

1 Úkol

1. S využitím krystalu LiF jako analyzátoru měření následujících rentgenových spektet:

(a) Rengenka s Cu anodou.

- i. proměřte krátkovlnné oblasti spekter brzdného záření při napětích 15 kV/1 mA, 25 kV/0,8 mA, 30 kV/0,8 mA, 33 kV/0,8 mA. K měření používejte tyto parametry: clonu o průměru 1 mm, interval Braggova úhlu pro 15 kV v rozmezí ($10^\circ - 15^\circ$) s krokem 0.2° a dobou expozice 8 s a pro ostatní napětí interval Braggova úhlu ($3^\circ - 10^\circ$) s krokem 0.2° a dobou expozice 5 s;
- ii. proměřte charakteristická spektra rentgenky při napětích 15 kV a 33 kV. K měření používejte tyto parametry: clonu o průměru 1 mm, interval Braggova úhlu ($15^\circ - 30^\circ$), krok 0.1° a dobu expozice 2 s;
- iii. proměřte tvar spektra s Zr absorbérem. K měření používejte tyto parametry: clonu s Zr absorbérem tloušťky 0.05 mm, interval Braggova úhlu ($3^\circ - 30^\circ$), krok 0.1° a dobu expozice 2 s;
- iv. proměřte tvar spektra s Ni absorbérem. K měření používejte tyto parametry: clonu s Ni absorbérem tloušťky 0.01 mm, interval Braggova úhlu ($3^\circ - 30^\circ$), krok 0.1° a dobu expozice 2 s.

(b) Rengenka s Fe anodou.

- i. proměřte charakteristické spektrum rentgenky při napětí 33 kV/0.8 mA. K měření používejte tyto parametry: clonu o průměru 1 mm, interval Braggova úhlu ($3^\circ - 30^\circ$), krok 0.1° a dobu expozice 2 s;
- ii. proměřte tvar spektra s Zr absorbérem. K měření používejte tyto parametry: clonu s Zr absorbérem tloušťky 0.05 mm, interval Braggova úhlu ($3^\circ - 30^\circ$), krok 0.1° a dobu expozice 3 s.

(c) Rengenka s Mo anodou

- i. proměřte charakteristické spektrum rentgenky při napětí 33 kV/0.8 mA. K měření používejte tyto parametry: clonu o průměru 1 mm, interval Braggova úhlu ($3^\circ - 35^\circ$), krok 0.1° a dobu expozice 3 s.

(d) Rengenka s Cu anodou

- i. proměřte charakteristické spektrum rentgenky při napětí 33 kV/0.8 mA v intervalu Braggova úhlu ($42^\circ - 51^\circ$). K měření používejte tyto parametry: clonu o průměru 1 mm, krok 0.1° a dobou expozice 2 s.

2. Interpretujte naměřené výsledky (pro mezirovinnou vzdálenost krystalu LiF použijte hodnotu $d = 201,4$ pm):

(a) Krátkovlnná mez brzdného záření

- i. Ze změřených mezních vlnových délek (respektive frekvencí) určete hodnotu Planckovy konstanty a oceňte přesnost měření

(b) Moseleyův zákon

- i. Přesvědčte se, že naměřené úhlové frekvence spektrálních čar K_α a K_β pro různé prvky splňují Moseleyův zákon. Ze směrnice příslušné závislosti určete hodnotu Rydbergovy úhlové frekvence a využitím této hodnoty určete též průměrnou hodnotu stínící konstanty.
- ii. Přesvědčte se, že i naměřené polohy absorpčních hran Zr a Ni splňují Moseleyův zákon.
- iii. Všimněte si, že absorpční hrana Ni koinciduje se spektrální čarou K_β mědi; této skutečnosti se využívá v rentgenové difraktografii pro monochromatizaci charakteristického spektra mědi. Z provedeného měření určete filtrační efekt niklu pro čaru K_β .

(c) Úhlová disperze

- i. Ze změřených spekter molybdenu určete velikost úhlové disperze pro různé řády difrakce.

2 Teorie

Difrakce na krystalové mříži je popsáno Braggovým zákonem

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (1)$$

kde d je vzdálenost rovin krystalu.

Rentgenové spektrum pro interakci s krystalem má dvě složky. První část je spojitá a nazývá se oblastí brzdného záření. Minimum tohoto spektra se chová dle identity

$$\frac{hc}{\lambda_m} = Ue, \quad (2)$$

kde h je Planckova konstanta, c rychlost světla, U napětí na rengence a e náboj elektronu, kterou můžeme využít jednoduchou úpravou ppro určení Planckovy konstanty

$$h = \frac{Ue\lambda_m}{c} \quad (3)$$

Druhá část se skládá z caharakteristických píků, které odpovídají materiálu rengenky. Toto spektrum je pospsáno Moseleyovým zákonem

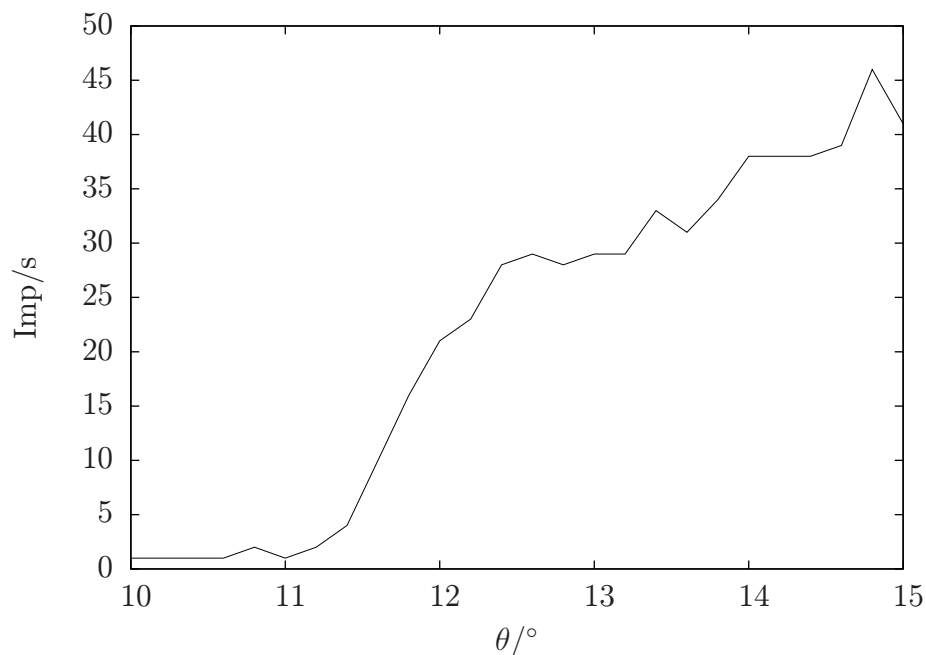
$$\sqrt{\omega} = \frac{\sqrt{3R_\omega}}{2} (Z - s), \quad (4)$$

kde R_ω se nazývá Rydbergovou úhlovou frekvencí, jejíž hodnota je zhruba

$$R_\omega = 2.0606 \cdot 10^{16} \text{s}^{-1} \quad (5)$$

Úhlová disperze je definována jako

$$\frac{\partial \theta}{\partial \lambda} = \frac{n}{2d \cos \theta} \quad (6)$$



Obrázek 1: Oblast brzdného spektra rengenky s Cu anodou při napětí 15 kV a expozici 8 s.

3 Měření

3.1 Měření spekter

Dle parametrů ze zadání jsem proběhl všechny druhy spekter pro všechny výbojky. Výsledky jsou na obrázcích (1) až (12). Původní výstupy z programu u úlohy jsou přiloženy k protokolu.

3.2 Planckova konstanta

Pro každý druh rengenky jsem odečetl z grafu mezní hranici brzdné části spektra θ_m .

$$\theta_{mCu} = (4.6 \pm 0.3)^\circ \quad (7)$$

$$\theta_{mFe} = (4.7 \pm 0.3)^\circ \quad (8)$$

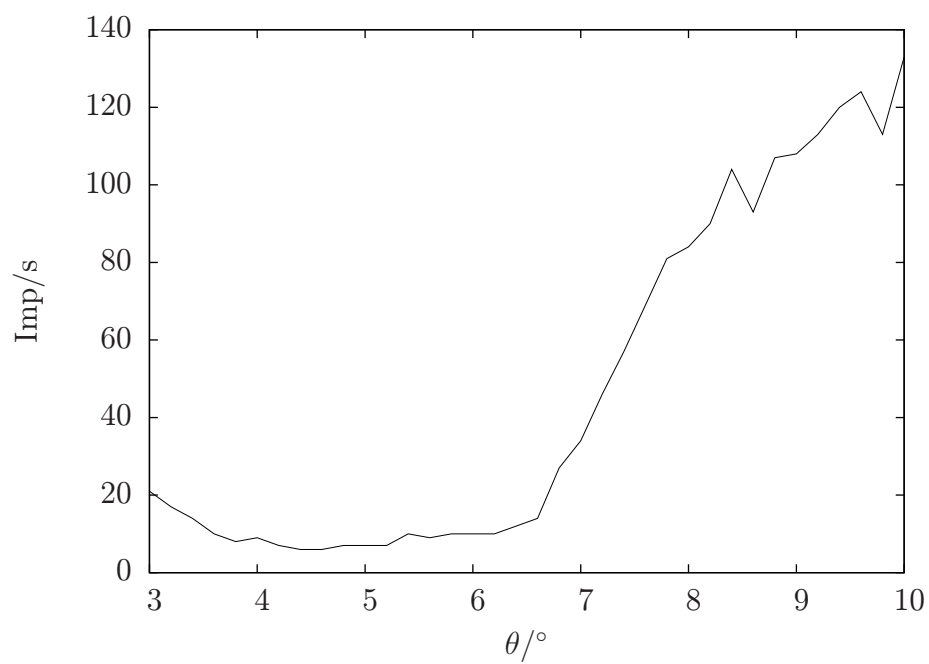
$$\theta_{mMo} = (4.6 \pm 0.3)^\circ \quad (9)$$

Z té jsem dle Braggova zákona 1 dopočítal λ

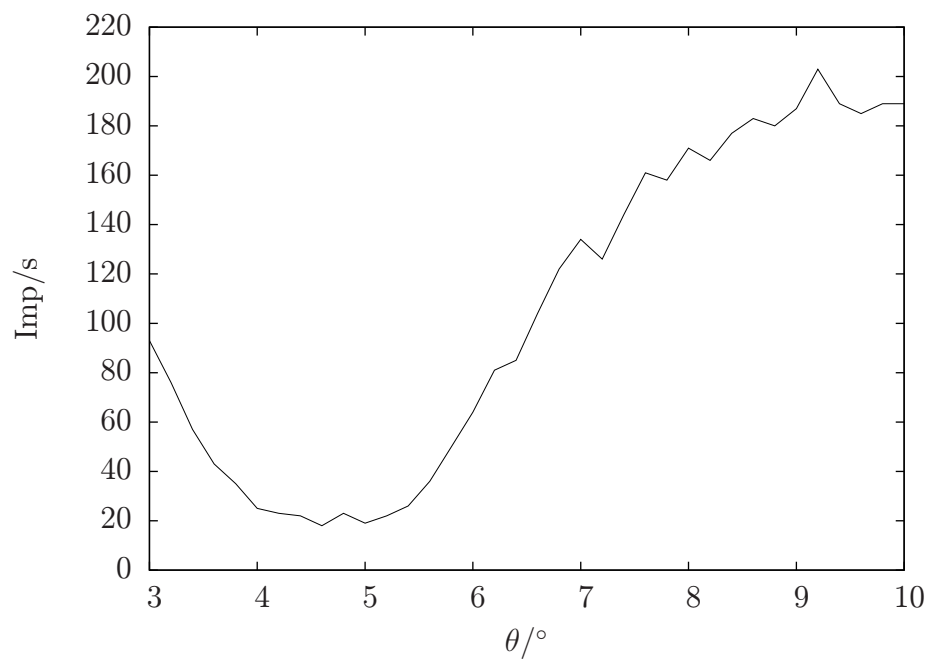
$$\lambda = (32 \pm 3)\text{pm}, \quad (10)$$

kterou jsem dosadil do rovnice 3 a získal

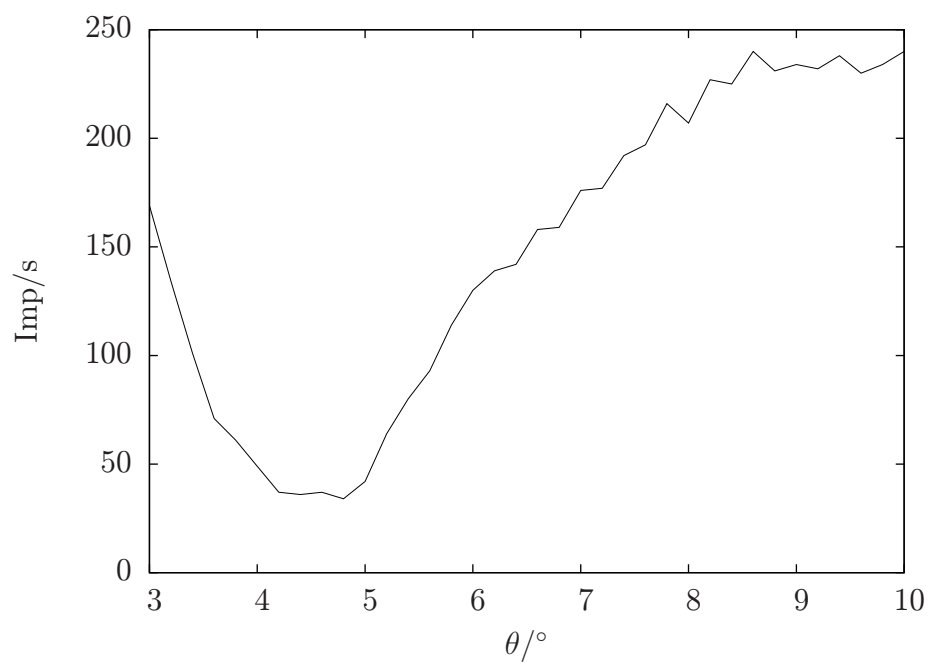
$$h = (5.7 \pm 1.2) \cdot 10^{-34}\text{Js} \quad (11)$$



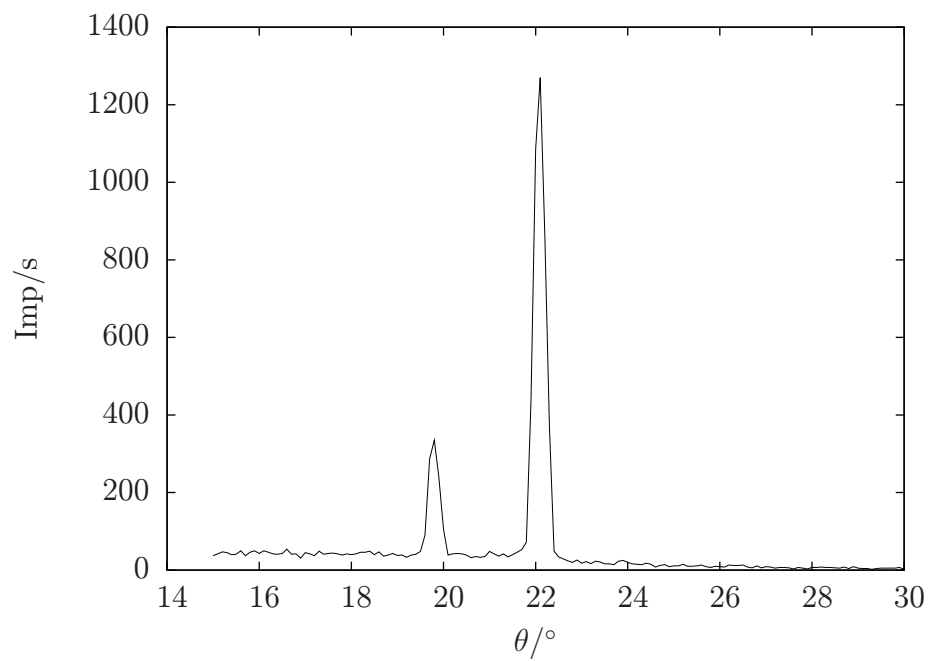
Obrázek 2: Oblast brzdného spektra rengenky s Cu anodou při napětí 25 kV a expozici 5 s.



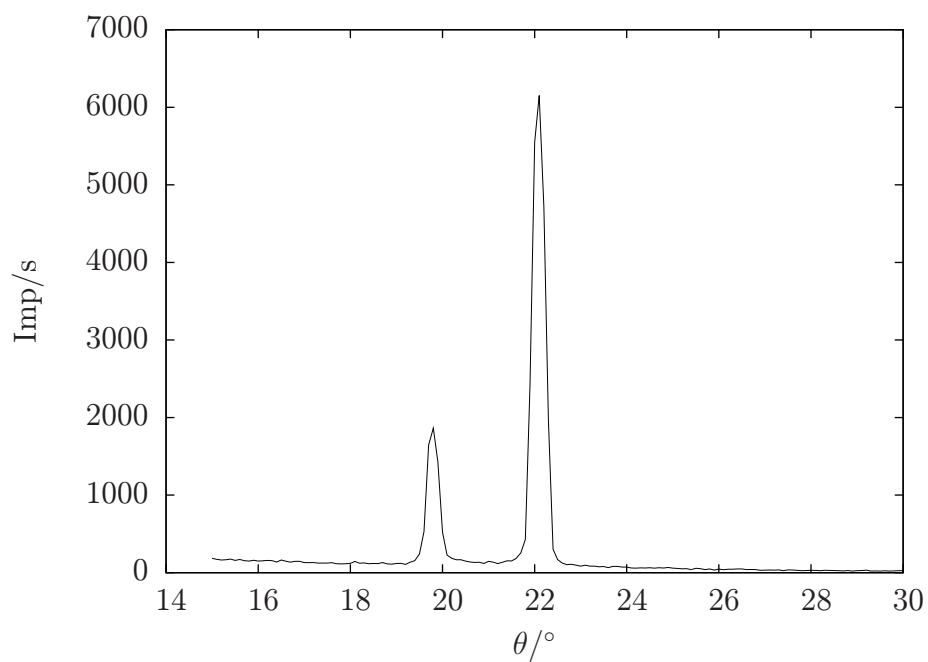
Obrázek 3: Oblast brzdného spektra rengenky s Cu anodou při napětí 30 kV a expozici 5 s.



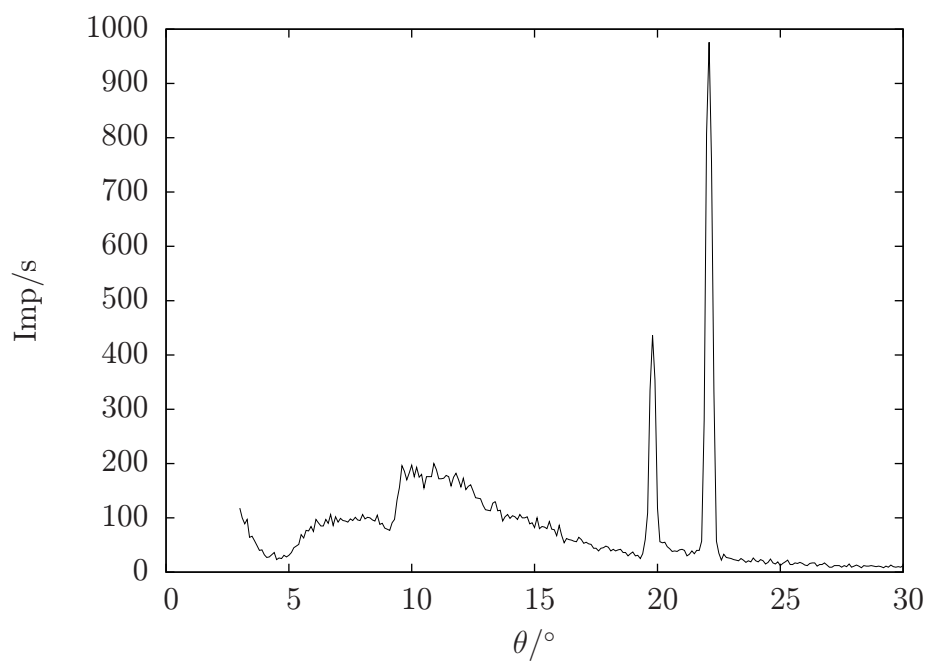
Obrázek 4: Oblast brzdného spektra rengenky s Cu anodou při napětí 15 kV a expozici 5 s.



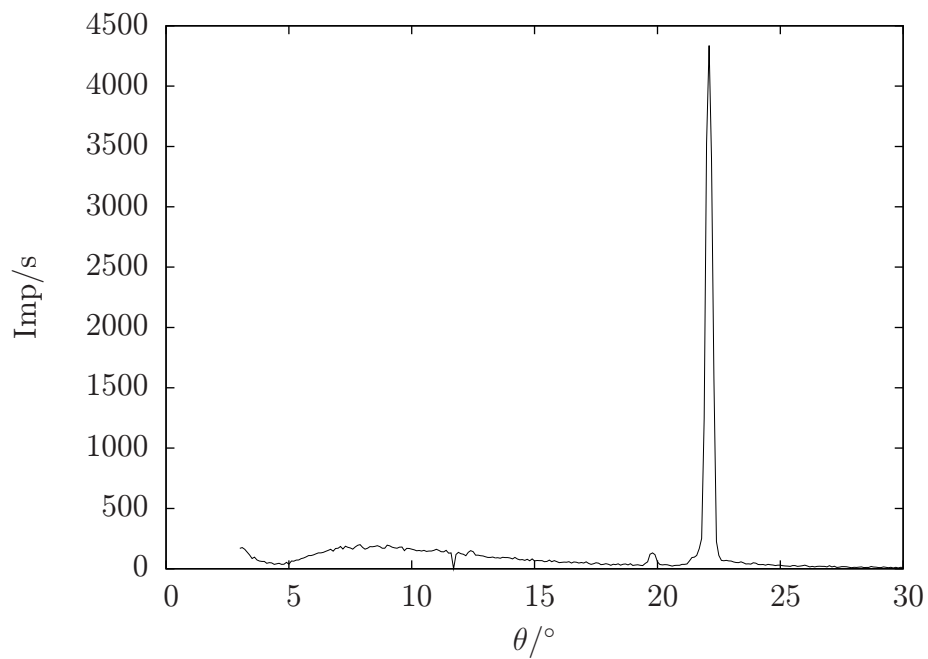
Obrázek 5: Oblast specifického záření pro rengenku s Cu anodou při napětí 15 kV a expozici 2 s.



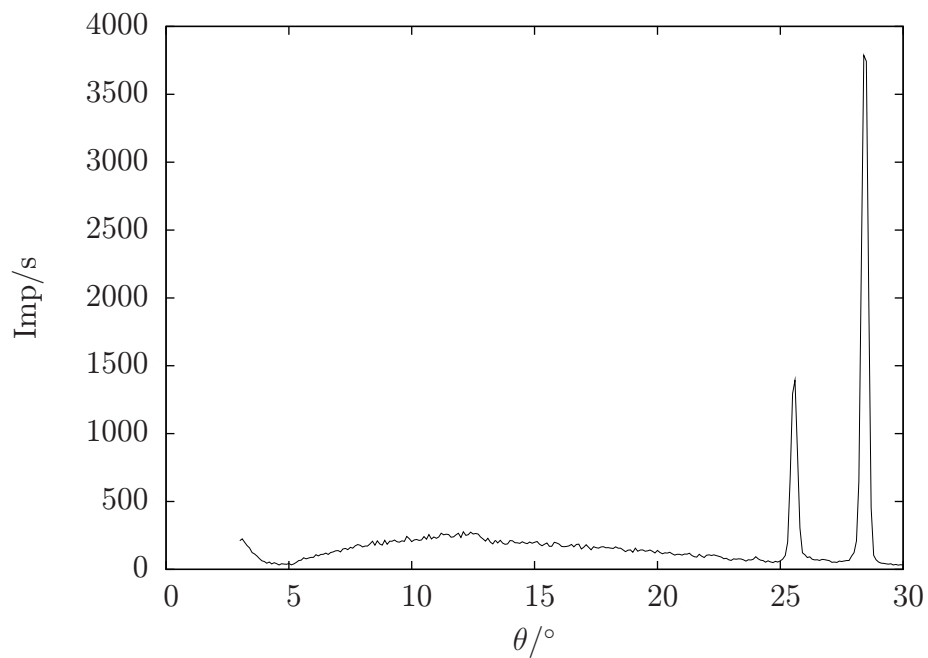
Obrázek 6: Oblast specifického záření pro rentgenku s Cu anodou při napětí 33 kV a expozici 2 s.



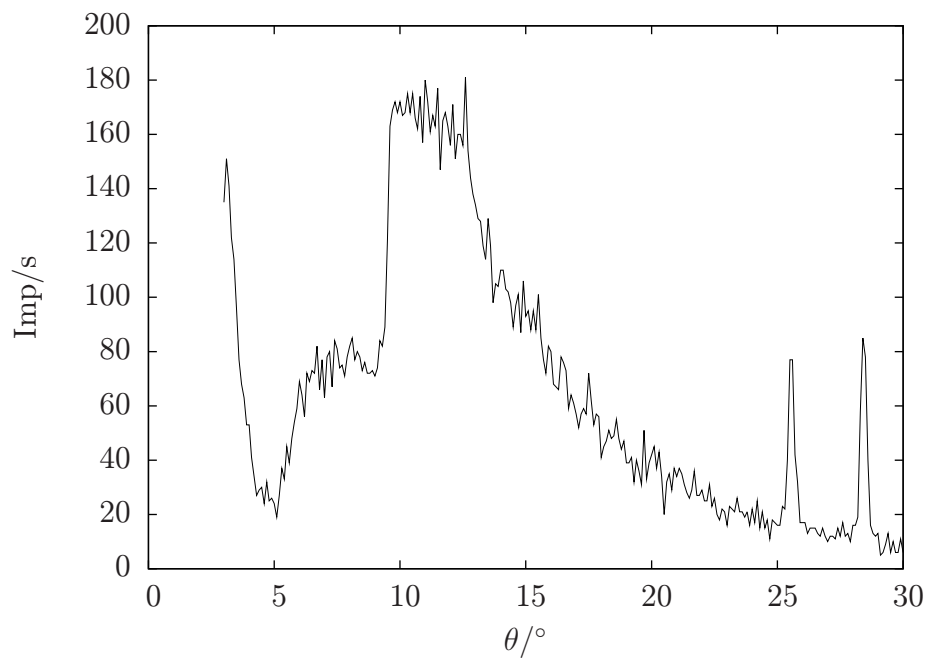
Obrázek 7: Spektrum rentgenky s Cu anodou s Zr absorbérem při napětí 33 kV a expozici 2 s.



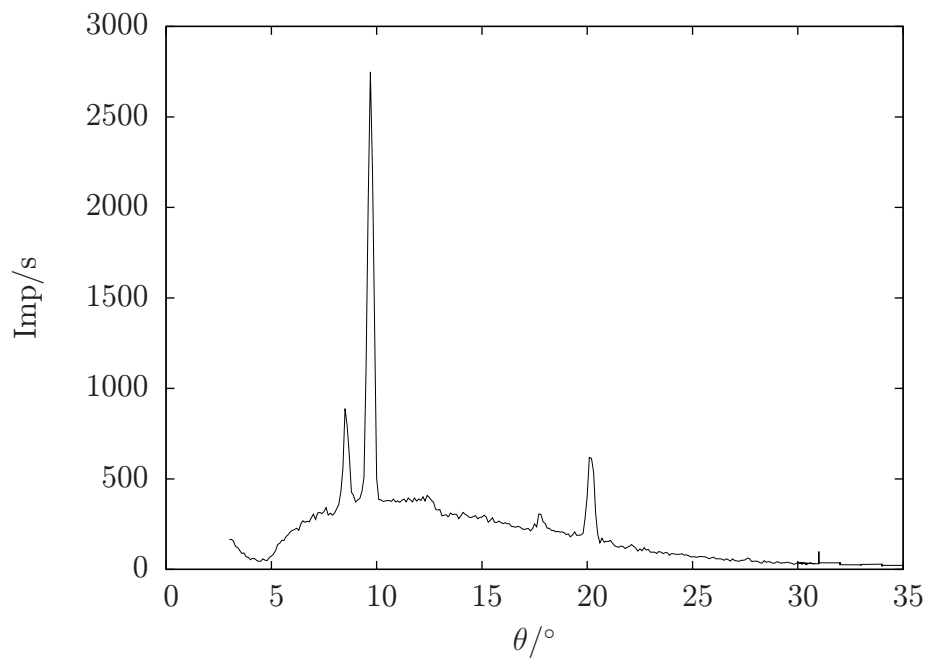
Obrázek 8: Spektrum rengenky s Cu anodou s Ni absorbérem při napětí 33 kV a expozicí 2 s.



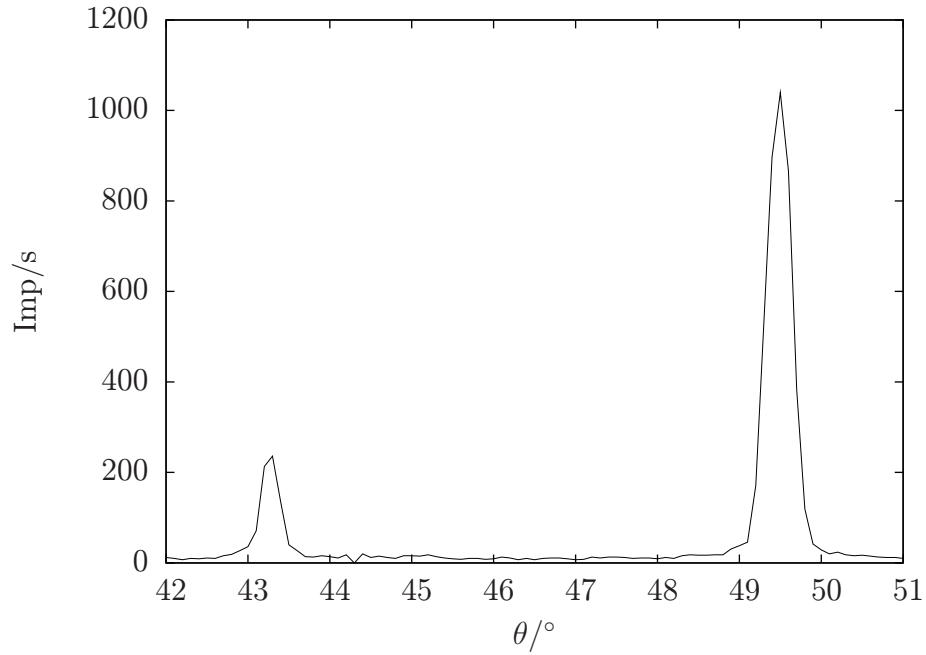
Obrázek 9: Spektrum rengenky s Fe anodou při napětí 33 kV a expozicí 2 s.



Obrázek 10: Spektrum rentgenky s Fe anodou s Zr absorbérem při napětí 33 kV a expozicí 2 s.



Obrázek 11: Spektrum rentgenky s Mo anodou při napětí 33 kV a expozicí 3 s.



Obrázek 12: Spektrum rengenky s Cu anodou při napětí 33 kV a expozici 2 s.

Pro srovnání tabelová hodnota je

$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad (12)$$

3.3 Moseleyův zákon

Nejprve jsem z naměřených spekter odečetl specifické délky záření

$$K_{Cu\beta} = (135.8 \pm 0.2)^\circ \text{pm} \quad (13)$$

$$K_{Cu\alpha} = (151.5 \pm 0.2)^\circ \text{pm} \quad (14)$$

$$K_{Fe\beta} = (173.4 \pm 0.2)^\circ \text{pm} \quad (15)$$

$$K_{Fe\alpha} = (191.6 \pm 0.2)^\circ \text{pm} \quad (16)$$

$$K_{Mo\beta} = (59.5 \pm 0.2)^\circ \text{pm} \quad (17)$$

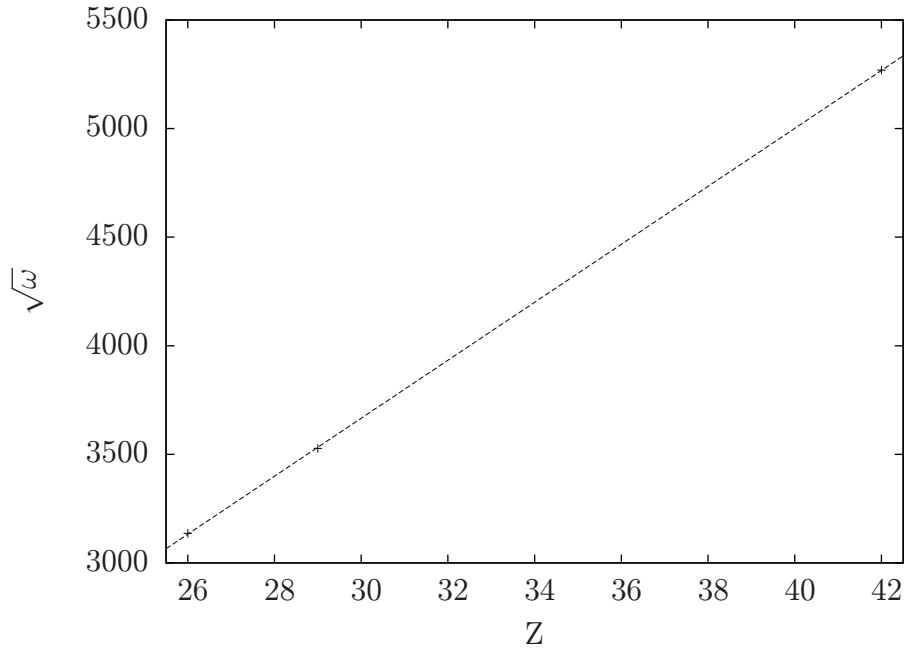
$$K_{Mo\alpha} = (67.9 \pm 0.2)^\circ \text{pm} \quad (18)$$

$$K_{Mo2\beta} = (122.5 \pm 0.2)^\circ \text{pm} \quad (19)$$

$$K_{Mo2\alpha} = (139.0 \pm 0.2)^\circ \text{pm} \quad (20)$$

Hodnoty pro alpha jsem přepočítal a vyneslu na obrázku 13 jako závislost $\sqrt{\omega}$ na Z . Tyto hodnoty jsem proložil přímkou a ze směrnice dopočítal

$$R_\omega = (2.37 \pm 0.05) \text{ s}^{-1} \quad (21)$$



Obrázek 13: Graf závislost $\sqrt{\omega}$ na Z pro K_{α}

Stínění vyšlo

$$s = 2.5 \pm 0.3 \quad (22)$$

Po dosazení těchto hodnot do Moseleyova zákonu se ná snadno ověřit i jeho platnost pro absorpční hrany.

Porovnáním intenzit pro $K_C u \beta$ získáme filtrační efekt Niklu pro tuto λ

$$F = (93 \pm 1)\%. \quad (23)$$

3.4 Úhlová disperze

Z naměřeného spektra rengenky s Mo anodou jsem určil úhlovou disperzi pro první a druhý řád dosazením do vztahu 6.

$$d_{n1} = (2.52 \pm 0.03) \cdot 10^9 \text{m}^{-1} \quad (24)$$

$$d_{n2} = (2.64 \pm 0.06) \cdot 10^9 \text{m}^{-1} \quad (25)$$

4 Diskuze

Naměřená spektra dopadla dle teoretických předpokladů. Jedinou odchylkou byly úhly od nuly. Vzhledem k uspořádání experimentu totiž docházelo k průchodu záření na

detektor bez interakce s krystalem. Tento efekt zvýšil nepřesnost určení λ_m , protože se lehce překrýval s okolím této hodnoty. To má za následek velkou chybu určení Planckovy konstanty. Ostatní počítané charakteristiky mají chybu o řád nižší, protože naměřené píky byli velmi úzké.

Poněkud ojedinělou chybou byl náhlý pokles intenzity pro určitou hodnotu na nulu. Tato chyba se neprojevovala nijak pravidelně a zřejmě se jedná pouze o ztrátu dat z detektoru.

5 Závěr

Proměřil jsem všechna spektra ze zadání. Výsledky jsou na obrázcích (1) až (12). Určil jsem hodnotu Planckovy konstanty

$$h = (5.7 \pm 1.2) \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad (26)$$

Ověřil jsem platnost Moseleyova zákonu a určil hodnotu

$$R_\omega = (2.37 \pm 0.05) \text{ s}^{-1} \quad (27)$$

Ze spektra Mo anody jsem určil úhlovou disperzi

$$d_{n1} = (2.52 \pm 0.03) \cdot 10^9 \text{ m}^{-1} \quad (28)$$

$$d_{n2} = (2.64 \pm 0.06) \cdot 10^9 \text{ m}^{-1} \quad (29)$$

Reference

- [1] **Studijní text na praktikum IV**
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_421.pdf (10. 11. 2012)
- [2] *J. English: Zpracování výsledků fyzikálních měření*
LS 1999/2000