

Laboratorium z Krystalografii

2 godz.

Absorpcja promieni rentgenowskich

Cel ćwiczenia: Rejestracja widma miedziowej lampy rentgenowskiej przy zastosowaniu folii metalowych jako absorberów.

Wstęp teoretyczny:

Na osłabienie natężenia promieni rentgenowskich przy przejściu przez materię mają wpływ trzy podstawowe czynniki. Głównie jest ono spowodowane absorpcją właściwą w wyniku efektu fotoelektrycznego, w którym foton promieniowania rentgenowskiego oddaje całą swą energię elektronowi znajdującemu się na jednym z wewnętrznych poziomów atomów absorbenta, co powoduje wzbudzenie atomu i emisję. Oprócz osłabienia natężenia wynikającego z efektu fotoelektrycznego promieniowanie pierwotne przechodzące przez materię ulega rozpraszaniu comptonowskiemu (niekoherentnemu) oraz rozpraszaniu klasycznemu (koherentnemu). Natężenie wiązki monochromatycznych, równoległych promieni rentgenowskich po przejściu przez materię, można wyrazić wzorem:

$$I = I_0 e^{-\mu(\lambda)d}$$

gdzie:

I – natężenie promieni po przejściu przez materiał,

I_0 – natężenie promieni padających na materiał,

μ – liniowy współczynnik osłabienia zależny od rodzaju materiału, jego gęstości oraz od długości fali promieniowania [cm^{-1}]

d – grubość materiału.

Zakładając, że całkowite osłabienie promieni rentgenowskich jest związane tylko z absorpcją i rozpraszaniem koherentnym, współczynnik osłabienia można wyrazić jako sumę współczynnika absorpcji i rozpraszania.

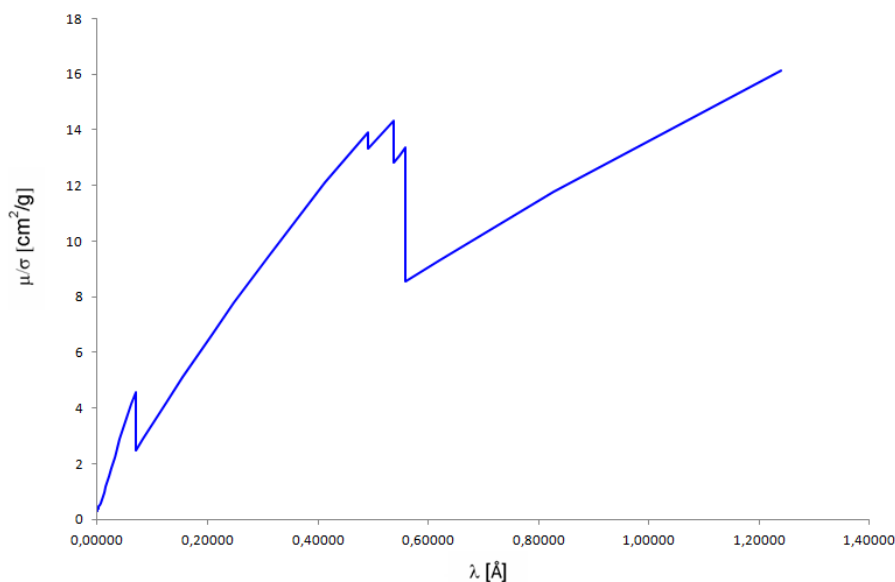
$$\mu = \sigma + \tau$$

gdzie:

σ – liniowy współczynnik rozpraszania

τ – liniowy współczynnik absorpcji właściwej

Dzieląc μ przez gęstość ρ otrzymuje się tzw. masowy współczynnik osłabienia, który jest charakterystyczny dla danej substancji. Współczynnik rozpraszania s jest prawie niezależny od długości fali natężenia promieni pierwotnych oraz od rodzaju naświetlanej substancji. Jego wartość jest niewielka i jest znacznie mniejsza od współczynnika absorpcji. Często pomija się wartości współczynnika rozpraszania i uwzględnia się tylko absorpcję promieniowania. Zależność masowego współczynnika osłabienia od długości fali promieniowania rentgenowskiego jest dość złożona. Skokowe zmiany absorpcji w postaci tzw. progów (krawędzi) absorpcji K, L, ... są związane z granicznymi warunkami pochłaniania kwantów przez różne powłoki atomów.



Długość fali promieniowania charakterystycznego jest nieco większa od długości fali, dla której występuje próg absorpcji. Wzdłuż krzywych między progami absorpcji masowy współczynnik absorpcji zmienia w przybliżeniu zgodnie z zależnością:

$$\frac{\mu}{\rho} = k\lambda^3 Z^3$$

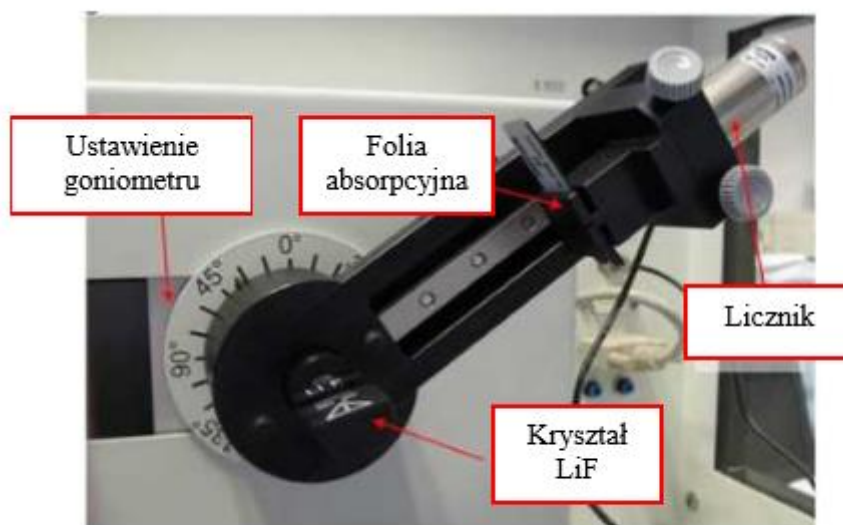
gdzie:

k – stała charakterystyczna dla każdej gałęzi krzywej (przed progiem: $k \approx 6 \cdot 10^{-4}$, za progiem: $k \approx 49 \cdot 10^{-4}$),

Z – liczba atomowa absorbenta

λ – długość fali padającego promieniowania.

Sprzęt i odczynniki: dyfraktometr PHYWE, komputer PC wraz z oprogramowaniem PHYWE Measure, kryształ LiF



Rys. 2. Dyfraktometr rentgenowski PHYWE.

Wykonanie ćwiczenia:

Część I. Pomiar intensywności promieniowania rentgenowskiego przy zastosowaniu folii absorbujących o różnej grubości.

- 1.1. Zamocować przesłonę na wyjściu promieniowania X o grubości 1.
- 1.2. Ustawić goniometr w pozycji 4.
- 1.3. Zamocować kryształ LiF w komorze eksperymentalnej.
- 1.4. W oknie dialogowym programu *Measure* zaznaczyć następujące opcje:
 - zliczanie impulsów
 - stały kąt kryształu
 - napięcie anodowe – 35 kV
 - prąd anodowy – 1mA
 - czas zliczania – 20s
 - kąt kryształu – 22.6°
- 1.5. Zmierzyć intensywność promieniowania X.
- 1.6. Po zakończeniu pomiaru zamocować płytkę z folią absorbującą Al o grubości 0,02mm zgodnie z rysunkiem 2.
- 1.7. W oknie dialogowym programu *Measure* zaznaczyć następujące opcje:
 - zliczanie impulsów
 - stały kąt kryształu
 - napięcie anodowe – 35 kV
 - prąd anodowy – 1mA
 - czas zliczania – 20s
 - kąt kryształu – 22.6°
- 1.8. Zmierzyć intensywność promieniowania X.
- 1.9. Czynności 1.6–1.9 powtórzyć dla folii Al o grubości 0.04, 0.06, 0.08 oraz 0.1, a także dla folii Zn o grubości 0.025, 0.05, 0.075 oraz 0.1.
- 1.10. Dane pomiarowe przedstawić w postaci tabeli:

	d[mm]	μ [cm ⁻¹]	μ/ρ [cm ² g ⁻¹]	I[Imp/s]	I/I ₀
Al (Z = 13, $\rho = 2.70$ g/cm ³)	0,02				
	0,04				
	0,06				
	0,08				
	0,1				
Zn (Z = 30, $\rho = 7.14$ g/cm ³)	0,025				
	0,05				
	0,075				
	0,1				

1.11. Wykreślić zależności intensywności promieniowania rentgenowskiego (I/I_0) od grubości zastosowanego absorbera (d) oraz $\ln(I/I_0)$ od grubości zastosowanego absorbera (d).

Część II. Pomiar intensywności promieniowania rentgenowskiego przy zastosowaniu folii absorbujących w zależności od zastosowanego metalu.

2.1. Zamocować przesłonę na wyjściu promieniowania X o grubości 1 mm.

2.2. Ustawić goniometr w pozycji 4.

2.3. Zamocować kryształ LiF w komorze eksperymentalnej.

2.4. W oknie dialogowym programu *Measure* zaznaczyć następujące opcje:

- *zliczanie impulsów*

• napięcie anodowe – 25 kV

• prąd anodowy – 1mA

• czas zliczania – 20s

• kąt kryształu – 6°

• wartość kąta licznika stanowi podwojoną wartość kąta kryształu

2.5. Zmierzyć intensywność promieniowania X.

2.6. Czynność 2.4–2.5 powtórzyć dla wartości kątów kryształu od 6° do 26° co jeden stopień

2.7. Po zakończeniu pomiaru zamocować płytkę z folią absorbującą Cu o grubości 0.025 zgodnie z rysunkiem 2.

2.7. W oknie dialogowym programu *Measure* zaznaczyć następujące opcje:

- *zliczanie impulsów*

• napięcie anodowe – 25 kV

• prąd anodowy – 1mA

• czas zliczania – 20s

• kąt kryształu – 6°

• wartość kąta licznika stanowi podwojoną wartość kąta kryształu.

2.8. Zmierzyć intensywność promieniowania X.

2.9. Czynność 2.7–2.8 powtórzyć dla wartości kątów kryształu od 6° do 26° co jeden stopień.

2.10. Ćwiczenie powtórzyć dla niklowej i cynowej folii absorpcyjnej.

2.11. Wykreślić zależności $\sqrt[3]{\mu/\rho}$ od długości fali promieniowania rentgenowskiego (λ) dla zastosowanych metali.

Część IV. Zadania do rozwiązania.

1. Obliczyć długość fali dla progu absorpcji K i długość fali K_{α} dla miedzi.
2. Podaj zależność pomiędzy grubością folii d a współczynnikiem osłabienia μ , przy założeniu, że natężenie promieniowania I_0 zmniejsza się o połowę w stosunku do natężenia wiązki promieniowania padającego. Wykorzystując wyprowadzony wzór oblicz grubość absorbera wykonanego ze stopu żelaza, zawierającego 17% chromu, wiedząc, że gęstość tego stopu wynosi $7.76 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$. Obliczenia przeprowadzić dla promieniowania $\lambda_{K\alpha}^{Mo}$.
3. Do monochromatyzacji promieniowania CoK wykorzystuje się folie wykonane z hematytu Fe_2O_3 . Dobierz grubość absorbera, tak aby uzyskać stosunek natężeń $K_{\beta} : K_{\alpha}$ równy 1 : 500. Gęstość sproszkowanego hematytu Fe_2O_3 wynosi gęstości $5.24 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$, natomiast gęstość upakowania ziaren proszku jest równa 70%.
4. W jakiej odległości od okienka lampy rentgenowskiej natężenie wiązki promieni rentgenowskich osłabianej przez powietrze spada do połowy? Obliczenia przeprowadzić dla lampy o anodzie molibdenowej i chromowej. Gęstość powietrza w warunkach normalnych $\rho = 1.294 \text{ g/cm}^3$.
5. Obliczyć straty natężenia promieniowania rentgenowskiego $\lambda_{K\alpha}^{Cu}$ przy przechodzeniu wiązki przez aluminium folię o grubości $d = 0.1 \text{ mm}$. Gęstość aluminium $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$.
6. Obliczyć liniowy współczynnik osłabienia promieniowania CuK_{α} dla niobianu(V) litu LiNbO_3 , arsenku galu (GaAs) i tytanianu baru (BaTiO_3).
7. Obliczyć masowy i liniowy współczynnik osłabienia promieniowania $\lambda_{K\alpha}^{Co}$ przez stal zawierającą 0,5% C, 9% Ni, 18% Cr i 72,5% Fe. Gęstość stali 8.6 g/cm^3 .

Tabela 1. Masy molowe, gęstość, masowe współczynniki osłabienia (cm²/g) pierwiastków

Characteristic radiation	Wavelength (Å)	1	2	3	4	5	6	7	8
		Hydrogen	Helium	Lithium	Beryllium	Boron	Carbon	Nitrogen	Oxygen
	Atomic weight	1.0079	4.0026	6.941	9.0122	10.811	12.011	14.0067	15.9994
	Density	8.375E-05	1.664E-04	0.533	1.86	2.47	2.27	1.165E-03	1.332E-03
ϑ (K)			344	1440	2230				
Cr Ka	2.2910	4.12E-01	4.98E-01	1.30E+00	3.44E+00	7.59E+00	1.50E+01	2.47E+01	3.78E+01
Cr Kb ₁	2.0849	4.05E-01	4.25E-01	1.01E+00	2.59E+00	5.69E+00	1.12E+01	1.86E+01	2.84E+01
Fe Ka	1.9374	4.00E-01	3.81E-01	8.39E-01	2.09E+00	4.55E+00	8.99E+00	1.49E+01	2.28E+01
Fe Kb ₁	1.7566	3.96E-01	3.35E-01	6.63E-01	1.58E+00	3.39E+00	6.68E+00	1.10E+01	1.70E+01
Co Ka	1.7903	3.97E-01	3.43E-01	6.93E-01	1.67E+00	3.59E+00	7.07E+00	1.17E+01	1.80E+01
Co Kb ₁	1.6208	3.93E-01	3.07E-01	5.55E-01	1.27E+00	2.67E+00	5.24E+00	8.66E+00	1.33E+01
Cu Ka	1.5418	3.91E-01	2.92E-01	5.00E-01	1.11E+00	2.31E+00	4.51E+00	7.44E+00	1.15E+01
Cu Kb ₁	1.3922	3.88E-01	2.68E-01	4.12E-01	8.53E-01	1.73E+00	3.33E+00	5.48E+00	8.42E+00
Mo Ka	0.7107	3.73E-01	2.02E-01	1.98E-01	2.56E-01	3.68E-01	5.76E-01	8.45E-01	1.22E+00
Mo Kb ₁	0.6323	3.70E-01	1.97E-01	1.87E-01	2.29E-01	3.09E-01	4.58E-01	6.45E-01	9.08E-01

Characteristic radiation	Wavelength (Å)	9	10	11	12	13	14	15	16
		Fluorine	Neon	Sodium	Magnesium	Aluminium	Silicon	Phosphorus	Sulfur
	Atomic weight	18.9984	20.1797	22.9898	24.305	26.9815	28.0855	30.9738	32.066
	Density	1.696E-03	8.387E-04	0.966	1.74	2.70	2.33	1.82(yellow)	2.09
ϑ (K)	75		158	400	428	645			
Cr Ka	2.2910	5.15E+01	7.41E+01	9.49E+01	1.26E+02	1.55E+02	1.96E+02	2.30E+02	2.81E+02
Cr Kb ₁	2.0849	3.89E+01	5.61E+01	7.21E+01	9.62E+01	1.18E+02	1.51E+02	1.77E+02	2.17E+02
Fe Ka	1.9374	3.13E+01	4.52E+01	5.82E+01	7.78E+01	9.59E+01	1.22E+02	1.44E+02	1.77E+02
Fe Kb ₁	1.7566	2.33E+01	3.38E+01	4.37E+01	5.85E+01	7.23E+01	9.27E+01	1.09E+02	1.35E+02
Co Ka	1.7903	2.47E+01	3.58E+01	4.62E+01	6.19E+01	7.64E+01	9.78E+01	1.15E+02	1.42E+02
Co Kb ₁	1.6208	1.83E+01	2.66E+01	3.45E+01	4.63E+01	5.73E+01	7.36E+01	8.70E+01	1.07E+02
Cu Ka	1.5418	1.58E+01	2.29E+01	2.97E+01	4.00E+01	4.96E+01	6.37E+01	7.55E+01	9.33E+01
Cu Kb ₁	1.3922	1.16E+01	1.69E+01	2.20E+01	2.96E+01	3.68E+01	4.75E+01	5.64E+01	6.98E+01
Mo Ka	0.7107	1.63E+00	2.35E+00	3.03E+00	4.09E+00	5.11E+00	6.64E+00	7.97E+00	9.99E+00
Mo Kb ₁	0.6323	1.19E+00	1.69E+00	2.17E+00	2.92E+00	3.64E+00	4.73E+00	5.67E+00	7.11E+00

Characteristic radiation	Wavelength (Å)	17	18	19	20	21	22	23	24
		Chlorine	Argon	Potassium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chromium
	Atomic weight	35.4527	39.948	39.0983	40.078	44.9559	47.867	50.9415	51.9961
	Density	3.214E-03	1.663E-03	0.862	1.53	2.99	4.51	6.09	7.19
ϑ (K)	92		91	230	360	420	380	630	
Cr Ka	2.2910	3.16E+02	3.42E+02	4.21E+02	4.90E+02	5.16E+02	5.90E+02	7.47E+01	8.68E+01
Cr Kb ₁	2.0849	2.44E+02	2.66E+02	3.28E+02	3.82E+02	4.03E+02	4.44E+02	4.79E+02	6.70E+01
Fe Ka	1.9374	2.00E+02	2.18E+02	2.70E+02	3.14E+02	3.32E+02	3.58E+02	3.99E+02	4.92E+02
Fe Kb ₁	1.7566	1.52E+02	1.67E+02	2.07E+02	2.42E+02	2.56E+02	2.77E+02	3.09E+02	3.85E+02
Co Ka	1.7903	1.61E+02	1.76E+02	2.18E+02	2.55E+02	2.69E+02	2.91E+02	3.25E+02	4.08E+02
Co Kb ₁	1.6208	1.22E+02	1.34E+02	1.66E+02	1.95E+02	2.06E+02	2.27E+02	2.50E+02	2.93E+02
Cu Ka	1.5418	1.06E+02	1.16E+02	1.45E+02	1.70E+02	1.80E+02	2.00E+02	2.19E+02	2.47E+02
Cu Kb ₁	1.3922	7.95E+01	8.75E+01	1.09E+02	1.29E+02	1.37E+02	1.52E+02	1.66E+02	1.85E+02
Mo Ka	0.7107	1.15E+01	1.28E+01	1.62E+01	1.93E+01	2.08E+01	2.34E+01	2.60E+01	2.99E+01
Mo Kb ₁	0.6323	8.20E+00	9.14E+00	1.16E+01	1.38E+01	1.49E+01	1.68E+01	1.87E+01	2.15E+01

Characteristic radiation	Wavelength (Å)	25	26	27	28	29	30	31	32
		Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Gallium	Germanium
	Atomic weight	54.9381	55.845	58.9332	58.6934	63.546	65.39	69.723	72.61
	Density	7.47	7.87	8.8	8.91	8.93	7.13	5.91	5.32
ϑ (K)	410	470	445	450	343	327	320	374	
Cr Ka	2.2910	9.75E+01	1.13E+02	1.24E+02	1.44E+02	1.53E+02	1.71E+02	1.83E+02	1.99E+02
Cr Kb ₁	2.0849	7.53E+01	8.69E+01	9.60E+01	1.12E+02	1.18E+02	1.32E+02	1.42E+02	1.55E+02
Fe Ka	1.9374	6.16E+01	7.10E+01	7.85E+01	9.13E+01	9.68E+01	1.08E+02	1.16E+02	1.27E+02
Fe Kb ₁	1.7566	3.75E+02	5.43E+01	6.00E+01	6.98E+01	7.40E+01	8.27E+01	8.86E+01	9.69E+01
Co Ka	1.7903	3.93E+02	5.72E+01	6.32E+01	7.35E+01	7.80E+01	8.71E+01	9.34E+01	1.02E+02
Co Kb ₁	1.6208	3.06E+02	3.42E+02	4.81E+01	5.60E+01	5.94E+01	6.64E+01	7.12E+01	7.78E+01
Cu Ka	1.5418	2.70E+02	3.02E+02	3.21E+02	4.88E+01	5.18E+01	5.79E+01	6.21E+01	6.79E+01
Cu Kb ₁	1.3922	2.07E+02	2.32E+02	2.48E+02	2.79E+02	3.92E+01	4.38E+01	4.70E+01	5.14E+01
Mo Ka	0.7107	3.31E+01	3.76E+01	4.10E+01	4.69E+01	4.91E+01	5.40E+01	5.70E+01	6.12E+01
Mo Kb ₁	0.6323	2.38E+01	2.71E+01	2.96E+01	3.40E+01	3.57E+01	3.93E+01	4.15E+01	4.46E+01

Characteristic radiation	Wavelength (Å)	33	34	35	36	37	38	39	40
		Arsenic	Selenium	Bromine	Krypton	Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium
	Atomic weight	74.9216	78.96	79.904	83.8	85.4678	87.62	88.9059	91.224
	Density	5.78	4.81	3.12 (liq.)	3.488E-03	1.53	2.58	4.48	6.51
ϑ (K)	282	90		72	56	147	280	291	
Cr Ka	2.2910	2.19E+02	2.34E+02	2.60E+02	2.77E+02	3.03E+02	3.28E+02	3.58E+02	3.86E+02
Cr Kb ₁	2.0849	1.70E+02	1.82E+02	2.02E+02	2.15E+02	2.36E+02	2.56E+02	2.79E+02	3.00E+02
Fe Ka	1.9374	1.39E+02	1.49E+02	1.65E+02	1.76E+02	1.93E+02	2.10E+02	2.29E+02	2.47E+02
Fe Kb ₁	1.7566	1.06E+02	1.14E+02	1.27E+02	1.35E+02	1.48E+02	1.61E+02	1.76E+02	1.91E+02
Co Ka	1.7903	1.12E+02	1.20E+02	1.33E+02	1.42E+02	1.56E+02	1.70E+02	1.85E+02	2.00E+02
Co Kb ₁	1.6208	8.55E+01	9.16E+01	1.02E+02	1.09E+02	1.19E+02	1.30E+02	1.42E+02	1.54E+02
Cu Ka	1.5418	7.47E+01	8.00E+01	8.90E+01	9.52E+01	1.04E+02	1.13E+02	1.24E+02	1.39E+02
Cu Kb ₁	1.3922	5.65E+01	6.05E+01	6.74E+01	7.21E+01	7.90E+01	8.59E+01	9.40E+01	1.01E+02
Mo Ka	0.7107	6.61E+01	6.95E+01	7.56E+01	7.93E+01	8.51E+01	9.06E+01	9.70E+01	1.63E+01
Mo Kb ₁	0.6323	4.82E+01	5.08E+01	5.55E+01	5.84E+01	6.30E+01	6.72E+01	7.21E+01	7.61E+01

Characteristic radiation	Wavelength (Å)	41	42	43	44	45	46	47	48
		Niobium	Molybdenum	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silver	Cadmium
	Atomic weight	92.9064	95.94	[99]	101.07	102.9055	106.42	107.8682	112.411
	Density	8.58	10.22	11.50	12.36	12.42	12.00	10.50	8.65
ϑ (K)	275	450		600	480	274	225	209	
Cr Ka	2.2910	4.16E+02	4.42E+02	4.74E+02	5.01E+02	5.36E+02	5.63E+02	6.02E+02	6.26E+02
Cr Kb ₁	2.0849	3.25E+02	3.45E+02	3.70E+02	3.92E+02	4.20E+02	4.41E+02	4.72E+02	4.90E+02
Fe Ka	1.9374	2.67E+02	2.84E+02	3.05E+02	3.23E+02	3.46E+02	3.63E+02	3.89E+02	4.05E+02
Fe Kb ₁	1.7566	2.05E+02	2.19E+02	2.35E+02	2.49E+02	2.67E+02	2.81E+02	3.01E+02	3.13E+02
Co Ka	1.7903	2.16E+02	2.30E+02	2.47E+02	2.62E+02	2.80E+02	2.95E+02	3.16E+02	3.29E+02
Co Kb ₁	1.6208	1.66E+02	1.76E+02	1.90E+02	2.01E+02	2.16E+02	2.27E+02	2.43E+02	2.53E+02
Cu Ka	1.5418	1.45E+02	1.54E+02	1.66E+02	1.76E+02	1.89E+02	1.99E+02	2.13E+02	2.22E+02
Cu Kb ₁	1.3922	1.10E+02	1.17E+02	1.26E+02	1.34E+02	1.44E+02	1.51E+02	1.63E+02	1.69E+02
Mo Ka	0.7107	1.77E+01	1.88E+01	2.04E+01	2.17E+01	2.33E+01	2.47E+01	2.65E+01	2.78E+01
Mo Kb ₁	0.6323	8.10E+01	1.38E+01	1.49E+01	1.58E+01	1.70E+01	1.80E+01	1.94E+01	2.02E+01

Characteristic radiation	Wavelength (\AA)	49 Indium	50 Tin	51 Antimony	52 Tellurium	53 Iodine	54 Xenon	55 Caesium	56 Barium
	Atomic weight	114.818	118.71	121.76	127.6	126.9045	131.29	132.9054	137.327
	Density	7.29	7.29	6.69	6.25	4.95	5.495E-03	1.91(263K)	3.59
	θ (K)	108	200	211	153		64	38	110
Cr $K\alpha$	2.2910	6.63E+02	6.91E+02	7.23E+02	7.40E+02	7.96E+02	7.21E+02	7.60E+02	5.70E+02
Cr $K\beta_1$	2.0849	5.19E+02	5.42E+02	5.70E+02	5.85E+02	6.31E+02	6.52E+02	6.86E+02	6.45E+02
Fe $K\alpha$	1.9374	4.28E+02	4.47E+02	4.71E+02	4.83E+02	5.22E+02	5.40E+02	5.69E+02	5.86E+02
Fe $K\beta_1$	1.7566	3.32E+02	3.47E+02	3.65E+02	3.74E+02	4.08E+02	4.22E+02	4.46E+02	4.61E+02
Co $K\alpha$	1.7903	3.49E+02	3.64E+02	3.83E+02	3.94E+02	4.25E+02	4.40E+02	4.65E+02	4.80E+02
Co $K\beta_1$	1.6208	2.69E+02	2.81E+02	2.96E+02	3.04E+02	3.30E+02	3.43E+02	3.63E+02	3.76E+02
Cu $K\alpha$	1.5418	2.36E+02	2.47E+02	2.59E+02	2.67E+02	2.88E+02	2.99E+02	3.17E+02	3.25E+02
Cu $K\beta_1$	1.3922	1.80E+02	1.88E+02	1.98E+02	2.04E+02	2.20E+02	2.29E+02	2.43E+02	2.52E+02
Mo $K\alpha$	0.7107	2.95E+01	3.10E+01	3.27E+01	3.38E+01	3.67E+01	3.82E+01	4.07E+01	4.23E+01
Mo $K\beta_1$	0.6323	2.16E+01	2.26E+01	2.39E+01	2.47E+01	2.68E+01	2.80E+01	2.98E+01	3.10E+01

Literatura.

- [1] Z. Bojarski, E. Łągiewka „Rentgenowska analiza strukturalna” PWN Warszawa 1988.
[2] Y. Waseda, E. Matsubara, K. Shinoda, X-Ray Diffraction Crystallography, Introduction, Examples and Solved Problem, Springer