

บทที่ 1

การวิเคราะห์โดยใช้ฟลูออร์เรสเซนต์เอ็กซ์

1.1 บทนำ

การวิเคราะห์โดยใช้ฟลูออร์เรสเซนต์เอ็กซ์ เรียกย่อๆว่า FE.4 (fluorescent-excitation analysis) เป็นเทคนิคในการกระตุ้นสารตัวอย่าง (sample) ให้ปล่อย characteristic x-rays ออกมานาจากอะตอม ชี้งการกระตุ้นอะตอมภายในสารตัวอย่าง มีหลักวิธี เช่น

- ใช้หลอด เอ็กซ์ เรย์ธรรมชาติ (พลังงานสูง หรือดับก์ได้)
- ใช้ไอโซไทบอร์นีทีคิวบิก ชีงปล่อยอนุภาคแอลไฟ เมتا แแกมน่า หรือเอ็กซ์เรย์
- ยิงด้วยอนุภาคมีประจุ หรือไอออน จากเครื่องเร่งอนุภาค
- ฉายด้วย เอ็กซ์เรย์ทุติยภูมิ ชีงได้จากเม้า (target) ที่เลือกไว้อย่างเหมาะสม หรือเป็น เอ็กซ์เรย์ที่ถูกโพลาไรซ์ (polarized) เช่น จากชินไครอตรอน (synchrotron radiation)
- กระตุ้นโดยตัวเอง กัลวาสิอ สารตัวอย่างประกอบด้วยกัมมันตภาพรังสี

จากนั้น ใช้เครื่องมันติกรังสีเอ็กซ์ที่เปล่งออกมานาจากสารตัวอย่าง และพิจารณาในตาราง โดยคุณภาพลักษณะของแคแรค เทอเรสติก เอ็กซ์เรย์ (characteristic x-ray) ชีงจะบ่งชี้ถึงธาตุยัง (ธาตุที่เป็นตัวมล่อยเอ็กซ์เรย์ดังกล่าว)

ความรู้สึกฐานที่ควรจะเข้าใจ คือ เรื่องโครงสร้างอะตอม ขบวนการคุณคลิน (absorption) และการกระเจิง (scattering) ของกัมมันตภาพรังสี ผลที่เกิดขึ้นคือ สเปกตรัม (spectrum)

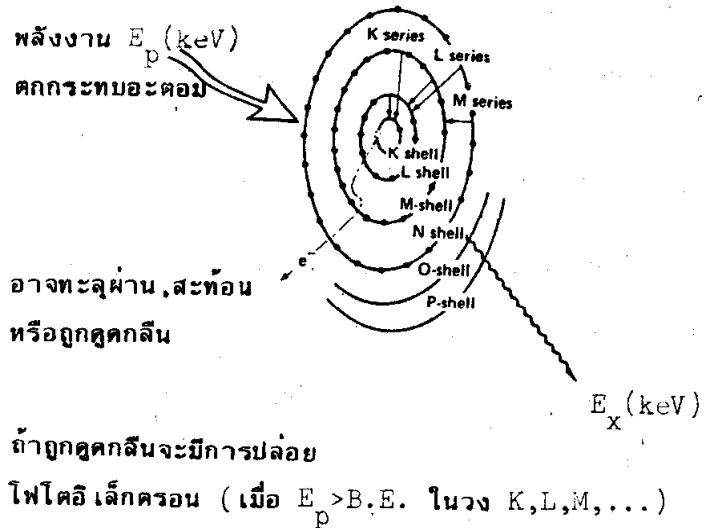
1.2 หลักการที่ว่าไปของการวิเคราะห์โดยใช้การกระตุนให้เกิดฟลูออร์เรสเซนส์

หลักการที่ว่าไปของ FEA คือ มีฟลักซ์ (flux) ของกัมมันตภาพรังสีที่ถูกกระตุนให้เกิด ในฟลักซ์ประกอบด้วยอนุภาคหรือไฟต่อน มีพลังงาน E_p ตกกระบทสารตัวอย่าง ซึ่งพลังงานดังกล่าวมักมีหน่วยเป็น keV (kilolectronvolt) หรือ MeV (Megaelectronvolt) เมื่อฟลักซ์ตกกระบทสารตัวอย่าง ย่อมเกิดการชนกัน (ของอนุภาค) แต่ไม่ทุกอนุภาคในฟลักซ์จะชนกับสารตัวอย่างได้ทั่วถึง ขึ้นอยู่กับ (1) ความหนาของสารตัวอย่าง (2) พลังงานของกัมมันตภาพรังสีที่ใช้กระตุน

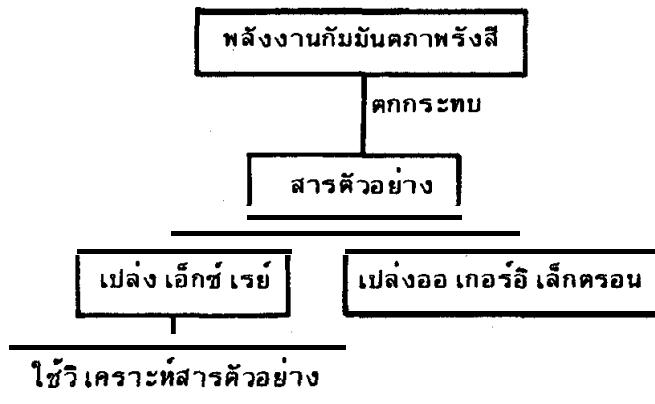
ต่อไปพิจารณาว่า ถ้ามีการชนกัน ย่อมเกิดการกระเจิง ซึ่งแยกได้เป็น 2 แบบคือ มีการสูญเสีย หรือไม่สูญเสียพลังงาน นอกจากนี้ กัมมันตภาพรังสีบางส่วนอาจถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์โดยสารตัวอย่าง ในกรณีอินไซรัล เอียดของการชนกันดังกล่าว จะเลือกอินไซรัล เอียดอะตอมเดียวเท่านั้น แนวโน้มความเป็นจริงจะมีการชนกันเป็นจำนวนล้านอะตอมกิ๊ตตาน ทั้งนี้ เพื่อสะดวกและง่ายต่อการทำความเข้าใจนั้นเอง ในรูป 1.1 แสดงแผนภาพการชนกัน โดยสมมุติว่าปริมาณตักกระบทนั้นถูกดูดกลืนทั้งหมด และถ้า E_p (keV) > พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของอิเล็กตรอนในอะตอม ดังนั้น อิเล็กตรอนในวงโคจรจะได้รับพลังงานจนมีขนาดเท่า E_p จึงสามารถหลุดพ้นจากอะตอมแม่ได้ ผลตามมาคือ เกิดช่องว่างในวงโคจรของอะตอมดังกล่าว ทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะไม่มั่นคง หรือเรียกว่าอยู่ในภาวะถูกกระตุน (excited state) เพื่อที่จะจัดให้มีสถานะมั่นคง เช่นเดิม ต้องมีการปล่อยแครค เทอร์เรสติก เอ็กซ์เรย์ หรืออี เกอร์อี เล็กตรอน (Auger electron) ดังแสดงแผนภาพในรูป 1.2

ข้อสังเกตคือ หลังจากเกิดภาวะถูกกระตุนในอะตอมแล้ว ไม่จำเป็นต้องเกิดแครค เทอร์เรสติก เอ็กซ์เรย์เพียงอย่างเดียวเสมอไป แต่ถ้าเป็นเอ็กซ์เรย์ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์สเปกตรัมได้

ในการทดลอง ยังมีอีกหลายพารามิเตอร์ที่ต้องคำนึงถึง เช่น การเตรียมสารตัวอย่าง อุปกรณ์สำหรับการทดลอง การจัดจีโอเมทรี (geometries) ของเครื่องมือ การ



รูป 1.1 แผนภาพอย่างง่ายแสดงกลไกการเปล่งรังสีเอ็กซ์ จำนวนอิเล็กตรอนที่มีประจุในแต่ละวงโคจรขึ้นกับอะตอมของธาตุ ($B.E.$ =พลังงานยึดเหนี่ยว หรือ binding energy)



รูป 1.2 โครงสร้างสรุปเหตุการณ์เมื่อกัมมันตภาพรังสีตกกระทบอะตอมสารตัวอย่าง

เครื่ยมสารมาตรฐาน (standards) เพื่อใช้ในการปรับเทียบ (calibrate) การลดผลลัพธ์ของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากเกิดการคุกคันขึ้นภายในสารตัวอย่าง เป็นต้น

1.3 ข้อได้เปรียบและการประยุกต์ใช้ FEA

โดยทั่วไป อาจสรุปได้ว่า FEA เป็นวิธีการใหม่ที่มีข้อได้เปรียบในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุต่างๆ ในสารประกอบ ดังนี้

- (1) ถ้าอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบมีประสิทธิภาพต้องทำการวิเคราะห์ได้จะเสียค่าใช้จ่ายส่วนที่ต้องจ่ายให้กับผู้ให้บริการ
- (2) มีความรวดเร็ว (กว่าวิธีอื่นๆ) โดยใช้เวลาเป็นนาทีสำหรับการวิเคราะห์ในงานประจำ
- (3) เทคนิคการใช้อิเล็กทรอนิกส์หรือไฟฟ้า เป็นตัวกระตุ้นนั้น ไม่ทำลายองค์ประกอบของสารตัวอย่าง (แต่ถ้าเป็นลักษณะของเครื่องเร่งอนุภาคอาจมีส่วนทำลายได้บ้าง)
- (4) การเครื่ยมสารตัวอย่าง ง่ายและสะดวกไม่ต้องผ่านขั้นตอนต่างๆ ที่ยุ่งยาก เช่นขั้นตอนใดๆ
- (5) รูปลักษณะของสารตัวอย่างอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส
- (6) กรณีวิเคราะห์หลายอย่างในสารประกอบเดียว ก็สามารถหาค่าเป็นพหุธาตุมีลำดับสูงกว่าใช้เดี่ยมสามารถใช้วิธีนี้ได้ ถ้าธาตุพวกมีลำดับต่อกันว่าใช้เดี่ยมจะมีการปล่อยเอ็กซ์เรย์หลังงานคู่ ซึ่งมักถูกคุกคันขึ้นอยู่กับในสารตัวอย่างนั้น เองยกเว้นกรณีเครื่ยมสารตัวอย่างที่ปราศสีดและมีขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนพอสมควร
- (7) อุปกรณ์แยกพิเศษหลังงานมักใช้แบบมัลติชานแนลซึ่งสามารถแยกได้หลายหลังงานในเวลาเดียว ก็จะมีข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในรูปแบบ digital ดังนั้นจึงสะดวกที่จะต่อ กับเครื่องคอมพิวเตอร์
- (8) การใช้เครื่องมือวิเคราะห์นั้นง่าย จึงสามารถฝึกหัดง่ายเพื่อกำกับดูแล บนหน้าจอของแต่ละอุปกรณ์ได้ ทุนเวลาผู้เชี่ยวชาญ

การประยุกต์ใช้ FEA กว้างขวางมาก เช่น วิเคราะห์ธาตุ aerosol ทางปริมาณธาตุที่ เป็นผลภาวะในย่านโรงงาน วิเคราะห์สารตัวอย่างที่เก็บจากบริเวณใกล้เคียง โรงงานพื้นิวเคลียร์ เป็นต้น ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น บุนชีเมนต์ หรือในโรงงานผลิตโลหะ ได้มีการใช้เทคนิคนี้ในการหาส่วนประกอบที่เหมาะสม หรือหาปริมาณสาร เจือตามลำดับสามารถใช้วิธีการนี้หาอายุของวัตถุโบราณในสาขาวิศวกรรมศาสตร์ ธรณีวิทยา และการแพทย์ ได้มีการประยุกต์ใช้ เช่นเดียวกัน

1.4 โครงสร้างอะตอม

1.4.1 อะตอมนิวเคลียร์

อะตอมใหญ่ ย้อมประกลบด้วยอิเล็กตรอน (มีประจุลบ) ล้อมรอบนิวเคลียสหรือแกนอะตอม ซึ่งประกอบด้วยโปรตอน (ประจุบวก) และนิวตรอน (ไม่มีประจุ) ปริมาณที่ใช้อธิบายลักษณะเฉพาะตัวของอะตอม (ในทางทฤษฎี) มีหลายจำนวน เช่น

1) Principal quantum number n มีค่าเป็น 1, 2, 3, ใช้แทนลำดับวงโคจรหลัก (major shell) ของอะตอม

2) Quantum number l มีค่า 0, 1, 2, ($n-1$) ใช้แสดงโน้มน้าว

3) Quantum number j โดยถือว่า $j = l+s = l \pm \frac{1}{2}$ ที่ s เป็นจำนวน

ปริมาณการหมุนของอิเล็กตรอน (intrinsic-spin quantum number) มีค่าແล็วแต่ทิศทางการหมุน ถ้าหมุนตามเข็มนาฬิกา หรือหมุนขึ้นให้ $s = +\frac{1}{2}$ ถ้าหมุนลง หรือหมุนทวนเข็มนาฬิกาให้ $s = -\frac{1}{2}$

เมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมมีการเปลี่ยนย้ายตำแหน่ง เรียกว่า เกิดการจัดอะตอม (atomic transition) เช่น อิเล็กตรอนเปลี่ยนจากวงโคจรหนึ่ง ไปยังอีกวงหนึ่ง ต้องอาศัยจำนวนปริมาณดังกล่าวข้างต้น เป็นตัวอธิบาย เมื่อจากแกนอะตอมมีประจุบวกดังนั้น ย้อมออกแรงดึงดูดอิเล็กตรอนในวงโคจรที่อยู่รีบกับแกนมากที่สุด ด้วยค่าพลังงานยิ่ง เนี่ยวยสูงที่สุด และ

วงโคจรดังกล่าวนี้ มีจำนวนปริมาณ $n = 1$ ซึ่งกำหนดให้มีอิเล็กตรอนในวงโคจรได้มากที่สุด 2 ตัว เรียกชื่อ เป็นวงโคจร K (K shell) ถ้าเกิดมีช่องว่างอิเล็กตรอนในวงโคจร K ย่อมทำให้อะตอมเป็นป่วนมากที่สุด ต่อไปถ้ามีอิเล็กตรอนจากวงโคจรอื่นมาแทนที่ว่างดังกล่าว อาจเกิดรังสีเอ็กซ์ขึ้นได้ เรียก เป็น เอ็กซ์เรย์ ในอนุกรม K (K-series)

วงโคจรที่มีแรงยึดเหนี่ยวของลงมาคือ เชลล์ L มีค่า $n = 2$ ประกอบด้วย 3 ชั้บเชลล์ (subshell) คือ :

- | | |
|---|----------------------------|
| (1) $n = 2, l = 0, j = \frac{1}{2}$ | เรียกชื่อ เป็นชั้บเชลล์ LI |
| (2) $n = 2, l = 1, j = (l-s) = \frac{1}{2}$ | " " LII |
| (3) $n = 2, l = 1, j = (l+s) = \frac{3}{2}$ | " " LIII |

จำนวนอิเล็กตรอนสูงสุดที่บรรจุในแต่ละชั้บเชลล์คือ $(2j + 1)$ และค่ารวมใน เชลล์ใหญ่ มีค่า เป็น $2n^2$

<u>ตัวอย่าง</u>	ชั้บเชลล์ LI	มีจำนวนอิเล็กตรอนได้สูงสุด	= 2
"	LII	" "	= 2
"	LIII	" "	= 4

$$\text{รวมอิเล็กตรอนมีได้สูงสุด} = \text{LI} + \text{LII} + \text{LIII} = 2 + 2 + 4 = 8$$

$$\text{จากสูตรจำนวนอิเล็กตรอนมีได้สูงสุดใน เชลล์ L} = 2n^2 = 2(2)^2 = 8$$

การย้ายตำแหน่งของอิเล็กตรอนภายในอะตอมที่ เกิดจากชั้บเชลล์ได้ มีแรงยึดเหนี่ยวแน่นอยกว่า ไปแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนใน เชลล์ L เรียก เป็น เอ็กซ์เรย์ ในอนุกรม L (L-series X-rays)

กฎ กูเก้นท์ ดังกล่าวบัญญัคติใช้กับ เชลล์ อื่นๆ ดังไป คือ $n = 3, 4, 5, \dots$

ซึ่งเรียกชื่อ เป็น เชลล์ M, N, O, ตามลำดับ ในรูป 1.1 แสดงถึงการจัดอะตอม ซึ่งเกิดในอนุกรม K, L, M แต่ไม่มีการแสดงโครงสร้างชั้บเชลล์

โครงสร้างวงโคจรอิเล็กตรอนของอะตอมใหญ่ ขึ้นกับประจุของนิวเคลียส (แกน-อะตอม) ธาตุเบา มีประจุของนิวเคลียสน้อย ดังนั้น จะปรากฏเฉพาะ เอ็คซ์เรย์ในอนุกรม K เท่านั้น ตรงข้ามกับธาตุหนักซึ่งมีหลาย เชลล์ และหลายชั้น เชลล์ มีเอ็คซ์เรย์เกิดขึ้นหลายอนุกรุณ ในการตรวจวัดต้องอาศัยอุปกรณ์ที่สมบูรณ์

1.4.2 การตั้งชื่อรังสี เอ็คซ์และพลังงาน

ตามที่ได้อธิบายแล้ว มีการ เรียกชื่อ เอ็คซ์เรย์ เป็นอนุกรุณ ตามอิเล็กตรอนที่นา แทนที่ช่องว่างจาก เชลล์ อื่น เช่น เอ็คซ์เรย์อนุกรุณ K สัมพันธ์กับการเติมช่องว่างอิเล็กตรอน ใน เชลล์ K หรือ เอ็คซ์เรย์อนุกรุณ L สัมพันธ์กับการเติมช่องว่างอิเล็กตรอนใน เชลล์ L เป็นต้น ได้มีการกำหนดใช้อักษรกรีกแทนความเข้มของรังสี เอ็คซ์อีกด้วย เช่น K_{α} จะมีความเข้มมากกว่า K_{β} หรือ L_{α} มีความเข้มมากกว่า L_{β} เป็นต้น (จะกล่าวรายละเอียดในบทต่อไป)

ตาราง 1-1 แสดงรายชื่อรังสี เอ็คซ์ตามการจัดอะตอม $K_{\alpha 1}$ และ $K_{\alpha 2}$ เป็นรังสี เอ็คซ์สัมพันธ์กับอิเล็กตรอนเปลี่ยนตำแหน่ง จาก LIII และ LII ไปยัง เชลล์ K ตามลำดับ เอ็คซ์เรย์ K_{β} ซึ่งมีลำดับคี่ สัมพันธ์กับการย้ายตำแหน่งอิเล็กตรอนจาก เชลล์ M ส่วนพวกมี ลำดับคู่นั้นมีต้นกำเนิดจากชั้น เชลล์ N ส่วน เอ็คซ์เรย์ K_{δ} อ่อนมาก จะตรวจวัดได้โดยใช้วิธี การของ "ระบบกระจายพลังงาน" (energy dispersive system) ได้เท่านั้น และเกิดเฉพาะพวกมีค่า Z สูง ($Z > 60$)

ในตาราง 1-1 จะเห็น เอ็คซ์เรย์ $L_{\alpha 1}$ และ $L_{\alpha 2}$ สัมพันธ์กับการเติมอิเล็กตรอน ในชั้น เชลล์ LIII โดยอิเล็กตรอนจากชั้น เชลล์ M V และ M IV ตามลำดับ ส่วน $L_{\beta 1}$ และ $L_{\beta 2}$ เป็นการเติมช่องว่างอิเล็กตรอนใน LII และ LIII โดยอิเล็กตรอนจากชั้น เชลล์ M IV และ NV ตามลำดับ

เห็นได้ว่า เอ็คซ์เรย์ในอนุกรุณ L มีมากกว่าอนุกรุณ K โดยเฉพาะในธาตุหนัก เช่น ตะกั่ว ($Z = 82$) หรือ ยูโรเนียม ($Z = 92$) มีอนุกรุณ L มาก และสังเกตุได้ชัดเจน โดยใช้ FEA

ตาราง I - I

ชื่อ เอ็กซ์ เรย์ และการจัดระดับพลังงานในอะตอม

ระดับพลังงาน เริ่มต้น ^a					ระดับพลังงานสูคท้าย ^a				
nI	Shell	J	#e-	K-, L-,	หรือ			M-Shell	
1s	K	1/2	2	K Series					
2s	L1	1/2	2		L Series ^b				
2p	LII	1/2	2	K α_2	L1	LII	LIII		
2p	LIII	3/2	4	K α_1			L η	L ℓ	
3s	M1	1/2	2						
3p	MII	1/2	2	K β_3	L β_4			L ι	
3p	MIII	3/2	4	K β_3'	L β_3	L β_17	L ς		
3d	MIV	3/2	4	K β_5'	L β_{10}	L β_1	L α_2		
3d	MV	5/2	6	K β_5	L β_9		L α_1	MIII	MIV
4s	NI	1/2	2			L γ_5	L β_6		
4p	NII	1/2	2	K β_2	L γ_2				
4p	NIII	3/2	4	K β_2'	L γ_3			M ζ_2	M ζ_1
4d	NIV	3/2	4			L γ_1	L β_{15}	My2	
				K β_4					
4d	NV	5/2	6		L γ_{11}		L β_2	My1	
4f	NVI	5/2	6			L ν		M β_1	M α_2
							Lu		
4f	NVII	7/2	8						M α_1
5s	Old	1/2	2			L γ_8	L β_7		
5p	OII	1/2	2	K δ_2	L γ_4				
5p	OIII	3/2	4	K δ_1	L γ_4				
						L β_5			
5d	OIV	3/2	4			L γ_6			
5d	OV	5/2	6					Mt	
5f	OVI	5/2	6						
5f	OVII	7/2	8						
5g	OVIII	7/2	8						
5g	OIX	9/2	10						

หมายเหตุ a ระดับพลังงาน เริ่มต้นและสูคท้าย หมายถึงคำแทนของอิเล็กตรอน

b ส่วนใหญ่เป็น เอ็กซ์ เรย์อนุกรม L

c เอพาราอนุกรม M เท่านั้น

d เชลล์ O เริ่ม เดิมช่องว่าง เมื่อ Z > 37 (rubidium) และ เชลล์ P เริ่ม เมื่อ

Z > 55

ในทุกๆ อะตอม อิเล็กตรอนในชั้น K จะถูกยึด เหนี่ยวอย่างเหนียวแน่นกว่าอิเล็กตรอนในชั้น L และอิเล็กตรอนในชั้น L และ K จะถูกยึด เหนี่ยวแน่นกว่าอิเล็กตรอนในชั้น M เป็นต้น อะตอมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อมีอิเล็กตรอนย้ายที่จากชั้นนอกสุดไปยังชั้น K และเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด เมื่อย้ายที่ของอิเล็กตรอนระหว่างชั้นชั้นนอกสุด ธาตุที่มีหมาย เลขอะตอม (atomic number) หรือประจุของนิวเคลียสเพิ่มขึ้นจะมีอิเล็กตรอนในชั้นทั้งหมด ถูกยึด เหนี่ยวอย่างเหนียวแน่นขึ้น ดังนั้น นิวเคลียสที่มีประจุมากกว่า เมื่อเกิดการจัดอะตอม ย่อมมีการปล่อยพลังงานมากกว่านิวเคลียสที่มีประจุน้อยกว่า (แต่การเปรียบเทียบ เช่นนี้ ต้องเป็นการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในชั้น เชล์คู่ เดียวกัน) นั่นคือ เมื่อ Z มีค่ามากขึ้น จะได้ K_{α} และ K_{β} เอ็กซ์เรย์ที่มีพลังงานมากขึ้น

เอ็กซ์เรย์ในอนุกรม L เพิ่มขึ้นหรือไม่ ในลักษณะดังกล่าว? คำตอบคือมีการเพิ่ม เช่นกัน แค่ประมาณ 1/6 ของพลังงานใน K_{α} เอ็กซ์เรย์ (สำหรับธาตุที่มีค่า Z เดียว กัน)

ถ้าใช้ระบบ FEA spectroscopy มีค่า resolution 160 eV และมี FWHM ที่ 3.0 keV จะสามารถใช้ได้กับการแยกพลังงานเอ็กซ์เรย์ K_{α} และ K_{β} ของพวกราดู Z > 18 (Argon)

ส่วน $K_{\beta 1}$ และ $K_{\beta 2}$ สามารถแยกได้ตั้งแต่ธาตุมีค่า Z > 40 (Zirconium) และ $K_{\alpha 1}$ เริ่มแยกจาก $K_{\alpha 2}$ อย่างชัดเจน เมื่อ Z มีค่ามากกว่า 60 ขึ้นไป (Z = 60 คือ neodymium)

พวกราดูหนักกว่าที่กล่าวมาแล้ว (Z = 82 ± 10) นักมีพลังงานเอ็กซ์เรย์ของอนุกรม L อยู่ในช่วง 8-20 keV และใช้ประโยชน์ได้เท่าเทียมกับอนุกรม K ทั้งการวิเคราะห์แบบ qualitative และ quantitative

เอ็กซ์เรย์อนุกรม M ใช้น้อย นอกจําเป็นกรดิเศษเท่านั้น บางครั้งอาจกล่าว เป็นคําระบวนการนับวัดได้ เช่น สารตัวอย่างที่ประกอบด้วยชัลเฟอร์ (sulfur) ผสมอยู่กับตะกั่ว ชัลเฟอร์มีเอ็กซ์เรย์อนุกรม K ดังนี้ $K_{\alpha} = 2.31$ keV และ $K_{\beta} = 2.46$ keV

ขณะเมื่อ เอ็กซ์เรย์อนุกรม M ของตะกั่วมีค่า เฉลี่ย M_{α} และ M_{β} เป็น 2.39 keV ดังนั้นในทางปฏิบัติ พลังงาน เอ็กซ์เรย์อนุกรม M ของตะกั่วจะขึ้นอยู่กับอนุกรม K ของชัลเฟอร์

1.5 โอกาสในการเกิดรังสีเอ็กซ์

ในการวิเคราะห์ธาตุต่างๆที่ปรากฏในสารตัวอย่างโดยวิธีการกระตันด้วย เอ็กซ์เรย์ ได้เป็นที่ทดลองกันว่า ใช้พลังงานของรังสีเอ็กซ์ เป็นพารามีเตอร์สำคัญเพียงตัวเดียวเท่านั้น ซึ่งจะบ่งถึงธาตุนั้นๆ บางครั้ง ข้อมูลที่ได้จากการปฏิบัติ (quantitative information) เช่นการวัดความเข้มของพีค (peak) เอ็กซ์เรย์ อาจไม่เพียงพอ จำต้องอาศัยค่าทางทฤษฎี (qualitative) เน้าช่วย ตัวอย่าง สมมุติมีสารตัวอย่างใดๆ ซึ่งประกอบด้วย ธาตุต่อไปนี้ Ti V Cr Mn Fe พลังงานเอ็กซ์เรย์อนุกรม K_{β} เกือบจะเท่ากับ K_{α} ของธาตุที่มีค่า Z สูงกว่าตัวไป (เรียงตามลำดับตื้อ Ti คู่กับ V หรือ V คู่กับ Cr เป็นต้น) หรือแก้ปัญหาคือ ใช้ค่า K_{β}/K_{α} ของธาตุมี Z ต่ำกว่า เช่น Fe ปนอยู่กับ Mn โดยให้ Fe ปนอยู่ด้วยปริมาณมากกว่า Mn ประมาณ 10 เท่า ดังนั้น จำต้องอาศัยค่า K_{β}/K_{α} ของ Mn นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างอื่นซึ่งพลังงาน เพียงค่าเดียวอาจไม่สามารถจำแนกธาตุต่างๆได้ เช่น มีการขึ้นฟีคของเอ็กซ์เรย์ Pb L_{α} กับ As K_{α} หรือ เอ็กซ์เรย์ของแบนเรียม (Ba) คือ L_{α} และ L_{β} อาจมีเอ็กซ์เรย์ของ Ti และ V เป็นต้น

พารามีเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดความเข้มของเอ็กซ์เรย์ได้ เป็นพารามีเตอร์พื้นฐานของอะตอม คือ

- (1) ปริมาณอิเล็กตรอนของระดับพลังงานที่อยู่เหนือกว่า ซึ่งอาจไปเติมช่องว่าง (อิเล็กตรอน) ที่อยู่ณ ระดับพลังงานต่ำกว่า และ
- (2) วิธีการจัดตัวใหม่ที่เกิดขึ้นภายในอะตอม เพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุล

ข้อสังเกตคือ ไฮโดรเจน (hydrogen) และไฮเดรียม (helium) ไม่มีเอ็กซ์เรย์เนื่องจากหั้งสองของอะตอมไม่มีอิเล็กตรอนในเชลล์ L และจากคำกล่าวที่ว่า เมื่อเกิดช่องว่าง อิเล็กตรอนในเชลล์ K (หรือ เชลล์อื่นก็ตาม) จะทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะโลด (excited

state) อะตอมจะจัดตัวใหม่โดยการมีอิเล็กตรอนจากเซลล์ที่อยู่สูงกว่า เช่น L M เป็นต้น เกลื่อนมาแทนที่

ธาตุทั้งหมดที่มีค่า $Z > 3$ (lithium) สามารถสังเกตุเอ็กซ์เรย์ K_{α} ได้ ส่วน K_{β} จะเกิดขึ้นกับพากธาตุที่มีค่า $Z > 11$ (sodium) (K_{β}) เกิดจากการเคลื่อนของอิเล็กตรอนจากเซลล์ M หรือ N ไปยัง K โดยที่ว่าไปมากเรียก $K_{\beta 1}$ เป็นเอ็กซ์เรย์เกิดจากอิเล็กตรอนในเซลล์ M ไปแทนที่ซ่องว่างในเซลล์ K ความเข้มของ $K_{\beta 1}$ จะสูงสุดเมื่อชั้นเซลล์ของ M มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม เช่น ธาตุมีค่า $Z = 29$ (ทองแดง หรือ copper) ส่วน $K_{\beta 2}$ จะสังเกตได้ในพากธาตุมี $Z > 30$ (zinc) และมีความเข้มสูงสุดเมื่อ $Z = 46$ (palladium) ซึ่งสมนัยกับการเติมใน N II จนถึง N V ชั้นเซลล์

เอ็กซ์เรย์อนุกรม L เริ่มเกิด เมื่อธาตุมีค่า $Z > 20$ (calcium) และอนุกรม M เกิด เมื่อ $Z > 57$ (lanthanum)

ตามความเป็นจริงแล้ว ในการเกิดซ่องว่างอิเล็กตรอนแต่ละครั้ง ไม่จำเป็นต้องเกิดเอ็กซ์เรย์ตามมาเสมอไป มี 3 ขบวนการที่อาจเป็นไปได้ คือ

- (1) การปล่อยเอ็กซ์เรย์
- (2) ปล่อยออกอิเล็กตรอน (Auger electron)
- (3) การจัดตัวแบบคอสเตอร์-โกรนิก (Coster-Kronig transitions) เป็นการย้ายซ่องว่างอิเล็กตรอนจากชั้นเซลล์หนึ่งไปยังชั้นเซลล์ที่อยู่กึ่ดหนึ่งก่อนอยกว่าช่องอยู่ในเซลล์ใหญ่เดียว ในกรณี ไม่เกิดการแผ่รังสีขึ้น

เอ็กซ์เรย์ที่เกิดขึ้น เรียกเป็น “ยิลด์” (Yield) จากคำกล่าวข้างต้นแสดงว่า ยิลด์ของเอ็กซ์เรย์จะต้องมีน้อยกว่าจำนวนซ่องว่างอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น เรียกยิลด์ของเอ็กซ์เรย์นี้ว่า ยิลด์ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence yield) แทนสัญลักษณ์ด้วย γ ซึ่งหมายความที่แท้จริงคือ โอกาส (probability) ที่ซ่องว่างอิเล็กตรอนในเซลล์ของอะตอม (หรือชั้นเซลล์)

จะถูก เดิมให้ เต็มโดยปล่อยรังสี เอ็กซ์ เนื่องจาก เชล์ K ไม่มีชั้น เชล์ ตั้งนั้น เขียนสมการได้ ดังนี้

$$\omega_k = \frac{I_k}{n_k} \quad (1-1)$$

โดย ω_k เป็นฟูลูออร์ เรส เชนซ์ยัลค์ของ เชล์ K

I_k เป็นปริมาณความ เข้มทั้งหมดของแคนทรอก เทอริสติก K เอ็กซ์เรย์

n_k เป็นจำนวนช่องว่างอิ เล็กตรอนปฐมภูมิที่ เกิดใน เชล์ K ต่อหน่วยเวลา

ถ้า $\omega_k < 1$ ในช่วง เวลาดังกล่าว ควรจะเกิดอะไรขึ้น? พิจารณาการ เกิดออก- เกอร์อิ เล็กตรอน ให้ A_k แทนยิลเดอร์ของอ เกอร์อิ เล็กตรอน ถ้า เชล์ K ของอะตอมหนึ่ง จัดตัวใหม่ให้อู่ในสภาวะสมดุลโดยการปล่อยออก เกอร์อิ เล็กตรอนจาก เชล์ L

M N

$$A_k + \omega_k = 1 \quad (1-2)$$

การ เกิดออก เกอร์อิ เล็กตรอนได้ถูกแยกอธิบาย เป็น 2 แบบ คือ

- (1) เป็นขบวนการสองขั้น กล่าวคือ อะตอมหนึ่งได้ เกิดการเปล่งรังสีเอ็กซ์ แต่รังสีนี้ยังไม่พ้น ให้ทะลุผ่านอะตอมแม่อ ก็ตาม บันจะถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดนี้ให้กับอิ เล็กตรอนใน เชล์ L M หรือ N
- (2) เป็นขบวนการขึ้น เดียว กล่าวคือ เมื่อ เกิดมีอิ เล็กตรอนหลุดออกจาก เชล์หนึ่งสมบูรณ์ เป็น เชล์ K ย่อม เกิดช่องว่างอิ เล็กตรอนขึ้น และจะมีการแทนที่ช่องว่างนี้โดยอิ เล็กตรอนอื่นใน เชล์ อื่นของอะตอม ลักษณะ เช่นนี้ ถู เสนมีนัก เป็นการ เลื่อนตำแหน่งช่องว่าง (อิ เล็กตรอน) จาก เชล์หนึ่งไปยังอีก เชล์หนึ่ง อาจสมบูรณ์ให้ เป็นจาก เชล์ K ไปยัง เชล์ M ได้ ต่อไปกล่าวถึงโอกาสซึ่งอาจ เป็นไปได้สำหรับ เชล์ M คือ เชล์ M อาจมีช่องว่างอิ เล็ก- ตรอนอู่ เดิมแล้ว 1 ช่องว่าง ถ้า เกิดช่องว่างดังอธิบายนี้อีกช่องหนึ่ง กล่าวได้ว่าอะตอม

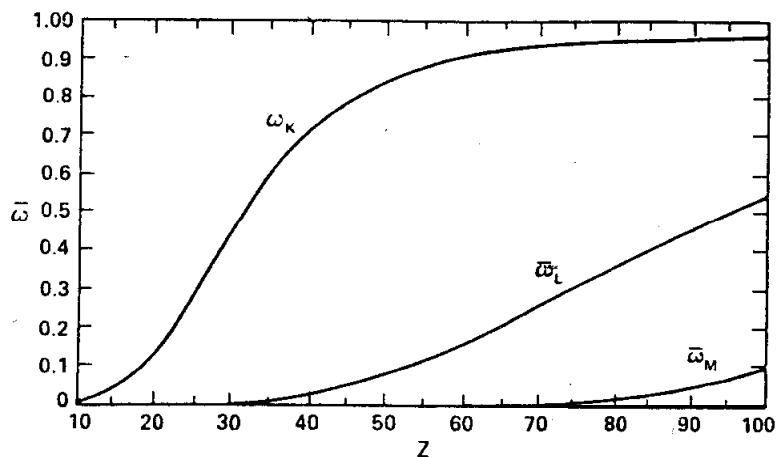
อยู่ในสถานะภูมิที่ได้แยกตัวสองเท่า (doubly ionized atom) และถ้าเกิดมีการแทนที่ซ่องว่างนี้อย่างพันทิพันได้ ย่อมเกิดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าพวกที่เกิดซ่องว่าง-เดียว ลักษณะที่ปรากฏจะเป็นแบบ satellite lines ต้องใช้ spectrometer ที่มีเรโซลูชันสูงในการแยกความยาวคลื่นที่กระจายออกไปหลาย ๆ ค่า

ขอ เกอร์อิ เล็กตรอนมีโอกาสเกิดในอะตอม เปาฯ ได้มากกว่า

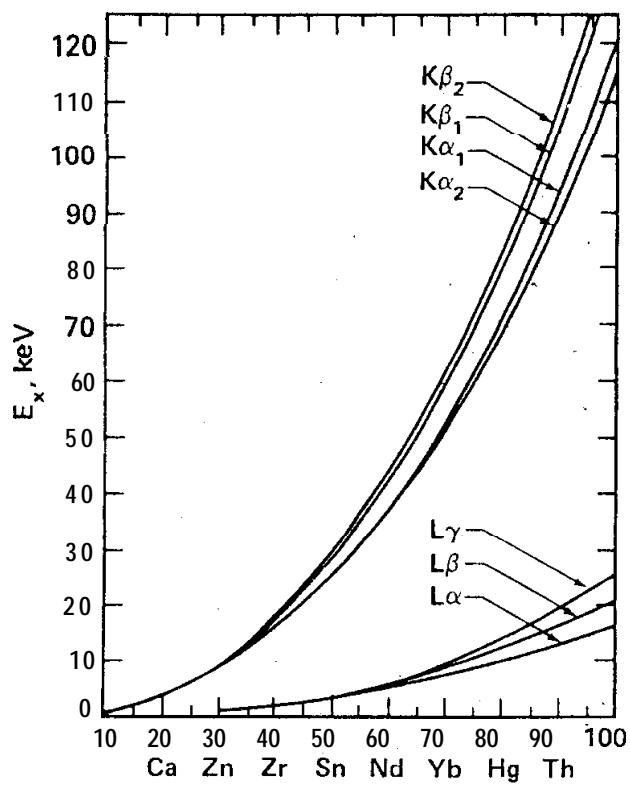
โอกาสในการเกิด K พลูออร์ เรส เช่นซึมีลักษณะเป็นไปดังแสดงในรูป 1.3 โดยค่า Z เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่น แคลเซียม (calcium) มีค่า Z = 20 ค่าร้อยละของ K พลูออร์ เรส เช่นซ์ 14% แต่เจอร์มาเนียม (germanium) มีค่า Z = 32 ค่าร้อยละมากกว่า 50% ส่วนพวก Z > 60 มีค่า $\pi_K > 90\%$ ซึ่งลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ว่าส่วนใหญ่ของพลังงานต่ำที่สุดที่ตั้งแสดงในรูป 1.4

ถ้าเกิดมีซ่องว่างอิเล็กตรอนในเชลล์ L หรือ M ซึ่งมีหลายชั้น เชลล์ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอาจมีได้ 3 กรณี คือ เอ็กซ์เรย์พลูออร์ เรส เช่นซ์ ขอ เกอร์อิ เล็กตรอน หรืออะตอมจัดตัวแบบคอส เทอร์โครนิก เพื่อสะท้อนในการทำความเข้าใจ สมมุติเหตุการณ์ตามลำดับดังนี้

- (1) เกิดซ่องว่างอิเล็กตรอนในชั้น เชลล์ LI
- (2) ถ้ามีการจัดตัวแบบคอส เทอร์โครนิก ซ่องว่างใน LI อาจเคลื่อนไปยัง LII หรือ LIII ก็ได้ และการยิงอิเล็กตรอนอาจเกิดขึ้นจากชั้น เชลล์ LI ในส่องชั้น เชลล์ LII ที่กล่าวนี้ หรือ เกิดจากชั้น เชลล์ M N ฯลฯ ก็ได้ และในท่านองเดียวกัน ซ่องว่างอิเล็กตรอนใน LII อาจเคลื่อนไปสู่ LIII โดยวิธีการจัดตัวแบบคอส เทอร์โครนิก เห็นได้ว่าซ่องว่างอิเล็กตรอนยังคงอยู่ใน เชลล์ L สรุปได้ว่า การจัดตัวแบบคอส เทอร์โครนิกของอะตอม เป็นการปล่อยอิเล็กตรอนออกไปจากชั้น เชลล์ LI หรือ เชลล์อื่นที่อยู่ภายนอก เนื่องจากความแรงน้อยกว่าก็ได้ แต่ซ่องว่างที่เกิดขึ้นภายในชั้น เชลล์ จะเคลื่อนย้ายตำแหน่งอยู่แต่ในพวงชั้น เชลล์ ของ เชลล์ เดียว กัน (ตามตัวอย่าง เป็น เชลล์ L)
- (3) ซ่องว่างในชั้น เชลล์ LIII อาจถูกเติมให้เต็มโดยขบวนการปล่อยรังสีเอ็กซ์ หรือขอ เกอร์อิ เล็กตรอน เท่านั้น



รูป 1.3 ความสัมพันธ์ของยีลเดิฟลูออร์ เรสเซนส์และลำดับอะตอม สำหรับวงโคจร L และ M เป็นค่ายีลเดิฟาย เฉลี่ย (เนื่องจากประกอบด้วยหลักขั้บ เชล์)



รูป 1.4 ลักษณะความสัมพันธ์ของพลังงาน เอ็กซ์เรย์ในอนุกรม K และ L กับค่า Z

ดังนั้น ยิลค์օ เกอร์ของ LI และ LII ถูกตัดแปลงเป็นโอกาสในการเกิดการจัดตัวแบบคงสูตร์โครนิก รวมกับยิลค์օ เกอร์ใน LIII สูปให้ใช้ค่าเฉลี่ยยิลค์ฟลูออร์เรสเซนซ์เป็น $\bar{\mu}_L$ ในเชลล์ L (รวมชั้น เชลล์ทั้งหมด) ในรูป 1.3 แสดงเส้นกราฟของ $\bar{\mu}_L$ และ $\bar{\mu}_M$ ของ เชลล์ L และ M ตามลำดับ

ได้มีการหาอัตราส่วนของ K_β/K_α $K_{\alpha 1}/K_{\alpha 2}$ หรือ $L_{\alpha 2}/L_{\alpha 1}$ ทางทฤษฎีผลปรากฏว่าใกล้เคียงกันค่าในการทดลอง ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงต้องเตรียมมาตรฐาน (standard) ให้มีสภาพใกล้เคียงสารตั้งอย่างมากที่สุด เพื่อที่จะทำได้ แม่ปริมาณของธาตุเชรัสที่มีอยู่ต้องทราบค่า จากนั้น ใช้ผลที่วัดความเข้มของ อีกซ์เรย์ค่าอ้างอิงหลัก (reference)

นอกจากนี้ สิ่งที่ควรพิจารณาคือขบวนการก่อซ่องว่างอิเล็กตรอน ซึ่งดังอธิบายข้างต้นไม่ได้กล่าวถึง เนื่องจาก การเกิดซ่องว่างอิเล็กตรอนมีผลต่อ yilc และ yilc ของฟลูออร์เรสเซนซ์จาก เชลล์ใดๆ และมีผลต่อกำไรความเข้มของ อีกซ์เรย์ ถ้าทำการทดลอง 2 ครั้ง ในสภาพแตกต่างกัน ผลได้ยิลค์ฟลูออร์เรสเซนซ์ต่างกัน ดังนั้น ความเข้มของ อีกซ์เรย์จึงแตกต่างกัน และถ้าใช้วิธีการทำให้แตกตัว หรือที่เรียกว่า ไอออนในเชลล์ (ionization) ก่อให้เกิดซ่องว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระจายไปทั่ว จะสังเกตได้ว่า μ ในใช้คุณสมบัติพื้นฐานของอะตอม แต่ขึ้นกับการจัดตัวของชั้น เชลล์ในอะตอม และยังขึ้นกับพารามิเตอร์ เหอร์ เอฟะของ การทดลอง

1.6 ปรากฏการณ์เมื่อรังสี อีกซ์ชนกับวัสดุกัน

รายละเอียดของปรากฏการณ์ FEA ได้อธิบายแล้วในตอนที่ 1.5 สิ่งที่ต้องพิจารณา อีกคือการชนของกัมมันตภาพรังสีกับสาร ซึ่งก่อให้เกิดขบวนการที่ เป็นไปได้ 3 แบบ ดังนี้

- (1) การดูดกลืนแบบไฟฟ้า (photoelectric absorption)
- (2) การกระเจิงของกัมมันตภาพรังสี (radiation scattering)
- (3) การเกิดคู่อนุภาค (pair production)

ในบทนี้จะเลือกกล่าวเฉพาะ 2 ขบวนการแรกเท่านั้น ส่วนขบวนการที่ 3 เป็นการ ก่อให้เกิด อีกซ์เรย์ทางอ้อม

1.6.1 การคูณกลืนและลดปริมาณกัมมันตภาพรังสี

เมื่อเราจ่ายกัมมันตภาพรังสีซึ่งมีคุณสมบัติ เป็นพลังงานเดียว (monochromatic) และถูกบังคับทิศทาง (collimated) อย่างดี มีความเข้ม I_0 ตกกราฟบนวัสดุกึ่งซึ่งมีความหนา x ซม. มีความหนาแน่น ρ กรัม/ซม.³ ให้ส่วนของจ่ายกัมมันตภาพรังสีดังกล่าวนี้ทะลุผ่านวัสดุกึ่งซึ่งมีความเข้ม เป็น I ในกรณี ถ้ากัมมันตภาพรังสีจะต้องถูกคูณกลืนหรือลดค่าความเข้มลง เมื่อ เดินทางผ่านวัสดุกึ่ง ดังนั้น I จะต้องมีค่าน้อยกว่า I_0 เสมอ อัตราการเปลี่ยนความเข้มของจ่ายกัมมันตภาพรังสี เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (3)$$

โดย μ เป็น ส.ป.ส. การคูณกลืน เชิงเส้น หน่วย เป็น ซม.⁻¹ เครื่องหมายลบแสดงว่าความเข้มจะลดลง เสมอ เมื่อ เดินทางผ่านวัสดุกึ่ง

ถ้า μ ไม่ขึ้นกับ x สามารถอินทิเกรต (integrate) สมการ (3) ได้เป็น

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (4)$$

เพื่อสะดวกในการนำสมการ (4) ไปใช้งาน นิยมเขียน μ ให้อยู่ในรูปของ ส.ป.ส. การคูณกลืนของมวล ไข้สัญญาณ μ_m มีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$\mu_m (\text{cm}^2/\text{gm}) = \mu(\text{cm}^{-1})/\rho(\text{g/cm}^3) \quad (5)$$

เขียนสมการ (4) ใหม่ ดังนี้

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho x) \quad (6)$$

ปริมาณ μ_m สัมพันธ์กับโอกาสที่กัมมันตภาพรังสีจะชนกับวัสดุ หรือสารใดๆ โดยขบวนการเดখวนการหนึ่ง ค่าว่าโอกาส P ภาษาอังกฤษใช้คำ probability หรือ cross section เนื่องจาก เสื่อมการวัดพื้นที่ของอะตอม (ในเชิงคณิตศาสตร์) ซึ่งถูกกัมมันตภาพ-

รังสีชนและพื้นที่ภาคตัดขวาง (cross-section) ของอะตอมมีหน่วยเป็น "บาร์น" (barn) โดยถือว่า

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

เพื่อให้สอดคล้องกับหน่วยของ ส.บ.ส. การคูณกลืนของมวล พื้นที่ดังกล่าวจึงถูกใช้หน่วยเป็น บาร์น/อะตอม นั่นคือ

$$\mu_m (\text{cm}^2/\text{g}) = \sigma(\text{barn}/\text{atom}) \cdot \frac{N}{A} \left(\frac{\text{atom/mol}}{\text{g/mol}} \right) \quad (1-7)$$

โดย N เป็นอิเล็กตรอน เมอร์ (Avogadro's number) = 6.02×10^{23} atoms/mol

A เป็นน้ำหนักอะตอม

เนื่องจากจำนวนการชนกันของกัมมันตภาพรังสีกับวัสดุก็มีโอกาสเป็นไปได้ 3 แบบ ดังนี้น เป็นสมการความสัมพันธ์ เป็น

$$\mu_m = \mu/\rho = (\tau + \sigma_s + \pi)/\rho \quad (1-7)$$

โดย τ แทนพื้นที่ภาคตัดขวางของการคูณลึกลงแบบไฟฟ้าอิเล็กทริก

σ_s แทนพื้นที่ภาคตัดขวางของการกระเจิง (scattering) ทั้งหมด

π แทนพื้นที่ภาคตัดขวางของการเกิดคู่อนุภาค ซึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ ยกเว้นเมื่อ

กัมมันตภาพรังสีมีพลังงานเกิน 1 MeV

1.6.2 การคูณลึกลงแบบไฟฟ้าอิเล็กทริก (Photoelectric absorption)

จากการเสนอว่าโครงสร้างของอะตอมประกอบด้วย เชลล์ (วงโคจรหลัก) และชั้นเชลล์ (วงโคจรย่อย) ของอิเล็กตรอน เชื่อว่าอิเล็กตรอนถูกยึด เนื่ียด้วยพลังงานมีปริมาณเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) หรือ เมื่อมันมี เป็นระดับๆ เรื่อยไป อิเล็กตรอนในวงในสุดจะถูกยึด เนื่ียดวยร่าง เนื่ัยวนั้นที่สุด พวกรอยู่ในวงนอกสุด (valence electron) จะถูก

ยังอยู่อย่างหลวงๆ เท่านั้น ยิ่งหลวงมาก เท่าไร ยิ่งต้องใช้พลังงานน้อยลงในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวัสดุ แต่ถ้าจะไล่อิเล็กตรอนออกจากชั้น เชล์หรือ เชล์ที่อยู่ด้านในเวลล์ส ต้องเพิ่มพลังงานของกัมมันตภาพรังสีที่ใช้เป็นตัวกระตุ้น (excite) อะตอม โอกาสในการเกิดขบวนการคูคอกลีนเพิ่มค่าขึ้น (หรือกล่าวว่า พื้นที่ภาคตัดขวางของการคูคอกลีนภายในอะตอม มีค่าเพิ่มขึ้น)

ถ้ากัมมันตภาพรังสีมีพลังงานเพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อยๆ ส.ป.ส. ของการคูคอกลีนจะกลับลดค่าลงประมาณ E^{-3} จนถึง เชล์วงใน เชล์ใด เชล์หนึ่ง จะเกิดการเพิ่มค่าพื้นที่ภาคตัดขวางทันทีทันใด เป็นผลให้เกิดสันขึ้นในเส้นกราฟพื้นที่ภาคตัดขวางของการคูคอกลีน แสดงในรูปที่ 1.5 ลักษณะสันตั้งกล่าวว่ามีการเปลี่ยน เชล์หรือชั้น เชล์ของอะตอม

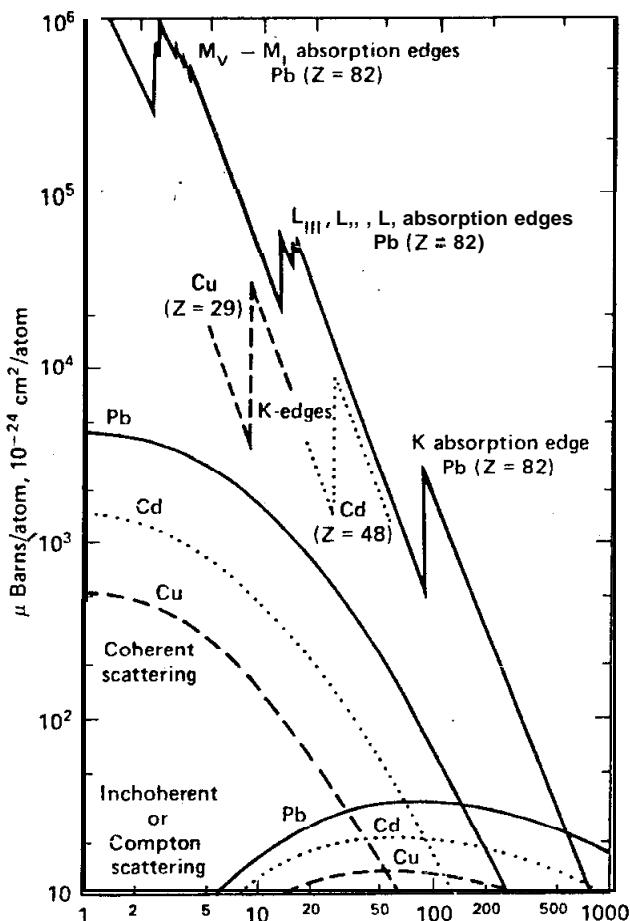
จากรูปที่ 1.5 เป็นการพล็อตบนสเกลล์อก-ล็อก (log-log scale) ของค่าพื้นที่ภาคตัดขวางของการเกิดการคูคอกลีนแบบไฟฟ้าอิเล็กทริก หน่วยเป็นบาร์ต่ออะตอม พิจารณาต่อกัน (Pb) ที่พลังงานต่ำกว่า 1 keV จะมีการเกิดสันของการคูคอกลีน เชล์ N O P ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ เมื่อพลังงานมากกว่า 1 keV เกิดสันของการคูคอกลีนพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งถูกยึด เนื่องจากอยู่อย่างหลวงๆ ในชั้น เชล์ MV เกิดขึ้นที่ 2.48 keV และเพิ่มค่าขึ้นทีละน้อยๆ สำหรับชั้น เชล์อื่นๆ ของ เชล์ M ส่วน เชล์ L จะเริ่มเกิดสันการคูคอกลีนของชั้น เชล์ LIII เมื่อพลังงานเกิน 13 keV ตามด้วยสันของ LII และ LI ตามลำดับ สุดท้ายคือ เชล์ K เกิดสันการคูคอกลีนที่ 88 keV

การใช้พลังงานกัมมันตภาพรังสีกระตุ้นอะตอมให้มีการปล่อยอิเล็กตรอน ต้องใช้พลังงานต่ำๆ ให้มีค่ามากกว่าพลังงานยึด เนื่องจาก (binding energy) ของเชล์นั้น สมมุติว่า กัมมันตภาพรังสีพลังงาน 100 keV ตกกระทบอะตอมของตะกั่ว จะเกิดการปล่อยอิเล็กตรอนออกจาก เชล์ต่างๆ ดังนี้

เชล์ K ประมาณ 80%

เชล์ L ทั้งหมดประมาณ 14% (มี 3 ชั้น เชล์)

เชล์ M ทั้งหมดประมาณ 5% (มี 5 ชั้น เชล์)



รูป 1.5 พื้นที่ภาคตัดขวาง (หน่วย เป็น 10^{-24} ซม. 2 ต่ออะตอม) ของการสูญเสียและการกระเจิง พล็อตในพังค์ชันของพลังงานระดับ (Pb) ชั้ง $z = 82$ แคด เมียม (Cd) ชั้งมีค่า $z = 48$ และทองแดง (Cu) ชั้งมีค่า $z = 29$ คำແຫນ່ງສັນກາรສູດກລືນຂອງເອັກສົ່ງ L ຂອງ ระดับและแคด เมียมໄມ້ໄດ້ແສດງໄວ້ ລໍາຕ້ອງການແປງທຳມະນຸຍ barns/atom ເປັນ cm^2/g ຕ້ອງຄຸດດ້ວຍ ສ.ປ.ສ. 2.91×10^{-3} ສໍາຫຼັບແแคດ ເມີນ ແລະ 9.48×10^{-3} ສໍາຫຼັບ ທອງແດງ

นอกนั้น เป็นการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเชลล์ N O และ P (รวมถึงชั้นเชลล์ต่างๆของมันด้วย)

สำหรับธาตุที่มีลำดับอะตอม (atomic number) ลดลง แรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในเชลล์ K จะน้อยลง สมญากับการลดค่าพลังงานของการเกิดสันการดูดกลืน พิจารณาแคม เมียม (cadmium) มีค่า $Z = 48$ และคอปเปอร์ (copper) มีค่า $Z = 29$ ในรูปที่ 1.5 เห็นได้ว่าสันเชลล์ K ของคอปเปอร์เกิดที่พลังงานต่ำกว่าสันเชลล์ L ของตะกั่ว (lead หรือ Pb)

ต้นกำเนิดพลังงานกัมมันตภาพรังสีค่า ที่มีค่า 22 keV จำกัดให้เกิดการปล่อยอิเล็กตรอนจากตะกั่ว (พิจารณาจากรูปที่ 1.5) ทำให้เกิดช่องว่างในเชลล์ L ตั้งนั้น เกิดเอ็กซ์เรย์อนุกรม L แคตถ้าเป็นทองแดง (Cu) จะมีการปล่อยอิเล็กตรอนในเชลล์ K ก่อน จากนั้นอาจมีบางอิเล็กตรอนจากเชลล์ L หล่อเลี้ยงเอ็กซ์เรย์อนุกรม K (และอาจมีอนุกรม L ด้วย)

1.6.3 การกระเจิงแบบโค希เรนต์ของกัมมันตภาพรังสี

Coherent Radiation Scattering

เมื่อกัมมันตภาพรังสีชนกับอะตอมของสารตัวอย่าง เลือกพิจารณาการที่หนึ่งไฟต่อนชนกับกุ่มอิเล็กตรอนของอะตอม (แท้จริงแล้วมีจำนวนหลายไฟต่อนในลักษณะกัมมันตภาพรังสี แต่เพื่อง่ายในการเข้าใจทฤษฎี จึงสมมุติเพียงเป็นไฟต่อนเดียวเท่านั้น) และเกิดการกระเจิงซึ่งอาจมีการสูญเสียพลังงานหรือไม่ก็ตาม ถ้าเป็นการกระเจิงโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน เรียกเป็น การกระเจิงเรย์เลย์ (Rayleigh scattering) หรือ แบบโค希เรนต์ (coherent scattering) กัมมันตภาพรังสีที่ถูกปล่อยออกไปจะมีเฟลส์พันธ์กัมมันตภาพรังสีติดกระหบ

เพื่อง่ายต่อการเข้าใจ นิยาม เมื่อมีคลื่นกัมมันตภาพรังสีติดกระหบอะตอม ถ้าอะตอมนั้นประกอบด้วยอิเล็กตรอนจำนวนมาก เท่าใด ย่อมมีโอกาสในการเกิดการกระเจิงแบบ

โคลีเรนต์มากตามไปด้วย หรือกล่าวได้ว่า ถ้าอะตอมมีหมาย เลขอะตอมมากมีโอกาสเกิดการกระเจิงแบบโคลีเรนต์มาก นอกจากนี้ พารามี เดอร์สินที่น่าจะมีผลต่อโอกาสของการเกิดการกระเจิงแบบโคลีเรนต์คือ พลังงานของกัมมันตภาพรังสีต่ำกว่า สรุปได้ว่า โอกาสของการกระเจิงแบบโคลีเรนต์ขึ้นอยู่กับพลังงานของกัมมันตภาพรังสีที่ต่ำกว่า และหมาย เลขอะตอมของธาตุที่ยกชน (แสดงในรูปที่ 1.5)

บทบาทสำคัญของการกระเจิงแบบโคลีเรนต์คือ FEA คือ สเปกตรัม (spectrum) ของสารตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นจะมีค่าของกัมมันตภาพที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นปานอยู่ด้วย เนื่องจากการกระเจิงแบบนี้จะไม่ทำให้กัมมันตภาพรังสีต่ำกว่า ก็ต่อเมื่อเปลี่ยนพิษทางได้ ทั้งนี้ไม่คำนึงถึงจีโอดเอนทรี (geometry) จะห่วงด้านกำเนิดที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นกับหัวตัดกัมมันตภาพ

1.6.4 การกระเจิงแบบอินโคลีเรนต์ของกัมมันตภาพรังสี

Incoherent Radiation Scattering

การกระเจิงของกัมมันตภาพรังสีที่มีการสูญเสียพลังงานของมันเอง เรียก เป็น การกระเจิงแบบคอมบ์ตัน (Compton scattering) หรือ แบบอินโคลีเรนต์ (incoherent) ในขบวนการนี้ไฟตอนเดียวประพฤติ เป็นอนุภาควิ่งไปชนกับอิเล็กตรอนเดียวของอะตอม ผลคือไฟตอนต่อกัน เปลี่ยนพิษทาง ส่วนอิเล็กตรอนของอะตอมจะได้รับพลังงานจนนี้ ซึ่งอาจมีปริมาณมากพอจนสามารถหลุดออกจากอะตอมได้ กัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากขบวนการนี้ย่อมมีพลังงานน้อยกว่าค่าที่ต่อกัน

เมื่อความสัมพันธ์ของพลังงานไฟตอนต่อกัน (E') กับพลังงานของไฟตอนที่กระเจิง (E') ได้โดยอาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงานและไข เมนตัม ดังนี้

$$E' = E_0 \left[1 + \frac{E_0}{511} (1 - \cos \theta) \right]^{-1} \quad (1-9)$$

โดย E_0 และ E' มีหน่วย เป็น keV

$$511 \text{ เป็นพลังงาน เมื่อมวลทุกนิ่งของอิเล็กตรอน (rest mass energy) } = m_0 c^2 \text{ keV}$$

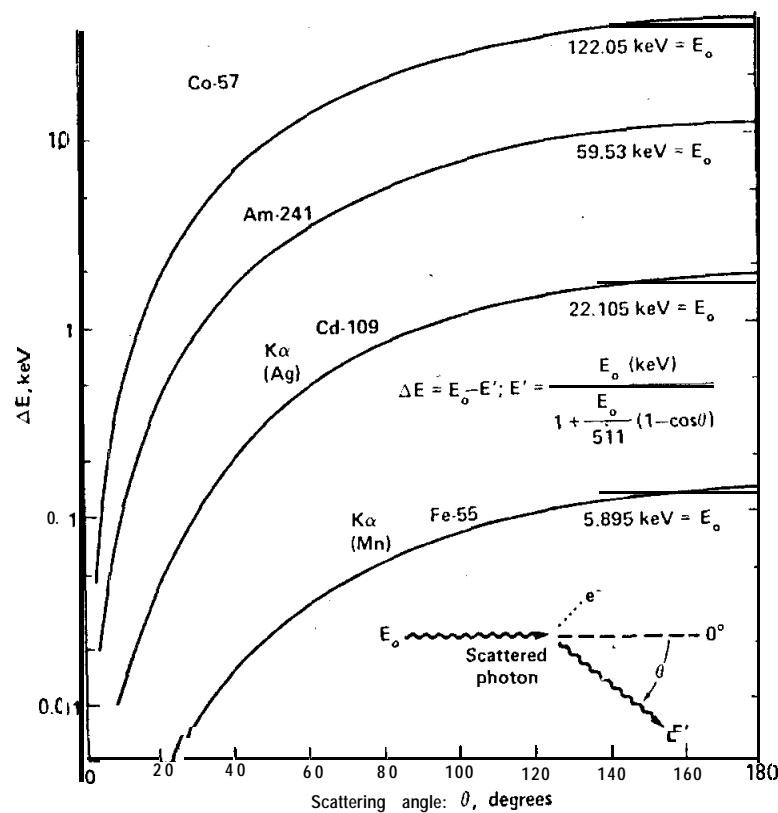
θ เป็นมุมชึ้งไฟตอนถูกกระเจิงไป มีค่าตั้งแต่ 0° - 180°

ไฟตอนที่ถูกทำให้กระเจิงแบบคอมปัตัน จะสูญเสียพลังงาน และอาจถูกบันทึกค่ารวมอยู่ในスペกตรัมของ E' ซึ่งอาจมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ E_0 ค่าพลังงานที่แปรค่าไปนี้ขึ้นกับมุมของการกระเจิง และแปรค่าจาก 0 keV เมื่อ $\theta = 0$ จะถึงค่าสูงสุด เมื่อ $\theta = 180^\circ$ เรียกว่าไฟตอนถูกกระเจิงย้อนกลับ (backscattered photon) ความสัมพันธ์นี้ได้ถูกพิสูจน์เป็นเส้นกราฟในรูปที่ 1.6 พลังงานกัมมันตภาพรังสีต่อกำลัง (E_0) มี 4 ค่าดังนี้

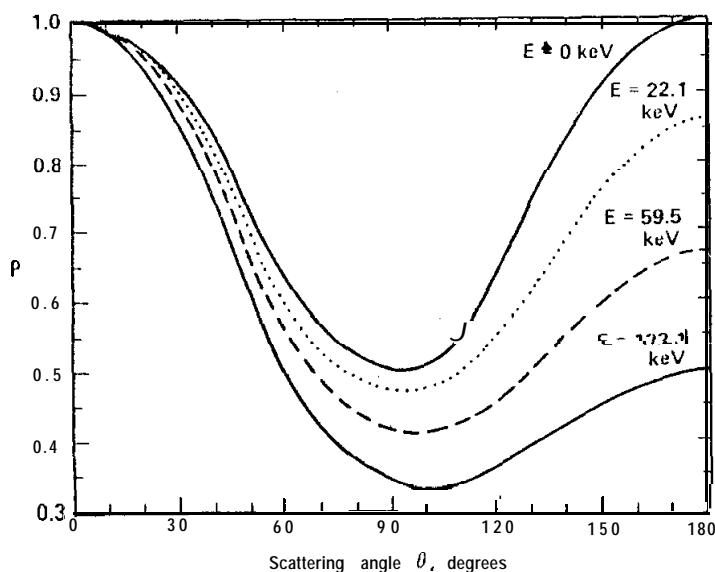
- (1) K_α ของ M_n พลังงาน 5.895 keV
- (2) K_α ของ A_g พลังงาน 22.105 keV
- (3) Am-241 พลังงาน 59.530 keV
- (4) Co-57 พลังงาน 122.050 keV

สำหรับเส้นกราฟล่างสุด $E_0 = 5.9$ keV พลังงานที่แปรค่าไปน้อยกว่า 140 eV ดังนั้น ค่าใช้ระบบกระจายพลังงาน (energy dispersive system) จะมองไม่เห็นพีค (peak) นี้บรากรูปในสเปกตรัมแยกออกไปต่างหาก แต่จะรบกวนพีคที่เกิดจากการกระเจิงแบบโคชีเรนต์ โดยทำให้พีคกว้างขึ้น และที่เส้นกราฟที่สอง $E_0 = 22$ keV พิจารณา θ มีค่าจาก 50° - 180° การแปรค่าพลังงาน (ΔE) มีค่าจาก 0.3 keV - 1.8 keV ยิ่ง E_0 มีค่ามาก จะยิ่งทำให้ ΔE มีค่ามากตามไปด้วย

การกระเจิงของกัมมันตภาพรังสีมีโอกาสเกิดไม่แน่นอน เสนอไป ขึ้นกับค่า θ และ E ในรูป 1.7 แสดงโอกาสที่ปริมาณหนึ่งจะถูกกระเจิงเป็นมุม θ โดยถือว่า เมื่อมุม $\theta = 0^\circ$ โอกาสเกิดการกระเจิงมีค่าสูงสุด คือเท่ากับ 1 สำหรับพลังงานต่ำ คือ $E < 22$ keV การกระเจิงมีโอกาสเกิดได้ตั้งในทิศทางไปข้างหน้าและไปข้างหลัง โอกาสในการเกิดลดลงเหลือ



รูป 1.6 ค่าพลังงานที่แปรค่าไป (ΔE) ถูกพิสูจน์เทียบกับมุมกรະเจิง (θ) ของพลังงานไฟคอนสีค่า



รูป 1.7 ความสัมพันธ์ของโอกาสการเกิดการกรະเจิงแบบคงปั้นต่อ มุมไชจิก และมุมของการกรະเจิง โดยใช้พลังงานไฟคอนสามค่า

ครึ่งหนึ่ง เมื่อ θ มีค่าใกล้ 90° เมื่อพัลส์งานเพิ่มค่าขึ้น ในช่วงบุบ θ มากกว่า 90° โอกาสในการเกิดจัลคลง สูปได้ว่า ในระบบการทดลองโดยสังเกตการกระจายพัลส์งานเป็นส์ เมค ตรัม จึงเลือกให้การจัดมุมระหว่างตัวกระตุ้นกับสารตัวอย่าง และแนวการบังคับทิศทางของสารตัวอย่างกับหัววัดกับมันด้วยการรังสีที่ทำบุบกันประมาณ 90° เพื่อลดปริมาณกัมมันด้วยการรังสีที่เกิดจากการกระเจิงและเดินทางจากสารตัวอย่างไปยังหัววัด ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสที่ฟลู-ออร์ เรสเซนซ์ เอ็กซ์จะตกรอบหัววัดได้มากขึ้น

เปรียบเทียบการกระเจิงของอนุภาคในรูป 1.6 กับรูป 1.7 เห็นได้ว่าแม้จะมีค่าบุบ θ เล็กๆ ในรูป 1.7 โอกาสเกิดการกระเจิงมีมาก แต่ค่าพัลส์งานที่แพรไปในรูป 1.6 มีค่าน้อยมากจนสามารถทึบได้ เช่น ที่ค่า $E_0 = 122 \text{ keV}$ มีค่า $AE = 0.2 \text{ keV}$ หรือที่ $E_0 = 22 \text{ keV}$ มีค่า $AE = 0.02 \text{ keV}$ เป็นต้น

1.6.5 กัมมันด้วยรังสีที่ถูกโพลาไรซ์

Polarized Radiation

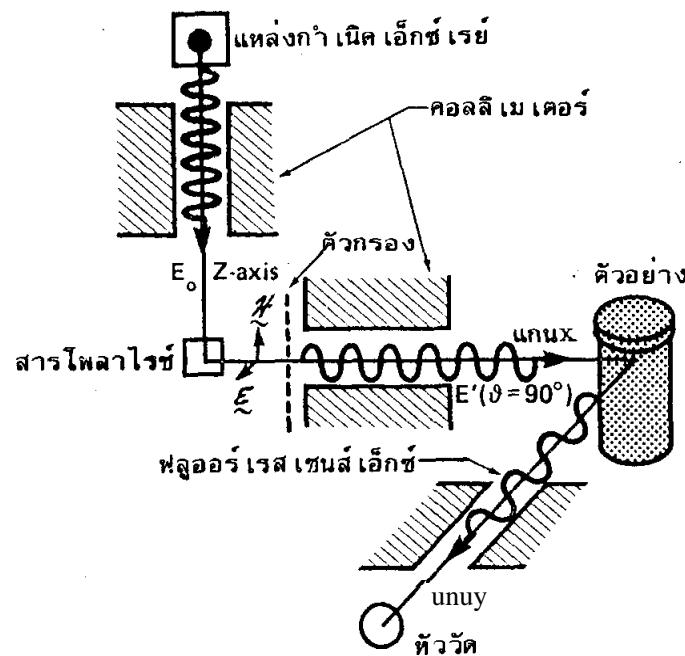
คำว่าโพลาไรซ์ (polarize) หมายถึงการจัดหรือบังคับให้กัมมันด้วยรังสีเคลื่อนที่ในระนาบใดระนาบที่นึง สำหรับเมื่อหาในบทเรียนนี้ การโพลาไรซ์กัมมันด้วยรังสีตอกกระแทบ เป็นวิธีหนึ่งที่ลดปริมาณที่เกิดจากการกระเจิงได้ เนื่องจากเวค เดอร์ไฟฟ้า (electric vector) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของกัมมันด้วยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า มีทิศทางการเคลื่อนที่ในบรรยายกาศแบบระเบียร์ แบบ (ไม่มีทิศทางแน่นอน เคลื่อนไปได้ทุกทิศทุกทาง) ถ้าต้องการบังคับทิศทางของมัน ทำโดยจัดให้มีตัวโพลาไรซ์ เช่น ถ้าตัวโพลาไรซ์ทำให้เกิดมีการกระเจิงที่ 90° ไฟฟอนที่ถูกทำให้กระเจิงจะมีเวค เดอร์ไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบ (plane) ของการกระเจิง ดังนั้น กล่าวได้ว่า ถ้าไฟฟอนที่ถูกทำให้กระเจิงที่ 90° ถูกโพลาไรซ์

สารที่ใช้ทำตัวโพลาไรซ์ มักมีค่า Z ต่ำ ซึ่งมีส่วนที่ภาคตัดขวางในการดูดกลืนต่ำ แต่มีความหนาแน่นสูง (density) กล่าวคือมีจำนวนอิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์ ซม.³ มาก เพื่อ

ก่อให้เกิดการกระเจิงได้มาก ที่นิยมใช้คือ ลูไซต์ (lucite) ถ่าน (carbon) เบอร์ริเลียม (beryllium) และอลูมิเนียม (aluminium)

กรณีที่สารตัวอย่างมีความหนา แต่ต้องการหาธาตุtrace (trace element) ที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ อาจอยู่ในช่วงต่ำสุดที่จะสามารถตรวจวัดได้ พิเศษที่เกิดจากการกระเจิงแบบอินโนเชนต์อาจหนัก เอ็กซ์เรย์ของสารที่ต้องการทราบก็ได้ อีกประการหนึ่งคือ สารตัวอย่างทนาย่อนมีโอกาสเกิดการกระเจิงของกัมมันตภาพรังสีแบบคอมป์ตัน หรืออินโนเชนต์สูง

ในรูป 1.8 แสดงการโพลาไรซ์ โดยไฟตอนพลังงาน E_0 ถูกจัดทิศทางการเคลื่อนที่อย่างดี (collimate) โดยปล่อยออกจากต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ตามแนวแกน Z และทุกกระบวนการตัวโพลาไรซ์ ลำเอ็กซ์เรย์จะถูกทำให้กระเจิงทุกทิศทุกทาง แต่ถ้าทำการบังคับให้กัมมันตภาพรังสีที่ถูกกระเจิงแบบอินโนเชนต์มีส่วนหนึ่งเคลื่อนไปตามแนวแกน X ลำพลังงาน E' จะมีเวคเตอร์ไฟฟ้า E ตั้งฉากกับระนาบ XZ ปริมาณพลังงานที่ได้นี้สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (9) และใช้ค่ามุม $\theta = 90^\circ$ จากคำจำกัดความที่ว่า กัมมันตภาพรังสีที่ถูกโพลาไรซ์นั้นไม่สามารถกระเจิงในทิศทางเดียวกับเวคเตอร์ไฟฟ้าของมันเอง หรือกล่าวว่าไม่สามารถเข้าสู่ระนาบของการโพลาไรซ์ของตัวมันเอง ดังนั้น ลำเอ็กซ์เรย์ในรูป 1.7 ผลกระทบบนสารตัวอย่าง และจะมีปริมาณกัมมันตภาพที่ถูกโพลาไรซ์เป็นจำนวนน้อย เท่านั้นที่สามารถเข้าสู่หัววัดได้เนื่องจาก เสือกให้แกนของหัววัดและสารตัวอย่างอยู่ในแนวแกน Y ซึ่งตั้งฉากกับระนาบ XZ และในช่วงเวลาเดียวกันนี้ บางส่วนของกัมมันตภาพรังสีที่ถูกโพลาไรซ์อาจกระตุ้นให้สารตัวอย่างทำการปล่อยฟลูออร์เรสเซนซ์เอ็กซ์เรย์ก็ได้ ซึ่งการปล่อยนี้เป็นไปทุกทิศทุกทาง อาจมีบางปริมาณถูกหัววัดบันทึกค่าไว้ อย่างไรก็ตาม อินโนเชนต์พิเศษมีความเข้มลดลงจากค่าจริงที่ควรจะเป็น แต่ไม่ถึงกับมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อจากลำกัมมันตภาพรังสีถูกความคุณเพียงน้ำหนึ่ง ส่วน ด้วยจีโอดิทรีของการบังคับทิศทาง และเมื่อจาก เกิดการกระเจิงแบบวีคูณสำหรับค่ามุมน้อยๆ ในตัวโพลาไรซ์ และสารตัวอย่าง



รูป 1.8 การจัดจิโอ เมทริ เพื่อทำการไฟลาราช์กับบันดาพรังสีที่จะเป็นตัวกระตุ้น ลำโพงความแนวนอน z ถูกไฟลาราช์หลังจากกระเจิงแล้ว ชิ้งลำโพงความแนวนอนแกน x ถูกไฟลาราช์ ตัวกรองทำหน้าที่เพิ่มความแกร่งแต่ลดการกระเจิงของพวกไฟคอนหลังงานด้ำ ในแนวแกน y พวกถูกกระเจิงแบบคอมบ์ตันจะมีความเข้มต่ำสุด

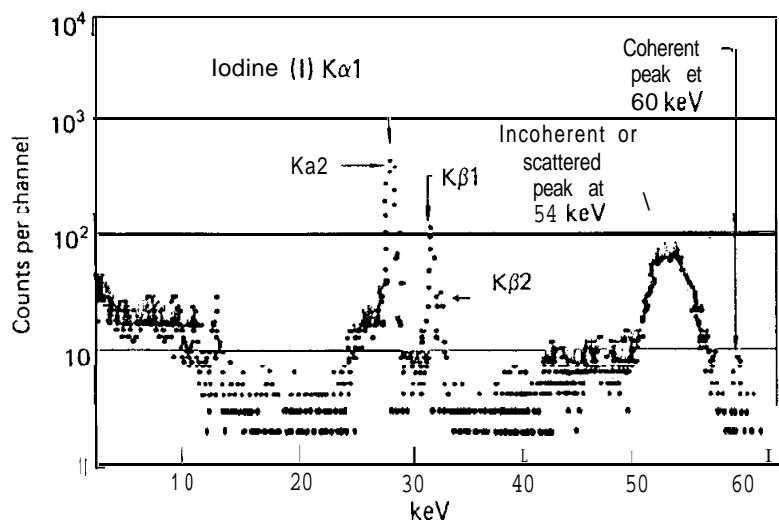
สรุปได้ว่า ถ้าต้องการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีความหนาด้วยวิธีการของ FEA จะเกิดมีศักดินไม่มี เน้นที่มีความเข้มสูง กำจัดให้น้อยลงได้โดยใช้วิธีการไฟลาราช์ ซึ่งจะทำหน้าที่ลดความเข้มของศักดังกล่าว

1.7 บทสรุป

การวิเคราะห์ธาตุเรซโดยใช้เทคนิคของ FEA (fluorescent excitation analysis) ทำได้อย่างรวดเร็วทั้งแบบทฤษฎีและปฏิบัติ สารตัวอย่างอยู่ได้หลายรูปแบบ เช่น เม็ดของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส (มีน้อยมาก) เป็นต้น การจัดจิโอล์มทรีของระบบการทดลองทำได้หลายแบบ

ถ้าในสารตัวอย่างมีธาตุอนินทรีย์ (inorganic) ประปน ธาตุเหล่านี้อาจถูกกระตุ้นให้ปล่อยเอ็งช์เรย์ โดยใช้ต้นกำเนิดกัมมันตภาพที่เหมาะสม เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งสารตัวอย่างอาจดูดกลืน หรือทำให้กัมมันตภาพรังสีที่เป็นตัวกระตุ้นนั้นกระเจิงไปได้ สุดท้ายคือ เกิดสเปกตรัณขึ้น ซึ่งถูกบันทึกค่าผับลัดโดยหัววัด $S_i L_i$ ตั้งแสดงในรูป 1.9 รายละเอียดดังนี้

- 1) แกนนอน แสดงค่าพลังงานหลายๆค่า
- 2) แกนตั้ง แสดงค่าผับลัดที่บันทึกได้จากมัลติแซน เนลอนาลัย เชอร์ (สเกลล์อก)
- 3) สารตัวอย่างคือ น้ำผลไม้ไอโอเดิน 12.5 mg ต่อสารละลายน้ำ 1 g บรรจุในขวดพลาสติกมีขนาด \varnothing 1.5 ซม. สูง 2.5 ซม.
- 4) กัมมันตภาพรังสีที่เป็นตัวกระตุ้นคือ รังสีแกมม่าจาก ^{241}Am มีพลังงาน 59.53 keV พลังงานยังคงเดินยาวของอิเล็กตรอนในวงโคจร K ของไอโอเดินคือ 33.164 keV เพื่อได้ว่าพลังงานกัมมันตภาพรังสีที่เป็นตัวกระตุ้นนั้นมีค่าสูงกว่าพลังงานยังคงเดินยาวของอิเล็กตรอนในวง K ตั้งนั้น ถ้าเกิดปราบภัยการผู้การดูดกลืนแบบไฟโตอิเล็กทริก (โดยอะตอมของไอโอเดิน) ย่อมเกิดช่องว่างอิเล็กตรอนขึ้น
- 5) การทดลอง จัดให้รังสีแกมมาชนสารตัวอย่างโดยตรง



รูป 1.9 สเปกตรัมของ FEA ชีงใช้ตัวอย่าง เป็นไอโอดีน 12.5 มิลลิกรัม/กรัม (สารละลายน้ำ) ถูกกระตุ้นด้วยรังสีแกมมา 60 keV จาก Am-241 ชีงชนตัวอย่างโดยตรง ใช้เวลาคือสเปกตรัม 5 วินาที แนวแกนตั้ง เป็นสเกลกึ่งล็อก

จากรูป 1.3 ยัลเดฟลูออร์เรสเซนซ์ของไอโอดีน ($Z = 53$) เป็น 0.87 หรือ กล่าวว่าช่องว่างอิเล็กตรอนในวงโคจร K จะก่อให้เกิดเอ็กซ์เรย์อนุกรม K 87% ของช่วง เวลา และจากตารางแสดงค่า $K_{\alpha 1} = 28.610 \text{ keV}$, $K_{\alpha 2} = 28.315 \text{ keV}$ เป็นค่า ที่ใกล้เคียงกันมาก หัววัดไม่สามารถแยกพิคได้ในรูป 1.9 ส่วน $K_{\beta 1} = 32.289 \text{ keV}$ และ $K_{\beta 2} = 33.036 \text{ keV}$ ในรูป 1.9 เท็นแยกได้เล็กน้อยเท่านั้น ส่วนพิคที่ 10.5 และ 12.5 keV เป็นเอ็กซ์เรย์ L_{α} และ L_{β} ของตะกั่วจากคอลลิเมเตอร์ (collimator) ที่ใช้ ในการทดลอง

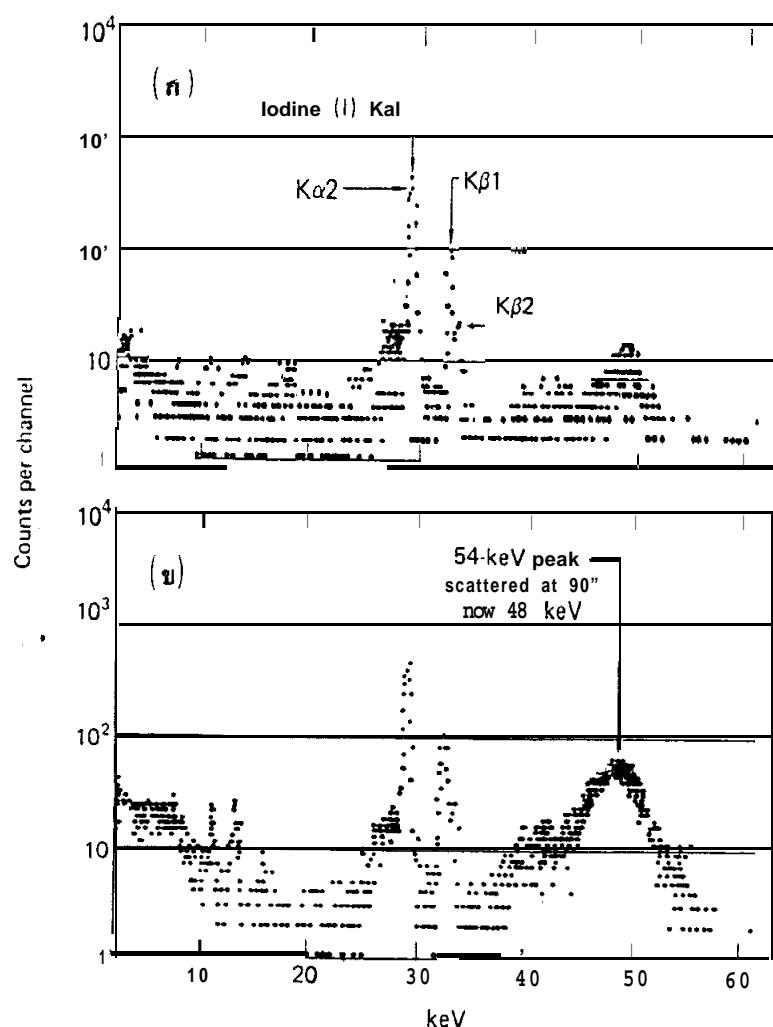
นอกจากนี้ ในรูป 1.9 ยังแสดงการกระเจิงแบบโคซีเรนต์ที่ 60 keV ส่วนที่ค่า 54 keV จะเห็นค่าพลังงานกระจักระยะอยู่รอบๆ เนื่องจากการกระเจิงแบบอินโคซีเรนต์ (หรือการกระเจิงแบบคอมบ์ตัน) ของพลังงานกัมมันตภาพรังสี 59.5 keV อธิบายรายละเอียดดังนี้

จากรูป 1.6 เห็นได้ว่ากัมมันตภาพรังสีที่เป็นตัวกระตุ้น มีพลังงาน 59.5 keV ถูกทำให้กระเจิงเป็นมุม 90° จะสูญเสียพลังงาน 5.5 keV ตั้งนั้น หัววัด (กัมมันตภาพรังสี) จะเห็นการกระเจิงแบบคอมบ์ตัน 54 keV ก่อน สังเกตว่า พิกของกัมมันตภาพรังสีถูกกระเจิงมีความกว้างมาก (หรือกล่าวว่า สักษณะพื้น เป็นนามๆ ไม่เหมือนไฟฟ้าพิก) สาเหตุอาจเนื่องจากจีโอด เมทริกของการทดลอง ทำให้หัววัดได้รับกัมมันตภาพจาก การกระเจิงหลายๆ ชุด

ถ้าใช้สารตัวอย่าง เดิม แต่จัดจีโอด เมทริกของการทดลองตามรูป 1.8 E_\odot (59.5 keV) เป็นตัวกระตุ้น ชึงถูกบังคับให้มีศักยภาพตามแนวแกน Z และกระเจิงจากไบรอนคาร์ไบด์ (boron carbide) เลือกใช้ตะกั่ว เป็นคอลลิเมเตอร์ (ตัวบังคับศักยภาพ) และให้มีมุมของการกระเจิง เป็น 90° กัมมันตภาพรังสีถูกทำให้กระเจิงนี้จะถูกโพลาไรซ์ในระนาบ zx และเมื่อพลังงานเปลี่ยนเป็น 54 keV ชึงถ้าพลังงานตั้งกล่าวมีชนกับสารตัวอย่าง สเปคตรัมของเอ็กซ์ เรย์ที่ถูกปล่อยออกมาจากสารตัวอย่างจะมีการรบกวนจากกัมมันตภาพรังสีถูกกระเจิงแบบอินโคซีเรนต์อยู่น้อยที่สุด ทำโดยจัดให้หัววัดอยู่ในแนวแกน y หรือกล่าวได้ว่า หัววัดถูกวางตั้งฉากกับระนาบ zx สเปคตรัมจากการทดลองตั้งกล่าวมีแสดงอยู่ในรูปที่ 1.10(ก) โดยยังคงใช้สารตัวอย่างเดิม แต่เปลี่ยนจีโอด เมทริกของการทดลองใหม่ ให้เป็นไปตามรูปที่ 1.8

เปรียบเทียบผลจากรูป 1.10(ก) กับรูป 1.9 ดังนี้

- 1) ที่พลังงานต่ำๆ $< 10 \text{ keV}$ ค่านับวัดในรูป 1.8 (ก) น้อยกว่าในรูป 1.9
- 2) $K_{\alpha 1}$ และ $K_{\alpha 2}$ ในพิกของไอโอดีน เป็นเช่นเดียวกันทั้งสองรูป
- 3) บริเวณพิกอินโคซีเรนต์ ในรูป 1.10(ก) มีคุณค่าคงที่ 48 keV ส่วนในรูป 1.7 อยู่ที่ 54 keV



รูป 1.10 สเปกตรัม FEA ของสารละลายนิโตรเจน 12.5 มิลลิกรัม/กรัม วัด 1000 วินาที
 (ก) กัมมันตภาพรังสีที่ใช้กระดุนเมล็ดงา 60 keV ถูกโพลาไรซ์ดังแสดงในรูป
 1.8 ชี้หัววัดอยู่ในแนวแกน y
 (ข) หัววัดอยู่ในแนวแกน z

ส่วนสเปกตรัมในรูป 1.10(ข) ข้ายกหัวด้วยแกน y ไปอยู่ในระนาบ zx และทิศทางการนับวัด เป็นไปตามแนวแกน z ผลที่ได้มีดังนี้

- 1) พอกอินโคชีเรนต์ที่ 48 keV มีความกว้างมากกว่าพอกในรูป 1.10(ก) และรูป 1.9 เป็นผลจากการนับวัดปริมาณกับมันตภาครังสีที่ถูกทำให้ระเงิง 90°
- 2) เอ็กซ์เรย์ของตะกั่วคือ L_α และ L_β เท็นได้ชัด และยังเห็น $L_{\gamma 1}$ ของตะกั่วที่ 14.76 keV (ตะกั่วเป็นวัสดุใช้ทำคอลลีเมเตอร์)

หมายเหตุ 1. ค่าต่างๆของเอ็กซ์เรย์ดูจากตาราง 1-1 เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง
 2. ความเข้มข้นของไอโอดีน ซึ่งมีค่า 1.25 mg/g สารละลายนี้น ผู้ดูได้ว่าเป็นความเข้มข้นประมาณ 1 ppm (part per million)

แบบฝึกหัดบทที่ 1

1. จงอธิบายทฤษฎีพื้นฐานของ เทคนิค FEA
2. เมื่อหลักซึ่งของหลังงานกับมันติดกันอย่างไร จึงสามารถใช้ FEA ในการคำนวณได้
3. ออ กอร์บิ เล็กตรอนคืออะไร? เกิดขึ้นได้อย่างไร?
4. ตามความเห็นของท่าน เทคนิค FEA มีข้อดี เมื่อยอย่างไรบ้าง?
5. จุดประสงค์หลักของปริมาณความต้านทานในทฤษฎีความต้าน เพื่ออะไร จงอธิบายพร้อมทั้งยกตัวอย่าง
6. อักษรกรีกที่ใช้ เป็นสับสคริปต์แต่ละอนุกรรมของ เอ็กซ์ เรย์ เพื่อแสดงข้อมูลอย่างไรบ้าง?
7. ตามความเห็นของท่าน ข้อมูลจาก เอ็กซ์ เเรย์ฟลูออร์ เรล เช่นส์ของธาตุคือ ไปนี้เป็นอย่างไร
H He Li Be B
8. จงอธิบายการเก็บสันของการถูกกลืน และข้อมูลนี้มีประโยชน์อย่างไรต่อ เทคนิค FEA
9. การไฟลารายรัชต์กับมันติดกันเพื่อวัดถุนประสงค์ใด? จงอธิบายหลักการพอสังเขป และวิจารณ์ผลที่ได้รับ
10. ตามความเข้าใจของท่าน ส เปคตรัมจากวงจรวิเคราะห์สัญญาณแบบแซน เนล เดียว และชนิดทดลองแซน เนล ต่างกันอย่างไร?