออนของธาตุนั้นในสถานะกระตุ้นเช่น ถ้าต้องการอนุกรม K ที่เปล่งของเงินศักย์ที่ใช้ต้องมีค่า

$$V \geq \frac{12,398}{0.485} \times 10^{-13} \geq 25.6 \times 10^3 \text{ โวลต์ หรือ } 25.6 \text{ กิโลโวลต์}$$

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Diffraction of X-rays)

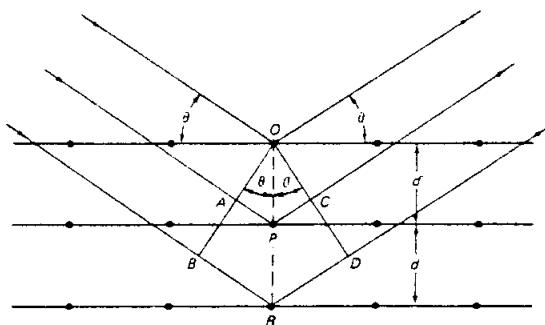
เมื่อเวลาเดอร์ทางไฟฟ้าของรังสีเอกซ์ชนอิเล็กตรอนที่อยู่ในสาร รังสีเอกซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ที่ถูกเลี้ยวเบนขึ้นกับการจัดตัวของสภาพแวดล้อมของผลึก การแทรกสอดแบบเสริมกันเกิดเมื่อระยะห่างของรังสีที่ถูกกระเจิง (เดินทางมากขึ้น) มีค่าเท่ากับจำนวนเต็มของความยาวคลื่น ส่วนที่อื่นเป็นการแทรกสอดแบบหักล้าง

กฎของเบร็กค์ (Bragg's law) เมื่อลำรังสีเอกซ์ชันผลึกที่ผิวและทำมุม θ อะตอมที่ผิวจะกระเจิงลำรังสีนี้ ลำรังสีที่ไม่ถูกกระเจิงจะผ่านเข้าสู่อะตอมที่อยู่ที่ชั้นที่สอง ลำรังสีส่วนที่เหลือผ่านเข้าสู่อะตอมชั้นที่สาม ผลของการกระเจิงเหล่านี้เกิดจากอะตอมที่อยู่ในแนวเดียวกันและมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่ากัน การกระเจิงเหล่านี้จะเกิดปรากฏการณ์การแทรกสอดได้เมื่อ

1. ระยะห่างระหว่างชั้นอะตอมมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสี
2. ศูนย์กลางการสะท้อนจะหันหน้าที่กระเจิงเหมือนกัน

ปี 1912 W.L. Bragg ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยผลีกรูป 15-8 ลำรังสีช่วงความยาวคลื่นแคบ ๆ ชนผลึกที่มุม θ การกระเจิงเกิดขึ้นที่มีอันตรกิริยา กับอะตอมที่ตำแหน่ง O, P และ R การเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นถ้าระยะทางที่เดินทางเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น รังสีที่ถูกกระเจิงที่ OCD จะอยู่ในพेसเดียวกัน ที่ OCE ผลึกจะหันหน้าที่สัมท้อนรังสีเอกซ์ ดังนั้นจะได้

$$AP + PC = n\lambda$$



รูป 15-8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยผลึก

$$AP = PC = d \sin \theta \quad \dots\dots(15.3)$$

d ระยะห่างระหว่างชั้นผลึก เมื่อรังสีมีการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference) ที่มุม θ เขียนเป็นสมการได้

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \dots\dots(15.4)$$

สมการนี้เป็นสมการของเบริร์ก์ รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการสะท้อนจากผลึกจะเกิดเมื่อมุม
ตกมีค่าเท่ากับ $\sin \theta = n\lambda / 2d$ ส่วนที่มุ่งอื่น ๆ จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง

ตัวอย่าง การเลี้ยวเบนอันดับหนึ่งของโมลิบดีนัม เส้น K_{α} 0.712 อั้งสตรอมจากระนาบของ
ผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์ที่มุ่ง 6.48 องศา จงหาระยะห่างระหว่างระนาบ (ชั้นผลึก)

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

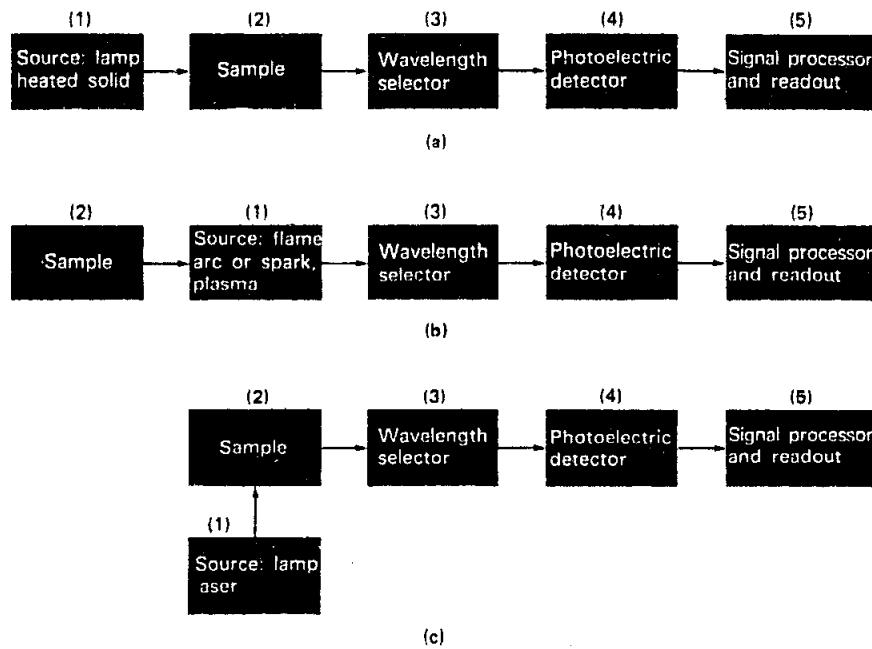
$$1 \times 0.712 = 2d \sin 6.48^\circ$$

$$d = 3.16 \text{ อั้งสตรอม}$$

องค์ประกอบของอุปกรณ์ Instrument Components

การดูดกลืน การเปล่งฟลูอเรสเซนซ์และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใช้ในการ
วิเคราะห์ทางเคมีได้ดี เครื่องเอกซ์เรย์คล้ายกับเครื่องสเปกโทรเชิงแสงประกอบด้วย แหล่ง
กำเนิดรังสี อุปกรณ์ที่ใช้จำกัดช่วงความยาวคลื่นของรังสีที่ต้องการใช้ ที่ใส่สารตัวอย่าง
เครื่องตรวจหาหรือแทรนซ์ดิเวเซอร์ และระบบอ่านสัญญาณ รูป 15-9 เป็นองค์ประกอบ
ของอุปกรณ์

เอกซ์เรย์โฟโตมิเตอร์ใช้ฟลูเตอร์เลือกความยาวคลื่นของรังสีที่ต้องการใช้ เอกซ์เรย์
สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ใช้ตัวทำแสงเอกรังค อีกแบบหนึ่งใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์แยกสเปกตรัม¹
รังสีเอกซ์โดยใช้หลักการแยกพลังงานมากกว่าความยาวคลื่น เครื่องแบบนี้เรียกอุปกรณ์
กระจายความยาวคลื่น (wavelength dispersive instrument) และอุปกรณ์กระจายพลังงาน
(energy dispersive instrument)



รูป 15-9 อุปกรณ์เอกซ์เรย์สเปกตรอกอีบี

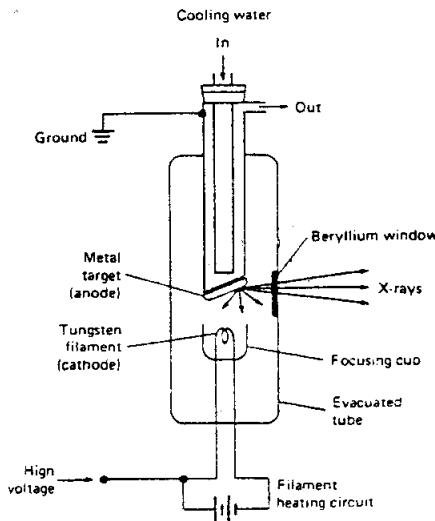
แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray source) มีสามแบบ

หลอดคูลิดจ์ (Coolidge tube) ดังรูป 15-10 ภายในหลอดเป็นสุญญากาศ ใช้ลวดทั้งส่วนเป็นแคโทด ส่วน外โโนด (เป้า) มีขนาดใหญ่เป็นโลหะพากทั้งส่วน ทองแดง โมลิบเดียม เงิน นิกเกิล โคบล็อต โรเดียมหรือเหล็ก และอนดเมทัลให้น้ำเย็นเข้าและน้ำร้อนออก วงจรอิเล็กทรอนิกส์มีสองชุด ชุดหนึ่งให้ความร้อนแก่แคโทด ชุดสองให้ศักย์เพื่อเร่งอิเล็กตรอน ลวดทั้งส่วนเมื่อได้รับความร้อนจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะมีอิเล็กตรอนหลุดออก มาและถูกเร่งไปชน (เป้า) วงจรที่ให้ความร้อนแก่ลวดทั้งส่วนเป็นตัวควบคุมความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ออกมาก ศักย์ที่ใช้เร่งบวกในรูปพลังงานหรือความยาวคลื่น หลอดนี้มีความร้อนสูงมากจึงต้องระบายความร้อนที่แอโนดด้วยน้ำ เพราะว่าร้อยละ 1 ของพลังงานที่เพื่อเปลี่ยนไปเป็นรังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์ที่ได้เป็นแบบที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่อง

ความเข้มรังสีเอกซ์ที่ได้จากหลอดคูลิดจ์คำนวณได้จาก

$$I = 5 \times 10^{-3} Z_i (V/d)^2 \quad \dots\dots(15.5)$$

I เรนต์เกนต่อชั่วโมง d ระยะห่างเป็นพุต V ศักย์เป็นกิโลโวลต์ i กระแสที่ให้กับหลอดเป็น มิลลิแอมป์ และ Z เลขอะตอมของเป้า



รูป 15-10 หลอดคูลิดจ์ (Coolidge tube)

ตัวอย่าง หลอดรังสีเอกซ์ที่มีเป้า (แอนด์) เป็นทองแดงทำงานด้วยกระแส 6.5 มิลลิแอมป์ ได้รับศักย์ 35 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 พุต จงคำนวณความเข้มของ หลอด (สมมติว่าไม่มีการดูดกลืน)

$$I = 5 \times 10^{-3} \times 29 \times 6.5 \times \left(\frac{35}{1} \right)^2$$

$$= 1150 \text{ เรนต์เกนต่อชั่วโมง}$$

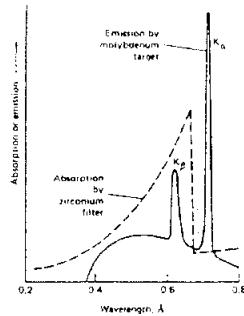
ไอโซโทปกัมมันตรังสี (Radioisotopes) ไอโซโทปกัมมันตรังสีหลายชนิดใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์และใช้ในการวิเคราะห์โดยการดูดกลืน สารกัมมันตรังสี จะถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนและอยู่ในภาชนะตะกั่ว สารกัมมันตรังสีให้เส้นรังสีเอกซ์จึงใช้กระตุ้นสารเพื่อให้ฟลูออเรสเซนซ์หรือใช้ในการศึกษาการดูดกลืนของธาตุต่างๆ เช่น สารกัมมันตรังสีที่ให้เส้นรังสีเอกซ์ 0.3 และ 0.47 อังสตรอมใช้วิเคราะห์ K แอบซอร์ปเօเดจของเงินตั้งรูป

แหล่งกำเนิดที่ให้ฟลูออเรสเซนซ์ชุดที่สอง (secondary fluorescent sources) สเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ของชาตุได้จากการกระตุ้นโดยรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (หลอดคูลิດจ์) แหล่งกำเนิดที่ให้ฟลูออเรสเซนซ์ชุดที่สองทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์สำหรับศึกษาการดูดกลืนหรือฟลูออเรสเซนซ์ เช่นคูลิດจ์ที่มีเป้าหังส滕ใช้กรอบตันเส้น K_{α} และ K_{β} ของโมลิบเดียมดังรูป 15-2 แหล่งกำเนิดรังสีแบบนี้จะไม่ให้รังสีแบบต่อเนื่องออกมาเช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดรังสีชุดแรก (หลอดคูลิดจ์) จะมีเฉพาะเส้นสเปกตรัมของมาเท่านั้น (สเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์)

ฟล็อกเตอร์สำหรับลำรังสีเอกซ์ (Filter for X-ray beam)

ลำรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเฉพาะได้จากการกระตุ้นโดยฟล็อกเตอร์ที่ทำหน้าที่แยกเส้นที่มีความเข้มมากของชาตุที่ใช้เป็นเป้า

เมื่อต้องการแยกเส้นสเปกตรัมสองเส้นที่อยู่ใกล้กัน เช่น ต้องการแยกเส้น K_{α} ของโมลิบเดียมมาใช้ทำน้ำหนักได้โดยใช้ฟล็อกเตอร์ที่มีเลขอะตอมน้อยกว่าชาตุโมลิบเดียมหนึ่งหรือสองกรองเอาเส้น K_{β} และรังสีต่อเนื่องที่เปล่งจากเป้าโมลิบเดียมออก ดังรูป 15-11 ฟล็อกเตอร์ที่ใช้เป็นแผ่นบาง ๆ หนาประมาณ 0.01 เซนติเมตร (เซอร์โคเนียม) การกรองรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (หลอดคูลิดจ์) เพื่อลดความเข้มของเส้นที่มีความยาวคลื่นต่ำทำได้โดยใช้แผ่นโลหะบาง ๆ จะได้เส้นรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นมาก และมีความเข้มน้อยลง รังสีแบล็คกราวน์กีลดลงเช่นกัน การกรองโดยวิธีนี้ฟล็อกเตอร์ที่ใช้วางไว้หน้าหรือหลังสารตัวอย่าง (specimen) ก็ได้ ฟล็อกเตอร์ที่ใช้กับหลอดรังสีเอกซ์ชนิดต่าง ๆ อยู่ในตาราง 15-3 รังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวใช้ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูป 15-11 การใช้ฟล็อกเตอร์เพื่อให้ได้รังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว

ตาราง 15-3 พิลเตอร์ที่ใช้กับหลอดรังสีเอกซ์ที่มีเป้า (แอลโอนด) ชนิดต่าง ๆ

เม็ด	K_{α_1} อังสตรอม	K_{β} อังสตรอม	พิลเตอร์	K แอนชอร์ป			K_{α_1} ร้อยละ
				ชั้นยอด พิลเตอร์	ความหนา ที่ลอดลง	(มิลลิเมตร)	
Mo	0.709	0.432	Zr	0.689	0.081	57	
Cu	1.541	1.392	Ni	1.487	0.013	45	
Cr	2.290	2.085	V	2.269	0.0153	51	
L _{α₁}	L _{β₁}	Zn	1.283	—	—		
อังสตรอม	อังสตรอม	Cu	1.380	0.035	77		
Pr	1.313	1.120					
W	1.476	1.282					

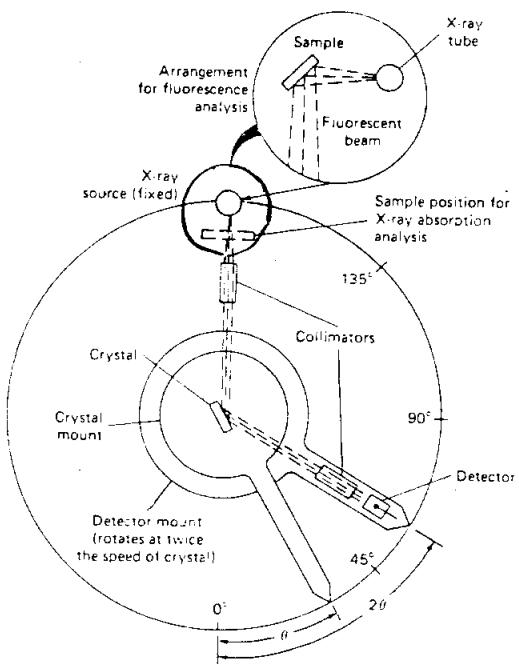
การกรองรังสีต่อเนื่องจากหลอดรังสีเอกซ์อาจใช้แผ่นโลหะบางได้ รังสีที่ออกจากแผ่นโลหะนี้จะเป็นแทบกว้างและมีปริมาณ (ความเข้ม) ลดลง แผ่นโลหะนี้มีคุณสมบัติเหมือนกับพิลเตอร์แก้วที่ใช้ในรังสีช่วงวิสิเบล

การกระจายความยาวคลื่นด้วยตัวทำแสงเอกรังค์ (Wavelength Dispersion with Monochromators)

รูป 15-12 เป็นองค์ประกอบของรังสีเอกซ์สเปกโกรามิเตอร์ ตัวทำแสงเอกรังค์ของเครื่องนี้มีสองชุด แต่ละชุดมีตัวทำขนาดซึ่งทำหน้าที่คล้ายช่องเล็กยาวในเครื่องตรวจหารังสี ชุดแรกเป็นหลอดรังสีเอกซ์สารตัวอย่าง ชุดหลังใช้ฟลีกเชิงเดียวติดบนโภนโนมิเตอร์ หรือโต๊ะที่หมุนได้ เพื่อหาค่ามุ่งระหว่างหน้าผิวฟลีกและลำรังสีท่วงชน (θ) จากสมการ 15.4 มุมของโภนโนมิเตอร์ θ ที่ตั้งไว้จะมีเฉพาะความยาวคลื่น λ , $\lambda/2$, $\lambda/3$... λ/n ที่ถูกเลี้ยวเบนโดย λ ต้องมีค่า $= 2d \sin \theta$ ตัวทำแสงเอกรังค์ที่ใช้กับรังสีเอกซ์จึงไม่ได้กระจายสเปกตรัมพร้อมกันเหมือนกับเกรตติงหรือปริชีม แต่จะยอมให้รังสีที่มีความยาวคลื่นเฉพาะถูกเลี้ยวเบนตามมุมโภนโนมิเตอร์ที่ตั้งไว้

เมื่อต้องการสเปกตรัมจากสารตัวอย่างต้องจัดให้ลำรังสีออกจากตัวทำขนาดน้ำที่สองเข้าสู่เครื่องตรวจหา ซึ่งหมุนด้วยอัตราเร็วสองเท่าของลำรังสีที่ออกจากตัวทำขนาด

ชุดแรกเข้าสู่ผลึกเชียงเดี่ยวถ้าลำรังสีที่ออกจากสารตัวอย่างทำมุม θ กับผลึก เครื่องตรวจหาต้องทำมุม 20 ระยะห่างระหว่างชั้นผลึก d มีค่าแน่นอน



รูป 15-12 ตัวทำขานของรังสีเอกซ์และเครื่องตรวจหามุมของเครื่องตรวจหานีบกับจำแสง (2θ) มีค่าเป็นสองเท่านอนหน้าผลึก การวิเคราะห์การดูดกลืน แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และสารตัวอย่างต้องวางอยู่ในตำแหน่งดังรูป การวิเคราะห์การเปล่งรังสีของสารตัวอย่างที่ให้ฟลูอเรสเซนซ์

ตัวทำขาน (collimators) รังสีจากหลอดรังสีเอกซ์ถูกทำให้อยู่ในแนวเดียวกันโดยแผ่นโลหะบางที่วางนานกันและห่างกันเพียงเล็กน้อยหรือใช้ท่อกลวงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตรหลาย ๆ ท่อ ฟลูอเรสเซนซ์สเปกโกรมิเตอร์วางแผนตัวทำขานไว้ระหว่างสารตัวอย่างกับผลึกที่ใช้วิเคราะห์เพื่อป้องกันไม่ให้ล้ำรังสีที่ถูกออก (ไม่อยู่ในแนวเดียวกัน) เข้าสู่ผลึก ตัวทำขานอันที่สองขยายกว่าวางไว้ระหว่างผลึกที่ใช้วิเคราะห์กับเครื่องตรวจหานีบมิเตอร์ เครื่องตรวจหาต้องจัดให้มุมมีค่าน้อยเพื่อกันไม่ให้รังสีที่ไม่ถูกสะท้อนโดยผลึกเดินทางเข้าสู่เครื่องตรวจหา การแยกของอุปกรณ์ดีบีนเมื่อลดระยะห่างระหว่างแผ่นตัวทำขานหรือเพิ่มความยาวตัวทำขาน

รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นมากกว่าโดยประมาณ 2 อังสตรอมถูกดูดโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ในบรรยากาศ การวิเคราะห์รังสีเอกซ์ในช่วงความยาวคลื่นนี้ต้องทำในบรรยากาศ

แก๊สเนื้อยหรือในสุญญากาศ ถ้าทำในบรรยากาศแก๊สเนื้อยให้ผ่านแก๊สเนื้อยเข้าไปในที่ใส่สารตัวอย่างและตัวทำแสงเอกสารนี้ ถ้าทำในสุญญากาศก็ใช้เครื่องดูดอากาศออก

ความเข้มของรังสีที่ได้จากตัวทำแสงเอกสารแบบใช้ผลึกเชิงเดี่ยวนิิดแบบรามมีค่าประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจากรังสีที่ถูกเลี้ยวบนน้ำจะสูญออกและถูกดูดด้วยตัวทำขันน ถ้าใช้ผลึกเชิงเดี่ยวจะได้ความเข้มของรังสีประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจากผลึกนี้ทำหน้าที่ไฟกัสรังสีที่สูญออกให้กลับเป็นลำแสงและผ่านออกจากการตัวทำขันนชุดที่สอง

จากตาราง 15-1 เส้นรังสีเอกสารที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.1 และ 10 อังสตรอม แต่จากตาราง 15-3 ไม่มีผลึกเชิงเดี่ยวใดที่กระจายรังสีทั้งช่วงความยาวคลื่นนี้ ตัวทำแสงเอกสารแบบนี้จึงต้องเปลี่ยนผลึกอย่างน้อยสองอันจึงวิเคราะห์ตลอดช่วงความยาวคลื่นได้

ช่วงความยาวคลื่นใช้งานสำหรับผลึกเชิงเดี่ยวหาได้จากระยะห่างระหว่างชั้นผลึกส่วนมุมมีข้อจำกัดในการตรวจหารังสีเมื่อ 20 เข้าใกล้ 0 หรือ 180 องศา ถ้าปรับมุมของตัวทำแสงเอกสาร ให้ 20 น้อยกว่า 10 องศา รังสีที่ถูกกระเจิงออกมายังมีหลายความยาวคลื่นซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ ถ้า 20 มากกว่า 160 องศา เครื่องตรวจหาห้าไม่ได้ เพราะไม่สามารถจัดเครื่องตรวจหาให้มีมุม 160 องศาได้ เพราะติดแหล่งกำเนิดรังสีและสารตัวอย่างดังรูป 15-12 ความยาวคลื่นต่ำสุดและสูงสุดของผลึกเชิงเดี่ยวที่อยู่ในตาราง 15-4 จึงหากันมุมที่อยู่ในช่วง $\theta = 5$ ถึง $\theta = 80$ องศา

ผลึกแอลูมิเนียมไดโอดเจนฟอสเฟตระยะห่างระหว่างชั้นผลึกมีค่ามาก จึงใช้ในช่วงความยาวคลื่นมาก ผลึกที่มีค่า d มาจะมีการกระจายน้อย เหตุผลนี้พิจารณาจาก การหอนุพันธ์ สมการ 15-4 จะได้

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{n}{2d \cos \theta} \quad \dots\dots(15.5)$$

$d\theta/d\lambda$ คือค่าการกระจาย ค่านี้แปรผันกับค่า d ตาราง 15-4 ยังแสดงถึงค่าการกระจายสูงสุดและต่ำสุดของผลึก การวิเคราะห์สารตัวอย่างโดยวิธีนี้ต้องเลือกนิิดของผลึกให้เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการวิเคราะห์

ถ้าใช้ผลึกที่มีค่า d น้อย ช่วงความยาวคลื่นมากสุดที่ได้จะมีค่าจำกัด เพราะว่า $\lambda = 2d$ มุม 2θ มีค่ามากสุดเพียง 180 องศา แต่ที่จริงแล้วมุมนี้เกิดจากการหมุนของgonio ซึ่งมีค่ามากสุดเพียง 150 องศา ดังนั้นแล้วมุมนี้เกิดจากการหมุนของgonio ซึ่งมีค่ามากสุดเพียง 150 องศา ดังนั้น ถ้าต้องการความยาวคลื่นมากต้องใช้ผลึกที่มีค่า d มาก ผลึกที่นิยมใน

การวิเคราะห์อยู่ในตาราง 15-4 ผลึกเหล่านี้ประกอบด้วยอะตอมเบา เช่น โซเดียมคลอไรด์ ควอร์ตซ์และกรดไขมันของโลหะหนัก (ตะกั่วพาลเมิตและสหรองเชียมบีชีเนต) โลหะเหล่านี้มี Z มากกว่า 9 จึงมีความสามารถให้ออกซเรย์ฟลูอเรสเซนซ์แต่ไม่รับกระบวนการวิเคราะห์ธาตุที่สนใจ รังสีที่มีอันดับมากกว่าหนึ่งของธาตุหนึ่งอาจซ้อนทับกับรังสีอันดับหนึ่งของอีกธาตุหนึ่งได้

ตาราง 15 - 4 ผลึกที่ใช้แยกความยาวคลื่น

ระยะห่างระหว่างชั้นผลึก d อังศกروم	ช่วงความยาวคลื่น (อังศกروم)		
	มากสุด ^ก	น้อยสุด ^ข	ก
โซเดียมคลอไรด์	1.356	2.62	0.189
โซเดียมฟลูอิโรม	2.014	3.89	0.281
อะลูมิเนียม	2.338	4.52	0.326
ควอร์ตซ์	2.821	5.45	0.393
แคลเซียมฟลูอิโรม	3.16	6.11	0.440
ควอร์ตซ์	3.343	6.46	0.466
เอนกเลินไดอะมีน	4.404	8.51	0.614
แอมโมเนียมไดไฮดรอเจน	5.325	10.29	0.742
อะโซฟอสเฟต ADP			
บิบัม	7.60	14.70	1.06
ไไมค้า	9.963	19.25	1.39
ตะกั่วพาลเมิต	45.6	78.3	6.39
สหรองเชียมบีชีเนต	61.3	121.7	8.59

$$\text{ก} \text{ มากสุด } 2\theta = 150 \text{ องศา } n\lambda = 2d \sin 75^\circ$$

$$\text{ข} \text{ น้อยสุด } 2\theta = 8 \text{ องศา } n\lambda = 2d \sin 4^\circ$$

เครื่องตรวจหารังสีเอกซ์และกระบวนการควบคุมสัญญาณ X – Ray Detectors and

Signal Processor)

อุตสาหกรรมเครื่องตรวจหาปริมาณรังสีเอกซ์ใช้ฟิล์มถ่ายรูป แต่บริษัทฯ ปริมาณได้ไม่ถูกต้อง ฟิล์มถ่ายรูปปัจจุบันใช้เป็นเครื่องตรวจหาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ฟิล์มนี้จะมีด

เมื่อถูกรังสีเอกซ์ ถ่านไฟล์มนี้ไปล้างแล้วด้วยมาตราทีบแสง (densitometer) จะเห็นความเข้มของเส้นสเปกตรัม

เครื่องตรวจหารังสีเอกซ์รุ่นใหม่เปลี่ยนรังสี (พลังงาน) เป็นสัญญาณไฟฟ้า เครื่องตรวจหารังสีเอกซ์มีสามแบบ เครื่องตรวจหาแบบบรรจุแก๊ส (Gas filled Detector) เครื่องนับการเปล่งแสงวับ (Scintillation Detector) และเครื่องตรวจหาแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Detector) เครื่องตรวจหารังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีคล้ายกับเครื่องตรวจหารังสีชนิดอื่น เครื่องนี้จะต้องนับโฟตอน แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า เครื่องตรวจหารังสีอัลตราไวโอลেตและวิสิเบลกิใช้หลักการนับโฟตอนเช่นกัน

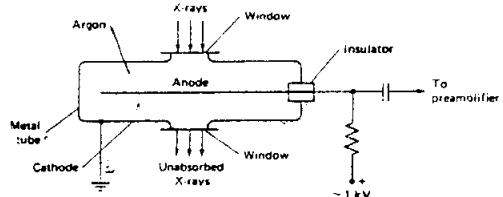
การนับโฟตอน (Photon counting) เครื่องตรวจหารังสีเอกซ์จะมีแทรนช์ดิวเซอร์ ดูดกลืนโฟตอน แล้วเปลี่ยนเป็นพัลส์ไฟฟ้าอย่างเร็ว ตามปริมาณโฟตอนที่ชนแทรนช์ดิวเซอร์ กำลัง (ความเข้ม) รังสีที่วัดได้เป็นเคานต์ต่อหน่วยเวลา เครื่องตรวจหาแบบนี้ต้องสนองตอบโฟตอนอย่างรวดเร็ว การสนองตอบเป็นไปได้มีโฟตอนที่ชนมีความเข้มไม่มาก ถ้าโฟตอนที่ชนมีความเข้มสูง อัตราพัลส์จะสูงมากกว่าความสามารถเครื่องที่จะสนองตอบได้กระแทกที่วัดไฟจึงมีค่าคงที่ (สถานะคงตัวหรือ steady state) กระแสนี้แทนจำนวนพัลส์เฉลี่ยต่อวินาทีที่วัดได้

เครื่องตรวจหาที่ใช้หลักการนับโฟตอนจึงใช้นับโฟตอนจากแหล่งกำเนิดโฟตอนที่มีความเข้มต่ำ การนับโฟตอนที่มีความเข้มต่ำมักมีการรบกวนที่เกิดจากค่าภูมิหลัง (background) ของแหล่งกำเนิดรังสี เครื่องตรวจหา และระบบอิเล็กทรอนิกส์ การแก้การรบกวนนี้จึงใช้ตัวคัดพัลส์ไฮท์ (pulse height discriminator) ซึ่งเป็นเครื่องอิเล็กทรอนิก

เครื่องตรวจหาแบบบรรจุแก๊ส (Gas filled Detectors) เมื่อรังสีเอกซ์ชนแก๊สเฉี่ยบ เช่น อาร์กอน ซีนอน หรือคริปต่อน จะทำให้แก๊สเฉี่ยบเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เช่น Ar⁺ กับอิเล็กตรอน (ไอออนคู่) เครื่องตรวจหารังสีเอกซ์แบบนี้ใช้หลักการการเพิ่มการนำไฟฟ้าจากประกายการณ์การแตกตัวเป็นไอออน เครื่องตรวจหาแบบนี้มีสามแบบ ห้องที่มีการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization chamber) เครื่องนับสัดส่วน (ปีวิภาค) (proportional Counter) และหลอดไกเกอร์ (Geiger Tube)

เครื่องตรวจหาแบบบรรจุแก๊สแสดงในรูป 15 – 13 เมื่อรังสีวิ่งผ่านหน้าต่างไปร่องใส เช่นไม้คา เบริลเลียม อะลูมิเนียมหรือไมลาร์เข้าไปชนอะตอมอาร์กอน อิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดของอะตอมหลุดออกมมา โฟโตอิเล็กตรอนนี้มีพลังงานสูงมาก และมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานจลน์ของรังสีเอกซ์กับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอมอาร์กอน โฟ-

โดยอิเล็กตรอนจะปล่อยพลังงานที่มากเกินพอด้วยการชนกับอะตอมแก๊สเนื่องจากหلامร้อยครั้ง (เกิดการแตกตัวเป็นไอออนจำนวนมาก) ถ้าใส่ศักย์เข้าไป อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังแอลูมิโนดที่เป็นลวดอยู่ตรงกลาง ขณะที่แคทโอดที่มีขนาดใหญ่กว่าไปยังแคตโอดที่เป็นโลหะรูปทรงกระบอก

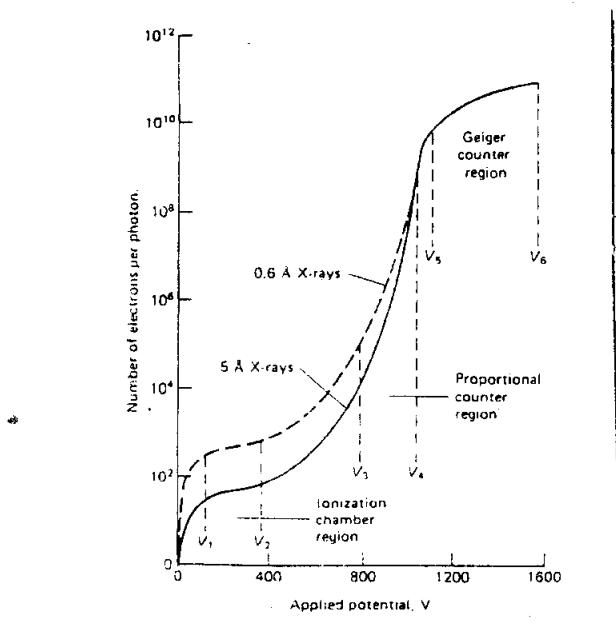


รูป 15-13 พื้นที่หน้าตัดของเครื่องตรวจหาที่ใช้หลักการของแก๊สที่แตกตัวเป็นไอ้อน

รูป 15-14 เป็นผลของศักย์ที่มีต่อจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งมาบังแอลูมิโนดของเครื่องตรวจหาที่ใช้หลักการการแตกตัวเป็นไอ้อนของแก๊สเมื่อมีรังสีเอกซ์วิ่งชน ช่วงศักย์ที่ใช้งานมีสามช่วง ช่วงศักย์ที่ต่ำกว่า V_1 ไอ้อนคู่ (ไอ้อนบวก และไอ้อนลบ e^-) มีน้อย ไอ้อนบวกและอิเล็กตรอนอยู่ใกล้กัน ไอ้อนคู่จึงเกิดการรวมกันบางส่วนก่อนที่จะวิ่งไปยังข้าไฟฟ้าทั้งสอง จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปแอโนดจึงมีน้อยกว่าความเป็นจริง ช่วงศักย์ V_1 และ V_2 ไอ้อนคู่เกิดขึ้นมากและวิ่งไปยังข้าไฟฟ้าทั้งสองก่อนที่จะเกิดการรวมกัน จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปแอโนดจึงมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับศักย์ที่เปลี่ยนไปเล็กน้อย ช่วงนี้เรียกห้องที่มีการแตกตัวเป็นไอ้อน จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปแอโนดแทนจำนวนพลังงานรังสีเอกซ์ที่วิ่งชนช่วงศักย์ V_3 ถึง V_4 จำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กับศักย์ที่เพิ่ม จำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มเกิดจากการผลิตไอ้อนคู่ชุดที่สอง (secondary ion pair) ไอ้อนชุดนี้เกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนชุดที่หนึ่งที่วิ่งด้วยความเร็วสูงกับโมเลกุลของแก๊ส ทำให้เกิดกระแสเพิ่มขึ้น หรือเกิดจากการขยายสัญญาณเนื่องจากแก๊ส (gas amplification) ช่วง V_5 ถึง V_6 (ไกเกอร์) การขยายพลัสไฟฟ้ามีค่ามหาศาล การขยายในช่วงนี้ถูกจำกัดโดยไอ้อนบวก เนื่องจากอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กจึงวิ่งไปแอโนดจนหมดขณะที่ไอ้อนบวกขนาดใหญ่ยังวิ่งไปแคตโอดไม่หมด ไอ้อนบวกบางส่วนยังอยู่ใกล้แอโนด ทำให้แอโนดจับอิเล็กตรอนไม่ได้ เครื่องตรวจหาจึงนับกระแสไม่ได้ กระแสที่ได้จากเครื่องนับจึงไม่ขึ้นกับชนิดและพลังงานของรังสีเอกซ์ แต่จะขึ้นกับรูปทรงและความตันของแก๊สภายในเครื่องตรวจหา รูป 15-14 เส้นบนแทนรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานมาก (ความยาวคลื่น 0.6 อังสตروم) เส้นล่างแทนรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานน้อย (ความยาวคลื่น 5 อังสตروم)

เครื่องตรวจหาห้องมีการแตกตัวเป็นไออ่อน (Ionization chamber detector) เป็นเครื่องตรวจหาที่ใช้ขั้วบวกและลบเป็นโลหะ ภายในมีแก๊สแห้งบรรจุอยู่และทำงานในช่วงศักย์ V_1 ถึง V_2 เมื่อใส่ศักย์ให้แก่ขั้วทั้งสอง 100 โวลต์หรือมากกว่า รังสีเอกซ์ที่ชนกับแก๊สจะเกิดการแตกตัวเป็นไออ่อนให้ไออ่อนบวกและอิเล็กตรอน (โพโตอิเล็กตรอน) ไออ่อนบวกซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าวิ่งไปขั้วแค็ปติด อิเล็กตรอนวิ่งไปแอนoden ทำให้เกิดกระแสขึ้น กระแสที่ได้ขึ้นกับผลงานของรังสีเอกซ์ไม่ขึ้นกับศักย์ใช้เร่ง กระแสที่ได้มีค่าน้อย (10^{-13} ถึง 10^{-16} แอมเปอร์) เครื่องตรวจหนานี้ไม่นิยมใช้วัดรังสีเอกซ์

เครื่องนับสัดส่วน (Proportional Counter) เครื่องนับนี้ทำงานในช่วงศักย์ V_3 ถึง V_4 ดังรูป 15-14 จำนวนอิเล็กตรอนที่นับได้ขึ้นกับอิเล็กตรอนชุดที่สอง (ขยายลัญญาณ 500



รูป 15-14 ศักย์ที่มีผลต่อการขยายตัวของแก๊สของเครื่องตรวจหาที่ใช้หลักการแยกตัวเป็นไออ่อน

(ถึง 10,000 เท่า) เมื่ออนุภาคที่แตกตัวเป็นไออ่อนได้ชนแก๊สเดี่ยวในเครื่องนับจะเกิดไออ่อน คุณไออ่อนนี้จะวิ่งไปที่ขั้วทั้งสอง สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนสูงมากเนื่องจากใช้ศักย์สูง อิเล็กตรอนที่วิ่งด้วยความเร็วสูงจึงชนกับอะตอมอาร์กอนอื่น ๆ เกิดไออ่อนบวกอาร์กอน (ชุดที่สอง) และอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น ไออ่อนบวกมีขนาดใหญ่กว่าข้าดังนั้นจึงวิ่งไปแค็ปติดไม่หมด ส่วนอิเล็กตรอนวิ่งไปแอนoden แล้ว เครื่องนับจึงนับไม่ได้ ต้องรอให้ไออ่อนบวกวิ่งไปแค็ปติดหมดก่อนเครื่องนับจึงทำงานใหม่ เวลาที่เครื่องนับหยุด

นับ (dead time) มีค่า 1 ไมโครวินาที พลัสร์ที่ได้จากเครื่องนับสัดส่วนจึงต้องถูกขยายก่อนที่จะนับอุอกมา

จำนวนอิเล็กตรอนต่อพลัสร์ (ความสูงพลัสร์) ที่เครื่องนับแบบนี้นับได้ขึ้นกับพลังงานของรังสีที่ชน ถ้าต้องการให้เครื่องนับนี้นับสัญญาณรังสีเอกซ์เพาะช่วงความถี่ต้องใช้เครื่องวิเคราะห์ความสูงพลัสร์ (pulse height analyzer) เครื่องวิเคราะห์จะนับแอมปลิจูดที่อยู่ในช่วงที่ตั้งไว้ เครื่องวิเคราะห์แบบนี้จึงทำหน้าที่คล้ายตัวทำแสงเอกสารนี้ เครื่องนับนี้นิยมใช้นับรังสีเอกซ์

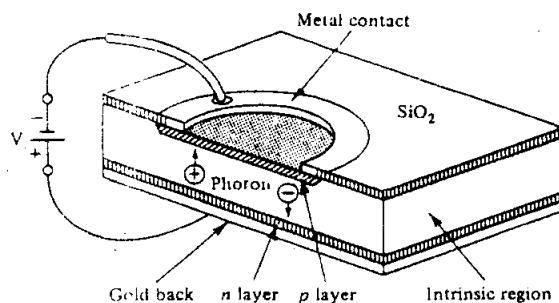
หลอดไกเกอร์ (Geiger tube) เป็นเครื่องนับที่นับในช่วงศักย์ V_s ถึง V_e ช่วงนี้แก๊สมีการขยายตัวมากกว่า 10^9 เท่า กระแสที่เกิดขึ้นจึงมีค่ามากวัดได้ง่าย การนำไฟฟ้าภายใต้ห้องของเครื่องนับชนิดนี้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง เพราะว่าอิเล็กตรอนจะหยุดวิ่งไปข้างบนหากถ้าบริเวณข้างบนมีไอออนบวกกันอยู่ (ไอออนบวกขนาดใหญ่ริ่งช้า) เครื่องนับนี้คล้ายกับเครื่องนับสัดส่วน เครื่องนับจะนำไปฟื้นได้อีกเมื่อไอออนบวกวิ่งไปจากข้างบน ช่วงเวลาที่เครื่องนับไม่ทำงาน เรียกว่าหยุดทำงาน (dead time) ช่วงนี้เครื่องนับไม่ตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ เวลาเครื่องหยุดทำงานนาน 50 ถึง 200 ไมโครวินาที เครื่องนับนี้จะมีสารอินทรีย์ผสมกับแก๊สเช่น สารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวระงับแก๊ส (quench gas) เช่นไฮาร์กอน 80 มิลลิเมตรผสานกับออกซิเจน 20 มิลลิเมตรผสานกับแก๊สอาร์กอน หรือคลอรีน 0.1 เปอร์เซ็นต์ในอาร์กอน ตัวระงับแก๊สทำหน้าที่ลดอิเล็กตรอนชุดที่สองซึ่งอาจเกิดจากแคทไอออน (Ar^+) ชนผนังห้องเพราศักย์ที่ใช้สูงมาก โมเลกุลออกซิเจนมีเทนหรืออาโลเจนมีศักย์ในการแตกตัวเป็นไอออนต่ำกว่าอาร์กอน ไฮอนอาร์กอนจึงถ่ายโอนพลังงานให้กับโมเลกุลเหล่านี้ โมเลกุลเหล่านี้จะเกิดการแตกออกเป็นเสียงของโมเลกุล และเกิดการรวมกันใหม่ได้โมเลกุลที่มีสภาพเหมือนเดิม

เครื่องนับนี้หาความเข้มของรังสีจากการนับพลัสร์ของกระแส เครื่องนับแบบนี้ใช้นับรังสีเอกซ์และรังสีชนิดอื่น แต่เครื่องนับนี้ไวต่อรังสีที่มีปริมาณน้อย ๆ

เครื่องนับการเปล่งแสงวับ (Scintillation counter) ใช้หลักการเกิดรังสีลูมิเนสเซนซ์โดยตอนหรืออนุภาค (รังสีเอกซ์) ชนสารพากฟอสฟอร์ เช่น แผ่นสังกะสีชัลไฟฟ์ทำหน้าที่ให้รังสีลูมิเนสเซนซ์ อุปกรณ์สมัยใหม่ใช้ผลึกโปร่งใส (transparent crystal) ของสารอนินทรีย์เช่น NaI ที่มี TI (I) ปะอยู่ร้อยละ 0.2 ผลึกนี้มีรูปร่างทรงกระบอกและมีขนาด 3 ถึง 4 นิ้วเมื่อโดยตอนชนผลึกโดยตอนจะถ่ายโอนพลังงานให้ผลึก ผลึกเมื่อรับพลังงานจะไม่เสียร่องรอย พลังงานออกมารูปรังสีฟลูออเรสเซนซ์ในช่วงความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรหลังจาก

โฟตอนวิ่งชัน 0.2 ไมโครวินาที (เวลาสลวยตัว) เวลาที่เครื่องนับแบบนี้หยุดนับจึงมีเวลาห้อยกว่าเวลาหยุดนับของเครื่องนับแบบบรรจุแก๊ส รังสีนี้จะชนหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์สองอันซึ่งจัดไว้ระหว่างสารตัวอย่าง สัญญาณที่นับได้จากหลอดคู่นี้จะเป็นสัญญาณจากสารตัวอย่างเท่านั้น ส่วนสัญญาณที่ได้จากการร้อนเปล่งอิเล็กตรอน (thermoion emission) หรือแบบลีกกราวน์จากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์อันได้อันหนึ่งไม่ถูกนับ ดังนั้นเครื่องนับแบบนี้จึงไม่ต้องแขวนในโทรศัพท์แบบพัลส์ให้ร่วมกับเครื่องนับนี้ เครื่องนับนี้จะนับเฉพาะช่วงพลังงาน (ความถี่) ที่ต้องการนับ นอกจากจะใช้ผลึกอนินทรีย์เป็นสารให้รังสีฟลูออเรสเซนซ์ยังใช้สารอินทรีย์ที่เรืองแสงได้ เช่นสีลบีน (silbene) แอนทราซีน (anthracence) และเทอร์ฟีนิล (terphenyl) ในโทลูอิน เครื่องนับที่ใช้ผลึกอนินทรีย์จะมีช่วงเวลาที่เครื่องหยุดนับ (dead time) 0.25 ไมโครวินาที ส่วนเครื่องนับที่ใช้สารอินทรีย์มีช่วงเวลาหยุดนับ 0.01 ถึง 0.1 ไมโครวินาที สารอินทรีย์นิยมใช้มาก เพราะไม่เกิดการดูดกลืนร่วม (self absorption) ของรังสีที่นับ เครื่องนับการเปล่งแสงวับที่ใช้ของเหลว ได้แก่ พารา-เทอร์ฟีนิลในโทลูอิน

เครื่องตรวจหาแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector) เครื่องตรวจหาแบบสารกึ่งตัวนำมีการทำงานคล้ายกับเครื่องตรวจหาที่ใช้หลักแก๊สแต่ตัวเป็นไอออน แต่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นของแข็งแทนแก๊สเนื้อย (Ar) สารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียมหรือซิลิโคน ที่ใส่ชาตุหมู่ (III) A เช่น แกลเลียมมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนอิสระน้อยกว่าซิลิโคนบริสุทธิ์ จะได้สารกึ่งตัวนำชนิด p ถ้าใส่ชาตุที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนอิสระมากกว่าซิลิโคนบริสุทธิ์จะได้สารกึ่งตัวนำชนิด n เมื่อรังสีชนสารกึ่งตัวนำจะเกิดการพาประจุโดยอิเล็กตรอนและโอลมากกว่าไอออนน้ำ รังสีที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนจะทำให้อิเล็กตรอนที่เคยอยู่ในแบบที่ไม่นำเลื่อนไปสู่เดบันนำและอิเล็กตรอนในเดบันนำจะเดินทางไปสู่ขั้วไฟฟ้าบวกด้วยสภาพเคลื่อนที่ได้ที่เร็วมาก ส่วนโอลหรือประจุบวกจะเดินทางไปทิศทางตรงข้าม (ขั้วไฟฟ้าลบ) โดยการแลกเปลี่ยนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ระหว่างชั้นและทิชชูข้างเคียงดังรูป 15-15 เครื่องตรวจ



รูป 15-15 โครงสร้างไฟโตไดโอดชนิดอยู่ต่อ p-n

หาแบบสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้มีสองแบบ แบบแรก ผิวที่ขวางกั้นเป็นชิลิคอนแบบที่สองเป็นลิเลียมที่loyเลื่อนอยู่ในชิลิคอนหรือเจอร์เมเนียมเพียงบางส่วน

เครื่องตรวจหาแบบผิวที่ขวางกั้น จะมีรอยต่อ p-n อยู่ที่ผิวของชิลิคอน ระหว่างรอยต่อ p-n เป็นชั้นของการพร่อง (depletion layer) ชั้นนี้จะไม่มีการพาประจุ ถ้าไม่มีการไปแอล์กัค์ร้อมรอยต่อ p-n ความลึกชั้นของการพร่องจะมีค่าหน่อย ถ้ามีการไปแอล์แบบพันกลับคร่อมรอยต่อ p-n ความลึกชั้นของการพร่องจะเพิ่มขึ้น ความลึกของชั้นนี้หาได้จาก $d = 0.5 \sqrt{\frac{v}{n}}$ (ในเมตร) ρ แทนสภาพด้านทานของชิลิคอนเป็นโอห์มเซนติเมตร v ศักย์ที่ใช้ไปแอล์เป็นโวลต์ สภาพด้านทานของชิลิคอนมีค่ามาก ถ้าศักย์ที่ใช้ไปแอล์มีค่ามาก ความลึกของชั้นนี้จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีรังสีชนชั้นของการพร่องในสารกึ่งตัวนำจะเกิดโซลและอิเล็กตรอนในชั้นนี้ แล้วให้ออกมาเป็นพัลส์คร่อมข้าวทั้งสองของรอยต่อ p-n

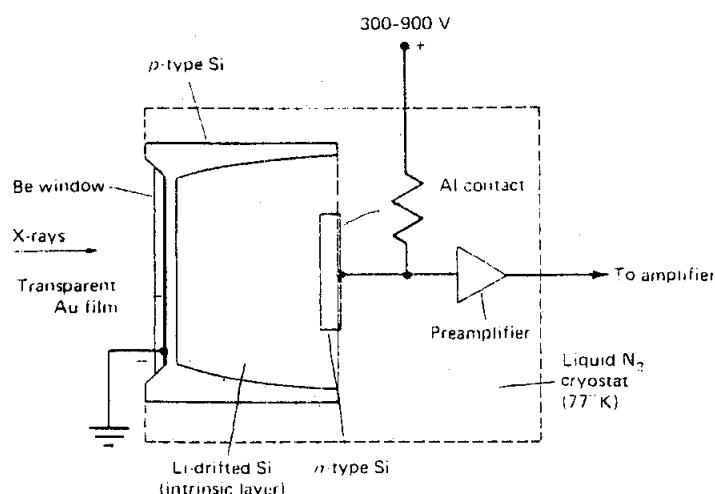
เครื่องตรวจหาแบบลิตเทียมที่loyเลื่อนในชิลิคอนหรือเจอร์เมเนียม Si(Li) หรือ Ge(Li) รูป 15 – 16 เป็นเครื่องตรวจหาริลิตเทียมที่loyเลื่อน มีลักษณะเป็น (Wafer) แผ่น ๆ ของผลึกชิลิคอน ในผลึกนี้มีสามชั้น ชั้นสารกึ่งตัวนำด้านนอก ชนิด n ทำหน้าที่รับรังสีเอกซ์ที่วิงชั้นชั้นภายในตรงกลาง (central intrinsic zone) และชั้นชนิด p ผิวด้านนอกของชั้นชนิด p ถูกเคลือบด้วยฟิล์มโปร่งใสของทองเพื่อให้นำไฟฟ้าดี ชั้นนี้จะมีหน้าต่างชั้นบาง ๆ ที่โปร่งใส ต่อรังสีเอกซ์ สัญญาณที่ออกมายังจะมาจากชั้นอะลูมิเนียมที่เคลือบบนชั้นชิลิคอนชนิด n สัญญาณนี้ถูกส่งเข้าสู่เครื่องขยายที่มีกำลังขยายประมาณ 10 เท่า เครื่องขยายส่วนมากเป็น field effect transistor ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนอินทิเกรตของเครื่องตรวจหา

เครื่องตรวจหาแบบลิตเทียมloyเลื่อนได้จากการพอกพูนผิวของผลึกชิลิคอนที่โดดเป็น p (หมู่ III A ปนกับหมู่ IV) เมื่อให้ความร้อน 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ลิตเทียมจะแพร่เข้าไปในผลึก เพราะว่าธาตุนี้ (ลิตเทียม) ให้อิเล็กตรอนง่าย ลิตเทียมที่เข้าไปอยู่จึงเปลี่ยนจากชั้น p เป็นชั้น n ใส่ศักย์กระแสตรงคร่อมผลึกขณะที่ยังร้อนอยู่เพื่อดึงอิเล็กตรอนจากชั้นลิตเทียม และโซล (ประจุบวก) จากชั้นชนิด p กระแสที่ผ่านคร่อมรอยต่อ pn ต้องพา (loyเลื่อน) ไอออนลิตเทียมไปยังชั้น p และเกิดชั้นภายในที่เป็นไอออนลิตเทียม (+) แทนที่จะเป็นโซล ทำให้มีเกิดการนำ เมื่อยืนลง ชั้นตรงกลางจะมีความด้านทานสูงเทียบกับชั้นอื่น (p และ n) เพราะไอออนลิตเทียมในตัวกลางนี้เคลื่อนที่ได้น้อย (ยาก) กว่าโซลที่ถูกแทนที่

ชั้นภายในของเครื่องตรวจหาชิลิคอนทำหน้าที่คล้ายกับเครื่องตรวจหาที่บรรจุแก๊สอา๊กตอน เมื่อมีโพตองชนชั้นภายในจะทำให้เกิดโพโตอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงจำนวนมาก โพโตอิเล็กตรอนนี้จะสูญเสียพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนในชิลิคอน (หมายพันตัว) ทำให้เกิด

แกนการนำ เป็นผลให้เพิ่มสภาพนำ เมื่อใส่ศักย์คร่อมพลีกนี้ แต่ละครั้งที่มีการดูดกลืนโฟตตอน จะให้พลัง ขนาดของพลังที่ได้แปรโดยตรงกับจำนวนโฟตตอนที่ถูกดูดกลืน

จากรูป 15-16 เครื่องตรวจหาและเครื่องขยายต้องควบคุมให้ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้ในโตรเจนเหลว (-196 องศาเซลเซียส) เพื่อลดระดับการรบกวน เครื่องตรวจหาแบบนี้มีการแยกพลังงานดีกว่าเครื่องที่ใช้หลักการแก๊สแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากอิเล็กตรอนและไฮล์ที่เกิดขึ้นมีค่ามาก การผลิตอิเล็กตรอนและไฮล์ 1 ชุดสำหรับเจอร์เมเนียมมีค่า 2.95 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับซิลิคอนมีค่า 3.65 อิเล็กตรอนโวลต์ เครื่องตรวจหาการเปล่งแสงวับ NaI (TI) ใช้พลังงาน 500 อิเล็กตรอนโวลต์ เครื่องตรวจหาแบบนี้จึงมีการแยกดีกว่าเครื่องตรวจหาแบบอื่นมาก



รูป 15-16 พื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งของลิเทียมที่ถอยเลื่อนในซิลิคอน เครื่องตรวจทาน้ำแข็งสีเอกซ์ และกันมั่นตั้งสี

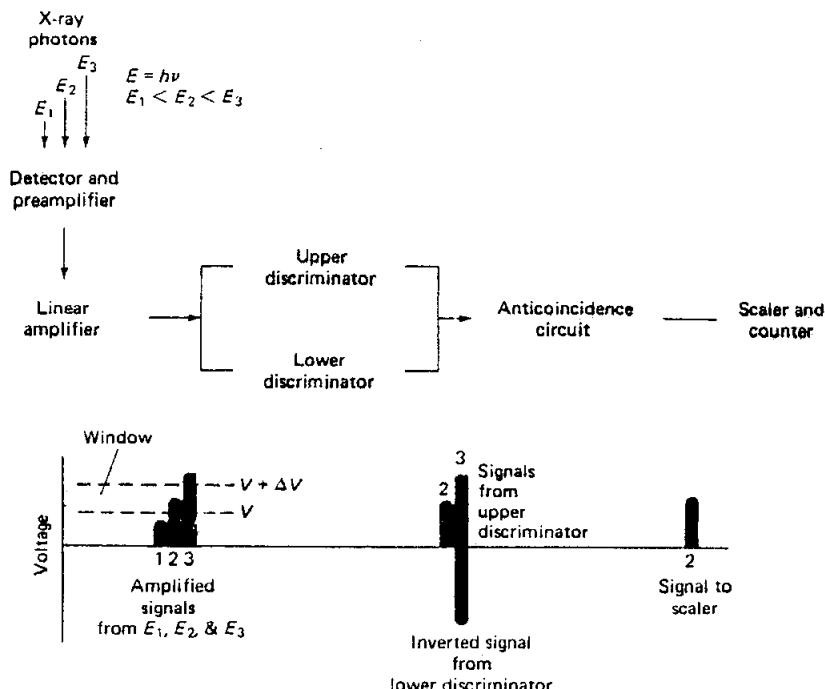
การแจกแจงของพลังสีเอกซ์จากเครื่องตรวจหารังสีเอกซ์ (Distribution of Pulse Height from X – Radiation Detectors) ก่อนที่จะเข้าใจถึงสมบัติของสเปกโกรามิเตอร์แบบกระจาย พลังงาน ต้องทราบว่าขนาดของพลัง (กระแส) ที่ได้เกิดจากเครื่องตรวจหาดูดกลืนพลังงานของ โฟตตอน (รังสีเอกซ์) ที่มีพลังงานท่ากันมีค่าไม่เท่ากัน พลังที่ต่างไปเกิดจากโฟโตอิเล็กตรอน ที่หลุดออกมาระบบทำให้เกิดแบบการนำของอิเล็กตรอนเป็นแบบสุ่ม ดังนั้นพลังที่ได้จึงเป็น การแจกแจงแบบเกาซ์เซียนรอบ ๆ ค่าเฉลี่ย ความกว้างของการแจกแจงของเครื่องตรวจ

หาแต่ละชนิดไม่เท่ากัน สำหรับเครื่องตรวจหาแบบลอยเลื่อนจะให้พัลส์ไฮท์เป็นแบบแคบ เครื่องตรวจหาลิเทียมที่ลอยเลื่อนในชิลิคอน หรือลิเทียมที่ลอยเลื่อนในเจอร์เมเนียมจึงนิยมใช้กับเอกซ์เรย์สเปกโกรามีแบบกระจายพลังงาน

กระบวนการคุณสัญญาณ (Signal Processor)

สัญญาณที่ได้จากการรับของขยายชุดแรกของเอกซ์เรย์สเปกโกรามีเตอร์จะถูกส่งเข้าสู่ เครื่องขยายชุดที่สองที่เป็นแบบเชิงเส้นที่ตอบสนองอย่างเร็วและมีกำลังขยายประมาณ 10,000 เท่า สุดท้ายได้พัลส์ของศักย์ที่สูงถึง 10 โวลต์

การเลือกเฟ้นพัลส์ไฮท์ (Pulse Height Selectors) เครื่องเอกซ์เรย์สเปกโกรามีเตอร์



รูป 15-17 แผนภูมิสัญญาณที่ได้จากการเลือกพัลส์ไฮท์ ตัวคัดบนตัดสัญญาณที่ต่ำกว่า V ทิ้ง โดยตัดสัญญาณ 1 ทิ้งให้สัญญาณ 2, 3 ผ่าน ตัวคัดล่างตัดศักย์ที่ต่ำกว่า $(V + \Delta)$ ทิ้ง ให้สัญญาณ 2 ผ่าน และกลับสัญญาณนี้ เกอร์ฟิลด์อัดตามแกนล่างแสดงความสูงของสัญญาณที่ผ่านออกสู่สเกล

รุ่นใหม่ (แบบบรรจุความยาวคลื่นและบรรจุพลังงาน) จะมีตัวคัด (discriminators) ทำหน้าที่ตัดพัลส์ที่ออกจากเครื่องขยายและมีค่าประมาณหรือน้อยกว่า 0.5 โวลต์ทิ้ง สัญญาณการรับกวนจากเครื่องตรวจหาและเครื่องขยายจึงถูกตัดออก เครื่องสเปกตรอบางแบบใช้ชุดการเลือกเฟ้นพัลส์ไฮท์แทนตัวคัด ชุดการเลือกเฟ้นพัลส์ไฮท์ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ตัดพัลส์ที่มีค่าต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้และพัลส์ที่มีค่าสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ทิ้ง พัลส์ที่มีค่าระหว่างขีดจำกัดซึ่งหรือหน้าต่างของพัลส์ไฮท์ผ่านได้ รูป 15-17 แสดงการทำงานของชุดการเลือกเฟ้นพัลส์ไฮท์ พัลส์ที่ได้จากเครื่องตรวจหาและเครื่องขยายชุดแรกจะถูกขยายโดยเครื่องขยายชุดสองและส่งออกมาเป็นสัญญาณศักย์ (ในช่วง 10 โวลต์) ตั้งแสดงในส่วนล่างของรูป สัญญาณเหล่านี้ถูกส่งเข้าสู่วงจรตัวคัดสองชุด วงจรตัวคัดทั้งสองจะตัดสัญญาณต่ำกว่าและสูงกว่าศักย์ทั้งสองที่ตั้งไว้ทิ้งโดยวงจรตัวคัดบนตัดสัญญาณ ! ออก เพราะสัญญาณนี้มีค่าต่ำกว่าศักย์ V ที่ตั้งไว้ แต่ยอมให้สัญญาณ 2 และ 3 ผ่าน วงจรตัวคัดล่างตั้งไว้ ($v + \Delta v$) จะตัดสัญญาณ 3 ทิ้งยอมให้สัญญาณ 2 ผ่าน วงจรชุดตัวคัดล่างยังทำหน้าที่กลับเข้าสัญญาณให้สัญญาณ 2 ที่มีศักย์ในช่วง Δv จะผ่านเข้าสู่เครื่องนับ

อุปกรณ์แบบบรรจุมักริชุดการเลือกเฟ้นพัลส์ไฮท์ตัดการรับกวน ใช้ตัวทำแสง เอกอร์ค์แยกเส้นที่วิเคราะห์จากเส้นที่มีอันดับสูง เนื่องจากรังสีที่มีพลังงานมากถูกเลี้ยวเบนจากผลึกที่เดียวกับรังสีที่มีพลังงานน้อย

เครื่องวิเคราะห์พัลส์ไฮท์ (Pulse-Height Analyzer) เครื่องวิเคราะห์นี้มักมีชุดการเลือกเฟ้นพัลส์ไฮท์หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งชุดทำหน้าที่จัดหาสเปกตรราพลังงาน เครื่องวิเคราะห์แบบหนึ่งช่อง (single channel) มีช่วงศักย์ 10 โวลต์หรือมากกว่า และมีหน้าต่าง 0.1 ถึง 0.5 โวลต์ การปรับหน้าต่างทำได้ทั้งแบบใช้มือหรืออัตโนมัติสแกนช่วงศักย์เพื่อหาสเปกตรัมแบบการกระจายพลังงาน เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (multichannel) มีช่องหลายช่องแยกจากกัน แต่ละช่องทำหน้าที่คล้ายแบบหนึ่งช่องและปรับหน้าต่างไว้รับศักย์ต่าง ๆ กัน สัญญาณที่ได้จากแต่ละช่องถูกส่งเข้าสู่วงจรนับแยกกันและทำการนับและบันทึกสเปกตรัมพร้อม ๆ กัน

สเกล และเครื่องนับ (Scalers and Counters) สัญญาณที่ได้จากเครื่องตรวจหารังสี เอกซ์ถูกหาร โดยจำนวนพัลส์จะมีค่าน้อยลงโดยการหารด้วยสิบ (บางที่ใช้สองหาร) จำนวนพัลส์นี้ถูกส่งเข้าสู่วงจรเครื่องนับ

วิธีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ X – Ray Fluorescence Methods

สเปกตรัมเปล่งออกของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการใช้หลอดรังสีเอกซ์อบรังสีสารตัวอย่างโดยจัดตัวอย่างให้อยู่ที่พื้นที่เป้าของหลอดรังสีเอกซ์ แต่เทคนิคนี้ใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างได้เฉพาะบางตัวจึงไม่นิยม การกระตุ้นสารตัวอย่างมักใช้วิธีการอบรังสีสารตัวอย่างด้วยลำรังสีเอกซ์จากหลอดรังสีเอกซ์หรือแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสี ธาตุที่มีในสารตัวอย่างถูกกระตุ้นโดยลำรังสีชุดแรกแล้วเปล่งรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่มีความยาวคลื่นเฉพาะอย่าง วิธีการนี้บางที่เรียก เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์หรือวิชีปล่อย รังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ใช้วิเคราะห์คุณภาพของชาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่าอกซิเจน (8) วิธีนี้ยังใช้วิเคราะห์ปริมาณหรือกึ่งปริมาณได้ด้วย

อุปกรณ์ Instrument

เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์มีสามแบบ ได้แก่ แบบกระจายความยาวคลื่น แบบกระจายพลังงาน และแบบไม่กระจาย ส่องแบบหลังยังแบ่งออกเป็นแบบใช้แหล่งกำเนิดรังสีหลอดรังสีเอกซ์หรือไอโซโทปกัมมันตรังสี

อุปกรณ์แบบกระจายความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive Instrument) อุปกรณ์แบบนี้ต้องใช้หลอดรังสีเอกซ์เป็นแหล่งกำเนิดรังสี เพราะการจัดอุปกรณ์แบบนี้มีขั้นตอนการสูญเสียพลังงานมาก โดยเฉพาะตัวทำงาน ตัวทำงานให้ลำรังสีเอกซ์ในแนวหน้าเข้าสู่ผลีก ผลีกจะกระจายรังสีที่มีความยาวคลื่นเหมาะสมเข้าสู่ตัวทำงานก่อนเข้าสู่เครื่องตรวจหา ถ้าใช้แหล่งกำเนิดรังสีจากสารกัมมันตรังสี สารนี้จะเปล่งโฟตอนน้อยกว่าหลอดรังสีเอกซ์ 10^{-4} เท่าปริมาณรังสีที่เข้าสู่เครื่องตรวจหามีน้อยมากจนนับไม่ได้หรือนับได้ไม่ถูกต้อง

อุปกรณ์แบบกระจายความยาวคลื่น มีสองแบบ หนึ่งช่องหรือลำดับ (Sequential) และหลายช่องหรือพร้อมกัน (simultaneous) สเปกโกรมิเตอร์แบบหนึ่งช่องแสดงในรูป 15 – 12 ใช้วิเคราะห์รังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ หลอดรังสีเอกซ์และสารตัวอย่างถูกจัดให้อยู่ในวงกลมแสดงไว้ส่วนบนสุด อุปกรณ์แบบช่องเดียวมีทั้งแบบใช้มือและอัตโนมัติ แบบใช้มือใช้วิเคราะห์ชาตุได้สองสามชาตุ การวิเคราะห์ทำโดยการปรับมุมผลีกที่ใช้วิเคราะห์ // และมุมเครื่องตรวจหา 20 ทำการนับด้วยเวลาที่เหมาะสม อุปกรณ์แบบอัตโนมัตินิยมใช้วิเคราะห์คุณภาพเนื่องจากเครื่องสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจได้รวดเร็ว อุปกรณ์แบบนี้มีมอเตอร์ช่วยขับเคลื่อนหมุนผลีกและเครื่องตรวจหาให้สัมภัณฑ์กับตำแหน่งปากกาของเครื่องบันทึก

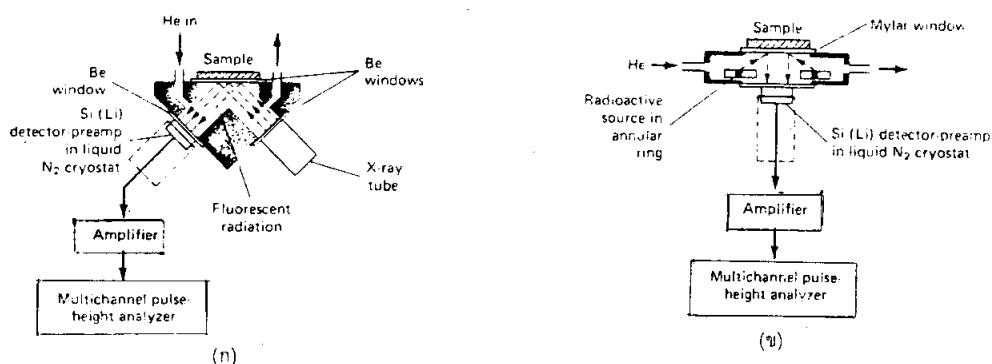
สเปกโกรมิเตอร์แบบช่องเดียวรุ่นใหม่ใช้หลอดรังสีเอกซ์ที่มีเวลาสองอัน อันแรกเป็น เก้าโครเมียมสำหรับวิเคราะห์ธาตุที่มีความยาวคลื่นมาก (ยาว) อันสองเป็นเก้าห้องสแตน สำหรับวิเคราะห์ธาตุที่มีความยาวคลื่นสั้น การวิเคราะห์ธาตุที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 2 อังสตรอมต้องใช้เครื่องคัดอากาศดูดอากาศออกหรือผ่านแก๊สไฮเลียม

อุปกรณ์ที่มีหลายช่องมีขนาดใหญ่กวิเคราะห์ธาตุที่สนใจได้พร้อมกันถึง 24 ธาตุ แต่ ละช่องจัดไว้ให้เหมาะสมกับผลึกและเครื่องตรวจหาโดยจัดไว้บนเส้นรอบวง ปกติรึงมุมผลึกไว้ตามเส้นที่ต้องการวิเคราะห์ อาจใช้ผลึกหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งอัน

เครื่องตรวจหานั่งอันใช้สำหรับหนึ่งช่อง เครื่องตรวจหาแต่ละอันมีเครื่องขยาย ตัวเลือกพัลส์ไซท์ สเกลต์ เครื่องนับ อุปกรณ์เหล่านี้มักพ่วงกับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ควบคุม อุปกรณ์ กระบวนการเกี่ยวกับข้อมูลผลวิเคราะห์ อุปกรณ์นี้วิเคราะห์ธาตุได้ 20 หรือมาก กว่า 20 ธาตุในสองสามวินาทีถึงสองสามนาที อุปกรณ์นี้ใช้ในอุตสาหกรรม เหล็กกล้า โลหะผสม ซีเมนต์ แร่ และผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจียม

อุปกรณ์แบบช่องเดียวและหลายช่องใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างในรูป โลหะ ของเบิง ที่เป็นผง พิล์มที่ระเหย ของเหลวบริสุทธิ์ หรือสารละลาย บางครั้งนำสารตัวอย่างใส่เซลล์ที่ หุ้มด้วยหน้าต่างไมลาร์หรือเซลโลฟেน

อุปกรณ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Instruments) รูป 15-18 เป็น สเปกโกรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน องค์ประกอบของเครื่องมี แหล่งกำเนิดรังสีที่มีหลาย ความยาวคลื่น เช่น หลอดรังสีเอกซ์หรือวัสดุกัมมันตรังสี ที่ใส่สารตัวอย่าง เครื่องตรวจ หาลิเทียมดิฟท์ (โลยเลื่อน) ซิลิคอน องค์ประกอบอิเล็กทรอนิกใช้เป็นตัวคัดพลังงาน

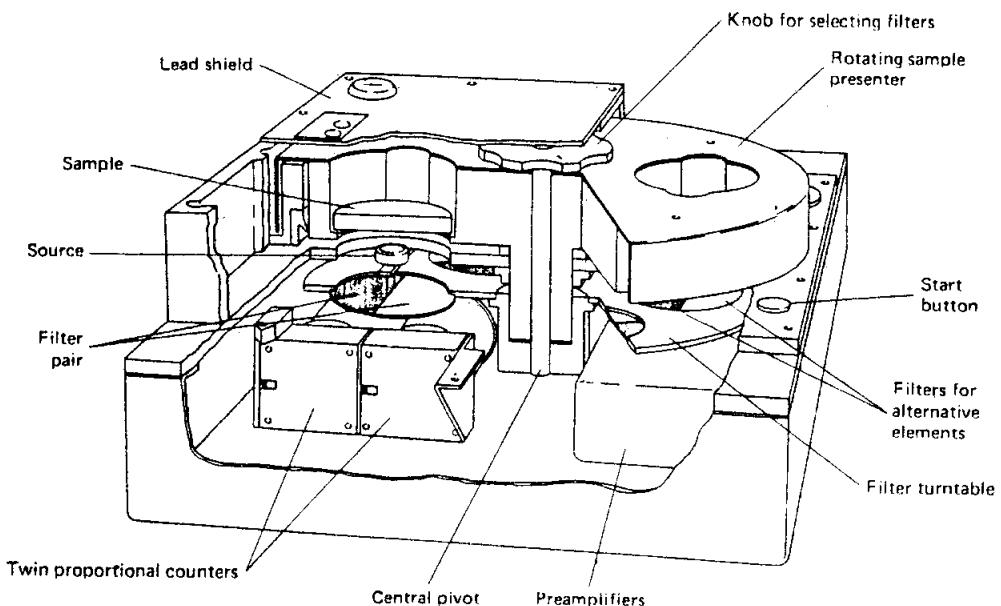


รูป 15-18 เอกซ์เรย์ฟลูออเรเซนซ์สเปกโกรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน (ก) การกระตุ้นโดยหลอดคูลิคช์ (ข) สารกัมมันตรังสี

อุปกรณ์นี้มีองค์ประกอบไม่ซับซ้อน แหล่งการระดูและตรวจหาเป็นแบบตรึง ไม่มีตัวทำขันนวนและผลึกที่ใช้เลี้ยงเบนรังสี สารตัวอย่างอยู่ใกล้กับเครื่องตรวจหา ความแรงรังสีที่เข้าสู่เครื่องตรวจหาแบบนี้มากกว่าอุปกรณ์แบบกระจายความยาวคลื่น 100 เท่า อุปกรณ์แบบกระจายพลังงานจึงใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสีเป็นแหล่งกำเนิดรังสีได้

อุปกรณ์แบบกระจายพลังงานที่มีหลายช่องวัดความเข้มเส้นรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาก็ได้พร้อมกัน สภาพไวและสัญญาณต่อการรับกันดี ส่วนข้อเสียของเครื่องแบบนี้คือ การแยกที่ความยาวคลื่นมาก (มากกว่าประมาณ 1 อังสตروم) ไม่ดี การแยกที่ความยาวคลื่น 5 นิ้วได้

อุปกรณ์ แบบไม่กระจาย (Nondispersive Instruments) รูป 15-19 เป็นภาพตัดข่องอุปกรณ์แบบไม่กระจาย อุปกรณ์แบบนี้ใช้ในการวิเคราะห์งานประจำ เช่นการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันและตะกั่วในน้ำมัน ใช้แหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีเหล็ก -55 ซึ่งให้รังสีเอกซ์ Mn K_α ที่มีพลังงานจริงเพียงพอในการกระดูน (อาบ) สารตัวอย่าง สารตัวอย่างที่มีกำมะถันให้เส้นฟลูอเรสเซนซ์ที่ 5.4 อังสตروم รังสีที่ออกจากสารตัวอย่างให้ผ่านฟิลเตอร์คู่หนึ่งที่อยู่ใกล้กันแล้วผ่านเข้าสู่เครื่องนับสัծส่วนคู่หนึ่ง ขอบซอร์ปชันเอดจ์ของฟิลเตอร์หนึ่งต่ำกว่า 5.4 อังสตرومเล็กน้อย ส่วนอีกฟิลเตอร์หนึ่งสูงกว่าหนึ่งเอดจ์เล็กน้อย ผลต่างระหว่างสัญญาณของสองขอบซอร์ปชันเอดจ์นี้ประโภโดยตรงกับปริมาณกำมะถันในสารตัวอย่าง การวิเคราะห์โดยวิธีนี้วัดสารตัวอย่างนานประมาณ 1 นาที ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดซ้ำ ๆ กัน มีค่าประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์



รูป 15-19 ภาพหน้าตัดของอุปกรณ์รังสีเอกซ์ฟลูอเรสเซนซ์แบบ ไม่กระจาย

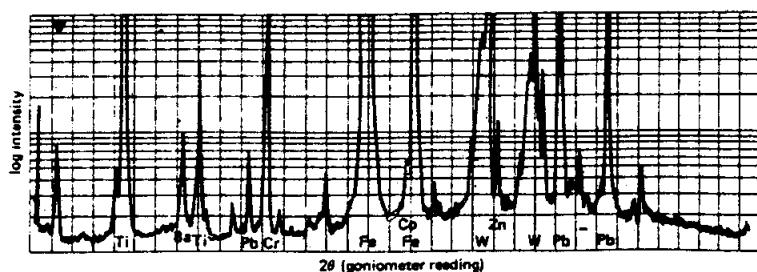
การประยุกต์รังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์สำหรับคุณภาพและปริมาณ (Qualitative and Quantitative Applications of X – Ray Fluorescence)

รูป 15 – 20 เป็นスペกตรัมที่ได้จากอุปกรณ์แบบกระจายความยาวคลื่นที่ใช้ศึกษาคุณภาพโดยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ ใช้พลังงานจากหลอดรังสีเอกซ์กระแสตู้น้ำตัวอย่างแกนราบที่ใช้หาความยาวคลื่นแทนด้วยมุม 2θ เมื่อทราบมุมและระยะห่างระหว่างชั้นผลึกจะหาความยาวคลื่นได้ นำความยาวคลื่นไปเทียบกับตารางสารอ้างอิง เพื่อหาว่าเส้นที่เปล่งออกมากเป็นเส้นของธาตุใด

รูป 15 – 21 เป็นスペกตรัมที่ได้จากอุปกรณ์กระจายพลังงาน แกนราบทะแหนex เขชช่องหรือพลังงานเป็นกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แต่ละจุดแทนค่าที่นับได้ของแต่ละช่อง ข้อมูลที่ได้จากการทำคุณภาพวิเคราะห์เปลี่ยนเป็นปริมาณได้โดยวัดความสูงฟีด ความสัมพันธ์นี้เขียนเป็นสมการได้

$$P_x = P_s W_x \quad \dots\dots\dots(15.16)$$

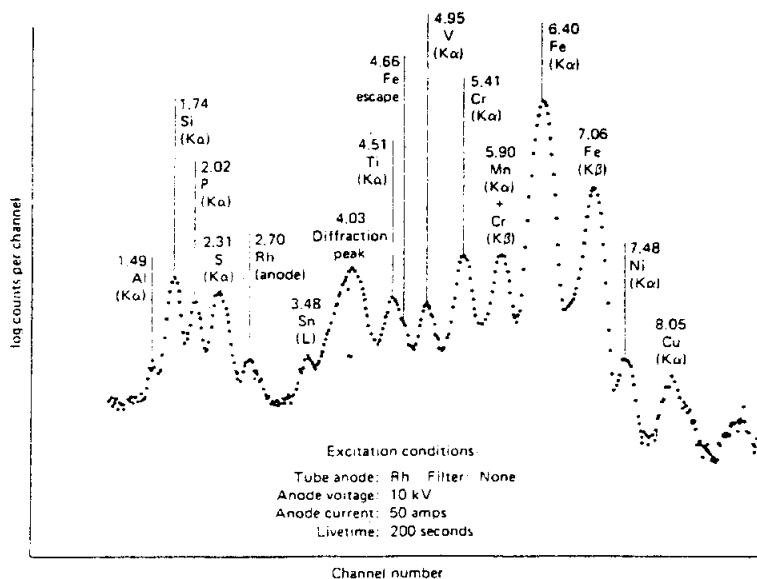
P_s ความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นที่วัดได้ (จำนวนที่นับได้ต่อ 1 ช่วงเวลา) W_x เชษส่วนโดยน้ำหนักของธาตุที่มีในสารตัวอย่าง P_x ความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นที่นับภายใต้สภาพเดียวกันถ้า W_x เป็นหนึ่ง P_x หาจากสารตัวอย่างที่บริสุทธิ์หรือสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน สมการ 15 – 16 ใช้ไดเมื่อสเปกตร์ที่สนใจไม่ถูกครอบกวนโดยสารอื่นที่มีในสารตัวอย่าง



รูป 15-20 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ของทริยากูที่ได้จากอุปกรณ์แบบที่มีการกระจายความยาวคลื่น

การทำปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative Analysis)

อุปกรณ์รังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์สามารถใช้ในการทำปริมาณสารตัวอย่างที่ซับซ้อนได้ด้วยความเที่ยงเมื่อต้องการผลวิเคราะห์ถูกต้อง สารตัวอย่างและสารมาตรฐานต้องมีสมบัติคล้ายกันมากที่สุดเพื่อตัดผลของเมทริกซ์



รูป 15-21 สเปกตรัมของตัวอย่างหนักที่ได้จากอุปกรณ์ที่มีการกระเจิงพลังงานโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นหลักคุณลักษณะเด่น

ผลของเมทริกซ์ (matrix effect) รังสีเอกซ์ที่เกิดจากกระบวนการฟลูออเรสเซนซ์ เกิดจากอะตอมที่อยู่บริเวณผิวและใต้สารตัวอย่าง ลำรังสีเอกซ์ชุดแรกที่ชนและลำรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่เปล่งออกจากความหนาของสารตัวอย่างจะเกิดการดูดกลืนและการกระเจิงภายในความหนาแน่น ขนาดของรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์และลำรังสีที่ชนขึ้นกับสัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของตัวกลาง ค่านี้ขึ้นกับสัมประสิทธิ์ของทุกราดในสารตัวอย่าง เครื่องนับนับความเข้มของเส้นที่เปล่งออกจากสารตัวอย่าง ความเข้มนี้ขึ้นกับความเข้มข้นของราด ความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของเมทริกซ์ที่มีในสารตัวอย่าง การดูดกลืนเนื่องจากเมทริกซ์หาได้จากสมการ 15-16

ผลของเมทริกซ์ที่มีต่อการวิเคราะห์ปริมาณ

- ถ้าเมทริกซ์ที่ปนกับธาตุที่สนใจดูดกลืนลำรังสีที่ชนหรือรังสีฟลูอเรสเซนซ์ที่เปล่งจากธาตุที่สนใจมากกว่าธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ W_x ที่หาได้จะมีค่าน้อย เนื่องจากค่า P_x หากสารมาตราฐานที่มีค่าตอบซอร์บแน่น้อย ถ้าเมทริกซ์ของสารตัวอย่างดูดกลืนน้อยกว่าเมทริกซ์ของสารมาตราฐาน W_x ที่หาได้จะเพิ่มขึ้น
- ผลของเมทริกซ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุได้มากกว่าเป็นจริง สเปกตรัมเปล่งออกที่ได้จากธาตุที่มีในสารตัวอย่างมีพลังงานมากพอที่จะไปกระตุ้นธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เป็นครั้งที่สอง ผลการวิเคราะห์ที่เพิ่มขึ้นขึ้นกับความเข้มข้นของธาตุที่สนใจกับความเข้มข้นของธาตุอื่น ๆ ที่มีในสารตัวอย่าง (เมทริกซ์)

เทคนิคที่ใช้แก้ผลของเมทริกซ์

- การเทียบมาตรฐานกับสารมาตราฐาน (calibration against standard) วิธีนี้หาปริมาณสารตัวอย่างโดยวัดความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ฟลูอเรสเซนซ์เทียบกับความเข้มข้นของสารมาตราฐานที่มีสมบัติคล้ายสารตัวอย่างมากที่สุด วิธีนี้ผลของการดูดกลืนและผลของการเสริมฟลูอเรสเซนซ์ที่มีต่อสารตัวอย่างและสารมาตราฐานมีค่าพอ ๆ กัน
- การใช้สารมาตราฐานภายใน (Use of internal standard) วิธีนี้เติมธาตุชนิดหนึ่งที่มีความเข้มข้นแน่นอนลงไปในสารมาตราฐานและสารตัวอย่าง ธาตุที่เติมลงไปต้องไม่ใช่ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ วัดอัตราส่วนความเข้มของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์กับสารมาตราฐานภายใน วิธีนี้ผลของการดูดกลืนและผลของการเสริมที่มีต่อเส้นทั้งสองมีค่าเท่ากัน
- เจือจางสารตัวอย่างและสารมาตราฐาน (Dilution of sample and standard) วิธีนี้เจือจางสารตัวอย่างและสารมาตราฐานด้วยสารที่ดูดกลืนรังสีเอกซ์เพียงเล็กน้อย (ธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมน้อย) เช่น เจือจางสารตัวอย่างด้วยน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีคาร์บอนไฮโดรเจน ออกซิเจนและไนโตรเจนเพียงอย่างเดียว เป็น ลิเทียมคาร์บอนเนต อะลูมินาและกรดบอริกหรือแก้วบอร์เชต ถ้าใช้ตัวทำละลายมากเกินพอก ผลของเมทริกซ์ที่มีต่อสารตัวอย่างและสารมาตราฐานจะมีค่าคงที่ วิธีนี้นิยมใช้วิเคราะห์แร่ โดยนำแร่ไปหลอมรวมกับบอร์เชต ทิ้งให้เย็นนำสารที่เป็นของแข็งมาวิเคราะห์

การประยุกต์รังสีเอกซ์ฟลูอเรสเซนซ์ในการทำปริมาณวิเคราะห์ (Some Quantitative Applications of X – Ray Fluorescence)

เอกซ์เรย์ฟลูอเรสเซนซ์สเปกไทรเมต์ริชีวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมมากได้รวดเร็ว ถ้าแก้ผลจากเมทริกซ์ได้ วิธีนี้วิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมน้อยกว่า 23 ได้ไม่ค่อยถูกต้อง

วิเคราะห์ธาตุที่เลขอะตอมน้อยกว่า 9 ไม่ได้

วิธีนี้นิยมมาประยุกต์ใช้คุณคุณภาพโลหะและโลหะผสม เนื่องจากใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้นจึงสามารถแก้ไของค์ประกอบของโลหะขณะดำเนินการผลิตได้ทัน วิธีนี้วิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวได้ เช่นวิเคราะห์ตัวก้าวและปริมาณในน้ำมันเบนซิน วิเคราะห์แคลเซียม แบเรียม และสังกะสีในน้ำมันหล่อลื่น วิเคราะห์รังค์วัตถุในตัวอย่างสี

วิธีนี้วิเคราะห์มลพิษในบรรยายกาศ เช่น การวิเคราะห์มลพิษในตัวอย่างอากาศ โดยการดูดอากาศผ่านถุงเก็บอากาศที่มีฟิลเตอร์มิลลิพอร์ที่ใช้กรองอนุภาคอากาศ งานสามอันที่มีกระดาษกรองซึ่งด้วยออร์โทโลลิดินเงินในเกรด และโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ บนกระดาษกรองเหล่านี้จะมีคลอริน ชัลไฟด์ และชัลเฟอร์ไดออกไซด์ นำกระดาษกรองเหล่านี้ไปหาปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์โดยรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์

นักวิทยาศาสตร์รัสเซียใช้วิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเหล็ก - 55 และพلوโตเนียม - 238 วิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในหิน ดาววินิสที่มีความร้อน 500 องศาเซลเซียสและมีความดัน 90 บรรยายกาศ พلوโตเนียม - 238 ใช้กระดุนธาตุเบา เช่น แมกนีเซียม อะลูมิเนียมและซิลิคอน เพื่อให้เปล่งรังสีฟลูออเรสเซนซ์เหล็ก - 55 ใช้กระดุนธาตุหนัก เช่น โพแทสเซียม แคลเซียมและไทเทเนียม

สรุปข้อดีและข้อเสียของรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (Summary of the Advantages and Disadvantages of X – Ray Fluorescence) ข้อดีคือ เส้นสเปกตราแยกจากกัน เส้นสเปกตราที่เกิดจากการแทรกสอดไม่ค่อยพบ สารตัวอย่างไม่ถูกทำลาย วิธีนี้ใช้วิเคราะห์สี สปีชีส์ของโบราณ เครื่องประดับ เหรียญ วิเคราะห์ สารตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย ๆ ถึงมากได้ วิเคราะห์ได้พร้อมกันหลายธาตุ ในเวลาเพียงสองสามนาทีความแม่นและความเที่ยง ของวิธีนี้พอ ๆ กับวิธีอื่น

ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่ไหเมื่อนกับการวิเคราะห์เชิงแสง ตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์โดยวิธีนี้ต้องมีความเข้มข้น 0.01 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์โดยวิธีเชิงแสงที่มีสองสามส่วนในส่วนส่วน กวิเคราะห์ได้ วิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ใช้วิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมน้อยกว่า 23 (วานเดียม) ได้ไม่แม่น เพราะธาตุเหล่านี้ชอบเกิดออกอิเล็กตรอนจึงลดความเข้มฟลูออเรสเซนซ์ อุปกรณ์มีราคาแพง วิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอม 8 (ออกซิเจน หรือ 9 (ฟลูออริน) ไม่ได้

วิธีดูดกลืนรังสีเอกซ์ X – Ray Absorption Methods

วิธีดูดกลืนรังสีเอกซ์นิยมน้ำไปประยุกต์ใช้เมื่อวิธีเปล่งรังสีเอกซ์และวิธีฟลูออเรส-

เซนซ์ใช้ไม่ได้ การวัดค่าแอบซอร์แบบซึ่งไม่ค่อยมีผลเนื่องจากเมทริกซ์ ผู้วิเคราะห์ต้องมี เทคนิค (ความชำนาญ) ในการวิเคราะห์และใช้เวลาในการวิเคราะห์มาก

วิธีดูดกลืนโดยตรง (Direct Absorption Methods) การวิเคราะห์โดยวิธีนี้คล้ายกับ วิธีเชิงแสง วัดແتبหรือเส้นรังสีเอกซ์ที่ลดลง ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ที่ใช้ได้จากการผ่าน รังสีเอกซ์ที่มีหลายความยาวคลื่นผ่านตัวทำงาน หรือใช้ฟลเตอร์ (ชาตุที่มีเลขอะตอมน้อย กว่าชาตุที่สนใจหรือสอง) หรือใช้จากแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสี

วิธีนี้ใช้วิเคราะห์ชาตุเดียวที่มีเลขอะตอมมาก และมีเมทริกซ์ที่มีเลขอะตอมน้อยปน ได้ดีเนื่องจากความกว้างของพืคดูดกลืนรังสีเอกซ์ห่างจากเส้นรังสีเอกซ์ เช่นการวิเคราะห์ ตะกั่วในน้ำมันเบนზิน กำมะถันหรืออาโลเจนในไฮโดรคาร์บอน

วิธีแอบซอร์ปชันเอดจ์ (The Absorption Edge Method)

วิธีแอบซอร์ปชันเอดจ์ไม่ค่อยมีการรับทราบของเมทริกซ์ที่เกิดจากวิธีการดูดกลืน โดยตรงและวิธีการเปล่งรังสีเอกซ์

หลักเบื้องต้นการวิเคราะห์ (Basis of the Method) วิธีแอบซอร์ปชันเอดจ์ วัดค่าสัม- ประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนไปที่แอบซอร์ปชันเอดจ์เมื่อความเข้มข้น ของสารเปลี่ยน ผลต่างสัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลด้านใดด้านหนึ่งของแอบซอร์ปชันเอดจ์มี \ ค่ามากดังรูป 15 – 7 เมื่อเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนค่าแอบซอร์แบบซึ่งที่ช่วงความยาวคลื่น อื่น (ไม่ใช้อดจ์) เมทริกซ์ที่อยู่กับชาตุที่สนใจมีค่าแอบซอร์แบบซึ่งของเอดจ์ที่ความยาวคลื่นอื่น จึงไม่รับกวนแอบซอร์ปชันเอดจ์ของชาตุที่สนใจ

ตัวอย่างการวิเคราะห์ (A typical Example) การวิเคราะห์ตะกั่วใช้อดจ์ L_{III} ($\lambda = 0.95$ อังสตรอม) ดังรูป 15 – 22 การวัดตะกั่วที่ความยาวคลื่น (เอดจ์) นี้จะวัดจากความยาวคลื่น ของรังสีฟลูออเรสเซนซ์ K_α และ K_β ของโซเดียมไบโรไมด์ ให้รังสีนี้ผ่านเข้าสู่สารตัวอย่าง จัดตัวทำแสงเอกสารคงไว้สำหรับวัดความเข้มเส้น K_α และ K_β ของไบโรมีนผลต่างของสัม- ประสิทธิ์ดูดกลืนสำหรับสารตัวอย่าง (เอดจ์ตะกั่ว) หากได้จากเส้นทั้งสอง ผลต่างนี้โดย ตรงกับความเข้มข้นตะกั่ว แต่ไม่ขึ้นกับเมทริกซ์ เนื่องจากความเข้มเส้นรังสีฟลูออเรสเซนซ์ ของไบโรมีนมีค่ามากแตกความกว้างแคบจึงใช้ได้ก็ว่าแหล่งกำเนิดหลอดรังสีเอกซ์ ปัจจุบัน แหล่งกำเนิดรังสีฟลูออเรสเซนซ์แบบเส้นใช้วิเคราะห์ชาตุได้ถึง 40 ชาตุ

วิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ X – Ray Diffraction Methods

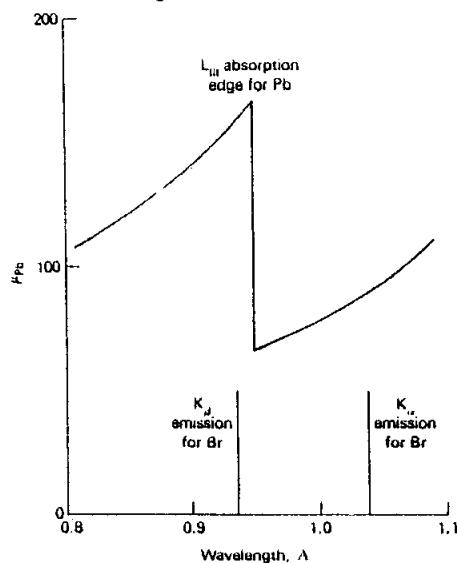
เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการจัดตัวและระยะห่างของอะตอมใน พล็ก เทคนิคนี้ยังให้ความกระจำงเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะ วัสดุพอลีเมอร์และ

ของแข็งอื่น ๆ เทคนิคนี้ยังใช้ศึกษาโครงสร้างผลิตภัณฑ์ธรรมชาติเชิงช้อน เช่นสเตียรอยด์ วิตามิน และสารปฏิชีวนะ

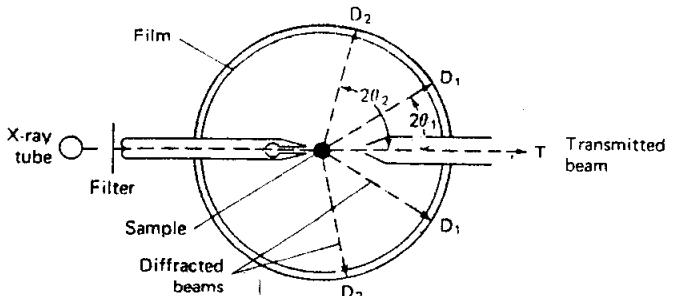
เทคนิคนี้ยังใช้ศึกษาคุณภาพผลึก เนื่องจากผลึกแต่ละชนิดมีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เฉพาะตัว สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเหมือนกับสารตัวอย่างสังเคราะห์ (สารมาตรฐาน) แสดงว่าสารทั้งสองนี้เป็นสารเดียวกัน วิธีนี้ใช้ศึกษาปริมาณของสารในของผสมได้

การชี้ผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Identification of Crystalline by X – Ray Diffraction)

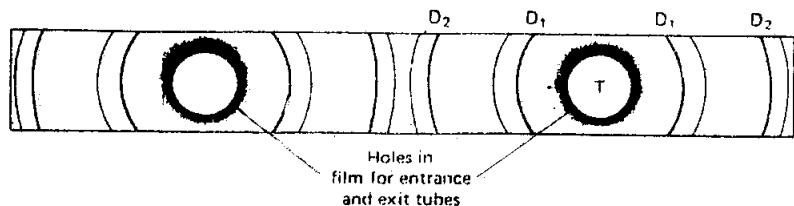
การเตรียมสารตัวอย่าง (Sample preparation) นำสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มาบดให้เป็นผงมีขนาด 200 ถึง 300 เมช หรือนำมาทำให้เป็นรูปทรงกรวยบอก นำสารตัวอย่างที่เป็นผงหรือรูปทรงกรวยบอกมาวางบนแก้วบาง ๆ หรือหลอดเซลล์โลฟ่อนโดยวางให้ขวางทางเดินแสงแคบ ๆ ของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว และมีความยาวคลื่นพอ ๆ กับระยะห่างระหว่างอะตอมของผลึก เมื่อรังสีเอกซ์ชนผลึกเกิดการสะท้อนบริเวณผิวน้ำและชั้นถัดไปของอะตอมที่จัดตัวอยู่อย่างเป็นระเบียบ ปรากฏการณ์นี้เรียกวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากผลึกสารตัวอย่าง ภาพดูได้จากฟิล์มถ่ายรูปที่จัดไว้ให้ตั้งฉากกับลำรังสีที่ชน รูปวงกลมบนแผ่นฟิล์มเกิดจากรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียวนะอะตอมของผลึกที่อยู่บนชั้นต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่สะท้อนแสง เนื่องจากผลึกมีหลายระนาบ (plane) จึงมีหลายมุม ภาพที่ได้จะเป็นรูปกรวย แต่แผ่นฟิล์มบางมากจึงเห็นเป็นรูปวงกลมหลังจากนำฟิล์มนี้ไปล้างดังรูป 15 – 23



รูป 15-22 ข้อมูลสำหรับการนับครั้งที่ melanochor เป็นผลลัพธ์ของอะตัว การตัดกรดออกกลีนที่ได้โดยการตัดกับไนโตรบาร์บิทูริก acid K_α และ K_β



(n)



(v)

รูป 15-23 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ชนผลีก (ก) ใช้กอส่องจับภาพ (ข) แผ่นฟิล์มหลังจากนำฟิล์มไปส่อง D₂, D₁ และ T แทนตำแหน่งฟิล์มที่อัดไว้ภายในกอส่อง

แผ่นฟิล์มถูกอัดไว้เป็นรูปวงกลม (ครึ่งวงกลมหรือเต็มวงกลม) โดยมีสารตัวอย่างอยู่ตรงจุดศูนย์กลาง การจัดแบบนี้ได้

$$4\theta = \frac{S}{r} \quad \dots\dots(15.7)$$

แทนรัศมีของฟิล์มเป็นมิลลิเมตร S ระยะห่างระหว่างภาพที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นมิลลิเมตร θ มุมของการเลี้ยวเบนเป็นเรเดียน

$$2\pi \text{ เรเดียน} = 360 \text{ องศา}$$

$$1 \text{ เรเดียน} = 360/2\pi = 180/\pi$$

$$= 57.296 \text{ องศา}$$

ดังนั้น

$$4\theta = \frac{S}{r}(57.296) \quad \dots\dots(15.8)$$

ปกติปรับ r ให้เป็นตัวคูณหรือตัวหารของ 57.296 การวัดมุม θ ทำได้โดยปรับให้เส้นผ่านศูนย์กลางของกล้องมีค่า 57.296 มิลลิเมตร เพื่อให้รัศมีของกล้องมีค่า 28.65 มิลลิเมตร

$$4\theta = \frac{S(57.296)}{\frac{57.296}{2}} \quad \dots\dots\dots(15.9)$$

S เป็นมิลลิเมตร

$$4\theta = 2S$$

$$S = 2\theta$$

ความเข้มและระยะห่างที่วัดได้จากพิล์มที่เกิดจากการเลี้ยวเบนใช้หาคูณภาพได้ เมื่อนำค่านี้ไปเทียบกับความเข้มและระยะห่างของสเปกตรัมของสารมาตรฐานเพื่อหาค่าระยะห่าง แผ่นที่เก็บข้อมูลสารมาตรฐานจัด d เรียงลำดับตามความเข้มของเส้น การวิเคราะห์สารตัวอย่างต้องเปรียบเทียบความเข้มเส้นต่าง ๆ ที่ได้กับความเข้มเส้นที่หนึ่ง สอง สาม และเส้นอื่น ๆ ของสารมาตรฐานตามลำดับ ถ้าสารตัวอย่างมีผลึกหลายชนิดปนกันการวิเคราะห์จะยุ่งยาก ความเข้มของเส้นที่ได้ใช้ในการคำนวณวิเคราะห์ได้

ตัวอย่าง เมื่อใช้กล้องที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 57.296 มิลลิเมตร แหล่งกำเนิดรังสีของเส้น K_{α} ของ Cu มีค่า 1.54 อั้งสตรอม ได้ระยะห่างระหว่างเส้นที่เกิดจากการเลี้ยวเบนบนพิล์ม มีค่า 28.66, 52.20 และ 82.08 มิลลิเมตรตามลำดับ จงหาค่ามุม θ และระยะห่างระหว่างชั้นผลึก

$$S = 2\theta$$

$$\theta_1 = \frac{28.66}{2} = 14.33 \text{ องศา}$$

$$\theta_2 = \frac{52.20}{2} = 26.10 \text{ องศา}$$

$$\theta_3 = \frac{82.08}{2} = 42.04 \text{ องศา}$$

ระยะห่างระหว่างชั้นผลึกได้จากการสมการของแบร์กเกอร์

$$d_1 = \frac{1.54}{2 \sin(14.33)} = 3.04 \text{ อั้งสตรอม}$$

$$d_2 = \frac{1.54}{2 \sin(26.10)} = 1.75 \text{ อั้งสตروم}$$

$$d_3 = \frac{1.54}{2 \sin(42.04)} = 1.15 \text{ อั้งสตروم}$$

กล้องที่ใช้บันทึกภาพผลลัพธ์คือกล้องแบบ เดบายชเรอเรอร์ กล้องที่วัดต้องปรับให้ถูกต้องโดยใช้ผลลัพธ์เดี่ยมคลอไวร์ด แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นท้องแดงที่ให้สี K_α และ K_β K_β ถูกกรองออกโดยแผ่นนิกเกิล รังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว K_α ผ่านเข้าสู่ห้องแคบ ๆ เพื่อให้รังสีนี้เดินทางในแนวขวาง รังสีที่ไม่ถูกเลี้ยวเบนโดยสารตัวอย่างจะผ่านออกสู่ช่องเล็ก ๆ แนวขวาง แล้วถูกจับโดยแผ่นพิล์ม สารตัวอย่างที่ใช้วัดต้องมีขนาดเล็กมาก เพื่อลดการดูดกัลเซ่นของลำรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนโดยผลลัพธ์ ความหนาของสารตัวอย่างมากสุดต้องไม่เกิน $1/\mu_{m\rho}$

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาการเลี้ยวเบนแบบอัตโนมัติ (Automatic Diffractometers) อุปกรณ์แบบนี้มีการจัดตัวคล้ายรูป 15–12 มีหลอดรังสีเอกซ์กับพิลเตอร์ที่เหมาะสม สารตัวอย่างที่เป็นผงละเอียดจะจัดไว้ตรงผลลัพธ์เชิงเดียว ปกติสารตัวอย่างอยู่ในที่ใส่สารตัวอย่างที่หมุนได้เพื่อเพิ่มกิจทางของผลลัพธ์ที่รับรังสี สเปกตร้าแบบเลี้ยวเบนได้จากการสแกนโดยอัตโนมัติ เมื่อนอกนับสเปกตรัมเปล่งออกหรือสเปกตรัมดูดกัลเซ่น อุปกรณ์แบบอัตโนมัติวัดความเข้มรังสีที่ถูกเลี้ยวเบนได้เที่ยงมาก

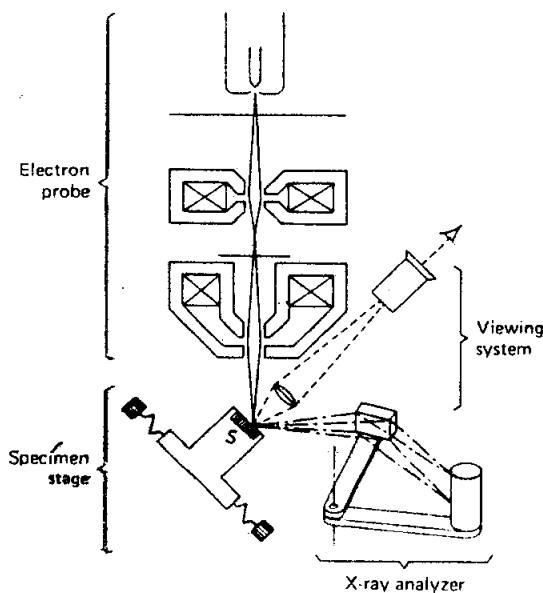
อิเล็กตรอนไนโครโพรบ The Electron Microprobe

วิธีอิเล็กตรอนไนโครโพรบ ใช้ลำอิเล็กตรอนแคน ๆ ที่ได้จากการไฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชนผิวสารตัวอย่าง และสารตัวอย่างให้รังสีเอกซ์ออกมา การตรวจหารังสีเอกซ์ใช้สเปกโทรมิเตอร์แบบกระจายความยาวคลื่นหรือพลังงาน

อุปกรณ์ (Instruments) รูป 15–24 เป็นแผนภูมิระบบอิเล็กตรอนไนโครโพรบ อุปกรณ์นี้ใช้ลำรังสีถึงสามชนิด อิเล็กตรอน แสง และรังสีเอกซ์ ระบบสัญญาณการทำงานที่จัดหาความดันน้อยกว่า 10^{-5} ทอร์ สเปกโทรมิเตอร์แบบกระจายความยาวคลื่นหรือพลังงาน (รูปนี้แสดงแบบกระจายความยาวคลื่น) เมื่อให้ความร้อนแก่แคโทดทั้งสองจะมีลำอิเล็กตรอนปล่อยออกมานะ อิเล็กตรอนจะถูกเร่งไปยังแอโนด เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าสองอันทำหน้าที่ไฟกัสดำ อิเล็กตรอนที่ตกสู่สารตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนมีเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.1 และ 1 ไมโครเมตร ของติกัล ไนโครโพรบใช้ถูตัวแห่งพื้นที่ที่ลำอิเล็กตรอนชนสารตัวอย่าง รังสีเอกซ์ฟลุ,oอเรสเซนซ์ที่ออกจากสารตัวอย่างผ่านเข้าสู่ตัวทำงานผลลัพธ์เชิงเดียว เครื่องตรวจหา

ชนิดบรรจุแก๊ส ที่ใส่สารตัวอย่างเคลื่อนที่ได้ในทิศทางตั้งฉากกันสองทิศทางและหมุนได้เพื่อทำการสแกนพื้นที่สารตัวอย่าง

การประยุกต์ใช้ (Applications) อิเล็กตรอนไมโครโปรบให้ข้อมูลทางฟิสิกส์และเคมีของผิวสารตัวอย่าง ใช้ศึกษาเฟสของโลหะรวมและเซรามิก การจัดตัวของโลหะในโลหะผสม อัตราการแพร่ของสารเจือปนในสารกึ่งตัวนำ ด้านกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ศึกษาคุณภาพและปริมาณที่ผิว



รูป 15-24 แผนภูมิของอุปกรณ์อิเล็กตรอนไมโครโปรบ

แบบฝึกหัด

- 15-1 จงหาขีดจำกัดความยาวคลื่นสั้นของรังสีแบบต่อเนื่องจากหลอด รังสีเอกซ์ ที่ใช้เงิน เป็นเป้า และได้รับศักย์ 80 กิโลวัตต์
- 15-2 จงหาศักย์ต่ำสุดที่ต้องใช้กรอบดูนุกรมของเส้น K_β และ L_β ของ (ก) U (ข) K (ค) Rb (ง) W
- 15-3 เส้น K_α ของแคลเซียม สังกะสี เชอร์โโคเนียม และดีบุก เกิดที่ความยาวคลื่น 3.36, 1.44, 0.70 และ 0.49 อังสตรอมตามลำดับ จงคำนวนความยาวคลื่นโดยประมาณสำหรับ เส้น (ก) วานเดียม (ข) นิกเกล (ค) ชีลีเนียม (ง) บอร์มีน (จ) แคนเดเมียม และ (ฉ) พลวง
- 15-4 เส้น L_α ของแคลเซียม สังกะสีเชอร์โโคเนียมและดีบุกพบที่ความยาวคลื่น 36.3, 11.9, 6.07 และ 3.60 อังสตรอมตามลำดับ จงหาความยาวคลื่นของเส้น L_α ของธาตุในแบบ ฝึกหัดข้อ 3.
- 15-5 สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของนิกเกลวัดโดยใช้เส้น K_α ของทองแดงมีค่า 49.2 ตาราง เชนติเมตรต่อกรัม จงคำนวนความหนาของแผ่นนิกเกลที่ยอมให้รังสี CuK_α ที่ผ่าน ได้ร้อยละ 36.1 สมมติความหนาแน่นของแผ่นนิกเกล 8.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- 15-6 สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลสำหรับ K, I, H และ O เมื่อใช้รังสี M_K 0.711 อังสตรอมมี ค่า 16.7, 39.2, 0.0 และ 15.0 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม
- ก. จงคำนวนสัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของสารละลายที่เตรียมจากการผสม KI 8.0 กรัม กับน้ำ 92.0 กรัม
- ข. ความหนาแน่นของสารละลายข้อ ก. มีค่า 1.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จงหาเศษส่วนของรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสี M_K ที่ผ่านชั้นสารละลายหนา 0.50 เซนติเมตร
- 15-7 การวัดค่าตอบซอร์บเอนซ์รังสีเอกซ์เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นหน้าต่างสำหรับเซลล์วัด เส้น K_α ของเงิน สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของอะลูมิเนียมที่ความยาวคลื่นนี้มีค่า 2.74 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ความหนาแน่น 2.70 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จง หาความหนาสูงสุดของแผ่นอะลูมิเนียมที่ดูดกลืนรังสีได้ไม่เกินร้อยละ 2.0
- 15-8 สารละลายไอโอดีนในเอทานอลมีความหนาแน่น 0.79 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชั้นสารละลายนี้หนา 1.5 เซนติเมตร ยอมให้รังสีจากแหล่งกำเนิดรังสี M_K ผ่าน

- ร้อยละ 27.3 สัมประสิทธิ์ดูดกลืนเชิงมวลของไอโอดีน คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนมีค่า 39.2, 0.70, 0.00 และ 1.50 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมตามลำดับ
- ก. จงคำนวณร้อยละของ I_2 ที่มีอยู่โดยไม่ต้องคำนึงถึงการดูดกลืนจากแอลกอฮอลล์
 ข. จงคำนวณร้อยละของ I_2 เมื่อมีการดูดกลืนของแอลกอฮอลล์
- 15-9. จงคำนวณการปรับgoniโอมิเตอร์ในเทอม 2θ ที่ต้องการดูเส้น K_α ของเหล็ก (1.76 อังสตรอม) ซีลีเนียม (0.992 อังสตรอม) และเงิน (0.497 อังสตรอม) เมื่อใช้ผลึกต่อไปนี้ เลี้ยวเบนรังสี (ก) โගแพช (ข) ลิตเทียมฟลูออไรด์ (ค) โซเดียมคลอไรด์
- 15-10. จงคำนวณการปรับgoniโอมิเตอร์ในเทอม 2θ ที่ต้องการดูเส้น L_β ของบอร์มีนที่ 8.126 อังสตรอม เมื่อใช้ผลึกต่อไปนี้เลี้ยวเบนรังสี
 (ก) เอทิลีนไดอะมีนดีทาร์เกต
 (ข) แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต
- 15-11. จงคำนวณศักย์ต่ำสุดที่ให้กับหลอดเพิ่กระดับเส้นของชาตุต่อไปนี้ ความยาวคลื่น ในวงเล็บมีหน่วยเป็นอังสตรอมและตรงกับแอบซอร์ปชันเอดจ์
- ก. เส้น K_α ของแคลเซียม (3.064)
 ข. เส้น L_α ของสารหก (9.370)
 ค. เส้น L_β ของยูเรเนียม (0.592)
 ง. เส้น K_α ของแมกนีเซียม (0.496)
-