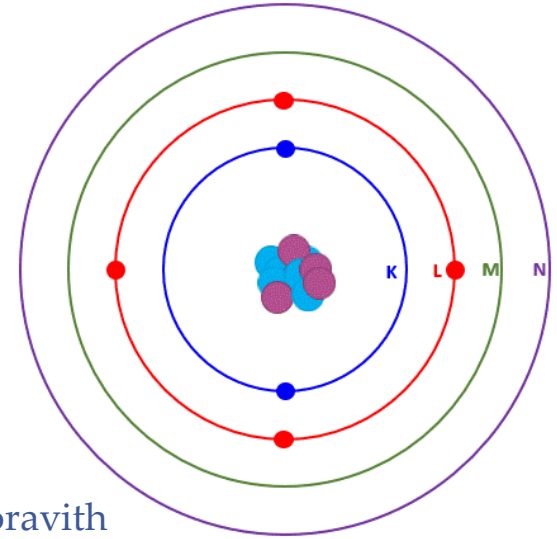
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เทคโนโลยีสุขภาพ เครื่องสำอางและการชะลอวัย
HEALTH, COSMETIC & ANTI-AGING TECHNOLOGY

หน่วย 6 เทคนิคทางเอกซ์เรย์และนิวเคลียร์

บทเรียน 6.1

เทคนิครังสีเอกซ์



(X-ray Techniques)

ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ
Asst.Prof.Woravith Chansuvarn, Ph.D.

woravith
woravith
woravith.c@rmutp.ac.th
http://sci.rmutp.ac.th/woravith

#แผนการเรียนรู้และการประเมินผลการเรียนรู้

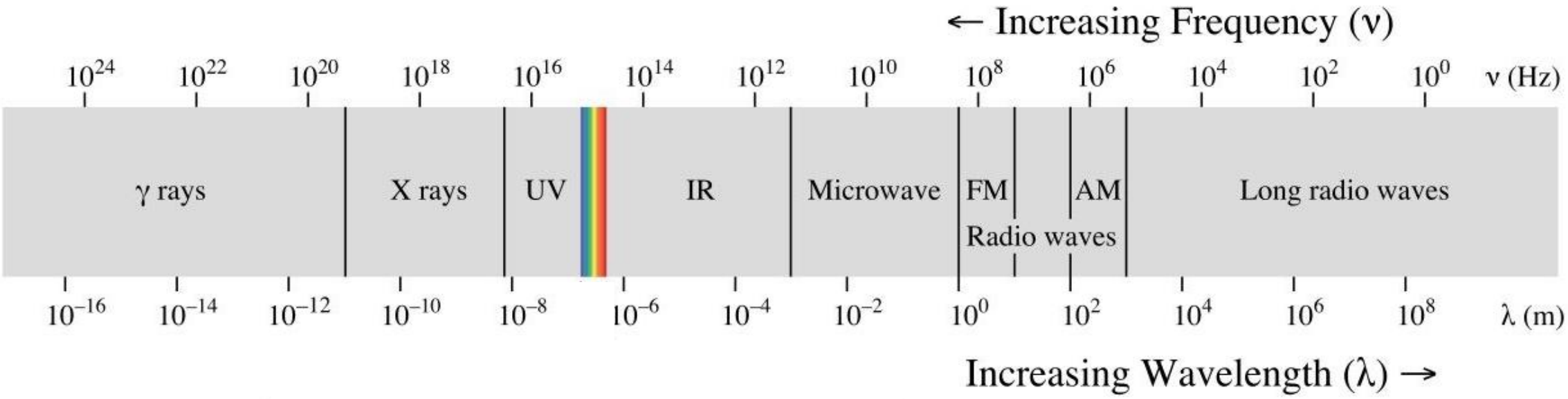
6.1

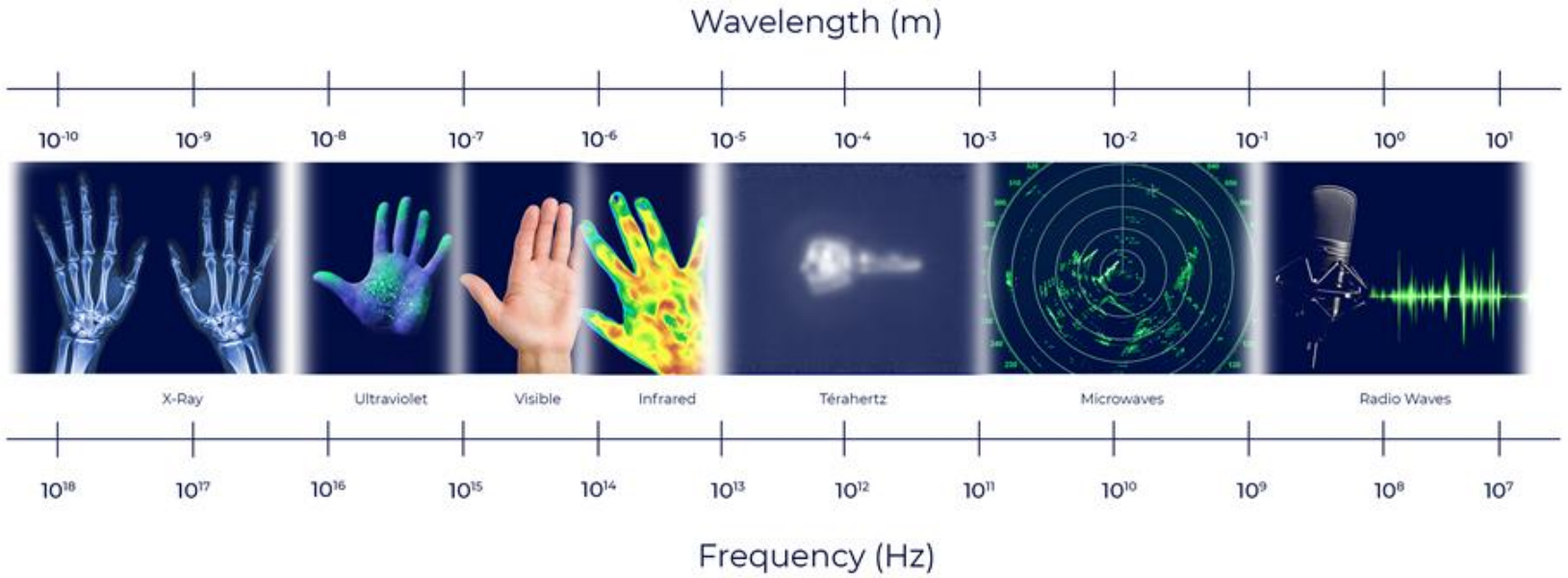
เพื่อให้เข้าใจเทคนิครังสีเอกซ์

- บอกสมบัติรังสีเอกซ์
- อธิบายเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)
- อธิบายเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)
- ปฏิบัติการทดสอบวัสดุและวัตถุดิบ

สมบัติรังสีเอกซ์

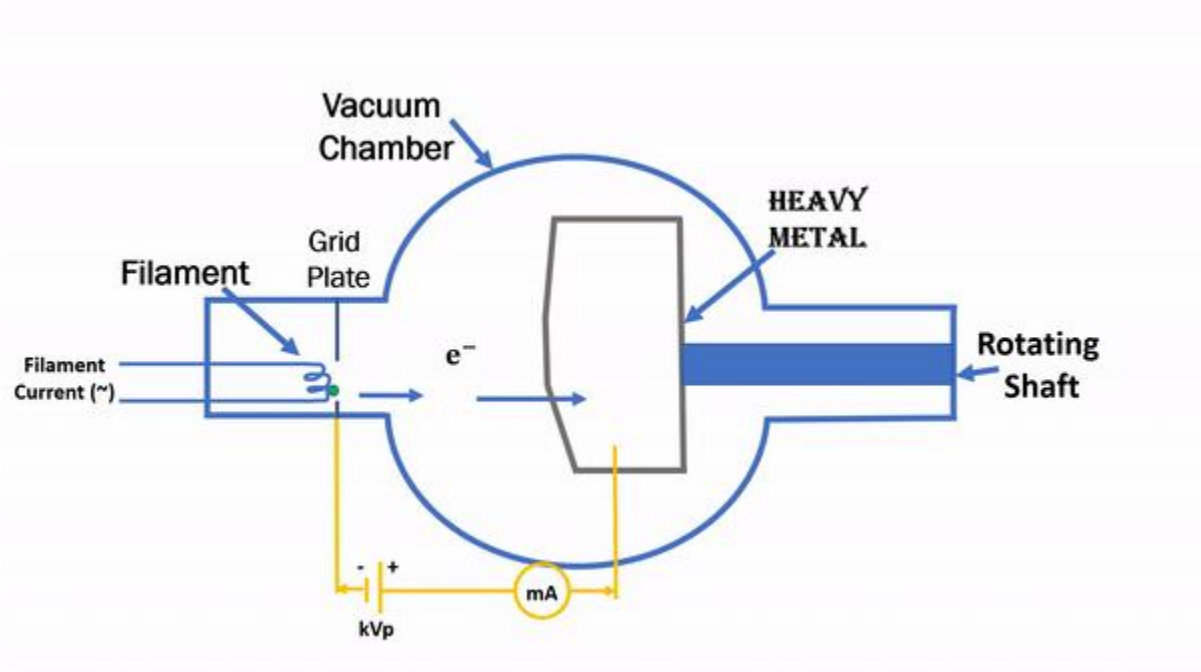
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง
- ย่านความยาวคลื่นประมาณ 0.01 ถึง 10 nm หรือย่านความถี่ 3×10^{16} ถึง 3×10^{19} Hz
- ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า
- มีพลังทะลุทะลวงสูง สามารถทะลุผ่านวัสดุได้หลายชนิด โดยเฉพาะวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ เช่น เนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต แต่จะถูกดูดกลืนหรือสะท้อนกลับเมื่อพบวัสดุที่มีเลขอะตอมสูง เช่น กระดูก หรือโลหะ
- เดินทางเป็นเส้นตรง เช่นเดียวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ รังสีเอกซ์สามารถเดินทางในสุญญากาศได้ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง
- สามารถก่อให้เกิดการวาวแสง (fluorescence) วัสดุบางชนิดสามารถเรืองแสงได้เมื่อถูกรังสีเอกซ์กระตุ้น
- สามารถก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน มีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนออกจากอะตอม ส่งผลให้เกิดไอออน


← Increasing Frequency (ν)
10^24 10^22 10^20 10^18 10^16 10^14 10^12 10^10 10^8 10^6 10^4 10^2 10^0 ν (Hz)
γ rays
X rays
UV
IR
Microwave
FM
AM
Radio waves
Long radio waves
10^−16 10^−14 10^−12 10^−10 10^−8 10^−6 10^−4 10^−2 10^0 10^2 10^4 10^6 10^8 λ (m)
Increasing Wavelength (λ) →


Wavelength (m)
10^-10 10^-9 10^-8 10^-7 10^-6 10^-5 10^-4 10^-3 10^-2 10^-1 10^0 10^1
X-Ray
Ultraviolet
Visible
Infrared
Térahertz
Microwaves
Radio Waves
10^18 10^17 10^16 10^15 10^14 10^13 10^12 10^11 10^10 10^9 10^8 10^7
Frequency (Hz)

หลักการเกิดรังสีเอกซ์

- อิเล็กตรอนอิสระซึ่งมีพลังงานจลน์สูงและถูกทำให้ลดความเร็วหรือถูกหยุดนิ่งโดยกระทันหันได้เมื่ออิเล็กตรอนอิสระวิ่งไปกระทบเป้าโลหะ (metal target)
- พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนอิสระจะถูกถ่ายเทให้กับเป้าโลหะและถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนร้อยละ 99 ซึ่งถูกดูดกลืนไว้ที่ผิวของเป้าโลหะ
- ส่วนอีกประมาณร้อยละ 1 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของโลหะที่เป็นเป้า ผลทำให้เกิดรังสีเอกซ์เกิดขึ้น

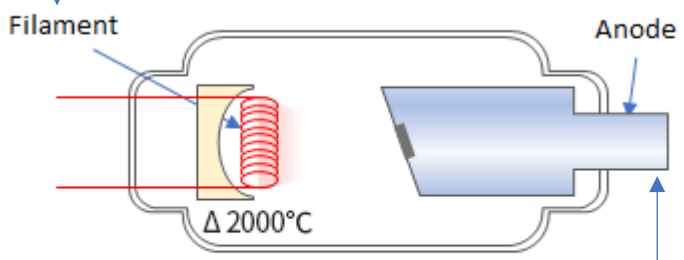


การเกิดรังสีเอกซ์ : X-ray tube

หลอดรังสีเอกซ์ (x-ray tube) ประกอบด้วย

- แคโทด หรือแหล่งผลิตอิเล็กตรอนอิสระจะใช้ไส้หลอด (filament) ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ
- แอโนด หรือเป้าโลหะ (target) เป็นขั้วบวก เป็นบริเวณที่ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอกซ์ ธาตุที่จะนำมาทำเป็นเป้าโลหะควรมีสมบัติดังนี้
  - เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูง (เลขอะตอมอยู่ระหว่าง 25 ถึง75)
  - เป็นธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง
  - เป็นธาตุที่นำความร้อนได้ดี (high thermal conductivity)
  - เป็นธาตุที่มีความดันไอต่ำ (เปลี่ยนเป็นไอได้ยาก)
- หลอดสุญญากาศ (vacuum tube) บรรจุแคโทดและแอโนดไว้ภายใน เพื่อให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระโดยไม่ชนกับโมเลกุลของอากาศ
- แหล่งให้ความต่างศักย์สูง (high acceleration voltage) เพื่อเร่งพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่จากแคโทดไปยังแอโนด ด้วยแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 20–150 kV

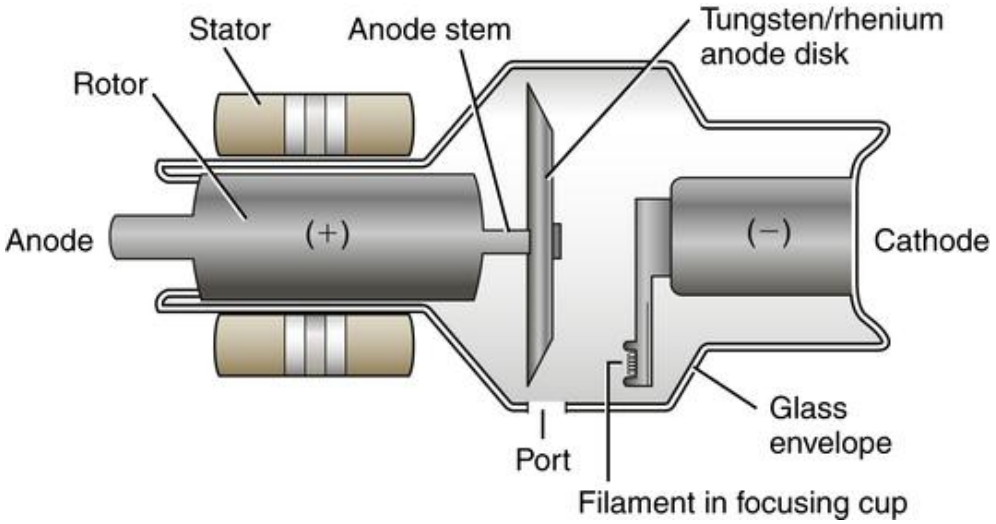
เป็นขั้วลบ ทำจากโลหะทังสเตนซึ่งถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า



ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากแคโทด ทำจากโลหะที่มีเลขอะตอมสูง เช่น W, Mo, Cu จุดที่อิเล็กตรอนชนกับแอโนดเรียกว่า focal spot

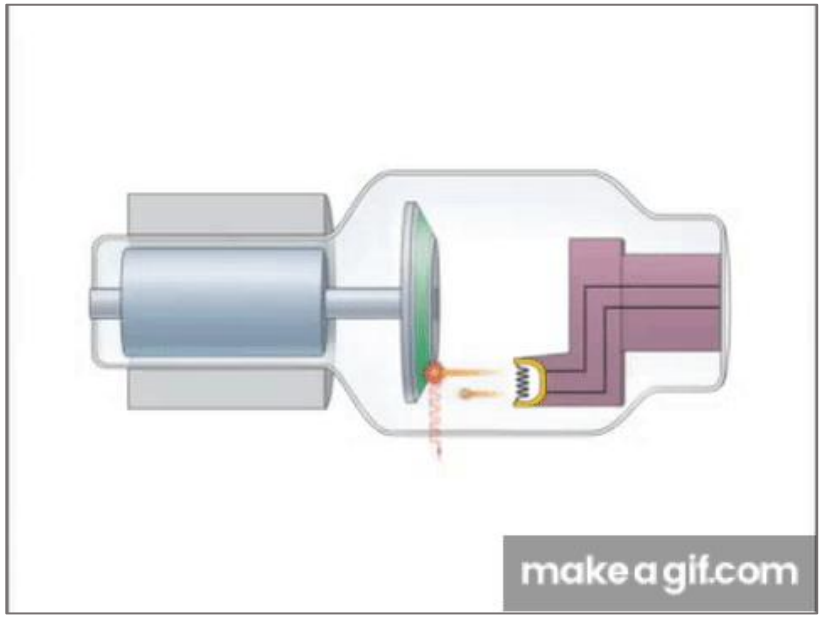
การเกิดรังสีเอกซ์ : X-ray tube

หลอดรังสีเอกซ์เป็นหลอดสุญญากาศ ทำจากแก้วทนความร้อนหรือเซรามิก ซึ่งจะทนต่อความร้อนและขั้วไฟฟ้าเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ เพื่อทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่ขั้วลบเคลื่อนที่ไปยังเป้าโลหะ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน และเพื่อให้เป็นฉนวนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง



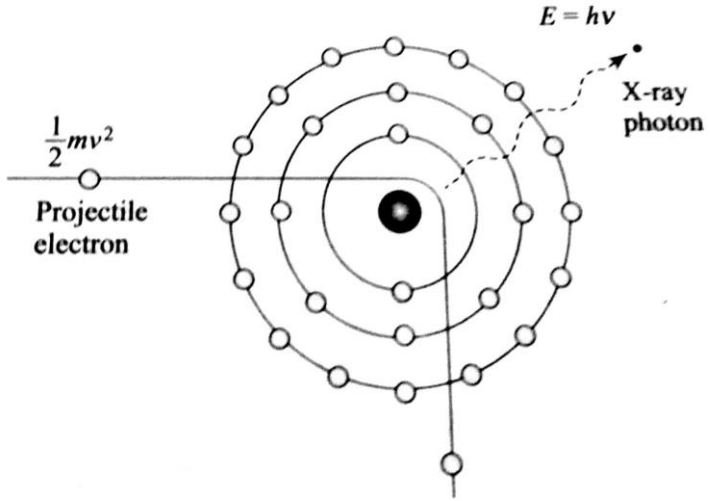
ขั้นตอนการเกิดรังสีเอกซ์

1) **การปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทด** เมื่อ filament ถูกทำให้ร้อน อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกมาเนื่องด้วยความร้อน (thermionic emission)
2) **การเร่งอิเล็กตรอน** อิเล็กตรอนที่หลุดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง ไปยังแอโนดด้วยความเร็วสูงมาก
3) **การชนของอิเล็กตรอนกับเป้าโลหะ** เมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงชนกับอะตอมของโลหะในแอโนด จะเกิดการปล่อยพลังงานในรูปของรังสีเอกซ์ ซึ่งเกิดได้ 2 แบบ คือ
   - ***รังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous x-ray spectrum or Bremsstrahlung)***
   - ***รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะตัว (Characteristic x-ray spectrum)***

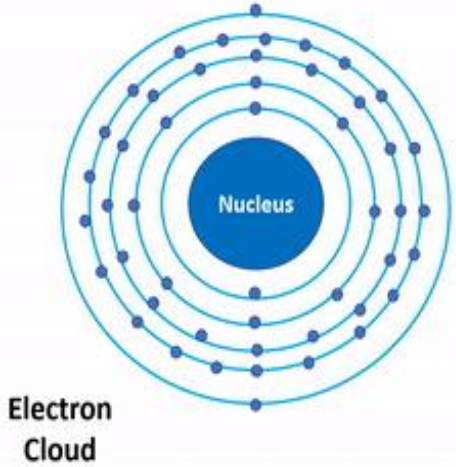


สเปกตรัมรังสีเอกซ์ : Continuous x-ray

- เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูง ซึ่งถูกเร่งให้เคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดในหลอดรังสีเอกซ์ วิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอมจะชะลอความเร็วอย่างรวดเร็ว
- อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานจลน์บางส่วนเปลี่ยนเป็นรังสีเอกซ์ (พร้อมปล่อยโฟตอนรังสีเอกซ์) ออกมา
- พลังงานจลน์ที่ลดลงจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ยิ่งอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสมากเท่าใด พลังงานจลน์ก็ยิ่งลดลง เป็นผลให้พลังงานของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาก็จะยิ่งสูงขึ้น เกิดเป็นสเปกตรัมต่อเนื่องของรังสีเอกซ์ โดยพลังงานที่ปล่อยออกมามีค่าหลากหลาย ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนสูญเสียในแต่ละการชน

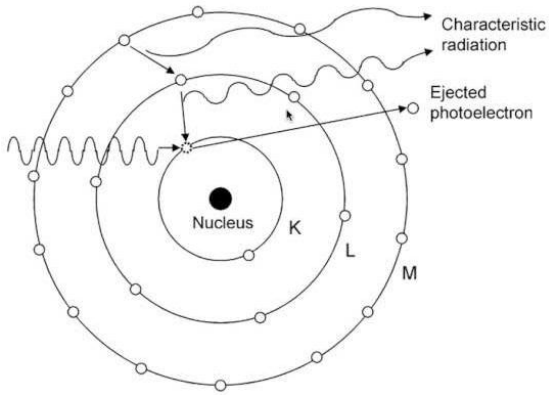


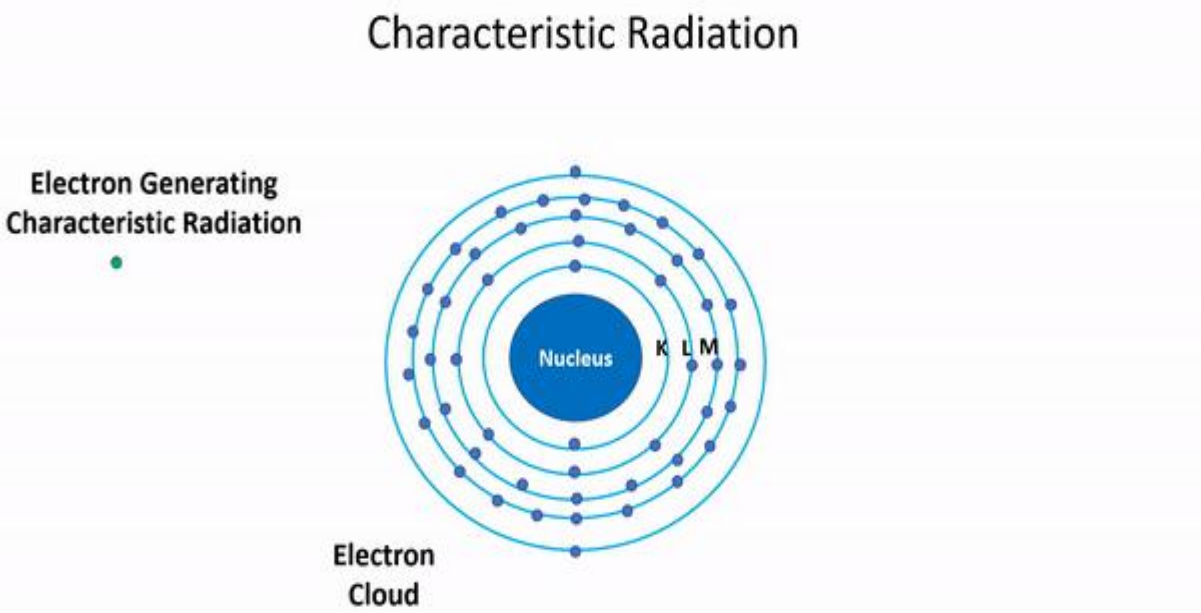
Bremsstralung (Breaking Radiation)



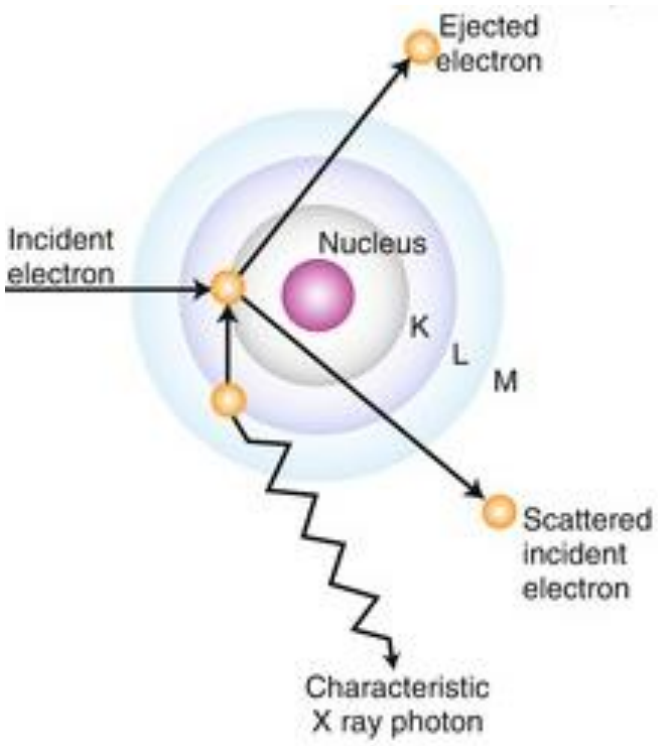
สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ : Characteristic x-ray

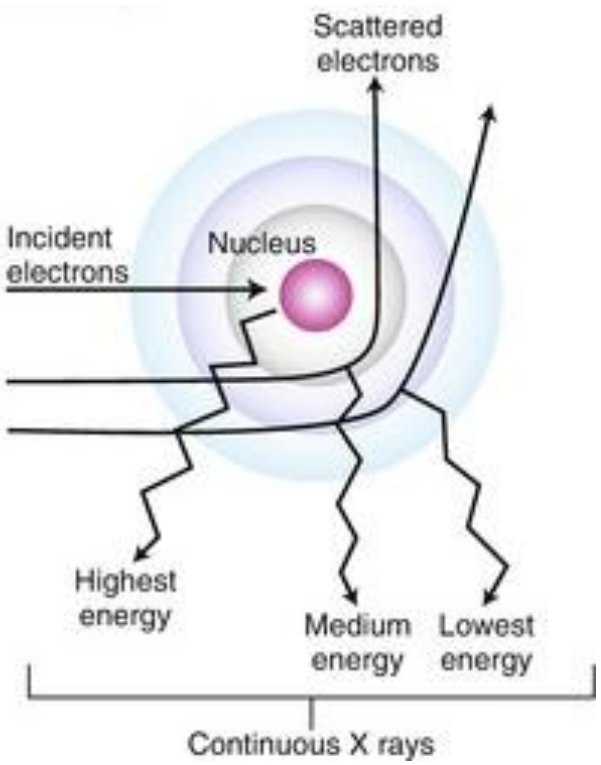
- เมื่ออิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานจลน์สูง (high kinetic energy electrons) ซึ่งถูกเร่งให้เคลื่อนที่ไปชนกับวัสดุเป้าโลหะ
- อิเล็กตรอนจะถ่ายโอนพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอมในเป้า เช่น ชั้น K, L หรือ M
- ถ้าอิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานมากเพียงพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส (binding energy) อิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นจะหลุดออกจากอะตอม ทำให้เกิดช่องว่าง
- อะตอมนั้นจะอยู่ใน excited state เมื่อกลับสู่ ground state อิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานที่สูงกว่าจะเคลื่อนที่ลงมาแทนที่ตำแหน่งที่ว่างอยู่ในชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า
- การเปลี่ยนแปลงนี้จะปล่อยพลังงานส่วนต่างออกมาในรูปของโฟตอนรังสีเอกซ์ ซึ่งมีพลังงานเฉพาะตามผลต่างระหว่างสองระดับพลังงานนั้น

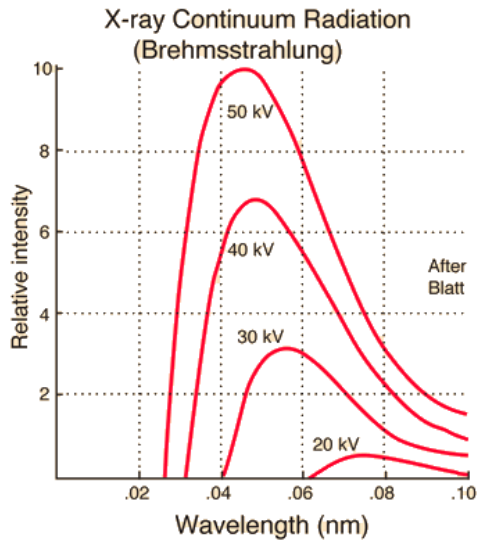


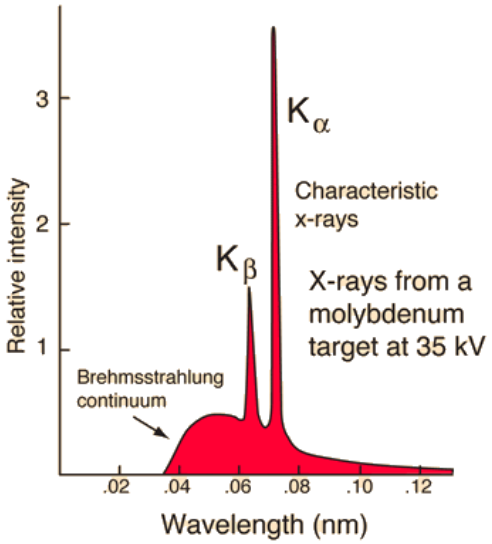


สเปกตรัมรังสีเอกซ์

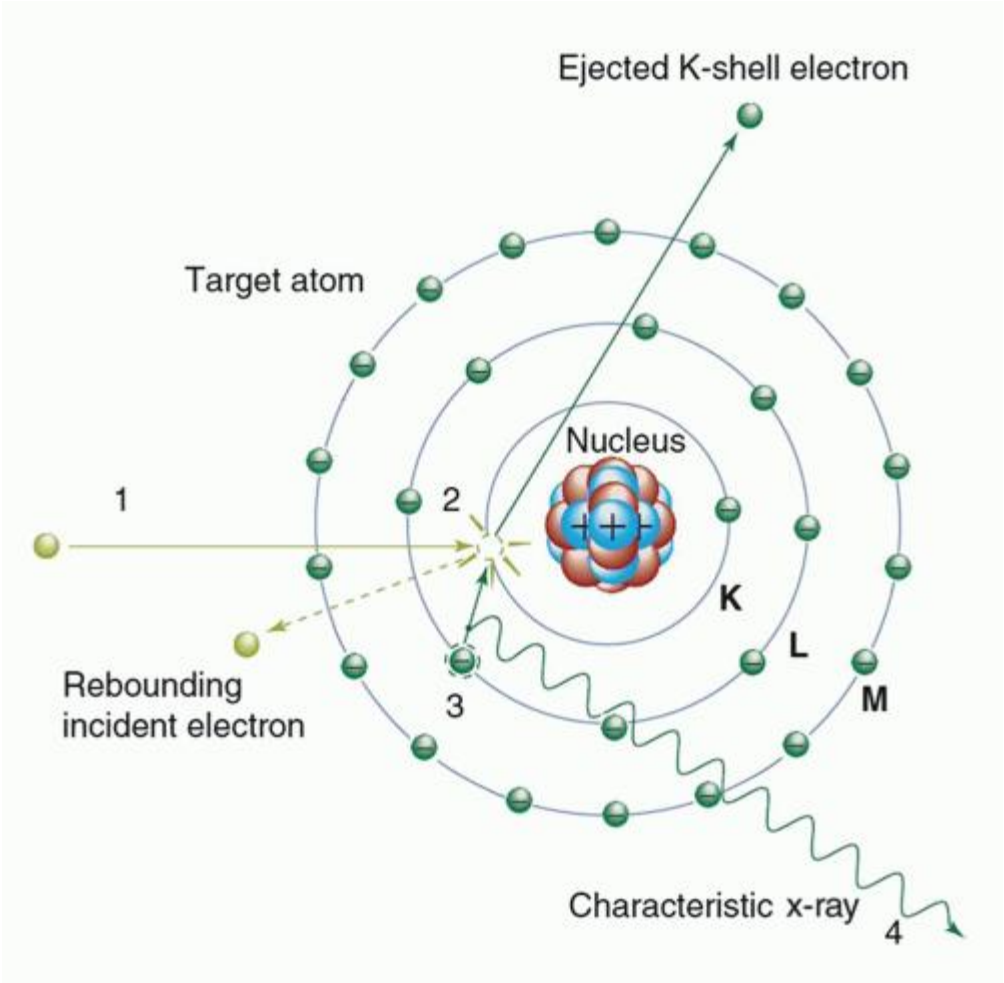


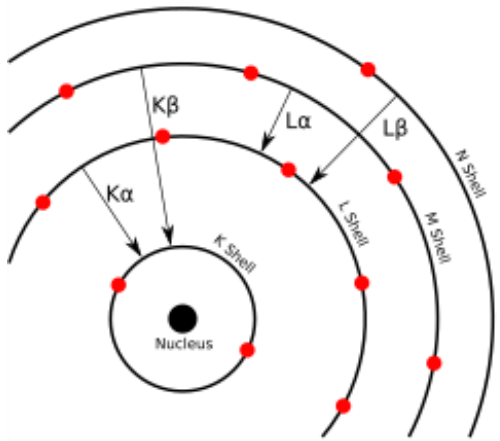


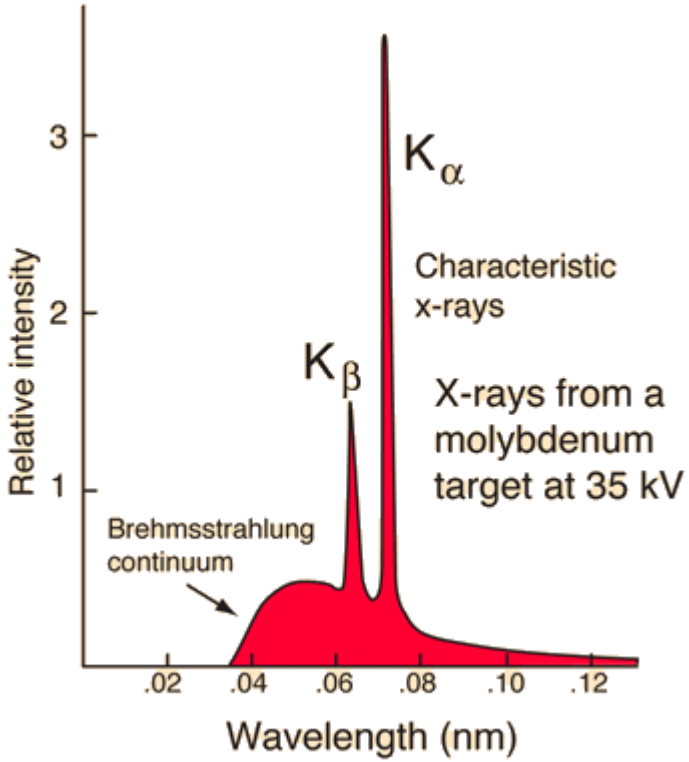




สเปกตรัมรังสีเอกซ์ : Characteristic x-ray



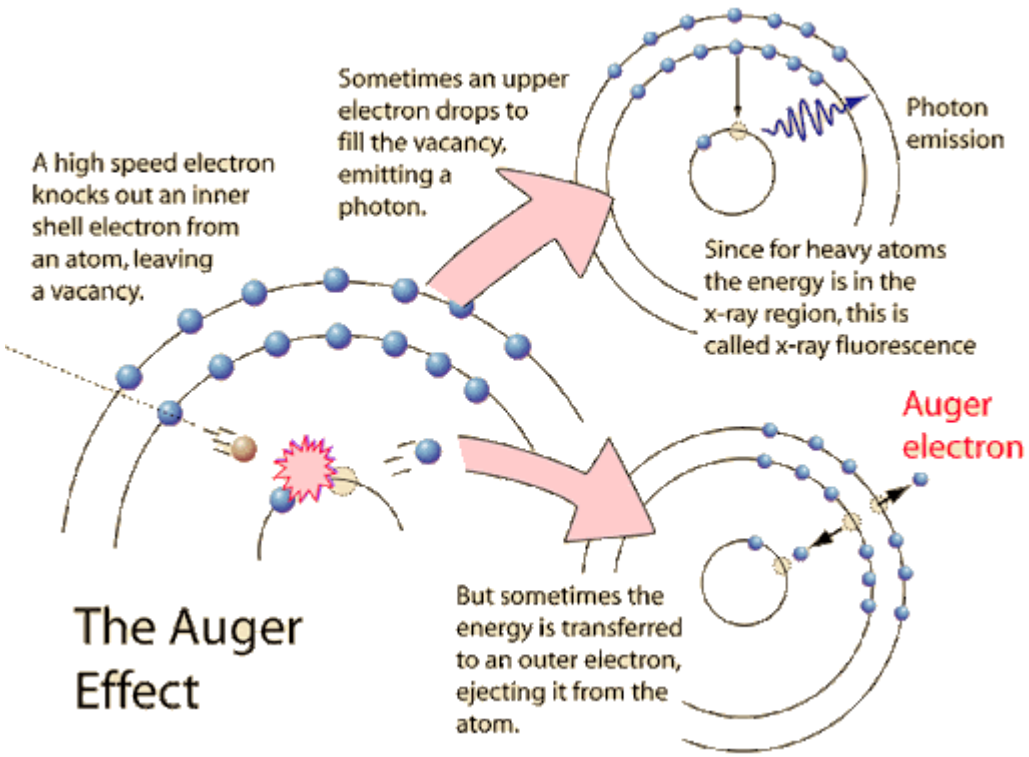




สเปกตรัมรังสีเอกซ์ : Characteristic x-ray > Auger effect

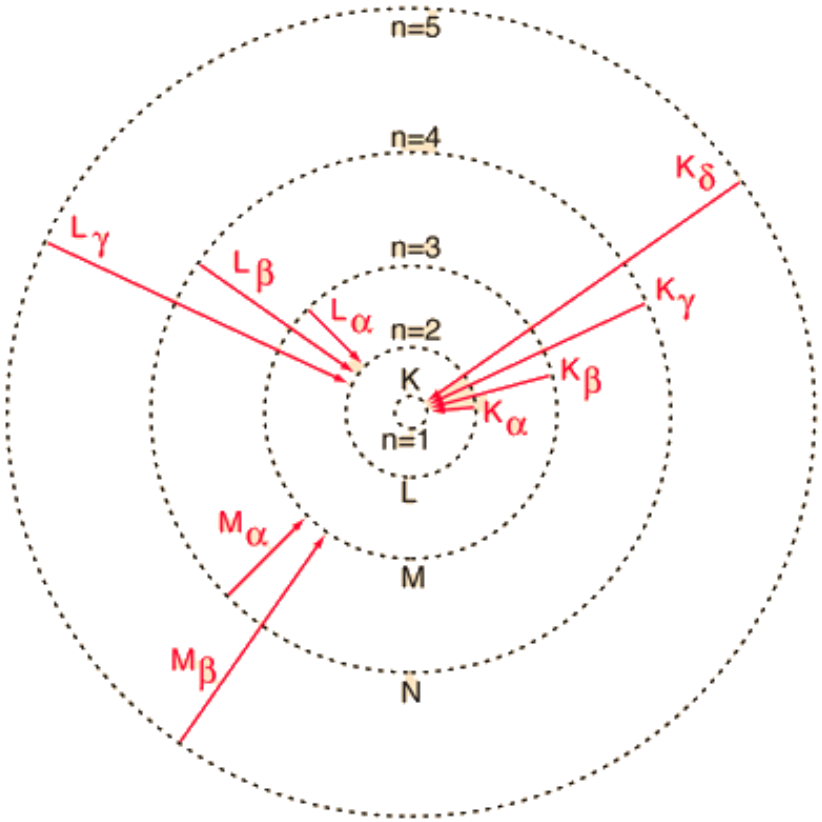
- เมื่ออิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานจลน์สูงชนอิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น K ทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกมา เรียกอิเล็กตรอนนี้ว่า ***photoelectron*** อิเล็กตรอนในชั้น K เกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนจากระดับชั้น L จะเข้ามาแทนที่พร้อมกับให้รังสีเอกซ์ เรียกว่า รังสีเอกซ์ชั้น K (K-shell X-ray)

- รังสีเอกซ์ชั้น K แทนที่จะหลุดออกไป แต่กลับไปเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในชั้น L อีก อิเล็กตรอนในระดับพลังงาน L จะหลุดออกไป เรียกว่า Auger electron
- อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานชั้น M จะเข้ามาแทนที่พร้อมกับปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาเป็น รังสีเอกซ์ชั้น L (L-shell X-ray)

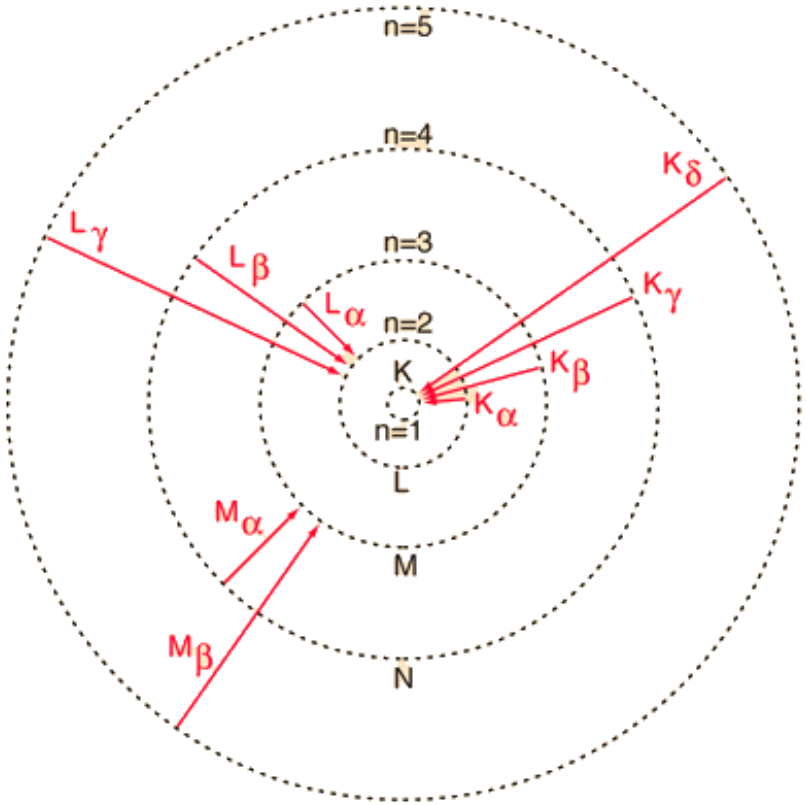


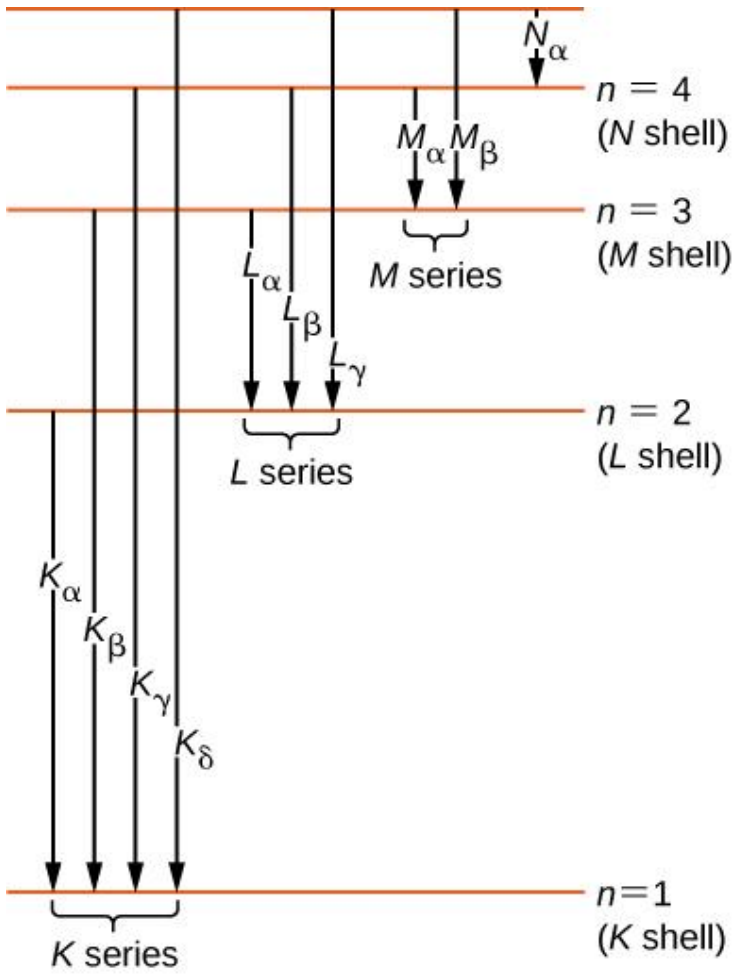
สเปกตรัมรังสีเอกซ์ : Characteristic x-ray series

- อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น L, M และ N เข้ามาแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้น K พร้อมกับปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวออกมา จะได้รังสีเอกซ์กลุ่มชุดชั้น K (K-series line spectrum) และเรียกว่า K_α, K_β และ K_γ ตามลำดับ
- อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น M และ N เข้ามาแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้น L พร้อมกับปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวออกมา จะได้รังสีเอกซ์กลุ่มชุดชั้น L (L-series line spectrum) และเรียกว่า L_α และ L_β ตามลำดับ
- อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น N เข้ามาแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้น M พร้อมกับปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวออกมา จะได้รังสีเอกซ์กลุ่มชุดชั้น M (M-series line spectrum) และเรียกว่า M_α

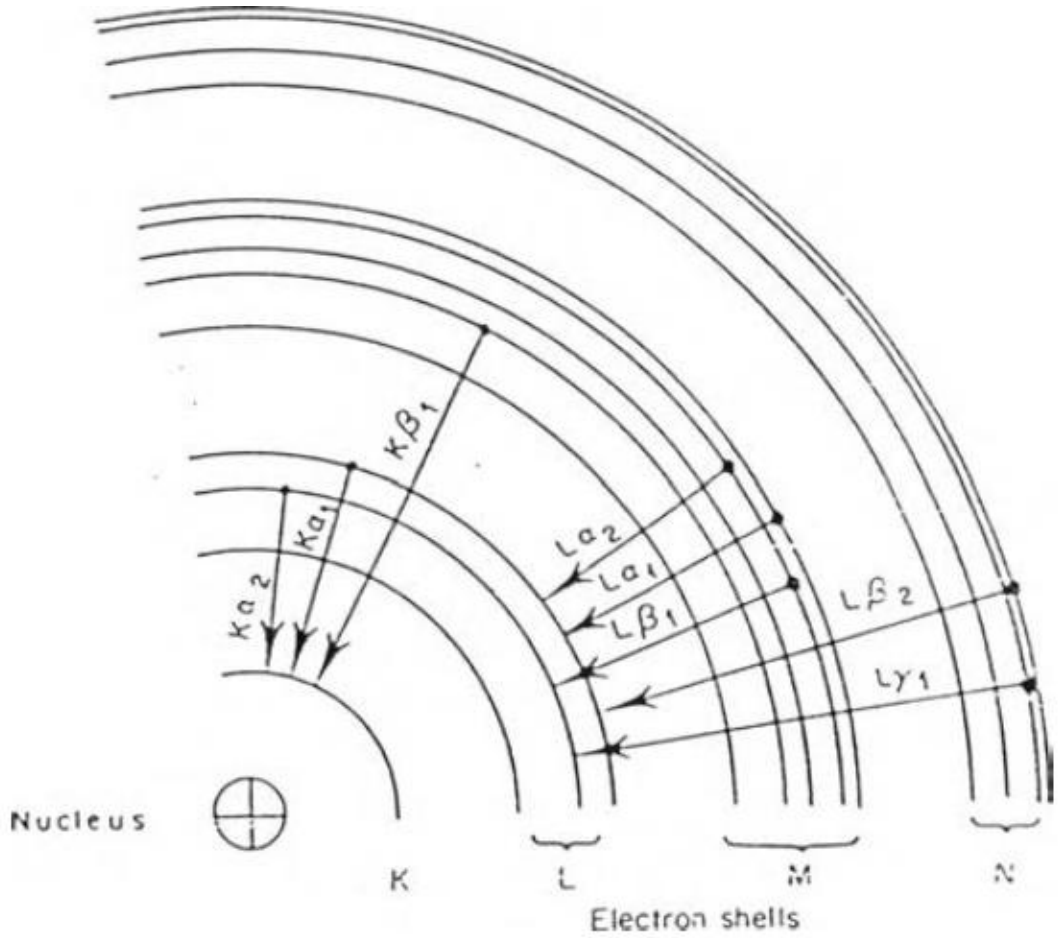


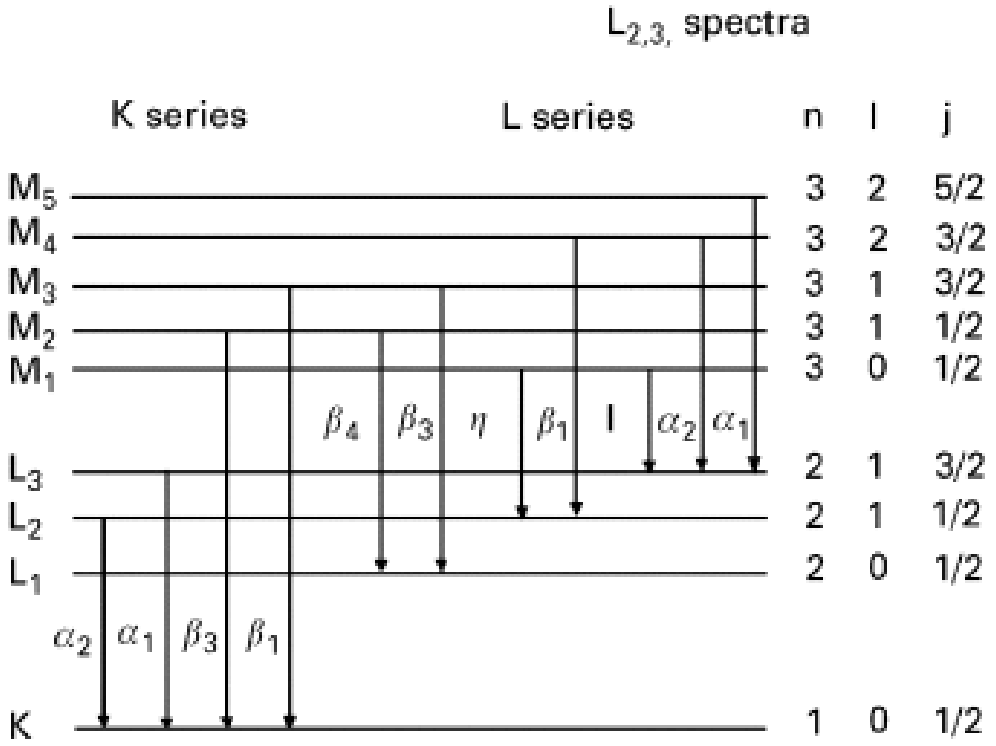
สเปกตรัมรังสีเอกซ์ : Characteristic x-ray series





สเปกตรัมรังสีเอกซ์ : Characteristic x-ray series

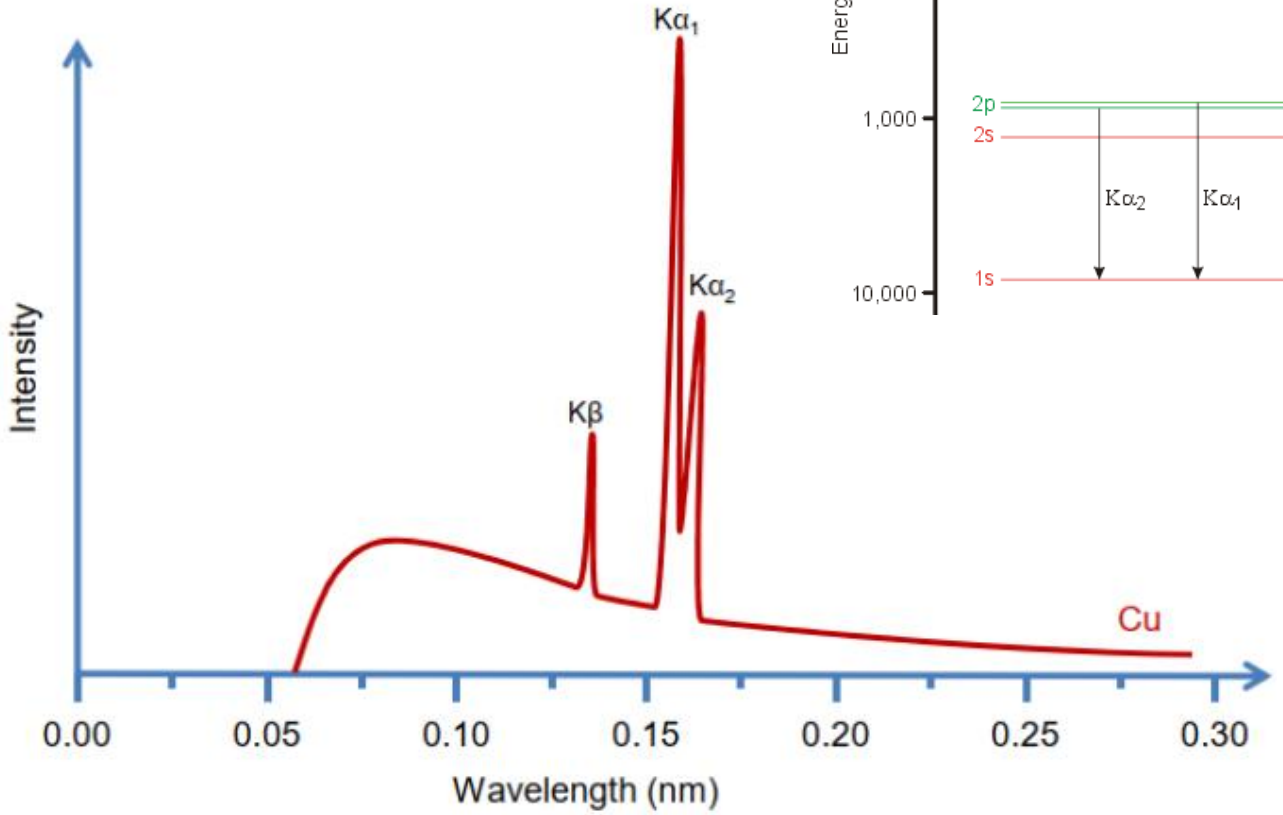


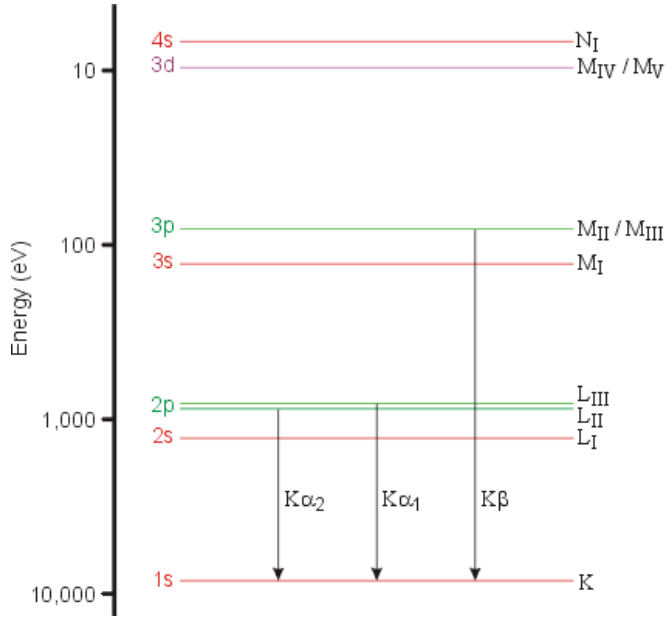


สเปกตรัมรังสีเอกซ์ : Characteristic x-ray series of Cu

หลอดรังสีเอกซ์ที่มี Cu เป็นเป้า จะเห็นเส้นสเปกตรัมที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีความเข้มค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นรังสีเอกซ์กลุ่มชุดชั้น K จำนวน 3 เส้น คือ

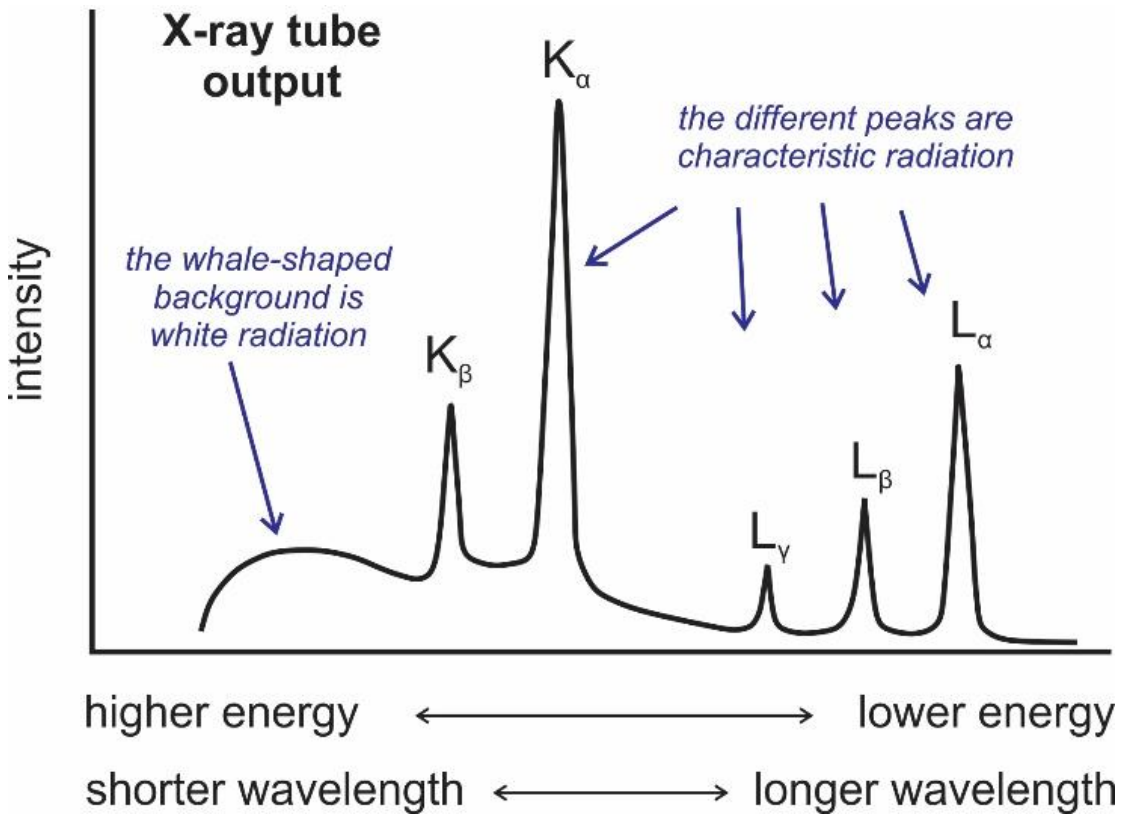
- $K_{\alpha 1}$
- $K_{\alpha 2}$
- K_{β}





สเปกตรัมรังสีเอกซ์ : Characteristic x-ray series

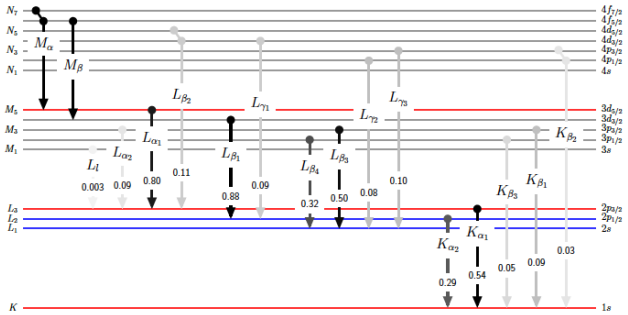
- การเห็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ซ้อนอยู่บนรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ
- ธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า 23 จะให้รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของ K-series line
- ธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 23 จะมีทั้งรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของกลุ่มชั้น K และกลุ่มชั้น L โดยที่รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของกลุ่มชั้น K จะมีพลังงานมากกว่ากลุ่มชั้น L แต่มีความยาวคลื่นสั้นกว่ากลุ่มชั้น L
- แต่ในกรณีธาตุหนัก อาจมีรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของกลุ่ม M และ N แต่มีความยาวคลื่นยาวและมีความเข้มต่ำจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้น้อย



Atomic Data and Energies from
W. T. Elam, B. D. Ravel and J. R. Sieber,
Radiation Physics and Chemistry 63, pp 121-128 (2002)

Common oxidation states from wikipedia.org, after
N. N. Greenwood and A. Earnshaw,
Chemistry of the Elements, 2nd ed. (1997).

All energies in eV.
Emission line strengths are approximate, and vary with element.



Symbol	Z
name	
K edge	K_{α_1} K_{β_5}
L_1 edge	L_{β_6} L_{γ_5}
L_2 edge	L_{β_1} L_{γ_1}
L_3 edge	L_{α_1} L_{β_5}
M_5 edge	M_α M_β
Mass	oxidation states

Na 11 sodium	Mg 12 magnesium																
1071 1040 64 30 30	1303 1254 1302 89 88 88 50 49																
22.9898 +1	24.305 +2																
K 19 potassium	Ca 20 calcium	Sc 21 scandium	Ti 22 titanium	V 23 vanadium	Cr 24 chromium	Mn 25 manganese	Fe 26 iron	Co 27 cobalt	Ni 28 nickel	Cu 29 copper	Zn 30 zinc	Ga 31 gallium	Ge 32 germanium	As 33 arsenic	Se 34 selenium	Br 35 bromine	Kr 36 krypton
3608 3314 3590 379 360 360 297 295	4038 3692 4013 438 413 413 350 346	4492 4093 4464 498 470 470 404 399	4966 4512 4933 561 528 528 460 458 454 452 2	5465 4953 5428 627 590 590 520 518 512 510 2	5989 5415 5947 696 654 654 584 582 574 572 2	6539 5900 6492 769 722 722 650 648 639 637 2	7112 6405 7059 845 792 792 720 718 707 705 2	7709 6931 7649 925 865 866 793 790 778 775 3	8333 7480 8267 1009 942 941 870 866 853 849 4	8979 8046 8904 1097 1022 1019 952 947 933 928 5	9659 8637 9570 1196 1108 1105 1045 1035 1022 1012 10	10367 9251 10267 1299 1199 1196 1143 1124 1116 1098 19	11103 9886 10982 1415 1294 1290 1248 1218 1217 1188 29	11867 10543 11726 1527 1386 1381 1359 1317 1324 1282 42	12658 11224 12497 1652 1491 1486 1474 1419 1434 1379 55	13474 11924 13292 1782 1600 1593 1596 1526 1550 1481 69	14326 12648 14112 1921 1707 1699 1731 1636 1678 1585 94
39.0983 +1	40.08 +2	44.9559 +3	47.88 +3, +4	50.9415 +2, +3, +4, +5	51.996 +2, +3, +6	54.938 +2, +3, +4, +7	55.847 +2, +3	58.9332 +2, +3	58.69 +2	63.546 +1, +2	65.38 +2	69.72 +3	72.59 -4, +2, +4	74.9216 -3, +3, +5	78.96 -2, +2, +4, +6	79.904 -1, +1, +3, +5	83.8
Rb 37 rubidium	Sr 38 strontium	Y 39 yttrium	Zr 40 zirconium	Nb 41 niobium	Mo 42 molybdenum	Tc 43 technetium	Ru 44 ruthenium	Rh 45 rhodium	Pd 46 palladium	Ag 47 silver	Cd 48 cadmium	In 49 indium	Sn 50 tin	Sb 51 antimony	Te 52 tellurium	I 53 iodine	Xe 54 xenon
15200 13396 14961 2065 1826 1816 1864 1751 1804 1692 112	16105 14165 15835 2216 1946 1936 2007 1871 1940 1806 134	17038 14958 16739 2373 2074 2062 2156 1998 2080 1924 156	17998 15775 17668 2532 2202 2188 2307 2126 2223 2044 179	18986 16615 18625 2698 2337 2322 2465 2260 2371 2169 202	20000 17480 19606 2866 2472 2454 2625 2394 2520 2292 228	21044 18367 20626 3043 2625 2595 2793 2535 2677 2423 254	22117 19279 21656 3224 2762 2741 2967 2683 2838 2558 280	23220 20216 22724 3412 2916 2891 3146 2834 3144 3004 2697 3002 307	24350 21177 23818 3604 3072 3044 3330 2990 3328 3173 2838 3171 335	25514 22163 24941 3806 3233 3202 3524 3150 3520 3351 2983 3347 368	26711 23173 26093 4018 3400 3365 3727 3315 3715 3538 3133 3526 405	27940 24210 27275 4238 3573 3535 3938 3487 3920 3730 3286 3712 444	29200 25271 28485 4465 3750 3708 4156 3663 4131 3929 3444 3904 485	30491 26359 29725 4698 3932 3885 4380 3942 4347 4132 3604 4099 528 528 538	31814 27473 30993 4939 4118 4068 4612 4029 4570 4341 3768 4299 573 573 583	33169 28612 32294 5188 4313 4257 4852 4221 4801 4557 3938 4506 619 619 631	34561 29775 33620 5453 4512 4451 5107 4418 5038 4786 4110 4716 676 676 689
85.4678 +1	87.62 +2	88.9059 +3	91.22 +4	92.9064 +4, +5	95.94 +3, +4, +6	97.907 +4, +7	101.07 +3, +4, +6	102.906 +2, +3, +4	106.42 +2, +4	107.868 +1	112.41 +2	114.82 +3	118.69 -4, +2, +4	121.75 -3, +3, +5	127.6 -2, +2, +4, +6	126.905 -1, +1, +3, +5, +7	131.29
Cs 55 cesium	Ba 56 barium	La 57 lanthanum	Hf 72 hafnium	Ta 73 tantalum	W 74 tungsten	Re 75 rhenium	Os 76 osmium	Ir 77 iridium	Pt 78 platinum	Au 79 gold	Hg 80 mercury	Tl 81 thallium	Pb 82 lead	Bi 83 bismuth	Po 84 polonium	At 85 astatine	Rn 86 radon
35985 30973 34982 5714 4711 4643 5359 4618 5279 5012 4285 4932 727 727 740	37441 32194 36378 5989 4926 4852 5624 4828 5531 5247 4466 5154 780 780 796	38925 33442 37797 6266 5138 5057 5891 5038 5786 5483 4647 5378 836 836 853	65351 55790 63244 11271 9164 8906 10739 9023 10519 9561 7899 9341 1662 1646 1700	67416 57535 65222 11682 9488 9213 11136 9343 10898 9881 8146 9643 1735 1712 1770	69525 59318 67244 12100 9819 9525 11544 9672 11288 10207 8398 9951 1809 1775 1838	71676 61141 69309 12527 10160 9845 11959 10010 11685 10535 8652 10261 1883 1840 1906	73871 63000 71414 12968 10511 10176 12385 10354 12092 10871 8911 10578 1960 1907 1978	76111 64896 73560 13419 10868 10510 12824 10708 12512 11215 9175 10903 2040 1976 2052	78395 66831 75750 13880 11235 10853 13273 11071 12941 11564 9442 11232 2122 2048 2128	80725 68806 77982 14353 11610 11205 13734 11443 13381 11919 9713 11566 2206 2118 2203	83102 70818 80255 14830 11992 11560 14209 11824 13831 12284 9989 11906 2295 2191 2281	85530 72872 82573 15347 12390 11931 14698 12213 14292 12658 10269 12252 2389 2267 2363	88005 74970 84939 15861 12795 12307 15200 12614 14766 13035 10551 12601 2484 2342 2444	90526 77107 87349 16388 13211 12692 15711 13023 15247 13419 10839 12955 2580 2418 2526	93105 79291 89803 16939 13637 13085 16244 13446 15744 13814 11131 13314 2683 2499 2614	95730 81516 92304 17403 14067 13485 16785 13876 16252 14214 11427 13681 2787 2577 2699	98404 83785 94866 18049 14511 13890 17337 14315 16770 14619 11727 14052 2892 2654 2784
132.905 +1	137.33 +2	138.906 +3	178.49 +4	180.948 +5	183.85 +4, +6	186.207 +4	190.2 +4	192.22 +3, +4	195.08 +2, +4	196.967 +1, +3	200.59 +1, +2	204.383 +1, +3	207.2 +2, +4	208.98 +3, +5	208.982 -2, +2, +4	209.987 -1, +1	222.018
Fr 87 francium	Ra 88 radium	Ac 89 actinium															
101137 86106 97474 18639 14976 14312 17907 14771 17304 15031 12031 14428 3000 2732 2868	103922 88478 100130 19237 15445 14747 18484 15236 17848 15444 12339 14808 3105 2806 2949	106755 90884 102846 19840 15931 15184 19083 15713 18408 15871 12652 15196 3219 2900 3051															
223.02 +1	226.025 +2	227.028 +3															

B 5 boron	C 6 carbon	N 7 nitrogen	O 8 oxygen	F 9 fluorine	Ne 10 neon											
188 183 13 5 5	284 277 18 7 7	410 392 37 18 18	543 525 42 18 18	607 677 45 20 20	870 849 48 22 22											
10.81 +3	12.011 -4, -3, ..., +2, +3, +4	14.0067 -3, +3, +5	15.9994 -2	18.9984 -1	20.179											
Al 13 aluminum	Si 14 silicon	P 15 phosphorus	S 16 sulfur	Cl 17 chlorine	Ar 18 argon											
1559 1486 1557 118 116 116 73 72	1839 1740 1837 150 148 148 100 99	2146 2010 2140 189 183 182 136 135	2472 2310 2465 231 224 223 164 162	2822 2622 2812 270 260 260 202 200	3206 2958 3190 326 311 310 251 248											
26.9815 +3	28.0855 -4, +4	30.9738 -3, +3, +5	32.06 -2, +2, +4, +6	35.453 -1, +1, +3, +5, +7	39.948											

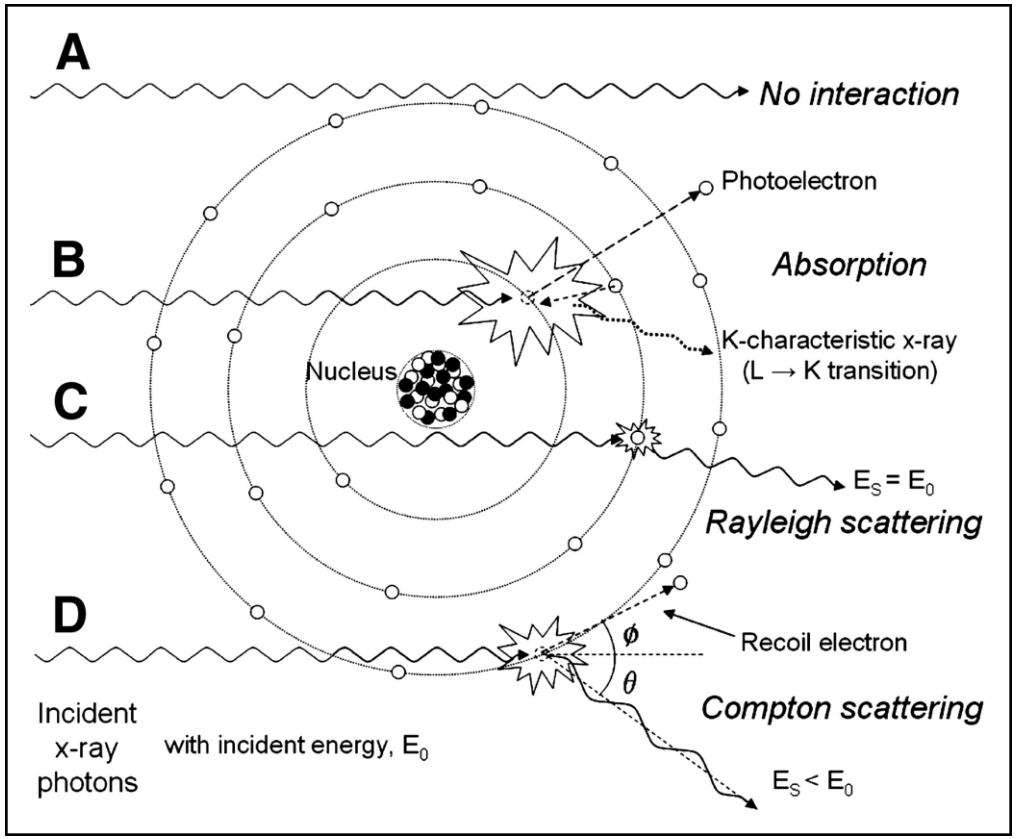
Ce 58 cerium	Pr 59 praseodymium	Nd 60 neodymium	Pm 61 promethium	Sm 62 samarium	Eu 63 europium	Gd 64 gadolinium	Tb 65 terbium	Dy 66 dysprosium	Ho 67 holmium	Er 68 erbium	Tm 69 thulium	Yb 70 ytterbium	Lu 71 lutetium	
40443 34720 39256 6548 5361 5274 6164 5262 6055 5723 4839 5614 884 884 902	41991 36027 40749 6835 5593 5498 6440 5492 6325 5964 5035 5849 929 927 946	43569 37361 42272 7126 5829 5723 6722 5719 6602 6208 5228 6088 980 979 1002	45184 38725 43827 7428 6071 5957 7013 5961 6893 6459 5432 6339 1027 1023 1048	46834 40118 45414 7737 6317 6196 7312 6201 7183 6716 5633 6587 1083 1078 1106	48519 41542 47038 8052 6571 6438 7617 6458 7484 6977 5850 6844 1128 1122 1153	50239 42996 48695 8376 6832 6688 7930 6708 7787 7243 6053 7100 1190 1181 1213	51996 44482 50385 8708 7097 6940 8252 6975 8102 7514 6273 7364 1241 1233 1269	53789 45999 52113 9046 7370 7204 8581 7248 8427 7790 6498 7636 1292 1284 1325	55618 47547 53877 9394 7653 7471 8918 7526 8758 8071 6720 7911 1351 1342 1383	57486 49128 55674 9751 7939 7745 9264 7811 9096 8358 6949 8190 1409 1404 1448	59390 50742 57505 10116 8231 8026 9617 8102 9442 8648 7180 8472 1468 1463 1510	61332 52388 59382 10486 8536 8313 9978 8402 9787 8944 7416 8753 1528 1526 1574	63314 54070 61290 10870 8846 8606 10349 8710 10143 9244 7655 9038 1589 1580 1630	
140.12 +3, +4	140.908 +3, +4	144.24 +3	144.913 +3	150.36 +3	151.96 +2, +3	157.25 +3	158.925 +3, +4	162.5 +3	164.93 +3	167.26 +3	168.934 +3	173.04 +3	174.967 +3	
Th 90 thorium	Pa 91 protactinium	U 92 uranium	Np 93 neptunium	Pu 94 plutonium	Am 95 americium	Cm 96 curium	Bk 97 berkelium	Cf 98 californium	Es 99 einsteinium	Fm 100 fermium	Md 101 mendelevium	No 102 nobelium	Lr 103 lawrencium	
109651 93351 105605 20472 16426 15642 19693 16202 18981 16300 12968 15588 3332 2990 3149	112601 95868 108427 21105 16931 16104 20314 16703 19571 16733 13291 15990 3442 3071 3240	115606 98440 111303 21757 17454 16575 20948 17220 20170 17166 13614 16388 3552 3164 3340	118669 101059 114234 22427 17992 17061 21600 17751 20784 17610 13946 16794 3664 3250 3435	121791 103734 117228 23104 18541 17557 22266 18296 21420 18057 14282 17211 3775 3339 3534	124982 106472 120284 23808 19110 18069 22952 18856 22072 18510 14620 17630 3890 3429 3635	128241 109271 123403 24526 19688 18589 23651 19427 22735 18970 14961 18054 4009 3525 3740	131556 112121 126580 25256 20280 19118 24371 20018 23416 19435 15308 18480 4127 3616 3842	134939 115032 129823 26010 20894 19665 25108 20624 24117 19907 15660 18916 4247 3709 3946						
232.038 +4	231.036 +5	238.051 +4, +6	237.048 +3, +4, +5	239.052 +3, +4, +5	243.061 +3, +4, +5	247.07 +3	247.07 +3, +4	251.08 +3						

Marie Sklodowska Curie

https://xrayabsorption.org/xraytable
Version 4, 2020-April-19

อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์

1) การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก (photoelectric absorption) เกิดเมื่อรังสีเอกซ์ชนกับอิเล็กตรอนในชั้นในของอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม (เกิดการไอออนไนซ์)
2) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) เกิดเมื่อรังสีเอกซ์ชนกับอิเล็กตรอนชั้นนอก ทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีและอิเล็กตรอน พลังงานบางส่วนของรังสีเอกซ์จะถูกถ่ายโอนไปยังอิเล็กตรอน ทำให้รังสีเอกซ์ที่เหลือมีพลังงานลดลง
3) การกระเจิงแบบเรย์ไลย์ (Rayleigh or coherent scattering) เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่น รังสีเอกซ์ชนกับอะตอมโดยไม่สูญเสียพลังงาน แต่มีการเบี่ยงเบนของทิศทาง

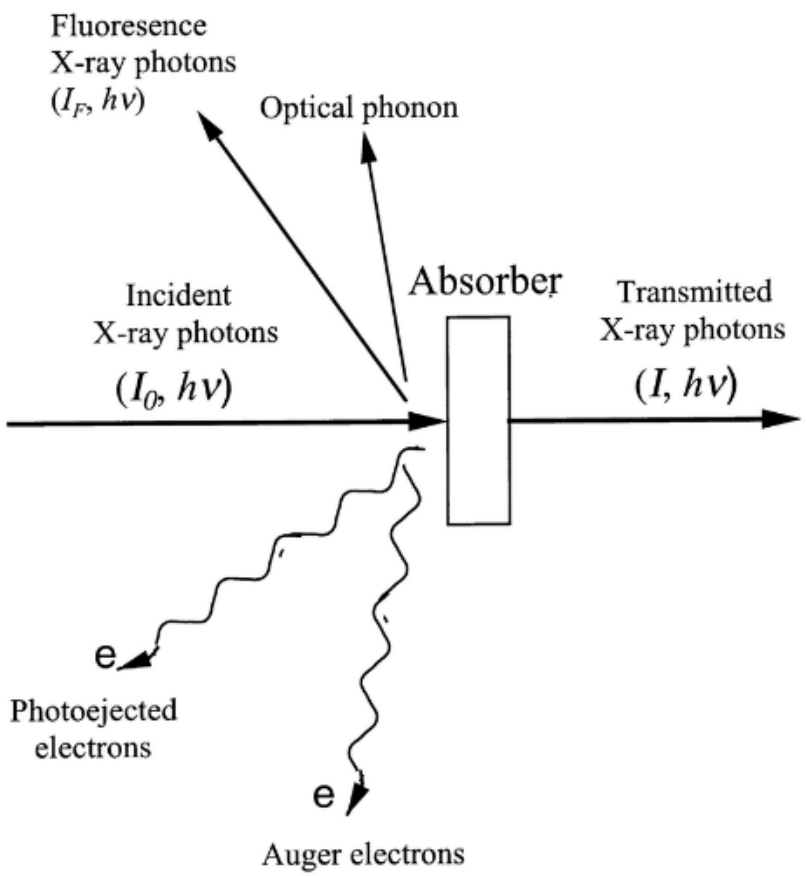


https://tech.snmjournals.org/content/33/1/3

อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอกซ์มีลักษณะคล้ายรังสีแกมมา ดังนั้นเมื่อรังสีเหล่านี้ผ่านเข้าไปในวัตถุจะเกิดปรากฏการณ์ เช่น

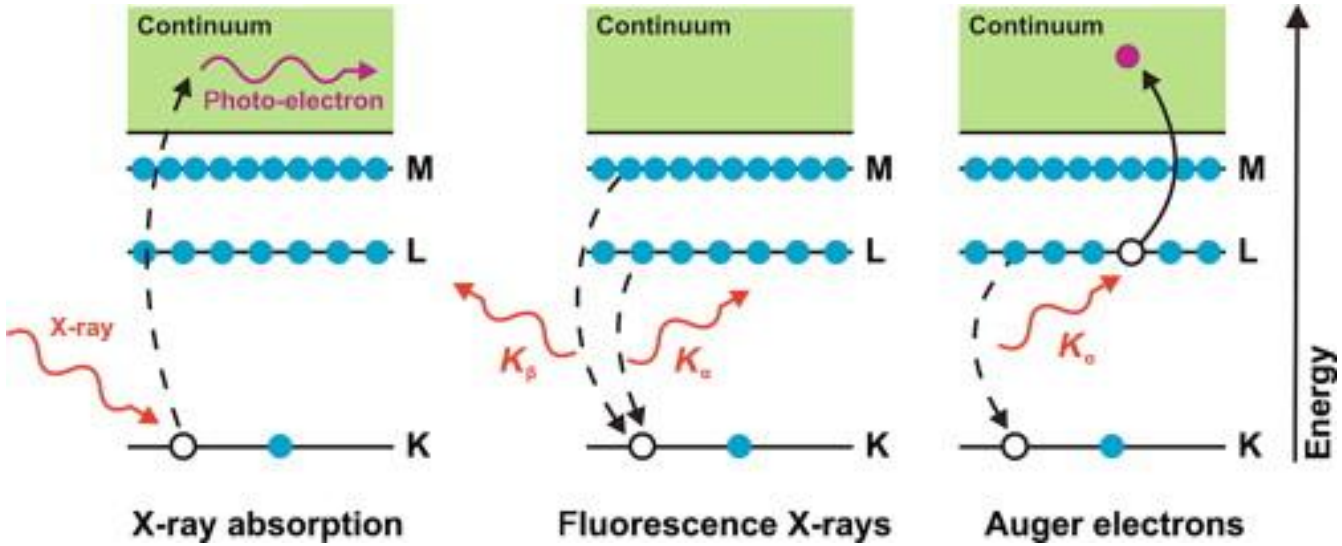
- การดูดกลืน (absorption)
- การเลี้ยวเบน (diffraction)
- การเรืองรังสีเอกซ์ (fluorescence)
- การไอออนไนเซชัน



อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์ : Absorption

- โฟตอนของรังสีเอกซ์ถูกดูดกลืนโดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานใกล้กับนิวเคลียส เช่น ระดับ 1s หรือ 2p
- การดูดกลืนจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพลังงานของโฟตอนมีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสต่ออิเล็กตรอน (binding energy)

- หาก binding energy สูงกว่าพลังงานโฟตอนของรังสีเอกซ์ อิเล็กตรอนจะไม่ดูดกลืนพลังงาน
- หาก binding energy ต่ำกว่า อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกจากอะตอมและพลังงานส่วนเกินจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมา



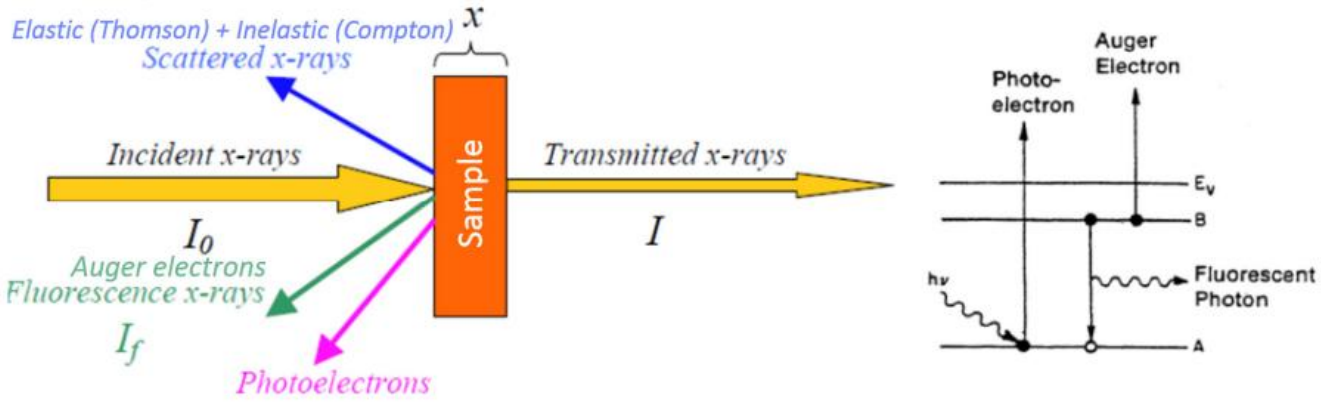
อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์ : Absorption

- การดูดกลืนรังสีเอกซ์ มักพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (μ) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความน่าจะเป็นที่รังสีเอกซ์จะถูกดูดกลืน
- อธิบายได้ด้วยกฎของเบียร์ (Beer's Law) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ก่อนผ่านตัวอย่าง (I_0) ความหนาของตัวอย่าง (t) และความเข้มของรังสีที่ผ่านออกมาหลังจากการดูดกลืน (I)

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

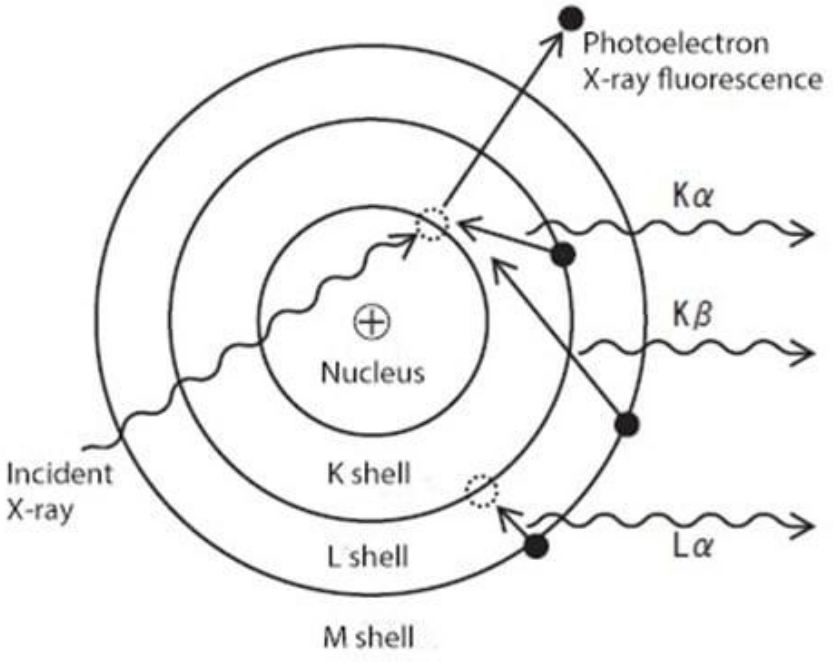
เมื่อ

I_0 คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ตกกระทบ
I คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่าน
t คือ ความหนาของตัวอย่าง
μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน



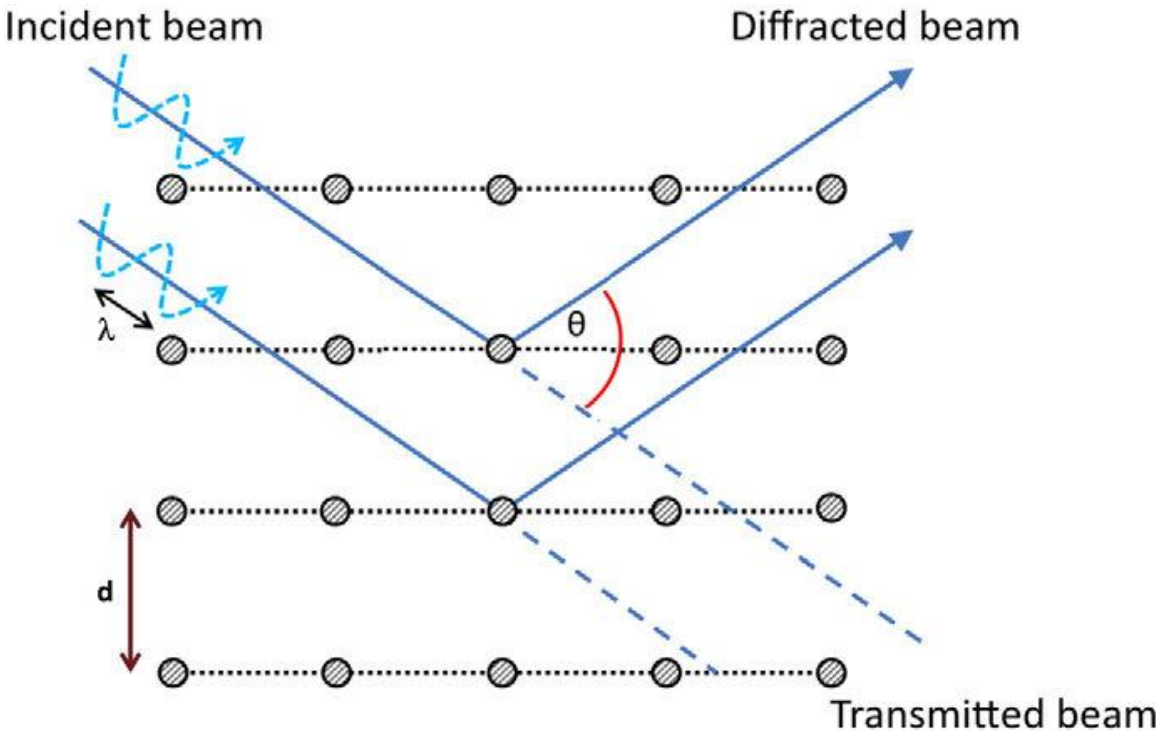
อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์ : Fluorescence

- อิเล็กตรอนในวงโคจร K และ L เกิดไอออไนซ์ (ionization) โดยการยิงรังสีปฐมภูมิ (primary radiation) เข้าไป อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)
- การเกิดโฟโตอิเล็กตรอนทำให้เกิดที่ว่างขึ้น (vacancy) ซึ่งจะอาศัยช่วงเวลาที่เร็วมาก และจะมีผลทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปซึ่งมีพลังงานสูงกว่าเข้ามาแทนที่พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า **รังสีเอกซ์เรือง** (fluorescent X-rays) และเรียกกระบวนการการเกิดรังสีเอกซ์เรืองว่า **การเรืองรังสีเอกซ์** (X-ray fluorescence)



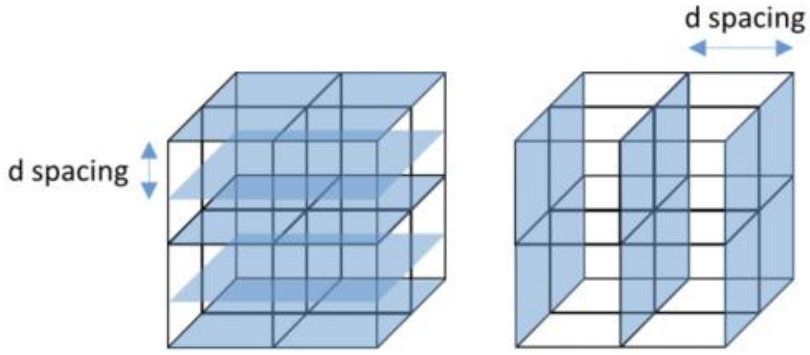
อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์ : Diffraction

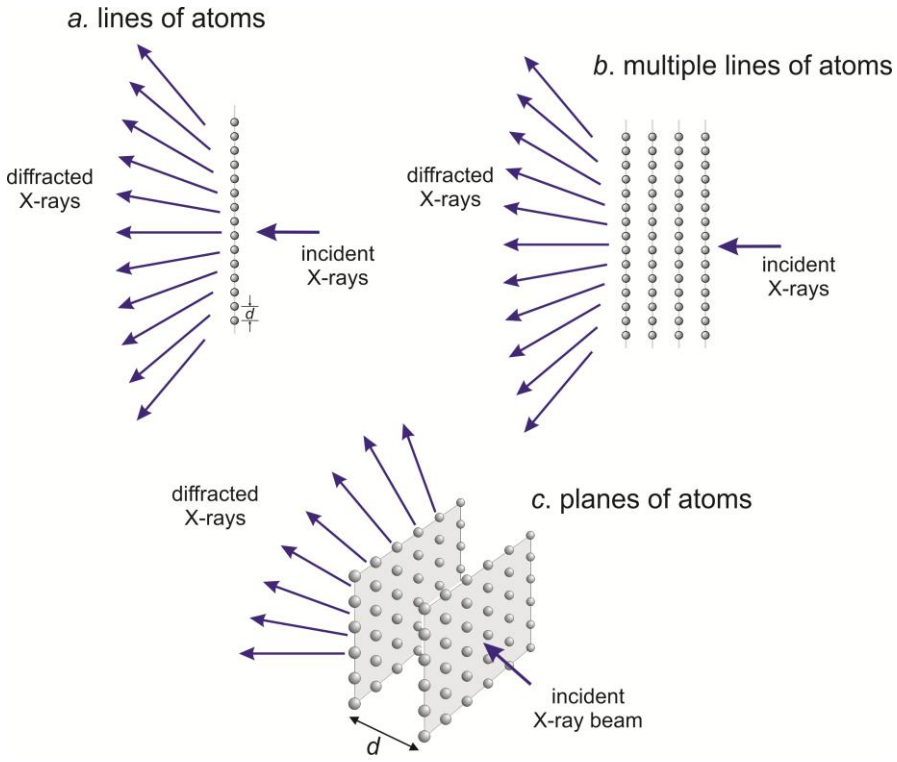
- การเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นคุณลักษณะพื้นฐานในการศึกษาความเป็นผลึกและลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอม และองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในโครงสร้างผลึกของสาร
- รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ จะมีความจำเพาะซึ่งสามารถใช้ในการระบุอัตลักษณ์ของผลึกของสารแต่ละชนิด



อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์ : Diffraction

- ภายในระบบผลึกหนึ่ง ๆ ประกอบด้วยระนาบผลึก (lattice planes) เป็นบริเวณที่พบอะตอมภายในโครงสร้างผลึก
- ระนาบผลึกในระบบเดียวกัน จะเรียงขนานกันอย่างเป็นระเบียบ โดยมีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกชนิดเดียวกัน (d–spacing) เป็นค่าที่แน่นอนและมีความจำเพาะในแต่ละชนิดผลึก
- เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบผลึก จะพบการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้
- การกระเจิงทำให้เกิดการแทรกสอดกันแบบเสริม ซึ่งทำให้สามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Bragg angle, or theta) ที่มีค่าจำเพาะต่อระยะห่างระหว่างระนาบผลึกตามสมการของแบรกก์ (Bragg's equation)





Diffraction : Bragg's equation

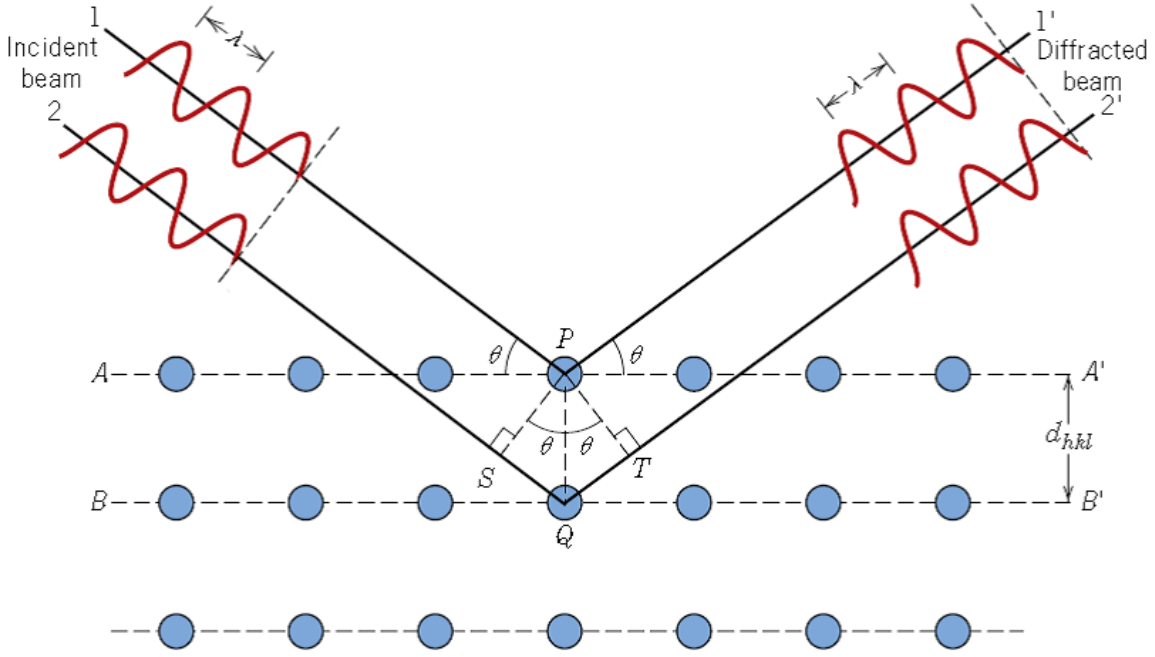
$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

เมื่อ d = ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

θ = มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์

n = ค่าตัวเลขจำนวนเต็มบวกใด ๆ เช่น 1, 2, 3....

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

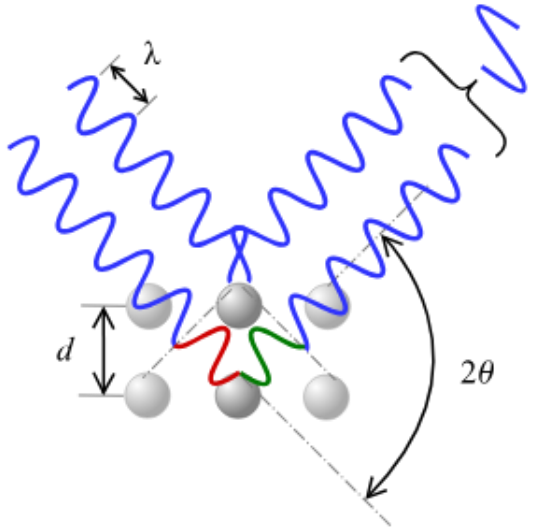


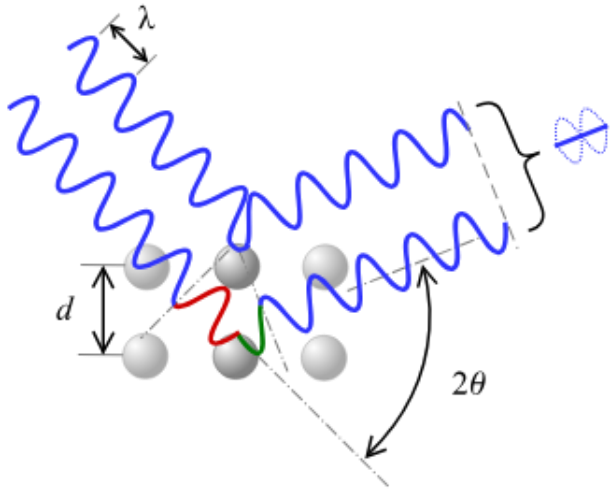
Diffraction : Bragg's equation

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบนระนาบของผลึกในแนวทำมุม θ กับแนวระนาบของอะตอมสองแนวที่อยู่ชิดกัน รังสีทั้งสองที่กระเจิงออกไปด้วยมุม θ เท่าเดิมจะไปรวมกันทำให้เกิดการการแทรกสอดแบบเสริมหรือแบบหักล้างกัน ขึ้นยู่กับความแตกต่างความยาวของทางเดินรังสี

ถ้าระยะห่างระหว่างอะตอม (d) เท่ากัน จะได้ว่าความแตกต่างของความยาวทางเดินรังสีเท่ากับจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์โดยคลื่นกระเจิงสองแนวจะเกิดการรวมกันแบบเสริม

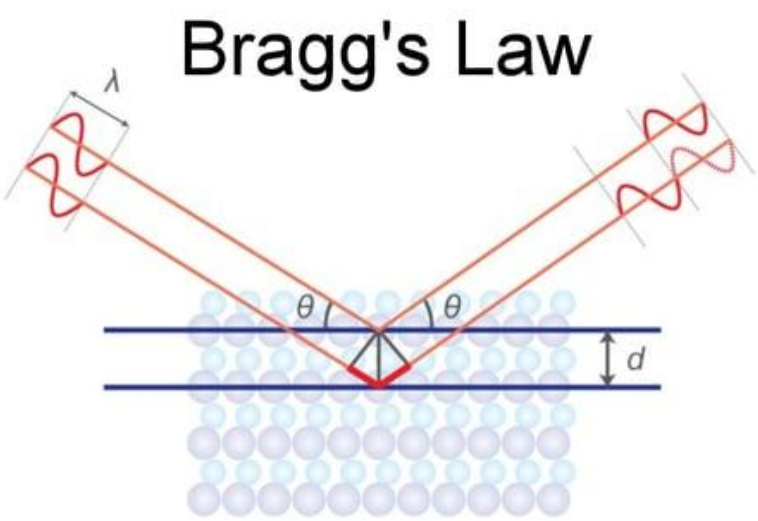
$$n\lambda = 2d\sin\theta$$





เทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

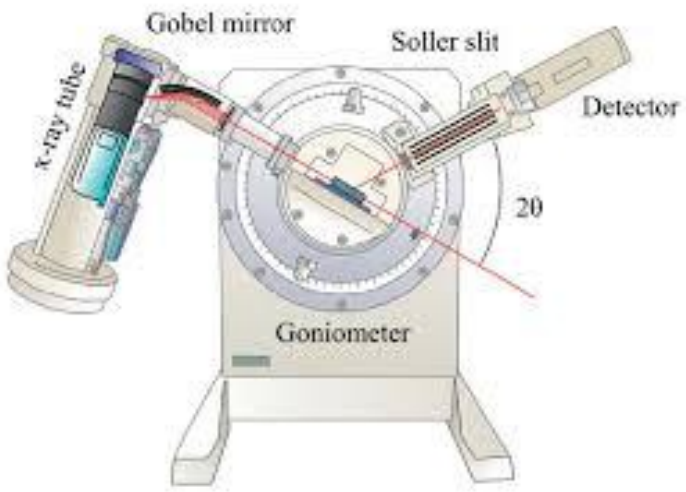
- เทคนิคการวิเคราะห์อาศัยหลักการเลี้ยวเบน (การกระเจิง) รังสีเอกซ์
- เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง
- อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน
- เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ รังสีเอ็กซ์ บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ
- นิยมใช้กันอย่างแพร่ หลายในกลุ่มนักเคมีวิทยา วัสดุศาสตร์ธรณีวิทยา และโลหะวิทยา

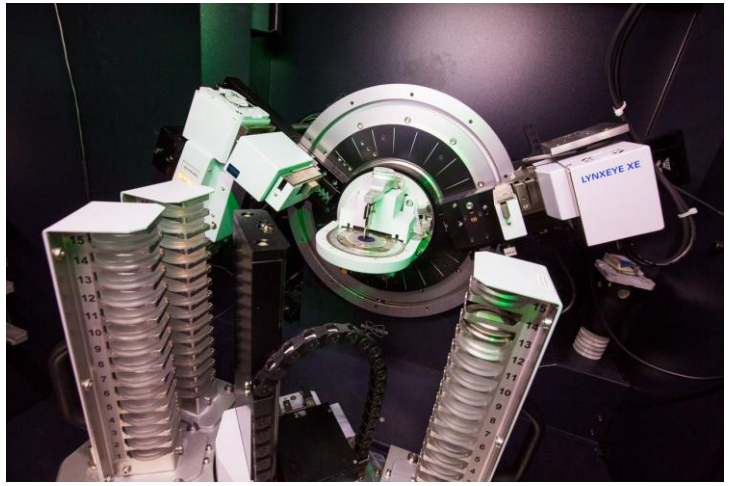


$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$$

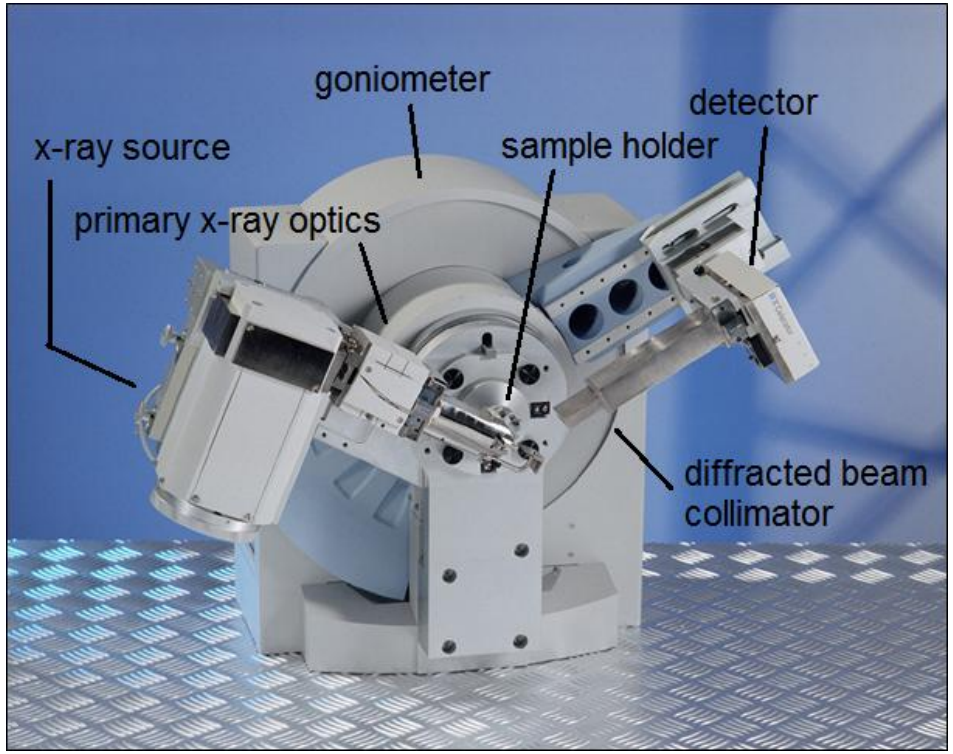
XRD : *หลักการ*

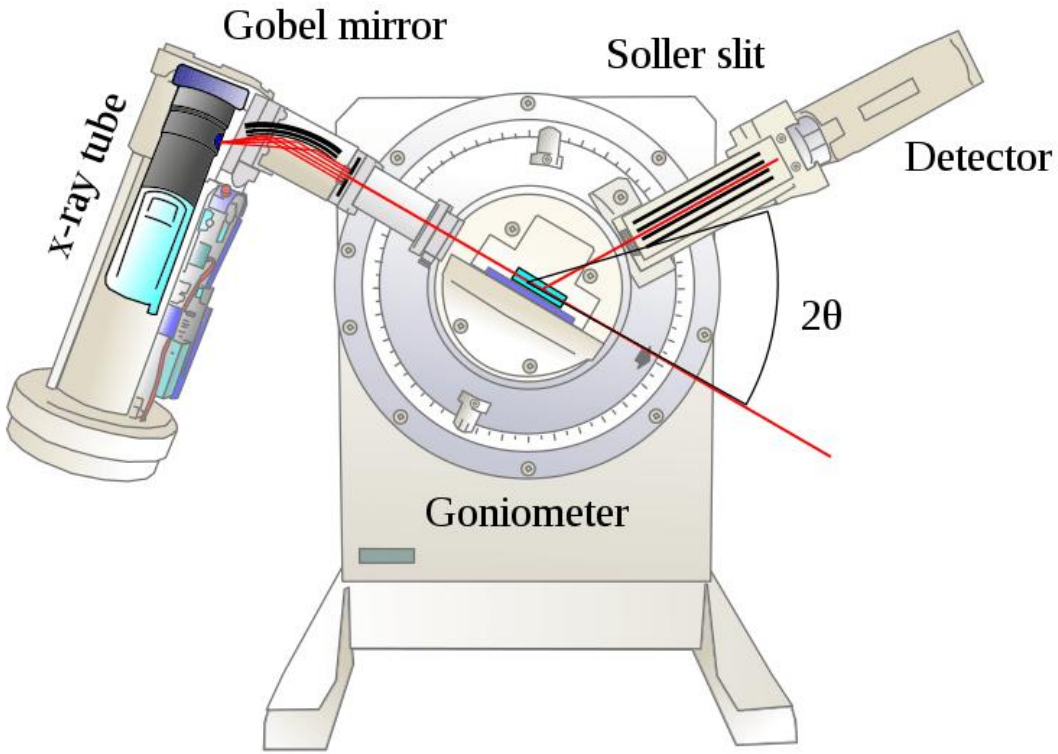
- เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystalline) ของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบผง และแบบฟิล์มบาง
- ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกและระนาบผลึกของสาร
- โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน
- สารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอมสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบเสมือนลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน





XRD : *Instruments*

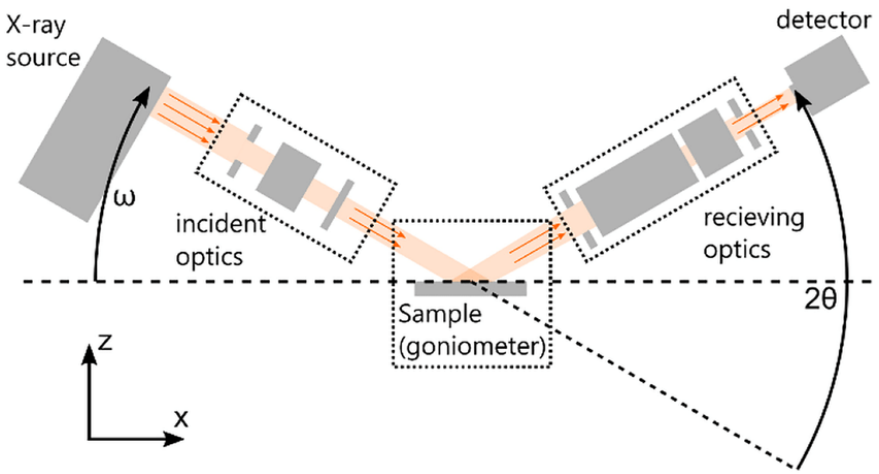


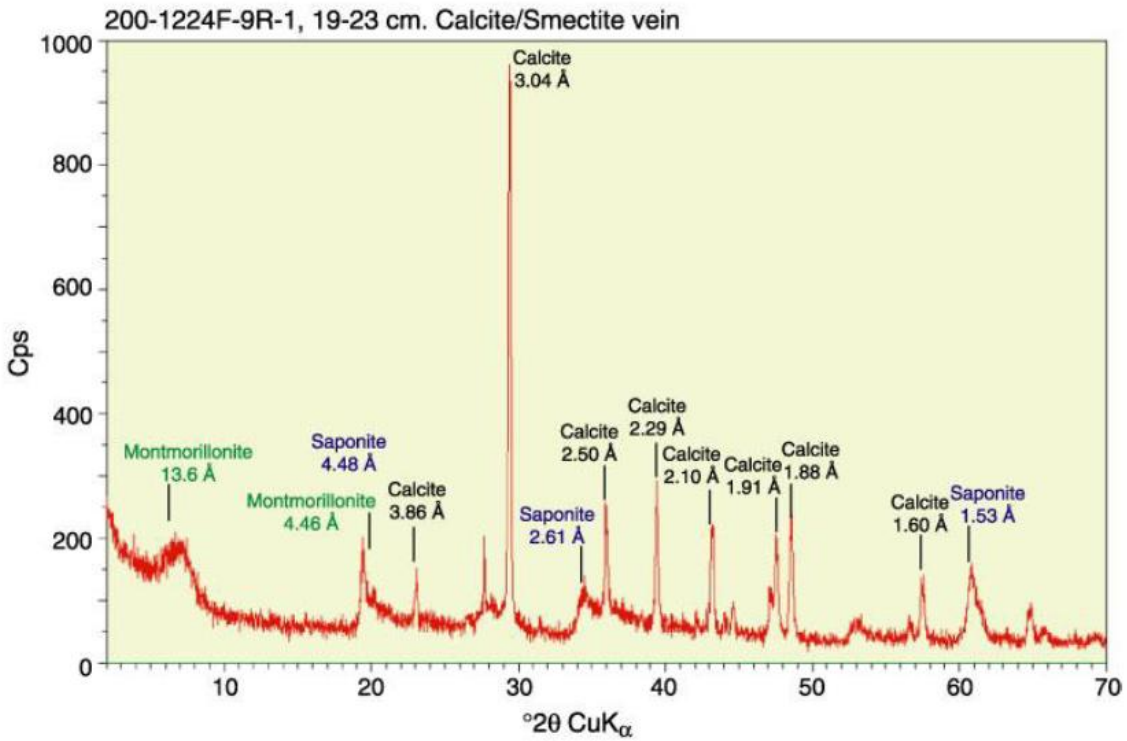


XRD : *Instruments*

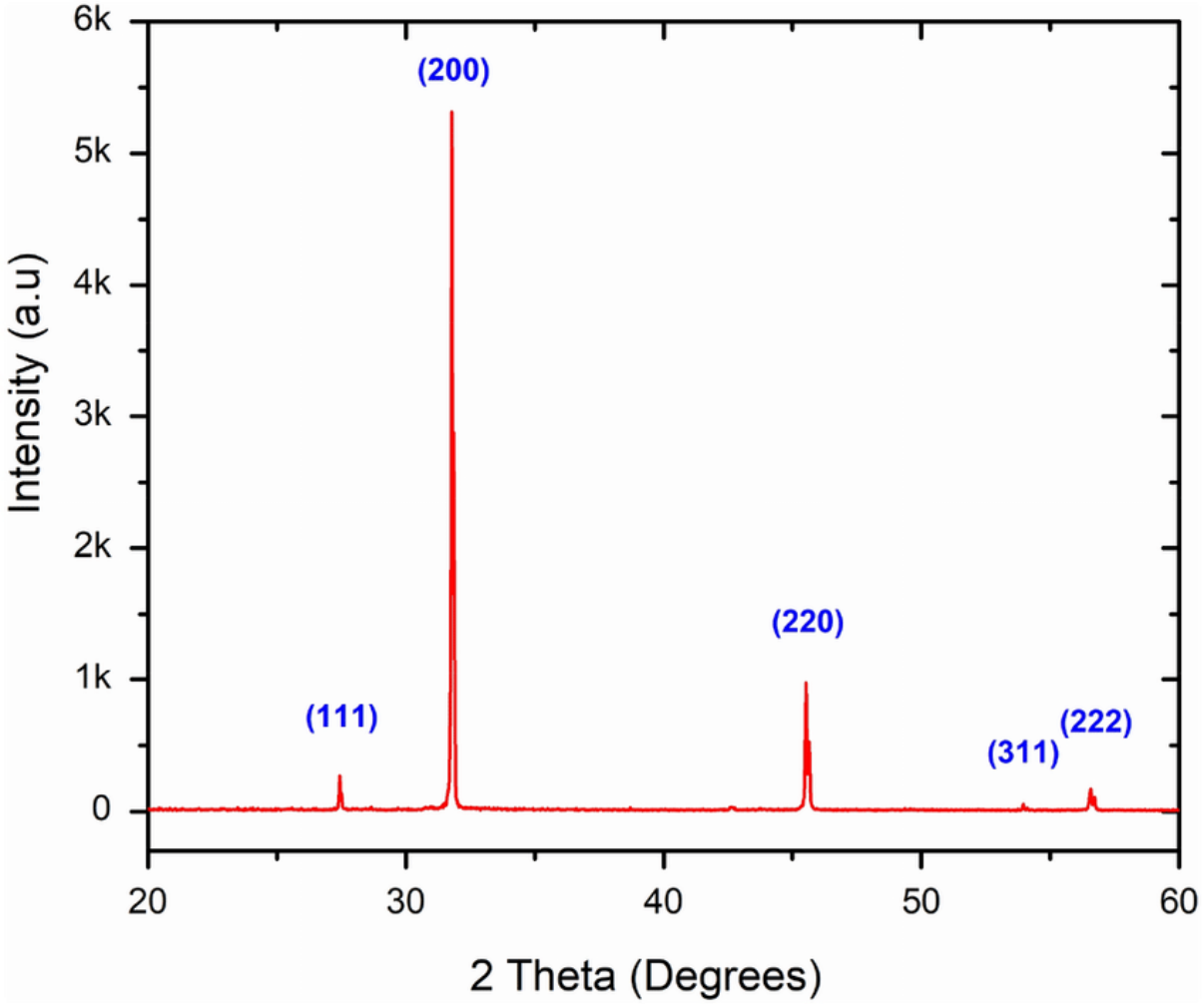
- ภายในเครื่องประกอบ ด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์
  - ทำให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของ อะตอมทองแดงหลุด
  - เกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L-shell และ M-shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น
  - เกิดการคายรังสีเอ็กซ์ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์

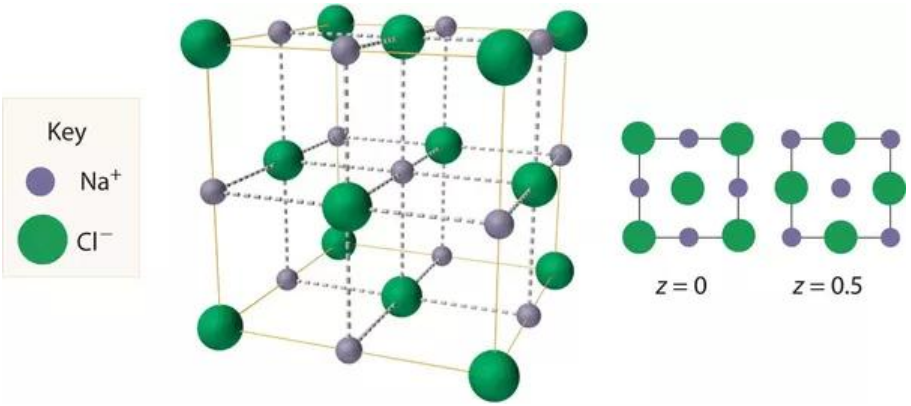
- รังสีเอกซ์แผ่ไปยังสารตัวอย่าง
- อุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์ (detector) ตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสาร



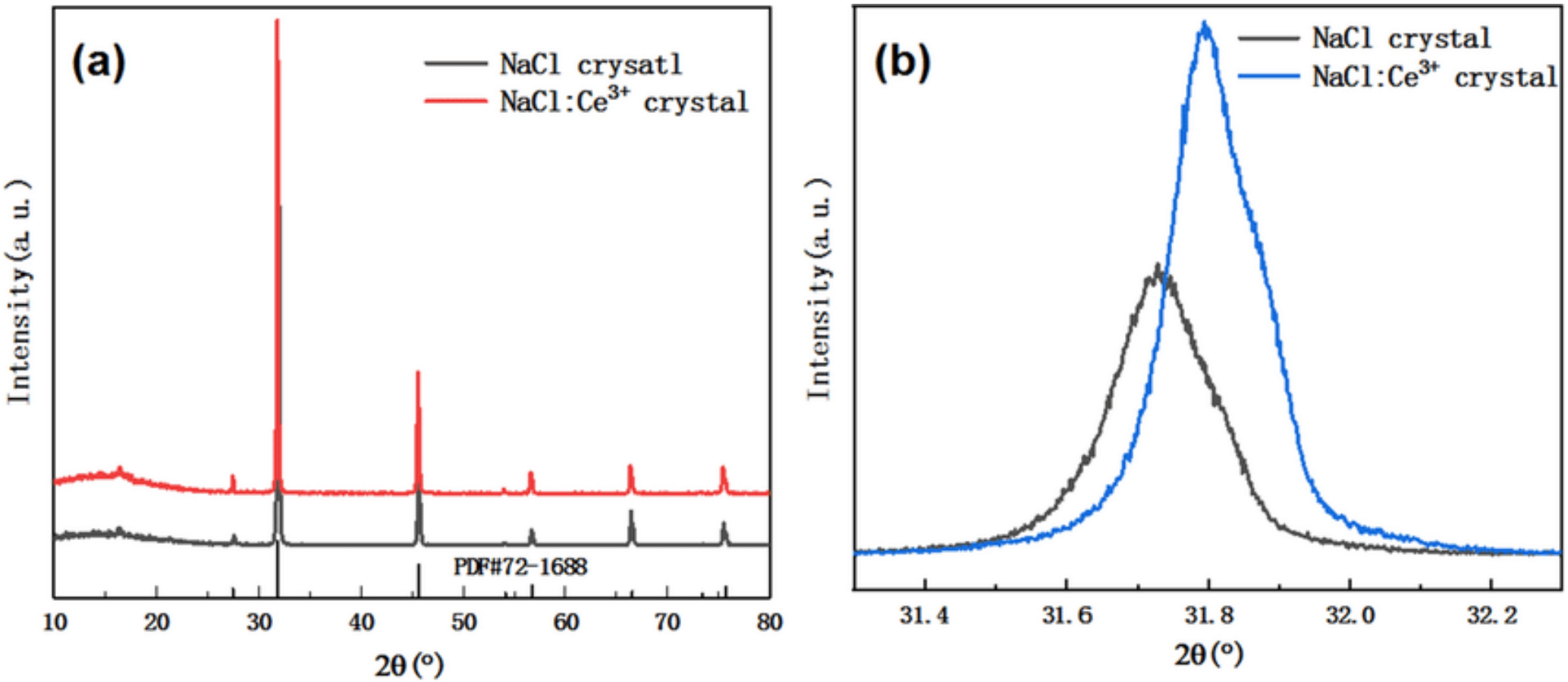


XRD : *X-ray diffraction (XRD) pattern of NaCl salt*





XRD : *XRD Patterns*



(a) The XRD patterns of NaCl:Ce^{3+} and pure NaCl crystals.
(b) Magnification of the main peak of NaCl:Ce^{3+} and pure NaCl crystals.

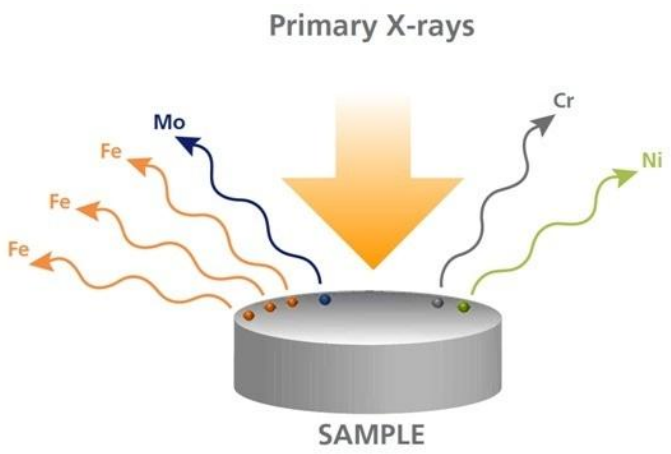
เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

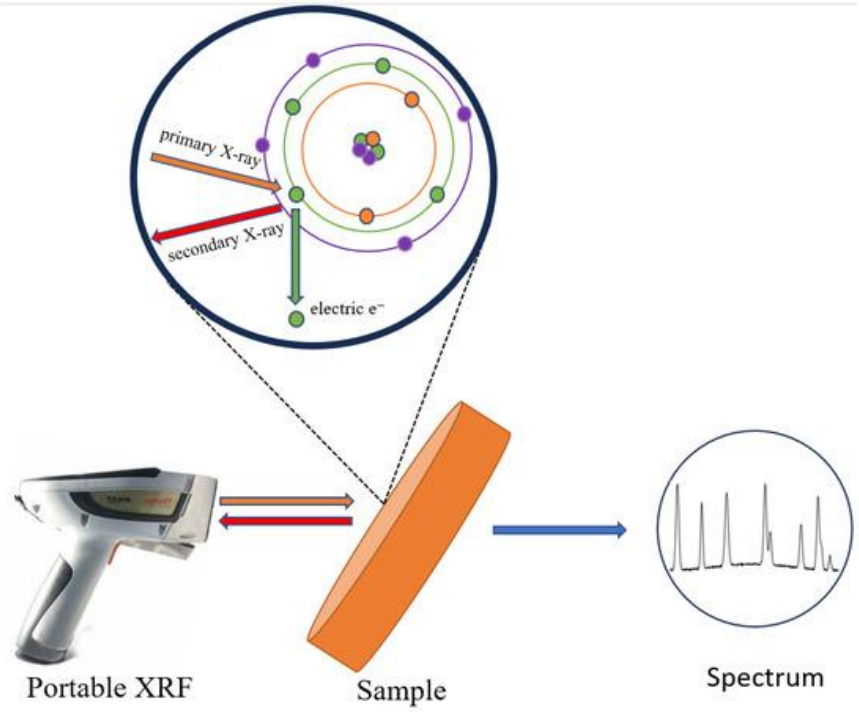
เทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีที่ใช้รังสีเอกซ์เพื่อระบุองค์ประกอบของสารต่าง ๆ

- เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ชนิดของธาตุ (Qualitative) และปริมาณธาตุ (Quantitative)
- ถูกใช้อย่างแพร่หลายในหลายสาขา เช่น การวิเคราะห์ธรณีวิทยา การตรวจสอบคุณภาพวัสดุ การวิเคราะห์สิ่งแวดล้อม การศึกษาโบราณคดี
- เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่างได้ และสามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

XRF : *หลักการวิเคราะห์*

- การเกิดรังสีเอกซ์จากหลอดรังสีเอกซ์
- การกระตุ้นตัวอย่าง (Sample Excitation) รังสีเอกซ์พลังงานสูงถูกฉายไปชนกับตัวอย่าง อะตอมในตัวอย่างจะได้รับพลังงาน
- การกระตุ้นการปล่อยฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence Emission) ออกมา
- รังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ถูกปล่อยออกมาจะถูกเก็บรวบรวมโดยเครื่องตรวจวัด
- สัญญาณที่ตรวจจับได้จะถูกประมวลผลเพื่อกำหนดองค์ประกอบของธาตุในตัวอย่าง

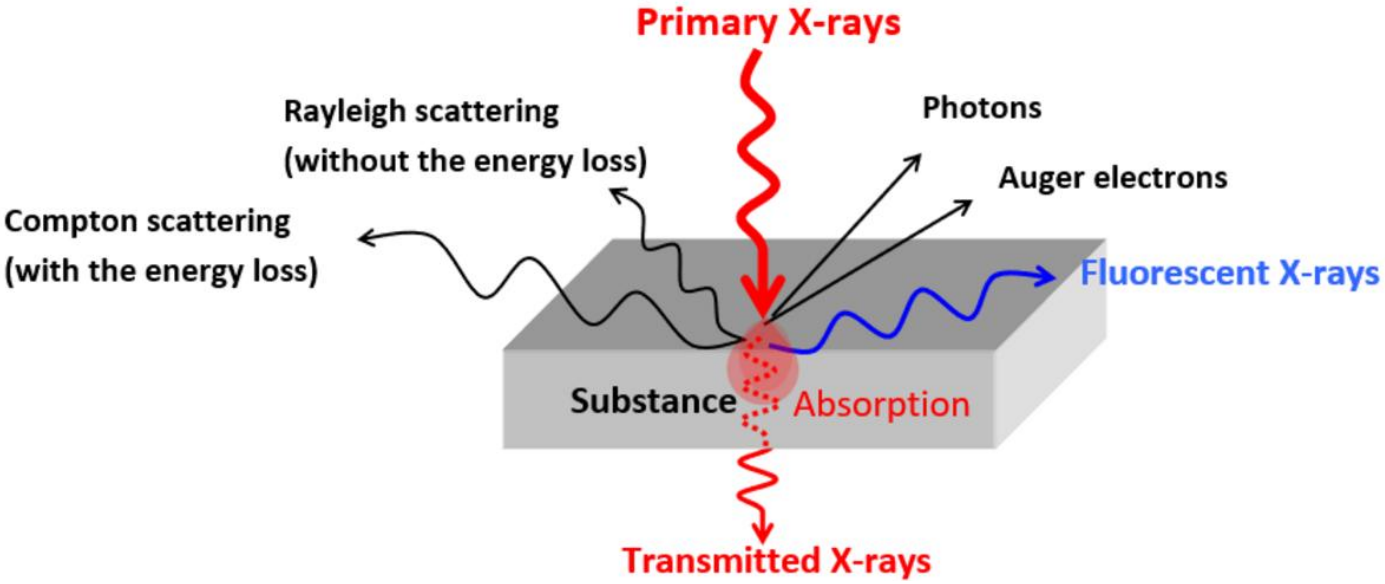




XRF : *หลักการวิเคราะห์*

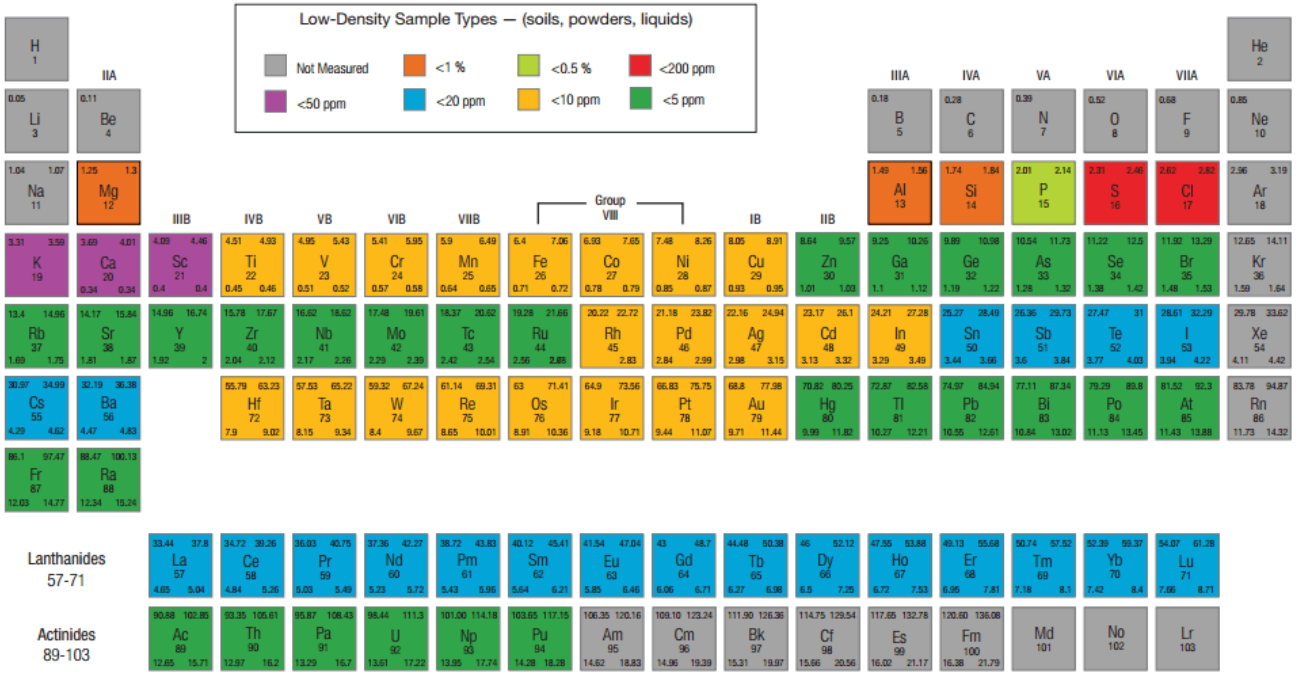
เมื่อวัสดุได้รับการกระตุ้นจาก X-rays ที่มีพลังงานสูงมากพอที่จะกระตุ้นให้ Electron (ชั้น K) หลุดออกมาจากวงโคจร

- อิเล็กตรอนจากชั้นวงนอกเลื่อนลงมาเติมช่องว่าง โดยอิเล็กตรอนชั้นนอกจะมีการปล่อยพลังงานส่วนหนึ่งออกมาในรูปของSecondary X-ray
- ยิง X-ray ที่มีพลังงานเพียงพอไปกระตุ้นชิ้นงานโดยตรง
- Secondary X-ray ถูกปล่อยออกมาจากชิ้นงานไปสู่ X-ray Detector
- X-ray Detector จะวัดค่า Energy Wavelength ของ K_α และ K_β เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน



XRF : *หลักการ*

- วิเคราะห์ธาตุได้ในช่วงอะตอมตั้งแต่ธาตุที่มีเลขอะตอม 11 (Na)–92 (U)
- ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอม<11 : H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne: Light Element (LE)
    - เนื่องจากพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุเลขอะตอม<11 ซึ่งมีค่าต่ำมาก ส่งผลให้เครื่องตรวจจับต้องมีความไวสูงและต้องมีการจัดการกับสัญญาณรบกวนอย่างดี
    - Li ,Be, B เลขอะตอม 3, 4, 5 อาจวิเคราะห์ได้โดยต้องใช้อุปกรณ์พิเศษหรือเทคนิคเสริม



XRF : *ระบบและส่วนประกอบเครื่อง XRF*

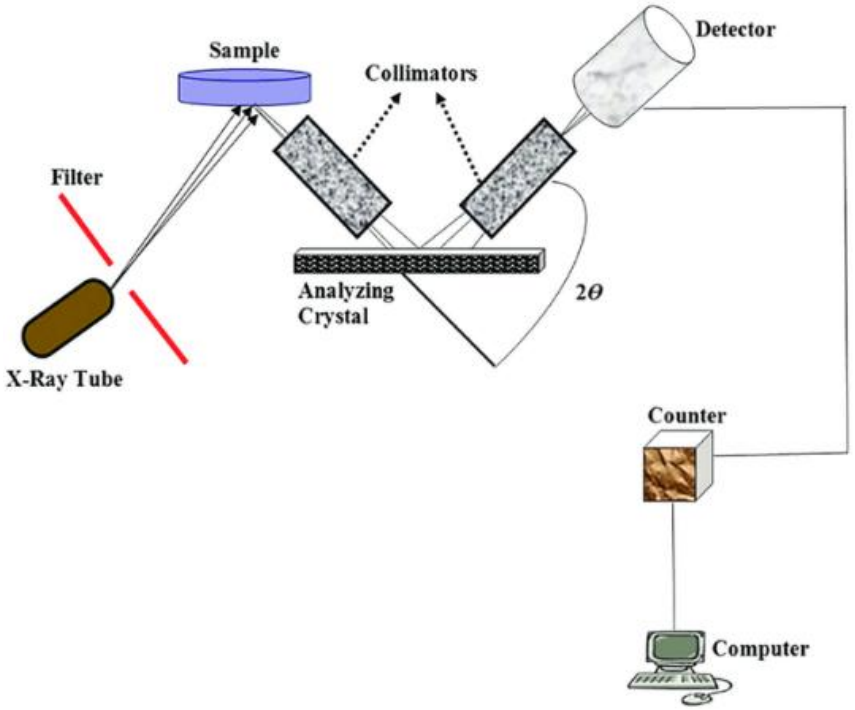
1) **ระบบกระจายความยาวคลื่น (wavelength dispersive X-ray fluorescence, WDX)**

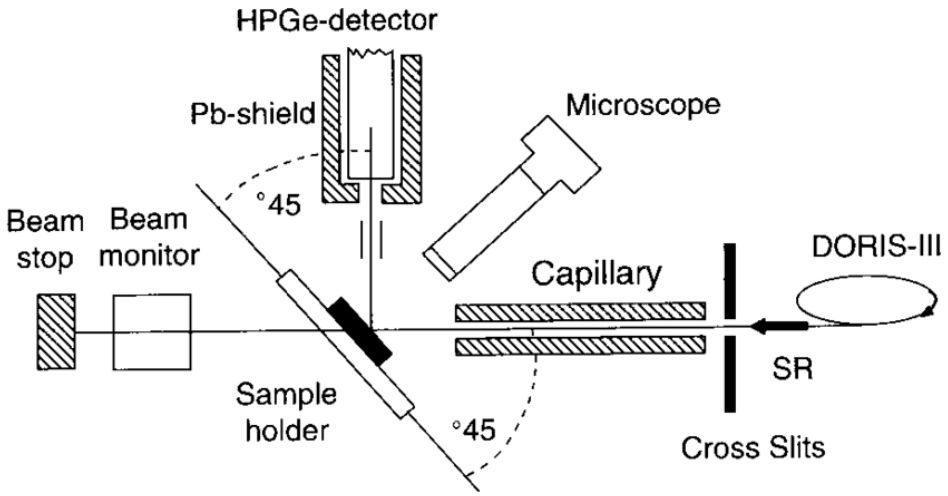
- เป็นระบบที่มีการแจกแจงพลังงานของรังสีเอกซ์ในผลึกเดี่ยว (single crystal) เช่น ลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) ซึ่งทำหน้าที่เลี้ยวเบนแยกพลังงานของรังสีเอกซ์เรืองที่ตกกระทบผลึกตามหลักการของคลื่นแบบเสริมและคลื่นแบบหักล้าง
- คลื่นที่สะท้อนออกจากผลึกจะเสริมกันเมื่อค่าความยาวคลื่น (λ) ของรังสีเอกซ์มีความสัมพันธ์กับมุมตกกระทบหรือมุมสะท้อนตามสมการของแบรกก์

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

XRF : *ระบบและส่วนประกอบเครื่อง XRF*

1) ระบบกระจายความยาวคลื่น (wavelength dispersive X-ray fluorescence, WDX)

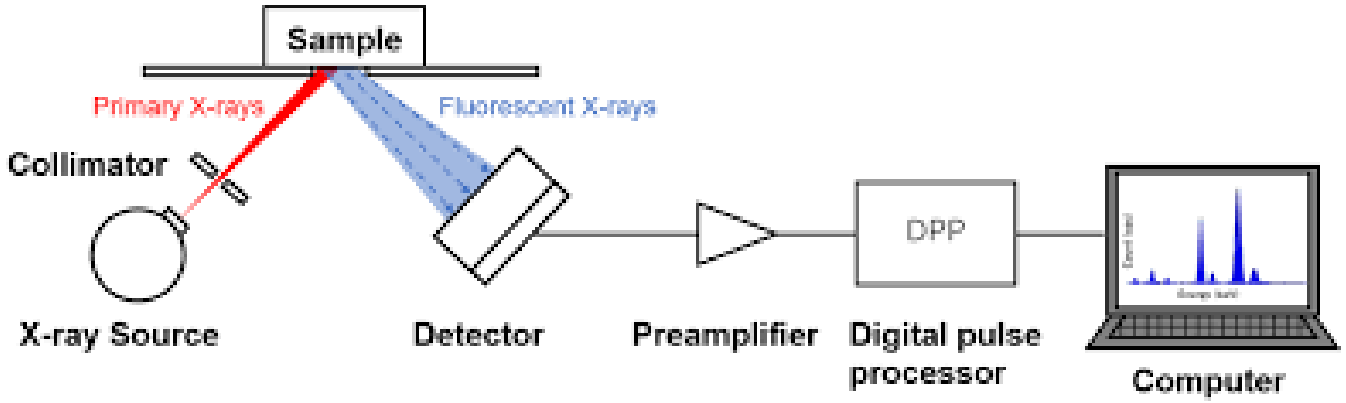




XRF : *ระบบและส่วนประกอบเครื่อง XRF*

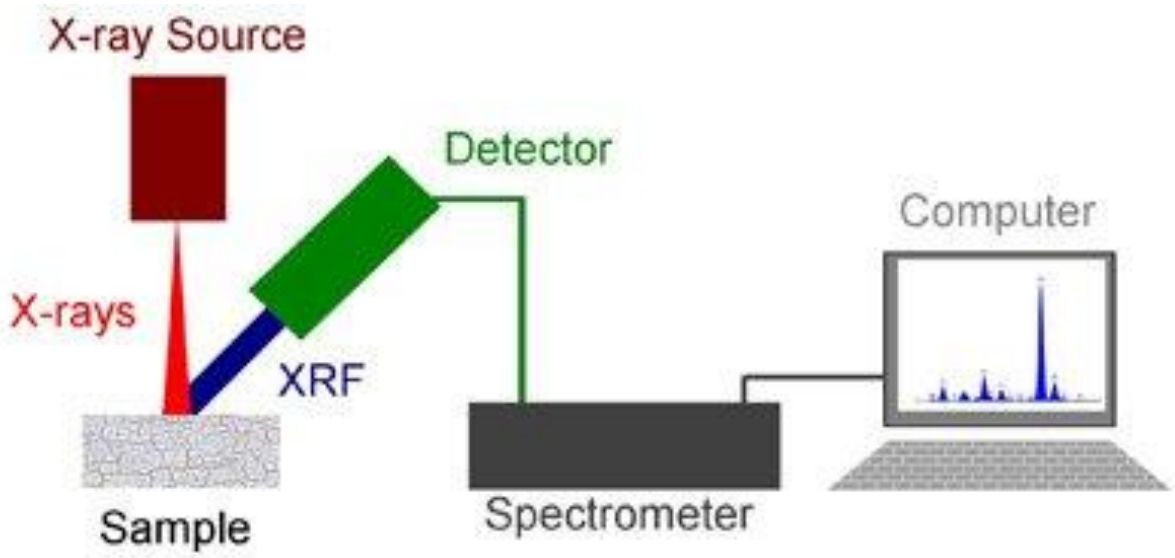
2) ระบบวิเคราะห์แบบกระจายพลังงาน (energy dispersive X-ray fluorescence, ED-XRF)

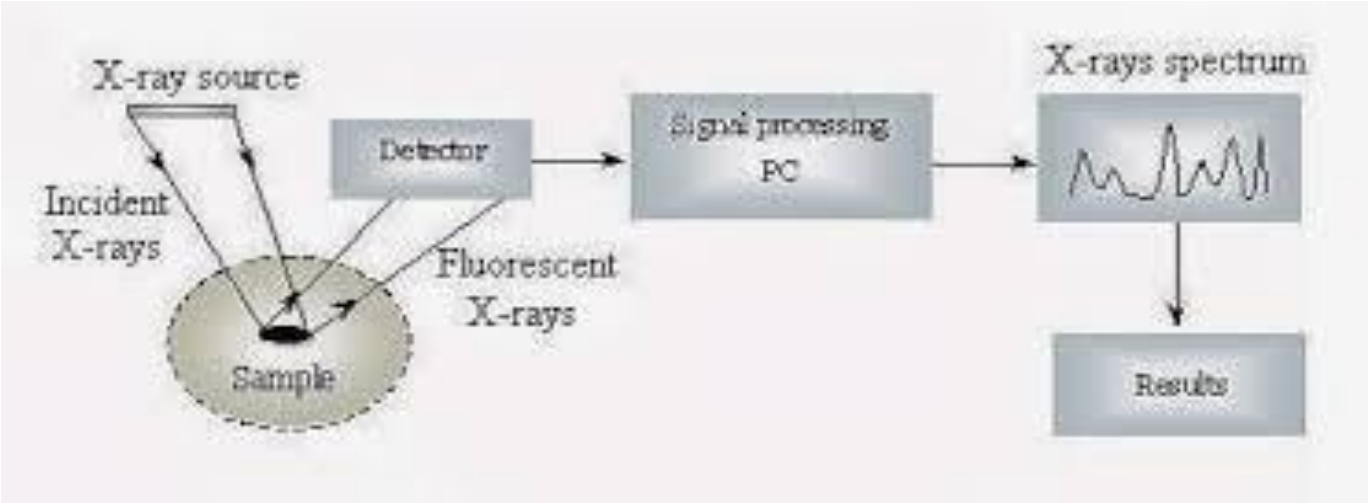
- ระบบนี้ใช้หัววัดรังสีทำการวัดรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดจากตัวอย่างโดยตรง
- ความสามารถในการแยกพลังงานจึงขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัดรังสีที่ใช้
- หัววัดรังสีทำการวัดรังสีเอกซ์เรืองโดยตรงโดยไม่ใช้ผลึกวิเคราะห์ ทำให้การสูญเสียรังสีเอกซ์เรืองมีน้อยและสามารถวางหัววัดรังสีใกล้กับตัวอย่างได้
- ระบบนี้สามารถใช้แหล่งกำเนิดรังสีได้ทั้งหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และไอโซโทปรังสี เนื่องจากการวิเคราะห์ในระบบนี้แสดงผลออกมาในรูปพลังงาน



XRF : *ED-XRF components*

1) X-ray excitation source
2) Sample chamber
3) Si (Li) detector
4) Pre and main amplifier
5) Multichannel pulse height analyzer

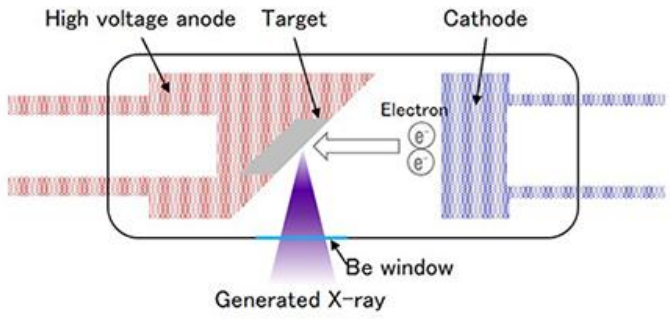




ED-XRF : *X-Ray excitation source*

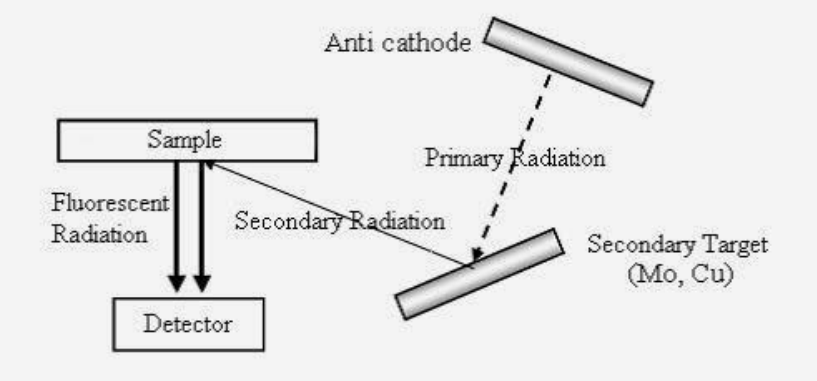
A) Direct Tube Excitation

The most popular X-ray tube used in direct excitation ED spectrometer is the side window tube for reasons of simplicity and safety. .



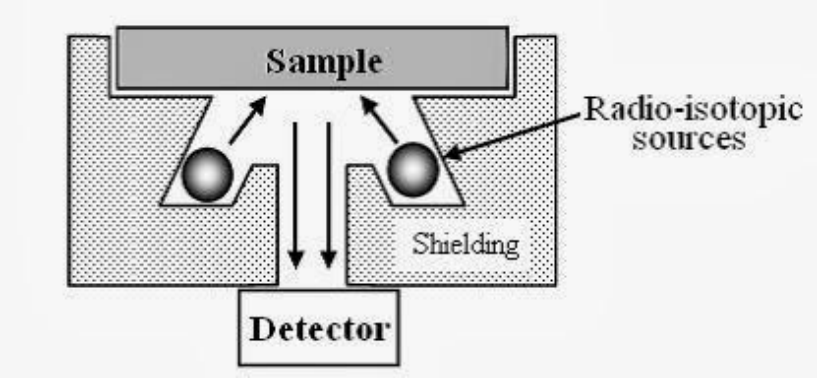
B) Secondary Target Excitation

- *to avoid the intense Bremsstrahlung continuum from the X-ray tube*



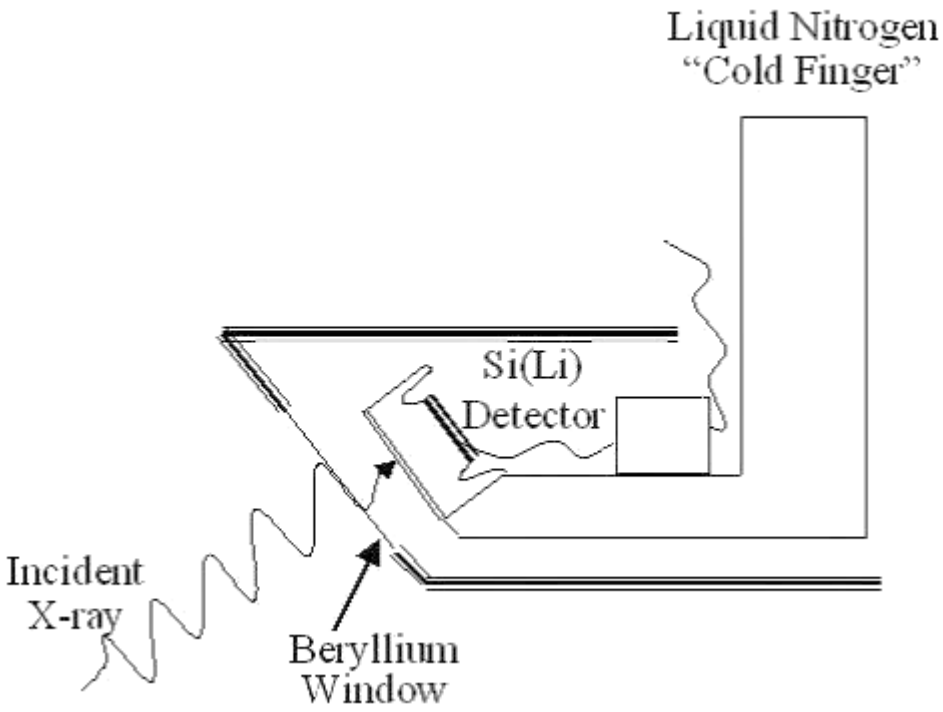
C) Radio Isotopic Excitation

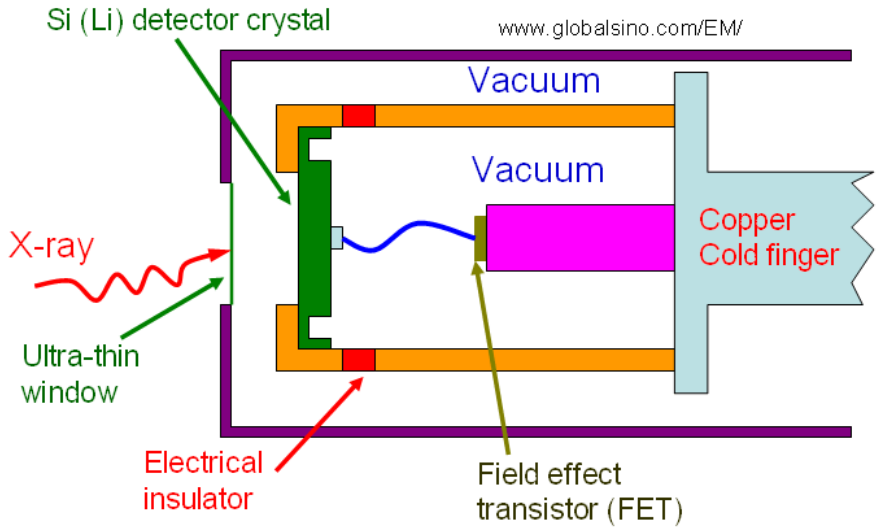
The X-rays and/or γ-rays emitted from the radio-isotopic sources cover a wide range (10 – 60 keV) of excitation energies.



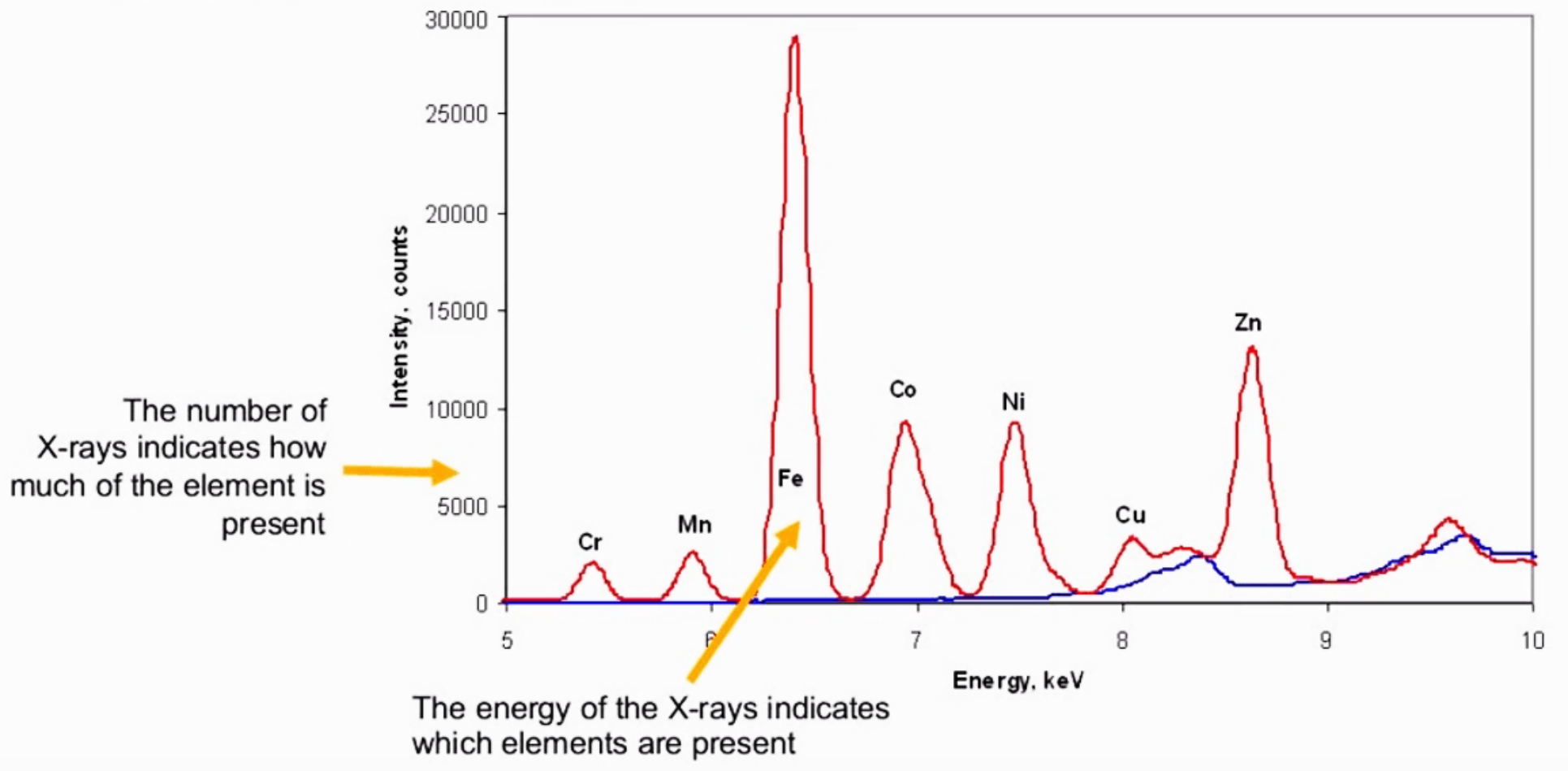
ED-XRF : *Si(Li) Detector*

The solid state, lithium-drifted silicon detector, Si(Li), was developed and applied to Xray detection in the 1960's.



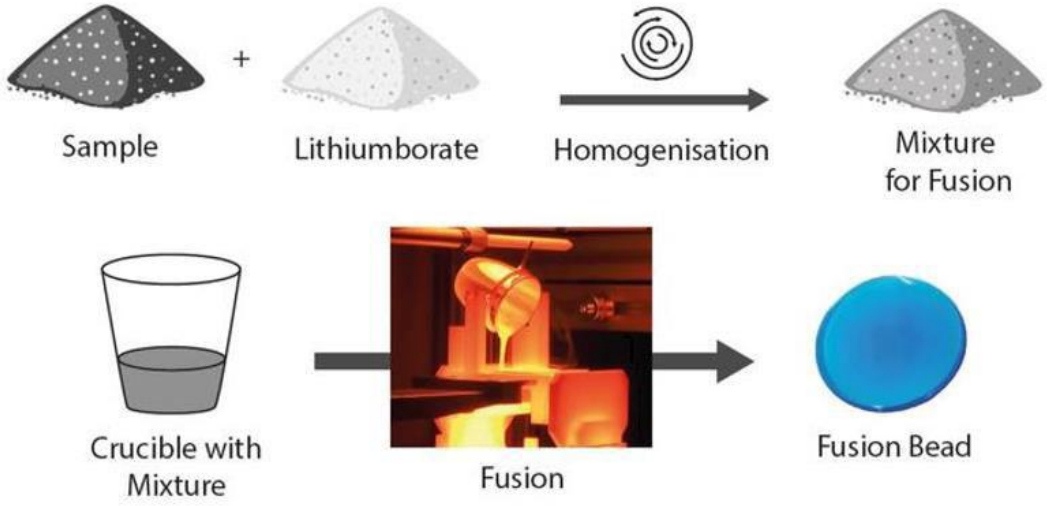


XRF : *ED-XRF signal*



XRF : *การเตรียมตัวอย่าง*

- การเตรียมตัวอย่าง มีหลายวิธี
  - วิธีการ Fusion
  - วิธีการบดเป็นผง
  - วิธีการบดเป็นผงและนำไปอัดเม็ด

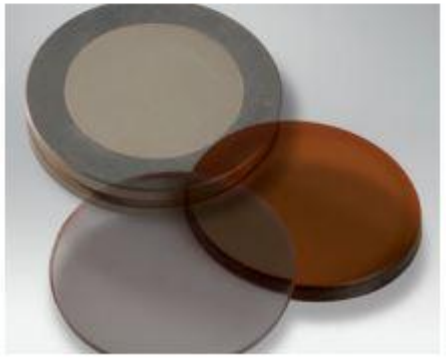


Cover the bottom of the cell with film and add the sample (loose powder method).

Press form the powder with a press machine (briquette press method).

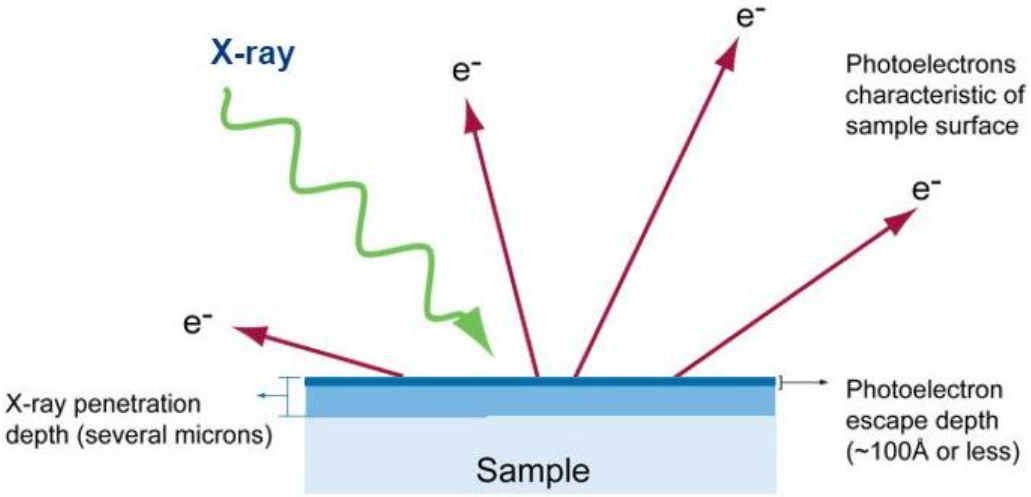
XRF : *การเตรียมตัวอย่างอัดเม็ด*

- บดหยาบด้วยเครื่องบดหยาบให้มีขนาดประมาณ 10-15 mm
- แบ่งและสุ่มตัวอย่างเพื่อนำไปบดละเอียด (การแบ่งและสุ่มตัวอย่างจะช่วยให้ผลการวิเคราะห์ซ้ำมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น)
- บดตัวอย่างให้มีความละเอียดประมาณ 50 μm ด้วยเครื่องบดละเอียด
- นำตัวอย่างที่บดละเอียดเรียบร้อยไปอัดด้วยเครื่องกดอัดตัวอย่างเพื่อให้ผิวหน้ามีความเรียบเนียน
- ในกรณีที่ตัวอย่างไม่สามารถยึดเกาะกันได้ด้วยการอัดเม็ด ใช้สารช่วยยึดเกาะผสมกับตัวอย่างในกระบวนการอัดเม็ดเพื่อช่วยให้ตัวอย่างสามารถยึดเกาะกันได้ดีขึ้น (อัตราส่วนการผสมระหว่างตัวอย่างและสารช่วยยึดเกาะจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารยึดเกาะ) และตัวอย่างจะไม่แตกหักระหว่างการเคลื่อนย้ายตัวอย่าง



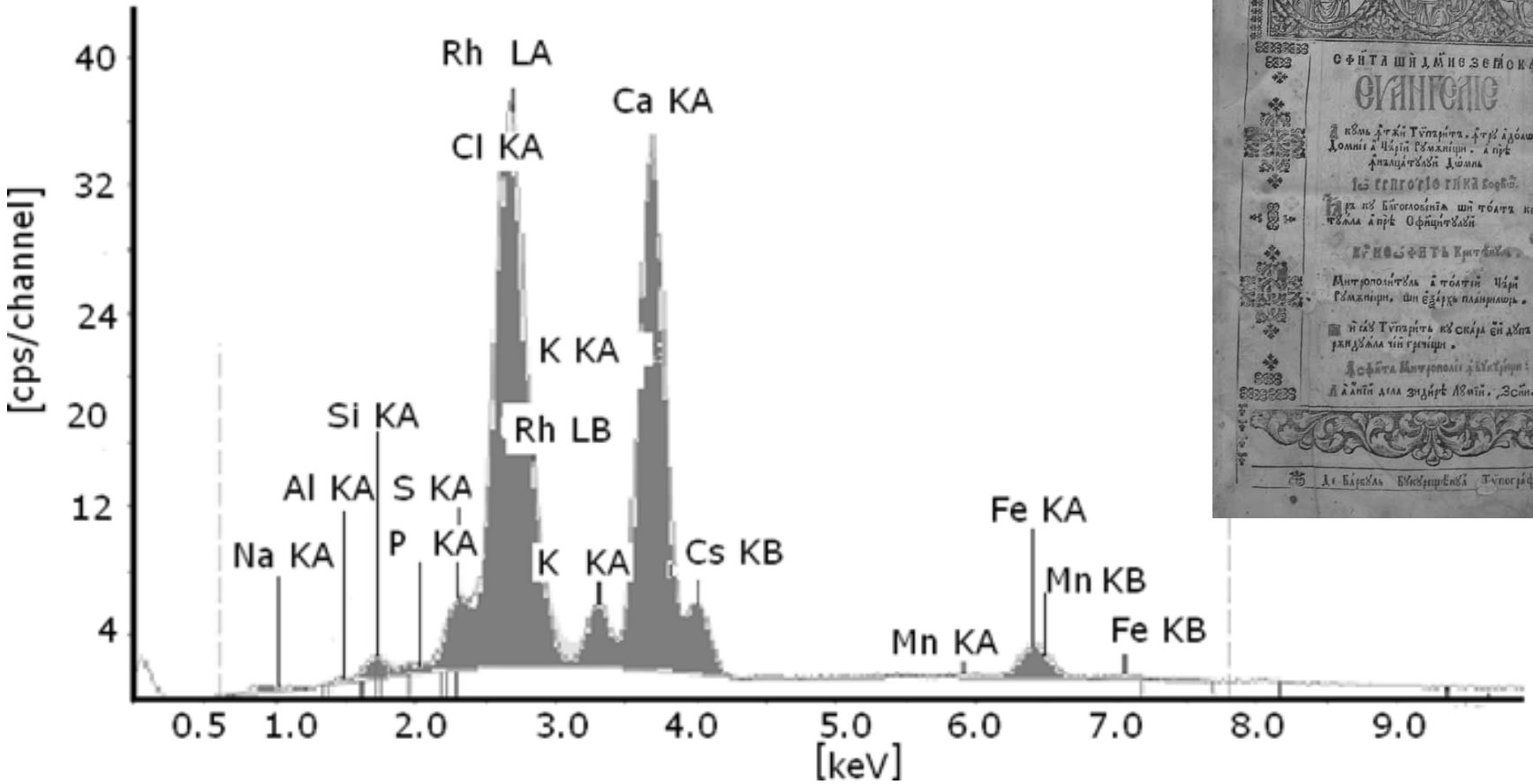
XRF : *พื้นผิวของวัสดุ*

- การวิเคราะห์ด้วย XRF จะสามารถตรวจวัดได้ที่เฉพาะผิวหน้าของตัวอย่างเท่านั้น ระดับความลึกประมาณไม่กี่ microns ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้ แต่ไม่สามารถตรวจวัดได้ลึกถึงระดับมิลลิเมตร



- ผิวหน้าของตัวอย่างต้องมีความเรียบเนียนและสม่ำเสมอ
- การบดลดขนาดเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวอย่างด้วยเครื่องบด และอาจนำไปอัดด้วยเครื่องอัดเม็ดเพื่อให้ผิวหน้าเรียบเนียนมากขึ้น

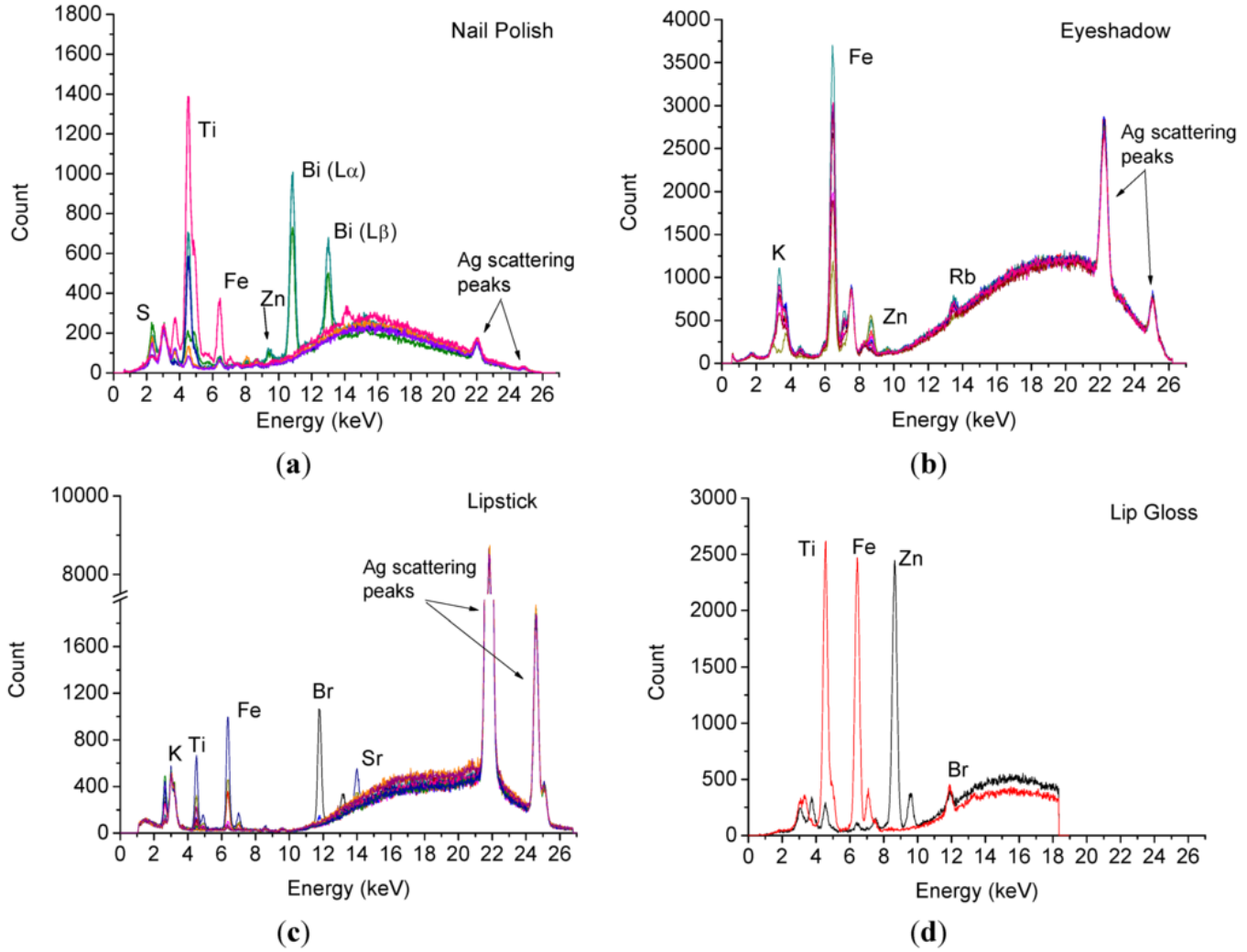
XRF : *EDXRF spectrum of paper*



Ion, R. M. et al., (2008). Spectral analysis of original and restaurated ancient paper from Romanian Gospel. *Romanian Journal of Physics*. 53. 781–791.

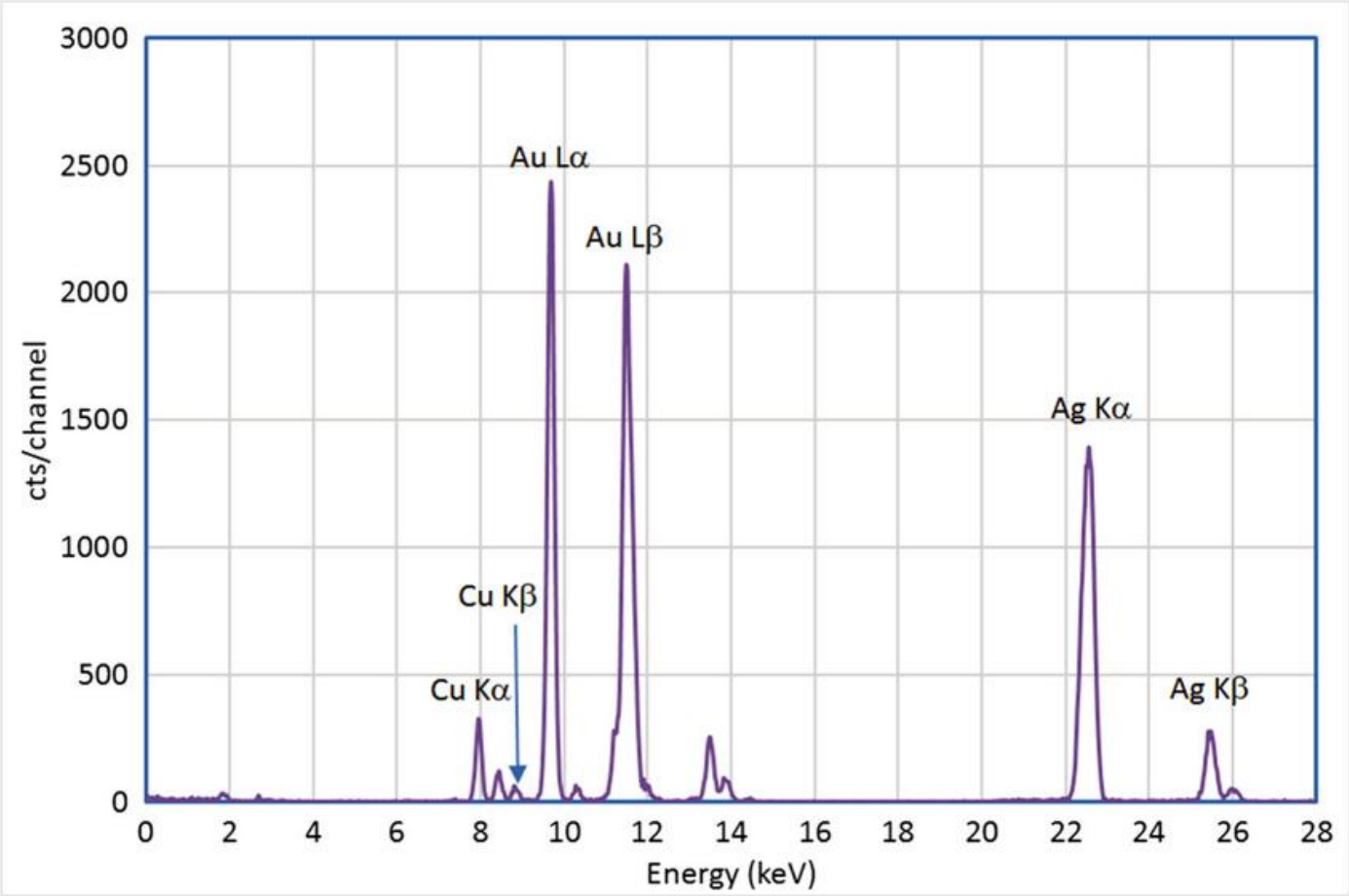
XRF : *Cosmetic Assurance*

(a) 6 spectra of nail polishes
(b) 9 spectra of eye shadow
(c) 12 spectra of lipstick
(d) 2 spectra of lip gloss



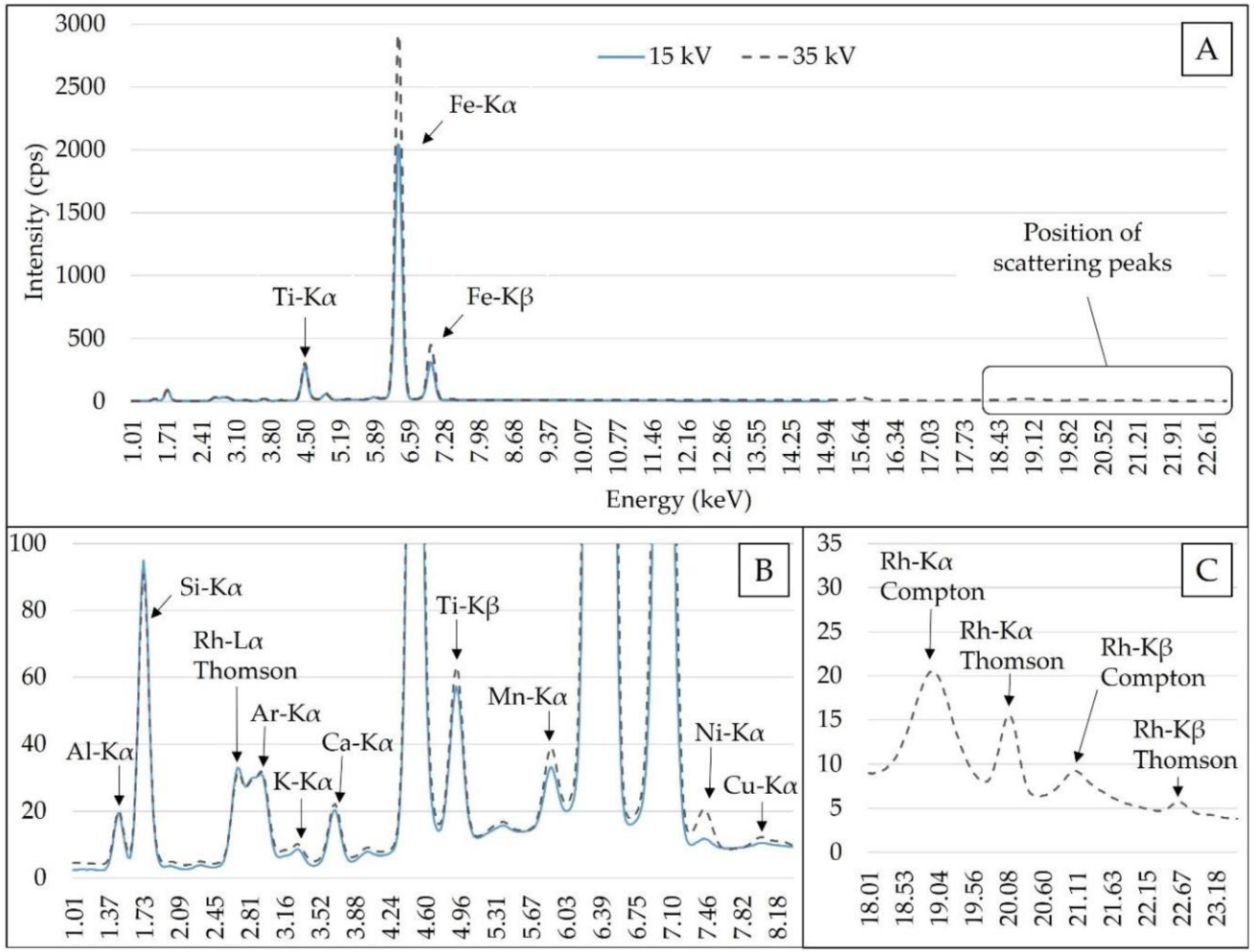
Melquiades, F. L., et al. (2015). Portable EDXRF for quality assurance of cosmetics. *Cosmetics*, *2*(3), 277–285. https://doi.org/10.3390/cosmetics2030277

XRF : *Metal Mixtures*



XRF : *Energy of X-ray tube*

X-ray fluorescence (XRF) spectra obtained with an X-ray tube set at 15 and 35 kV

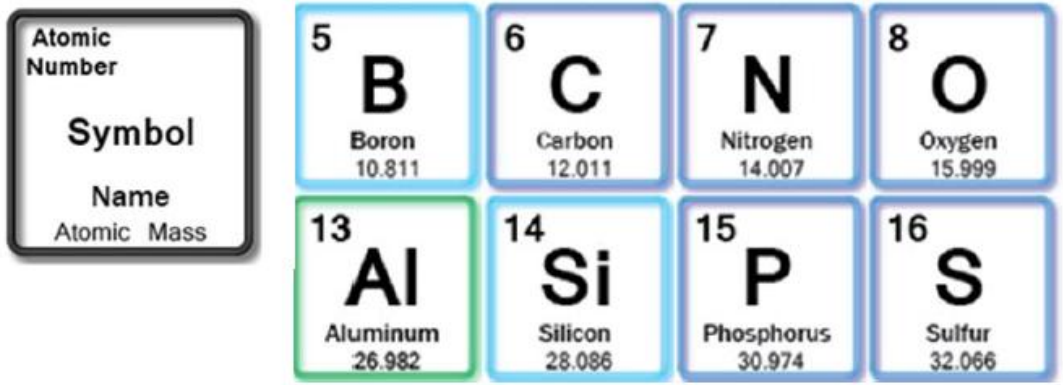


Tavares, T. R., et al., (2020). Effect of X-ray tube configuration on measurement of key soil fertility attributes with XRF. *Remote Sensing*, *12*(6), 963. https://doi.org/10.3390/rs12060963

ED-XRF : *Compound calculation*

$$SiO_2 = \frac{\text{มวลอะตอม } SiO_2}{\text{มวลอะตอม Si}} \times Si$$

Si : ค่าจาก XRF



*ปริมาณสารประกอบที่คำนวณได้เป็นค่าที่สมมติว่าธาตุที่นำมาคำนวณ (Si) อยู่ในรูปสารประกอบที่คำนวณ (SiO_2) เพียงรูปแบบเดียวไม่มีรูปแบบอื่นปนในตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

**ไม่ควรนำค่าที่ได้จากการคำนวณปริมาณสารประกอบนี้ไปอ้างอิงในงานวิจัย

	XRD (X-ray Diffraction)	XRF (X-ray Fluorescence)
หลักการทำงาน	การกระเจิงของรังสีเอกซ์จากโครงสร้างผลึก และวิเคราะห์ด้วยกฎของ Bragg	การปล่อยรังสีเอกซ์รองเมื่ออิเล็กตรอนชั้นในถูกกระตุ้นออกจากอะตอม
ข้อมูลที่ได้	โครงสร้างผลึก เช่น รูปร่างของเซลล์หน่วย, การจัดเรียงอะตอม การระบุเฟสของสาร	องค์ประกอบทางเคมี เช่น ชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่าง
ลักษณะของตัวอย่าง	เหมาะกับสารที่มีโครงสร้างผลึก (crystalline materials) เช่น แร่ โลหะ เซรามิก	ใช้ได้กับทุกสถานะของตัวอย่าง ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือผง
การวิเคราะห์	วิเคราะห์โครงสร้างผลึก การจัดเรียงเชิงอะตอม การระบุเฟส การเปลี่ยนเฟส	วิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุในระดับ ppm หรือ wt%
การใช้งานทั่วไป	- ระบุชนิดแร่ - วิเคราะห์เฟสโลหะ/เซรามิก - ตรวจสอบความบริสุทธิ์วัสดุ	- ตรวจสอบองค์ประกอบแร่ - ควบคุมคุณภาพในโรงงาน - ตรวจสอบวัตถุดิบ
ตัวอย่าง	- วิเคราะห์โครงสร้างควอตซ์ในดิน - ตรวจโครงสร้างผลึกเซรามิก	- ตรวจ Fe ในแร่เหล็ก - วิเคราะห์ Si ในแก้ว

#กิจกรรม work@class

แบ่งกลุ่มทำกิจกรรม 6.1

มอบหมายโจทย์ให้แต่ละกลุ่ม
ระดมสมองแก้ไขโดยวิธีการ
ร่วมแสดงความคิดเห็น

ให้แต่ละกลุ่มนำเสนอ วิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา
1) หลักการสำคัญหรือหลักพื้นฐานที่ถูกต้อง
2) วิธีการคำนวณค่าที่ถูกต้อง
3) วิธีอธิบายเชิงพฤติกรรม (วิธีปฏิบัติ) ที่ถูกต้อง
โดยให้กลุ่มอื่น ๆ รับฟัง และซักถามในข้อที่สงสัย