

Literatura

- [1] *Trna, J.*: Jak motivovat žáky ve fyzice se zaměřením na nadané. Paido, Brno, 2012 [on-line], dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Josef_Trna/publication/306100549
- [2] *Hromádka, Z.*: Zábava při vyučování fyziky. Metodický portál RVP, 2018, [on-line], dostupné z: <https://clanky.rvp.cz/clanek/r/ZF/21792/ZABAVA-PRI-VYUCOVANI-FYZIKY.html/>
- [3] *Benešová, L.*: Komiks jako motivační prvek ve výuce fyziky. Diplomová práce, Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita, Plzeň, 2013.
- [4] *Marková, I.*: Astronomie jako motivační prvek ve výuce fyziky. 2. Československá konference o vzdělávání v astronomii, Hvězdárna Valašské Meziříčí, Valašské Meziříčí, 2010, [on-line], dostupné z: <https://docplayer.cz/3312823-Astronomie-jako-motivacni-prvek-ve-vyuce-fyziky.html>
- [5] *Klopfner, E. et al.*: Using the technology of today, in the classroom today. MIT, Massachusetts, 2009, [on-line], dostupné z: https://education.mit.edu/wp-content/uploads/2018/10/GamesSimsSocNets_EdArcade.pdf
- [6] *Burda, M.*: Motivační prvky ve výuce fyziky. Seminář na Oddělení fyzikálního vzdělávání Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky PŘF MU v Brně, 2008, [on-line], dostupné z: http://edu.physics.muni.cz/documents/official/prezentace_burda.ppt
- [7] <https://www.ecorinth.com/>

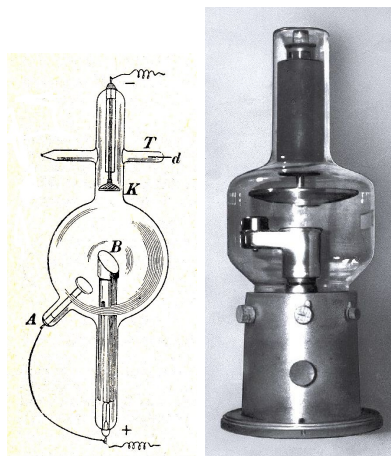
Rentgenové záření ve škole i mimo školu 1

MICHAL KLÁTIL – DANIEL JEZBERA

Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové

V roce 2020 to bude 125 let, co německý fyzik *Wilhelm Conrad Röntgen* při studiu výbojů v plynech objevil *papersky X*, v dnešní terminologii rentgenové záření, a v roce 1901 mu byla za tento unikátní objev udělena v historii první Nobelova cena za fyziku. I když si rentgenové záření

hledalo svoje praktické uplatnění postupně, již v osnovách fyziky vyššího gymnázia z roku 1908 se poprvé objevuje heslo *Röntgenovy paprsky* a učivo o *Röntgenově lampě*. V té době byly tyto poznatky pochopitelně součástí tématu Výboje v plynech, kam byla zařazena např. také *elektronová lampa* – trioda. Základem učiva byl výklad funkce klasické rentgenky s hliníkovou studenou katodou a měděnou antikatomou povlečenou vrstvou platiniridia nebo wolframu. Na obr. 1a je vyobrazení rentgenky v učebnici [1], jejíž první vydání vyšlo v roce 1936 a poslední, 7. vydání, v němž je rentgenovému záření věnována přibližně 1 tisková strana, bylo vydáno ještě v roce 1949 jako učebnice pro čtyřleté gymnázium. Pro srovnání je na obr. 1b snímek rentgenky s žhavenou katodou a rotující anodou (antikatomou) ze současné učebnice [2].



Obr. 1 Rentgenky v učebnicích včera a dnes

Další vývoj učiva znamenal přesun tématu Rentgenové záření z učiva elektřiny do optiky, do tematického celku Elektromagnetické záření. To můžeme zaznamenat od roku 1955 v učebnici pro 11. ročník jedenáctileté střední školy [3] a prakticky ve všech dalších souborech středoškolských učebnic až do současnosti. Nahlédneme-li však do nejnovější verze Rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia (RVP G), je jako očekávaný výstup sice uvedeno *elektromagnetické záření a jeho spektrum*, samotné rentgenové záření však není v RVP G vůbec zmíněno. Tím se RVP G liší od RVP pro SOŠ, kde je rentgenové záření přímo zahrnuto do kurikulárního rámce. Budeme-li předpokládat výuku fyziky na střední škole po celé

4 roky, žáci by se o rentgenovém záření mohli dovědět v posledním ročníku před teorií relativity a atomovou fyzikou. Hodinové dotace fyziky na různých středních školách se zmenšují a tak je i možné, že např. na škole, kde se fyzika vyučuje pouze v jednom ročníku, se o tomto záření žáci nemusejí dovědět vůbec.

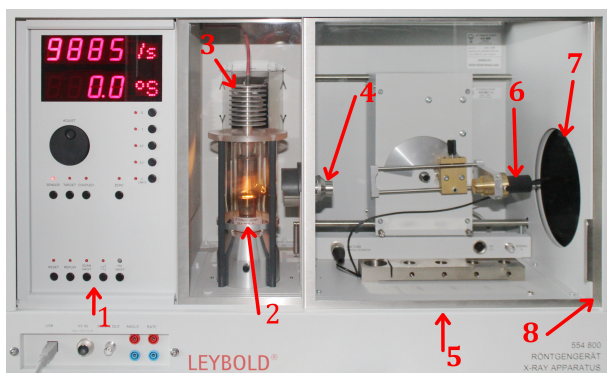
Rozhodující pro tvorbu Školního vzdělávacího programu učitelem je tedy spíše rozsah a pojetí výkladu učiva v učebnici, kterou bude učitel ve výuce používat. Ze současných učebnic je učivo o rentgenovém záření v největším rozsahu zpracováno v 3. přepracovaném vydání učebnice Fyzika pro gymnázia. Optika z roku 2002 [2]. V této učebnici je informacím o rentgenovém záření věnováno celých 9 stran. Obsahem učiva jsou Röntgenovy experimenty a objev záření, konstrukce prvního rentgenu a vysvětlení Laueho experimentu včetně schématu a výsledného vzniklého snímku. Uveden je zde i výčet vlastností záření a rozlišení pojmů brzděného a charakteristického záření. Zbytek učebnice je věnován aplikacím. Podrobně je rozebrána počítačová tomografie, a to včetně vzniklých snímků. Další podrobně popsanou aplikací je rentgenová strukturní analýza, v rámci níž je vysvětlena i Braggova difrakce a následně odvození Braggovy rovnice. V závěru jsou zmíněny i moderní aplikace v astronomii, defektoskopii a archeologii. Vzhledem k požadavkům RVP G však byl rozsah učiva v 5. vydání této učebnice z roku 2015 zkrácen přibližně na polovinu.

Uvedený rozsah učiva o rentgenovém záření neodpovídá jeho současnému uplatnění v mnoha přírodovědných oborech, jako jsou např. astronomie, strukturní analýza, defektoskopie, lékařství, tomografie, archeologie, krystalografie, kriminalistika a mnohé další. O významu nových poznatků z této problematiky svědčí i fakt, že z celkového počtu 110 udělených Nobelových cen za fyziku jich bylo 7 uděleno přímo za výzkum v oblasti rentgenového záření. K udělení dalších desítek Nobelových cen pomohly výzkumy rentgenového záření v oblasti chemie a medicíny [4].

Cenným prostředkem pro pochopení podstaty, vlastností a praktického využití rentgenového záření jsou experimenty. Jejich realizace samozřejmě dnes není možná pomocí klasické rentgenky a Ruhmkorfova induktoru jako zdroje vysokého napětí. K dispozici jsou moderní rentgenové aparatury, které jsou dostupné i pro experimentování ve školách. Ve dvou příspěvcích uvedeme experimenty s aparaturou LD DIDACTIC od firmy Leybold. V prvním příspěvku se budeme zabývat ověřením vlastností rentgenového záření a tématem druhého příspěvku budou principy rentgenové strukturní analýzy.

Rentgenová aparatura LD DIDACTIC

Rentgenová komora (obr. 2), se kterou jsou prováděny experimenty popsané v příspěvku, je navržena pro bezpečné předvádění významných vlastností rentgenového záření. I díky hmotnosti komory, která činí 41 kg, jde o poměrně stabilní zařízení. Rentgenka podle výrobce generuje ionizující záření, které uvnitř komory může překračovat absorbuující dávku 10 Sv/h. Taková dávka by i po krátkém expozičním čase mohla způsobit nevratné poškození tkáně, ba dokonce úmrtí. Proto je u samotné konstrukce kladen velký důraz na bezpečnost. Přesto však vždy trochu záření pronikne do okolí. Výrobce uvádí, že ve vzdálenosti 10 cm od rentgenky jde o dávku menší než 1 $\mu\text{Sv/h}$.



Obr. 2 Rentgenová aparatura LD DIDACTIC: 1 – ovládací panel s obrazovkou, 2 – rentgenka, 3 – chladicí systém, 4 – kolimátor, 5 – prostor pro umístění experimentu, 6 – GM detektor, 7 – fluorescenční obrazovka, 8 – bezpečnostní dvířka z olovnatého skla

Rentgenka s měděnou anodou, která je součástí aparatury, je chlazená vzduchem. Anodové napětí rentgenky lze regulovat v rozmezí 0 až 35 kV a proud v rozmezí 0 až 1 mA. Fluorescenční stínítko má průměr 15 cm. Komora je dále vybavena otočným goniometrem sloužící k uchycení krystalu a Geigerovy–Müllerovy (GM) trubice. Na čtyřmístném dvouřádkovém displeji lze zobrazit hodnotu anodového proudu, napětí, úhel otočení otočného terčíku a GM detektoru, rozsah otáčení, krok otáčení, atd. Otočení terčíku je možné v rozsahu od 0° do 360°. Otočení GM detektoru pak od 10° do 170°. Nejmenší krok otočení lze nastavit na 0,1°. Uvnitř komory jsou vývody kabelů pro GM detektor, 2 sloty stíněného koaxiálního ka-

belu a kanálek pro případné vložení vlastních vodičů. Pro lepší ovládání experimentů a záznam dat lze všechny akce řídit přes počítač v programu výrobce „X-RAY Apparatus“.

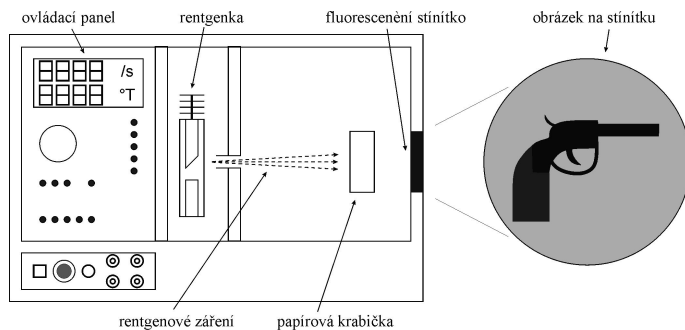
K rentgenové komoře jsou dostupné krystaly LiF a NaCl a již zmiňovaný Geigerův–Müllerův detektor. Do budoucna lze však pořídít více druhů krystalů.

Krystal LiF má rozměry 25 mm × 25 mm × 4 mm. Jeho krystalická struktura je kubická plošně centrovaná a udaná meziovinná vzdálenost činí 201 pm. U krystalu NaCl jsou parametry stejné, pouze meziovinná vzdálenost je 282 pm. Tyto vlastnosti krystalů se pak uplatní při experimentech popsanych v následujícím článku Rentgenové záření ve škole i mimo školu 2.

Geigerova–Müllerova trubice je naplněna směsí plynů neonu a argonu s příměsí halogenidu. Pracovní napětí, na které je detektor připojen, je 450 V. Odpor připojeného rezistoru je 10 Ω. Mrtvá doba, po kterou detektor není schopen správně zaznamenávat další kvanta, činí přibližně 90 ms.

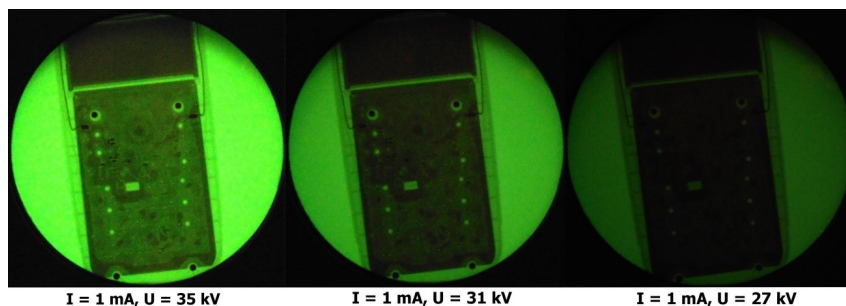
Experimenty s rentgenovou aparaturou a jejich výsledky

S rentgenovou komorou lze provést hned několik zajímavých experimentů ověřujících fyzikální vlastnosti rentgenového záření. Prvním, pro středoškoláky nejlépe představitelným experimentem, je detekce rozložení intenzity rentgenového záření po průchodu nějakým předmětem pomocí luminiscenčního stínítka. Paprsky rentgenového záření dopadající na stínítko excitují atomy luminoforu. Následným návratem atomu do základního stavu dojde k vyzáření fotonu viditelného záření. Uspořádání tohoto experimentu je zobrazeno na obr. 3.



Obr. 3 Uspořádání prvního experimentu

Konkrétně je zde možné pozorovat souvislost mezi hodnotou emisního proudu a světlostí luminiscenčního stínítka, stejně jako souvislost napětí a kontrastu stínítka. Při tomto experimentu je třeba zajistit dostatečnou tmou v místnosti z důvodu slabého kontrastu luminiscenčního stínítka. K tomuto účelu dobře poslouží např. deka, pod kterou lze vzniklé obrazy prosvícených předmětů fotografovat. Následující obrázek zobrazuje snímky vzniklé fotografováním stínítka při konstantním nastaveném proudu 1 mA a při proměnných hodnotách napětí. Analogický experiment lze provést i s konstantně nastavenou hodnotou napětí 35 kV a proměnnou hodnotou proudu.



Obr. 4 Prozářený kalkulátor při konstantní hodnotě proudu

Z výsledků prvního experimentu lze pozorovat, že se vzrůstající hodnotou proudu, a tedy se vzrůstající intenzitou záření, světlost obrazovky roste. Se vzrůstajícím napětím při konstantním proudu (obr. 4) je vidět větší kontrast luminiscenčního stínítka, protože roste intenzita záření a paprsky rentgenového záření jsou pronikavější.

Z těchto experimentů si lze povšimnout, že různé materiály mají různou pohltivost záření. Přes kovové šroubky záření takřka neprošlo, kdežto přes plastové pouzdro prošla záření většina. Se vzrůstající intenzitou je lépe vidět i vnitřní struktura prosvěcované kalkulačky, a kdyby rentgenka nebyla omezena svým výkonem, lze předpokládat, že při vyšším napětí by byla struktura plošných spojů ještě zřetelnější.

Takto jednoduchý experiment poukazuje na důležitost významu rentgenového záření při testování vnitřní struktury materiálů a zařízení v technické praxi. Na významnou roli využití poukazuje tento experiment i v medicínské diagnostice a v bezpečnostních složkách na letištích a u celní správy. Na následujících snímcích (obr. 5) jsou zachyceny snímky prosvícených

cené kuřecí kosti v papírové krabičce (simulující lidské tělo) a do krabice ukryté dětské kapslové pistolky.

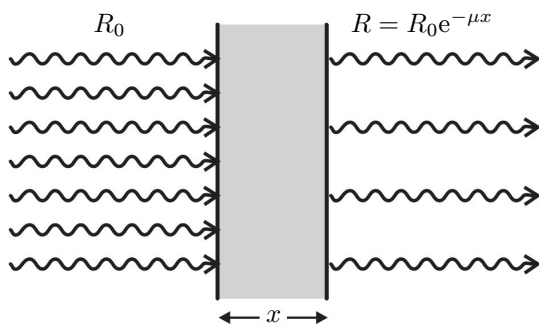


Obr. 5 Vlevo: prozařovaná krabička s ukrytými předměty; uprostřed: celá a zlomená kuřecí kost v papírové krabičce; vpravo: model revolveru v papírové krabičce

V rámci druhého experimentu se zaměříme na další důležitý jev u rentgenového záření, a sice na absorpci a zjišťování koeficientu útlumu. Rozdílné absorpce záření v závislosti na intenzitě záření, tloušťce a hustotě prozařovaného materiálu se využívá v celé řadě aplikací rentgenového záření, např. při rentgenové diagnostice, defektoskopii, archeologii, atd.

Mluvíme-li o absorpci, myslíme tím úbytek intenzity prošlého záření nějakou látkou. Známe-li intenzitu záření před průchodem látkou R_0 a po průchodu látkou R , můžeme dopočítat transmitanci (propustnost) materiálu T podle vztahu (1):

$$T = \frac{R}{R_0}. \quad (1)$$



Obr. 6 Schéma absorpce záření při průchodu látkou tloušťky x

Úpravou následujícího vztahu (2) vyjadřujícího intenzitu prošlého záření, která klesá exponenciálně s tloušťkou materiálu, pak pro propustnost získáváme vztah (3), nebo po zlogaritmování vztah (4):

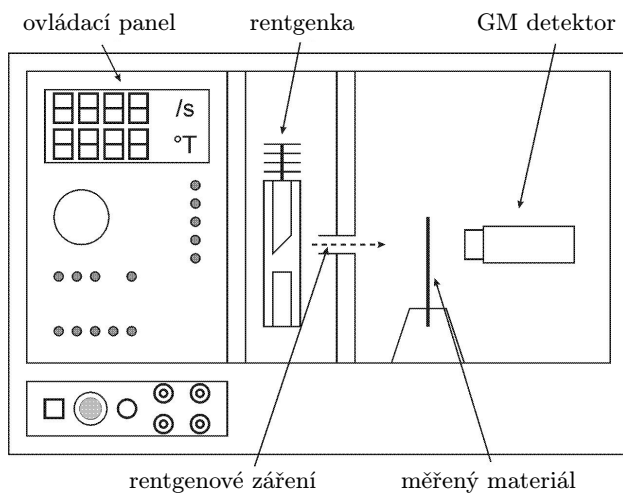
$$R = R_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (2)$$

$$T = e^{-\mu x}, \quad (3)$$

$$\ln T = -\mu x, \quad (4)$$

kde T je transmitance, μ lineární koeficient útlumu a x tloušťka prozařovaného materiálu. Hodnota koeficientu útlumu závisí na hustotě a atomovém čísle prozařovaného materiálu a stejně tak na energii dopadajícího záření. Poslední vztah (4) je znám též pod názvem Lambertův–Beerův zákon [6, 7].

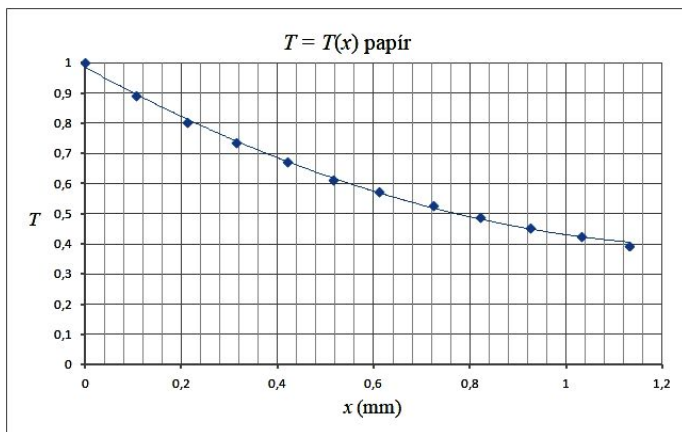
Cílem následujícího měření je nejen potvrdit Lambertův–Beerův zákon, ale i prokázat závislost koeficientu útlumu na atomovém čísle prosvěcovaného materiálu.



Obr. 7 Schéma provedení následujících experimentů

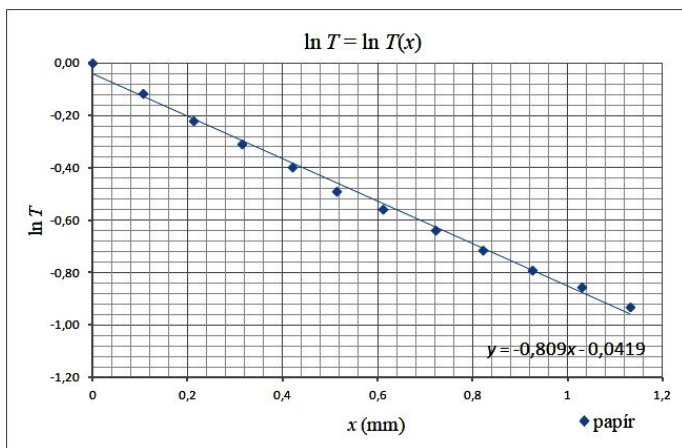
Všechna následující měření jsou provedená při nastavené hodnotě napětí rentgenky na 30 kV a při proudu 1 mA. Paprsky necháme procházet nejprve na volno, následně papírem, po dobu 120 s a výsledné intenzity záření zaznamenáme pomocí GM detektoru. Papír je zvolen díky jeho dobré dostupnosti v různých a pozvolna se zvětšujících tloušťkách.

Z naměřených hodnot vypočítáme podle vztahu (1) transmitanci, kterou vyneseme do grafu v závislosti na tloušťce prozařovaného materiálu (graf 1).



Graf 1 Exponenciální závislost transmitance na tloušťce papíru x

Že jde skutečně o exponenciální závislost podle rovnice (3), lze ověřit zlogaritmováním transmitance a vynesením získaných hodnot do grafu opět v závislosti na tloušťce materiálu. Tím bychom podle předpokladu rovnice (4) měli získat přímkou, což lze již vidět na následujícím grafu 2.



Graf 2 Lineární závislost $\ln T$ na tloušťce papíru x

Naměřená lineární závislost přirozeného logaritmu transmitance na tloušťce materiálu odpovídá očekávané závislosti podle rovnice (4). S vložení lineární spojnice trendu a zobrazením její rovnice lze z rovnice (4) dopočítat, že koeficient útlumu papíru $\mu = 9,2 \text{ cm}^{-1}$. Tímto měřením se tak podařilo experimentálně potvrdit platnost Lambertova–Beerova zákona.

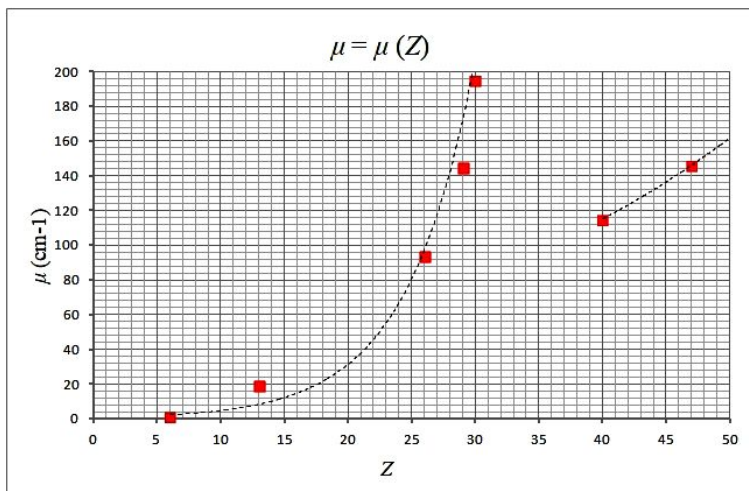
V úvodní části bylo řečeno, že hodnota koeficientu útlumu závisí nejen na energii dopadajícího záření, ale i na hustotě a atomovém čísle prozařovaného materiálu. Absorpce rentgenových paprsků je v podstatě způsobena excitací, nebo ionizací atomů, která uvolní elektron z vnitřní slupky elektronového obalu. V důsledku toho je absorpce silně závislá na excitační nebo vazební energii elektronů, a tedy i na atomovém čísle Z .

V následujícím měření se pokusíme potvrdit závislost koeficientu útlumu μ na atomovém čísle materiálu Z . Schéma měření odpovídá předchozímu experimentu, pouze místo přidávání vrstev papíru, jsou pečlivě proměřeny různé druhy materiálů.

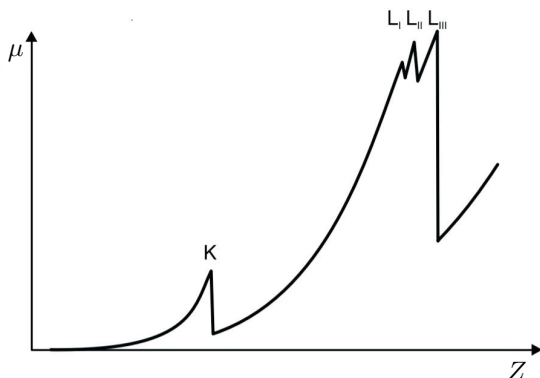
K experimentu se podařilo zajistit následující materiály: uhlík, hliník, železo, měď a zinek. Parametry nastavení rentgenky a doby měření jsou stejné jako v předchozím experimentu. Zprůměrovanou hodnotu intenzity prošlého záření zapíšeme do tabulky, ze které s využitím vzorců (1) a (4) dopočítáme transmitanci a koeficient útlumu jednotlivých prvků. Získané hodnoty vyneseme do grafu závislosti koeficientu útlumu na atomovém čísle. Pro prvky s vyššími atomovými čísly byla využita i měření intenzity prošlého záření za stejných podmínek určených výrobcem aparatury, a to pro materiály zirkonium a stříbro.

Z grafu 3 vidíme, že koeficient útlumu prudce roste se zvyšujícím se atomovým číslem, a to až do hodnoty $Z = 30$. Jelikož prvky mezi atomovým číslem $Z = 30$ a $Z = 40$ nebyly k měření dostupné, můžeme pouze předpokládat, že by tento nárůst pokračoval až do hodnoty $Z = 40$ [6]. Zde lze zaznamenat prudký pokles koeficientu útlumu. To je způsobeno tím, že některé doposud možné excitace nejsou pro prvky s větším atomovým číslem nadále možné, kvůli příliš vysoké vazební energii elektronů. Tento propad se nazývá absorpční hrana. Následně dochází opět k nárůstu koeficientu útlumu a vzniku dalších absorpčních hran (obr. 8). Nárůst koeficientu útlumu mezi absorpčními hranami je přibližně úměrný 4. mocnině atomového čísla.

Zeslabování rentgenového záření při průchodu hmotou má velmi širokou škálu využití. K nejznámějším aplikacím patří medicína, bezpečnostní rentgeny, analýza složení materiálu a další.



Graf 3 Graf závislosti koeficientu útlumu na atomovém čísle prozářeného materiálu



Obr. 8 Průběh závislosti koeficientu útlumu na atomovém čísle Z (upraveno z [6])

Závěr

Tyto experimenty, ověřují základní vlastnosti rentgenového záření. První prováděný experiment ověřuje schopnost fluorescence. Konkrétně lze zjišťovat souvislost emisního proudu a světlosti luminiscenčního stínítka, stejně

tak napětí a jeho kontrastu. Ve druhém měření se podařilo potvrdit Lambertův–Beerův zákon. Naměřená lineární závislost přirozeného logaritmu transmitance na tloušťce materiálu odpovídá očekávané závislosti. Ve třetím experimentu se ve shodě s teoretickými předpoklady podařilo proměřit závislost koeficientu útlumu na atomovém čísle prozařovaného materiálu.

Literatura

- [1] *Mašek, B., Wangler, A.*: Fyzika pro vyšší třídy středních škol, díl II, 7. vydání. JČMF, Praha, 1936.
- [2] *Lepil, O.*: Fyzika pro gymnázia. Optika, 3. přepracované vydání. Prometheus, Praha, 2002.
- [3] *Fuka, J. a kol.*: Fyzika pro jedenáctý ročník. SPN, Praha, 1955.
- [4] MLA style. *All Nobel Prizes in Physics*. In: Nobelprize.org [online]. Nobel Media AB 2019. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics>
- [5] *Beiser, A.*: Úvod do moderní fyziky. 2. vyd., Academia, Praha, 1978.
- [6] *LD DIDACTIC GMBH*: X-RAY Apparatus: Investigating the attenuation of X-rays as a function of the absorber material and absorber thickness: P6.3.2.1 [online]. Federal Republic of Germany [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <https://www.leybold-shop.com/vp6-3-2-1.html>
- [7] *Ullmann, V.*: Jaderná a radiační fyzika: Ionizující záření. [online]. Klinika nukleární medicíny FNŠP [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>