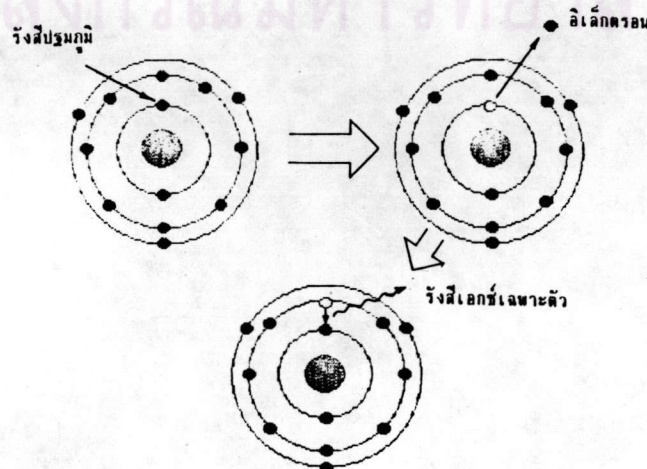


เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ และเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรือง

2.1 หลักการของวิธีเรืองรังสีเอกซ์

หลักการของวิธีเรืองรังสีเอกซ์ คือ ทำให้อิเล็กตรอนในวงจรโคจรชั้นใน ๆ (ชั้น K หรือ ชั้น L) เกิดไอออไนเซชัน (ionization) หลุดออกจากอะตอม โดยการยิงรังสีปฐมภูมิ (Primary radiation) เข้าไป เมื่ออิเล็กตรอนในวงจรโคจรในหลุดไปจะเกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนจากโคจรนอกซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าเข้าไปแทนที่ว่าง จะปลดปล่อยพลังงาน ส่วนเกินออกมาในรูปของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า "รังสีเอกซ์เรือง (fluorescent x-ray)" และเรียกขบวนการเกิดรังสีเอกซ์เรืองว่า "การเรืองรังสีเอกซ์ (x-ray fluorescence)" ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เนื่องจากพลังงานของรังสีเอกซ์เรืองนั้น มีค่าเฉพาะสำหรับธาตุแต่ละชนิดจึงเรียกรังสีเอกซ์เรืองอีกชื่อหนึ่งว่า "รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-rays)" ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์คุณภาพและปริมาณของธาตุด้วยวิธีนี้ วิเคราะห์ได้โดยการวัดพลังงาน และความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองนั่นเอง



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เรือง

ตารางที่ 2.1 (5)

ค่า Absorption Edge และพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุต่าง ๆ (ในหน่วย keV)

X-Ray Critical-Absorption and Emission Energies in keV

Atomic Number	Element	K series					L series								
		K _α	K _β	K _β '	K _α 1	K _α 2	L _{1α}	L _{1β}	L _{1γ}	L _{2γ}	L _{3γ}	L _α	L _β		
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				0.522									
9	Fluorine	0.687†				0.677									
10	Neon	0.874*				0.851‡	0.048†	0.022†	0.022†						
11	Sodium	1.06*		1.067		1.041	0.055‡	0.034‡	0.034‡						
12	Magnesium	1.303		1.297		1.254	0.063	0.050	0.049						
13	Aluminium	1.559		1.553	1.487	1.486	0.087	0.073**	0.072**						
14	Silicon	1.838		1.832	1.740	1.739	0.118*	0.099**	0.098**						
15	Phosphorus	2.142		2.136	2.015‡	2.014‡	0.153*	0.129‡	0.128‡						
16	Sulphur	2.470		2.464	2.308	2.306	0.193*	0.164**	0.163**						
17	Chlorine	2.819‡		2.815	2.622	2.621	0.238*	0.203‡	0.202‡						
18	Argon	3.203		3.192‡	2.957	2.955	0.287*	0.247**	0.245**						
19	Potassium	3.607		3.589	3.313	3.310	0.341*	0.297**	0.294**						
20	Calcium	4.038		4.012	3.691	3.688	0.399*	0.352	0.349			0.344	0.341		
21	Scandium	4.496		4.460	4.090	4.085	0.462*	0.411**	0.408**			0.399	0.395		
22	Titanium	4.964		-4.931	4.510	4.504	0.530*	0.460**	0.454**			0.458	0.452		
23	Vanadium	5.463		-5.427	4.952	4.944	0.604*	0.519**	0.512**			0.519	0.510		
24	Chromium	5.968		-5.946	5.414	5.405	0.679*	0.583**	0.574**			0.581	0.571		
25	Manganese	6.537		6.490	5.898	5.887	0.762*	0.650**	0.639**			0.647	0.636		
26	Iron	7.111		7.057	6.403	6.390	0.849*	0.721**	0.708**			0.717	0.704		
27	Cobalt	7.709		7.649	6.930	6.915	0.929*	0.794**	0.779**			0.790	0.775		
28	Nickel	8.331	8.328	8.264	7.477	7.460	1.015*	0.871**	0.853**			0.866	0.849		
29	Copper	8.980	8.976	8.904	8.047	8.027	1.100*	0.953	0.933			0.948	0.928		
30	Zinc	9.660	9.657	9.571	8.638	8.615	1.200*	1.045	1.022			1.032	1.009		
31	Gallium	10.368	10.365	10.263	9.251	9.234	1.30*	1.134**	1.117**			1.122	1.096		
32	Germanium	11.103	11.100	10.981	9.885	9.854	1.42*	1.248**	1.217**			1.216	1.186		
33	Arsenic	11.863	11.863	11.725	10.543	10.507	1.529	1.359	1.323			1.317	1.282		
34	Selenium	12.652	12.651	12.495	11.221	11.191	1.652	1.473	1.434			1.419	1.379		
35	Bromine	13.475	13.465	13.290	11.923	11.877	1.794‡	1.599**	1.552**			1.526	1.480		
36	Krypton	14.323	14.313	14.112	12.648	12.597	1.931‡	1.727**	1.675**			1.638‡	1.587**		
37	Rubidium	15.201	15.184	14.960	13.394	13.335	2.067	1.866	1.806			1.752	1.694	1.692	
38	Strontium	16.106	16.083	15.834	14.164	14.097	2.221	2.008	1.941			1.872	1.806	1.805	
39	Yttrium	17.037	17.011	16.736	14.957	14.882	2.369	2.154	2.079			1.996	1.922	1.920	
40	Zirconium	17.998	17.969	17.666	15.774	15.690	2.547	2.305	2.220	2.200	2.302	2.219	2.124	2.042	2.040
41	Niobium	18.987	18.951	18.621	16.614	16.520	2.706	2.467**	2.374	2.462	2.367	2.257	2.166	2.163	
42	Molybdenum	20.002	19.964	19.607	17.478	17.373	2.884	2.627	2.523	2.623	2.518	2.395	2.293	2.290	
43	Technetium	21.054‡	21.012‡	-20.585‡	18.410‡	18.328‡	3.054‡	2.795‡	2.677‡	2.792‡	2.674‡	2.538‡	2.424‡	2.420‡	
44	Ruthenium	22.118	22.072	21.655	19.278	19.149	3.236‡	2.966	2.837	2.964	2.836	2.683	2.558	2.554	
45	Rhodium	23.224	23.169	22.721	20.214	20.072	3.415	3.145	3.002	3.144	3.001	2.834	2.696	2.692	
46	Palladium	24.347	24.297	23.816	21.175	21.018	3.617	3.329	3.172	3.328	3.172	2.990	2.838	2.833	
47	Silver	25.517	25.454	24.942	22.162	21.988	3.810	3.528	3.352	3.519	3.348	3.151	2.984	2.978	
48	Cadmium	26.712	26.641	26.093	23.172	22.982	4.019	3.727	3.538	3.716	3.528	3.316	3.133	3.127	
49	Indium	27.928	27.859	27.274	24.207	24.000	4.237	3.939	3.729	3.920	3.713	3.487	3.287	3.279	
50	Tin	29.190	29.106	28.483	25.207	25.042	4.464	4.157	3.928	4.131	3.904	3.662	3.444	3.435	
51	Antimony	30.486	30.387	29.723	26.357	26.109	4.697	4.381	4.132	4.347	4.100	3.843	3.605	3.595	
52	Tellurium	31.809	31.698	30.993	27.471	27.200	4.938	4.613	4.341	4.570	4.301	4.029	3.769	3.758	
53	Iodine	33.164	33.016	32.292	28.610	28.315	5.190	4.856	4.559	4.800	4.507	4.220	3.937	3.926	
54	Xenon	34.579	34.446‡	33.644	29.802‡	29.485‡	5.452	5.104	4.782	5.036‡	4.720‡	4.422‡	4.111‡	4.098‡	
55	Cesium	35.959	35.819	34.984	30.970	30.623	5.720	5.358	5.011	5.280	4.936	4.620	4.286	4.272	
56	Barium	37.410	37.255	36.376	32.191	31.815	5.995	5.623	5.247	5.531	5.156	4.828	4.467	4.451	
57	Lanthanum	38.931	38.728	37.799	33.440	33.033	6.283	5.894	5.489	5.789	5.384	5.043	4.651	4.635	
58	Cerium	40.449	40.231	39.255	34.717	34.276	6.561	6.165†	5.729	6.052	5.613	5.262	4.840	4.823	
59	Praseodymium	41.998	41.772	40.746	36.023	35.549	6.846	6.443	5.968	6.322	5.850	5.489	5.034	5.014	
60	Neodymium	43.571	43.298*	42.269	37.359	36.845	7.144	6.727	6.215	6.602	6.090	5.722	5.230	5.208	
61	Promethium	45.207‡	44.955‡	-43.945‡	39.649‡	38.160‡	7.448‡	7.018‡	6.466‡	6.891‡	6.336‡	5.956	5.431	5.408‡	
62	Samarium	46.846	46.553‡	45.400	40.124	39.523	7.754	7.281‡	6.721‡	7.180	6.587	6.206	5.636	5.609	
63	Europium	48.515	48.241	47.027	41.529	40.877	8.069	7.624	6.983	7.478	6.842	6.456	5.846	5.816	
64	Gadolinium	50.229	49.961	48.718	42.983	42.280	8.393	7.940	7.252	7.788	7.102	6.714	6.059	6.027	
65	Terbium	51.998	51.737	50.391	44.470	43.737	8.724	8.258	7.519	8.104	7.368	6.979	6.275	6.241	
66	Dysprosium	53.789	53.491	52.178	45.985	45.193	9.083	8.621‡	7.850‡	8.418	7.638	7.249	6.495	6.457	
67	Holmium	55.615	55.292**	53.934‡	47.528	46.686	9.411	8.920	8.074	8.748	7.912	7.528	6.720	6.680	
68	Erbium	57.483	57.088	55.690	49.099	48.205	9.776	9.263	8.364	9.089	8.188	7.810	6.948	6.904	
69	Thulium	59.335‡	58.969**	57.575‡	50.730	49.762	10.144	9.628	8.652	9.424	8.472	8.103	7.181	7.135	
70	Ytterbium	61.303	60.959	59.352	52.360	51.326	10.486	9.977	8.943	9.779	8.758	8.401	7.414	7.367	

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Atomic Number	Element	K series					L series							
		K _α	Kβ ₁	Kβ ₂	Kα ₁	Kα ₂	L _{1α}	L _{1β}	L _{1γ}	L _{2α}	L _{2β}	L _{2γ}		
71	Lutecium	63.304	62.946	61.282	54.063	52.959	10.867	10.345	9.241	10.142	9.048	8.708	7.654	7.604
72	Hafnium	65.313	64.936	63.209	55.757	54.579	11.264	10.734	9.556	10.514	9.346	9.021	7.898	7.843
73	Tantalum	67.400	66.999	65.210	57.524	56.270	11.676	11.130	9.876	10.892	9.649	9.341	8.145	8.087
74	Tungsten	69.508	69.090	67.233	59.310	57.973	12.090	11.535	10.198	11.283	9.959	9.670	8.396	8.333
75	Rhenium	71.662	71.220	69.298	61.131	59.707	12.522	11.955	10.531	11.684	10.273	10.008	8.651	8.584
76	Osmium	73.860	73.393	71.404	62.991	61.477	12.965	12.383	10.869	12.094	10.596	10.354	8.910	8.840
77	Iridium	76.097	75.605	73.549	64.886	63.278	13.413	12.819	11.211	12.509	10.918	10.706	9.173	9.098
78	Platinum	78.379	77.866	75.736	66.820	65.111	13.873	13.268	11.559	12.939	11.249	11.069	9.441	9.360
79	Gold	80.713	80.165	77.968	68.794	66.980	14.353	13.733	11.919	13.379	11.582	11.439	9.711	9.625
80	Mercury	83.106	82.526	80.258	70.821	68.894	14.841	14.212	12.285	13.828	11.923	11.823	9.987	9.896
81	Thallium	85.517	84.904	82.558	72.860	70.820	15.346	14.697	12.657	14.288	12.268	12.210	10.266	10.170
82	Lead	88.001	87.343	84.922	74.957	72.794	15.870	15.207	13.044	14.762	12.620	12.611	10.549	10.448
83	Bismuth	90.521	89.833	87.335	77.097	74.805	16.393	15.716	13.424	15.244	12.977	13.021	10.836	10.729
84	Polonium	93.112	92.386	89.809	79.296	76.868	16.935	16.244	13.817	15.740	13.338	13.441	11.128	11.014
85	Astatine	95.740	94.976	92.319	81.525	78.956	17.490	16.784	14.215	16.248	13.705	13.873	11.424	11.304
86	Radon	98.418	97.616	94.877	83.800	81.080	18.058	17.337	14.618	16.768	14.077	14.316	11.724	11.597
87	Francium	101.147	100.305	97.483	86.119	83.243	18.638	17.904	15.028	17.301	14.459	14.770	12.029	11.894
88	Radium	103.927	103.048	100.136	88.485	85.446	19.233	18.481	15.442	17.845	14.839	15.233	12.338	12.194
89	Actinium	106.759	105.838	102.846	90.894	87.681	19.842	19.078	15.865	18.405	15.227	15.712	12.650	12.499
90	Thorium	109.630	108.671	105.592	93.334	89.942	20.460	19.688	16.296	18.977	15.620	16.200	12.966	12.806
91	Protactinium	112.581	111.575	108.408	95.851	92.271	21.102	20.311	16.731	19.559	16.022	16.700	13.291	13.120
92	Uranium	115.591	114.549	111.289	98.428	94.648	21.753	20.943	17.163	20.163	16.425	17.218	13.613	13.438
93	Neptunium	118.619	117.533	114.181	101.005	97.023	22.417	21.596	17.614	20.774	16.837	17.740	13.945	13.758
94	Plutonium	121.720	120.592	117.146	103.653	99.457	23.097	22.262	18.066	21.401	17.254	18.278	14.279	14.082
95	Americium	124.876	123.706	120.163	106.351	101.932	23.793	22.944	18.525	22.042	17.677	18.829	14.618	14.411
96	Curium	128.088	126.875	123.235	109.098	104.448	24.503	23.640	18.990	22.699	18.106	19.393	14.961	14.743
97	Berkelium	131.357	130.101	126.362	111.896	107.023	25.230	24.352	19.461	23.370	18.540	19.971	15.309	15.079
98	Californium	134.683	133.383	129.544	114.745	109.603	25.971	25.080	19.938	24.056	18.980	20.562	15.661	15.420
99		138.067	136.724	132.781	117.646	112.244	26.729	25.824	20.422	24.758	19.426	21.166	16.018	15.764
100		141.510	140.123	136.075	120.598	114.926	27.503	26.584	20.912	25.475	19.879	21.785	16.379	16.113

For $Z \leq 69$, values without symbols are derived from (1). Values prefixed with a - sign are $K\beta_{1,2}$.
 For $Z \geq 70$, absorption-edge values are from (4) in the case of $Z = 70-83, 88, 90$, and 92; remaining absorption edges to $Z = 100$ are obtained from these by least-squares quadratic fitting. All emission values for $Z \geq 70$ are derived from the preceding absorption edges, and others based on (4), using the transition relations $K\alpha_1 = K\alpha - L_{III}$, $K\alpha_2 = K\alpha - L_{II}$, $K\beta_1 = K\alpha - M_{III}$, etc.
 * Obtained from E. D. Hill, E. L. Church, J. W. Mihalich (5). † Derived from Compton and Allison (6). ‡ Derived from C. E. Moore (7).
 † Values derived from Cauchois and Hulubei (1) which deviate from the Moseley law. Better-fitting values are: $Z = 17$, $K\alpha_1 = 2.826$; $Z = 43$, $K\alpha_1 = 18.370$, $K\alpha_2 = 18.250$, $K\beta_1 = 20.612$; $Z = 54$, $K\alpha_1 = 29.779$, $K\alpha_2 = 29.463$, $K\beta_1 = 34.398$; $Z = 60$, $K\beta_1 = 43.346$; $Z = 61$, $K\alpha_1 = 38.726$, $K\alpha_2 = 38.180$, $K\beta_1 = 43.811$; $Z = 62$, $K\beta_1 = 46.581$, $L_{II} = 7.312$; $Z = 66$, $L_{II} = 8.591$, $L_{III} = 7.790$; $Z = 69$, $K\alpha_1 = 50.382$, $K\beta_1 = 57.487$.
 ‡ Calculated by method of least squares. ** Calculated by transition relations.

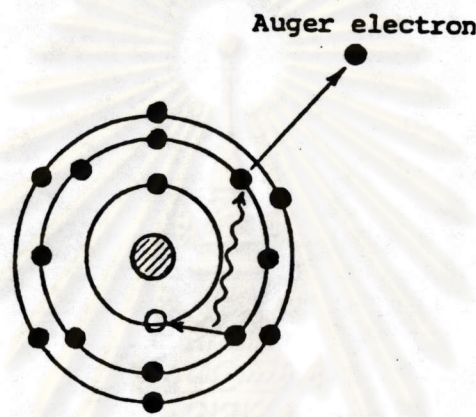
พลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้มีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงโคจรนอกกับระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงโคจรใน ดังนั้นพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$E_x = E_i - E_f \dots \dots \dots (2.1)$$

เมื่อ

- E_x คือ พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว
- E_i คือ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงโคจรนอกที่เข้าไปแทนที่
- E_f คือ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจรในที่เกิดที่ว่างขึ้น

ถ้ารังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นจากการแทนที่ว่างในวงโคจรอิเล็กตรอนวงในไปชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรนอก ๆ ก็จะทำให้รังสีเอกซ์เรืองถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนหมด แล้วได้อิเล็กตรอนหลุดออกมาแทน เราเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปว่า ไอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "ไอเจเอฟเฟ็คท์ (Auger effect)" ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.2



- = อิเล็กตรอน
- = ที่ว่างของอิเล็กตรอน
- = ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
- ~→ = ทิศทางการเคลื่อนที่ของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดไอเจอิเล็กตรอน

2.2 ฟลูออเรสเซนซ์ยิลด์ (fluorescence yield)

ฟลูออเรสเซนซ์ยิลด์ คือ อัตราการเกิดของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวต่ออัตราการเกิดที่ว่างในวงโคจรอิเล็กตรอนนั้น ตัวอย่างเช่น

$$\text{ฟลูออเรสเซนซ์ยิลด์ของวงโคจร K } (\omega_K) = \frac{\text{อัตราการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว}}{\text{อัตราการเกิดที่ว่างในวงโคจร K}}$$



$$\omega_K = \frac{\sum (n)_K}{N_K} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$= \frac{n(K_{\alpha 1}) + n(K_{\alpha 2}) + \dots}{N_K} \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ

- ω_K คือ fluorescence yield ของ K X-rays
- n คือ จำนวน K X-rays ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา
- N_K คือ จำนวนที่ว่างที่เกิดขึ้นในวงโคจรของอิเล็กตรอนชั้น K ต่อหน่วยเวลา เดียวกัน

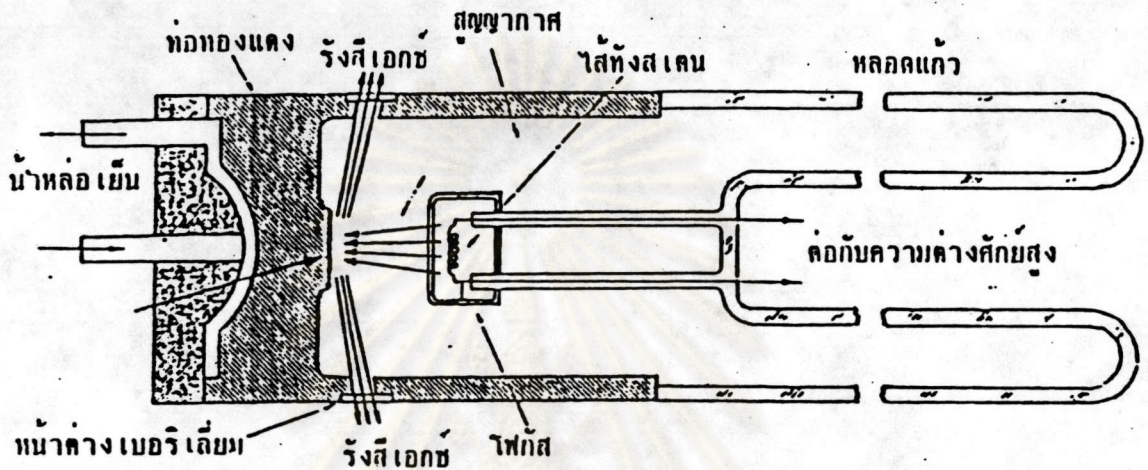
2.3 ส่วนประกอบสำคัญของระบบวิเคราะห์แบบเรืองรังสีเอกซ์

ระบบวิเคราะห์แบบเรืองรังสีเอกซ์ แบ่งออกเป็นส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ (primary radiation source) ตัวอย่าง (sample) และส่วนของระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์ (x-ray detection and analysing system)

2.3.1 ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

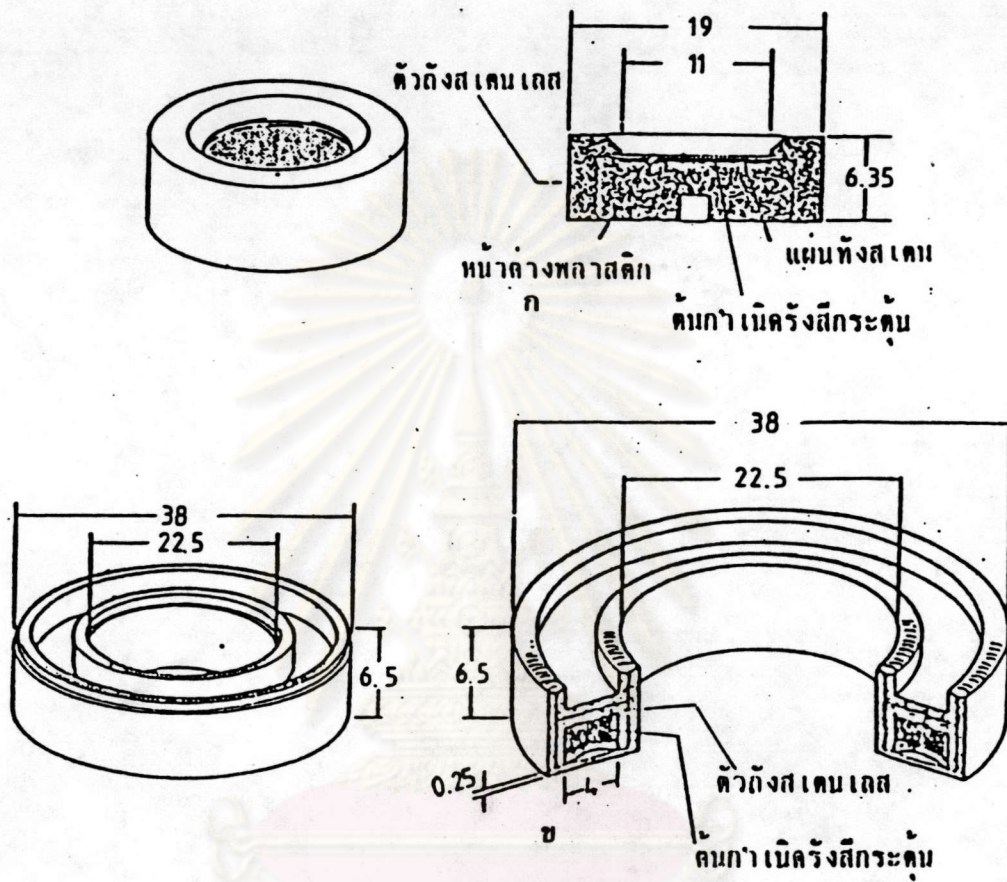
2.3.1.1 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ มีลักษณะเป็นหลอดแก้วสุญญากาศดังตัวอย่างในรูปที่ 2.3 เมื่อขั้วลบมีลักษณะเป็นไส้หลอดคล้ายไส้หลอดไฟฟ้า แต่ทำด้วยโลหะที่จะปล่อยอิเล็กตรอนออกมา เมื่อเกิดความร้อนจากการที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เช่น โลหะทังสเตน (tungsten , W) ส่วนขั้วบวกเป็นโลหะนิวาเรียบ เมื่อมีความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสอง จะทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากขั้วลบวิ่งไปยังขั้วบวก เมื่อชนขั้วบวกจะทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ (พลังงานส่วนใหญ่จะสูญเสียไปในรูปของความร้อน) ซึ่งเรียกว่า "เบรมส์สตราห์ลุง (bremsstrahlung)"

รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นแบบนี้มีพลังงานได้ต่าง ๆ กัน จนถึงพลังงานสูงสุดซึ่งเท่ากับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจึงทำให้รังสีเอกซ์ชนิดนี้มีสเปกตรัมอย่างต่อเนื่อง (continuous spectrum)



รูปที่ 2.3 ภาพภาคตัดขวางหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

2.3.1.2 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาชนิดไอโซโทป รังสีต้นกำเนิดรังสีประเภทนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 พวกคือ ต้นกำเนิดรังสีที่ให้โฟตอนพลังงานต่ำ (low energy photon source) ต้นกำเนิดรังสีพวกอิเล็กตรอนแคปเจอร์ (electron capture source) และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous x-ray source หรือ bremsstrahlung source) ลักษณะของต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทปรังสีที่ใช้กันมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ แบบจุดหรือแบบจาน (point source or disc source) และแบบวงแหวน (annular source or ring source) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างคันท้าเบ็ดรังสีไอโซโทป

(ขนาดบอกเป็น มม.)

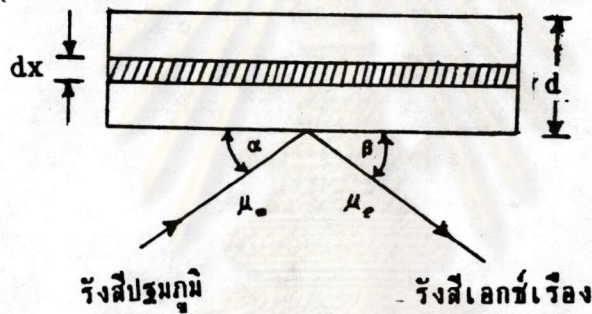
(ก) แบบจาน

(ข) แบบวงแหวน

2.3.2 ตัวอย่างและการเกิดรังสีเอกซ์เรืองจากตัวอย่าง

เมื่อตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยโฟตอน (รังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาปฐมภูมิ) ความเข้มของรังสีเอกซ์เรือง (I_r) ที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้

$$dI_r = \frac{kA\omega\tau C_p \exp\left[\frac{-\mu_a X}{\sin\alpha}\right] \exp\left[\frac{-\mu_r X}{\sin\beta}\right] dx \dots\dots\dots(2.4)$$



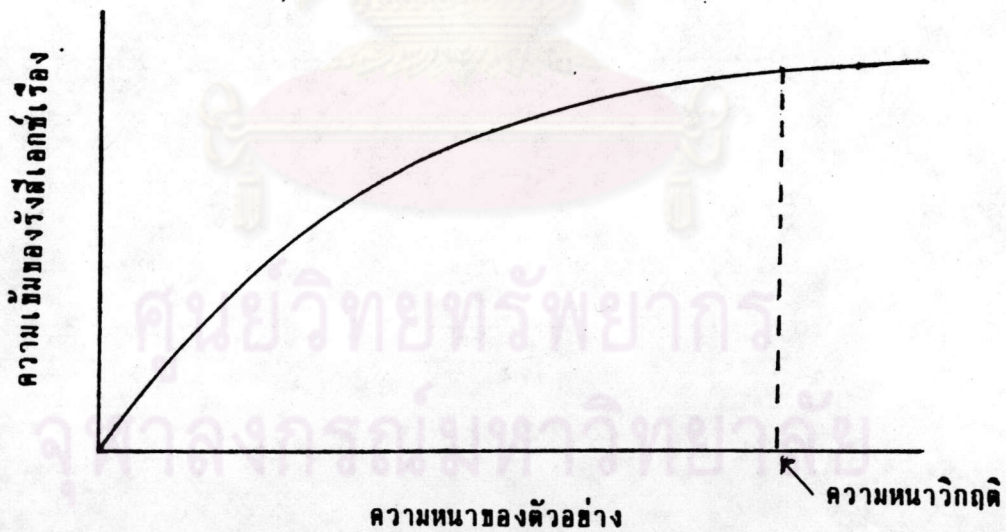
เมื่อ

- k คือ ประสิทธิภาพรวมในการวัดรังสี
- A คือ ความเข้มรังสีของต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ
- ω คือ อัตราการปล่อยรังสีเอกซ์เรือง
- τ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (mass absorption coefficient)
เนื่องจากอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกคอมป์ตันและฟลักซ์ของธาตุที่สนใจ ต่อพลังงานของโฟตอนปฐมภูมิ
- c คือ ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจในตัวอย่าง

- ρ คือ ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง
 μ_o คือ สัมประสิทธิ์การหักเหเชิงมวลของสารตัวอย่างต่อโฟตอนปฐมภูมิ
 μ_e คือ สัมประสิทธิ์การหักเหเชิงมวลของสารตัวอย่างต่อรังสีเอกซ์เรือง
 α คือ มุมระหว่างโฟตอนปฐมภูมิกับตัวอย่าง
 β คือ มุมระหว่างรังสีเอกซ์เรืองกับตัวอย่าง
 X คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง

ถ้าอินทิเกรต สมการที่ (2.4) สำหรับตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d จะได้

$$I_e = \frac{k A_o \omega T C}{\mu_o + \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \mu_e} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\mu_o + \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \mu_e}{\sin \alpha} \right) \rho d \right\} \right] \dots (2.5)$$



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์เรือง (I_e) กับ ความหนาของตัวอย่าง d



ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อ ความเข้มรังสีเอกซ์เรื่องที่เกิดขึ้นก็คือ ความหนาของตัวอย่าง ความเข้มข้นของธาตุนั้น ๆ และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง ปัจจัยสุดท้ายนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของตัวอย่างนั่นเอง

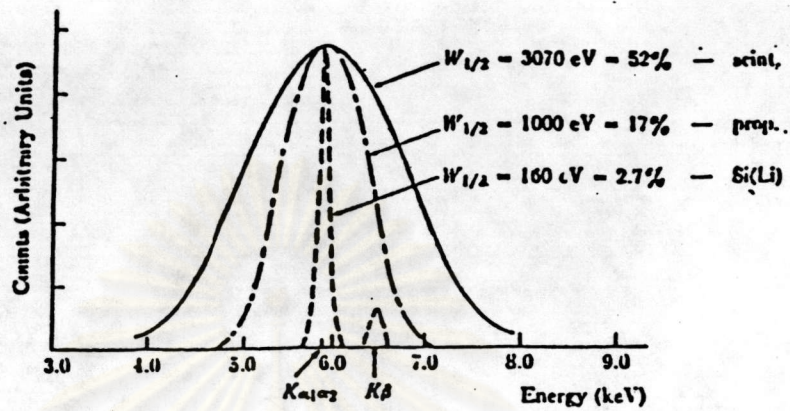
2.3.3 เครื่องระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์

ระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบ non-dispersion (energy dispersive x-ray fluorescence spectrometer, EDX) และแบบ dispersion (wavelength dispersive x-ray fluorescence spectrometer, WDX)

2.3.3.1 ระบบ non-dispersion ระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบนี้ประกอบด้วย หัววัดรังสีเอกซ์ (x-ray detector) ภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier) ภาคขยายหลัก (amplifier) และ เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (analyzer)

หัววัดรังสีเอกซ์ทำหน้าที่วัดรังสีเอกซ์เรื่องจากตัวอย่างโดยตรง ซึ่งความสามารถในการแยกพลังงาน (energy resolution) และประสิทธิภาพของหัววัดนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัดที่ใช้ สัญญาณจากหัววัดรังสีจะถูกปรับแต่งรูปและขยายโดยภาคขยายส่วนหน้าและภาคขยายหลัก และถูกส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์ ซึ่งอาจจะเป็นเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (multichannel analyzer MCA) หรือเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดียว (single channel analyzer, SCA)

หัววัดรังสีเอกซ์ที่ใช้กันอยู่มี 3 ชนิด คือ หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดเรืองแสง (scintillation detector) ได้แก่ หัววัดโซเดียม ไอโอไดด์ $[NaI(Tl)]$ แบบบางมีความสามารถในการแจกแจงพลังงานไม่ดี โดยมีค่ารีโซลูชัน (resolution) ประมาณ 52% ที่ 5.9 keV เหมาะสำหรับใช้วัดพลังงานต่ำ ๆ ตั้งแต่ 4.5 ประมาณ 5 keV



รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการ
แจกแจงพลังงานของหัววัดรังสี 3 ชนิด

ขึ้นไป และธาตุที่จะวิเคราะห์จะต้องมีความแตกต่างของเลขอะตอม (atomic number) ประมาณ 7-10

หัววัดรังสีเลขชนิดบรรจุก๊าซ เป็นหัววัดรังสีเลขที่เหมาะสมในการวัดพลังงานต่ำ ได้แก่ หัววัดรังสีเลขแบบพรอพอร์ชันนัลที่บรรจุก๊าซอาร์กอน (argon, Ar) ซีลอน (xenon, Xe) คริปทอน (Krypton, Kr) หรือ มีเทน (methane, CH_4) เมื่อใช้หน้าต่างเบริเลียม (Be-window) หนา 0.05 มิลลิเมตร จะสามารถวัด พลังงานตั้งแต่ 1.74 keV (Si-K) สำหรับพลังงานที่ต่ำกว่านี้ใช้หัววัดรังสีเลขแบบพรอพอร์ชันนัลก๊าซโฟลเคาน์เตอร์ (proportional gas flow counter) ซึ่งอาจจะบรรจุก๊าซดังกล่าว หรือ ก๊าซผสมของ ฮีเลียม-มีเทน (helium-methane, He-CH_4), อาร์กอน-มีเทน (argon-methane, Ar-CH_4) ซีลอน-มีเทน (xenon-methane, Xe-CH_4) โดยมีอะลูมิเนียมเคลือบบนเทอไรลีน (terrylene) หนา 0.006 มิลลิเมตร เป็นหน้าต่างสามารถวัดพลังงานตั้งแต่ 1.25 keV ได้ (Mg-K) ส่วนพลังงานที่ต่ำกว่านี้อาจใช้หน้าต่างโคลโลเดียน (Collodion window) (6) หรือไม่มีใช้หน้าต่างเลย (windowless) โดยทั่วไปหัววัดชนิดนี้มีความสามารถ ในการแจกแจงพลังงานปานกลาง โดยมีค่าความสามารถในการแจกแจงพลังงานประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ ที่ 5.9 keV

และธาตุที่จะวิเคราะห์จะต้องมีความแตกต่างของเลขอะตอมประมาณ 2-3

ท้าวัดรังสีแบบกึ่งตัวนำ ซึ่งแบ่งเป็นลิเทียมดริฟต์ ซิลิกอน [Si(Li): Lithium drifted silicon] และเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe: hyperpure or high purity germanium) ท้าวัดรังสีเอกซ์ชนิดนี้มีความสามารถในการแจกแจงพลังงานดีที่สุด โดยมีค่าความสามารถในการแจกแจงพลังงานประมาณ 2.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ 5.9 keV จึงสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมติดกันได้ แสดงไว้ในรูปที่ 2.6

2.3.3.2 ระบบ dispersion ระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบนี้ประกอบด้วยผลึกเดี่ยว (single crystal) ท้าวัดรังสีเอกซ์ ภาคขยายส่วนหน้า ภาคขยายหลัก เครื่องนับสัญญาณ

ระบบนี้เป็นระบบที่มีการจ่ายแอกพลังงานของรังสีเอกซ์โดยใช้ผลึกเดี่ยว เช่น ลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF : Lithium fluoride) หรือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl : Sodium Chloride) ทำหน้าที่แยกพลังงานของรังสีเอกซ์เรื่องที่เกิดกระทบผลึกตามหลักการของคลื่นสร้างเสริม และ คลื่นหักล้าง (constructive and destructive interference) คลื่นสะท้อนออกจากผลึกจะเสริมกันเมื่อค่าความยาวคลื่น (λ) ของรังสีเอกซ์มีความสัมพันธ์กับมุมตกกระทบหรือมุมสะท้อนตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) คือ

$$2 d \sin\theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

เมื่อ

- d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบภายในผลึก
- θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์
- n คือ ค่าตัวเลขจำนวนเต็มบวก 1, 2, 3...

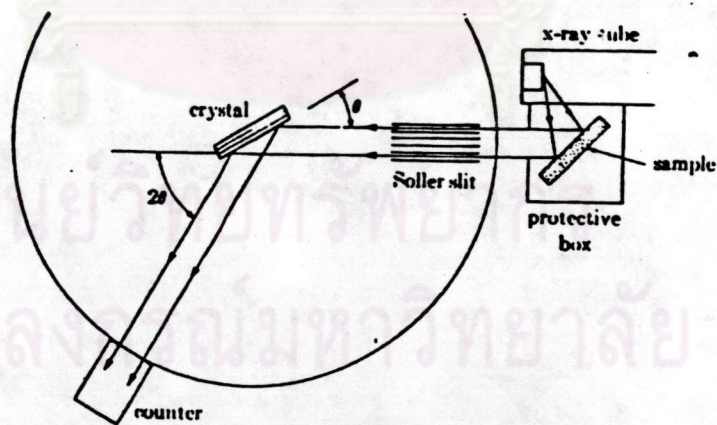
ดังนั้นที่มุมหนึ่ง ๆ จะมีรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นค่าเดียวถูกสะท้อนออกมา (เมื่อ $n=1$) คลื่นที่มีความยาวคลื่นเป็น $1/2$, $1/3$, $1/4$, ... ของความยาวคลื่น

ที่มุมนี้ก็จะถูกสะท้อนออกมาที่มุมนี้ได้เช่นกันเมื่อ n มีค่าเท่ากับ 2, 3, 4, ... ตามลำดับ โดยที่มีชื่อเรียกดังนี้

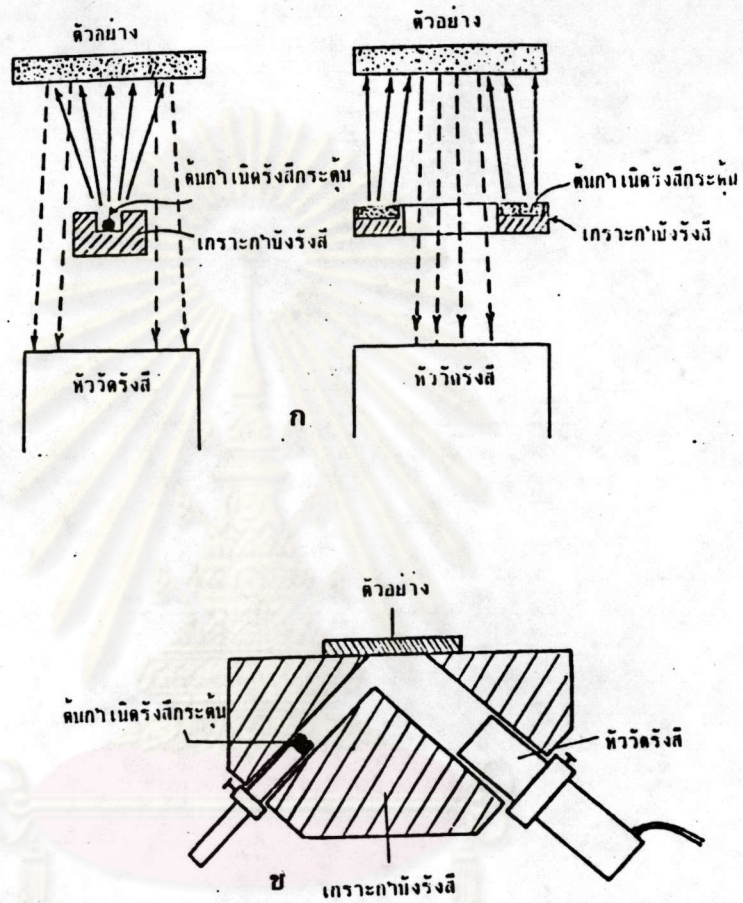
- $n = 1$ เรียกว่า first order of reflection
- $n = 2$ เรียกว่า second order of reflection
- $n = 3$ เรียกว่า third order of reflection
- $n = 4$ เรียกว่า fourth order of reflection

ฯลฯ

แผนภาพของเครื่องวิเคราะห์ระบบ WDX แสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงระบบวิเคราะห์แบบ Dispersion (WDX)



รูปที่ 2.8 แผนผังตัวอย่างการจัดระบบวิเคราะห์ของเครื่องวิเคราะห์แบบ Non-dispersion (EDX)

(ก) การจัดแผนผังแบบโคแกนเชียล
(coaxial geometry)

(ข) การจัดแบบแผนผังแบบนอนโคแกนเชียล
(noncoaxial geometry)