

## บทที่ 4

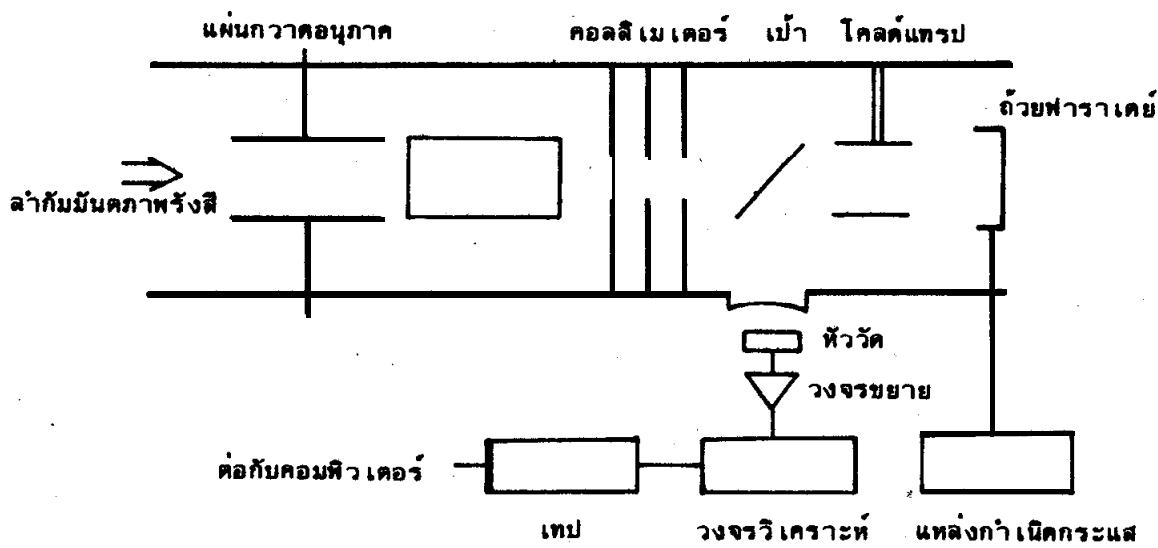
### การใช้อุปกรณ์วิเคราะห์แบบเปล่งรังสีเอ็กซ์ (PIXE)

#### 4.1 บทนำ

เทคนิคการใช้อุปกรณ์วิเคราะห์แบบเปล่งรังสีเอ็กซ์ เรียกชื่อย่อเป็น "pixe" (PIXE = Particle Induced X-Ray Emission) โอกาสประสบผลสำเร็จ (เกิดการเปล่งรังสีเอ็กซ์) มีค่าสูง โดยที่นำไประบบเก็บรวบรวมข้อมูลมักประกอบด้วยหัววัดกัมมันตภาพรังสีแบบชิลิคอน และใช้มัลติชานแนลลอนาลizer (multichannel analyzer) อุปกรณ์มีประดั้งกล่าวว่าอาจเป็นไปได้ อนุภาคแหล่งฟ้าหรืออนุภาคอื่นๆที่ชนกับวัสดุใดๆ ก็ตามจะปล่อยรังสีเอ็กซ์ ให้กับหัววัดกัมมันตภาพรังสีแบบชิลิคอน ความไวของวิธีการทดลอง และปริมาณวิเคราะห์ (quantitative analysis) ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางแก้ปัญหานำไปในสาขาวิชานี้สำหรับขั้นสูงต่อไป

#### 4.2 หลักการพื้นฐานของวิธีการ

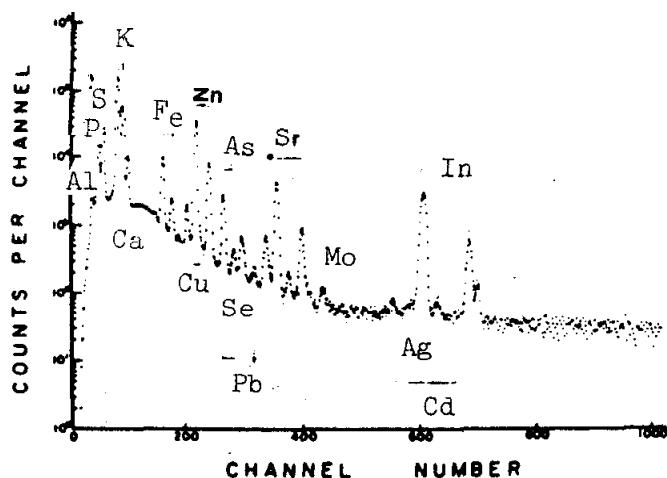
โครงสร้างของวิธีการวิเคราะห์แบบ PIXE แสดงในรูปที่ 4.1 "ลำอุปกรณ์แหล่งฟ้า (หรือไอโอดอนหนักอื่นๆ)" ถูกฉีดผ่านปริมาตรที่จะทำการอ่านรังสี อาศัยเทคนิคบางประการจัดให้ลำอุปกรณ์ดังกล่าวมีความเรียบลื่น (uniform) กล่าวคือใช้วัสดุแผ่นบางซึ่งมีคุณสมบัติแห่งการกระจายอนุภาค เรียกชื่อเป็น "diffusor foil" หรืออาจใช้แผ่นสะท้อนไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic deflector plates) 2 ชั้น ทำหน้าที่กวาดลำอุปกรณ์ให้แยกเป็น 2 แนวที่ตั้งฉากกัน จากนั้นใช้คอลลิเมเตอร์ (collimator) ทำหน้าที่บังคับแนวทางเดินของลำอุปกรณ์ เพื่อชนกับเม็ดก้อนสารตัวอย่าง วัสดุที่ใช้ทำเม็ดก้อนเป็นคาร์บอน (carbon) หรือพลาสติก (plastic) สักษะเป็นแผ่นบางๆ ทำหน้าที่รองรับสารตัวอย่าง บางครั้งอาจเรียกเป็น "แบคกิ้ง" (backing) ส่วนพวกเนื้อเยื่ออินทรี หรือผงขัดอัด เป็นเม็ด



หากเป็นสารตัวอย่างซึ่งมีกัมมันต์ อาจใช้เป็นเม้าได้ เช่นกัน จากนั้นล่าอนุภาคจะถูกบังกับให้เข้าสู่ถ้วยฟาราเดย์ (Faraday cup) ซึ่งอยู่ห่างจากอุปกรณ์เก็บรวมร่วมล่าอนุภาค เมื่ออะตอมของสารตัวอย่างเปล่งรังสีเอ็กซ์ รังสีบริ摹านี้จะ เกสื่อนสู่บริ摹านครซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์เก็บรวมร่วมข้อมูล ซึ่ง เป็นของปวิามาตรดังกล่าวมีลักษณะคล้ายหน้าต่าง ผู้วัดกันมั่นคงกว้างซึ่งมักใช้ชิลโคน

ผลการวิเคราะห์จะเป็นสเปกตรัดังแสดงในรูป 4.2 แต่ละพิกัดจะสมนัยกับ เอ็กซ์-เรย์อนุกรม  $K_{\alpha}$  และ  $K_{\beta}$  ของแต่ละธาตุ หากราดูหนักจะมีโอกาสโน้มในการเปล่งรังสีเอ็กซ์อนุกรม K แต่จะมีโอกาสมากที่จะเปล่งอนุกรม L เช่น ตะกั่ว เป็นต้น บรรดาพิกัดที่เกิดจากหลังงานรังสีเอ็กซ์จะข้อนอยู่บนแบบกราฟที่ซึ่ง เกิดจากวัสดุที่ใช้ทำแม่กิงก์ เป็นส่วนใหญ่ จำนวนผิบวัด (count number) ในแต่ละพิกัดจะสมนัยกับปริมาณธาตุที่ปะปนอยู่ในสารตัวอย่างซึ่งหากค่าได้โดยทราบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทำยิลด์ (yield) ของเอ็กซ์เรย์ หรืออาจใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์สเปกตรัดังกล่าว (วิธีนี้ใช้เวลาอยู่มาก)

ในรูปที่ 4.2 ณ บริเวณปลายสเปกตรัมด้านหลังงานตัว จะปรากฏบริเวณตัด (cut off) ทึ้งนี้ เป็นองจากการเกิดการถูกกั่นรังสีเอ็กซ์ในช่องหน้าต่างของบวิามาตรและผู้วัด



รูป 4.2 ตัวอย่างสเปกตรัมได้จาก เทคนิค PIXE วิเคราะห์เนื้อเยื่ออ่อนในปลาดาว

ชีดจ่ากัดค่าสุคอาจวิ เคราะห์ได้ถึงพวกราดที่มีจำนวนอะตอม (atomic number) ใกล้เคียง กันอัลูมิเนียม (aluminum) ซึ่งถ้าเลือกใช้ระบบนับวัดที่มีประสิทธิภาพดีย่อมวัดธาตุเบาๆ ได้ จัดเป็นข้อได้เปรียบของวิธีการนี้ กล่าวคือ สามารถวิเคราะห์ได้หลายธาตุที่มีช่วงจำนวน-อะตอมต่างกันมากๆ ได้ เป็นการทุ่นเวลา และประหยัดค่าใช้จ่าย อนุภาคตัดกระแทบมีพลัง-งานอยู่ในช่วง 1-5 MeV/amu

#### 4.3 การผลิตรังสีเอ็กซ์

ปรากฏการณ์ที่เกิด เมื่อนุภาคหนักมีประจุชนกันอะตอมของ เม้าคือการ เปลิงรังสีเอ็กซ์ ออกจากการชนของเม้า ทั้งนี้ ต้องแยกเป็น (1) กรณีอนุภาคมีสักยณะ เป็นประจุอยู่รวมกันเป็น จุด (หรือสักยณะคล้ายเป็นจุด) หรือ (2) กรณีไอออนหนักกว่าจำนวนมากอยู่รวมกัน เนื่อง จากปฏิกิริยาในการชนกันจะมีทฤษฎีที่แตกต่างกัน โดยทั่วไป ในงานวิเคราะห์มักใช้โปรดอน หรือแอลฟ่า เท่านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ที่หนักกว่าจะใช้ในงานวิเคราะห์เฉพาะกรูบบิช เช่น เพื่อกันคว้าวิจัยลึกลึกลึกใหม่ เป็นต้น ซึ่งปัญหาต่างๆ อันอาจเกิดขึ้นยังไม่เป็นที่ทราบจังหนักอน

เช่น รังสีเอ็กซ์อาจมีพลังงาน เคลื่อนค่าไป และอาจเกิดการแตกตัวแบบทวีคูณ (multiple ionization) ซึ่งทำให้ยิลเดอร์ของรังสีเอ็กซ์แปรไป

#### 4.3.1 ป्रรดอนและอนุภาคแอลฟ่า

การท่อนุภาค (ป्रรดอนหรือแอลฟ่า) ชนกันจะคอมสารตัวอย่างและก่อให้เกิดการแตกตัว โอกาสของการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ขึ้นกับพลังงานของอนุภาค สามารถอธิบายหรือคาดการณ์ได้โดยใช้ทฤษฎีของบอร์น (PWBA = plane wave Born approximation) สำหรับพหุอนุภาคพลังงานสูง แต่ถ้าเป็นพหุอนุภาคต่ำ (2-3 MeV) ต้องแยกพิจารณาด้วยวิธีอื่น เกี่ยวกับตัวประกอบที่ใช้เป็นค่าแก้บริบทพลังงานยิด เหนี่ยวอิเล็กตรอนในอะตอมของ เป้า และการหัก เมนทิศทางของอนุภาค เมื่อจากแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) โจชันสัน (Johansson) และคณะ ได้เสนอสูตรที่มีลักษณะกึ่งง่าย (Semi-empirical) ในปี ค.ศ. 1976 เพื่ออธิบายพื้นที่ภาคตัดขวาง (cross section) ของการแตกตัวในอะตอม เป้าชนิดบาง อาศัยแบบจำลอง "ไบนารี เอ็นโคเนอร์" (binary-encounter model) ของ การเซีย (Garcia) ก่อให้เกิดกฎการเทียบค่า (scaling law) ของพื้นที่ภาคตัดขวาง โดย เสนอ เฉพาะในรูปของพหุอนุภาคยิด เหนี่ยวของอิเล็กตรอน และพลังงานของอนุภาค เท่านั้น

จากการทดลองโดยใช้เป้าชนิดบาง ตรวจวัด อัตราเร็วจากการแตกตัวของวงโคจร K และ L สมการความสัมพันธ์ของ เส้นกราฟชึงหาค่าโดยอาศัยไฟลินอล เมียลติกรีที่ 5 (fifth degree polynomial) ดังนี้

$$e_{\log} (\sigma u_i)^2 = \sum_{n=0}^5 b_n x^n \quad (4-1)$$

โดย  $x = e_{\log} (10^{-3} E / \lambda u_i)$

$u_i$  เป็นค่าพลังงานยิด เหนี่ยวของอิเล็กตรอน

E เป็นพลังงานของป्रรดอน

$\sigma$  เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของการแตกตัว

$\lambda$  เป็นอัตราส่วนของมวลโปรตอนต่อมวลอิเล็กตรอน  
ค่า ส.ป.ส. ๖ หาได้จากตารางที่ 4-1

ตาราง 4-1 ส.ป.ส. ในการคำนวณพื้นที่ภาคตัดขวางการผลิต เอ็คซ์เรย์

X-ray	จำนวนจุด	ส.ป.ส.				
		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
K	316	2.0471	-0.65906(-2)	-0.47446	0.99190(-1)	0.46064(-1) 0.60023(-2)
L	158	3.6082	1.37123	-0.30971	-0.70593(-4)	0.25063(-2) 0.12613(-2)

(คำนวณตามสมการ (4.1))

ถ้าทำการพิจารณาค่า  $u_i^2 \sigma$  ( $i = K$  หรือ  $L$ ) ในแกนตั้ง และ  $E/\lambda u_i$  ในแกนนอน จะได้ เส้นกราฟตั้งแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งพื้นที่ภาคตัดขวางมีหน่วย เป็น  $10^{-14} \text{ ชม}^2$ .

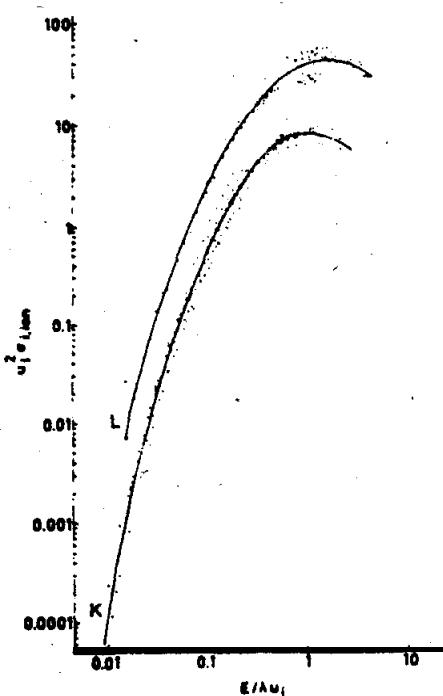
คำนวณ  $u_L$  โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$u_L = \frac{1}{4} (u_{L1} + u_{L2} + 2u_{L3}) \quad (4-2)$$

ตาราง 4-2 และ 4-3 แสดงค่าพื้นที่ภาคตัดขวางของชาตุบางกลุ่ม

แม้ว่าสมการ (4-1) จะสร้างขึ้นจากข้อมูลของโปรตอนทั้งสิ้น แต่อาจใช้คาดคะเนเป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของอนุภาคแหล่งฟ้าได้ โดยพิจารณาในกรณีที่อนุภาคมีความเร็วเท่ากัน แต่ความถูกต้อง (accuracy) จะมีค่าน้อยลงประมาณ 20-30%

พื้นที่ภาคตัดขวางในการผลิตรังสีเอ็คซ์ (กำหนดให้เป็น  $\sigma_p$ ) ในกลุ่มเส้นที่ปรากฏ ในสเปกตรัมคือ



รูป 4.3 เส้นกราฟแสดงสัมประสิทธิ์ภาคตัดขวางของการแตกตัวในวงไจจ์ K และ L เส้นทึบ  
ได้จากทฤษฎี ส่วนจุดต่างๆได้จากการทดลองในเม็ดบาง

$$\sigma_p = \sigma_{ion} \cdot \omega k \quad (4-3)$$

โดย  $\omega$  เป็นฟrequency เรสเซนซ์ เอ็กซ์ที เกิดขึ้น

$k$  เป็นความเข้มสับพหุรของ เส้น เอ็กซ์เรย์ ซึ่งได้จากการจัดตัวใหม่ของอิเล็กตรอน  
ในอะตอม

จากการทดลองพบว่า อัตราการปล่อย K- เอ็กซ์เรย์จากธาตุเดียวกัน จะเป็นค่าเดียวกันใน  
ว่าจะใช้ตัวกระตุนเป็นจุดประจุ (point charge), เอ็กซ์เรย์, หรืออิเล็กตรอน ส่วนข้อมูล  
ของอนุกรม L และ M มีน้อยมาก

#### 4.3.2 ไอออนหนัก

จากตอนที่แล้วได้เสนอว่า ไอออนใดๆตามที่มีความเร็วเดียวกัน จะมีสัมประสิทธิ์ภาคตัด  
ขวางในการผลิต เอ็กซ์เรย์ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า  $Z^2$  ประโยชน์ที่สามารถนำไปใช้คือ ทำ  
การเทียบส่วนเพื่อตัดแปลง เป็นค่าคาดคะเนลักษณะของไอออนหนักได้ แต่จะต้องคำนึงถึงผล  
อันเกิดขึ้น เช่น เมื่อไอออนหนักเคลื่อนผ่านอะตอมของเม้าที่มีค่า Z สูง จะก่อให้เกิดการ

ตาราง 4-2 พื้นที่ภาคตัดขวางของการหลีก  $K_{\alpha}$  เอ็กซ์เรย์ชั่งคำนวณจากสมการ (4-1) และ (4-3)

ธาตุ	Z	$\omega_k$	$K_b/K_a$	ผลลัพธ์ (MeV)														
				0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
Al	13	0.0357	0.0134	219	625	906	1054	1113	1120	1100	1066	1027	985	910	847	797	..	..
S	16	0.0761	0.0659	68.2	257	473	638	736	832	677	899	905	900	873	134	792	753	717
Ca	20	0.163	0.1315	15.2	80.3	174	274	3 %	446	511	564	604	634	671	664	662	672	657
Ti	22	0.219	0.1355	7.51	45.2	106	176	1248	315	374	423	469	504	556	586	601	606	603
Cr	24	0.282	0.1337	3.79	25.7	64.5	113	166	218	268	313	354	389	446	486	512	527	535
Fe	26	0.347	0.1391	1.90	14.3	31.6	70.9	108	146	183	222	2 %	267	341	313	414	4 %	451
Ni	28	0.414	0.1401	0.961	8.23	23.3	44.5	69.9	97.6	126	155	182	209	256	295	327	352	371
Zn	30	0.479	0.1410	0.485	4.69	14.0	27.7	44.8	64.2	85.0	106	128	148	187	222	251	275	295
As	33	0.567	0.1560	0.168	I. %	6.32	13.2	22.3	33.0	45.0	57.8	71.1	84.5	111	136	159	179	197
Br	35	0.622	0.1683	0.0829	1.10	3.75	8.11	14.0	21.2	29.4	38.4	47.9	57.7	17.6	97.1	116	133	148
Sr	38	0.691	0.1831	0.0284	0.466	1.72	3.90	b. 96	10.9	IS. 4	20.6	26.2	32.1	44.6	57.4	70.0	12.2	93.6
Mo	42	0.764	0.1981	0.00678	0.151	0.621	I. 50	2.61	4.53	6.63	9.07	11.8	14.8	21.3	28.3	35.6	42.9	50.0
Ag	47	0.830	0.2130	0.00111	0.0376	0.180	0.472	0.932	1.57	2.37	3.34	4.45	5.71	8.56	11.8	IS. 3	11.9	22.1
Sn	50	0.159	0.2230	-	0.0163	0.0862	0.138	0.467	0.639	1.29	I. 85	2.51	3.25	4.98	6.99	9.21	11.6	14.1
Ba	56	0.901	0.2433	-	0.00310	0.0203	0.0626	0.137	0.249	0.399	0.589	0.818	1.09	1.73	2.51	3.41	4.41	5.49
Pb	62	0.968	0.2621	-	-	-	0.246 (-3)	0.799 (-3)	0.00169	0.00370	0.00638	0.0100	0.0148	0.0276	0.0458	0.0692	0.0979	0.132

ตาราง 4-3 พื้นที่ภาคตัดขวางของ L เอ็กซ์เรย์ชั่งคำนวณจากสมการ (1)

ธาตุ	Z	$\bar{\omega}_L$	ผลลัพธ์ (MeV)														
			0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.1	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
Zn	30	0.0059	576	1253	1b78	1917	2038	2066	2086	2058	2012	1956	1828	-	-	-	-
Br	35	0.020	450	1212	1836	2292	2609	2823	2960	3041	3080	3089	3046	2954	2639	2713	2584
Zr	40	0.031	175	572	965	1299	1569	1782	1947	2072	2165	2233	23J0	2332	2319	2263	2232
Ag	47	0.060	60.5	250	479	704	910	1092	1251	1386	1502	1599	1749	1851	1916	1954	1972
Sn	50	0.079	39.0	178	359	546	725	889	1036	1167	1282	1383	1543	1665	1752	J012	1851
Ba	56	0.120	15.0	83.3	185	300	418	534	643	746	640	927	1077	1200	1300	1379	1442
Gd	64	0.19	4.41	31.8	79.5	139	1ob	271	344	412	478	541	677	760	850	928	996
Hf	72	0.26	1.26	11.5	32.2	60.7	94.J	132	170	210	250	289	365	437	503	563	617
W	74	0.30	0.981	Y. 53	27.5	52.8	63.3	117	153	190	227	265	338	401	471	531	585
Au	79	0.34	0.421	4.10	14.9	30.0	46.6	70.4	93.9	119	144	170	222	272	320	366	408
Pb	82	0.31	-	3.3	10.7	.22.2	16.8	53.8	72.7	92.7	114	135	179	222	263	303	341
U	92	0.50	-	0.876	3.32	7.53	13.4	20.5	28.9	38.1	46.0	58.J	86.7	104	127	150	173

(หมายเหตุ: หน่วยของพื้นที่ภาคตัดขวางในตารางทึ้งสูงศักดิ์ "บาร์น" (barns))

จัดเรียงข้าว (polarization) ของวงโคจรในอะตอม ผลศื้อเพิ่มพื้นที่ภาคตัดขวางในวงโคจรซึ่งว่างอิเล็กตรอน และการมีโครงสร้างกับที่กล่าวว่านี้อีกด้านหนึ่งด้วย

อีกกรณีหนึ่งคือ การที่ไออ่อนต่อกำลังไฟฟ้าจะมีประดิษฐ์ภาพในการขับอิเล็กตรอนออกจากวงโคจรที่อยู่ในน้ำ มันต้องเคลื่อนเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอม เป็นไป ซึ่งจะก่อให้ค่าขังผล (effective value) ของพลังงานยึด เหนี่ยวเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ต้องหาค่าแก้ เกี่ยวกับการสะท้อนของไออ่อนต่อกำลังไฟฟ้าในสนามคูลลอนม์ (Coulomb field) ของนิวเคลียสของ เป็นเหตุผลดังกล่าวทำให้โอกาสในการชนกันของอนุภาควายในพื้นที่สำคัญมีน้อย นั่นคือ พื้นที่ภาคตัดขวางลดลง

อีก เมื่อไออ่อนหนักต่อกำลังไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างระบบที่มี 2 อิเล็กตรอน และอาจก่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน K จากอะตอมของ เป็นไปสู่ช่องว่างในวงโคจรของไออ่อนต่อกำลังไฟ ทำให้พื้นที่ภาคตัดขวางของการแผลตัวภูมิภาค ผลข้อห้อนดังกล่าวนี้ได้ถูกสังเกต เป็นครั้งแรกจากภารกิจศึกษา เกี่ยวกับการเปล่งรังสีเอ็กซ์ของบางส่วนของอะตอมที่ถูกทำให้เคลื่อนที่ช้าลง ปรากฏว่ายิ่งดองรังสีเอ็กซ์ซึ่งเกิดจากสารหนึ่งที่เป็นตัวหยุด กัมมันตภาพ และผลจากการวิเคราะห์แสดงว่าพื้นที่ภาคตัดขวางจะมีค่าสูงสุด เมื่อพลังงานยึด - เหนี่ยวของอิเล็กตรอนถูกกระตุ้น มีค่าเท่ากับพลังงานยึด เหนี่ยวของนำงอิเล็กตรอนในอุ่นกัน

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว อาจแสดงแบบง่ายขึ้นได้โดยใช้ทฤษฎีวงโคจรของโมเลกุล (molecular orbit theory) ซึ่งสมบุติว่า ณ ช่วงความเร็วต่ำ ระบบอิเล็กตรอนของสองอะตอมที่ชักกันนั้นมีการย้ายตำแหน่งอิเล็กตรอนแบบเดียบatically transform) ไปสู่ระบบโมเลกุลซึ่งจะคงตัวอยู่ช่วงขณะนี้ ในแผนภาพของระดับพลังงาน แสดงถึงระดับในรูปของผังค์ชันระยะห่างว่างนิวเคลียส ซึ่งปรากฏแนวตัดของวงโคจรมากมาย เมื่อวงโคจรที่มีอิเล็กตรอนบรรจุเต็ม ตัดกับวงโคจรที่มีช่องว่าง ย่อมมีโอกาสที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนไปสู่ช่องว่างดังกล่าวในอีกวงโคจรหนึ่ง ขบวนการนี้จะยกเว้นค่าพื้นที่ภาคตัดขวางของ การเปล่งรังสีเอ็กซ์ เช่นกัน และจะปรากฏผลมาก เมื่ออะตอมที่ชักกันมีประจุเท่ากัน

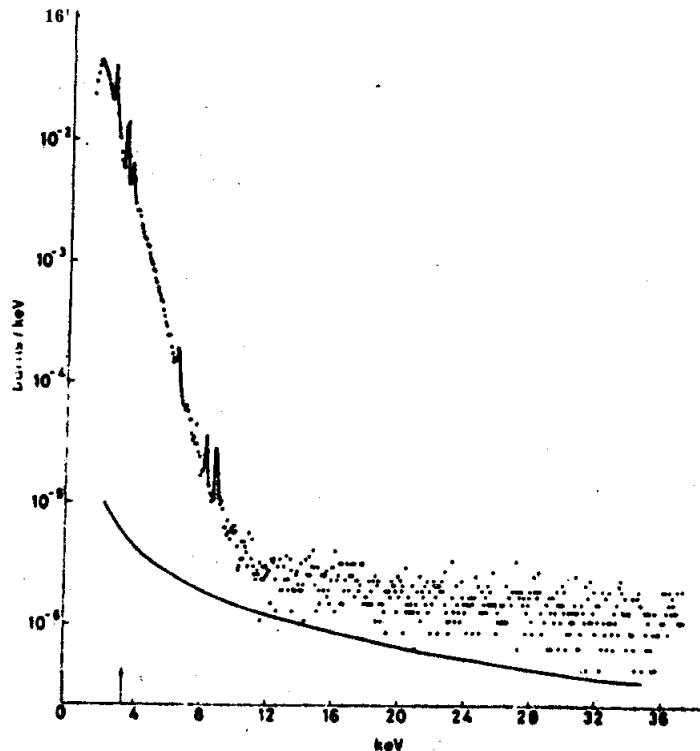
นอกจากนี้ สเปกตรัของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการชนด้วยไอน้ำหนักจะซับช้อนกว่าการใช้โปรตอน แนวเส้นเอ็กซ์เรย์ที่ปราศจาก เมื่อใช้โปรตอนกระตุ้นจะเคลื่อนตำแหน่งไป ทั้งยังเกิดแยกเป็นส่วนประกอบอย่างหลายส่วน ซึ่งอาจทำให้สเปกตรัมมีนาคกว้างขึ้นอีกด้วย ร้อย eV ปราศจากการณ์เมื่อเชิงไนโตรเจน แม่เหล็กดิโอด เกิดซ่องว่างช่วงอะตอมในวงโคจรและนอกเนื่องจากการแตกตัวอย่างแรง ก่อให้ค่าพลังงานยืด เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรที่อยู่ในกว่า เกิดแปรค่า เล็กน้อย

เห็นได้ว่า การผลิตรังสีเอ็กซ์โดยการกระตุ้นด้วยอนุภาคหนักนั้น เป็นขบวนการที่ซับซ้อนโดยทั่วไป สำหรับการตัดช่วงจะมีค่าสูงกว่าที่คาดหวังไว้จากสเกลธรรมชาติซึ่งได้จากการใช้โปรตอน เป็นตัวกระตุ้น แต่ค่าที่แน่นอนจะขึ้นอย่างซับซ้อนกับค่าพลังงาน และวิธีการชนกันของอนุภาค การเพิ่มค่าดังกล่าวจะเป็นมาก ณ ค่าพลังงานต่ำๆ การประยุกต์ใช้วิธีการกระตุ้นด้วยอนุภาคหนักจึงมีข้อจำกัดที่จะใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ เช่น

#### 4.4 แมคกราวน์ (Background)

##### 4.4.1 โปรตอนและอนุภาคแหล่ง

การวิเคราะห์ธาตุ เช่น ใช้เทคนิค PIXE สารตัวอย่างจะปะปนกันอยู่ในลักษณะปริมาณคร หรือเรียกเป็นเมทริกซ์ (matrix) เพื่อความเข้าใจอาจมีกลึงสภาพก้อนพินซึ่งมีแร่เป็นก้อนๆ ผึ้งอยู่ ตัวอย่าง เช่น เนื้อเยื่อชีวภาพในสารตัวอย่างชีวภาพ หรือตัวอย่างแอโรโซล (aerosol) ติดตั้งอยู่บนแบบกิงก์ที่ทำด้วยคาร์บอน จากการใช้หัวดับชิลิคอน ปราศรังสีเอ็กซ์ทั้งจากธาตุ เช่น และจากกัมมันตรังสีแบบกราวน์ซึ่งเกิดจาก เมทริกซ์นั่นเอง ตัวอย่างแสดงในรูป 4.4 เป็นสเปกตรัมของแผ่นคาร์บอนบางๆ ถูกชนด้วยโปรตอน 1.5 MeV เกิดพีซึ่งมีการกระจายค่าอย่างต่อเนื่อง ณ พลังงานต่ำ และมีลักษณะเป็นทาง ณ พลังงานสูง (ด้านขวาของ เส้นกราฟ) สังเกตด้านซ้ายใกล้ๆ จุดเริ่มต้นของแกน เส้นกราฟจะมีลักษณะตัดออก (cutoff) เนื่องจากการถูกกั้นพลังงานในอุปกรณ์การทดลอง



รูป 4.4 ผลจากการใช้ปีรัตตอน 1.5 MeV ชนผ่านคาร์บอนบางๆ อุกตรบนแกนนอนหมายถึง พลังงานสูงสุดของ เบรนสตราห์ลิงค์ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

นอกจากนี้ ยังมีอีกหลายขั้นการที่เป็นสาเหตุของแยคกรารวน์ เช่น เบรนสตราห์ลิงค์ (bremsstrahlung) จากอนุภาคตกระษน ที่สำคัญทางช่องขบวนการนี้อาจทำ- นวยจากสูตร

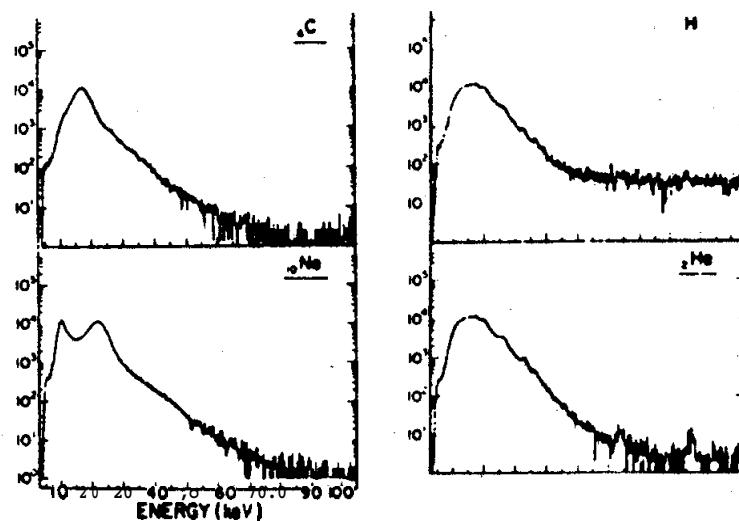
$$\frac{d\sigma}{dE_x} = C \frac{AZ^2 Z_1^2}{EE_x} \left( \frac{Z}{A} - \frac{Z_1}{A_1} \right) \quad (4-4)$$

โดย  $Z$ ,  $A$ ,  $E$  เป็นค่าประจุ, มวล, และพลังงาน ตามลำดับ ของอนุภาคตกระษน  $Z_1$  และ  $A_1$  เป็นประจุและมวล ตามลำดับ ของอะตอม เมทริกซ์  $C$  เป็นตัวประกอบที่มีการแปรค่าอย่างช้าๆ

การที่แยคกรารวน์ในขบวนการนี้เพิ่มค่าขึ้น pijarataได้จากรูปที่ 4.4 ซึ่งในช่วง พลังงานสูง แยคกรารวน์จะเกิดมากตามสูตรในสมการ (4-4) สิ่งสำคัญคือ

(1) ยิลค์จะเพิ่มค่า ถ้าอนุภาคมีพลังงานลดลง ตามสมการ (4-4) สักขณะ เช่นนี้ ตรงข้ามกับยิลค์ของแคแรคเตอร์ลิสติก เอ็กซ์เรย์ (characteristic x-ray)

(2) นิพจน์ ( $Z/A - Z_1/A_1$ ) โดยที่ว่าไป เมทริกซ์มีอัตราส่วน  $Z_1/A_1$  เป็น  $1/2$  ดังนั้น ถ้า  $Z/A$  มีค่า เท่ากับอัตราส่วนดังกล่าวของ เมทริกซ์ นิพจน์จะหายไป ถ้าเป็น อนุภาคแอลฟ่า และไอออนหนักอื่นๆ (ที่หนักกว่าแอลฟ่า) จะไม่ปรากฏนิพจน์นี้ สรุปได้ว่า แมคกราวน์ต่อส่วนนี้ในมี เกิดขึ้น ยกเว้นกรณีประตอน และการทดลองของวัตสัน (Watson) ลักษณะนี้เกิดขึ้นในรูปที่ 4.5



รูป 4.5 สเปกตรายของ เอ็กซ์เรย์โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ แผ่นมีลาร์บานา ก 530 ในโครงการ  
ต่อ คร.ช.m.

กรณีพัฒนาด้าน แมคกราวน์อาจรวมทั้ง เบรนสตราท์สิงก์ซึ่ง เกิดจากอิเล็กตรอน ทุติยภูมิ จากรูปที่ 4.4 บนแนวแกนนอนจะมีลักษณะซึ่ง ค่าพลังงานสูง เกินค่าดังกล่าวจะได้ เส้นกราฟที่ลอกค่าลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสเปกตรัมของ เบรนสตราท์สิงก์จะลดค่าอย่างรวดเร็ว ผ ผลลัพธ์สูงกว่า เอ็กซ์เรย์ซึ่ง

$$E_x \sim \frac{4}{M} m_e E \quad (4-5)$$

$E_x$  เป็นพลังงานสูงสุดที่ projectile (projectile) มวล  $M$  มีพลังงาน  $E$  จะส่งไปยัง

อิเล็กตรอน ๓ อาจศึกษาความหมายได้ว่า ค่าดังกล่าวเป็นข้อจำกัดของพลังงาน

ข้อสังเกตุที่สำคัญคือ การเกิดเบร์มสตราห์ลั่งก์โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิภายใน เมทริกซ์ สูญเสียอย่างยิ่งกับการเปล่งรังสีเอกซ์ของธาตุ เทรส ซึ่งหั้งสองขบวนการนี้ต่างมีขั้นตอนพื้นฐานเดียวกัน คือ เกิดช่องว่างอิเล็กตรอนภายในวงโคลจ เนื่องจากอนุภาคตกรอบ นั่นคือ อัตราส่วนของพีค เอ็กซ์เรย์ต่อแบคกราวน์ เบร์มสตราห์ลั่งก์จะมีค่า เดียวกันหมดสำหรับทุกอนุภาคที่มีความเร็วเดียวกัน ดังนั้น ครบที่เบร์มสตราห์ลั่งก์เป็นส่วนเด่นในแบคกราวน์ อนุภาคหนักทั้งหมดจะมีอัตราส่วนของสัญญาณต่อแบคกราวน์ ( $r/B$ ) เช่นเดียวกันหมด

จะทำการลดค่าเบร์มสตราห์ลั่งก์ได้หรือไม่? คำตอบนี้อาจจะคำนึงถึงลักษณะของ เป้า อาจหมายความว่าให้นางที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (ต้นเหตุของ - เบร์มสตราห์ลั่งก์) หลุดพ้นจากเป้าได้โดยไม่ก่อให้เกิดเบร์มสตราห์ลั่งก์ อย่างไรก็ตาม เป้าชนิดนั้นน่าจะยาก ทั้งยังลำบากในการจัดการทดลองอีกด้วย เนื่องจากมีความประมาก

นอกจากเบร์มสตราห์ลั่งก์แล้ว ยังมีรังสีแคมนา เกิดขึ้นได้ เช่นกัน กล่าวคือ กรณีของอนุภาคตกรอบมีพลังงานสูงพอที่จะกระตุ้นนิวเคลีย (nuclei) ในเป้า ย่อมมีการเปล่งรังสีแคมนา ผลคือ เกิดลักษณะเป็นทางในช่วงพลังงานสูงปรกฏในสเปกตรัม เนื่องจากเกิดการกระเจิงแบคคอมบ์ตันภายในหัววัด ปริมาณของรังสีแคมนานาจักมากหรือน้อย เพียงใดขึ้นกับ (1) ส่วนประกอบของเป้า นิวเคลียบางชนิดอาจมีโอกาสเปล่งรังสีแคมนานาจัก เช่น ฟลูออร์ริน (fluorine) ถูกกระตุ้นโดยไประตอน  $1 \text{ MeV}$  และ (2) การจัดการทดลอง แม้จะมีการบังกันรังสีแคมนานาจัก เป้าไม่ให้ผลกระทบหัววัดโดยตรง แต่อาจเกิดการกระเจิงแบคทิวภาพ (multiple scattering) ซึ่งในที่สุดอาจเคลื่อนเข้าสู่หัววัดได้นั้นเอง

แบคกราวน์เนื่องจากรังสีแคมนานาจักสูง เมื่อ  $Z > 30$  โดยไประตอนมีพลังงาน 3 และ  $5 \text{ MeV}$  ดังนั้น ถ้าต้องการลดแบคกราวน์ตั้งกล่าวนี้ต้องใช้ไประตอนพลังงานต่ำ เท่าที่จะเป็นไปได้ กล่าวคือต้องสามารถก่อรังสีแคมนาที่เป็นแบคกราวน์คิดน้อยที่สุด แต่ก่อให้มีการเปล่งรังสีเอกซ์มากพอสมควร ส่วนอนุภาคอื่นที่หนักกว่าไประตอน เช่น  ${}^4\text{He}$  และ  ${}^{16}\text{O}$

มีความเร็วเท่าไพร่อนแต่จะมีพลังงานสูงกว่า จึงมีโอกาสสร้างรังสีแคมมาได้มากกว่า ดังนั้น ในการทดลองส่วนใหญ่นักใช้ไพร่อนพลังงาน 1-2 MeV

#### 4.4.2 อุบัติเหตุ

พิจารณาสมการที่ (4-4)  $n_{\text{พจน์}} (Z/A - Z_1/A_1)$  มีค่าน้อยที่สุด เป็นไอน้ำที่ไม่หนักเกินไป (แต่นักกว่าไพร่อน) เนื่องจากนิวเคลอันส่วนเกินจะทำให้นิพจน์ตั้งกล้ามีค่าสูงกว่าศูนย์ และในบางกรณีอาจเกิดเบร์สตราทลังก์โดยตรงก็ได้

นอกจากนี้ แมคกราวน์อาจเกิดจากการจัด เติมช่องว่างอิเล็กตรอนในวงไจโร 1 S ขณะเกิดการชนกัน พลังงานของวงไจรอีนกับระยะห่างระหว่างนิวเคลสิก และก้มมันคงพังสีที่เปล่งออกมากจะมีลักษณะต่อเนื่อง จุดปลายพลังงาน (end-point) อาจคาดคะเนได้จากพลังงานยึด เมนี่ยวยของวงไจโร 1 S ซึ่งเป็นต่อพลังงานของอุบัติเหตุที่ใช้ เป็นตัวกระตุ้นนั้นเอง

ไอน้ำหนักยังสามารถสร้างรังสีแคมมา ผลต่อไปคือ เกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันอย่างต่อเนื่อง และยกยับที่กิโลวัตต์ต่อวัตต์ จากต่อนที่แล้วได้กล่าวว่าไอน้ำหนักมีพลังงานสูงกว่าไพร่อนนั้น หมายถึงมีพื้นที่ภาคตัดขวางในการเปล่งรังสีแคมมาสูงกว่าไพร่อนที่มีความเร็วเดียวกัน คุณสมบัตินี้จัดเป็นข้อเสีย เปรียบอย่างมาก ผลที่เกิดคืออาจลดเกน (gain) เนื่องจากนิพจน์  $Z^2$  ซึ่งปรากฏในความสัมพันธ์พื้นที่ภาคตัดขวางในการผลิตแคนแรค เทอร์สติก เอ็กซ์เรย์

#### 4.5 ความไว (Sensitivity)

เป็นที่ทราบทั่วไปแล้วว่าได้เปรียบของเทคนิค PIXE คือความไวสูง สิ่งที่น่าศึกษาคือรายละเอียด เกี่ยวกับความไวที่เราจะคาดคะเนได้ และความไวนี้จะเป็นต่อพารามิเตอร์ของการทดลองอย่างไร? ซึ่ง “ความไว” ในที่นี้หมายถึงความไวในการวิเคราะห์

สารตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นหรือชนโดยผลงานกับมันด้วยรังสีบริมาณหนึ่ง และเกิดการเปล่งเอ็งซ์เรย์คามนา

วิธีการ เครื่ยมสารตัวอย่าง มีผลต่อการปุ่งแต่งค่าความไวของการวิเคราะห์ เช่น ให้การเพาล์ตัวอย่างอินทรีย์ที่ เป็นชีล์เต้า เม็นตัน ความไวที่คาดคะ เวลาจะเป็นค่าจากสารตัวอย่างแรกเริ่ม (ก่อนผ่านขั้นตอนของการ เครื่ยม) จะสูงกว่าที่คาดคะ ณ เมื่อได้ผ่านวิธีการ เครื่ยมแล้ว

จุดประสงค์หลักของ เทคนิคนี้คือ ต้องการทราบดู เธรรบิมาณน้อยๆที่มีปะปนอยู่ใน เมทริกซ์ ดังนั้น อาจนิยามได้ว่า ความไวคือความ เย็บชันต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้ อายุ่งไรก์ตาม การก่อเหตุค่าจ่าก็ความอาจมีได้อีกหลายแบบ ที่กล่าวถึง ณ ที่นี่ เป็นเพียงความหมายนึงเท่านั้น ขั้นต่อไปคือหาลำดับ (order) ของความไว ผู้วิเคราะห์อาจจะคำนวณความไว สัมบูรณ์ของแต่ละธาตุได้ โดยทราบน้ำหนักของส่วนตั้งกล่าวที่มีอยู่ในสารตัวอย่างที่ถูกฉายด้วยลำบูนภาค

ถ้าสามารถคำนวณบริมาณสัญญาณ เอ็งซ์เรย์ที่ถูกบันทึกในหัววัดเชิงก้อน ตามการวัด จิโอเมทรี (geometry) มาก ดี ซึ่ง เอ็งซ์เรย์นี้ เกิดจากธาตุ เธรรบิมาณน้อยๆถูกอบด้วย- ไปรเดอน (ผลงานอยู่ในช่วง MeV) จะพบว่าสามารถทำภารบันทึกบริมาณตั้งกล่าวได้แม้ว่า ธาตุ เดียวจะมีปะปนอยู่ เพียง เล็กน้อยก็ตาม เช่น ลำดับ  $10^{-16}$  กรัม ธาตุ เธรรสน์อาจอยู่ ใน เมทริกซ์ อาจเป็นเนื้อเยื่อชีวภาพ หรือในทางๆของภารบัน (ทรีอฟลาสติก) ที่ใช้เป็นพื้นที่ฝึกชิบและช่อง.

อย่างไรก็ตาม ในตอน 4.4 ได้กล่าวถึงแบบกราวน์ที่หลัก เสียงไม่ได้ไปแล้ว เช่น แบบกราวน์ที่เกิด เมื่ออนุภาคตอกกระแทกได้ชนกับอะตอมของ เมทริกซ์ แบบกราวน์ที่ตั้งกล่าว จะเป็นตัวบ่งชี้ค่าจ่าก็ของความไว และเพื่อให้ภารบันทึกกับมันด้วยรังสีบริมาณที่ต้องดูแล ที่คือของแคแรค เทอเรสติก เอ็งซ์เรย์จะต้องมีขนาดสูงกว่าแบบกราวน์อย่างน้อย 10 เท่า จำนวนสัญญาณในพีค  $N_p$  จะต้อง เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$N_p > 3\sqrt{N_B} \quad (4-6)$$

โดย  $N_B$  เป็นจำนวนสัญญาณภายใต้พื้นของแมคกราวน์ด ซึ่งมีช่วงความกว้างเท่ากับ fwhm  
(full width at half maximum)

เนื่องจากแมคกราวน์ดขึ้นกับส่วนประกอบของ เมทริกซ์ จึงไม่สามารถ เขียนความ  
ไวในรูปหัวไปทางคณิตศาสตร์ได้ และการทดลองส่วนใหญ่จะ เป็น เมทริกซ์ซึ่งประกอบด้วย -  
การบันทึกอินทิเกรต ถ้าเป็นสารอินทิเกรตอาจอนุโลมหาค่าแมคกราวน์ดโดยคาดคะเนจาก  
การฟิการ์บอนได้ ในรูป 4.4 ให้แสดงแมคกราวน์ดของไปร่อง 1.5 MeV บัญหาคือ จะ  
คำนวณรัฐมนตรีและสอดคล้องกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4-6) ได้อย่างไร คำตอน  
ศือต้องทราบค่าพื้นที่ภาคตัดขวางในการผสัตย์เอ็กซ์เรย์ (ตอนที่ 4.3.1) และการคำนวณดัง-  
กล่าวนี้นั้นอยู่กับข้อกำหนดในการทดลอง พารามิเตอร์ต่างๆที่จะกล่าวต่อไปนี้มีผลอย่างมากต่อ  
ค่าความไว

- (1)  $\Omega$  มุมไซลิด (solid angle) ของพื้นที่
- (2)  $\Delta E$  เรโซลูชัน (resolution) ของพื้นที่
- (3)  $j$  ประดิษฐ์สูญเสีย เก็บ
- (4)  $t$  ความหนาของเม็ด

$$\text{ส.เกลความไว} = \Delta E^{\frac{1}{2}} (\Omega j t)^{-\frac{1}{2}} \quad (4-7)$$

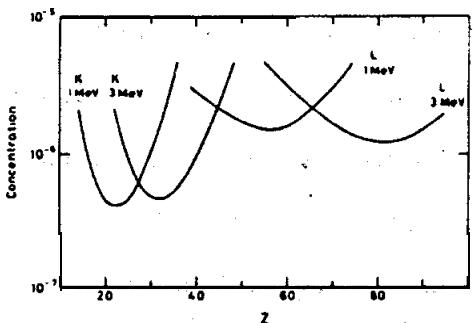
ในงานวิเคราะห์ที่ว่าในมักมีค่าดังนี้ :

$$\Delta E = 165 \text{ eV}, \quad j = 10 \mu\text{C}$$

$$\Omega = 0.003 \times 411, \quad t = 0.1 \text{ mg/cm}^2$$

ความเข้มข้นค่าสูตรที่ควรระวังได้ซึ่งหากำเพร้ามพารามิเตอร์ตั้งกล่าว แสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็น

พังค์ชันของลำดับอะตอม (atomic number) เส้นกราฟแต่ละเส้นสมมัยกับพลังงานของโปรตอน และปัจจัยต่อไปนี้ ความไวสูงสุด พวกธาตุเบาจะมีความไวลดลง เมื่อจากยีลด์ของฟลูออร์เรสเซนต์ เอ็กซ์มีค่าลดลงอย่างมาก พวกธาตุหนักมีความไวลดลง เช่นกัน ขึ้นกับพื้นที่ภาคตัดขวางใน



รูป 4.6 ความเข้มข้นตัวสูตรที่สามารถตรวจวัดได้ พล็อตร่วมกับลำดับอะตอม โดยใช้โปรตอน พลังงาน 1 และ 3 MeV ชนเม็ดหนา 0.1 มิลลิกรัม ต่อ ตร.ซม.

การผลิตเอ็กซ์เรย์ของแต่ละธาตุ นอกจ้านี้ กล่าวได้ว่าความไวขึ้นกับพลังงานของโปรตอน ต่ำกว่าหนึ่ง ถ้าในการทดลองหนึ่งมีการกำหนดชีดจำากตที่แน่นอน ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกใช้พลังงานโปรตอนเพื่อให้ได้ความไวสูงสุดในการวิเคราะห์ธาตุ เช่น ธาตุหนึ่งได้ ความไวสูงสุดจะปรากฏในช่วง  $Z \sim 20-30$  ซึ่งก็เป็นช่วงที่สนใจทำการวิเคราะห์ในห้องทดลอง ส่วนใหญ่อยู่แล้ว และพลังงานของโปรตอนที่เหมาะสมที่สุดมีค่า  $1-2 \text{ MeV}$

สำหรับธาตุที่หนักกว่า คือ  $Z > 40$  เอ็กซ์เรย์อนุกรม K จะมีความเข้มต่ำมาก จึงใช้ออนุกรม L แทน โดยที่ไว้ ความเข้มข้นที่ตรวจวัดโดยวิธีการ PIXE มีค่าประมาณ  $10^{-6}$

ข้อบ่งชี้ของการเปลี่ยนเอ็กซ์เรย์ K และ L ในเวลาเดียวกัน และเข้าสู่หัววัดทั้งสองพลังงาน เช่น พีค  $L_{\beta}$  ของแคนดี้เมียม (cadmium) มีพลังงาน 3.317 eV จะซ้อนกับ

$K_{\alpha}$  ของโพแทสเซียม (potassium) มีพลังงาน 3.314 eV การวิเคราะห์กรณีดังกล่าวมีรายละเอียดในบทต่อไป บัญหาอื่นๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ธาตุเบาๆ ซึ่งจะเปลี่ยงรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานต่ำ ถ้าใช้หัววัดซีสิกอนอาจวัดธาตุเบาๆ ได้ถึงซัลเฟอร์ (sulphur) หรืออลูминيوم (aluminium)

ถ้าใช้อุปกรณ์แอลฟ่าหรืออุปกรณ์หนักอื่นๆ อาจคำนวณหาความไวโดยใช้วิธีเดียวกับโปรดอน กล่าวคือ วัดเม็ดกราวน์ดของ เมทริกซ์ จากนั้นคำนวณความไวโดยทราบค่าพื้นที่ภาคตัดขวางในการผลิต เอ็กซ์เรย์ รูป 4.7 ได้จากผลการทดลองของฟอล์คแมน (Folkman) และค่าใช้อุปกรณ์ (โปรดอน แอลฟ่า และไอโอดินหนักอื่นๆ) มีพลังงาน 3 MeV/amu พวกธาตุเบาๆ จะมีความไวเดียวกันหมดไม่ว่าจะใช้อุปกรณ์อะไร เมื่อจากในบริเวณนี้แบ่งคราวน์เด่น เกิดจากเบรนสตราทลิงก์ ตั้งอธิบายแล้วในตอน 4.4.1 อัตราส่วนของขบวนการเกิดเอ็กซ์เรย์ต่อการเกิดเบรนสตราทลิงก์นั้นไม่ซึ้งกับการเลือกใช้อุปกรณ์ใด เป็นตัวกระตุ้น สำหรับธาตุหนักกว่ากรัมมีขึ้นไป ใช้พากอุปกรณ์หนัก เป็นตัวกระตุ้นจะได้ผลต่ำกว่า เมื่อจากในมีการผลิตเบรนสตราทลิงก์โดยตรง (รายละเอียดกล่าวแล้วในตอน 4.4.2)

ส่วนความไวสัมบูรณ์ คำนวณได้จากความเข้มข้นของธาตุ ถ้าทราบปริมาณสารตัวอย่างที่ลำบากเคลื่อนผ่าน ซึ่งแน่นอนว่าสถานะในการวิเคราะห์ย่อมแตกต่างไปสำหรับแต่ละธาตุ ตัวอย่างเช่น ต้องการศึกษาลักษณะในอากาศ (air pollution studies) มากที่โดยเก็บตัวอย่างบนแม่คัพกิง์หนาและขนาดใหญ่พอสมควร (หนาประมาณ  $10^{-4}$  กรัม/ซม.<sup>2</sup>, พื้นที่ 1 ซม.<sup>2</sup>) ความหนาแน่นต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้คือ  $10^{-6}$  สมนัยกับปริมาณ  $10^{-10}$  กรัม ถ้าต้องการวิเคราะห์ธาตุโดยความที่มีปริมาณน้อยๆ อาจเตรียมสารตัวอย่างชนิดบางประมาณ  $2 \times 10^{-5}$  ซม. และใช้ลำบากมีขนาดพื้นที่ตัดขาวง 1 มม.<sup>2</sup> ความหนาแน่นต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้คือ  $10^{-7}$  จะสมนัยกับ  $2 \times 10^{-14}$  กรัม ถ้าต้องการให้ระบบมีความไวสูงกว่าค่าที่กล่าวมาแล้ว อาจทำได้โดยใช้เทคนิคในไครโพรบ (microprobe technique) ซึ่งลำบากจะต้องยกน้ำหนักตัวอย่างด้วยคิลลิเมเตอร์ (collimator) และทำการศึกษาโดยสร้างละ เอียงของตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการสแกน (scanning technique)

โดยทั่วไป ใช้ล่าอนุภาคมีเล่นผ่านยานย์กลางประมาณ  $5 \times 10^{-4}$  ซม. ถ้าเม็ดหนา  $2 \times 10^{-5}$  ซม. และมีความเร็วขัน  $10^{-5}$  ค่าที่สมนัยกันคือ  $5 \times 10^{-17}$  กรัม

ค่าความไวที่กล่าวถึงแล้วนี้ ไม่รวมถึงข้อบ่งชี้และบัญหาต่างๆในการทดลองอย่างไรก็ตาม น่าจะสรุปจากข้อมูลได้ว่า PIXE เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ธาตุปริมาณ้อยๆ ได้เป็นอย่างดี ดัวอย่างของบัญหาที่อาจมีขึ้นในการทดลอง เช่น ในระหว่าง เตรียมสารตัวอย่างอาจมีสารเจือ (หมายถึงสารอื่นๆ ที่ไม่ต้องการให้มีอยู่ในสารตัวอย่าง) เพื่อปะปนอยู่ ผลคืออาจมีการบังเพิคของธาตุที่เราต้องการวิเคราะห์ได้ บัญหาหลักมักเกิดจากแบบคัทติ้ง เช่น การวิเคราะห์แอลูมิโนซิลิกา เป็นต้น นอกจากนี้สารเจืออาจเกิดขยะที่ทำกิจกรรมสารตัวอย่างก็ได้ อนุภาคเดียวของฝุ่นผง (dust) ขนาดกลาง ( $1 \mu\text{m}$ ) จะมีน้ำหนักประมาณ  $10^{-12}$  กรัม ถ้าเปรียบเทียบปริมาณนี้กับค่าที่กล่าวข้างต้นในย่อหน้าที่แล้วจะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการให้ความไวในการวิเคราะห์มีค่าสูง จำต้องเพิ่มความระมัดระวังอย่างสูง เช่นกัน

#### 4.6 ปริมาณวิเคราะห์ (quantitative analysis)

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PIXE ศึกษาเบื้องต้น เรียกว่า วัดถุประสงค์ ของผู้ทำการวิเคราะห์คือต้องการทราบปริมาณของธาตุที่มีประบันกันอย่างถูกต้องในสารตัวอย่าง ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณคือ

$$dN = A(s)n(s)\sigma\omega T_e dS \quad (4-8)$$

โดย  $dN$  = จำนวนค่านับวัดที่ได้

$A(s)$  = จำนวนอะตอมในธาตุ ซึ่งมีหน่วยเป็น  $\text{dS}$  ในสารตัวอย่าง

$n(s)$  = จำนวนโปรตอนทั้งหมดในพื้นที่ 1 ตร.ซม. ซึ่งเคลื่อนผ่าน  $dS$

$\sigma$  = พื้นที่ภาคตัดขวางของการแทกตัวภายในวงโคจรที่สมนัยกัน

$\omega$  = อัลตร้าฟลูออร์เรสเซนส์

- $k$  = ความเข้มสัมพัทธ์ของ เส้นเอ็กซ์ เรียชีงได้จากการจัดตัวใหม่ของอิเล็กตรอน  
 $\Omega$  = มุมโซลิเดที่หัววัดรองรับอยู่  
 $\epsilon$  = ประสิทธิภาพ  
 $T$  = การทะลุผ่านหน้าต่างของหัววัด

ถ้าต้องการค่าผันวัดทั้งหมด ต้องอินทิเกรต (integrate) สมการที่ (4-8) ให้ทั่วบริเวณสารตัวอย่างทั้งหมด ซึ่ง  $A$  และ  $n$  ต่างเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง  $s$  ผลลัพธ์

$$N = \sigma \omega k \Omega T \epsilon \int_S A(s) n(s) dS \quad (4-9)$$

เพื่อสะดวกในการหาค่าตอบของลักษณะ (4-9) ตั้งเงื่อนไขให้  $n$  เป็นอิสระต่อ  $s$  กายในลักษณะ และถ้าอกลักษณ์  $n = 0$  ดังนี้

$$N = n \sigma \omega k \Omega T \epsilon \int A(s) dS = A n \sigma \omega k \Omega T \epsilon \quad (4-10)$$

โดย  $A =$  จำนวนอะตอมทั้งหมดของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ในตัวอย่าง และวิธีการตั้งกล่าวนี้ เป็นกรณีเมื่อลักษณะมีความหนาแน่นกระจายแบบสี่เหลี่ยมจตุรัส (สี่เหลี่ยมจตุรัส) (ลักษณะคล้ายกล่อง)

รายละเอียดของค่าตัวแปรในสมการ (4-10) ดังนี้

- (1)  $N$  เป็นค่าผันวัดในพีค อาจคำนวณแต่ละพีคโดยหัก เทเบคกราวน์ท์หรือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะจัดข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานโดยใช้ เก้า เชียน (Gaussian) ที่มีทางกราฟแบบ เอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential) กับแต่ละพีค แต่ถ้า เป็นแบบกราวน์ท์ จะใช้โพลีโนเมียล (polynomial)
- (2)  $n$  เป็นหลักซ์โปรดอน หาค่าโดยจัด เก็บลักษณะในลักษณะเดียวกัน
- (3)  $\sigma$ ,  $\omega$  และ  $k$  ได้อธิบายการหาค่าแล้วในตอน 4.3.1.
- (4)  $\Omega$  มุมโซลิเดที่รองรับโดยหัววัด หาค่าจากจีโอดิทริกของการจัดอุปกรณ์การทดลอง บางกรณีไม่ทราบขนาดหัววัดแน่นอน หรืออาจยากในการกำหนดค่า เมื่อจากปรากฏ

บริเวณเป็นวงร้อนหัววัด ซึ่งบริเวณนี้หัววัดไม่สามารถทำการนับวัตถุอย่างใดๆ อาจเรียกว่า เป็นบริเวณที่หัววัดตาย (dead layer) คือ ดังนั้น จึงเสนอให้นิยามบุนไชลิตโดยใช้คลาส เมตร์ที่อยู่ด้านหน้า (แบบสันทิ) หัววัด

(5) ε ประสมิทิภานของหัววัด อาจได้จากข้อมูลของบริษัทผู้ผลิต แต่บางครั้งมีข้อมูลเหล่านี้อาจไม่ถูกต้องพอเพียง แก้ไขโดยทำการเทียบวัด (calibrate) ใหม่ โดยใช้สูตร

$$\epsilon = \frac{\text{cpm}}{\text{dpm}} \quad (4-11)$$

โดย cpm เป็นค่าผับวัตต์ต่อนาที

dpm เป็นอัตราการสลายตัวต่อนาที

ในการนี้ต้องใช้ตันก้า เนิดกันบันดุงารังสีที่ทราบความแรง มักหาดีอิมีตันก้า เนิดให้มีลังงานต่ำกว่า 6 keV กรณีอาจใช้สมการ (4-10) คำนวณข้อมูลที่ได้จากการยิง เป้าที่เป็นแผ่นบางๆ ชั้นทราบความหนา

(6) T ปริมาณที่จะอุ่นหัววัด ลำดับการนับวัด เอ็กซ์เรย์คือ เริ่มต้นจากหัวอุ่น กมาจากบรินสารตัวอย่าง เข้าสู่หน้าค้างหัววัดและผ่านศูนย์ดักกลืน (absorber) โดยทั่วไปจะมีปัญหาจากการดักกลืนภายในสารตัวอย่าง แม้จะเป็นชนิดบางมากก็ตาม เช่น ขนาด 1 มิลลิเมตร ต่อตารางเซนติเมตร ถ้าธาตุมีค่า Z ต่ำ จะเปล่งรังสีเอ็กซ์ฟลังงานน้อยๆ เนื่องจาก อุ่นดักทอนทำไปมากพอสมควร ถ้าเป็นตัวอย่างชนิดหนา การดักกลืนเอ็กซ์เรย์จะ เป็นปัญหาใหญ่ เช่นเดียวกับกรณีสารตัวอย่างมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียว กัน (inhomogenieties) ในกระบวนการนี้ ก็มีปัญหาโดยก้านด ค คงที่ แต่ถ้าเป็นตัวอย่างหนานากๆ หัวก้านหนดนี้ใช้ไม่ได้ เนื่องจากว่า อนุภาคตกระบบทุกทำให้เคลื่อนที่ช้าลง สิ่งสำคัญคือ ด ชั้นกันฟลังงานของอนุภาค

ดังได้กล่าวข้างต้น แสดงว่าสมการ (4-8) มีความพร้อมที่ทราบค่าแล้วทั้งหมด ยกเว้น A หรือ N ซึ่งอาจทราบเพียงค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น (หรืออาจหาค่าโดยทางคดลอง) ดังนั้น

PIXE จึงจัด เป็น เทคนิคที่สมบูรณ์ ข้อยุ่งยากหรือปัญหาอาจมีบ้าง สำหรับกรณีสารตัวอย่างมีความหนา มีลักษณะไม่ลับม่าน เช่นอ. เป็นเนื้อเดียวกัน ต้องมีสัมประสิทธิ์ เป็นตัวแปรความคลาด เกลื่อนต่างๆ รึซึ่งก็ไขวเซ็นที่นิยมก็คือ เติมสารมาตรฐาน ( เป็นสารเคมี ) ที่ทราบปริมาณความ เชื้อมขันแน่นอน ลงในสารตัวอย่าง เทคนิคนี้คือ internal standard

#### 4.7 บทสรุป

จากการศึกษาทฤษฎี เกี่ยวกับ PIXE เห็นได้ว่า มีหลักการ เช่น เดียว กับ XRF ต่างกันที่ความยุ่งยากในการ เตรียมสารตัวอย่างชนิดบาง ส่วนของบลหรือส เม็ดตราที่ปราศภูมิ ถ้าไม่มีการซ่อนพิกพลังงานของธาตุต้องก่อความที่ต้องการวิเคราะห์ ย้อมไม่เกิดปัญหาใดๆ ปัจจุบัน มีกันยมใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ข้อมูล

คุณสมบัติ เด่นคือมีความไวในการวิเคราะห์สูง ชั่งผลอยได้ต่อทุนเวลา และ ประหยัดค่าใช้จ่าย

ในการพิจารณา เกี่ยวกับการผลิตรังสีเอ็กซ์ ต้องแยก เป็น 2 กรณีคือ

- (1) โปรดอนและอนุภาคแหล่งฟ้า
- (2) อนุภาคหนักอื่นๆ

ซึ่งโดยทั่วไป งานวิเคราะห์วัสดุเป็นกรณีแรก และการคาดคะเนโอกาสในการ เพล่งรังสี เอ็กซ์ ให้ใช้วิธีการของ โจแยนสันและคณะ ซึ่งใช้โปรดอนยิงชนเม้าชนิดบาง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้ยัง เป็นประโยชน์กว้างขวางในการคาดคะเนโอกาสที่จะ เกิดรังสีเอ็กซ์ในกรณีใช้ อนุภาคแหล่งฟ้า หรือไออกอนอื่นที่มีความเร็วเท่ากัน แต่ความถูกต้องอาจลดลง 20-30%

#### แบบฝึกหัดบทที่ 4

1. คำว่า “ฟื้นฟูกาศักดิ์ขาวง” ใน การแตกตัวของอะตอมนั้น มีความหมายอย่างไร? หน่วยที่ใช้คืออะไร?
2. การที่สารตัวอย่างมีรูปร่าง เป็นปริมาตรย่อม เกิดสภาพ “เมทริกซ์” สักษะดังกล่าวจะส่งผลดีหรือผลเสียในการใช้เทคนิค PIXE วิเคราะห์สารตัวอย่างดังกล่าว
3. เทคโนโลยีในห้องปฏิบัติการ PIXE จึงนิยมใช้ไปรดอนพลังงาน 1–2 MeV ?
4. “ความไว” ใน การวิเคราะห์ หมายถึงอะไร? อธิบายความสัมพันธ์ของความไวในการวิเคราะห์กับพลังงานไปรดอน ชี้งใช้ในเทคนิค PIXE
5. จากสมการ (4-7) วิจารณ์ถึงตัวประกอบต่างๆแต่ละค่าจะส่งผลต่อสเกลความไวอย่างไรบ้าง?
6. เทคโนโลยีจึงนิยมใช้ เม้าส์สักษะบางในเทคนิค PIXE ?
7. แมคกราวน์ล่าหรับ เทคนิค PIXE ควรสัมพันธ์หรือ เกี่ยวเนื่องกับปริมาณใดบ้าง?