

Studium rentgenových spekter Cu a Mo anody

Miroslav Michlíček, Gymnázium Vyškov

exodusf@centrum.cz

abstrakt

Cílem práce bylo seznámit se s rentgenovým spektrem mědi a molybdenu a určit Planckovu konstantu. Měření probíhalo na rentgenovém krystalovém spektrometru PHYWE, s krystalem LiF.

1 Úvod

Rentgenové záření (v anglické literatuře X-rays) je část elektromagnetického spektra s vlnovou délkou 10^{-8} až 10^{-10} m, bylo objeveno roku 1895 německým fyzikem W. C. Röntgenem (1845 - 1923) při zkoumání tzv. katodových paprsků. Za svůj objev získal v roce 1901 Nobelovu cenu.[3]

Tvrdé rentgenové paprsky se energeticky překrývají se spektrem γ záření, zpravidla se rozlišují podle svého původu, tj. rentgenové záření pochází z obalu atomu a γ záření z jádra.

Využití nachází zejména při lékařské diagnostice, ale také při defektoskopii a rentgenové fluorescenci. Oproti viditelnému spektru mají velkou energii a jako ionizující záření mohou být zdraví nebezpečné. [4]



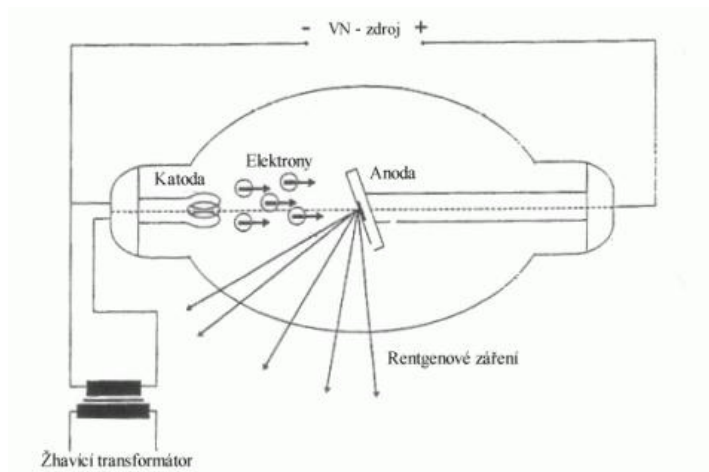
Obr. č. 1: W. C. Röntgen

2 Teoretická část

Běžně se jako zdroj rentgenového záření používají rentgenky. Elektrony, které unikají termoemisí ze žhavené katody, jsou vysokým napětím v řádech desítek kV urychlovány k anodě, kde ztrácejí při srážkách s materiálem anody energii. Vznikají fotony až do energie $E_{\max}=eU$. Záření vzniká dvěma způsoby.

Spojité rentgenové záření

Spojité rentgenové záření vzniká interakcí urychlených elektronů s hmotou. Při takovýchto srážkách se většina energie elektronů mění v teplo a jen z velmi malé části vzniká rentgenové záření. Principem vzniku spojitého spektra je tzv. brzdné záření. To vzniká vždy když nabitá částice zrychluje a je vysvětleno i klasickou elektrodynamikou. Při interakci s atomy a jádry jednotlivé elektrony různě mění směr díky coulombickým silám okolních elektronů a atomového jádra, a tedy i vyzařují. Spektrum je spojité, protože letící elektron může změnit dráhu prakticky jakkoli. Takového spektrum má oproti rozložení spektra žhnoucího tělesa výrazný rozdíl, končí energií E_{\max} , která přísluší energii elektronů.

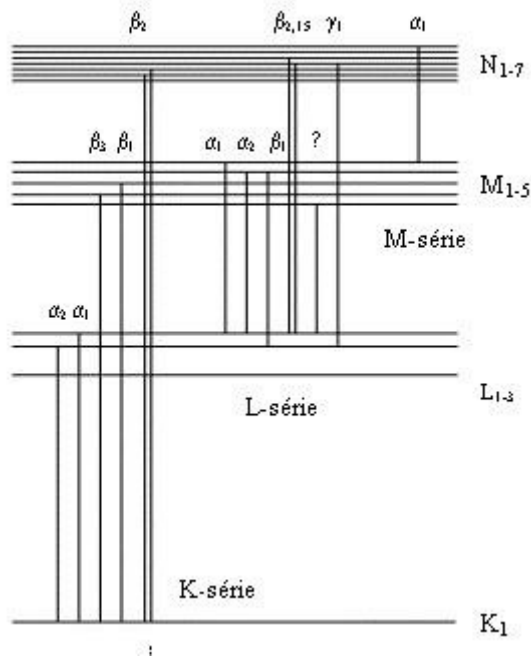


Obr. č. 2: schematický náčrt jednoduché rentgenky

Diskrétní rentgenové záření

Dalším možným způsobem interakce mezi urychlenými elektrony a anodou je fotoefekt. Urychlený elektron může vyrazit elektrony z nízké energetické hladiny atomu například K,L, čímž ho ionizuje nebo excituje. Ionizovaný atom velmi rychle přechází do stavu s nižší energií, tedy elektron z vyšší energetické hladiny (L,M) spadne do hladiny nižší a přebytečnou energii vyzáří ve formě fotonu.[1]

Vyzářený foton má charakteristickou vlnovou délku příslušející rozdílu energií hladin. Toto rozdělení závisí na protonovém čísle atomu a můžeme tedy určit z jakého atomu byl vyzářen.



Obr. č. 3: energetické hladiny v atomu a přechody mezi nimi

Difrakce na krystalu

Kvůli velmi malé vlnové délce rentgenového záření není možné sestavit mřížky, na kterých by rentgenové záření interferovalo, používají se proto krystaly, jejichž mřížková konstanta řádově odpovídá vlnové délce rentgenového záření.

Braggova rovnice popisuje rozptyl rentgenového záření na krystalu, vychází z popisu interference na jednotlivých rovinách krystalové mřížky a matematicky lze zapsat:

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

kde n je řád interferenčního maxima a ν je poloviční úhel rozptylu

Z rovnice vyplývá že pro monochromatické záření by vzniklo jen několik výrazných maxim a při malé změně úhlu by intenzita rychle klesala. Toto lze využít při konstrukci spektrometrů. Ze vzorce vyplývá, že úhel záleží na vlnové délce λ , tedy při dodržení Braggovy podmínky změnou úhlu proměříme spektrum rentgenového záření. Pro elektromagnetické záření platí :

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

a tedy závisí úhel rozptylu na energii dopadajícího záření

$$\sin \nu = \frac{nhc}{2dE}$$

3 Experimentální část

Aparatura

K měření jsem použil aparaturu PHYWE, která se skládá z rentgenky, s nastavitelným napětím 0 – 35 kV, krystalu LiF s mřížkovou konstantou $d=201$ pm, na kterém dochází k rozptylu a z goniometru s krokovým motorkem (slouží k měření úhlů). K měření intenzity záření slouží Geiger-Müllerův čítač umístěný na rameni goniometru. Mezi rentgenkou a krystalem je kolimátor, který ze záření rentgenky propouští jen úzký rovnoběžný svazek. K dispozici byla měděná a molybdenová anoda.

Měření

Nejdříve jsem s měděnou anodou naměřil četnost rentgenového záření v závislosti na úhlu otočení . Tabulkové hodnoty rozdílů energetických hladin jsem přepočítal na úhly ν . Po srovnání s experimentálními daty se ukázalo, že goniometr má posunutou nulovou hladinu o 2,6 stupně. Po kalibraci se hodnoty téměř přesně shodovaly s tabulkovými.

	$K_{\alpha 1}$	$K_{\alpha 2}$	K_{β}	L_{α}
Cu	8047 eV	8027 eV	8905 eV	929 eV
Mo	17479 eV	17374 eV	19608 eV	2293 eV

Tabulka č. 1: tabulkové hodnoty pro rozdíly energetických hladin

Po kalibraci jsem začal s měřením maximální energie E_{\max} , této energii odpovídá úhel φ označený v grafu č. 2. Z výše uvedených vztahů obecně pro ν vyplývá:

$$\sin \vartheta = \frac{nhc}{2deU}$$

Protože známe součin $\sin \vartheta$ a U můžeme určit velikost Planckovy konstanty:

$$h = \frac{2Ude \sin \vartheta}{c}$$

Naměřil jsem hodnoty a dopočítal Planckovu konstantu:

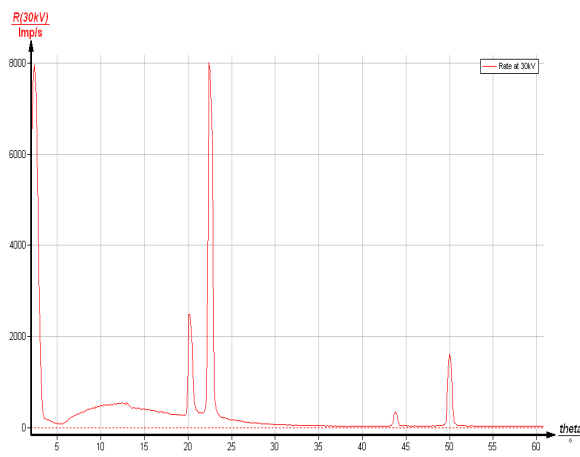
U [V]	ϑ / [°]	h / [Js]
30000	5,3	$5,96 \cdot 10^{-34}$
25000	6,4	$5,99 \cdot 10^{-34}$
20000	8,2	$6,14 \cdot 10^{-34}$
15000	11,4	$6,38 \cdot 10^{-34}$

Tabulka č. 2: Měření

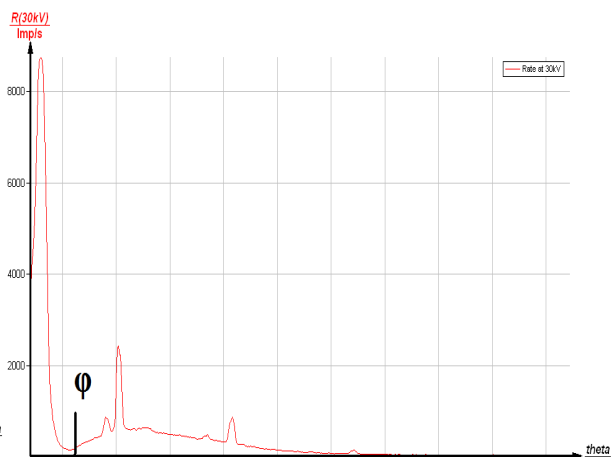
Rentgenové spektrum

Další částí mé práce bylo seznámit se s rentgenovým spektrem mědi a molybdenu. Na grafech 1 a 2 je naměřené spektrum pro molybden a měď. První velmi výrazný pík představuje téměř celý svazek, který při nulovém otočení směřuje přímo do detektoru. Po prudkém snížení následuje vzestup, znamenající horní energetickou mez rentgenového záření a za ním pak dva výrazné píky, energetičtější z nich odpovídá K_{β} přechodu a méně energetický K_{α} 1 i 2, tyto hladiny jsou při rozlišení goniometru $0,1^{\circ}$ neoddělitelné (rozdíl $K_{\alpha 1,2}$ odpovídají úhlu $0,05^{\circ}$).

Pro náš použitý krystal LiF o $d = 4,03 \cdot 10^{-10}$, byl pro další L přechody $\sin \vartheta > 1$ a tedy je nebylo možné změřit. Další píky jsou pouze druhými (u Mo i třetími) řády interference K přechodů.



Graf č. 1: spektrum mědi s velmi výraznými charakteristickými spektrálními čarami



Graf č. 2: spektrum molybdenu, charakteristické spektrální čáry jsou méně výrazné, ale s LiF byl viditelný i třetí řád

4 Diskuze

Nepřesnosti způsobeny statistickými chybami jsem omezil volbou pětisekundového integračního času. G-M čítač tedy pro každý úhel po $0,1^\circ$ po zvolený integrační čas průměroval počet příšlých impulzů, které poté vynášel do grafu. Je tedy zřejmé, že při použití delšího integračního času získáme vyhlazenější graf, kde lze pozorovat například i třetí řád molybdenu. Záření pozadí lze zanedbat, bylo v rozmezí 0 – 2 impulzy za sekundu, což je podstatně méně než průměrný signál, který byl řádu stovek. V případě prvního kalibračního měření se objevila dvakrát krátká chyba, kdy detektor přestal počítat signály a do grafu vynesl 0. Později se však již neopakovala a neovlivnila měření.

Výsledkem měření je dopočítaná Planckova konstanta $h = (6,12 \pm 0,14) \cdot 10^{-34}$ Js, od tabulek se liší asi o 8 %, musím však zdůraznit, že se jí při použití nižšího napětí blížila více. Samozřejmě součin $U \sin \varphi$ musí být konstantní, ale při použití vysokého napětí je φ nižší a velmi špatně se odčítá, z důvodu pozadí vzniklého přímým svazkem. Možným řešením by bylo postupovat po menších napětích a uskutečnit tak daleko více měření.

5 Závěr

Pomocí měření spekter mědi při různých napětích jsem určil velikost Planckovy konstanty na $h = (6,12 \pm 0,14) \cdot 10^{-34}$ Js. Od tabulkové hodnoty $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [2] se moje hodnota liší asi o 8%, což lze považovat za úspěch. Seznámil jsme se také s některými procesy uvnitř atomu, které se týkají rentgenového spektra a problematikou s tím spojenou.

Rád bych zde poděkoval garantu mého miniprojektu Danielu Krasnickému za seznámení s experimentem a četné rady při měření. Stejně tak bych chtěl poděkovat všem organizátorům Fyzikálního Týdne, FJFI ČVUT a sponzorům za možnost se sem podívat a zkusit si zahrát na vědce.

Literatura

- [1] Podklady pro laboratorní měření na FJFI ČVUT - Studium rentgenových spekter Cu a Mo anody - <http://praktika.fjfi.cvut.cz/MoAnoda/>
- [2] http://cs.wikipedia.org/wiki/Planckova_konstanta
- [3] http://cs.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Conrad_Röntgen
- [4] http://cs.wikipedia.org/wiki/Rentgenové_záření