

UNIVERZA V NOVI GORICI  
FAKULTETA ZA APLIKATIVNO NARAVOSLOVJE

**KARAKTERIZACIJA KVALITETE  
NEVTRONOGRAFSKE SLIKE NA RAZISKOVALNEM  
REAKTORJU TRIGA**

DIPLOMSKO DELO

**ALEN ORŠULIĆ**

Mentor: prof. dr. Bogdan Glumac

Nova Gorica, 2014

## **Zahvala**

Zahvalil bi se rad obema mentorjema, tako prof. dr. Bogdanu Glumcu, kot dr. Igorju Lengarju, ker sta mi omogočila, da se mi je želja uresničila in sem lahko diplomsko delo opravljal na reaktorskem odseku Inštituta Jožefa Štefana v Podgorici. Zahvaljujem se jima za vestno odgovarjanje na vsa moja nešteta vprašanja in za vodenje po pravi poti skozi probleme do rešitev. Zahvalil bi se rad še vsej ostali ekipi na reaktorskem odseku s katero sem delal, zlasti pa dr. Vladimirju Raduloviću za svetovanje ter Dušanu Rudmanu in Bojanu Žefranu, ki sta ustregla vsem mojim željam.

Zahvaljujem se vsem prijateljem za moralno podporo ter staršem za moralno in finančno podporo, da je bilo moje diplomsko delo izvedljivo.



## **Izveček**

Z nevtronsko radiografijo, pri kateri sem uporabljal samo termične nevtrone, sem preučeval odvisnost debeline vzorca na vidnost slike ustvarjene s slikovnimi ploščami v termalni koloni ter odvisnost debeline materiala pred vzorcem na kvaliteto slike. Z oddaljevanjem vzorca od slikovne plošče sem poskušal karakterizirati vrednost sipanih nevtronov na vzorcu na določenih razdaljah, kateri še zadenejo slikovne plošče ter s tem posledično zamažejo slike. Za eksperimentalno delo sem uporabljal termalno kolono reaktorja TRIGA Mark II, last Inštituta Jožefa Štefana v Podgorici, s katero sem ustvarjal slike, ter procesorsko moč odseka F8 za reaktorsko fiziko v Podgorici.

## **Abstract**

Using neutron radiography, based on thermal neutrons only, I have studied the relationship between thickness of a sample and the resulting image clarity for images made with imaging plates in a thermal column and, similarly, the dependence of image clarity to the thickness of pre-sample material. By increasing the distance between the sample and the imaging plates I also tried to characterise the amount of scattered neutrons, which, at a given distance, still hit the imaging plates thus blurring the resulting images. To create the images I have used the thermal column of TRIGA Mark II, owned by Jožef Štefan Institute in Podgorica, and also imaging plates equipment and computing power of F8 reactor at Reactor Physics Department in Podgorica.



# Kazalo

Zahvala.....	I
Izvleček .....	III
Abstract .....	III
Kazalo .....	V
Kazalo tabel.....	VI
Kazalo slik.....	VI
1 Uvod.....	1
2 Nevtroni.....	2
2.1 Nevtronski žarek.....	2
2.1.1 Divergenca .....	3
2.1.2 Sipanje .....	4
3 Nevtronska radiografija.....	6
3.1 slikovna plošča .....	7
3.2 Termalna kolona.....	9
3.2.1 Kolimator .....	10
4 MCNP .....	11
5 Eksperimentalni del.....	13
5.1 Razlika med termalno kolono in tangencialnim kanalom .....	14
5.2 Slikanje .....	14
7 Zaključek.....	30
8 Literatura .....	30

## Kazalo tabel

Tabela 1: Vrednosti elementov [15].....	7
---	---

## Kazalo slik

Slika 1: Geometrijska neostrina.....	4
Slika 2: Odvisnost parametrov za geometrijsko ostrino .....	5
Slika 3: Masni atenuacijski koeficient $\mu$ elementov periodnega sistema [6].....	6
Slika 4: Slikovni demonstracija delovanja programa MCNP5.....	11
Slika 5: Slikovni prikaz geometrije reaktorja v MCNP5 [14] .....	14
Slika 6: Nevtronografska slika ožajočega se vodnega klina napolnjenega z vodo.....	15
Slika 7: Nevtronografska slika vzorca napolnjenega z vodo slikana skozi 5 cm svinca .....	16
Slika 8: Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči ob slikanju skozi 5 cm svinca .....	17
Slika 9: Nevtronografska slika vzorca napolnjenega z vodo slikana skozi 10 cm svinca .....	17
Slika 10: Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči ob slikanju skozi 10 cm svinca .....	18
Slika 11: Nevtronografska slika vzorca napolnjenega z vodo slikana skozi 20 cm svinca .....	18
Slika 12: Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči ob slikanju skozi 20 cm svinca .....	19
Slika 13: Nevtronografska slika vzorca napolnjenega z vodo slikana skozi 25 cm svinca .....	19
Slika 14: Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči ob slikanju skozi 25 cm svinca .....	20
Slika 15: Kemijska sestava PMMA [17] .....	21
Slika 16: Slikovni prikaz geometrije fantoma .....	21
Slika 17: Nevtronografska slika železnega fantoma na oddaljenosti 0 cm od slikovne plošče .....	22
Slika 18 Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za Fe fantom postavljen tik ob slikovni plošči.....	22
Slika 19: Nevtronografska slika Fe fantoma na oddaljenosti 7 cm od slikovne plošče.....	23
Slika 20: Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za Fe fantom na razdalji 7 cm od slikovne plošče .....	23
Slika 21: Nevtronografska slika Fe fantoma na oddaljenosti 28 cm od slikovne plošče.....	24
Slika 22 Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za Fe fantom na razdalji 28 cm od slikovne plošče .....	24
Slika 23: Graf odvisnosti sipanih nevtronov na Fe fantomu od razdalje med fantomom in slikovno ploščo .....	25
Slika 24: Nevtronografska slika PMMA fantoma na oddaljenosti 0 cm od slikovne plošče.....	25

Slika 25: Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za PMMA fantom postavljen tik ob slikovni plošči.....	26
Slika 26: Nevtronografska slika PMMA fantoma na oddaljenosti 7 cm od slikovne plošče.....	26
Slika 27: Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za PMMA fantom na razdalji 7 cm od slikovne plošče.....	27
Slika 28: Nevtronografska slika PMMA fantoma na oddaljenosti 28 cm od slikovne plošče.....	27
Slika 29: Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za PMMA fantom na razdalji 28 cm od slikovne plošče.....	28
Slika 30: Graf odvisnosti sipanih nevtronov na PMMA od razdalje med fantomom in slikovno ploščo .....	29





# 1 Uvod

Industrijski razvoj neustavljivo hiti naprej. Konkurenca med podjetji veliko pripomore k temu in je gonilo napredka in izboljšav. Nekatera podjetja si želijo svoje izdelke tako izboljšati, da se včasih zatečejo tudi k nevtronski radiografiji, katera je tudi tema moje diplomske naloge. Z nevtronsko radiografijo dobimo slike, na katerih vidimo naše vzorce, vendar so te slike ravno nasprotje slikam, ki jih pridobimo z rentgensko ali  $\gamma$  svetlobo. Nevtronska radiografija ima to posebnost, da je za nevtrone večina gostejših materialov, kot so npr. kovine (Fe, Al, Pb,...), prozornih in so lažji materiali vidni na slikah (npr. voda, katero sem sam uporabljal pri raziskovalnem delu). Z nevtronsko radiografijo lahko pogledamo globoko v material in ga pri tem ne uničimo ali poškodujemo. Lahko pa pride do manjše nevtronske aktivacije.

Konkretno sem se začel ukvarjati z mojo diplomsko nalogo, ker so na Inštitutu Jožef Štefan prejeli zahtevek nekega podjetja za pregled njihovega toplotnega izmenjevalnika z nevtronsko radiografijo. S slednjo so na Inštitutu preverili, kje se znotraj izmenjevalnika kondenzira in nabira voda, in rezultate raziskave poslali podjetju, da je le-to lahko svoj izdelek izboljšalo. Jaz sem šel še dlje od te raziskave, saj sem želel preveriti, kje so dejanske meje slikanja z nevtronsko radiografijo na slikovnih ploščah z opremo, ki jo imajo na reaktorskem odseku v Podgorici. Preveril sem, kako majhno količino vode se še da videti na slikah in skozi kakšno debelino svinca je vodo še moč zaznati. Na koncu sem uporabil dva fantoma iz različnega materiala (Fe in PMMA), saj sem želel z njima okarakterizirati sipanje nevtronov in določiti razdaljo med vzorcem in slikovno ploščo, pri kateri nastanejo najboljše slike. Vrednosti vseh slik sem poročunal še s simulacijo v programu MCNP5. Rezultate sem predstavil kot grafe s programom Mathematica 8. S pomočjo rezultatov simulacije sem prišel do zaključkov, ki sem jih utemeljil v opisu eksperimentov.

## 2 Nevtroni

Nevtron je leta 1932 odkril britanski znanstvenik James Chadwick. Nevtron je izven jedra nestabilen in razpade v proton, ob tem nastaneta še elektron in elektronski antinevtrino. To se zgodi v času do 15 min (povprečna življenjska doba 14,76 min) [10]. Nevtron nima naboja in ima nekoliko večjo maso od protona ( $m_n=1,67495 \times 10^{-27}$ ,  $m_p=1,67265 \times 10^{-27}$ ) [1]. Ker je brez naboja lahko prodre globlje v večino materialov kot ostali delci. Nevtroni v materialu večinoma interagirajo z jedri preko absorpcije in trkov, ki so lahko elastični in neelastični. Pri trkih nevtroni zadenejo jedro ter s spremenjenim kotom smeri nadaljujejo svojo pot, ob tem pa jedro, če gre za neelastično sipanje, vzbudijo, in kasneje to vzbujeno jedro emitira  $\gamma$ -žarek. Elastično sipanje je podobno, le da ne vzbudi jedra. Poleg trkov lahko pride do radioaktivnega zajema, kjer jedro zajame nevtron in kasneje emitira enega ali več  $\gamma$ -žarkov, lahko pa nevtron tudi izgine kot posledica absorpcije pri nastanku  $\alpha$ -delca ali protona. Zgodi pa se lahko, da nevtron z visoko energijo, ki trči v jedro, pri tem izbije še enega ali dva dodatna protona, ki sta šibko vezana v jedru [2].

Energije nevtronov segajo od 0 eV pa do več kot 20 MeV. Na levi strani spektra imamo tako imenovane hladne nevtrone, ki imajo energije od 0–0,025 eV. Tem sledijo termični nevtroni, ki so bili za moje raziskovalno delo najpomembnejši, saj je njihov presek za interakcijo s snovjo največji in se lepo absorbirajo na slikovnih ploščah. Ime »termični nevtroni« so slednji dobili, ker so v termičnem ravnovesju z okolico pri sobni temperaturi (20°C). Maxwell-Boltzmanova distribucija pripisuje tem nevtronov kinetično energijo 0,025 eV, čeprav je povprečna vrednost termičnih nevtronov 0,038 eV [12]. Pomembnejši razredi so še počasni nevtroni 1–10 eV, resonančni nevtroni 10–300 eV, hitri nevtroni 1–20 MeV ter relativistični nevtroni z energijami višjimi od 20 MeV [16].

Za mojo diplomsko nalogo sem potreboval veliko število nevtronov na ustju kolimatorja. Nevtroni nastajajo s fisijo znotraj sredice reaktorja TRIGA Mark II, nato pa jih z reflektorjem usmerimo v kolimator. Fisija je dogodek, ko trk počasnega nevtrona s težkim jedrom tega vzbudi v nestabilno stanje. Po nekem času pride do cepitve, pri tem nastaneta dve srednje težki jedri ter nekaj nevtronov in fotonov [4].

## 2.1 Nevtronski žarek

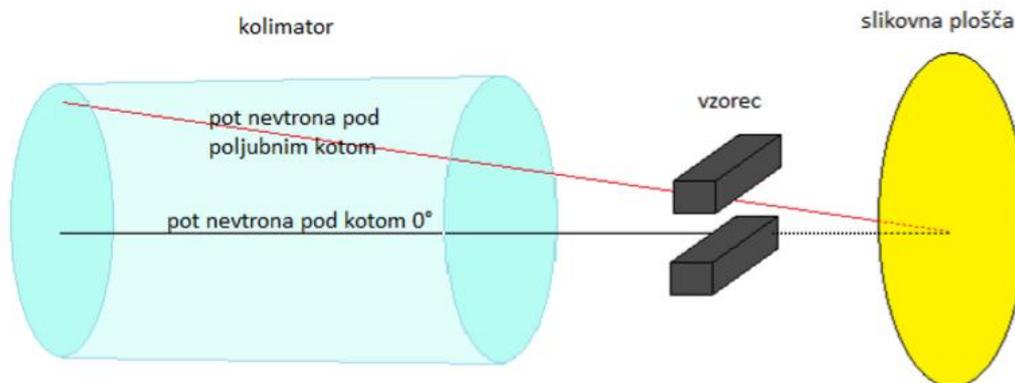
Nevtronski žarek, ki nam služi za nedestruktivne preiskave, okarakteriziramo največkrat z njegovim fluksom in razmerjem med njegovo dolžino ( $L$ ) in premerom kanala ( $D$ ), ki ga imenujemo efektivno kolimacijsko razmerje ( $L/D$ ). Seveda pa pomembno vlogo tu odigrata tudi geometrija samega reaktorja ter kanala in energijska porazdelitev nevtronov [8].

Velik problem pri geometriji nam predstavlja divergenca snopa, saj nevtronov ni moč na enostaven način in brez izgub usmeriti v snop s čim manj divergence. Ena od možnosti je, da je geometrija kanala tako prilagojena k zmanjšanju divergence, da je efektivno kolimacijsko razmerje ( $L/D$ ) čim večje. Glede na to, da je reaktor TRIGA Mark II zasnovan tako, da je  $L/D$  razmerje 65 in ga ni moč spreminjati, lahko uporabimo material, ki dobro absorbira nevtrone. Skozenj naredimo luknjo zelene velikosti ter ga postavimo na izhod iz kolimatorja. Tako bi povečali  $L/D$  razmerje, a bi zmanjšali velikost slike [7].

### 2.1.1 Divergenca

Nevtroni nimajo naboja, zato lahko globoko prodrejo skozi material, zelo težko pa jih je fokusirati, kar pri nevtronski radiografiji lahko odigra pomembno vlogo. Zaradi nezmožnosti usmerjanja nevtronov (razen z njihovo absorpcijo v stenah kolimatorja) nastane nek kot divergence, znotraj katerega lahko nevtron prileti do objekta ali slikovne plošče. V mojem diplomskem delu sem poskušal zmanjšati šum na slikovnih ploščah, ki je posledica sipanih nevtronov, z odmikanjem vzorca od slikovne plošče. Na drugi strani pa sem moral upoštevati divergenco, ki je s pretiranim odmikanjem vzorca od slikovne plošče začela dominirati v napaki na sliki. Da bi bil nevtronski žarek idealen, bi morala biti dolžina kolimatorja neskončna, premer pa bi moral iti proti nič. Premer kolimatorja je na žalost preširok za svojo dolžino. Posledica tega je, da dopušča nevtronom izhodne kote iz ustja, ki niso  $0^\circ$ , kar bi bilo idealno, ampak lahko segajo vse do  $2^\circ$ . Premer nevtronskega žarka je idealen za preiskave, ki jih opravljajo na reaktorju, zato se ga ne zmanjšuje, lahko pa bi se podaljšalo kolimator in na ta način zmanjšalo divergenco. V našem primeru je razmerje med dolžino kolimatorja in njegovo širino 65, divergenca pa je  $2^\circ$ . Slika 1 prikazuje kako preveli-

ka širina dopušča, da nevtron zapusti kolimator pod kotom, ki ni  $0^\circ$ . Posledično se lahko nahaja tudi za vzorcem ko doseže slikovno ploščo.



**Slika 1:** Geometrijska neostrina

Zaradi kolimatorja, ki naj bi bil odprt z  $2^\circ$  prihaja do indirektnega snopa nevtronov kar lahko na veliki razdalji med slikovnimi ploščami in predmetom grdo razmaže sliko. Divergenco je moč izračunati iz razmerja med velikostjo predmeta in nastale slike.

### 2.1.2 Sipanje

Nevtroni se ob prehodu skozi material sipljejo na jedrih atomov. Nevtroni so lahko sipani v vse smeri, nekaj se jih sipa tudi v smeri nevtronskega žarka. Te vidimo na naših slikovnih ploščah, vendar ne vemo ali gre za sipane nevtrone ali za nevtrone, ki so prišli skozi material brez interakcije. Če gre za sipane nevtrone nam njihovo zaznavanje ne koristi, saj nam zamaže sliko. Njihova detekcija na slikovni plošči nam ne pove ničesar o notranjosti materiala, saj se je nevtron sipal kjerkoli. Kot sipanja je odvisen tudi od materiala na katerem se je nevtron sipal. Na težjih materialih je sipanje bolj izotropno, kot na lažjih, pri katerih se nevtroni sipljejo pretežno naprej. To drži za tanke plasti materiala. Na dovolj debelih plasteh dobimo tudi na lažjih materialih izotropno porazdelitev kotov. Sipani nevtroni nam lahko zamažejo sliko tudi do 15% [13]. V mojem diplomskem delu sem se poskušal znebiti sipanih nevtronov tako, da sem povečal razdaljo med obsevanim predmetom in slikovno ploščo in se znebil določenih kotov vpada nevtronov na slikovno ploščo. Ker pa je razmerje  $L/D$  na TRIGA Mark II zelo nizko sem moral plačati določeno ceno. S povečevanjem razdalje je v zamazanosti slike pričela dominirati divergenca. V diplomskem delu

bom opisal, kako sem poizkušal dobiti optimalno razdaljo, pri kateri bi bilo sipanje in divergenca kar najmanjše, jasnost slike pa najvišja.

Da bi izmerili skupno neostrino slike  $U_T$  moramo poznati notranjo neostrino  $U_I$ , ki je v mojem primeru 0,25 mm in geometrijsko neostrino  $U_G$ , ki jo izračunamo iz formule [3]:

$$U_G = \frac{D}{(L-L')}L' \quad (1)$$

Nato lahko po Klassensovi metodi izračunamo skupno neostrino [5]:

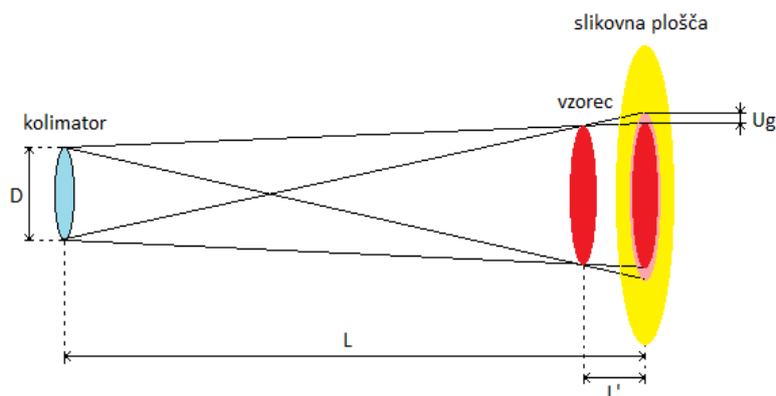
$$U_T = \sqrt[3]{U_I^3 + U_G^3} \quad (2)$$

Enačbo (1) lahko prepišemo kot,

$$U_G \approx \frac{D}{L}L' \quad (3)$$

če je  $L'$  mnogo manjši od celotne dolžine  $L$  ter s pomočjo te enačbe izračunamo  $L'$ , ki nam pove, kolikšna naj bo razdalja med vzorcem in slikovno ploščo, saj je smiselno povečevati razdaljo le do meje, ko se  $U_T$  izenači z  $U_I$ . Tako lahko izračunamo, da je ta razdalja 16,3 mm. V eksperimentalnem delu bomo videli, da s to razdaljo le malo zmanjšamo število sipanih nevtronov.

Na sliki 2 so prikazane odvisnosti parametrov, kjer je  $D$  premer ustja kolimatorja.



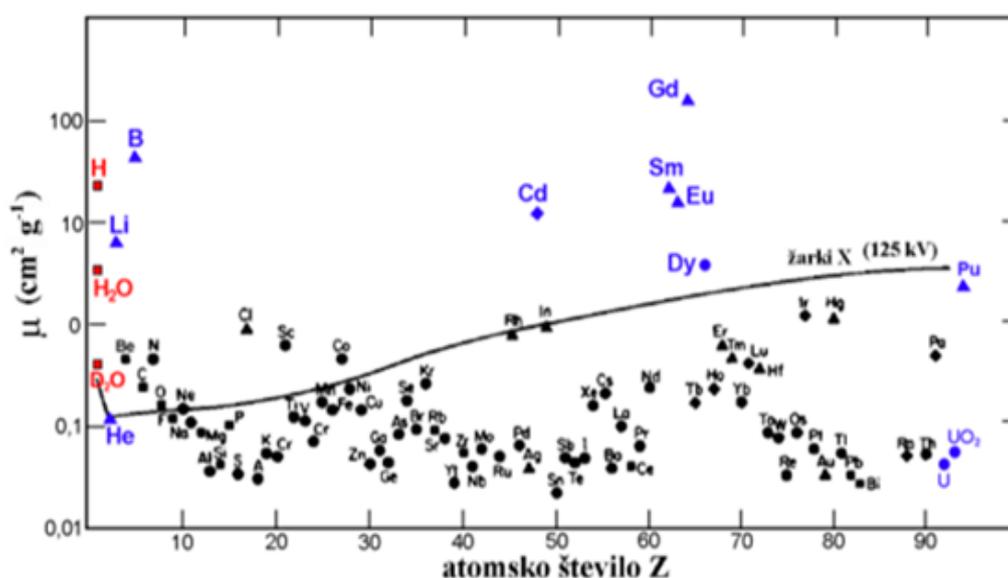
**Slika 2:** Odvisnost parametrov za geometrijsko ostrino

### 3 Nevtronska radiografija

Nevtroni nimajo naboja, zato lahko prodrejo globoko v večino materialov in jih pri tem ne poškodujejo. Nevtronska radiografija je komplementarna radiografiji z rentgenskimi žarki in slikanju z gama žarki, saj z nevtroni vidimo večinoma lahke elemente, kot so npr. H,O,N,B..., in lahko prodremo skozi težke materiale [11]. Masni atenuacijski koeficient  $\mu$  nam lepo pokaže, kakšne preseke imajo nevtroni ter žarki z elementi. Pri rentgenskih žarkih atenuacijski koeficient  $\mu$  narašča z vrstnim številom elementa Z, medtem ko atenuacijski koeficient  $\mu$  za nevtrone nima nobene zvezne oblike in se vrednosti spreminjajo od elementa do elementa. Masni atenuacijski koeficient  $\mu$  nam pove, kako močno kemijska spojina sipa ali absorbira delce, s katerimi jo preiskujemo. Masni atenuacijski koeficient  $\mu$  lahko izračunamo z vsoto vseh presekov posameznih elementov, ki sestavljajo molekulo spojine [6]:

$$\mu = \frac{1}{\rho} \sum_i N \sigma_i = \frac{N_A}{M} \sum_i \sigma_i \quad (4)$$

Na sliki 3 je graf, ki prikazuje masni atenuacijski koeficient  $\mu$  elementov periodnega sistema za X žarke (125 kV), in kar je bolj pomembno za nas, za termične nevtrone (0,025 eV).



Slika 3: Masni atenuacijski koeficient  $\mu$  elementov periodnega sistema [6]

V tabeli 1 so zbrani določeni elementi, katerim je poleg vrstnega števila in atomske mase pripisan še mikroskopski presek za absorpcijo in sipanje. Med navedenimi

elementi jih je kar nekaj pomembnih za moje diplomsko delo. Najpogostejši materiali za zajem nevtronov so Li-6, B-10, Cd, Gd. Iz spodnje tabele je lepo vidno, da je njihov absorpcijski mikroskopski presek zelo velik.

**Tabela 1:** Vrednosti elementov [15]

element	Vrstno število	Atomska masa [g/mol]	Mikroskopski presek [b]	
			sipanje	absorbpcija
H	1	1,008	81,5	0,332
Li	3	6,939		70,7
B	5	10,811	4,4	759
C	6	12,011	4,8	0,0034
O	8	15,9994	3,76	0
Al	13	26,9815	1,55	0,235
Fe	26	55,47	11,8	2,53
Cd	48	112,40	5,6	2450
Gd	64	257,25	4,0	49000

### 3.1 Slikovna plošča

V slikovni plošči imamo gadolinij, ki je razpršen v fotostimulativni fosforjevi plasti BaFBrEu. Nevtroni, ki priletijo na slikovno ploščo, se absorbirajo v gadolinijevih jedrih. Gadolinijeva jedra nato emitirajo sekundarno sevanje, ki vzbudi fotostimulativno fosforjevo plast do metastabilnega stanja. Absorpcija sekundarnega sevanja povzroči generiranje parov elektron/vrzel. Ko slikovne plošče po končanem obsevanju postavimo v čitalnik, zajete elektrone vzbudimo s pomočjo rdeče laserske svetlobe (He-Ne 633nm). Rekombinirajo se z vrzeli in pri tem izsevajo foton v modrem delu vidnega spektra. Fotone zajamemo s fotopomnoževalko. Tako dobimo analogni električni signal, ki ga pretvorimo v digitalnega za nadaljnjo računalniško obdelavo. Skener s pomočjo laserske svetlobe vzbudi vsak delček slikovne plošče posebej in zabeleži numerično vrednost v razponu več kot 8 redov velikosti. Velikost piksla je 50  $\mu\text{m}$ . Ploščo lahko večkrat preberemo, vendar je kvaliteta slike slabša, lahko pa jo popolnoma zberemo z belo svetlobo in jo kasneje ponovno uporabimo. Slikovne plošče so uporabne zaradi sprejemljivega časa obsevanja, svoje velike občutljivosti



in širokega dinamičnega območja (več kot 8 redov velikosti) [4]. Substrat vsebuje Gd oksid v razmerju 1:1 med Ba in Gd atomi.

Slikovne plošče so med slikanjem spravljene v aluminijastih kasetah, saj le-te preprečujejo, da bi vidna ali UV svetloba izbrisala sliko. Aluminij je izbran zato, ker ima visoko prepustnost za termične nevtrone in zanemarljivo aktivacijo ob obsevanju z nevtroni.

Pri slikanju z nevtronsko radiografijo šum lahko opišemo s tremi prispevki: s statistično procesa obsevanja, z bralnim procesom in z učinkom sevanja ozadja. Dejanski šum pa sestavljajo vsa 3 področja po formuli [4]:

$$N_{total} = \sqrt{N_{read}^2 + N_{dark}^2 + N_{shot}^2} \quad (5)$$

Prevladovanje določenega področja šuma je posledica postavitve našega poskusa. Načeloma pa se šum povečuje s hitrejšim branjem. Kakovost slike se odraža v dobrem signal/šum razmerju, ki ga lahko nekoliko povišamo z daljšim časom obsevanja. Glede na naše zahteve se moramo odločiti, katera področja šuma bomo izboljšali in katere napake bomo tolerirali. Glede na to, da sem na reaktorju TRIGA Mark II v Podgorici uporabljal le en tip slikovne plošče in da naprava dopušča le en način in čas branja, nisem mogel vplivati na nič drugega, kot na čas obsevanja.

Na reaktorskem odseku v Podgorici imajo 5 slikovnih plošč s katerimi lahko ustvarimo 10 slik naenkrat ob dobri postavitvi. Slikovne plošče v zasilni temnici (hišica zraven reaktorja) iz kartonastih kaset položimo v aluminijasto kaseto in to kaseto vpnemo na aluminijasto vodilo stojala, ki je centrirano znotraj nevtronskega fluksa, ki izhaja iz ustja kolimatorja. Al stojalo nam omogoča, da je slikovna plošča vedno na isti razdalji od in v sredini obsevalne naprave. Ob racionalni postavitvi slikovne plošče si lahko z vodili na stojalu pomagamo, da na isti slikovni plošči ustvarimo 2 latentni sliki. Vzorec postavimo na poljubno razdaljo od vpete slikovne plošče in zapustimo obsevalni prostor. Z zunanje strani ročno odmaknemo varovalo in obsevamo slikovno ploščo. Obsevanja so trajala 40 sekund. Nato slikovno ploščo znova v temnici iz Al kasete prenesemo v kartonasto (da jo zaščitimo pred svetlobo) in jo odnesemo do skenerja, kjer jo preberemo. Delati moramo hitro, saj so gama žarki znotraj obsevalnega prostora prisotni tudi ko je kanal zaprt z varovalom. Ti gama žarki nam latentno sliko seveda pokvarijo. Po končanem obsevanju pa je treba ravno

tako pohiteti, saj latentna slika razpada s časom, bodisi zaradi svetlobe ali temperature.

### 3.2 Termalna kolona

Svojo diplomsko nalogo sem pretežno opravljal na termalni koloni reaktorja, kjer je bilo urejeno mesto za slikanje. Nevtronski tok na izhodu iz ustja kolimatorja je seveda nevaren. Iz tega razloga poteka obsevanje predmetov v zavarovanem prostoru. Prostor je primarno zavarovan z 30 cm debelimi kockami iz boriranega parafina, ki služi za moderacijo in absorbcijo nevtronov. Sekundarna zaščita je težki beton, ki z debelino od 30 cm do 90 cm ponekod obdaja prostor z zunanje strani. Ko poteka obsevanje, je zadrževanje znotraj tega prostora prepovedano. Na to nas opozarja alarmni sistem, ki je povezan z infrardečim detektorjem. Da je pa možno zadrževanje znotraj prostora poskrbi premična loputa, ki je tik na ustju kolimatorja in je narejena iz absorberjev tako nevtronov kot tudi gama žarkov. Loputo odpiramo in zapiramo ročno z zunanje strani zavarovanega prostora, kar je še en ukrep, da se slučajno ob obsevanju ne bi nahajali v nevtronskem in gama polju.

Pri verižni reakciji nastanejo nevtroni z energijo reda velikosti MeV. Da bi dosegli želeno energijo nevtronov, v mojem primeru termične nevtrone, moramo te upočasniti z moderatorjem. Kot moderator se uporabljajo atomska jedra, ki imajo velik presek za sipanje in majhen absorpcijski presek. Na tak način zmanjšamo prepotovano pot nevtrona preden izgubi dovolj energije in preprečimo izginotje nevtronov. Kot moderatorji se uporabljajo vodik, devterij (težka voda) in grafit. Na lažjih jedrih pride do elastičnega sipanja, na grafitu pa do neelastičnega sipanja [9]. Smotrno je izbrati lažje elemente saj je iz enačbe:

$$\frac{E_2}{E_1} = \left[ \frac{A-1}{A+1} \right]^2 \quad (6)$$

kjer sta  $E_1$  in  $E_2$  energiji nevtronov pred in po trku razvidno, da je izguba energije na lažjih jedrih večja. Za slikanje z nevtronsko radiografijo se na TRIGI Mark II nevtroni moderirajo v cirkonijevem hidridu, ki je primešan v gorivo, v vodi, ki obdaja gorilne elemente in v grafitu, ki je v termalni koloni in reflektorju sredice. Ko nevtron prepotuje pot iz sredine reaktorja do izhoda kolimatorja, izgubi ravno dovolj energije, da je v termičnem ravnovesju z okolico (s privzeto temperaturo 293,6 K),

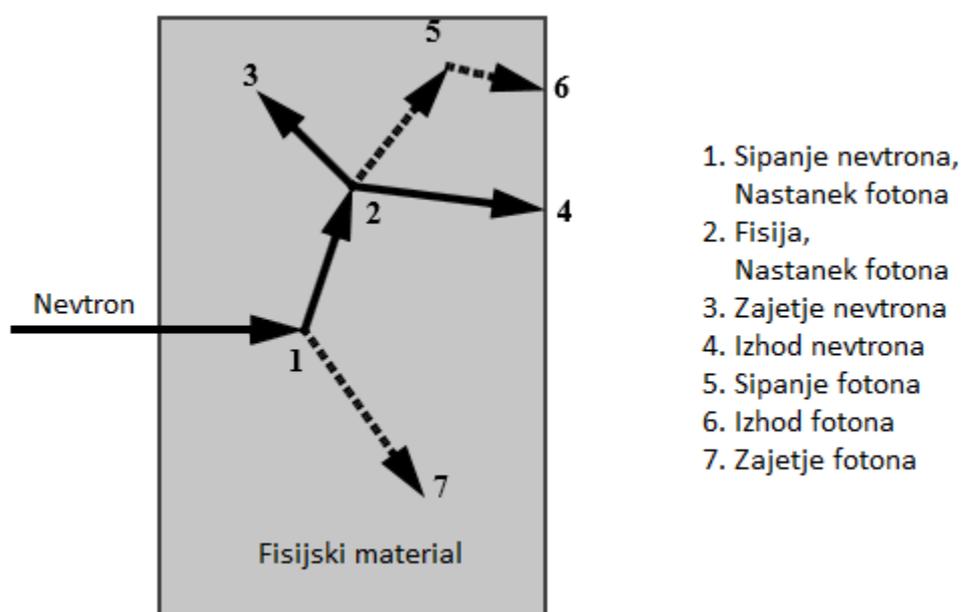
kar pomeni da ima hitrost 2200 m/s in povprečno energijo 0,0253 eV. Dejansko imajo nevtroni nekoliko višjo temperaturo od moderatorja. Na izhodu kolimatorja tako dobimo spekter termičnih nevtronov s skoraj Maxwelllovo porazdelitvijo.

### **3.2.1 Kolimator**

Kolimator na reaktorju TRIGA Mark II je dolg 156 cm. Narejen je iz kadmijeve pločevine in je vstavljen radialno glede na sredico reaktorja. Radialna lega je smotrna, saj nam ponudi največji fluks nevtronov in tako zmanjša obsevalni čas. Na slikovni plošči, ki je od izhodnega ustja kolimatorja oddaljena 126,3 cm, kolimator ustvari sliko, ki ima premer 12 cm. Premer, ki ga ponuja kolimator na TRIGA Mark II s takšno oddaljenostjo od ustja je bil zame zadovoljiv. Lahko bi bil še nekoliko širši, kolikor bi dopuščal prostor, če bi obsevalno mesto pomaknili še nekoliko stran od ustja in bi s tem pridobili še na geometrijski natančnosti, vendar pa bi bili naši obsevalni časi daljši, saj fluks nevtronov pada s kvadratom oddaljenosti. Poleg te geometrijske postavitve na kvaliteto slike vplivajo tudi gama žarki, na katere so naše slikovne plošče občutljive, saj nastajajo v Cd oblogi kolimatorja z  $(n,\gamma)$  reakcijami. Gama žarki pa seveda izvirajo tudi iz sredice reaktorja ob fisiji.

## 4 MCNP

Monte Carlo N-Particle je simulacijski program, ki zmore obdelati življenjske poti bodisi nevtronov, elektronov ali fotonov. Poda lahko lastne vrednosti za kritične sisteme. Monte Carlo ime se je uveljavilo pri takem postopku reševanja problemov, ker program dejansko naključno izžreba številko za naslednji dogodek, kar lahko primerjamo z dogajanjem v casinojih ob metanju kock. Program vsakemu delcu sledi od njegovega rojstva do smrti (absorpcija, pobeg iz sistema,...) in se na njegovi poti slučajno odloča, kaj se bo z njim zgodilo ob naslednji interakciji. Programska koda simulira dejansko geometrijo.



**Slika 4:** Slikovni demonstracija delovanja programa MCNP5 [14]

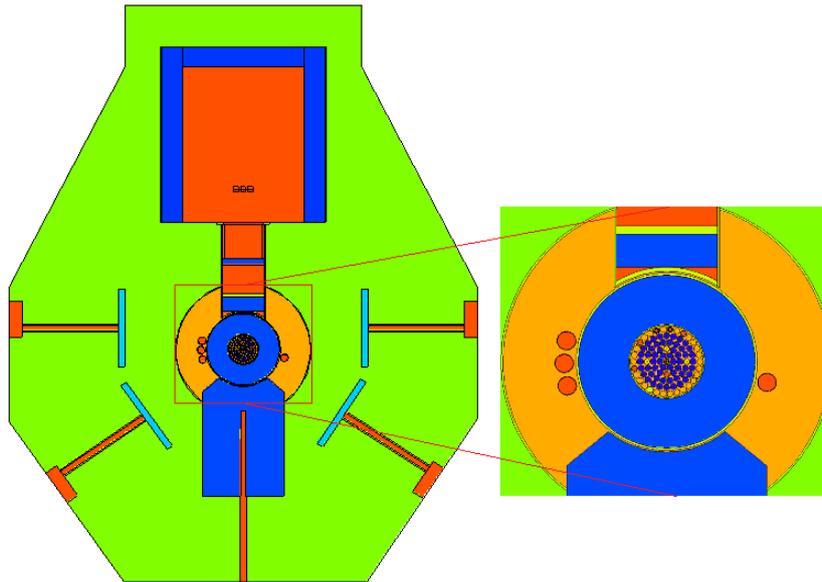
Program deluje po principu LIFO (Last In First Out), kajti ne more slediti vsem novonastalim delcev v realnem času, zato jih shrani za kasnejše sledenje. Zadnji delec, ki je bil shranjen, je prvi na vrsti za sledenje do njegove smrti. Na zgornji sliki je po številkah označeno, kaj se lahko zgodi na poti enega nevtrona in kako to program časovno obdela [14].

V moji diplomski nalogi sem uporabil geometrijo reaktorja, ki je bila že sestavljena, vendar sem moral kolimator malo dodelati, da bi bili rezultati natančnejši. Geometrija, ki jo podamo MCNP-ju, je lahko sestavljena iz prve in druge stopnje površin in

četrte stopnje torusov. Programu podamo oddaljenost ploskev od izhodišča ter jih omejimo z ostalimi ploskvami, da dobimo površine, s katerimi lahko opišemo volumne. Volumen moramo napolniti z materialom, za katerega lahko določimo izotopsko sestavo, njegovo gostoto in s pomočjo knjižnic presek za reakcije. Ko natančno opišemo naše okolje z geometrijo in materialno sestavo lahko definiramo tudi meje za energijo delcev [14]. V mojem primeru sem obravnaval termične nevtrone z energijami 2eV–20eV, saj ti prevladujejo v termalni koloni. Da bi prišli do želenih rezultatov, moramo podati programu ukaze preko tako imenovanih tally-ev, tj. kaj naj nam program poda kot rešitev problema. V mojem primeru sem zahteval, da mi pove, kolikšno število termičnih nevtronov zazna na slikovni plošči in koliko od teh je bilo sipanih na elementih pred slikovno ploščo.

## 5 Eksperimentalni del

Diplomsko nalogo sem koncipiral tako, da bi poskušal čim bolj izboljšati slikanje na reaktorju TRIGA Mark II v Podgorici in ugotoviti, kje so njegove meje, ko gre za slikanje vode. Sprva sem poskusil določiti mejo, kolikšna je minimalna količina vode, ki jo je na slikah še moč zaznati. Poskus ni popolnoma uspel, saj zaradi površinske napetosti ni bilo moč napolniti vode v ozek vzorec po celotnem volumnu in je ponekod ostal zrak znotraj vzorca. Kljub temu sem pokazal, da so tudi majhne količine vode dovolj dobro vidne. S postavljanjem materiala pred vzorec sem poskušal določiti, kolikšna je meja debeline svinca pred vzorcem, skozi katero se še da slikati. Zanimalo me je tudi, kako bi lahko izboljšal kvaliteto slike. Poizkusil sem določiti vpliv sipanih nevtronov na popačenje slike. Za vsako sliko (razen za določanje količine vode) sem vrednosti tudi izračunal s simulacijo v programu MCNP5. Simulacije v tem programu vzamejo ogromno časa. Najprej sem štirikrat po 2 tedna na 2 jedrih XEON procesorjev simuliral celoten model reaktorja TRIGA, da sem dobil energijsko porazdelitev nevtronov ter njihovo porazdelitev po kotih na ustju kolimatorja. V vsaki od štirih simulacij sem uporabil weight window funkcijo. Gre za funkcijo, ki nam vrednosti nevtronov ohranja znotraj naših meja in poda natančnejše rezultate na območjih, ki nas zanimajo. Nevtronom se ob prehodu skozi celice energija spreminja. Če je energija nevtrona nad mejo, ga funkcija razbije na več nevtronov tako, da vsak novonastali nevtron pristane znotraj okvirja vrednosti. Funkcija nevtronu z manjšo energijo od mejne energije doda energijo po sistemu ruske rulete ali pa ga na tak način ubije [14]. Po končani simulaciji je funkcija weight window podala vrednosti, katere sem vnesel v naslednjo simulacijo in s tem še bolj definiriral energijski okvir v naslednji simulaciji. Po četrti simulaciji so bili izračunani rezultati (na ustju kolimatorja) z zanemarljivo relativno napako. Po analizi rezultatov mi ni bilo treba več simulirati celotnega modela reaktorja, ampak sem kar poustvaril vir na izhodu iz kolimatorja in nadaljnje simulacije so tekle od tod naprej, za kar so potrebovale vsaka le dva dneva za izračun. Ta vir je imel  $2^\circ$  divergenco in samo termalne nevtrone, kajti ostalih je bilo za nekaj redov manj. Slikovne plošče pa so najbolj občutljive na termalne nevtrone (gadolinij). Slika 5 prikazuje geometrijo reaktorja TRIGA Mark II, in sicer kako zgleda v programu MCNP5.



**Slika 5:** Slikovni prikaz geometrije reaktorja v MCNP5

### 5.1 Razlika med termalno kolono in tangencialnim kanalom

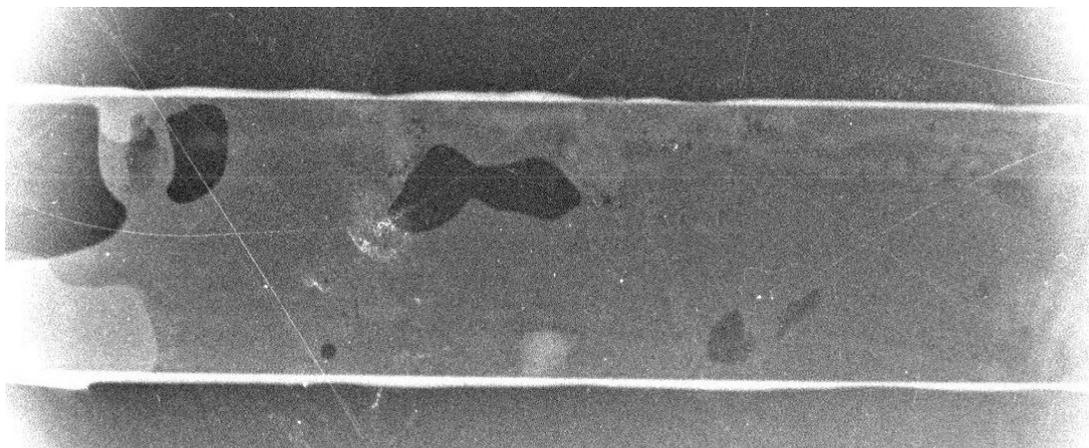
Kot sem zgoraj omenil, sem moral izvesti nekaj dolgih izračunov, ki so imeli 5050 ciklov s 750000 sledenim nevtronom. Medtem, ko sem preučeval nevtronski fluks na ustju kolimatorja, sem istočasno izračunal in primerjal, kakšen fluks dobimo na izhodu termalne kolone in kakšnega na izhodu tangencialnega kanala na reaktorju TRI-GA MARK II. Rezultati so pokazali, da je število nevtronov na izhodu iz kolimatorja termalne kolone za 3,37 krat večje od števila nevtronov na izhodu iz aluminijastega ohišja pri tangencialnem kanalu. Ob upoštevanju velikosti presekov ugotovimo, da je fluks na površino v termalni koloni kar 12,67 krat večji od tistega v tangencialni koloni, saj je presek tangencialnega kanala 3,76 krat večji. Velika prednost obsevanja z uporabo nevtronov iz tangencialnega kanala bi bila v tem, da ni gama žarkov iz sredice reaktorja, ki nam pri radialnem kanalu popačijo sliko.

### 5.2 Slikanje

Na slikah, ki jih s skenerjem preberemo iz slikovnih plošč, nam temnejše površine predstavljajo več zajetih nevtronov, svetlejše pa manj zajetih nevtronov. Slikovne plošče so postavljene na razdalji 126,3 cm od ustja kolimatorja, saj je tam postavljeno stojalo za slikovno ploščo, s pomočjo katerega je moč na eni slikovni plošči pridobiti dve sliki. Stojalo bi sicer lahko premaknili, a premer slike ne bi bil več 12 cm.

Fluks termičnih nevtronov iz kolimatorja je  $4,5 \times 10^5$  [ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]. Slikovne plošče sem izpostavil fluksu za 40 s, saj sem s predhodnim slikanjem in pogovorom s tehniki zaključil, da je ta čas najprimernejši.

Na sliki 6 je prikazan vodni klin iz aluminija, napolnjen z vodo, ki se iz širine 2 mm zoži na širino 0 mm. Aluminijevo ohišje je pritrjeno skupaj s silikonom, zato je tudi ta viden na sliki. Vodo sem moral vbrizgati v klin z medicinsko iglo (površinska napetost). Celotnega volumna klina mi ni uspelo napolniti z vodo (zlasti, kjer se klin stisne) zaradi površinske napetosti in je ponekod prisoten zrak, kar je vidno na sliki kot temnejše površine.



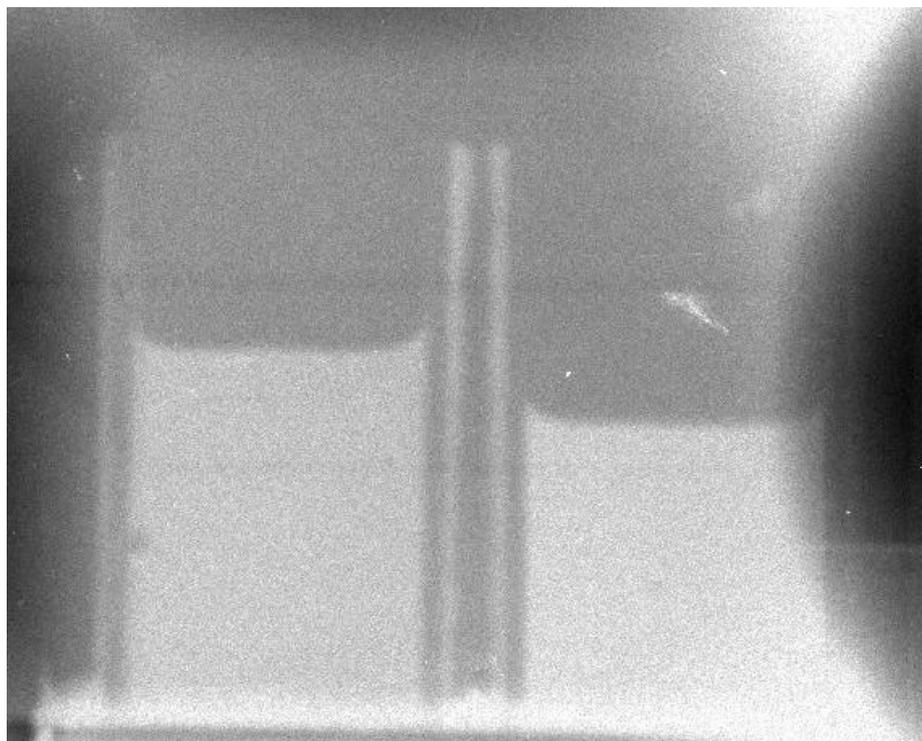
**Slika 6:** Nevtronografska slika ožajočega se vodnega klina napolnjenega z vodo

Na zgornji sliki je vidno, da se da zaznati tudi minimalne količine vode (oz. kakršnega koli drugega sipalca, ki ima sipalne vrednosti podobne vodi), saj imajo slikovne plošče visoko občutljivost in široko dinamično območje.

Na naslednjih slikah je prikazano, skozi katero debelino materiala pred našim vzorcem nevtroni še prodrejo do našega vzorca. Kot vzorec sem znova uporabil vodo v aluminijastem okvirju, le da je bila tokrat širina, skozi katero so prehajali nevtroni, konstantna po vsej dolžini, in sicer 2 mm in 4 mm. Kosi materiala, ki sem jih dodajal pred vzorec, so bile svinčene plošče debeline 5 cm. Na vsaki naslednji sliki sem dodal po eno ploščo, dokler nisem prišel do debeline 25 cm. Nadaljevati ni bilo več smiselno, saj vzorec že za 25 cm debelo svinčeno oviro ni bil več viden. Na spodnjih slikah in grafih bo vidno, da se da zaznati že zelo majhne količine vode.



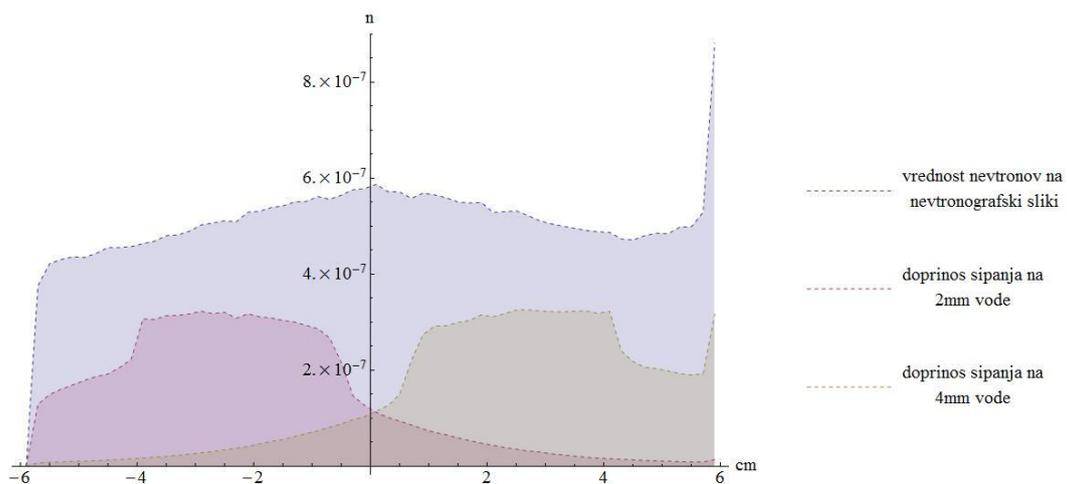
Na sliki 7 je videti, da slikanje skozi 5 cm svinca slike še ne zamegli.



**Slika 7:** Nevtronografska slika vzorca napolnjenega z vodo slikana skozi 5 cm svinca

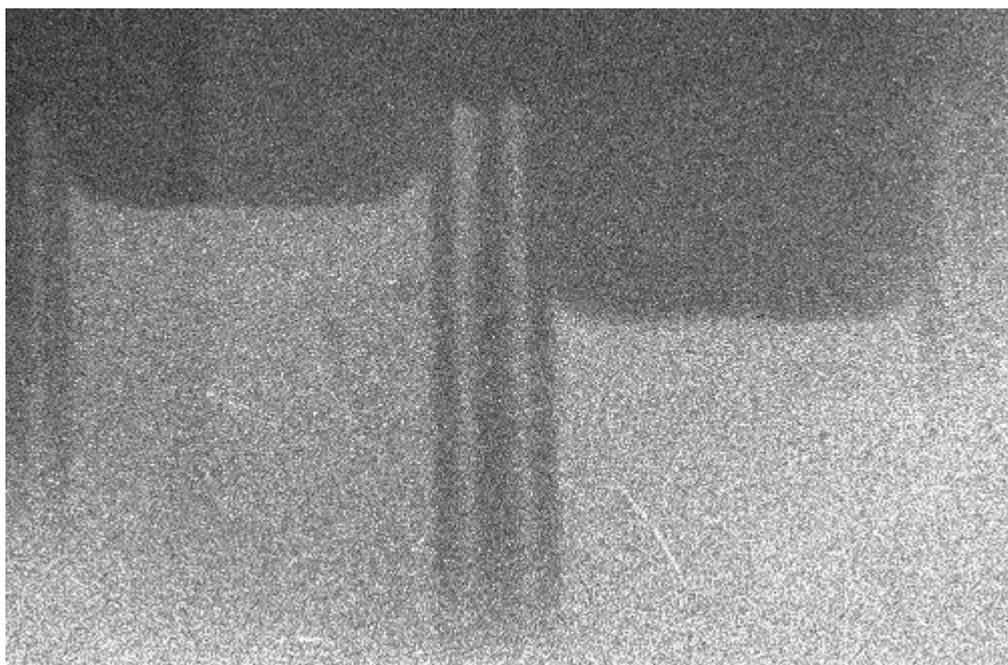
Pri simulaciji v programu MCNP5 sem 12 cm sliko, ki nastane na slikovni plošči, razdelil na 60 segmentov tako, da mi je simulacija podala povprečno vrednost  $\text{MeV}/\text{cm}^2$  na površini tega 2 mm širokega segmenta, kar sem predstavil kot eno točko na grafu na sredini segmenta. Točke sem v programu Mathematica 8 izrisal in jih povezal s črto, da dobimo neko obliko grafa, nam pa padanje in vzpenjanje črte ne pomeni dejansko linearno večje ali nižje število nevtronov, ampak črte le zgolj povezujejo točke. Graf je izrisan le za eno dimenzijo, in sicer v x smeri (slika po širini). Po višini je vrednost konstantna, če seveda odmislimo napake na slikovnih ploščah.

Na spodnjem grafu (slika 8) je s pomočjo programa Mathematica 8 izrisan graf, ki prikazuje vrednosti na zgornji sliki, ko je slikan vzorec skozi 5 cm svinca. Graf je razdeljen na 3 dele, in sicer levi in desni del vzorca posebej, ter skupna vrednost nevtronov.

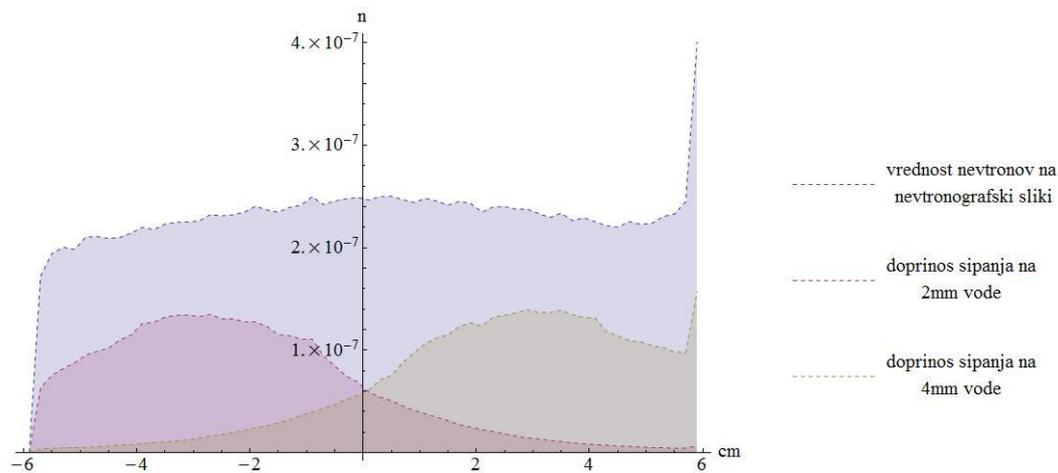


**Slika 8:** Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči ob slikanju skozi 5 cm svinca

Na spodnji sliki in grafu (slika 9 in 10) je prikazano kašna je videti slika in kakšne so vrednosti pri slikanju skozi 10 cm svinca.

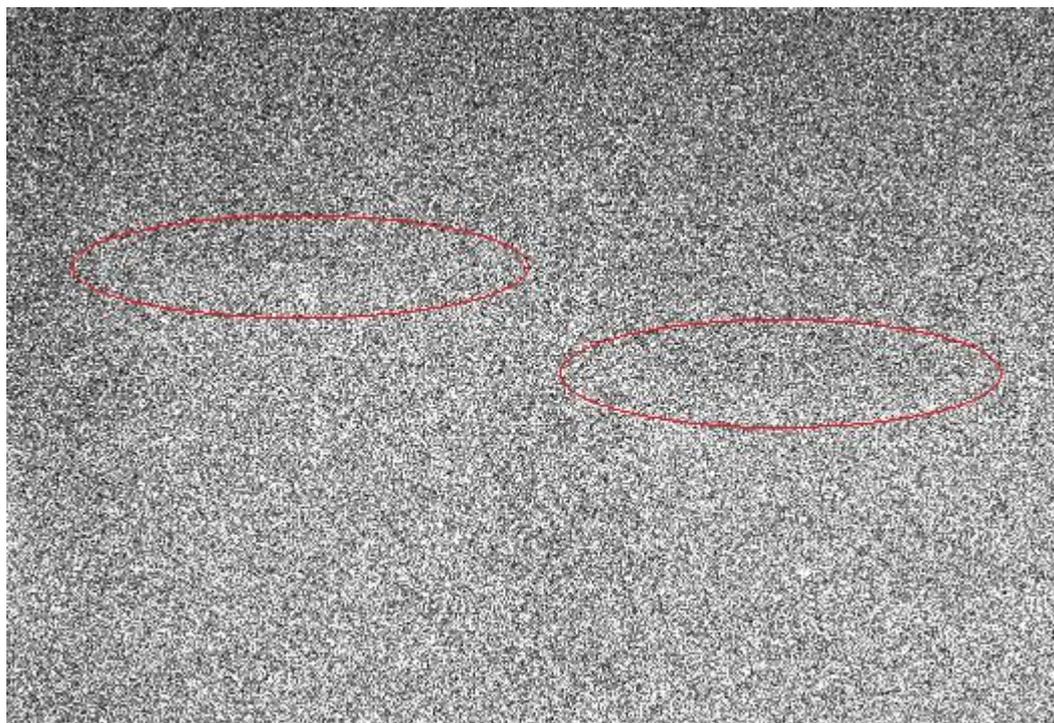


**Slika 9:** Nevtronografska slika vzorca napolnjenega z vodo slikana skozi 10 cm svinca

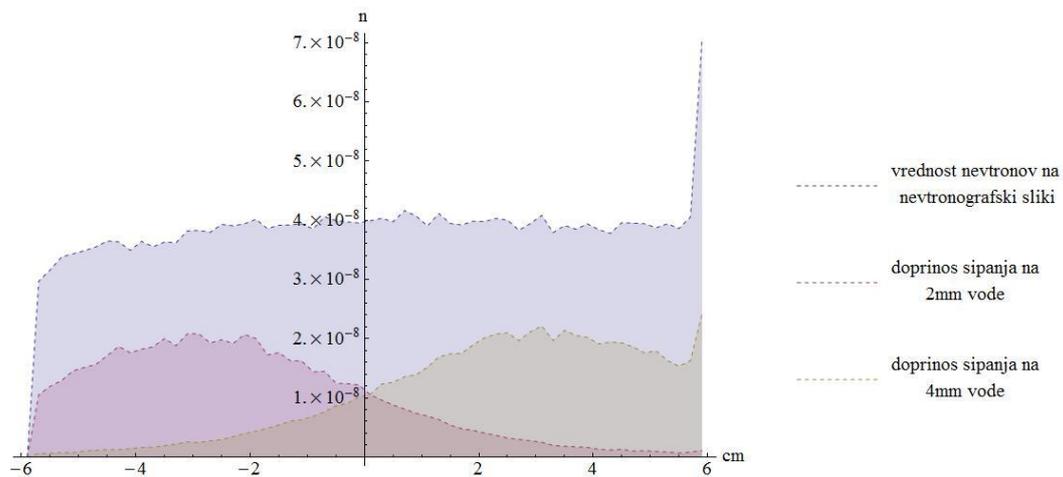


**Slika 10:** Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči ob slikanju skozi 10 cm svinca

Vzorec še vedno lepo vidimo, 10 cm svinca še vedno ni prehuda ovira. Sliki 11 in 12 predstavljata mejo slikanja skozi svinec. Na sliki je vzorec za 20 cm plastjo svinca. Vidimo ga le z dobrim očesom, še boljše pa seveda z digitalno filtracijo slike.

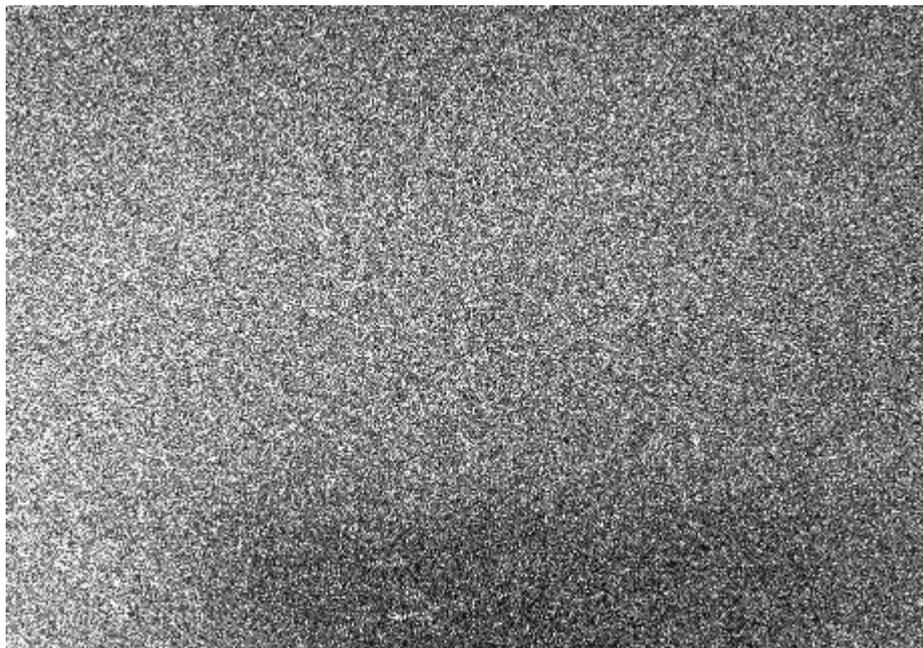


**Slika 11:** Nevtronografska slika vzorca napolnjenega z vodo slikana skozi 20 cm svinca

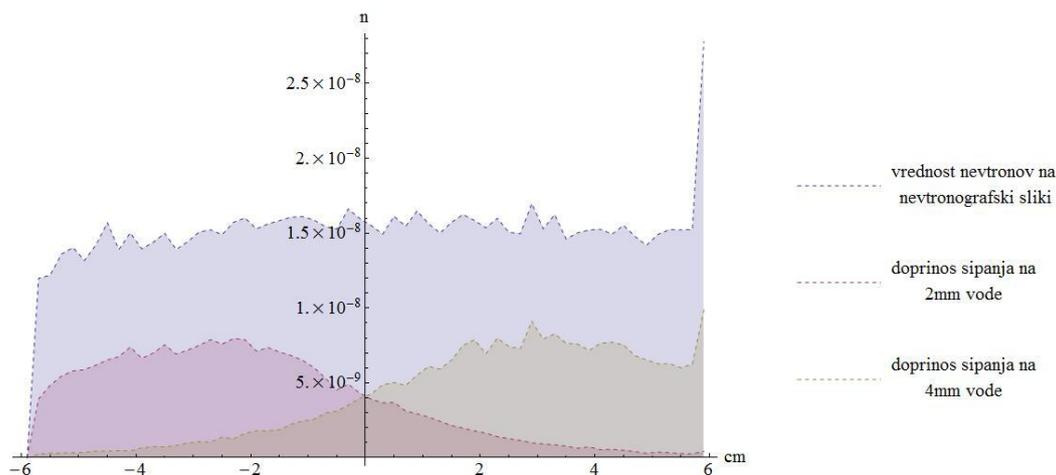


**Slika 12:** Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči ob slikanju skozi 20 cm svinca

Za konec pokažem še (slika 13), da se pri 25 cm svinca koristni signal povsem izgubi v šumu: slika vzorca ni več prepoznavna, vrednosti pa s programom MCNP5 še vedno lahko poračunamo (slika 14).



**Slika 13:** Nevtronografska slika vzorca napolnjenega z vodo slikana skozi 25 cm svinca



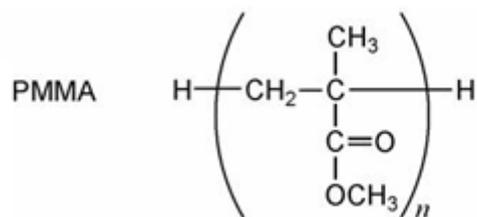
**Slika 14:** Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči ob slikanju skozi 25 cm svinca

Na zgornjih slikah je že vidno sipanje na vodi. Sipani nevtroni nam popačijo sliko, saj se sipljejo v vse strani. Vidimo, da se nevtroni iz ene strani našega vzorca sipljejo na stran, kjer bi morala nastati slika druge strani elementa. Pri zahtevnejših geometrijah našega vzorce nam bodo sipani nevtroni sliko torej popačili.

Ko sem določil mejo skozi katero se da še slikati skozi svinec sem se odločil, da poskusim še nekako zmanjšati popačitve, ki jih dodajo sipani nevtroni na slikovnih ploščah.

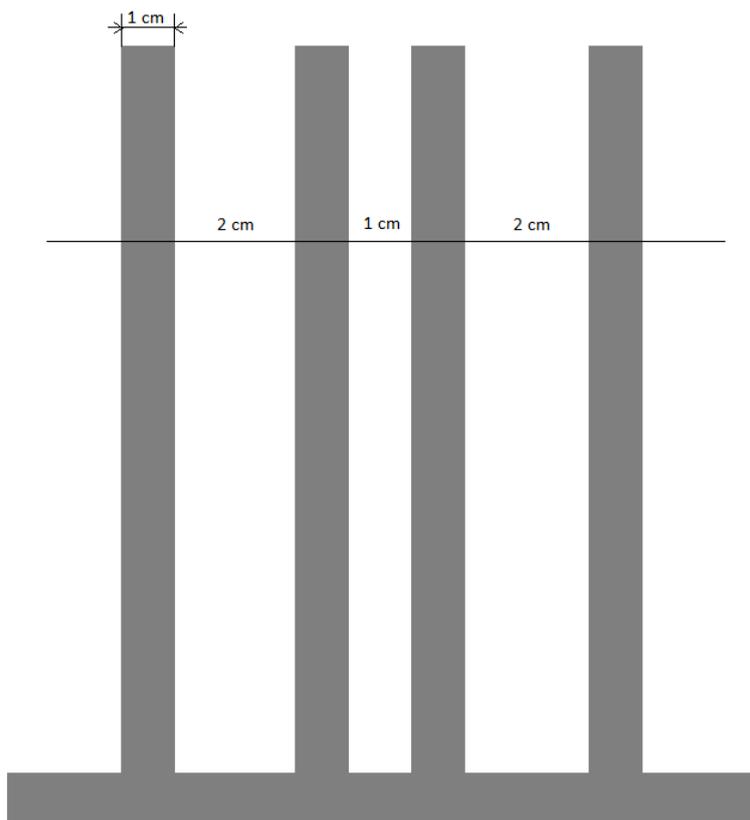
V ta namen sem izdelal dva fantoma, s katerima sem skušal izračunati sipanje. Fantoma sta bila v mojem primeru predmeta s štirimi 20 cm dolgimi navpičnimi palicami. V širino so palice merile 1 cm v globino pa 2,5 cm. Geometrija in postavev fantoma, kakor so ga videli nevtroni je prikazana na sliki 16. Fantoma sta iz železa (Fe), ter akrilnega stekla (PMMA-Poly(methyl methacrylate)). Slednji je odličen sipalec nevtronov. Fantoma sem slikal na različnih oddaljenostih od slikovnih plošč. Slikovna plošča je bila fiksno postavljena na 126,3 cm od ustja kolimatorja, fantoma pa sem premikal proč od plošče, se pravi bližje ustju. Te razdalje med fantomoma in slikovno ploščo so bile 0 cm, 7 cm, 14 cm ter 28 cm. Za vsako sliko, ki sem jo poslikal sem tudi poračunal vrednosti z programom MCNP5 in prišel do zanimive rešitve, ki pa ni izvedljiva, saj nas omejujejo prostor in sredstva. Oddaljenost vzorca od slikovnih plošč je bila naključno izbrana. Stojalo, kamor je vpeta slikovna plošča, je projektirano tako, da je postavitev na te razdalje omogočalo lepo lego vzorca.

PMMA material je sestavljen iz treh elementov, ki zelo sipajo nevtrone in skoraj nič jih absorbirajo. Dominantno vlogo sipalca ima vodik, a sta prisotna še ogljik in kisik, ki imata ravno tako dokaj visok sipalni presek. Na sliki 15 je kemijska sestava PMMA (gre za polimer, zapisana molekula se periodično nadaljuje).



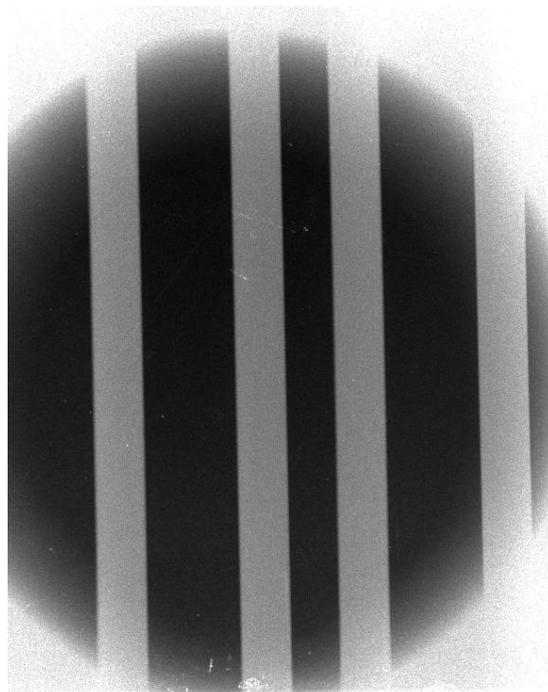
**Slika 15:** Kemijska sestava PMMA [17]

Na sliki 16 je predstavljena geometrija železnega in PMMA fantoma.



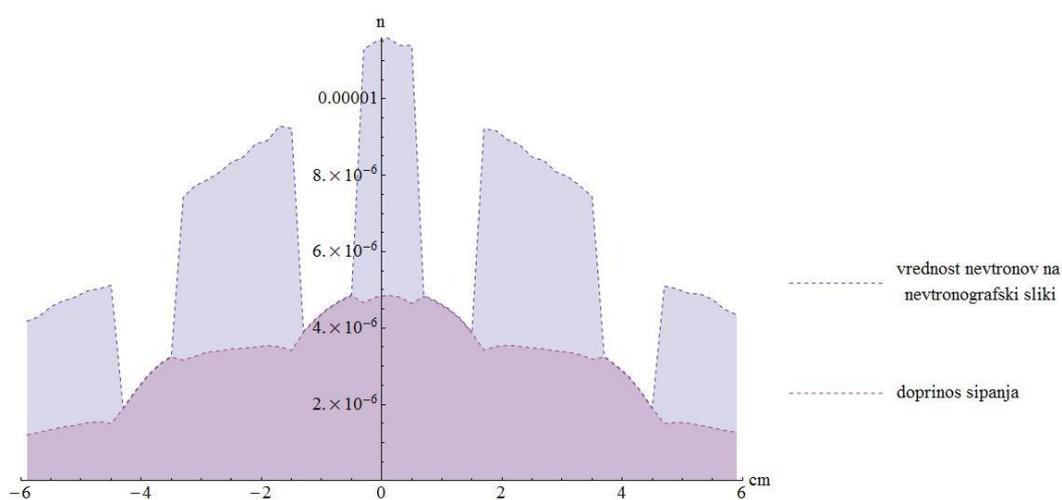
**Slika 16:** Slikovni prikaz geometrije fantoma

Kot prva v seriji slik zadnjega dela eksperimenta je slika, na kateri je Fe fantom tik ob slikovni plošči. Na sliki 17 je lepo videti čiste in ravne linije železa, kar se bo pa z nadaljnjiimi slikami spremenilo.



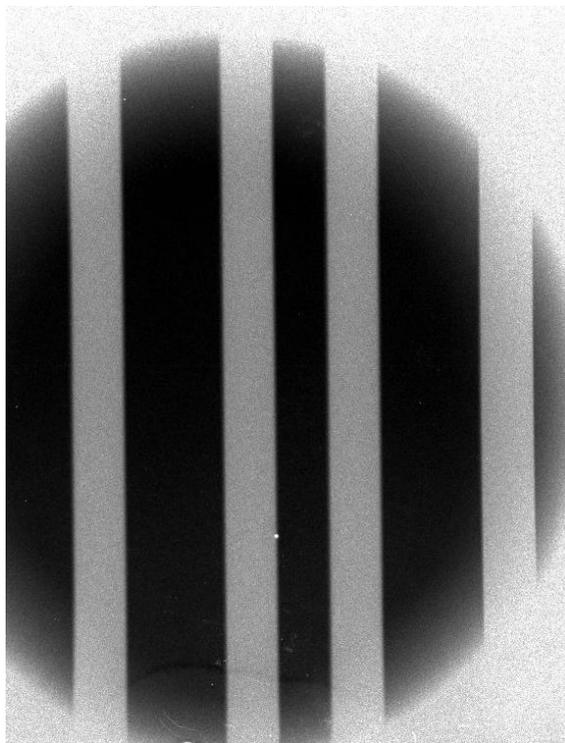
**Slika 17:** Nevtronografska slika železnega fantoma na oddaljenosti 0 cm od slikovne plošče

Na sliki 18 predstavljam izračunane vrednosti sipanih nevtronov. Vrednosti so dobljene z Monte Carlo simulacijo s programom MCNP5.

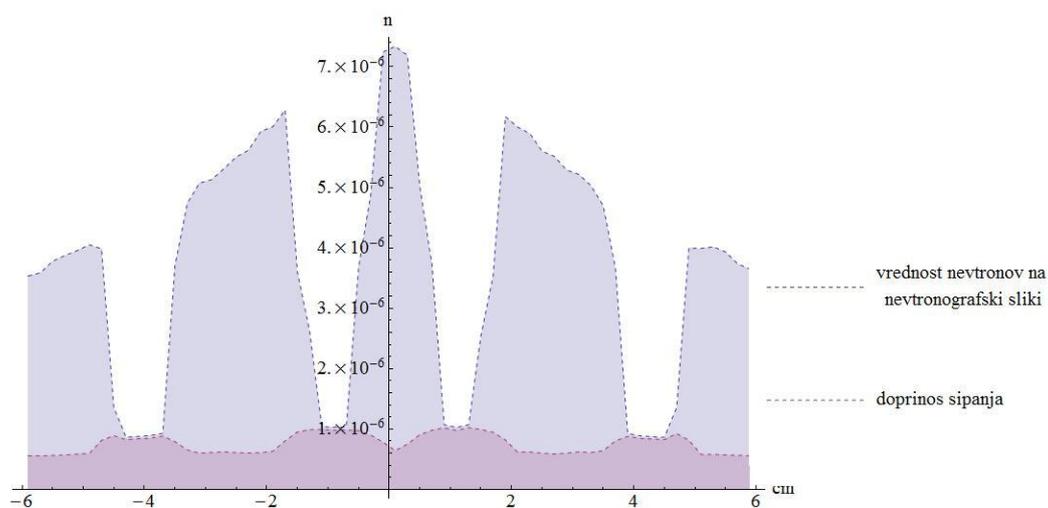


**Slika 18** Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za Fe fantom postavljen tik ob slikovni plošči

Sledita sliki 19 in 20, oddaljenost Fe fantoma od slikovne plošče je 7 cm. Na sliki je že moč videti zoženje posameznih palic fantoma, prej ostri robovi fantoma so zaradi sipanja nevtronov že razmazani.



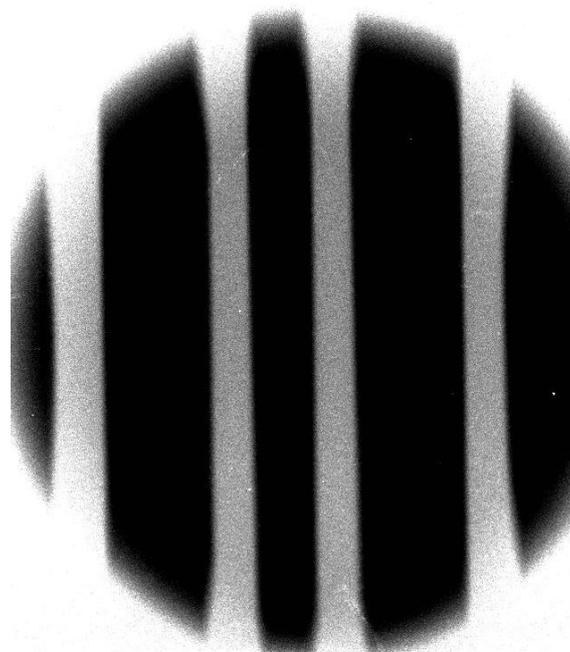
**Slika 19:** Nevtronografska slika Fe fantoma na oddaljenosti 7 cm od slikovne plošče



**Slika 20:** Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za Fe fantom na razdalji 7 cm od slikovne plošče

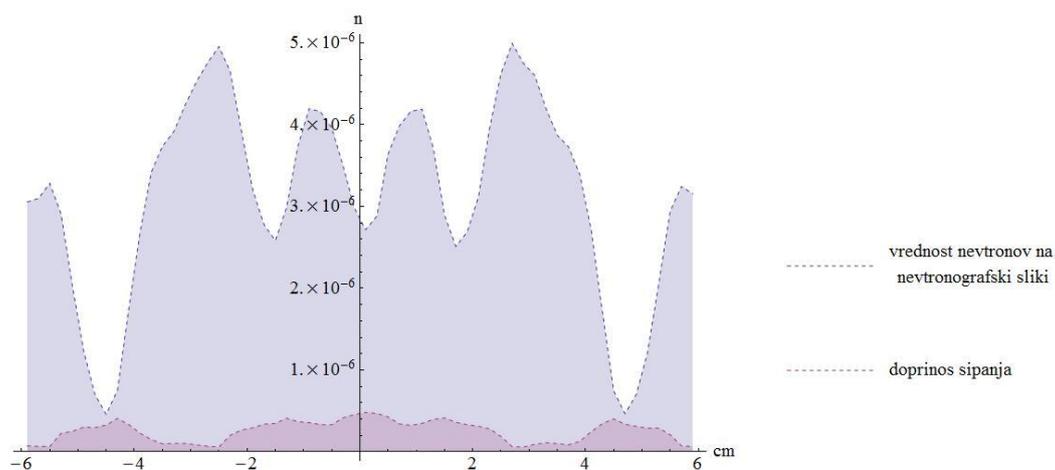


Sliki 21 in 22 za Fe fantom ustrezata oddaljenosti 28cm od slikovne plošče. Vidimo kako geometrijska neostrina popači sliko mnogo bolj kot sipani nevtroni, saj zaradi slabo kolimiranega curka nekateri nevtroni zaobidejo palice fantoma.



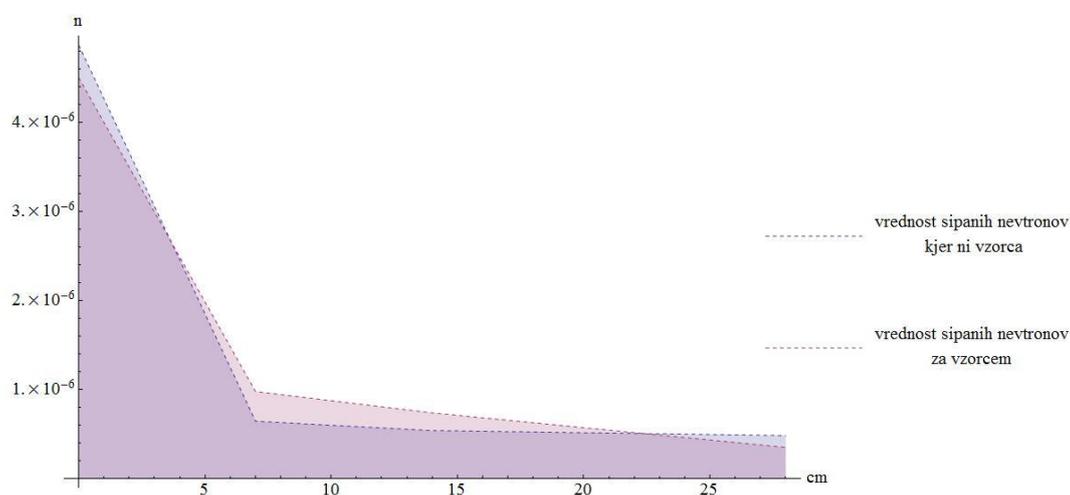
**Slika 21:** Nevtronografska slika Fe fantoma na oddaljenosti 28 cm od slikovne plošče

Na sliki 22 je moč videti, da se vrednost sipanih nevtronov zmanjša. Vendar pa je slika zaradi geometrijske neostrine mnogo slabša, kot bi bila samo zaradi sipanih nevtronov.



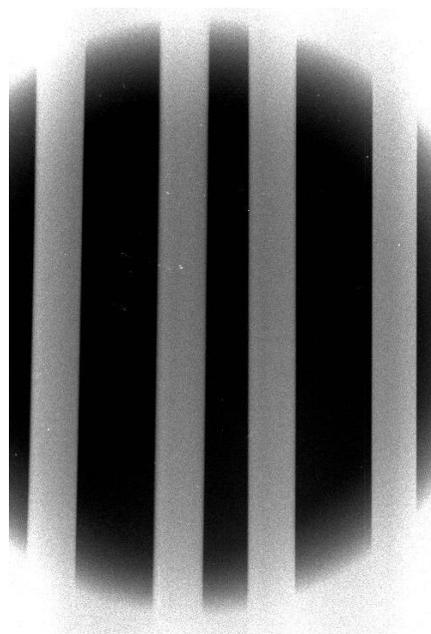
**Slika 22:** Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za Fe fantom na razdalji 28 cm od slikovne plošče

Slika 23 nam prikaže odvisnost vrednost sipanih nevtronov od razdalje vzorca od slikovne plošče. Na grafu je lepo vidno, da se nevtroni na sipalcu sipljejo poljubno ter da se z razdaljo njihova vrednost zmanjšuje.



**Slika 23:** Graf odvisnosti sipanih nevtronov na Fe fantomu od razdalje med fantomom in slikovno ploščo

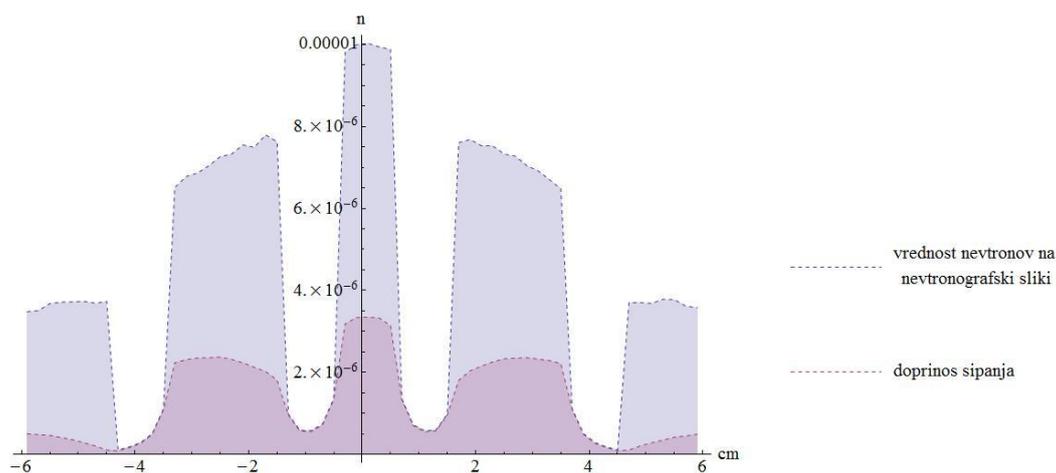
Sledijo rezultati eksperimentov za PMMA. Ta je zaradi vsebnosti H, C in O seveda boljši sipalec kot Fe. Na sliki 24 je prikazan rezultat meritve, ko je slikovna plošča tik ob fantomu (razdalja 0 cm).



**Slika 24:** Nevtronografska slika PMMA fantoma na oddaljenosti 0 cm od slikovne plošče

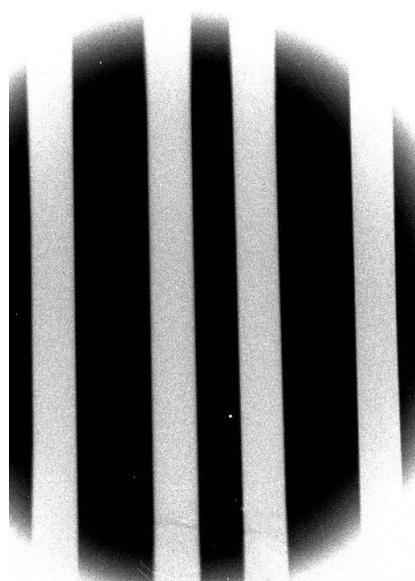
Na sliki 24 in 25 je lepo vidno, da drugačen material (PMMA) pri razdalji 0 cm v sliko ne vnese opaznih razlik (primerjava s sliko 17).

Na sliki 25 je prikazana izračunana vrednost sipanih nevtronov s simulacijo v programu MCNP5 za PMMA fantom na oddaljenosti 0 cm od slikovne plošče. Tu pa so v primerjavi s sliko 18 (material Fe) opazne znatne razlike.



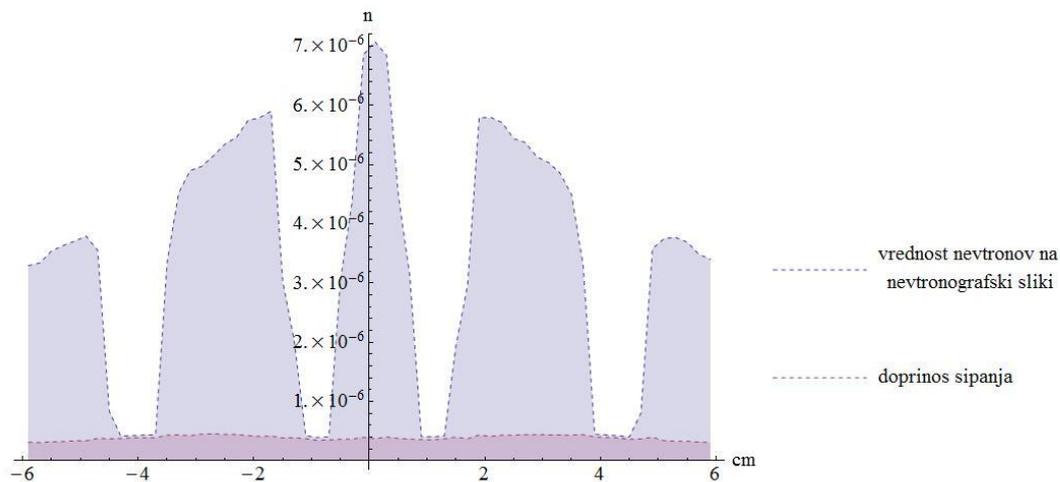
**Slika 25:** Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za PMMA fantom postavljen tik ob slikovni plošči

Na sliki 26 in sliki 27 je prikazan rezultat na razdalji 7 cm med fantomom in slikovno ploščo. Slika 26 ostaja še vedno podobna sliki 19 (sedem centimetrov odmika med Fe fantomom in slikovno ploščo).



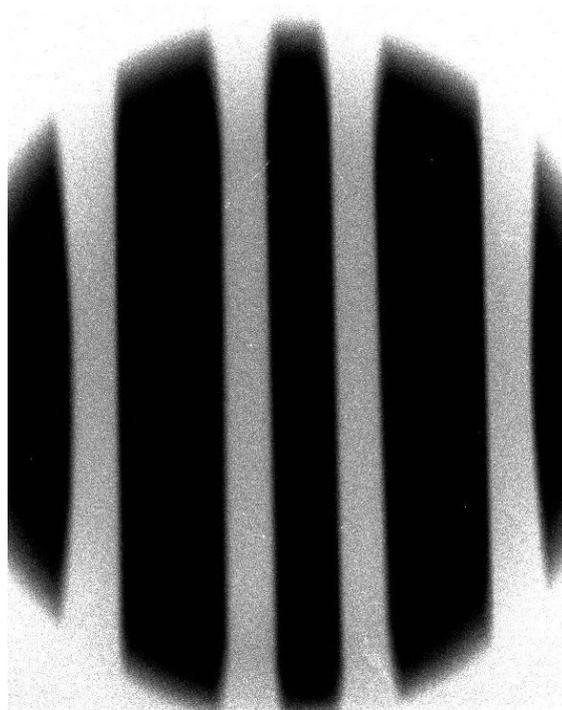
**Slika 26:** Nevtronografska slika PMMA fantoma na oddaljenosti 7 cm od slikovne plošče

Slika 27 prikazuje rezultate Monte Carlo simulacije za PMMA fantom in 7 cm razdalje. Znova vidimo občutno razliko, če rezultate primerjamo z rezultati za Fe fantom na 7 cm razdalje (slika 20).



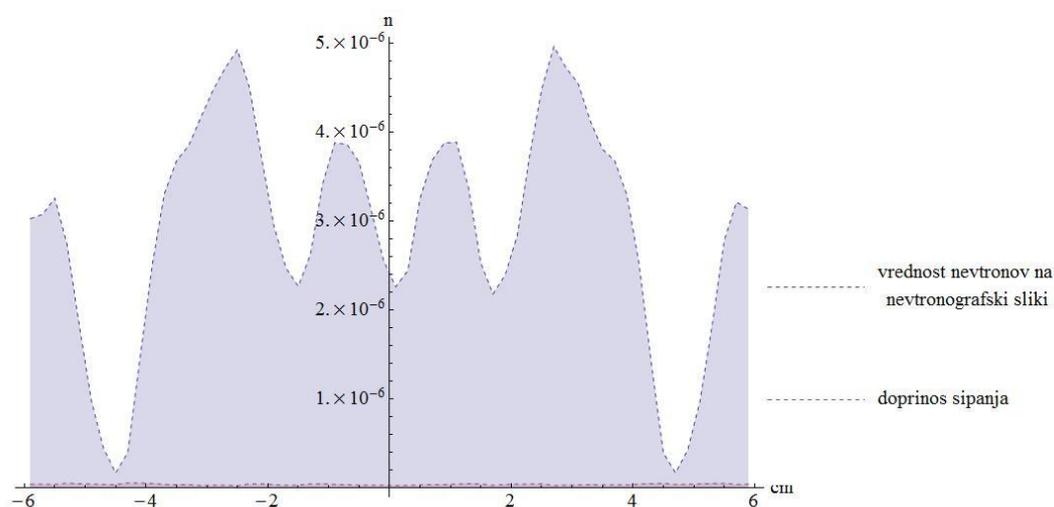
**Slika 27:** Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za PMMA fantom na razdalji 7 cm od slikovne plošče

Oglejmo si še sliko 28, kjer je razdalja med PMMA fantomom in slikovno ploščo 28 cm. Lepo je vidna razlika (primerjava s sliko 24), ki nastane zaradi divergence.



**Slika 28:** Nevtronografska slika PMMA fantoma na oddaljenosti 28 cm od slikovne plošče

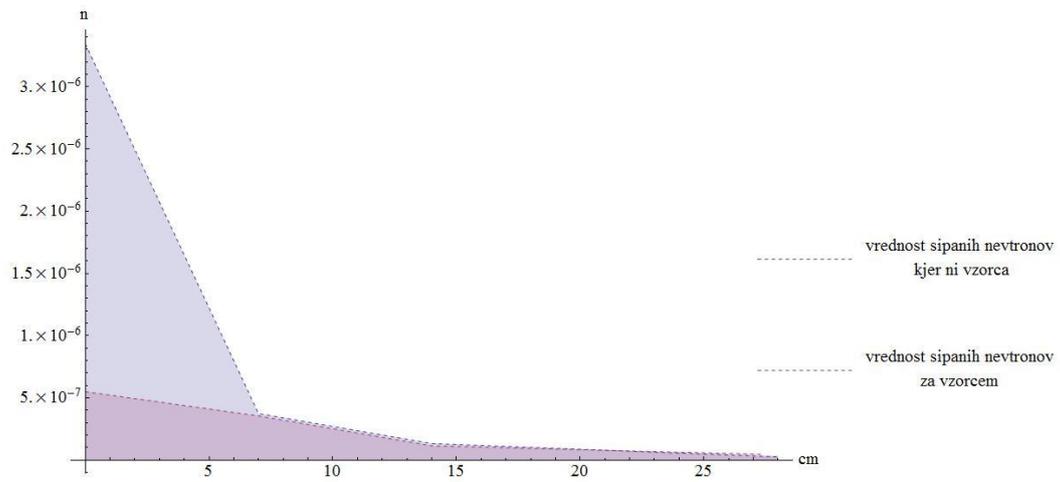
Na sliki 29 je s simulacijo je v programu MCNP5 prikazan izračun vrednosti sipanih nevtronov. Tukaj se pa najverjetneje že nakazuje rešitev problema.



**Slika 29:** Izračunane vrednosti nevtronov na slikovni plošči za PMMA fantom na razdalji 28 cm od slikovne plošče

Kot je vidno na sliki 29 (morda že na sliki 27) preide doprinos sipanih nevtronov v neko konstantno vrednost, ki se razporedi po celi površini slike, ko povečujemo razdaljo med vzorcem in slikovno ploščo. Če bi nam geometrija prostora dopuščala, bi se lahko s povečevanjem razdalje med vzorcem in slikovno ploščo sipanih nevtronov znebili ali pa bi odšteli konstantno vrednost sipanih nevtronov, ki bi jo z Monte Carlo simulacijo izračunali, nato pa odšteli od slike. Vendar pa nam divergenca še veliko bolj popači sliko ob takšnem poskusu odštevanja sipanih nevtronov. Ena od rešitev bi bila popraviti izhodni kot nevtronov iz ustja kolimatorja s povečanjem  $L/D$  števila, nato pa odmakniti slikovno ploščo od vzorca (zmanjšanje števila sipanih nevtronov). Dokler se tega ne izvede, je naše vzorce bolje slikati čim bližje slikovni plošči.

Slika 30 nam lepo prikaže zmanjševanje vrednosti sipanih nevtronov s povečevanjem razdalje med vzorcem in slikovno ploščo. Vidno je, da PMMA sipa drugače nevtrone kot Fe. Vendar na koncu preide delež sipanih nevtronov pri obeh v neko konstanto vrednost, razpotegnjeno po vsej širini, če se z vzorcem dovolj oddaljimo od slikovne plošče.



**Slika 30:** Graf odvisnosti sipanih nevtronov na PMMA od razdalje med fantomom in slikovno ploščo

## 7 Zaključek

Poizkus nevtronske radiografije z vodnim klinom lepo prikaže, da je voda vidna na slikah s slikanjem s slikovnimi ploščami neodvisno od njene količine. To neodvisnost potrди drugi eksperiment (dva različna volumna vode). Drugi eksperiment nam da jasno vedeti, da je moč zaznati vodo tudi skozi debelejšo plasti materiala z visokim vrstnim številom, v mojem primeru je to svinec. Grafi, narisani z izračunanimi vrednostmi simulacije drugega eksperimenta, nas privedejo do obravnave sipanih nevtronov, ki razmažejo našo nevtronografsko sliko. Na grafih je lepo vidna distribucija sipanih nevtronov. Vidno je, da nevtroni, ki se sipljejo na levem delu vzorca, ne popačijo le leve strani slike, ampak preidejo deloma tudi na desno stran slike. Z desno stranjo vzorca je enako. V tretjem delu pa to sipanje želim opredeliti in ga zmanjšati ali celo izničiti. S slikanjem dveh fantomov iz različnega materiala pridem do različnih vrednosti sipanih nevtronov, a v končni fazi vidim, da s povečevanjem razdalje med slikovno ploščo in vzorcem zmanjšam vpliv sipanih nevtronov. Pojavi se pa nov problem, in sicer problem divergence. Zaradi majhnega  $L/D$  razmerja prične divergenca ob odmikanju vzorca od slikovnih plošč dominirati, zaradi nje so slike slabše kvalitete kot zaradi sipanih nevtronov, če so vzorci tik ob slikovni plošči.

Nalogo lahko zaključim z ugotovitvijo, da je nevtronska radiografija lahko zelo uporabna za analiziranje notranjosti predmetov, izdelanih iz materialov z visokim  $Z$ , saj nevtroni prodrejo zelo globoko v njih in je z njimi moč zaznati zelo majhne količine sipalcev nevtronov. To sem tudi potrdil s prvim in drugim eksperimentom. Na žalost je kvaliteta slik malo slabša zaradi slabe geometrije kolimatorja. To je vidno iz rezultatov drugega in tretjega eksperimenta in iz ustreznih Monte Carlo simulacij, a le če ne gre za zahtevne oblike vzorcev (gosto postavljeni drobni deli). Kvaliteta nevtronskih radiografskih slik je zelo sprejemljiva.

Metoda je torej uporabna tudi za potrebe industrije. Res pa je, da je uporabljena raziskovalna oprema zelo zahtevna in draga. Kot izvor nevtronov mi je služil radialni kanal reaktorja TRIGA Mark II, last Instituta "Jožef Stefan". Oprema za detekcijo nevtronografske slike so bile z gadolinijem dopirane slikovne plošče ter njihov čitalnik. Monte Carlo simulacije nevtronskega transporta sem izvedel s programskim paketom MCNP5 ter geometrijskim modelom reaktorja TRIGA, ki sem ga s področja radialnega kanala ustrezno dopolnil. Izjemno zahtevne Monte Carlo simulacije sem

opravi na zmogljivi računalniški gruči Oddelka za reaktorsko fiziko Instituta “Jožef Stefan”.



## 8 Literatura

- [1] Anthony J. Baratta, John R. Lamarsh (2001), Introduction to Nuclear Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, str. 7
- [2] Anthony J. Baratta, John R. Lamarsh (2001), Introduction to Nuclear Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, str. 52-53.
- [3] (Casali F., Chirco P., Zanarini M. (1995), Advanced Imaging Techniques: A New Deal for Neutron Physics, La Rivista del Nuovo Cimento 18 (10), str. 1-69
- [4] Eberhard H Lehmann, P. Vontobel, G. Frei, C. Brönnimann (2004), Neutron imaging-detector options and practical results, Nuclear Instruments and Methods in Physic Research A 531 (2004) 228-237
- [5] Hawkesworth M.R. (1977), Neutron Radiography: Equipment and Methods, Atomic Energy Rev. 15 (2), str. 169-220
- [6] von der Hardt P., Roettger H. (Eds.) (1981), Neutron Radiography Handbook, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht
- [7] N. Kardjilov, S.W. Lee, E. Lehmann, I.C. Lim, C.M. Sim, P. Vontobel (2005), Improving the image contrast and resolution in the phase-contrast neutron radiography, Nuclear Instruments and Methods in Physic Research A 542 (2005) 100-105
- [8] Sarah W. Morgan, Jeffrey C. King, Chad L. Pope (2013), Beam characterization at the Neutron Radiography Reactor, Nuclear Engineering and Design 265 (2013)639-653
- [9] Tomaž Nemeč (2002), Doktorska disertacija, Določanje vodika z nevtronsko radiografijo, Univerza v Mariboru, Maribor, str. 12-19
- [10] Syed Naeem Ahmed (2007), Physic & Engineering of Radiation Detection, Academic Press inc. Published by Elsevir, Great Britain str. 49
- [11] Ismail Shaaban (2010), Design of the thermal neutron beam for neutron radiography at the Syrian MNSR, Annals of Nuclear Energy 37 (2010) 1588-1594

- [12] James E. Turner (2007), *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*, 7 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, str. 214.
- [13] Hironabu Unesaki, Takashi Hibiki, Kaichiro Mishima (1998), Evaluation of scattered neutron component in thermal neutron radiography image: Influence of scattered neutrons and unparallelness of incident neutron beam, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 413 (1998) 143-150
- [14] X-5 Monte Carlo Team (2003), *MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory*, University of California, poglavlja1-1, 1-3)
- [15] Lamarsh J.R. (1975), *Introduction to Nuclear Engineering*, Addison-Wesley Publ. Co., Reading, pp. 42-101, and 592-595; Rauch H., Zeilinger A. (1977), Hydrogen Transport Studies Using Neutron Radiography, *Atomic Energy Rev.* 15 (2), 249-290; Peterka F., Hrdlička Z. (1990), Application of Neutron Radiography to Building Industry, *Neutron Radiography* (3), Proc. World Conf., (Fujine S. et al., Eds.), Kluwer Publ. Co., Dordrecht, pp. 663-670
- [16] Neutron temperature: [http://en.wikipedia.org/wiki/Neutron\\_temperature](http://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_temperature)
- [17] PMMA: ([http://bowers.chem.ucsb.edu/research/materials/organic\\_polymers/pmma\\_ps/index.shtml](http://bowers.chem.ucsb.edu/research/materials/organic_polymers/pmma_ps/index.shtml))