

การดูดกลืนรังสีเอกซ์

(ABSORPTION OF X-RAYS)

2.1 Mass Absorption Coefficient

เมื่อรังสีเอกซ์ถูกกั้นโดยวัตถุ เช่น แผ่นกั้น (absorber) บางส่วนของรังสีเอกซ์ จะผ่านไปได้ แต่บางส่วนจะถูกดูดกลืนหายไป จากการทดลองแสดงว่า การดูดกลืนรังสีเอกซ์นั้น เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu t}$$

- เมื่อ I = ความเข้มรังสีที่ผ่านไปได้
 I_0 = ความเข้มรังสีที่ตกกระทบ
 μ = mass absorption coefficient
 t = ความหนาของแผ่นกั้น (กรัม/ตร.ซม.)

ในกรณีของการเรืองรังสีเอกซ์นั้น ไม่เพียงแต่ exciting radiation เท่านั้นที่ถูกดูดกลืน excited radiation ที่เกิดขึ้นก็ถูกดูดกลืนด้วย และเนื่องจากพลังงานของรังสีเอกซ์ทั้งสองนี้ไม่เท่ากัน ดังนั้น mass absorption coefficient จึงต่างกันไปด้วย

ในขณะที่เกี่ยวกับการคิดตั้งเครื่องมีอิวิเคราะห์ที่อาจทำได้ 2 วิธีคือ "Transmission Geometry" และ "Reflection Geometry" ดังนั้นการดูดกลืนรังสีเอกซ์จึงแตกต่างกันดังนี้

ก. ในกรณี "Transmission Geometry" เป็นไปตามความสัมพันธ์
 ดังนี้

$$I_t = K (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})$$

ข. ในกรณี "Reflection Geometry" เป็นไปตามความสัมพันธ์
ดังนี้

$$I_r = K (1 - e^{-(\mu_1 + \mu_2)t})$$

เมื่อ I_t เป็นความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านไปได้เมื่อใช้ "transmission geometry"

I_r เป็นความเข้มรังสีเอกซ์ที่ผ่านไม่ได้เมื่อใช้ "reflection geometry"

μ_1 mass absorption coefficient ของ exciting radiation

μ_2 mass absorption coefficient ของ excited radiation

t ความหนาของสารตัวอย่าง (กรัม/ตร.ซม.)

K เป็นค่าคงที่ = $\frac{I_c \mu_1}{\mu_2 - \mu_1}$, I_c เป็นความเข้มที่ลดกระทันหัน

2.2 Absorption Edges ของรังสีเอกซ์

อย่างไรก็ตาม ค่า mass absorption coefficient ของแก๊สนั้น แต่ละชนิดก็ทำได้เปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอไปตามขนาดความยาวคลื่นไม่ แต่จะมีลักษณะไม่ต่อเนื่องเป็นตอน ๆ ไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ และขนาดอะตอมซึ่งก็คือชนิดของธาตุที่ใจทำแก๊สหรือสารตัวอย่างนั้นนั่นเอง

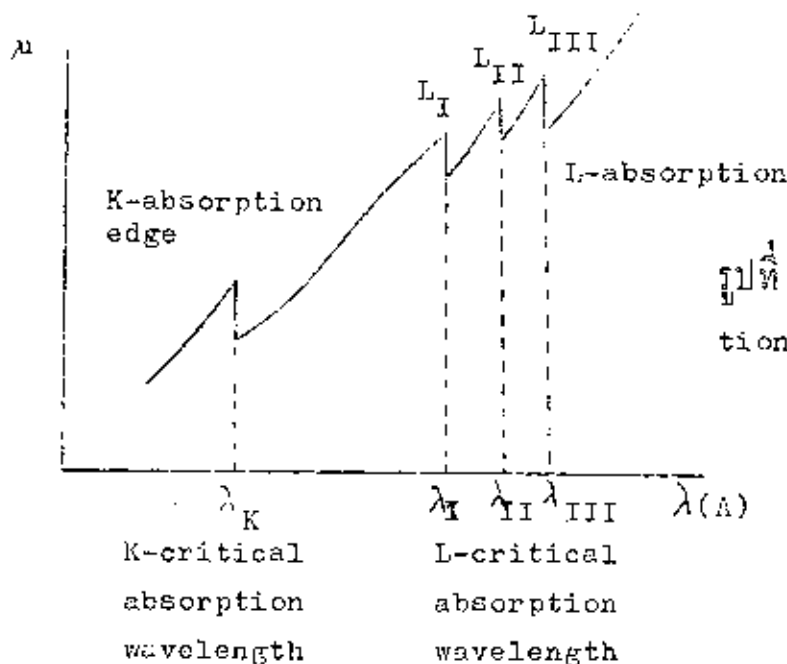
ตามรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง mass absorption coefficient กับความยาวคลื่นรังสีเอกซ์เป็นเส้นไม่เรียบ แต่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องไปเป็นระยะ ๆ เมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น เช่นที่ความยาวคลื่น λ_{K_1} , λ_{K_2} หรือ λ_m จะพบว่า ค่า mass absorption coefficient จะเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันในทันทีทันใด แม้ว่าความยาวคลื่นจะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ภาวะนี้เรียก absorption edge, หรือ absorption limit ของรังสีเอกซ์

ซึ่งเขียนไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu = k \lambda^3 z^3$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่ของเส้นกราฟแต่ละตอน

z เป็นอะตอมมิคัมเบอร์ของสารตัวอย่างที่เป็นเป้า



รูปที่ ๒ แสดง absorption edge ของรังสีเอกซ์

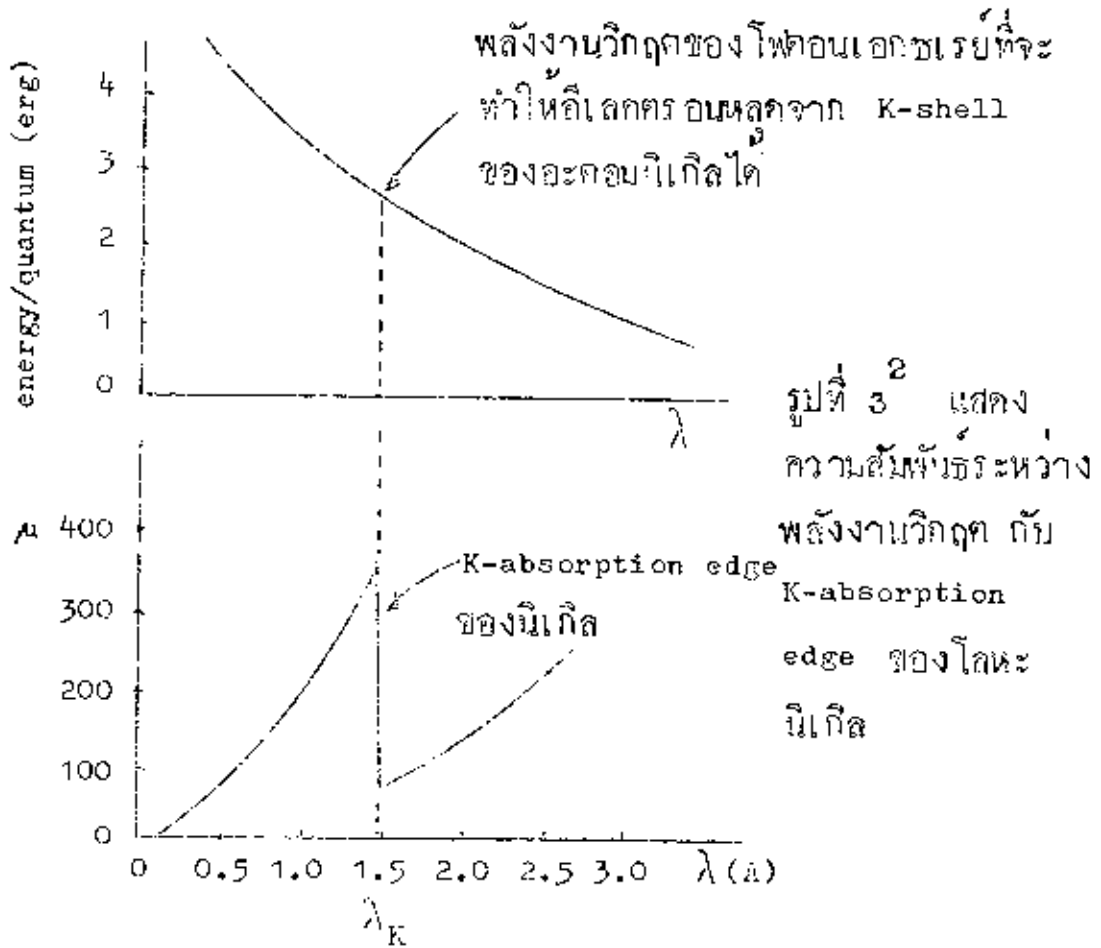
จากรูปที่ ๒ สมมติว่า รังสีเอกซ์ขนาดความยาวคลื่นต่าง ๆ กันตกกระทบแผ่นนี้เกิดแล้วคำนวณหาค่า mass absorption coefficient ที่ความยาวคลื่นเหล่านั้น เช่นที่ความยาวคลื่น ๒.๕ อังสตรอม แล้วลดความยาวคลื่นลงไปเรื่อย ๆ ซึ่งหมายความว่าพลังงานของโฟตอนเอกซเรย์สูงขึ้น

¹B.D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction,

Massachusetts, : Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1956,

p. 11.

ตามกราฟเส้นบน เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นจะทำให้ absorption coefficient ลดลง เมื่อความยาวคลื่นลดลงจนสูงกว่าค่าวิกฤตค่าหนึ่งเพียงเล็กน้อย จะปรากฏว่า absorption coefficient จะเพิ่มขึ้นโดยทันทีทันใด เกิด sharp discontinuity ขึ้น การไม่ต่อเนื่องนี้เรียกว่า K-absorption edge (λ_K) เช่น K-absorption edge ของนิกเกิล = 1.488 อังสตรอม พอมาถึงระยะนี้ จะเกิดการดูดกลืนอย่างแท้จริงขึ้น จะพบว่าโพตอนเอกซเรย์ถูกดูดกลืนหายไปหมด พลังงานนี้จะเป็นการเร่งรังสีเกือบหมด กลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากอะตอม



²Ibid.

เมื่อความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ลดลงก็ไปอีกจนต่ำกว่าค่าวิกฤต (λ_K) แล้ว ค่า absorption coefficient ก็จะมีผลลดลงอีกครั้งหนึ่ง แม้ว่า K-X-ray fluorescence และ โฟโตอิเล็กตรอนจะยังคงเกิดขึ้นอยู่เรื่อยๆ ก็ตาม เช่นที่ $\lambda = 1.0$ อังสตรอม เอกซ์เรย์มีพลังงานมากกว่าพลังงานที่จะใช้ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจาก K-shell เสียอีก แต่ถึง โฟตอนมีพลังงานสูงขึ้น มันก็ยิ่งทะลุทะลวงผ่านกันหรือสารตัวอย่างได้มากขึ้นตามไปด้วย

ถ้าหากกราฟเส้นกลางถูกลากต่อไปทางขวามือที่ความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 อังสตรอม ก็จะมี sharp discontinuity ใหม่อีก ตำแหน่งเหล่านี้คือ L-absorption edge หรือ M-absorption edge เป็นต้น ความจริงแล้ว มี L_I, L_{II}, L_{III} และมี M-absorption edge 5 เส้น เช่นเดียวกับที่ K-line มีหลายเส้นเช่นเดียวกัน แต่ละ absorption edge หมายความว่า incident beam ของรังสีเอกซ์มีพลังงานพอที่จะทำให้ L, M, N-electron หลุดออกจากอะตอมได้นั่นเอง

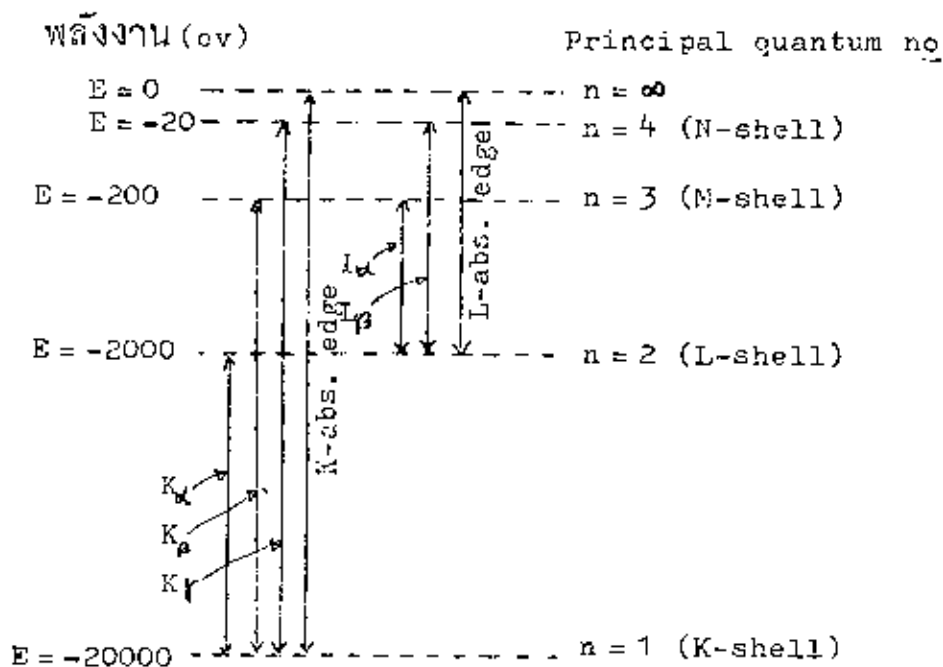
จะเห็นว่า ซีกขวาของกราฟนั้นอยู่ระหว่าง K- กับ L-absorption edge ช่วงนี้เป็นช่วงที่รังสีเอกซ์มีพลังงานพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนใน L, M, หรือ N-shell หลุดออกจากอะตอมของโลหะนี้เกิดได้ แต่ไม่มีพลังงานพอที่จะ "กระแทก" อิเล็กตรอน จาก K-shell ให้นำหลุดไปได้

เราอาจเขียนโคออร์ดิเนตแสดงชั้นพลังงาน (energy level) ของการเกิดรังสีเอกซ์ และ absorption edge (ดังรูปที่ 6)

อิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนถูกยึดโดยนิวเคลียสที่มีประจุเพียง $+e$ แต่ธาตุหนัก ๆ นิวเคลียสมีประจุถึง Ze ผลแตกต่างของ nuclear charge นี้เองที่ทำให้ energy level ของแต่ละธาตุต่างกันมากมาย

เช่นที่ $n = 1$ (K-shell) ไฮโดรเจนอะตอมมีพลังงานเพียง -13.6 ev

รูปที่ 4³ เป็นโคออร์เนตของธาตุที่มี $Z \approx 40$.



แต่ธาตุหนัก ๆ เช่น $Z \approx 40$, $n = 1$ level มีพลังงานถึง $-20,000$ ev. เป็นต้น ในการพูดถึงรังสีเอกซ์ เรามักจะไม่พูดถึงชั้นพลังงานจาก $n = 4$ (N-shell) ขึ้นไปจนถึง $n = \infty$ คือที่ระดับอิเล็กตรอนอิสระ เพราะที่ $n = 4$ พลังงานจะอยู่ในแถบ ultraviolet region และที่ระดับพลังงานนี้สเปกตรัมของรังสีเอกซ์จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน.

³Russell M. Wehr, and James A. Richards, Jr.

2.3 ตารางแสดง X-ray Absorption Edges and Emission Energies

ตารางที่ 2^{4,5} แสดง K-absorption edges และ K_α X-rays ของธาตุต่าง ๆ เป็น keV และอังสตรอม.

Z	Element	K-absorption edge		K _α - Emission	
		KeV	Å ^o	KeV	Å ^o
1	Hydrogen	0.0136			
2	Helium	0.0246			
3	Lithium	0.055		0.052	
4	Beryllium	0.116		0.110	
5	Boron	0.192		0.185	
6	Carbon	0.283		0.282	
7	Nitrogen	0.399		0.392	
8	Oxygen	0.531		0.523	
9	Fluorine	0.681		0.677	
10	Neon	0.874		0.851	
11	Sodium	1.080		1.041	11.909
12	Magnesium	1.303	9.5117	1.254	9.889
13	Aluminium	1.559	7.9511	1.487	8.337
14	Silicon	1.838	6.7446	1.740	7.125
15	Phosphorus	2.142	5.7866	2.015	6.155

⁴Nucleonics, Vol. 13 No. 3 p. 36.

⁵H.A. Liebhafsky, et. al. X-ray Absorption and Emission in Analytical Chemistry, New York; John Wiley & Sons, Inc., p.p. 307 - 308, 311.

Z	Element	K-absorption Edge		K _α -Emission	
		Kev	Å ^o	Kev	Å ^o
16	Sulphur	2.470	5.0182	2.308	5.372
17	Chlorine	2.819	4.3969	2.622	4.728
18	Argon	3.203	3.8707	2.957	4.192
19	Potassium	3.607	3.4365	3.313	3.741
20	Calcium	4.038	3.0702	3.691	3.358
21	Scandium	4.496	2.7573	4.090	3.031
22	Titanium	4.964	2.4937	4.510	2.748
23	Vanadium	5.463	2.2690	4.952	2.503
24	Chromium	5.987	2.0701	5.414	2.290
25	Manganese	6.535	1.8964	5.898	2.102
26	Iron	7.109	1.7433	6.403	1.936
27	Cobolt	7.707	1.6081	6.930	1.789
28	Nickel	8.392	1.4880	7.477	1.658
29	Copper	8.978	1.3804	8.047	1.541
30	Zinc	9.657	1.2833	8.638	1.435
31	Gallium	10.365	1.1957	9.251	1.340
32	Germanium	11.100	1.1165	9.885	1.254
33	Arsenic	11.860	1.0450	10.453	1.176
34	Selenium	12.649	0.9798	11.221	1.105
35	Bromine	13.471	0.9200	11.923	1.040
36	Krypton	14.319	0.8655	12.648	0.980
37	Rubidium	15.197	0.8155	13.184	0.926

Z	Element	K-absorption Edge		K _α -Emission	
		Kev	Å ^o	Kev	Å ^o
38	Strontium	16.101	0.7697	14.164	0.875
39	Yttrium	17.032	0.7276	14.957	0.829
40	Zirconium	17.993	0.6888	15.774	0.786
41	Niobium	18.981	0.6529	16.614	0.746
42	Molybdenum	19.996	0.6198	17.478	0.709
43	Technetium	21.054		18.410	0.673
44	Ruthenium	22.112	0.5605	19.278	0.643
45	Rhodium	23.217	0.5338	20.214	0.613
46	Palladium	24.341	0.5092	21.175	0.585
47	Silver	25.509	0.4858	22.162	0.559
48	Cadmium	26.704	0.4641	23.172	0.535
49	Indium	27.920	0.4439	24.027	0.512
50	Tin	29.182	0.4247	25.270	0.491
51	Antimony	30.477	0.4046	26.357	0.470
52	Tellurium	31.800	0.3897	27.471	0.451
53	Iodine	33.155	0.3738	28.610	0.433
54	Xenon	34.570	0.3585	29.802	0.416
55	Cesium	35.949	0.3447	30.970	0.400
56	Barium	37.399	0.3314	32.191	0.385
57	Lanthanum	38.920	0.3184	33.440	0.371
58	Cerium	40.438	0.3065	34.717	0.357
59	Praseodymium	41.986	0.2952	36.023	0.344
60	Neodymium	43.559	0.2845	37.359	0.332

Z	Element	K-absorption Edge		K α -Emission	
		Kev	A°	Kev	A°
61	Promethium	45.207		38.649	0.321
62	Samarium	46.833	0.2646	40.124	0.309
63	Europium	48.501	0.2555	41.529	0.299
64	Gadolinium	50.215	0.2468	42.983	0.288
65	Terbium	51.984	0.2384	44.470	0.279
66	Dysprosium	53.773	0.2305	45.985	0.270
67	Holmium	55.599	0.2229	47.528	0.261
68	Erbium	57.465	0.2157	49.099	0.252
69	Thulium	59.319	0.2089	50.730	0.244
70	Ytterbium	61.282	0.2022	52.360	0.237
71	Lutecium	63.281	0.1958	54.063	0.229
72	Hafnium	65.292	0.1898	55.757	0.222
73	Tantalum	67.379	0.1839	57.524	0.215
74	Tungsten	69.479	0.1784	59.310	0.209
75	Rhenium	71.590	0.1731	61.131	0.203
76	Osmium	73.856	0.1678	62.991	0.197
77	Iridium	76.096	0.1629	64.886	0.191
78	Platinum	78.352	0.1582	66.820	0.186
79	Gold	80.768	0.1534	68.794	0.180
80	Mercury	83.046	0.1492	70.821	
81	Thallium	85.646	0.1447	72.860	0.170
82	Lead	88.037	0.1408	74.957	0.165
83	Bismuth	90.420	0.1371	77.097	0.161
90	Thorium	109.741	0.1129		0.133
92	Uranium	115.610	0.1078		0.126