

Karakterizacija izvora rendgenskog zračenja metodom skenirajuće difraktometrije

Kuljiš, Lenka

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:921470>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno-matematički fakultet

**Karakterizacija izvora rendgenskog zračenja
metodom
skenirajuće difraktometrije**

Završni rad

Lenka Kuljiš

Split, rujan 2023.

Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno–matematički fakultet
Odjel za fiziku
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Završni rad

Karakterizacija izvora rendgenskog zračenja metodom skenirajuće difraktometrije

Lenka Kuljiš

Sveučilišni prijediplomski studij Fizika

Sažetak:

U ovom završnom radu pomoću uređaja *PHYWE XR 4.0 expert X-ray unit* izmjeren je i analiziran spektar izvora rendgenskog zračenja. Snop rendgenskih zraka, koji napušta izvor zračenja u uređaju, upada na monokristal zatvarajući s njegovom površinom kut θ . Pri tome se događa pojava ogiba rendgenskih zraka na kristalu. Detektor uređaja koristi metodu skenirajuće difraktometrije te bilježi difrakcijske maksimume određenih kristalnih ravnina kada je za kut θ postignut uvjet konstruktivne interferencije. U spektru zračenja dobivenog na ovaj način uočavamo karakteristične linije izvora rendgenskog zračenja. Pomoću različitih metalnih folija istraživalo se koji od korištenih metala bolje apsorbira rendgensko zračenje, odnosno koliki je njihov utjecaj na karakteristično zračenje izvora. Eksperimenti poput ovoga, koji koriste neku od metoda ogiba rendgenskih zraka, našli su primjenu u znanstvenim istraživanjima različitih područja, od kristalografije do medicine.

Ključne riječi: rendgensko zračenje, metoda skenirajuće difraktometrije, karakteristične linije, bakrena cijev, metalne apsorpcijske folije

Rad sadrži: 33 stranice, 22 slike, 1 tablicu, 15 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku.

Mentor: doc. dr. sc. Ivana Weber

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Ivana Weber,
izv. prof. dr. sc. Bernarda Lovrinčević,
doc. dr. sc. Martina Požar

Rad prihvaćen: 26. rujna 2023.

Rad je pohranjen u Knjižnici Prirodoslovno–matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

Basic documentation card

University of Split
Faculty of Science
Department of Physics
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Bachelor thesis

Characterization of an X-ray Radiation Source by Scanning Diffractometry

Lenka Kuljiš

University undergraduate study Physics

Abstract:

In this bachelor thesis spectrum of an x-ray radiation source was measured and analyzed using *PHYWE XR 4.0 expert X-ray unit*. A beam of x-rays that leaves the radiation source in the measuring device, falls upon a monocrystal closing an angle θ with its surface. A phenomenon called x-ray diffraction of a crystal is what occurs consequently. The detector of the device uses scanning diffractometry and marks diffraction maximum of certain crystal planes when the condition of constructive interference is achieved for glancing angle θ . In the radiation spectrum obtained in this way we notice the characteristic lines of the x-ray radiation source. Using different metal foils it has been shown which of the metals absorb x-ray radiation better, while observing the way on which they affect the characteristic radiation of the source. Experiments like this, that use one of the methods of x-ray diffraction, found an application in scientific research of different areas, from crystallography to medicine.

Keywords: x-ray radiation, scanning diffractometry, characteristic lines, copper tube, metal absorption foils

Thesis consists of: 33 pages, 22 figures, 1 tables, 15 references. Original language: Croatian.

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ivana Weber

Reviewers: Assist. Prof. Dr. Ivana Weber,
Asoc. Prof. Dr. Bernarda Lovrinčević,
Assist. Prof. Dr. Martina Požar

Thesis accepted: September 26, 2023

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Rendgensko zračenje	2
2.1	Elektromagnetsko zračenje	2
2.2	Otkriće rendgenskih zraka	6
2.3	Spektar rendgenskog zračenja	7
3	Ogib rendgenskih zraka	12
3.1	Metode ogiba rendgenskih zraka na kristalima	14
4	Primjena rendgenskog zračenja	16
5	Opis mjernog uređaja	17
6	Opis eksperimenta i mjerenja	20
7	Rezultati i diskusija	24
8	Zaključak	31
9	Literatura	32

1 Uvod

Otkriće rendgenskog zračenja jedno je od znanstvenih otkrića koje je doprinijelo razvoju moderne fizike kakvu poznajemo danas. Našlo je svoju primjenu u nizu različitih područja, među kojima su najpoznatije one primjene koje su vezane za medicinu i kristalografiju. Bez moderne kristalografije ne bismo poznavali kemijsku i prostornu strukturu većine materijala koji postoje danas. Ogib ili difrakcija rendgenskih zraka, koja će biti proučavana u ovom radu, nezaobilazni je dio fizike u napretku kristalografije. Dokle god postoji potreba za otkrivanjem struktura s uređenim rasporedom atoma ili molekula, primjerice novih virusa, budućnost za ovu granu znanosti definitivno je svijetla. [1]

U prvom dijelu rada dan je povijesni osvrt na istraživanja u području elektromagnetskih valova, koja su prethodila otkriću rendgenskog zračenja. Nakon toga opisane su karakteristike rendgenskih zraka, način njihovog nastanka te izgled spektra kojeg proizvode. U idućem je poglavlju opisana fizika koja se nalazi iza metoda ogiba rendgenskih zraka na kristalima. Poblje je opisana metoda skenirajuće difraktometrije koja je zatim iskorištena u eksperimentu. Pomoću dobivenih mjerenja napravljena je analiza spektra rendgenskog zračenja njegovog izvora, konkretnije karakterističnih linija tog izvora. Na kraju je proučeno koje od metalnih folija koje smo imali na raspolaganju uspijevaju blokirati spomenuto karakteristično zračenje izvora.

2 Rendgensko zračenje

2.1 Elektromagnetsko zračenje

Teoretska su podloga ovog završnog rada saznanja o rendgenskom zračenju. Potreban nam je opis procesa nastanka rendgenskih zraka i njihovih karakteristika te spektra njihovog zračenja. Zatim nas zanima ogib ili difrakcija rendgenskih zraka na uzorcima kristala. Međutim, prije nego što sve ovo možemo opisati, potrebna nam je određena podloga iz samog elektromagnetskog zračenja. U ovom će potpoglavlju ukratko biti napisan povijesni osvrt na otkrića u području elektromagnetizma te fizikalni dio koji nam je bitan za razumijevanje rendgenskog zračenja.

Britanski je fizičar James Clerk Maxwell 1864. godine predložio kako ubrzani električni naboji stvaraju povezane električne i magnetske smetnje, koje mogu kroz prostor putovati neodređeno puno vremena. U slučaju da naboji osciliraju periodično, ove su smetnje valovi čije su električne i magnetske komponente okomite međusobno i okomite na smjer širenja vala. Maxwellove fundamentalne jednadžbe elektromagnetizma, skupa s elektromagnetskom indukcijom, predviđaju postojanje elektromagnetskih valova u kojima su povezana konstantno promjenjiva električna i magnetska polja. [1]

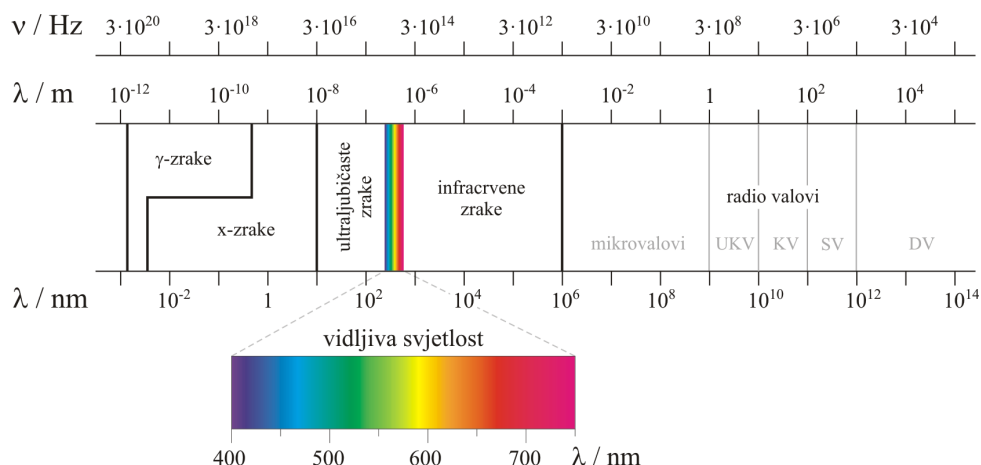
Maxwell je uspio pokazati da se elektromagnetski valovi u slobodnom prostoru (vakuumu) šire brzinom

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} ,$$

gdje su ϵ_0 i μ_0 električna permitivnost te magnetska permeabilnost vakuuma redom. Vidimo da je brzina ista kao i brzina svjetlosnih valova. Sličnost je bila previše velika da bi bila slučajna, pa je Maxwell zaključio kako se svjetlost sastoji od elektromagnetskih valova. Heinrich Hertz je 1888. godine eksperimentalno pokazao da elektromagnetski valovi zaista postoje te da se ponašaju onako kako je to predvidio Maxwell. [1]

Svjetlosni valovi su, dakle, elektromagnetski valovi na koje naše oči mogu reagirati. Međutim, vidljiva svjetlost nije jedini primjer elektromagnetskog vala. Svi elektromagnetski valovi temeljno su po prirodi isti, ali ovisno o njihovoj frekvenciji razlikuju se svojstva njihove interakcije s materijom. Na slici 2.1 prikazan je spektar elektromagnetskog zračenja od niskih frekvencija koje pronalazimo kod radio valova, do visokih frekvencija rendgenskog i gama zračenja. Vidimo da se vidljiva svjetlost nalazi u uskom frekvencijskom intervalu od približno $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz crvene svjetlosti do otprilike $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz, kolika je frekvencija ljubičaste svjetlosti. Rendgensko zračenje nalazi se u frekvencijskom intervalu od otprilike $3 \cdot 10^{16}$ do $3 \cdot 10^{18}$ Hz. U idućim poglavljima ovog rada, vidjet ćemo kako rendgenske zrake imaju široku primjenu upravo zbog ovakvog položaja u elektromagnetskom spektru zračenja. Odnosno, zbog svoje visoke frekvencije, a manje valne duljine rendgenske zrake imaju visoko svojstvo

prodornosti kroz materiju. [1, 2]



Slika 2.1: Spektar elektromagnetskog zračenja (slika je preuzeta s <https://www.periodni.com> [3])

Za sve valove vrijedi princip superpozicije, odnosno kada dva ili više vala iste prirode prolaze pokraj neke točke u isto vrijeme, trenutna amplituda u toj točki, zbroj je trenutnih amplituda pojedinačnih valova. Za svjetlosne se valove kao trenutna amplituda najčešće uzima vrijednost električnog polja. [1]

Kada se dva ili više svjetlosnih valova susretne u određenoj regiji, oni interferiraju kako bi proizveli novi val čija je trenutna amplituda na tom mjestu jednaka zbroju amplituda izvornih valova. Kod valova iste frekvencije događa se konstruktivna interferencija ako imaju istu fazu, čime se pojačavaju izvorni valovi kako bi stvorili val veće amplitude. Destruktivna interferencija se pak odnosi na djelomično ili potpuno poništenje valova koji su u različitoj fazi. Kada izvorni valovi imaju različite frekvencije rezultat će biti kombinacija konstruktivne i destruktivne interferencije. Godine 1801. Thomas Young prvi je eksperimentalno pokazao interferenciju svjetlosnih valova, koristeći par proreza osvijetljenih pomoću izvora monokromatske svjetlosti. Osim interferencije, kod Youngovog se pokusa može objasniti još jedan karakteristični valni fenomen: difrakcija. Iz svakog od proreza u Youngovom pokusu šire se sekundarni valovi kao da potječu iz samog proreza što je jedan mogući primjer difrakcije. Pojave interferencije te difrakcije naravno primjećujemo i kod ostalih elektromagnetskih valova. U ovom ćemo radu promatrati difrakciju rendgenskih zraka, ali o fizici koja objašnjava njihove difrakcije više u trećem poglavlju.

Na zaslonu su se zbog konstruktivne i destruktivne interferencije redom vidjele svijetle i tamne linije, dok bi zaslon bio taman da klasičnu česticu pustimo kroz prorez, a ne val. Konstruktivna interferencija događa se kada je razlika u duljinama puta od proreza do ekrana $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$, a destruktivna se javlja tamo gdje je razlika puta $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \dots$ [1]

Svjetlost se sastoji od elektromagnetskih valova koji poštuju Maxwellovu teoriju. Ta se temeljna priroda svjetlosti činila jasnom, sve do pokušaja shvaćanja porijekla zračenja kojeg emitiraju tijela materije. Za početak je zgodno bilo proučavati idealno tijelo koje bi apsorbiralo

svo zračenje kojem je izloženo, bez obzira na frekvenciju. Takvo tijelo zove se crno tijelo. Spektar zračenja crnog tijela prvo su probali formulom opisati Rayleigh i Jeans, ali naišli su na problem: ultraljubičastu katastrofu. Kako se frekvencija povećavala prema ultraljubičastom dijelu spektra, gustoća energije je težila prema beskonačnosti. Ovaj neuspjeh klasične fizike uspio je riješiti njemački fizičar Max Planck. Planck je shvatio kako je zračenje crnog tijela fundamentalni učinak koji je neovisan o atomskoj strukturi i proučavao ga je zbog njegove važnosti. Rezultat njegovog istraživanja bilo je otkriće da se zračenje emitira u kvantima čija je energija jednaka $h\nu$, gdje je $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$ J/s Planckova konstanta, a ν frekvencija zračenja. Ova će nam relacija kasnije biti bitna kod proučavanja energije rendgenskog zračenja kojeg smo analizirali pomoću mjernog uređaja u eksperimentu. [1, 2]

Planck je još želio formulu za gustoću energije zračenja opravdati u smislu fizikalnih principa te je došao do sljedećeg zaključka: oscilatori u stijenkama šupljine (koja je aproksimacija crnog tijela) nisu mogli imati kontinuiranu distribuciju mogućih energija, već samo specifične energije $\epsilon_n = nh\nu$. Oscilator emitira zračenje frekvencije ν kada padne iz jednog energijskog stanja u sljedeće niže, odnosno prelazi u sljedeće više stanje kada apsorbira zračenje frekvencije ν . Svaki diskretni snop energije $h\nu$ naziva se kvant (*lat. quantum*-koliko). [1] Sa stajališta klasične fizike ovo nije bilo moguće razumjeti te je dugi niz godina Planck smatrao da iako su prijenosi energije između električnih oscilatora i elektromagnetskih valova očito kvantizirani, sami elektromagnetski valovi ponašaju se na posve klasičan način s kontinuiranim rasponom mogućih energija. [1]

Iako je njemački fizičar Heinrich Rudolf Hertz bio taj koji je pokazao da se svjetlost sastoji od elektromagnetskih valova, ujedno je dao i prvi nagovještaj da to nije potpuna priča. Tijekom svojih eksperimenata na elektromagnetskim valovima Hertz je primijetio da se iskre lakše pojavljuju u zračnoj praznini njegovog odašiljača kada je ultraljubičasto svjetlo usmjereno na jednu od metalnih kuglica. Ubrzo je otkriveno da je uzrok toga fenomen poznat kao fotoelektrični efekt: kada je frekvencija svjetlosti bila dovoljno visoka, s metala su emitirani elektroni. Te elektrone nazivamo fotoelektronima. Međutim, elektromagnetska teorija svjetlosti nije mogla objasniti neke od eksperimentalnih opažanja kod fotoelektričnog učinka. Kada je Planck izveo svoju jednadžbu, Albert Einstein bio je jedan od prvih koji je razumio koliko je radikalna bio postulat kvantizacije energije oscilatora. 1905. godine shvatio je da se fotoelektrični učinak može razumjeti ako energija u svjetlosti nije rasprostranjena preko valnih fronti, već je koncentrirana u malim paketima - fotonima. Svaki foton svjetlosti frekvencije ν ima Planckovu kvantnu energiju $h\nu$. Kao što je već napisano Planck je smatrao da se elektromagnetski valovi ponašaju prema konvencionalnoj teoriji valova, a Einstein je shvatio da osim što je energija elektromagnetskim valovima dana u zasebnim kvantima energije, valovi su je također i prenosili u zasebnim kvantima. Fotoelektrični efekt jest pojava koju prvenstveno opažamo kod vidljivog i ultraljubičastog područja elektromagnetskog zračenja, ali će nam pomoći kod razumijevanja nastanka rendgenskog zračenja. [1]

Koncept da svjetlost putuje kao niz malih paketića izravno je suprotan valnoj teoriji svjetlosti, a vidjeli smo da oba pogleda imaju snažnu eksperimentalnu potporu. Prema valnoj teoriji, svjetlosni valovi se šire iz izvora kontinuirano raspoređujući energiju kroz valni uzorak. Za razliku od toga, prema kvantnoj se teoriji svjetlost sastoji od pojedinačnih fotona, od kojih je svaki dovoljno malen da ga može apsorbirati jedan elektron. Iako kvantna teorija prikazuje čestičnu prirodu svjetlosti, potrebna joj je frekvencija svjetlosti kako bi opisala energiju fotona. Dakle, vidimo da su potrebne dvije različite teorije za objašnjenje jednog fenomena. Kada svjetlost prolazi kroz proreze ponaša se kao što bi se ponašao val, a kada udari u ekran ponaša se kao čestica. Odnosno, svjetlost apsorbira i daje energiju kao skup čestica, a putuje kao val. Prava priroda svjetlosti uključuje i valna i čestična svojstva, odnosno svjetlost je dualnog karaktera, iako nema ništa u svakodnevnom životu što bi nam pomoglo da to vizualiziramo. Valno-čestična dualnost je (uz specijalnu teoriju relativnosti) temelj moderne fizike. [1]

Francuski eksperimentalni fizičar Maurice de Broglie od početka je podržavao gledište s kojeg zračenje ima čestičnu prirodu. De Broglieva je hipoteza bila da se valno-čestična dualnost zračenja jednako dobro odnosi i na materiju. Baš kao što je fotonu pridružen svjetlosni val i materijalnoj je čestici (primjerice elektronu) pridružen val materije koji upravlja njezinim gibanjem. De Broglieva relacija $\lambda = h/p$, predviđa da je valna duljina λ vala materije povezana s gibanjem materijalne čestice koja ima količinu gibanja p . [2]

Pri opisu spektra rendgenskog zračenja važno je imati na umu valno-čestičnu dualnost zračenja, budući da će nam pomoći shvatiti zašto je takvog izgleda.

Fotoelektrični učinak daje uvjerljiv dokaz za prijenos energije sa svjetlosnih fotona na elektrone. Zanima nas je li i obrnut proces moguć. Odnosno, može li se sva kinetička energija pokretnog elektrona ili njen dio, pretvoriti u foton? Odgovor je da. Postoji proces inverzan fotoelektričnom efektu. Ne samo što se događa, već je taj fenomen i otkriven prije Planckovog i Einsteinovog rada, samo ga se tada nije razumjelo. Više o tome u idućem potpoglavlju. [1]

2.2 Otkriće rendgenskih zraka

Wilhelm Conrad Röntgen je 1895. godine otkrio da kada brzi elektroni udare u materiju, nastaje vrlo prodorno zračenje nepoznate prirode. Budući da mu je zračenje bilo nepoznato nazvao ga je x-zračenjem, odnosno x-zrakama. Njemu u čast te zrake danas zovemo rendgenskim zrakama. Do svog je otkrića došao na fakultetu Würzburg u Njemačkoj, gdje je radio kao profesor fizike. Röntgen je 8. studenog već spomenute godine u blizini lista papira obloženog barijevim platino cijanidom uključio katodnu cijev, koja je u potpunosti bila obložena crnim kartonom. Tada je primijetio da papir svijetli. Želio je ispitati uzrok svjetlucanja te je načinio fluorescentni zastor i između njega i katodne cijevi počeo postavljati razne predmete. Bez obzira na vrstu predmeta koja se nalazila ispred zastora, on je i dalje svijetlio. Tek kada je ispred zastora postavio olovnu ploču, svjetlucanje je nestalo. Jednom je prilikom ispred zastora stavio svoju ruku i uočio da se kosti njegove ruke jasno vide na zastoru. Nakon otkrića ovog iznenađujućeg fenomena zastor je zamijenio fotografskom pločom. Na razvijenim su se fotografskim pločama pojavile konture predmeta i tada je došao do zaključka da sva tijela propuštaju x-zrake, ali u različitoj mjeri. Na slici 2.2 nalazi se jedna rana rendgenska snimka ruke koja je snimljena na Röntgenovom predavanju. [1, 4]



Slika 2.2: Rendgenska snimka ruke Alberta von Köllikera iz 1896. godine (slika preuzeta s <https://upload.wikimedia.org> [5])

Röntgen je očekivao da će ljudi, kada čuju za njegovo otkriće, misliti kako je vjerojatno poludio. Međutim, rendgenske zrake su postale trenutna senzacija i već su se nakon dva mjeseca koristile u medicini. Osim toga, rendgenske su zrake potaknule i istraživanja u novim smjerovima. Pa je tako u samo godinu dana od Röntgenovog otkrića uslijedilo Becquerelovo otkriće radioaktivnosti. Prvu Nobelovu nagradu za fiziku Röntgen je dobio 1901. godine. Odbio je imati financijsku korist od svog rada te je umro u siromaštvu kada je u Njemačkoj uslijedila inflacija krajem Prvog svjetskog rata. [1]

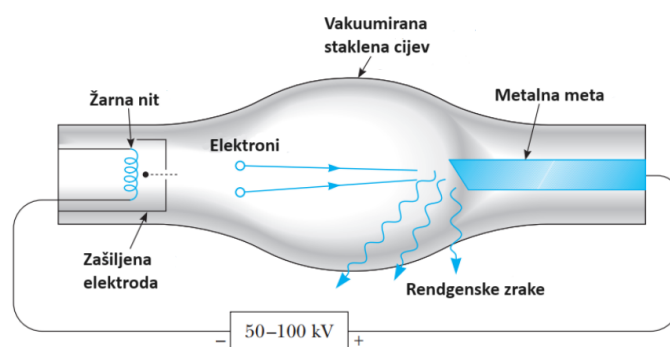
2.3 Spektar rendgenskog zračenja

Prije nego što opišemo kakav je spektar rendgenskog zračenja, ukratko ćemo opisati karakteristike x-zraka te na koji ih način možemo proizvesti u katodnoj cijevi.

Rendgensko zračenje elektromagnetsko je zračenje čije su valne duljine u rasponu od otprilike 0,01 do 10 nm. Iz spektra elektromagnetskog zračenja može se primijetiti da granice ovog dijela spektra nisu oštre. Dio s kraćim valnim duljinama preklapa se s gama zračenjem, a gornja granica s dužim valnim duljinama upada u ultraljubičasto zračenje. [1]

Ubrzo nakon Röntgenovog otkrića otkriveno je da rendgenske zrake putuju u ravnim linijama, da električna i magnetska polja ne utječu na njih, da lako prolaze kroz neprozirne materijale, izazivaju sjaj kod fosforescentnih tvari i da djeluju na fotografske ploče. Što je više izvornih elektrona, to je veći intenzitet rendgenske zrake, a što su elektroni brži, rezultirajuće rendgenske zrake su prodornije. Vrlo se brzo otkrilo i to da su rendgenske zrake elektromagnetski valovi. Kao što smo već vidjeli u potpoglavlju 2.1, elektromagnetska teorija predviđa da će ubrzani električni naboj zračiti elektromagnetske valove. Dakle, to očekujemo i od elektrona koji se vrlo brzo giba u katodnoj cijevi i iznenada biva zaustavljen. [1]

Rendgenske zrake možemo proizvesti u katodnoj cijevi čiju shemu vidimo na slici 2.3. Žarna nit kroz koju prolazi električna struja zagrijava katodu. Katoda na taj način termičkom emisijom opskrbljuje cijev elektronima. Prostor između katode i anode održavan je na visokoj potencijalnoj razlici V i na taj se način elektroni ubrzavaju prema metalnoj meti (anodi). Anoda je postavljena pod kutom u odnosu na elektronski snop, koji je brži što je veća razlika napona V . Rendgenske zrake napuštaju metu i prolaze kroz bočnu stranu cijevi kada ovaj snop izrazito brzih elektrona pogađa metalnu metu. U cijevi je vakuum kako bi elektroni do mete mogli doći neometano. Valna duljina tih rendgenskih zraka je to kraća što su elektroni brži. [1, 6]

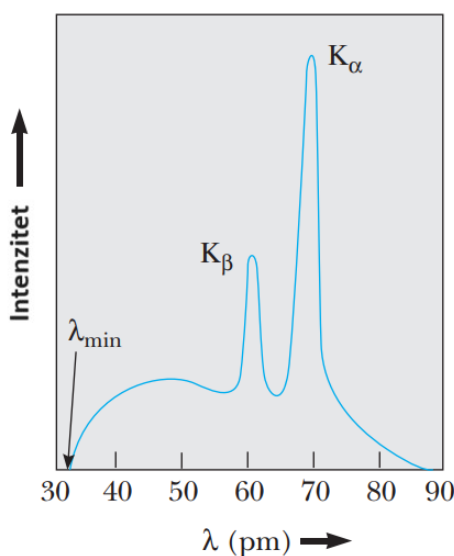


Slika 2.3: Shema katodne cijevi koja proizvodi rendgenske zrake bombardirajući metalnu metu elektronima (slika preuzeta iz [6]; engleski tekst na izvornoj slici preveden je na hrvatski)

Kod ovakvog bombardiranja metalne mete elektronima dolazi do njihovog naglog usporavanja, ali i izbijanja elektrona iz unutarnjih ljuski atoma metala od kojeg je načinjena

meta. Zračenje koje je proizvedeno zbog naglog usporavanja elektrona dobilo je njemački naziv "bremsstrahlung" (njem. *bremsstrahlung* - kočenje zračenja), odnosno zakočno zračenje. Gubitak energije zbog zakočnog zračenja važniji je za elektrone nego za teže čestice, budući da su elektroni nasilnije usporeni kada na svom putu prolaze blizu jezgri. Što su veće energija elektrona i atomski broj jezgre na koju nailazi, zakočno zračenje je energičnije. Izbijanje elektrona iz unutarnjih ljuski atoma metalne mete uzrokuje drugačiju vrstu zračenja, kojeg nazivamo karakterističnim rendgenskim zračenjem. Klasična elektromagnetska teorija nije uspjela objasniti ovu vrstu zračenja. [1, 6]

Na slici 2.4 prikazan je spektar rendgenskog zračenja koji nastaje kada elektroni koji su ubrzani potencijalnom razlikom 35 keV u katodnoj cijevi bombardiraju metu od molibdena. Vidimo da se spektar sastoji od širokog kontinuiranog spektra i niza oštih linija. [6]

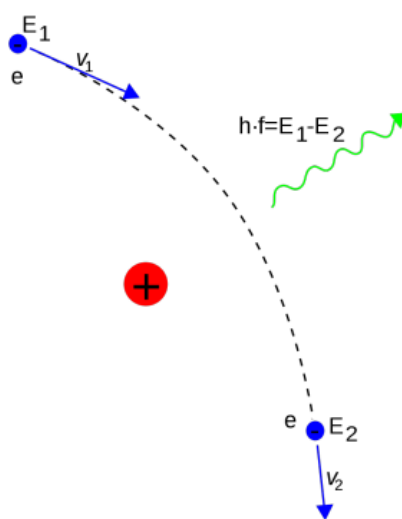


Slika 2.4: Spektar rendgenskog zračenja molibdena (slika preuzeta iz [6]; engleski tekst na izvornoj slici preveden je na hrvatski)

Klasična elektromagnetska teorija kao što smo već vidjeli predviđa zakočno zračenje, pa je ovaj kontinuirani dio spektra na slici 2.4 bio očekivan. Međutim, dva su svojstva koja vidimo kod ovog spektra zračenja na slici, a da ih klasična elektromagnetska teorija ne može objasniti. Prvo, vidimo da je pri određenim valnim duljinama stvaranje rendgenskih zraka bilo pojačano, s obzirom na pojavu maksimuma intenziteta (oštrih linija na slici). Ovisno o materijalu od kojeg je proizvedena anoda, ovi se maksimumi intenziteta javljaju za specifične valne duljine. Na slici vidimo karakteristične valne duljine za molibden. Bombardirajući elektroni poremete elektronsku strukturu atoma mete te dovode do preuređivanja te strukture, odnosno posljedično do maksimuma intenziteta. Dakle, uz kontinuirani spektar zračenja, prisutne su rendgenske zrake određenih valnih duljina, što je fenomen koji definitivno nije klasičan. Drugo svojstvo koje možemo opaziti na spektru rendgenskog zračenja na slici 2.4 uklapa se u kvantnu teoriju zračenja. Rendgenske zrake koje su proizvedene pri danoj razlici potencijala V variraju u valnoj duljini, ali postoji određena minimalna vrijednost valne duljine. Minimalna valna duljina

smanjuje se ako povećamo napon V . Većina elektrona koji udare u metu prije toga prolaze kroz niz brzih sudara, gdje njihova energija odlazi u toplinu. Upravo su zbog ovoga anode u rendgenskim cijevima izrađene od metala s visokim talištem kao što je i bakar od kojeg je izrađen izvor uređaja kojeg ćemo koristiti u eksperimentu opisanom u šestom poglavlju. Uz to je u većini slučajeva implementiran i nekakav način hlađenja mete. Međutim, postoji nekoliko elektrona koji svoju energiju ne utroše samo u toplinu, već u pojedinačnim sudarima s atomima anode izgube većinu ili čak svu svoju energiju. Upravo je ova energija rendgenskog zračenja. [1]

Visokoenergijski elektroni prilikom sudara s atomima anode usporavaju i skreću, jer se nađu u električnom polju atomskih jezgri. Na slici 2.5 vidimo skicu koja opisuje ovaj proces zakočnog zračenja, gdje elektroni prilikom nalijetanja na jezgru atoma emitiraju zračenje. [2]



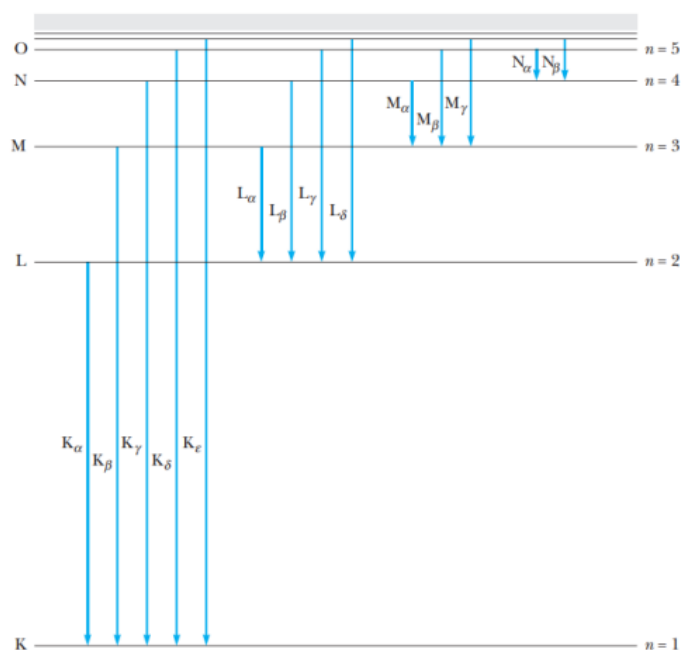
Slika 2.5: Zakočno zračenje koje stvara kontinuirani dio spektra rendgenskog zračenja (slika preuzeta s <https://upload.wikimedia.org> [7])

Promatramo li dio proizvodnje rendgenskog zračenja koji stvara kontinuirani spektar, vidimo da zapravo predstavlja inverzni fotoelektrični učinak. Kinetička se energija elektrona pretvara u energiju fotona $h\nu$, za razliku od fotoelektričnog efekta, gdje se energija fotona transformira u kinetičku energiju elektrona. Kratka valna duljina rendgenske zrake znači visoku frekvenciju ν , dok visoka frekvencija znači da je energija fotona $h\nu$ također visoka. Budući da su potencijalne razlike na kojima su održavane rendgenske cijevi obično jednake desetcima, odnosno stotinama tisuća volta, možemo protumačiti da minimalna vrijednost valne duljine odgovara slučaju kada se cjelokupna kinetička energija bombardirajućeg elektrona ($E_K = Ve$) predaje pojedinačnom fotonu energije $h\nu_{max}$. [1]

Na slici 2.4 vidjeli smo da kada su mete bombardirane brzim elektronima, pri karakterističnim valnim duljinama za određeni materijal mete, spektar zračenja pokazuje i uske šiljke. Osim kontinuiranog dijela spektra rendgenskog zračenja za kojeg smo zaključili da možemo reći da je rezultat učinka inverznog onom fotoelektričnom, imamo dakle s druge strane i linijski

(diskretni) spektar. Elektroni koji bombardiraju metu poremete njene atome, te dolazi do prijelaza elektrona unutar samih atoma mete, i na taj način nastaje karakteristični linijski spektar rendgenskog zračenja. [1, 6]

Za prijelaz elektrona iz vanjske ljuske atoma potrebno je samo nekoliko elektronvolta energije te su takvi prijelazi povezani s fotonima čije valne duljine leže u blizini ili u samom vidljivom dijelu spektra elektromagnetskog zračenja. Sasvim je druga stvar kod unutarnjih elektrona težih elemenata, budući ti elektroni nisu dobro zaštićeni od punog nuklearnog naboja intervenirajućih elektronskih ljuski i stoga su vrlo čvrsto vezani. Primjerice kod atoma natrija, potrebno je samo 5,13 eV da bi se uklonio najudaljeniji 3s elektron, dok je za unutarnje elektrone potrebno više energije, a za svaki 1s elektron čak 1041 eV. [1] Linijski dio spektra rendgenskog zračenja stoga uzrokuju upravo prijelazi koji uključuju elektrone u unutarnjim ljuskama atoma zbog uključenosti visoke energije fotona. [1]



Slika 2.6: Podrijetlo linijskog dijela spektra rendgenskog zračenja (slika preuzeta iz [6])

Slika 2.6 prikazuje kako bi izgledale energijske razine nekog teškog atoma. Shema nije u mjerilu već samo općeniti prikaz. Razlike u energiji između stanja kutne količine gibanja unutar ljuske male su u usporedbi s energijskim razlikama između različitih ljuski. Što se događa kada elektron koji ima energiju udari u atom te izbaci jedan od elektrona koji se nalazio unutar K ljuske? Taj elektron bi se mogao i podići na jedno od nepopunjenih viših stanja atoma, ali je razlika između energije potrebne da se to dogodi i energije potrebne za potpuno uklanjanje elektrona beznačajna. Stoga nećemo promatrati taj slučaj. Elektron iz vanjske ljuske sada upada u "rupu" koja je ostala u K ljusci te atom većinu svoje značajne energije pobude tada predaje u obliku fotona rendgenskog zračenja. Na slici se vidi da pri prijelazima elektrona iz L, M, N i viših razina do razine K, nastaju valne duljine od kojih se sastoji K serija linija rendgenskog

spektra zračenja elementa. Na sličan način nastaje L serija dužih valnih duljina kada je elektron izbačen iz L ljuske atoma, odnosno kada je uklonjen elektron iz M ljuske nastaje M serija u linijskom spektru rendgenskog zračenja, i tako dalje. [1, 6]

Na slici 2.4 vidimo dva maksimuma rendgenskog spektra zračenja molibdena. To su K_{α} i K_{β} karakteristične linije od molibdenove K serije. Kada elektron prijeđe iz L ljuske ($n = 2$) i smjesti se u prazno stanje K ljuske ($n = 1$), kažemo da se emitira K_{α} foton. Prema slici 2.6 možemo vidjeti da se po ovoj analogiji zovu karakteristične linije ovisno o tome iz kojeg stanja i u koje konačno stanje prelazi elektron. [1, 6]

Britanski fizičar Henry G. J. Moseley 1910. godine započeo je sustavno proučavati spektar rendgenskog zračenja zajedno s Rutherfordom u Manchesteru, te je svoja istraživanja nastavio kasnije na Oxfordu. Godine 1913. i 1914. Moseley je uspio potvrditi odnos između valnih duljina rendgenskih zraka elementa te njegovog atomskog broja, mjereći K_{α} frekvencije gotovo svih tada poznatih elemenata. Za svoja je mjerenja koristio metodu difrakcije rendgenskih zraka koja će biti opisana u idućem poglavlju. Ovaj odnos između frekvencije, odnosno valne duljine, rendgenskog zračenja i atomskog broja Z omogućio je Moseleyu da ispravi dvosmislenosti u do tada dodijeljenim atomskim brojevima. Uz to je predvidio i postojanje nekoliko do tada nepoznatih elemenata, koji su kasnije i otkriveni. Dakle, njegovo je otkriće po prvi put omogućilo da se eksperimentalno odredi atomski broj elemenata. Do tada se poredak elemenata u periodičnoj tablici bazirao na njihovoj atomskoj masi, a sada se mogla koristiti puno elegantnija metoda rasporeda po atomskom broju elementa. Osim toga, Moseley je ubrzo prepoznao važnu vezu između svog otkrića te Bohrovog modela atoma, odnosno njegovo je otkriće podržavalo taj model. [1]

3 Ogib rendgenskih zraka

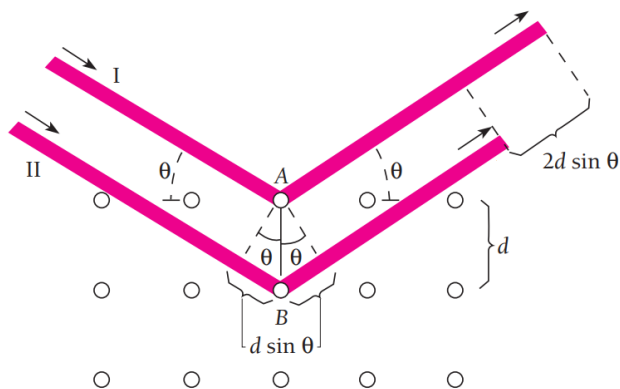
U ovom će poglavlju biti opisana fizika ogiba, odnosno difrakcije, rendgenskih zraka na kristalima te će biti spomenute i metode kojima se rendgenske zrake mogu ogibati.

Eksperiment ogiba ili difrakcije bio je prepoznat kao idealna metoda za mjerenje valnih duljina rendgenskih zraka. Međutim, kao što je poznato iz fizikalne optike, razmak između susjednih linija difrakcijske rešetke mora biti istog reda veličine kao i valna duljina svjetlosti kako bi dobili zadovoljavajuće rezultate. Grube procjene dobivene difrakcijom rendgenskih zraka pomoću uskog proreza pokazale su da je red veličine valnih duljina zraka oko 10^{-10} m. Najbolje difrakcijske rešetke onog vremena imale su razmake 10^{-7} m, pa fizičari nisu imali pristup rešetkama s dovoljno malenim razmakom kojeg bi zahtijevale rendgenske zrake. Njemački fizičar Max von Laue shvatio je da je red veličina valnih duljina koje su predložene za rendgenske zrake usporediv s razmakom između susjednih atoma u kristalima. Predložio je da se za ogib rendgenskih zraka iskoriste kristali, koji će se sa svojom pravilnom strukturom ponašati kao svojevrsna trodimenzionalna difrakcijska rešetka. 1912. godine ogibanjem rendgenskih zraka na kristalu bakar-sulfata dokazao je njihovu valnu prirodu te je za svoje istraživanje dobio Nobelovu nagradu. U eksperimentima koji su provedeni u idućoj godini, pronađene su valne duljine rendgenskih zraka od 0.013 do 0.048 nm. Iste godine kada je svoj prijedlog dao von Laue i William Henry Bragg te William Lawrence Bragg, otac i sin iz Engleske, sugerirali su korištenje monokristala kao prirodnih trodimenzionalnih difrakcijskih rešetki. [1, 6]

Vratimo se na trenutak opisu mehanizma raspršivanja elektromagnetskih valova na atomu, koji je poprilično izravan. Na negativno nabijene elektrone i pozitivno nabijenu jezgru atoma u stalnom električnom polju djeluje sila suprotne orijentacije. Atom u stalnom električnom polju stoga postaje polariziran. U usporedbi sa silama koje taj atom drže zajedno, ove su sile koje djeluju na jezgru i elektrone male, pa je rezultat deformirana distribucija naboja koja je ekvivalentna električnom dipolu. U prisutnosti elektromagnetskog vala frekvencije ν , odnosno njegovo izmjeničnog električnog polja, polarizacija atoma se s tom istom frekvencijom mijenja naprijed-natrag. Nešto energije nadolazećeg vala biva utrošeno na ovaj način stvaranja oscilirajućeg električnog dipola. Oscilirajući dipol zauzvrat zrači elektromagnetske valove frekvencije ν i ovi sekundarni valovi se šire u svim smjerovima osim duž osi dipola. Sekundarni valovi, prema valnoj terminologiji, imaju sferne valne fronte umjesto valnih fronta ravnina kod nadolazećih valova. Dakle, vidimo da proces raspršivanja uključuje atome koji apsorbiraju upadne ravne valove te zrače sferne valove jednake frekvencije. [1]

Za raspršivanje elektromagnetskih valova mogu se stoga koristiti kristali koji se sastoje od pravilnog niza atoma, kako su von Laue te otac i sin Bragg i predlagali. Budući da su doprinosi pojedinačnih atoma slučajni, u skupini atoma izloženih nepolariziranom zračenju, ograničenje za nemogućnost širenja sekundarnih valova duž osi dipola ne vrijedi. [1]

Prema tome, da se zaključiti da će se monokromatski snop rendgenskih zraka koji upada na kristal, raspršiti u svim smjerovima unutar tog kristala. Ipak, zahvaljujući pravilnoj strukturi kristala, odnosno pravilnom rasporedu atoma unutar njega, raspršeni će valovi u određenim smjerovima interferirati konstruktivno jedni s drugima, dok će u drugim smjerovima interferencija biti destruktivna. Godine 1913. William L. Bragg predložio je strukturu atoma u kristalu kakva je skicirana na slici 3.1. Predložio je kako se može smatrati da atomi u kristalu definiraju "obitelji" paralelnih ravnina. Pri tome svaka "obitelj" ima karakteristični razmak između svojih sastavnih ravnina. Njemu u čast zovu se Bragove ravnine. [1, 6]



Slika 3.1: Bragovo raspršenje rendgenskih zraka na kristalu (slika preuzeta iz [1])

Iz slike koja 3.1 možemo vidjeti koji uvjeti trebaju biti ispunjeni kako bi rendgensko zračenje, koje je raspršeno na atomima kristala, interferiralo konstruktivno. Snop rendgenskih zraka valne duljine λ upada na kristal i s "obitelji" Bragovih ravnina tog kristala, čiji je razmak d , zatvara kut θ . Snop rendgenskih zraka u prvoj ravnini prolazi kroz atom A, a u drugoj kroz atom B. Svaki od atoma raspršuje dio snopa u nasumičnom smjeru. Između raspršenih zraka odvija se konstruktivna interferencija samo ako su one međusobno paralelne te ako se njihovi putovi razlikuju točno za λ , 2λ , 3λ , i tako dalje. Na slici su sa I i II označene jedine zrake za koje ovo vrijedi. Prvi je uvjet za zrake I i II da njihov zajednički kut raspršenja bude jednak upadnom kutu θ izvornog snopa. Ovaj uvjet neovisan je o valnoj duljini i zapravo nam je već poznat iz optike. Za običnu zrcalnu refleksiju u optici mora vrijediti da je upadni kut jednak kutu refleksije. Drugi uvjet je Bragovo pravilo koje kaže da mora vrijediti sljedeće

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (3.1)$$

gdje je $n = 1, 2, 3, \dots$, odnosno cijeli broj. Sa slike se vidi da ovaj uvjet vrijedi budući da zraka II mora prijeći za $2d \sin \theta$ veću udaljenost od zrake I. Prirodni broj n predstavlja red raspršenog snopa. [1, 6]

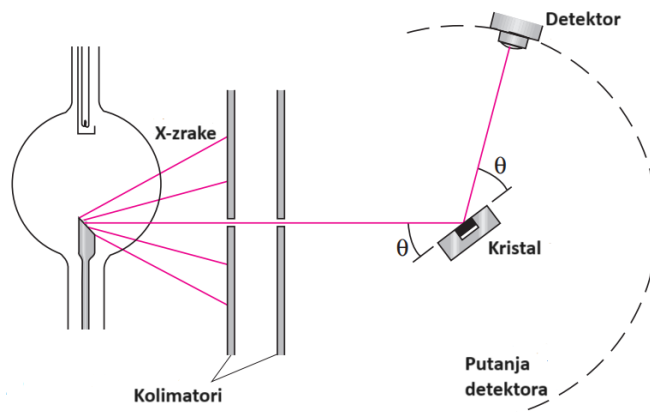
Upravo se ovaj Bragov uvjet koristi kod metode skenirajuće difraktometrije, uz pomoć koje će se okarakterizirati izvor zračenja u ovom radu. Ova metoda je pobliže opisana u sljedećem potpoglavlju.

3.1 Metode ogiba rendgenskih zraka na kristalima

Postoje von Laueova i Debye-Scherrerova metoda ogibanja rendgenskih zraka te metoda skenirajuće difraktometrije.

U eksperimentu koji je proveden za ovaj završni rad koristiti će se upravo metoda skenirajuće difraktometrije za karakterizaciju izvora rendgenskog zračenja.

Ova se metoda temelji na Braggovoj analizi kristala. Na slici 3.2 prikazana je shema rendgenskog spektrometra pomoću kojeg se provodi ova metoda ogiba rendgenskih zraka.



Slika 3.2: Rendgenski spektrometar koji koristi metodu skenirajuće difraktometrije za obavljanje mjerenja (slika preuzeta iz [1]; engleski tekst na izvornoj slici preveden je na hrvatski)

Uski snop rendgenskih zraka upada na kristal pod kutom θ , a detektor je postavljen u takav položaj da detektira one zrake čiji je kut refleksije upravo jednak kutu θ . Stoga sve zrake koje dopijaju do detektora poštuju prvi Braggov uvjet: upadni kut jednak je kutu refleksije. Kako se kut θ bude mijenjao od neke zadane početne do neke konačne vrijednosti, detektor će zabilježiti maksimume intenziteta koji odgovaraju redovima raspršenog snopa predviđenih jednačinom (3.1). Ako je poznat razmak d između susjednih Braggovih ravnina u kristalu, može se izračunati valna duljina rendgenskog zračenja. [1, 6] U eksperimentu opisanom u šestom poglavlju koristi se kristal čiji je razmak d poznat, upravo iz ovog razloga.

Budući da preostale dvije metode nisu korištene za eksperiment u ovome radu, sada će samo biti opisane u najkraćim mogućim crtama.

Von Laueov opis ogibanja rendgenskih zraka temelji se na pretpostavci da je svaki atom obasjan rendgenskim zračenjem izvor sfernog vala. Kod von Laueove metode ogibanja rendgenskih zraka, kristalni uzorak obasjan je uskim snopom rendgenskog zračenja, a iza kristala postavljena je fotografska ploča. Difrakcijska slika koja se javlja na ploči ima centralnu mrlju koja potječe od neskrenutih rendgenskih zraka te serije difrakcijskih maksimuma raspoređenih oko te centralne mrlje. [4]

Kod Debye-Scherrerove metode upadno rendgensko zračenje obasjava uzorak kristala samljevenog u fini prah. Prah kristala zapravo je niz malih kristala koji su nasumice

raspoređeni. Zbog finog mljevenja uzorka možemo pretpostaviti da su sve kristalne ravnine podložne raspršenju rendgenskih zraka. Kao rezultat nastaju karakteristični Debye-Scherrerovi prsteni čija geometrija preslikava uvjete konstruktivne interferencije. [2, 4]

4 Primjena rendgenskog zračenja

Primjena rendgenskog zračenja je široka, a u ovom će poglavlju biti spomenute samo neke od mogućih primjena kako bi se dobila ideja o tome.

Upravo je ogib zraka kojeg smo opisivali u prethodnom poglavlju jedna od primjena rendgenskog zračenja. Postoje različite metode ogibanja rendgenskih zraka, a temeljem spektra zračenja dobivenog tim metodama, može se odrediti prostorna struktura ozračenog materijala.

Jedna od najvažnijih primjena rendgenskih zraka je ona u dijagnostičkoj medicini. Njihova upotreba kao dijagnostičko sredstvo temelji se na različitoj mjeri u kojoj ih drugačije vrste tkiva apsorbiraju. Tako su mišići neprozirniji rendgenskim zrakama od masti, a zbog svog sadržaja kalcija kosti su im mnogo neprozirnije od mišića. Pacijenti prije pretraga probavnog sustava unose obroke koji sadrže barij kako bi se pojačao kontrast snimaka. Kako bi se omogućilo proučavanje stanja krvnih žila, u krvotok se mogu ubrizgati i neki drugi spojevi. [1] Još jedna od primjena rendgenskog zračenja u medicini su CT skeneri (CT = eng. *computerized tomography*, odnosno kompjuterizirana tomografija, grč. *tomos* - rezati). U ovakvim skenerima računalo kombinira niz pacijentovih izlaganja rendgenskom zračenju koji su obavljeni iz različitih smjerova. Na taj način dobiju se slike presjeka dijelova tijela koji se ispituju. Zapravo računalo na temelju rendgenskih snimaka "razrezuje" tkivo, te se može prikazati bilo koji željeni rez. Ova tehnika omogućuje otkrivanje abnormalnosti, kao i određivanje njezine točne lokacije. Obična rendgenska slika ne bi mogla obaviti sve ovo. [1]

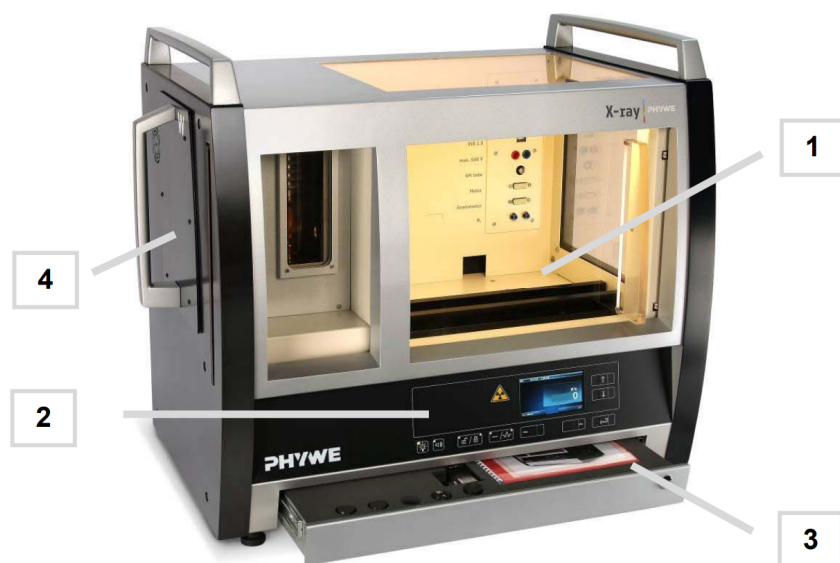
Primjena rendgenskog zračenja široka je i u znanosti. Kao što je već spomenuto prije, Moseley je upravo primjenom rendgenskog zračenja uspio unaprijediti periodni sustav elemenata. Međutim, i dan danas rendgensko je zračenje korisno za određivanje nepoznatih količina elemenata u nekom uzorku.

Ako u rendgenskom spektrometru usmjerimo snop brzih elektrona u uzorak kojem ne poznajemo sastav, možemo taj sastav upravo odrediti pomoću ovakvog eksperimenta. Neki od ubrzanih elektrona izbace elektrone koji se nalaze u unutarnjim ljuskama atoma tog uzorka. Kako smo već vidjeli, kada ta sada prazna mjesta popune elektroni iz vanjskih ljusaka, emitira se rendgensko zračenje čije su valne duljine karakteristične za elemente koji su prisutni u nepoznatom uzorku. Na ovaj se način mogu odrediti elementi od kojih se sastoji uzorak, kao i njihove relativne količine u njemu. [1]

5 Opis mjernog uređaja

U ovom će poglavlju biti opisan mjerni uređaj koji je korišten za obavljanje eksperimenta u ovom završnom radu. Glavni dio mjernog uređaja rendgenska je jedinica *XR4 expert unit* tvrtke PHYWE. Rendgenska cijev koja se koristi u eksperimentu jest bakrena *XR4 X-ray Plug-in Cu tube*.

Potrebni su nam još određeni nastavci koji će biti opisani dalje u ovom poglavlju, a na slici 5.1 prikazan je uređaj *PHYWE XR 4.0 expert X-ray unit, 35 kV* pomoću kojeg je eksperiment izvršen.



Slika 5.1: Prednja strana uređaja *PHYWE XR 4.0 X-ray expert unit* (slika je preuzeta s <https://phywe.com> [8])

Ova rendgenska jedinica omogućava izradu velikog broja eksperimenata za potrebe obrazovanja. Osim upotrebe u izradi eksperimenata iz fizike, može se koristiti i za potrebe obrazovanja u medicini i tehnici. [8] Rendgensko zračenje ima široku primjenu u medicini zbog svoje sposobnosti da prodire u materiju, ovisno o njenoj gustoći. Ovo omogućuje snimanje unutrašnjosti predmeta, pa tako i ljudi. Na ovaj se način uređaji sa sličnim principom rada koriste i u svrhe sigurnosti, primjerice na aerodromima. [9]

Posebno obilježje ove kompaktne jedinice kojom upravlja mikroprocesor svojstvo je rendgenskih cijevi koje koriste tehnologiju brze izmjene. To omogućava izradu eksperimenata s rendgenskim cijevima koje koriste različite materijale anoda. U eksperimentu je korištena priključna rendgenska cijev čija je anoda izrađena od bakra (Cu). [8, 10]

Za odrađivanje eksperimenata uz rendgensku jedinicu i bakrenu rendgensku cijev bili su potrebni još i goniometar te integrirani mjerac brzine. Izravno na mjernoj jedinici mogu se postaviti i radni i kontrolni parametri, ali i putem USB priključka s računalom. Na računalu je skinut softver (engl. *software*, to znači programska podrška) koji nam omogućuje upravljanje uređajem. Rendgenskom jedinicom možemo izravno upravljati pomoću TFT zaslona

(tankoslojni tranzistor) na upravljačkoj ploči. Zaslون prikazuje parametre, ali i vrijednosti koje su izmjerene. Više o samom softveru te parametrima koje je potrebno bilo unijeti za obavljanje mjerenja u poglavlju Opis eksperimenta i mjerenja. [8]

Na slikama 5.1 i 5.2 prikazane su glavne komponente XR 4.0 rendgenske jedinice. Komponente mjernog uređaja su sljedeće, prema brojevima s kojima su označene na slici:

- 1 Eksperimentalna komora: U njoj se postavlja dodatna oprema za izradu određenog eksperimenta, kao što je goniometar u našem slučaju. Koristi se za izvođenje pokusa.
- 2 Upravljačka ploča: Služi za postavljanje i podešavanje radnih i kontrolnih vrijednosti te prikazivanje svih dostupnih izmjerenih veličina.
- 3 Ladica s dodatnom opremom: U njoj su pohranjene dodatne komponente. Kasnije će u poglavlju biti opisano koje su od komponenti bile iskorištene za izradu ovog rada.
- 4 Priključna rendgenska cijev s utorom za umetanje: Ovo je zapravo izvor rendgenskog zračenja, odnosno dio uređaja u kojem se generiraju rendgenske zrake.
- 5 Ploča s utičnicama koja se nalazi u eksperimentalnoj komori: Pomoću nje spajaju se razne komponente za poveznicu s XR 4.0 rendgenskom jedinicom.
- 6 Vanjska ploča s utičnicama: Nalazi se s desne strane mjerne jedinice i pandan je ploči koja se nalazi s unutarnje strane. Na ovu se vanjsku ploču spaja druga potrebna periferna oprema.



Slika 5.2: Desna strana uređaja PHYWE XR 4.0 X-ray expert unit (slika je preuzeta s <https://phywe.com> [8])

Eksperimentalna se komora sastoji od nekoliko funkcionalnih elemenata, od kojih će ovdje biti opisani oni s kojima smo najviše imali doticaj tijekom samog eksperimenta. Za otvaranje eksperimentalne komore koriste se klizna vrata izrađena od akrilnog stakla koje sadrži olovo. Dva sigurnosna strujna kruga prate otvaranje i zatvaranje tih vrata koja nam omogućavaju pristup komori u kojoj obavljamo eksperiment. Ako su klizna vrata zatvorena i ako se mjerni uređaj nalazi u sigurnom stanju, preko upravljačke se ploče mogu zaključati vrata. Tek tada možemo započeti s mjerenjima. Kada se klizna vrata otključaju postoji sigurnosna mjera

koja prekida proizvodnju rendgenskih zraka. Tada ih možemo otvoriti te mijenjati ono što se nalazi u eksperimentalnoj komori ako nam je to potrebno za nastavak eksperimenta. Uz to što omogućavaju proizvodnju rendgenskih zraka samo kada su klizna vrata pravilno zaključana, sigurnosni strujni krugovi su tu i kako bi spriječili prekoračenje maksimalne dopuštene radne vrijednosti rendgenske cijevi. S lijeve strane u komori nalazi se otvor za rendgenske zrake te ga možemo vidjeti na slici 6.2. U otvor stavljamo metalne cijevi s kružnim otvorima sa svake strane. Te metalne cijevi generiraju snop rendgenskih zraka, a biranjem veličine otvora omogućavamo da je snop prikladan za određeni eksperiment. Goniometar se putem magnetske folije osigura unutar eksperimentalne komore. Povezan je s mjernim uređajem te možemo obavljati mjerenje s njim. U sljedećem će poglavlju biti pobliže opisano na koji način u našem eksperimentu koristimo goniometar. [8]

Kao što je već spomenuto kod nabiranja glavnih komponenti mjernog uređaja, s njegove se lijeve strane nalazi otvor za umetanje podešene rendgenske cijevi u kućištu od čeličnog lima. Rendgenska cijev koja je korištena u ovom eksperimentu ima bakrenu anodu. Kako bi se spriječilo pregrijavanje rendgenske cijevi, ona je zatvorena u cilindru od Duran stakla. Ovaj stakleni cilindar ima bočne dijelove koji su spojeni na XR 4.0 jedinicu te putem kojih ulazi hladni zrak iz ventilatora u rendgenskoj jedinici. [8]

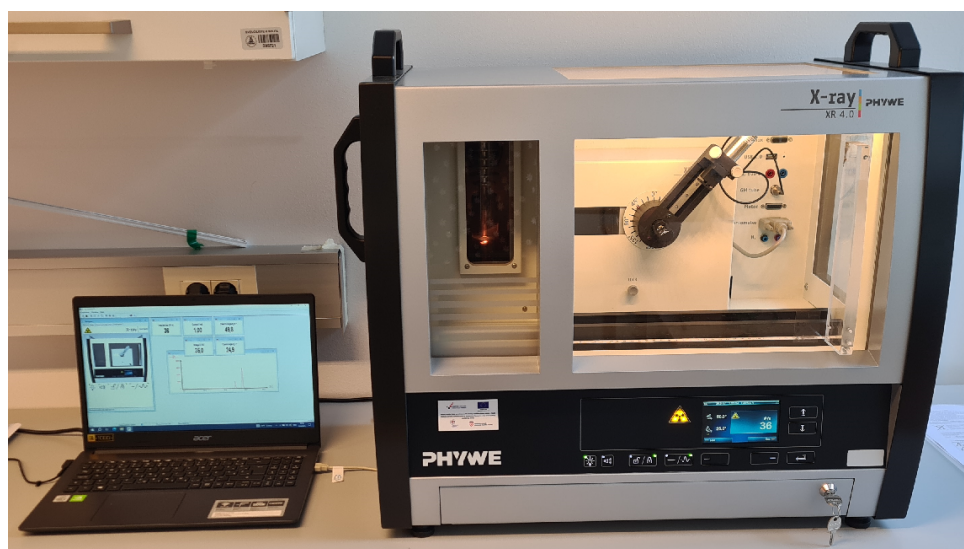
Rendgenska jedinica spojena je na izvor napajanja pomoću strujnog kabela s konektorom. Utičnica u koju uključujemo kabel nalazi se sa stražnje strane mjernog uređaja. Tu se također nalazi i centralni prekidač za uključiti odnosno isključiti jedinicu. Aktiviramo ovaj prekidač te na taj način uključimo mjerni uređaj. Potrebno je zatim jednom otvoriti pa zatvoriti klizna vrata kako bi uređaj napravio sigurnosno samotestiranje. Na kontrolnoj ploči koju vidimo na slici 5.1 (označena brojem 2) možemo prateći žuti znak radioaktivnosti vidjeti jesmo li na siguran način zaključali klizna vrata te možemo li početi s mjerenjima. Kada mjerenja počnu ovaj se znak vidi i s desne strane panela uz trenutni izmjereni intenzitet rendgenskog zračenja. Prilikom prvog mjerenja rendgenska cijev ne smije raditi punom snagom. Umjesto toga, pustimo rendgensku cijev da radi otprilike 10 minuta pri najvišoj struji, ali razliku potencijala na koju je spojena cijev, odnosno napon ubrzanja, ograničimo na maksimalno 25 kV. Kasnija su mjerenja obavljena pri maksimalnoj struji 1 mA i maksimalnom naponu 35 kV. Kao što je već spomenuto, za izradu našeg eksperimenta potrebni su i Geiger-Müllerov brojač te goniometar koji nam omogućavaju mjerenje potrebno za grafički prikaz spektra rendgenskog zračenja sa zakočnim zračenjem te karakterističnim linijama bakra. [8]

6 Opis eksperimenta i mjerenja

Cilj ovog eksperimenta bio je okarakterizirati izvor rendgenskog zračenja metodom skenirajuće difraktometrije. Izvor rendgenskog zračenja jest bakar u rendgenskoj cijevi te je stoga analiziran spektar zračenja bakrene anode korištenjem monokristala litijevog fluorida (LiF), a rezultati su prikazani grafički. Za različite su se redove difrakcije zatim odredile energije karakterističnih linija iz položaja upadnog kuta na monokristal. [10]

Nakon proučavanja spektra rendgenskog zračenja za bakar, mjerenja su odrađena uz montiranje različitih apsorpcijskih folija na držač ispred detektora zračenja. Uz pomoć ovih različitih metalnih folija kvantitativno je ispitana apsorpcija rendgenskih zraka. [11]

U poglavlju iznad, gdje je opisan mjerni uređaj, već smo otprilike vidjeli što nam je sve potrebno kako bismo odradili ovaj eksperiment. Na slici 6.1 prikazan je uređaj tijekom mjerenja te vidimo da je spojen i na prijenosno računalo na kojem je pokrenut softver kojim možemo zadavati željene parametre prije samih mjerenja.



Slika 6.1: Uređaj tijekom mjerenja

Izvor rendgenskih zraka čiji ćemo spektar proučavati rendgenska je cijev umetnuta u uređaj s lijeve strane. Uz pomoć monokristala koji se nalazi na slici 6.2 rendgensko je zračenje prikazano kao funkcija Braggovog kuta. U ovom smo eksperimentu primarno koristili kristal LiF za dobivanje spektra zračenja. Metoda skenirajuće difraktometrije kojom ćemo to rendgensko zračenje okarakterizirati opisana je pobliže u potpoglavlju 3.1, a spomenuta će biti i kasnije. Goniometar je magnetski osiguran na uređaj te nam omogućuje da se držač uzorka i detektor na koji je spojena Geiger-Müllerova brojačka cijev tijekom mjerenja zakreću za omjer kuta 1:2. Metalne folije apsorbera kasnije će se također montirati ispred detektora zračenja na nosač s prorezom. Goniometar je samokalibrirajući. [12] Geiger-Müllerov brojač mjeri intenzitet rendgenskog zračenja. Dobiveni spektar rendgenskog zračenja koji se sastoji od kontinuiranog dijela zakočnog zračenja i od spektra karakterističnih linija grafički će biti

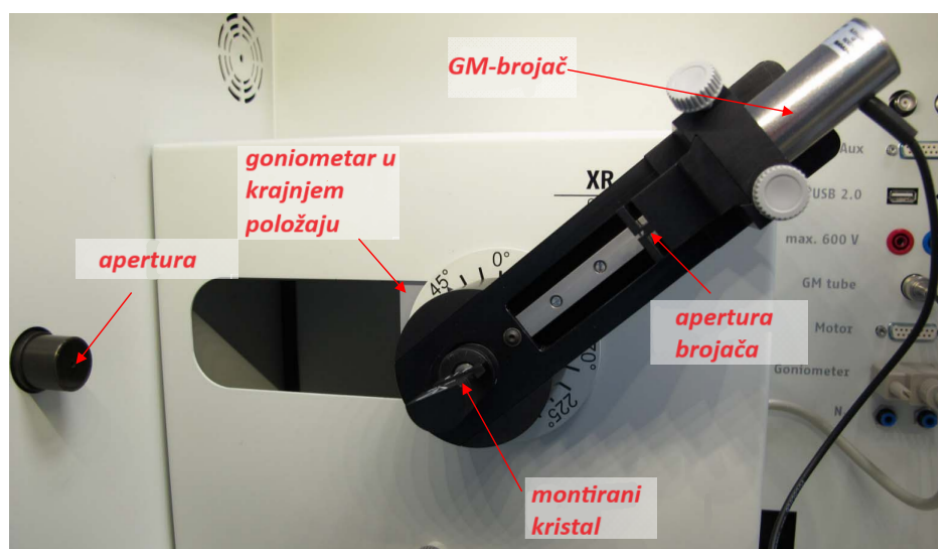
prikazan na prijenosnom računalu. Energiju karakterističnih linija biti će moguće odrediti iz upadnog kuta rendgenskih zraka na površinu monokristala. Zatim će se proučiti koje metalne folije su uspjele blokirati karakteristične linije zračenja. [9]



Slika 6.2: Monokristal litijevog fluorida LiF (slika preuzeta s <https://phywe.com> [13])

S obzirom na to da je cilj eksperimenta istražiti karakteristično rendgensko zračenje bakra, započet ćemo s analizom intenziteta tog zračenja kao funkciju Braggovog kuta uz korištenje monokristala LiF. [9]

Prije početka mjerenja potrebno je bilo spojiti goniometar i Geiger-Müllerov brojač pomoću njima odgovarajućih utičnica koje se nalaze na ploči unutar eksperimentalne komore. Na slici 6.3 vidimo blok goniometra s montiranim kristalom u krajnjem desnom položaju u kojem se mora nalaziti. Pričvršćena mora biti i Geiger-Müllerova brojačka cijev i to na način da njen držač bude na stražnjoj granici vodilice. Ispred brojača koji detektira rendgenske zrake potrebno je postaviti i aperturu, što također vidimo sa slike 6.3. Ispred izlaza snopa od rendgenske cijevi umetnuta je apertura otvora promjera $d = 1$ mm. Za kalibraciju je prije mjerenja potrebno još i provjeriti je li u parametre goniometra unesen točan kristal. Zatim u izborniku goniometra odaberemo autokalibraciju. Sada uređaj može odrediti optimalni položaj između montiranog kristala LiF i goniometra, kao i pri mjerenju položaj maksimuma. [9]

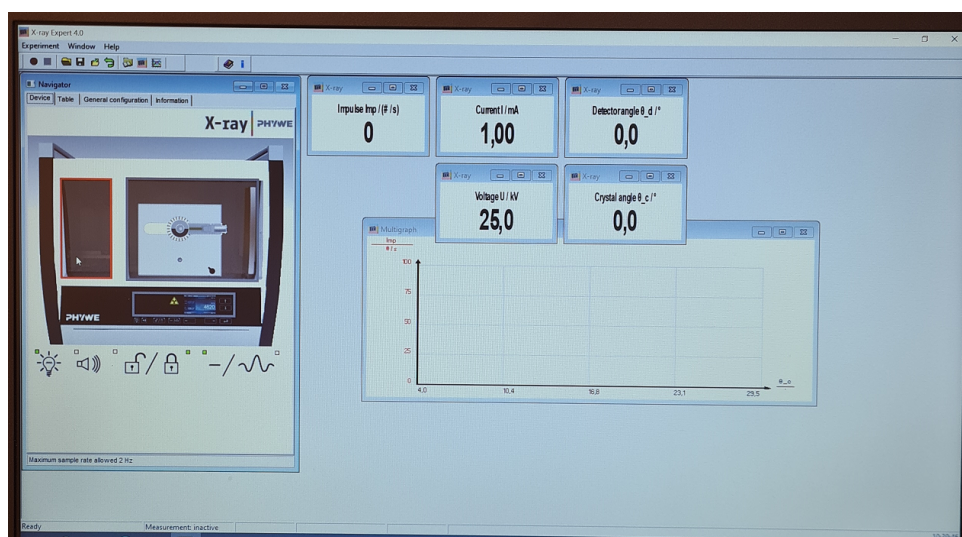


Slika 6.3: Goniometar u pravilnom položaju prije početka mjerenja (slika preuzeta s <https://phywe.com> [9]; engleski tekst na izvornoj slici preveden je na hrvatski)

Rendgenska jedinica je putem USB kabela spojena na USB priključak prijenosnog računala. Na računalu se nalazi softver kojeg možemo pokrenuti i koji nam omogućava zadavanje parametara i pokretanje mjerenja. Kada pokrenemo ovaj program, možemo umjesto na samom mjernom uređaju, mijenjati sve što je potrebno na "virtualnoj" rendgenskoj jedinici koju vidimo na ekranu računala. [9]

Prvo kliknemo na "virtualnu" rendgensku cijev koja je prikazana na slici 6.4. Sada nam računalo nudi upis parametara struje i napona bakrene rendgenske cijevi. Sva mjerenja obavljat ćemo sa strujom od 1 mA, dok ćemo prvo mjerenje obaviti s naponom od 25 kV, ali za ostala mjerenja napon ćemo promijeniti na 35 kV.

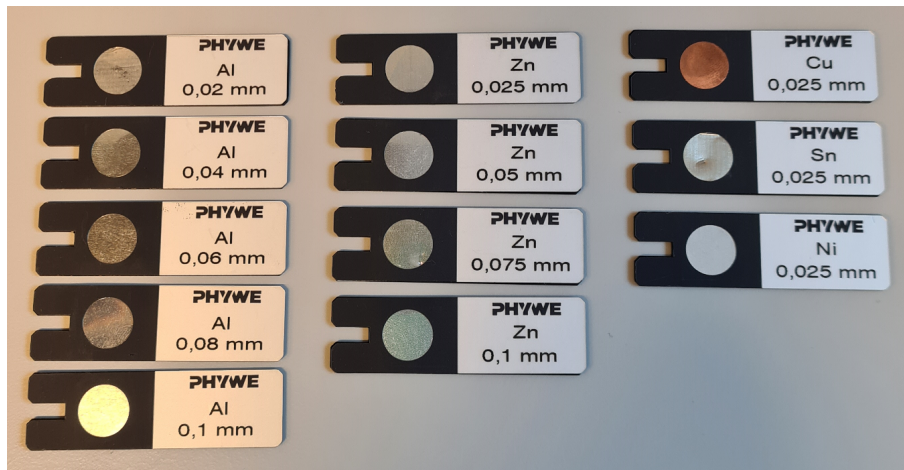
Nakon što zadamo napon i struju rendgenske cijevi, kliknemo na virtualnu eksperimentalnu komoru koja se na slici 6.4 nalazi pokraj virtualne cijevi i mijenjamo parametre goniometra. Parametre koje unosimo su sljedeći: raspon upadnog kuta za LiF kristal je od 4° do 55° , promjena kuta je $0,1^\circ$, a integracijsko vrijeme je 2 sekunde. Važno je da za način spajanja kristala i detektora odaberemo omjer 1:2. Odnosno, prilikom mjerenja goniometar će se s kristalom pomicati na način da je upadni kut između rendgenskih zraka i površine kristala, jednak kutu između površine kristala i detektora. Ovo nam je važno kako bismo mogli kasnije koristiti Braggovu relaciju. [9]



Slika 6.4: "Virtualna" rendgenska cijev te eksperimentalna komora koje odaberemo kada pomoću softvera želimo zadati parametre eksperimenta

U računalo također unosimo podatak da nema apsorbera jer prva dva mjerenja obavljamo bez njih. Kasnije ćemo na isto mjesto unositi koji smo apsorber montirali ispred detektora. Metalne folije apsorbera koje imamo na raspolaganju prikazane su na slici 6.5.

Kada se uvjerimo da smo sve parametre postavili kako treba, klikom na crveni krug (slika 6.4 u gornjem lijevom kutu, ispod *Experiment*) započinjemo mjerenje. Nakon što uređaj dovrši mjerenje, pojavi se prozor na računalu koji nam nudi 3 opcije: da trenutne izmjerene vrijednosti pošaljemo u softver *mjerenje* (eng. *measure*), da izbrišemo sve vrijednosti ili da ih zadržimo.

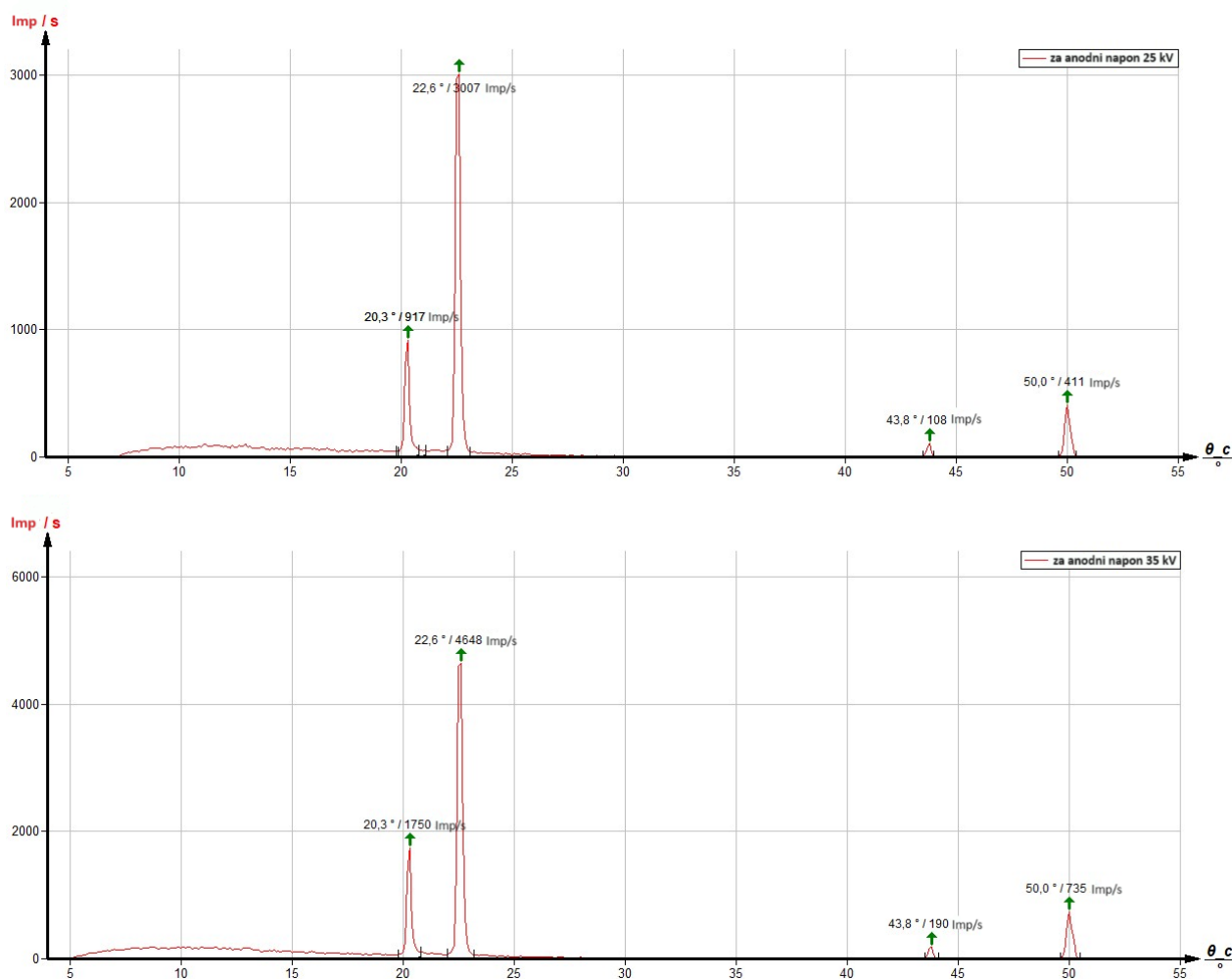


Slika 6.5: *Komplet različitih metalnih folija drugačijih debljina koje su montirane na nosače*

Odaberemo prvu ponuđenu opciju te se direktno izmjerene vrijednosti šalju u mjerni softver. Tu nam se sada nalazi grafički prikaz mjerenja kojeg je lako spremi nakon što u spektru odredimo maksimume. [9]

7 Rezultati i diskusija

Na početku želimo analizirati intenzitet rendgenskog zračenja bakra u ovisnosti o kutu θ kojeg upadni snop rendgenskih zraka zatvara s površinom kristala analizatora litijevog fluorida. Prvo mjerenje obavljeno je s aperturom otvora 1 mm te pri struji 1 mA i naponu 25 kV, kako bi se zagrijala rendgenska cijev. Mjerenje je zatim obavljeno pri naponu od 35 kV. Kao što smo već vidjeli u poglavlju Opis eksperimenta i mjerenja, raspon skeniranja je za LiF monokristal od 4° do 55° . Ovaj raspon uzimamo budući da iz literature [9] očekujemo da se u ovom rasponu nalaze karakteristične linije za bakar, koje nam je cilj analizirati. Na slici 7.1 nalazi se difrakcijski spektar kristala LiF pri anodnom naponu od 25 kV te 35 kV izmjeren metodom skenirajuće difraktometrije. Na x osi grafa nalazi se upadni kut θ rendgenskog snopa na kristal, a na y osi intenzitet rendgenskog zračenja.



Slika 7.1: Usporedba difrakcijskog spektra kristala LiF izmjerenog pri naponu od 25 kV i 35 kV

Primjećujemo kontinuirani spektar zakočnog zračenja te dobro definirane linije koje su superponirane nad njim. Vidimo da je upadni kut θ kod kojeg se pojavljuju ove karakteristične linije ostao isti i za anodni napon od 25 kV i od 35 kV. Jedino se povećanjem anodnog napona

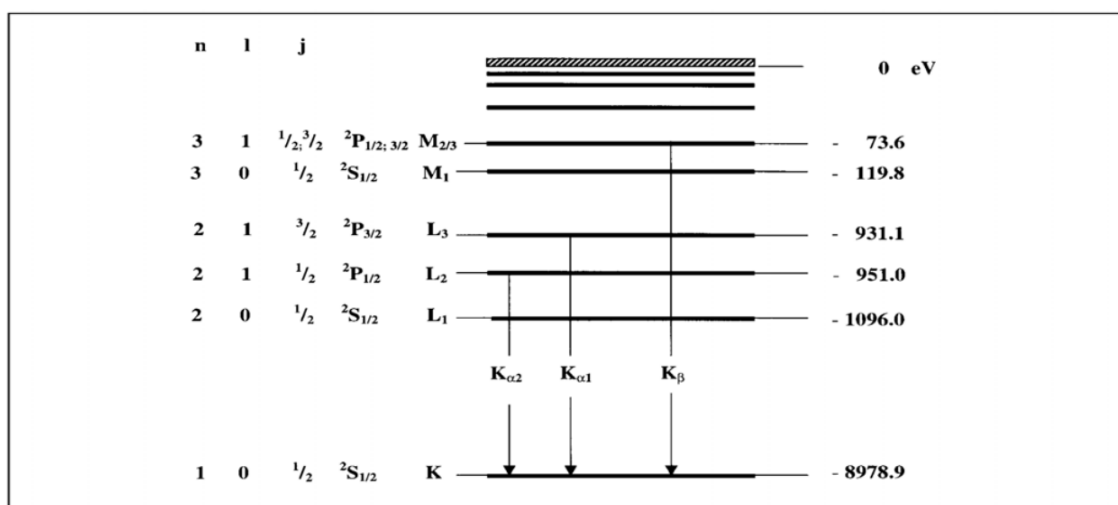
povećao intenzitet zračenja, što iz teorije i očekujemo. S obzirom na to da kut θ ne ovisi o anodnom naponu, ovo ukazuje na to da su ovo karakteristične linije rendgenskog zračenja. [9]

Iz teorije smo već mogli pretpostaviti da će spektar rendgenskog zračenja izgledati kao ovaj sa slike 7.1. Poznato je da kada elektroni koji imaju visoku razinu kinetičke energije udare u metalnu anodu rendgenske cijevi, ta cijev proizvodi rendgenske zrake koje imaju kontinuiranu distribuciju energije zbog zakočnog zračenja (eng. bremsstrahlung). Međutim, diskretne linije su dodatno superponirane na ovaj kontinuirani dio spektra zračenja. Ovaj linijski dio spektra rendgenskog zračenja nastaje kada elektron koji je udario u anodu time ukloni elektron iz unutarnje ljuske atoma, a to se prazno mjesto popuni drugim elektronom te se pritom emitira zračenje. Za slučaj anode od bakra koja je korištena u ovom eksperimentu, nakon udara elektrona atom bakra se ionizira na K ljusci. Sada to slobodno mjesto u K ljusci može zauzeti elektron iz neke više ljuske pritom emitirajući kvant rendgenskog zračenja. Energija ovog emitiranog kvanta zračenja odgovara energijskoj razlici između dvije atomske ljuske koje su uključene u ovaj proces. Pošto je ova energijska razlika specifična za određeni atom, u našem slučaju atom bakra, rezultatno zračenje zove se karakteristično rendgensko zračenje. Na slici 7.2 prikazan je dijagram energijskih razina za bakar. [9]

Na dijagramu vidimo da se karakteristično rendgensko zračenje koje se generira pri prijelazu elektrona iz L ljuske u K ljusku naziva K_{α} zračenje. Spektralna karakteristična linija koja nastaje pri prijelazu elektrona iz M u K ljusku zove se K_{β} linija. Zbog kvantnomehaničkih pravila odabira zabranjeni su prijelazi iz M_1 i L_1 ljuske u K ljusku. Uočavamo da karakteristične linije bakra imaju sljedeće energijske razine:

$$E_{K_{\alpha}} = E_K - \frac{1}{2} (E_{L_2} + E_{L_3}) = 8,038 \text{ keV} \quad (7.1)$$

$$E_{K_{\beta}} = E_K - E_{M_{2,3}} = 8,905 \text{ keV} \quad (7.2)$$



Slika 7.2: Energijski dijagram za atom bakra (slika preuzeta s <https://phywe.com> [9])

E_{K_α} predstavlja usrednjenu energijsku vrijednost K_{α_1} i K_{α_2} linija. Korištenjem monokristala moguće je analizirati polikromatsko rendgensko zračenje. U trećem poglavlju vidjeli smo što se događa kada rendgenske zrake valne duljine λ upadaju na ravnine rešetke monokristala pritom s njima zatvarajući kut θ . Zrake koje se reflektiraju na paralelnim ravninama kristala konstruktivno interferiraju kada je njihova razlika putanje jednaka cjelobrojnom višekratniku valne duljine. Već smo vidjeli da sukladno slici 3.1 vrijedi Braggov zakon konstruktivne interferencije opisan s jednadžbom (3.1): $2d \sin \theta = n\lambda$. [9]

Budući da nam je poznato kako udaljenost između kristalnih ravnina u kristalu LiF iznosi $d = 201$ pm, možemo koristeći Braggov zakon odrediti valnu duljinu zračenja λ unoseći u jednadžbu (3.1) upadni kut θ . Energiju karakterističnog zračenja odredit ćemo koristeći sljedeću jednadžbu:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{n \cdot h \cdot c}{2d \cdot \sin \theta}, \quad (7.3)$$

gdje je f frekvencija, a λ valna duljina rendgenskog zračenja. Kao što već znamo, $d = 201$ pm udaljenost između kristalnih ravnina za kristal LiF, θ je kut kojeg zatvara upadni snop rendgenskih zraka s ravninom kristala, a n je prirodni broj koji predstavlja red difrakcije. Potrebne su nam i dvije konstante: Planckova konstanta $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$ J Hz⁻¹ i $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ m s⁻¹. [9] Ove vrijednosti fizičkih konstanti preuzete su iz NIST baze [14].

Dakle, ako se na trenutak vratimo na analiziranje slike 7.1, vidimo da su dva para linija koje možemo uočiti, dodijeljena prvom i drugom redu difrakcije. Isto tako sa slike vidimo koliki su Braggovi kutovi θ za određenu liniju. [9] U tablici 7.1 nalaze se vrijednosti energija koje su pomoću jednadžbe (7.3) izračunate za karakteristične linije bakra.

Tablica 7.1: *Energijske vrijednosti karakterističnih linija bakra*

Red difrakcije za LiF	θ [°]	Karakteristična linija	E [keV]
n=1	22,6	K_α	8,026
	20,3	K_β	8,8898
n=2	50,0	K_α	8,052
	43,8	K_β	8,912

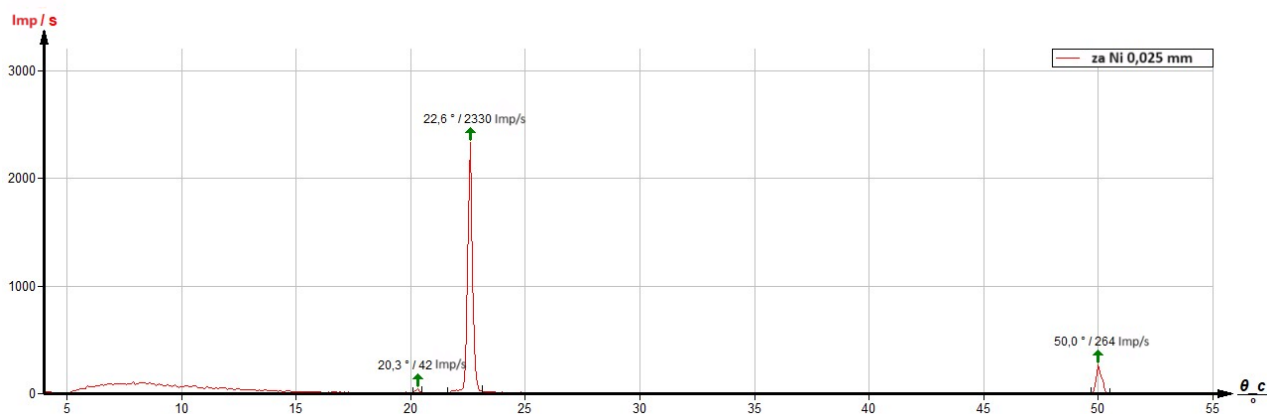
Ako sada izračunamo srednju energiju karakterističnih linija, dobijemo $E_{K_\alpha} = 8,039$ keV i $E_{K_\beta} = 8,9009$ keV. Usporedimo li to s vrijednosti iz literature [15], odnosno iz dijagrama (7.1) i (7.2), vidimo da imamo dobro poklapanje.

Nakon ovih mjerenja bez apsorbera te analiziranja karakterističnog rendgenskog zračenja izvora, obavili smo mjerenja montirajući folije različitih metala na držačima ispred detektora. Zanimalo nas je koje će od metalnih apsorpcijskih folija bolje apsorbirati rendgensko zračenje, odnosno koji elementi propuštaju manju količinu zračenja do detektora. Na raspolaganju smo imali i različite debljine metalnih folija za apsorbere od aluminija i cinka. Naravno da se očekuje kako će deblje folije apsorbirati veću količinu zračenja.

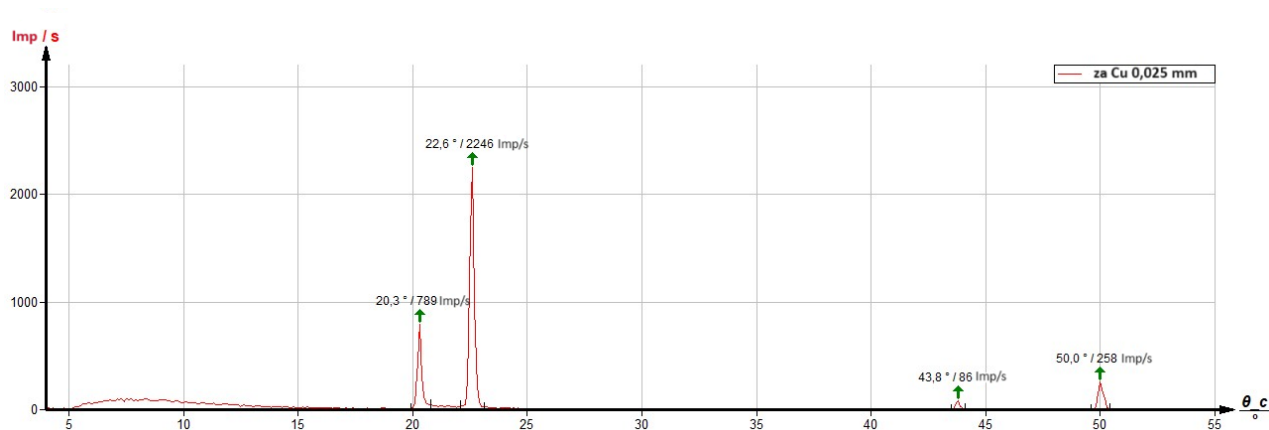
Na slici 7.3 nalazi se spektar rendgenskog zračenja, kada je tijekom mjerenja ispred detektora bila montirana apsorpcijska folija od nikla (Ni), debljine 0,025 mm. Kao što vidimo sa grafa ovaj je apsorber od nikla uspio blokirati K_{β} liniju, i to za red difrakcije $n = 2$ upotpunosti. Intenzitet zračenja kojeg je izmjerio detektor smanjio se i za K_{α} liniju u odnosu na spektar sa slike 7.1. Jedna od apertura koje je moguće iskoristiti za ovaj eksperiment je i apertura s niklom, za koju znamo da je monokromator i da blokira K_{β} liniju, pa je spektar zračenja na slici 7.3 bio očekivan. Mjerenje s monokromatorom također smo obavili, ali budući da je spektar sličan ovome s apsorberom, nismo u rad dodavali sliku. Razlika u ta dva spektra jest što monokromator ne snižava i intenzitet za K_{α} liniju, kao što to čini metalna folija.

Na slici 7.4 prikazan je spektar rendgenskog zračenja kada je tijekom mjerenja ispred detektora bila montirana apsorpcijska folija od bakra Cu, debljine 0,025 mm. Vidimo da se intenzitet zračenja smanji otprilike na pola u odnosu na intenzitet bez apsorbera za obje linije, međutim ni jednu liniju ne blokira tako dobro kao što je to bio slučaj kod nikla.

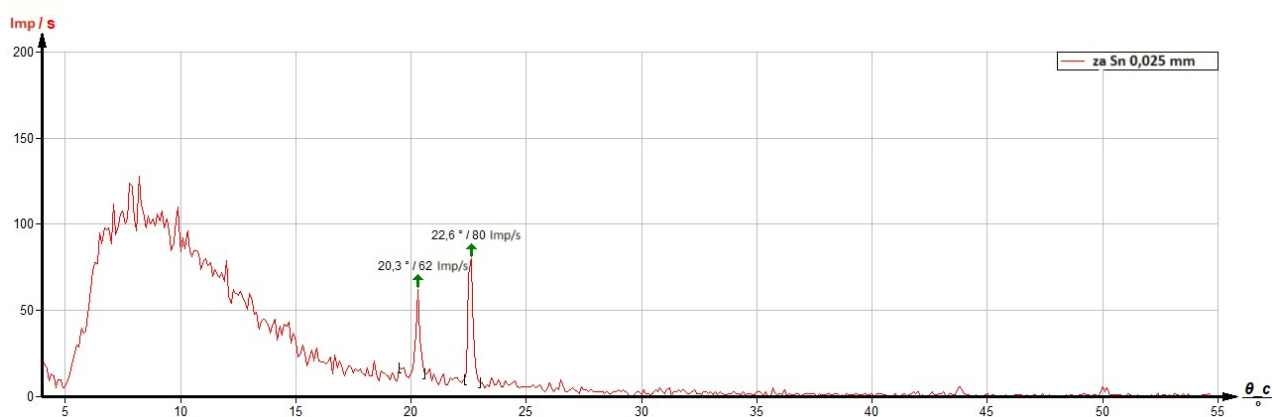
Mjerenja smo obavili s još jednom apsorpcijskom folijom debljine 0,025 mm, ovog puta od kositra (Sn). Spektar rendgenskog zračenja prikazan je na slici 7.5 i ako ga analiziramo vidimo da je kositar apsorbirao najveću količinu zračenja od metalnih folija koje smo koristili, odnosno blokirao je obje karakteristične linije. U potpunosti ih je blokirao za red difrakcije $n = 2$, ali zapravo skoro u potpunosti i za red difrakcije $n = 1$.



Slika 7.3: Spektar rendgenskog zračenja uz korištenje apsorbera od nikla debljine 0,025 mm



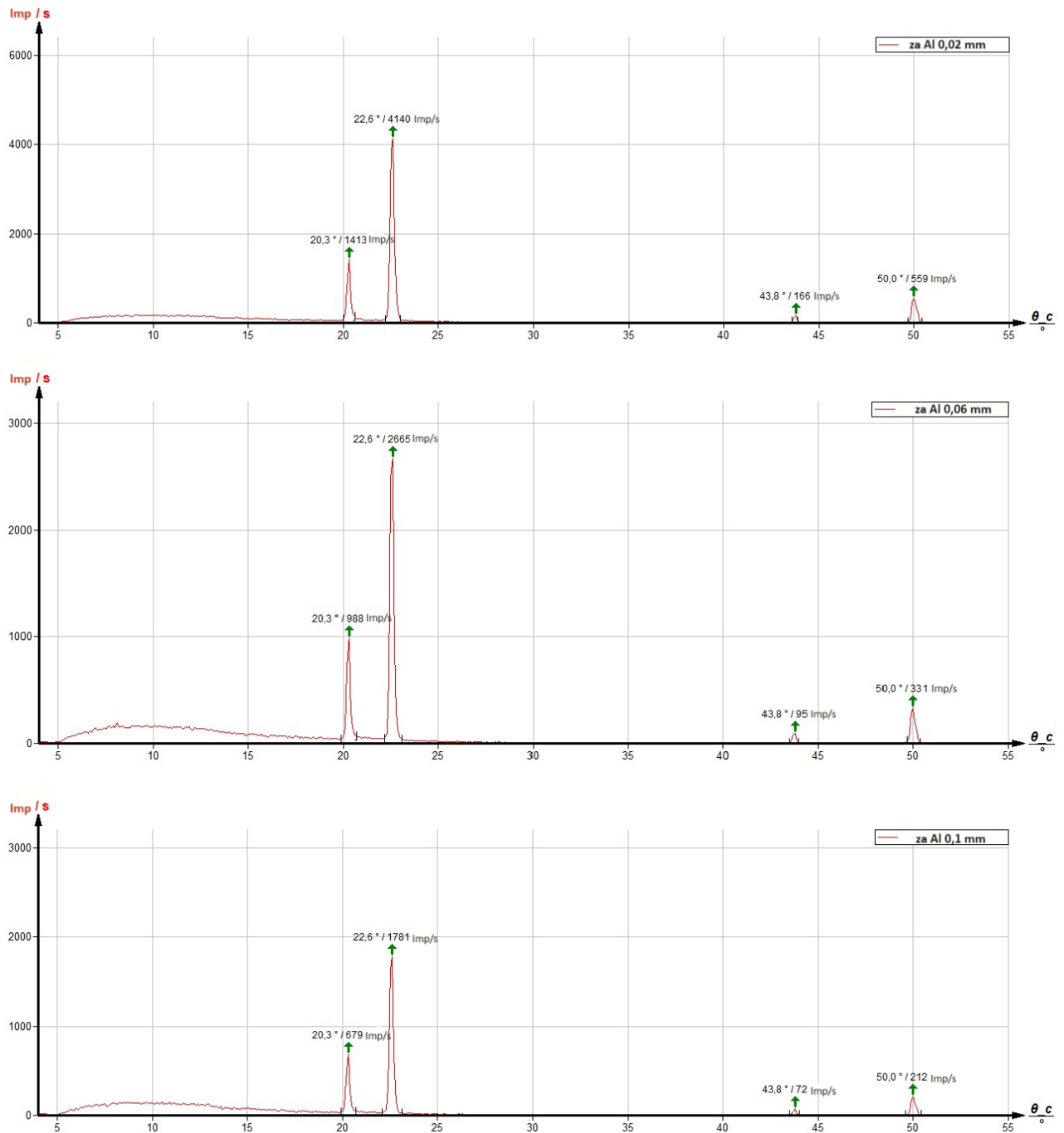
Slika 7.4: Spektar rendgenskog zračenja uz korištenje apsorbera od bakra debljine 0,025 mm



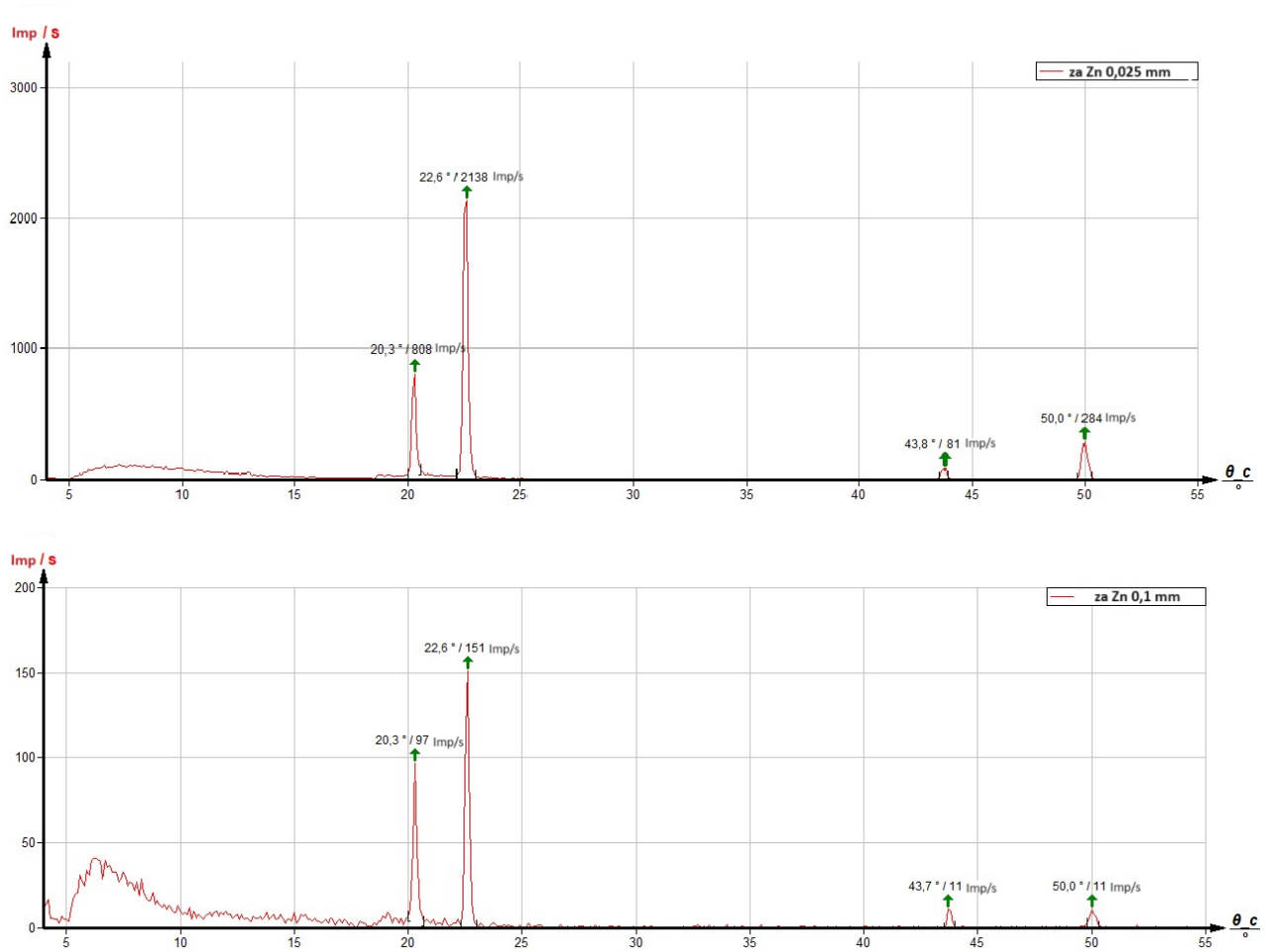
Slika 7.5: Spektar rendgenskog zračenja uz korištenje apsorbera od kositra debljine 0,025 mm

Aluminijeva apsorpcijska folija apsorpira zračenje lošije od one bakrene. Odnosno, vidimo da se intenzitet smanjuje, ali i dalje uočavamo karakteristične linije, pogotovo za najtanju foliju. Na raspolaganju smo imali aluminijske folije debljine 0,02 mm, 0,04 mm, 0,06 mm, 0,08 mm i 0,1 mm. Na slici 7.6 prikazani su spektri kada su mjerenja obavljena s folijama 0,02 mm, 0,06 mm i 0,1 mm. Iz ova tri grafa zapravo se da zaključiti kako izgledaju i grafovi za preostale dvije debljine folije, pa slika nije uvrštena u rad. Vidimo da za debljinu folije 0,02 mm zapravo nema velike razlike u odnosu na spektar sa slike 7.1. Tek najdeblja folija od 0,1 mm uspijeva apsorbirati više rendgenskog zračenja od bakrene apsorpcijske folije debljine 0,025 mm.

Na slici 7.7 prikazana su mjerenja s cinkovim apsorberom debljine 0,025 mm te 0,1 mm. Mjerenja smo obavili i za 0,05 mm te 0,075 mm, ali iz istog razloga kao i kod aluminijske folije u radu nisu prikazane sve debljine. Ako usporedimo spektar zračenja za cinkov apsorber debljine 0,025 mm s ostalim apsorberima iste debljine, vidimo da je približno sličan spektru zračenja za metlanu foliju od bakra. Kada smo koristili deblje folije, vidjeli smo istu situaciju kao i kod aluminijske folije. Odnosno, deblja folija bolje apsorpira zračenje. Pogledamo li sada još graf za aluminijski apsorber debljine 0,1 mm i cinkov apsorber iste debljine, možemo zaključiti da je cink propuštao manje rendgenskog zračenja do detektora.



Slika 7.6: Usporedba spektara rendgenskog zračenja izmjerenih uz korištenje različitih debljina apsorbera od aluminija



Slika 7.7: Usporedba spektara rendgenskog zračenja izmjerenih uz korištenje različitih debljina apsorbera od cinka

8 Zaključak

Metodom skenirajuće difraktometrije u ovom završnom radu okarakteriziran je izvor rendgenskih zraka. Korišteni je izvor cijev s bakrenom anodom koja je spojena na razliku potencijala. Za različite anodne napone dobiveni su spektri rendgenskog zračenja te je usporedbom njihova izgleda zaključeno kakve su karakteristične linije atoma bakra. Kvantitativno je promatrana i sposobnost apsorpcije rendgenskog zračenja različitih metala. Uspoređen je utjecaj metalnih apsorpcijskih folija, koje su bile iste debljine, na spektar rendgenskog zračenja izvora. Na ovaj je način promatrano koji je metal propuštao najmanju količinu rendgenskog zračenja do detektora.

Tema bi se dalje mogla razraditi promatranjem ogiba rendgenskih zraka na drugačijim kristalima. Na primjer, mogli bismo koristiti uzorak kristala kalijevog bromida (KBr) koji ima veći red difrakcije od korištenog kristala litijevog fluorida (LiF) ili uzorke kristala samljevene u fini prah. Umjesto metode skenirajuće difraktometrije za analizu spektra zračenja mjerenja su se mogla obaviti i koristeći von Laueovu ili Debye-Scherrerovu metodu ogiba rendgenskih zraka.

U ovom je završnom radu iskorišten samo jedan način rada mjernog uređaja. Međutim, sam uređaj omogućava izradu brojnih eksperimenata u različitim znanstvenim područjima. Tako ga se može osim za istraživanja u okviru nastave fizike koristiti i za područje kemije, biologije i medicine. Zbog toga je *PHYWE XR 4.0 expert X-ray unit*, kao i njemu slični uređaji, nepresušan izvor za različite završne i diplomske radove.

9 Literatura

- [1] Arthur Beiser: *Concepts of Modern Physics, Sixth Edition*, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [2] Robert Eisberg, Robert Resnick: *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles, Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc., 1985.
- [3] *Spektar elektromagnetskog zračenja*, Kemijski rječnik
URL: https://www.periodni.com/gallery/spektar_elektromagnetskog_zracenja.png
(23. 9. 2023.)
- [4] Branka Radulović: *Priprema i obrada nastavne jedinice "x-zračenje" u srednjim školama, diplomski rad*, Novi Sad, 2008.
URL: [https://www.df.uns.ac.rs/wp-content/uploads/publikacije/branka_radulovic_-_diplomski_rad_\(d-522\).pdf](https://www.df.uns.ac.rs/wp-content/uploads/publikacije/branka_radulovic_-_diplomski_rad_(d-522).pdf) (22. 9. 2023.)
- [5] *X-ray by Wilhelm Röntgen of Albert von Kölliker's hand*, Wikipedia
URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/X-ray_by_Wilhelm_R%C3%B6ntgen_of_Albert_von_K%C3%B6lliker%27s_hand_-_18960123-02.jpg
(23. 9. 2023.)
- [6] R. A. Serway, C. J. Moese, C. A. Moyer: *Modern Physics, third edition*, Thomson Learning Inc., Belmont, 2005.
- [7] *Bremsstrahlung*, Wikipedia
URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1e/Bremsstrahlung.svg/800px-Bremsstrahlung.svg.png> (23. 9. 2023.)
- [8] *PHYWE XR 4.0 expert unit, X-ray unit 35 kV, Operating Instructions*, PHYWE Systeme GmbH & Co. KG .
URL: https://www.phywe.com/physics/modern-physics/x-ray-physics/xr-4-0-expert-unit-35-kv_1557_2488/ (22. 9. 2023.)
- [9] *PHYWE Characteristic X-rays of copper*, PHYWE Systeme GmbH & Co. KG .
URL: https://www.phywe.com/physics/modern-physics/x-ray-physics/characteristic-x-rays-of-copper_10845_11850/ (22. 9. 2023.)
- [10] *PHYWE Solutions for schools and universities; Overview of PHYWE solutions in 2022 - including TESS Expert and TESS Advanced*, PHYWE Systeme GmbH & Co. KG .
URL: <https://www.phywe.com/catalogues/> (22. 9. 2023.)
- [11] *PHYWE XR 4.0 X-ray Absorption set for X-rays*, PHYWE Systeme GmbH & Co. KG .

URL: https://www.phywe.com/equipment-accessories/phywe-xr-4-0-x-ray-equipment-accessories/xr-4-0-x-ray-absorption-set-for-x-rays_1732_2663/ (22. 9. 2023.)

[12] *PHYWE XR 4.0 X-ray Goniometer*, PHYWE Systeme GmbH & Co. KG .

URL: https://www.phywe.com/equipment-accessories/phywe-xr-4-0-x-ray-equipment-accessories/xr-4-0-x-ray-goniometer_1511_2442/ (22. 9. 2023.)

[13] *PHYWE XR 4.0 X-ray LiF crystal, mounted*, PHYWE Systeme GmbH & Co. KG .

URL: <https://cdn02.plentymarkets.com/jd5w7us67fek/item/images/1505/full/09056-05-1627225475.jpg> (22. 9. 2023.)

[14] Eite Tiesinga, Peter J. Mohr, David B. Newell, Barry N. Taylor: *The 2018 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants*, web-verzija 8.1, bazu razvili J. Baker, M. Douma i S. Kotochigova, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD 20899.

URL: <http://physics.nist.gov/constants> (22. 9. 2023.)

[15] *PHYWE XR4 X-ray Plug-in Cu tube*, PHYWE Systeme GmbH & Co. KG .

URL: https://www.phywe.com/physics/modern-physics/x-ray-physics/xr4-x-ray-plug-in-cu-tube_1516_2447/ (22. 9. 2023.)