

# Primjena radiografske tehnike raspršenog zračenja kod nerazornog ispitivanja zrakoplovnih komponenti

---

Leko, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:656231>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-09**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marko Leko**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof.dr. sc. Damir Markučić

Student:

Marko Leko

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Prof.dr.sc. Damiru Markučiću na pomoći, savjetima i vodstvu prilikom izrade završnog rada.

Marko Leko



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Leko**

Mat. br.: 0035184250

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena radiografske tehnike raspršenog zračenja kod nerazornog ispitivanja zrakoplovnih komponenti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of Backscatter Radiography Technique for NDT of Aircraft Components**

Opis zadatka:

Konvencionalne radiografske tehnike temelje se na prolasku ionizirajućeg zračenja kroz ispitivani objekt, gdje se zračenje ovisno o vrsti i debljini materijala objekta prigušuje i na temelju razlika u intenzitetu primarnog zračenja dospjelog do radiografskog senzora, postavljenog na suprotnoj strani objekta u odnosu na izvor zračenja, formira radiografski zapis. Prilikom prolaska kroz ispitni objekt glavni mehanizam prigušenja ionizirajućeg zračenja kod industrijske radiografije je Comptonov efekt raspršenja zračenja. Takvo raspršeno (sekundarno) zračenje nepoželjno je kod konvencionalne radiografije, budući da negativno utječe na kvalitetu radiografskog zapisa, no predstavlja temelj za formiranje radiografskog zapisa kod tzv. radiografije raspršenog zračenja (eng. backscatter radiography). Glavna značajka ove alternativne radiografske tehnike jest mogućnost dobivanja odziva nepravilnosti ispitivanog objekta s izvorom i senzorom zračenja postavljenih na istoj strani ispitivanog objekta. Budući da su organski materijali (polimeri) osobito prikladni za ovu vrstu inspekcije, tehnika raspršenog zračenja ima potencijalnu primjenu i u ispitivanju kompozitnih zrakoplovnih komponenti. Sukladno tome, u radu je potrebno:

- usporediti principe nastajanja radiografske slike kod konvencionalne tehnike prozračivanjem i kod tehnike raspršenog zračenja, s posebnim osvrtom na mogućnosti i ograničenja detekcije nepravilnosti s obzirom na vrstu i dimenzije;
- prikazati i obrazložiti mogućnosti primjene tehnike raspršenog zračenja kod nerazornog ispitivanja zrakoplovnih komponenti;
- predložiti postav za provođenje tehnike raspršenog zračenja pomoću sustava za računalnu radiografiju u cilju ispitivanja prisustva vode u sačastim kompozitnim zrakoplovnim komponentama.


U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:  
1. rok: 26. veljače 2015.  
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:  
  
Prof. dr. sc. Damir Markučić

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Ivica Smojver

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2.RENDGENSKO ZRAČENJE.....	2
2.1.Izvor rendgenskog zračenja.....	2
2.2.Priroda rendgenskih zraka.....	3
2.2.1. Kvaliteta rendgenskih zraka.....	4
2.2.2. Interakcija elektromagnetskog zračenja i materije.....	4
2.2.2.1. Fotoelektrični efekt.....	6
2.2.2.2. Comptonov efekt.....	7
2.2.2.3. Tvorba parova.....	11
2.3.Tehnika raspršenog zračenja.....	11
2.3.1. Različiti sustavi koji koriste raspršeno zračenje za radiografsko snimanje.....	12
3.USPOREDBA TEHNIKE RASPRŠENOG ZRAČENJA I TEHNIKE PROZRAČIVANJA...14	
3.1. Utjecaj izvora zračenja na snimanje.....	15
3.2. Utjecaj međusobnog položaja izvora i detektora na snimanje.....	17
3.2.1. Geometrijski utjecaj.....	17
3.2.1. Utjecaj kuta raspršenja.....	17
3.3. Utjecaj predmeta snimanja na samo snimanje.....	19
3.3.1. Utjecaj materijala.....	19
3.3.2.. Utjecaj položaja predmeta snimanja u odnosu na izvor i detektor.....	19
3.4. Utjecaj detektora rendgenskog zračenja.....	20
3.4.1. Filmska radiografija.....	21

3.4.2. Računalna radiografija.....	21
3.4.3. Radiografija u realnom vremenu.....	22
3.4.4. Utjecaj kolimatora na raspršene f fotone.....	23
4. MOGUĆNOST PRIMJENE TEHNIKE RASPRŠENOG ZRAČENJA U NE RAZORNIM ISPITIVANJIMA MATERIJALA.....	24
4.1. Ispitivanje prisutnosti korozije.....	24
4.2. Ispitivanje prisutnosti vode u saćastim kompozitima.....	26
5. ISPITIVANJE PRISUTNOSTI VODE U SAĆASTIM KOMPOZITNIM KONSTRUKCIJAMA POMOĆU SUSTAVA ZA RAČUNALNU RADIOGRAFIJU.....	27
6.ZAKLJUČAK.....	29
7.LITERATURA.....	30

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. rendgenska cijev.....	3
Slika 2.2. Odnos koeficijenta prigušenja i energije zračenja na primjeru čelika.....	5
Slika 2.3. Fotoelektrični efekt.....	6
Slika 2.4. Sudar fotona sa elektronom.....	7
Slika 2.5. Totalni udarni presjek u funkciji kuta raspršenja i upadne energije fotona.....	9
Slika 2.6. prikazana je ovisnost energije odbijenog fotona o kutu raspršenja i energiji upadnog fotona.....	10
Slika 2.7. Udio Comptonog efekta u cijeloj apsorpciji u funkciji vrste materijala i energije zračenja.....	10
Slika 2.8. Tvorba parova.....	11
Slika 2.9. Princip tehnike raspršenog zračenja.....	12
Slika 2.10. Sustav za snimanje dvodimenzionalnih slika tehnikom raspršenog zračenja.....	12
Slika 2.11. Sustav za snimanje trodimenzionalnih slika tehnikom raspršenog zračenja.....	13
Slika 3.1. Usporedba sustava za snimanje tehnikom raspršenog zračenja i tehnike prozračivanja.....	14
Slika 3.2. Utjecaj raspršenog zračenja na snimanje tehnikom prozračivanja.....	15
Slika 3.3. Utjecaj veličine žarišta na kvalitetu slike kod tehnike prozračivanja.....	15
Slika 3.4. Veličina izlazne zrake fotona je smanjena na određenu veličinu.....	16
Slika 3.5. Utjecaj kolimatora na izlazne X zrake.....	16
Slika 3.6. Utjecaj geometrije na snimanje.....	17
Slika 3.7. Utjecaj energije na broj raspršenih fotona pod odrađenim kutom.....	18
Slika 3.8. Utjecaj položaja predmeta na kvalitetu slike.....	20
Slika 3.9. Slikovna ploča.....	22
Slika 3.10. Funkcija kolimatora ispred detektora.....	23
Slika 4.1. Uređaj za rendgensko snimanje tehnikom raspršenog zračenja.....	24



Slika 4.2 Ispitivanje korozije u aluminijskoj oplati.....	25
Slika4.3 Upotreba tehnike raspršenog zračenja sa digitalnim detektorom pri ispitivanju vode u kompozitnim sačama.....	26
Slika 4.4. Snimka saće tehnikom raspršenog zračenja(b) i tehnikom prozračivanja(c).....	26
Slika 5.1. Skica prijedloga postava.....	28

## POPIS TABLICA

Tablica 3.1. utjecaj energije na dubinu pojave raspršenja u različitim materijalima.....	20
--	----

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\mu$	-	Linerani koeficijent prigušenja
$\tau$	-	Prigušenje zbog fotoelektričnog efekta
$\sigma_S$	-	Prigušenje zbog Comptonovog efekta
$\pi$	-	Prigušenje zbog efekta stvaranja parova
$E_\gamma$	eV	Energija fotona
$W$	eV	Energija vezanja elektrona
$E_{kin}$	eV	Kinetička energija elektrona
$h$	eV*s	Planckova konstanta
$f$	s <sup>-1</sup>	Frekvencija
$E_{\gamma'}$	eV	Energija raspršenog fotona
$E$	eV	Totalna energija fotona
$\gamma$	-	Odnos brzine elektrona i svjetlosti
$m$	g	Masa elektrona
$l$	m	Debljina materijala
$c$	km/s	Brzina svjetlosti
$p$	kgms <sup>-1</sup>	Količina gibanja u Comptonovom raspršenju
$\vartheta$	rad	Kut raspršivanja
$\varphi$	rad	Kut raspršivanja
$\lambda$	m	Valna duljina
$\lambda'$	m	Valna duljina raspršenog fotona
$\lambda_c$	m	Comptonova valna duljina elektrona
$\Omega$	rad	Prostorni kut
$n_e$		Volumenska gustoća elektrona u materijalu
$N_a$	mol <sup>-1</sup>	Avogadrov broj
$Z$	-	Atomski broj
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća materijala
$\sigma_c$	m <sup>2</sup>	Totalni udarni presjek za Comptonovo raspršenje
$E_+$	eV	Kinetička energija novostvorenog para
$E_-$	eV	Kinetička energija novostvorenog para
$M$	g/mol	Molarna masa
$p_e$	kgms <sup>-1</sup>	Količina gibanja raspršenog elektrona

## SAŽETAK

Konvencionalne radiografske tehnike temelje se na prolasku ionizirajućeg zračenja kroz ispitni objekt, gdje se zračenje ovisno o vrsti i debljini materijala objekta prigušuje i na temelju razlika u intezitetu primarnog zračenja dospjelog do radiografskog senzora, postavljenog na suprotnoj strani objekta u odnosu na izvor zračenja, formira radiografski zapis. Prilikom prolaska kroz ispitni objekt glavni mehanizam prigušenja ionizirajućeg zračenja kod industrijske radiografije je Comptonov efekt raspršenog zračenja. Takvo raspršeno (sekundarno) zračenje nepoželjno je kod konvencionalne radiografije, budući da negativno utječe na kvalitetu radiografskog zapisa, no predstavlja temelj za formiranje radiografskog zapisa kod takozvane radiografije raspršenog zračenja (eng. Backscatter radiography). Glavna značajka ove alternativne radiografske tehnike je mogućnost dobivanja odziva nepravilnosti ispitivanog objekta s izvorom i senzorom zračenja postavljenih na istoj strani ispitnog objekta.

## SUMMARY

Conventional imaging techniques are based on the passage of ionizing radiation through the test object, where the radiation depending on the type and thickness of the object dims and based on the difference in intensity of the primary radiation due to radiological sensors, mounted on the opposite side of the object relative to the radiation source, forming radiographic record. When passing through the test object main mechanism of attenuation of ionizing radiation in industrial radiography the Compton effect of scattered radiation. Such scattered (secondary) radiation is undesirable in conventional radiography, since it adversely affects the quality of radiographic records, but the basis for the formation of radiographic records in the so-called diffuse radiation radiography eng. Backscatter radiography. The main feature of these alternative imaging techniques is the possibility of obtaining a response irregularities the tested object with the source and radiation sensor positioned on the same side of the test object.

measurement

uncertainty



## **1.UVOD**

Rendgenski uređaji su danas jako rasprostranjeni te se koriste u raznim područjima od medicine, sigurnosnih sustava pa do ispitivanja materijala. Rendgensko snimanje materijala je postupak nerazornog ispitivanja materijala, sa svrhom detekcija nepravilnosti koje nisu vidljive golom oku. Razni su nedostaci i prednosti ispitivanja rendgenskim zračenjem u odnosu na ostale nerazorne metode. Najveći nedostatak je u veličini energije koja se koristi pri snimanju koja može biti jako štetna za ljudsko zdravlje, te cijena opreme koja je poprilično visoka. Prednosti su lako prepoznavanje položaja i oblika nepravilnosti, te realno brzo dobivanje slike predmeta. U prvome dijelu rada ukratko je prikazan teoretski dio koji se uvelike oslanja na fizikalne osnove same radiografije. Potrebno je poznavati i razumjeti na koji način dolazi do snimanja rendgenskim zrakama, i do kakvih interakcija može doći između materijala i snopa zračenja u ovisnosti o parametrima ispitivanja. U drugom dijelu rada prikazana je primjena tehnike raspršenog zračenja u nerazornim ispitivanjima zrakoplovnih komponenti.

## 2. RENDGENSKO ZRAČENJE

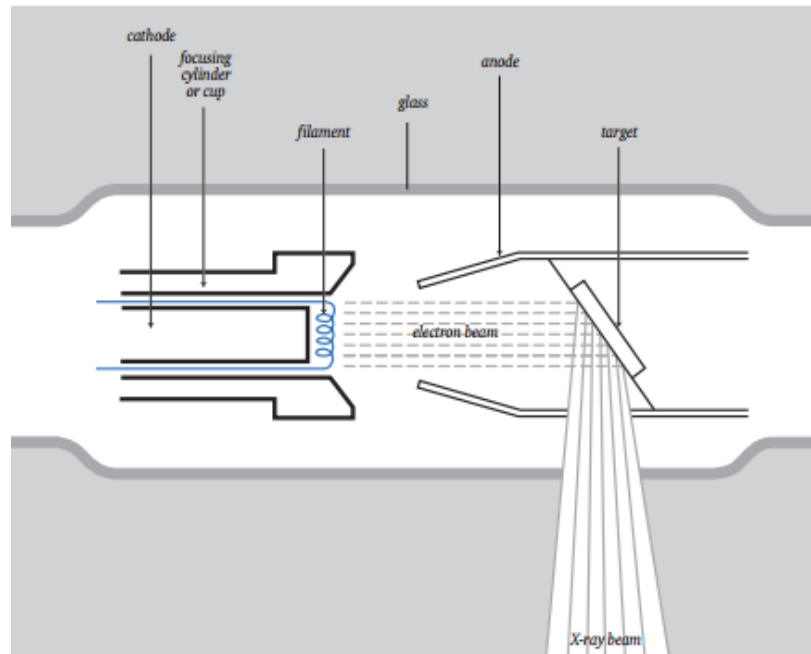
Wilhelm Conrad Röntgen je 1895. otkrio nevidljive zrake koje izazivaju fluorescenciju, prolaze kroz materiju, te se ne otklanjaju u magnetskom polju. Röntgen je te zrake nazvao X zrake zbog njihove nepoznate prirode. Iako se poslije pokazalo da su takve zrake već bile uočene u nekim pokusima, Röntgen ih je prvi istražio, primijenio i shvatio njihovu prirodu. Röntgen je odmah uočio mnoge sličnosti s vidljivom svjetlošću. Rendgenske zrake se šire u pravcima, bacaju oštre sjene, djeluju na fotografsku ploču, u nekim tvarima izazivaju fluorescenciju, te imaju izvanrednu prodornost. 1912. Max von Laue je dokazao da se rendgenske zrake mogu ogibati (difrakcija), te je dokazao da su one transverzalni elektromagnetski valovi, kao i vidljiva svjetlost, od koje se razlikuju po mnogo kraćim valnim duljinama.

### 2.1. Izvor rendgenskog zračenja

Izvor X zraka u industrijskoj radiografiji je rendgenska cijev (slika 2.1). Ona je cijev načinjena od stakla ili keramike u koju su smještene anoda (pozitivna elektroda) i katoda (negativna elektroda), i to u uvjetima izrazito visokog vakuma. U cijevi je vakum kako nebi došlo do kolizije elektrona ili nastalih rendgenskih zraka i čestica zraka. Katoda se, kako to sugerira, sastoji od fokusirajuće čašice filameta (tarna nit) te izvora napajanja. Tarnu nit zagrijava nekoliko ampera niskonaponskog izvora (najčešće mali transformator) čime se stvaraju elektroni koji se usred razlike potencijala između dvije elektrode gibaju ka anodi. Fokusirajuća čašica koncentrira snop elektrona na maleni dio mete (engl. target) koji se naziva tarištem. Taj se snop elektrona naziva strujom cijevi, a njegova se jakost mjeri u redovima veličine miliampera. Što je temperatura filameta veća, veća je i količina elektrona što rezultira jačom strujom cijevi. Kada se ubrzani elektroni velike kinetičke energije sudare s atomima na anodi izbijaju iz njegovog elektronskog omotača elektrone. Tako nastaju prazne elektronske ljuske koje se popunjavaju iz vanjskih, elektronski bogatijih ljusaka. Prelaskom elektrona na ljuske niže energijske razine oslobađa se energija koja se predaje okolini. Veći dio te energije se pretvara u toplinu na području tarišne točke, a tek se mali dio energije pretvara u elektromagnetsko zračenje. Očita je potreba za anodom visoka temperatura taljenja, pa se anode najčešće rade od volframa (taljenje na oko 3400 °C). Anoda se mora hladiti. Postoje razni mehanizmi hlađenja (npr. kondukcija, konvekcija). Veličina elektronskog snopa usmjerenog na metu razlikuje se od efektivne veličine tarišta. Efektivna veličina tarišta je projekcija područja tarišta na površinu okomitu prema snopu X zraka. Ona mora biti čim manja kako bi se postigla maksimalna oštrina dobivene slike. Na energetski



spektar zračenja utječe napon u rendgenskoj cijevi, a intenzitet zračenja je proporcionalan struji u cijevi. [1]



Slika 2.1. Rendgenska cijev [1]

Uređaji za radiografsko ispitivanje x- zrakama se, generalno, dijele u tri naponske kategorije:

- Do 320 kV,
- Do 450 kV,
- Do 10 MeV.

U naponsku kategoriju do 320 kV ulazi primjena X zraka u uvjetima isprekidanog rada, uz mogućnost prenošenja opreme. Oprema napona do 450 kV se koristi kod kontinuiranog korištenja. Pri tom naponu oprema može biti poluprijenosna ili u potpunosti stacionarna (zbog dimenzija i težine opremom je teško rukovati). U slučajevima kada se ispituju predmeti ekstremno velike debljine koristi se megavoltna oprema (do 10 MeV). Ona je velikih dimenzija i težina, pa se koristi samo pri stacionarnom radu.

## 2.2.Priroda rendgenskih zraka

Rendgenske zrake su transverzalni, elektromagnetski valovi, čija je valna duljina mnogo kraća od valne duljine vidljive svjetlosti. Valna duljina rendgenskih zraka iznosi od nekoliko nanometara do stotinki nanometara (nalaze se između spektra gama zraka i ultraljubičastih zraka). Rendgenske zrake su nevidljive, a šire se pravocrtno i u vakuumu se kreću brzinom od  $3 \times 10^8$  m/s. Ne otklanjaju se u električnom i magnetnom polju, kao ni pri prolazu kroz bilo kakvu leću, ali ih se može zrcaliti na površini kristala. [1]

Svojstva X zraka:- Ne može ih se otkriti ljudskim osjetilima

- Putuju u ravnoj liniji brzinom svjetlosti
- Na putanju im ne utječu električna i magnetska polja
- Podliježu malom stupnju difrakcije na spoju dva različita materijala
- Prolaze kroz materiju dok ne naiđu na atomsku česticu
- Dubina penetracije ovisi im o energiji i svojstvima materije kroz koju prolaze
- Imaju dovoljno energije da ioniziraju tvar i unište žive stanice

### **2.2.1. Kvaliteta rendgenskih zraka**

Rendgenska cijev proizvodi snop rendgenskih zraka dulje ili kraće valne duljine. Zrake manje valne duljine imaju veću frekvenciju, a time i veću energiju te time lakše prodiru u materijal.[1] Energija, a time i prodornost rendgenskih zraka određuje se naponom. Što je napon veći elektroni imaju veću energiju pri sudaru s anodom, te se oslobađa veća energija. Za prikaz ispitivanja materijala različitih debljina i svojstava primjenjujemo zrake različite prodornosti. Osim prodornosti rendgenskih zraka za kvalitetnu sliku materijala bitna je i količina rendgenskih zraka koja je ovisna o broju elektrona koji udaraju anodu. Tu količinu elektrona koja se oslobađa na katodi reguliramo jačinom struje.

### **2.2.2 Interakcija elektromagnetskog zračenja i materije**

Prolaskom rendgenskog zračenja kroz neku tvar intenzitet zraka se smanjuje. Apsorpcija je izražena pri niskim vrijednostima energije i frekvencije rendgenskog zračenja, a funkcija je valne duljine rendgenskih zraka, gustoće tvari kroz koju prolaze i atomskog broja tvari kroz kojeg prolaze. Prema tome, rendgenskog zračenja kraćih valnih duljina ili tvrdo rendgensko zračenje, bit će manje apsorbirano. Dakle prodornije je od onoga duljih valnih duljina. Prolaskom kroz nehomogeno tijelo rendgensko zračenje se više apsorbira na mjestima veće gustoće i na mjestima koja su od elemenata većeg atomskog broja. Upravo ta apsorpcija nam omogućava dobivanje slike kod rendgenskog snimanja materijala.

Prigušenje se najlakše opisuje linearnim koeficijentom prigušenja  $\mu$ .

$$\mu = \tau + \sigma_S + \pi \quad (1.1) [1]$$

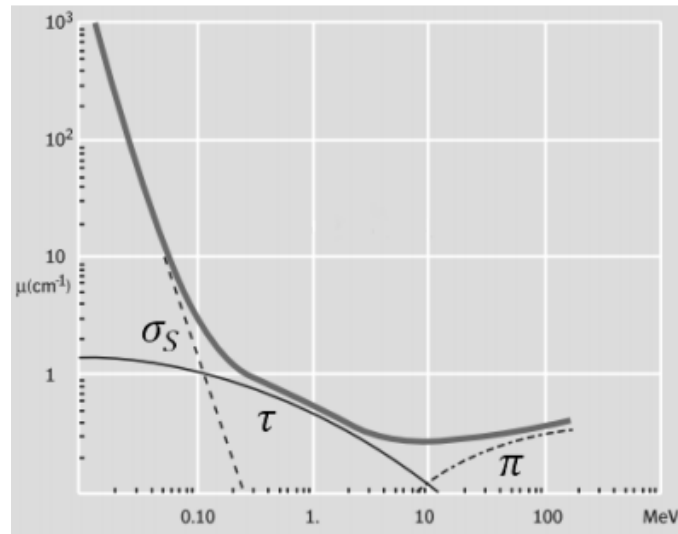
Gdje je:

$\mu$  – linearni koeficijent prigušenja

$\tau$  – prigušenje zbog fotoelektričnog efekta

$\sigma_S$  – prigušenje zbog Comptonovog efekta

$\pi$  – prigušenje zbog efekta stvaranja parova



Slika 2.2. Odnos koeficijenta prigušenja i energije zračenja na primjeru čelika[1]

Thomsonovo i Rayleighovo raspršenje primjeri su u kojima ne dolazi do znatnijeg transfera energije. U Thomsonovu raspršenju, na elektronu dolazi samo do promjene smjera fotona (elastično raspršenje) i znatnija mu je vjerojatnost, samo za najniže energije fotona.

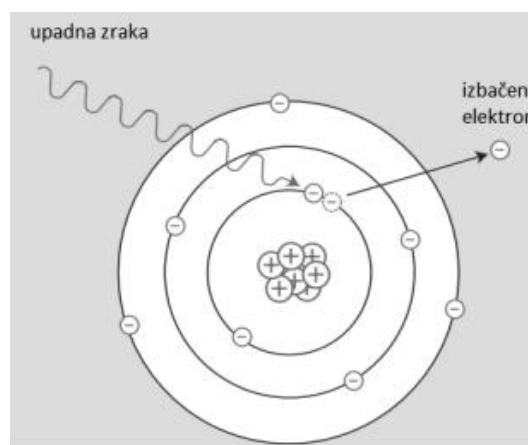
Takvo raspršenje može se zamisliti kao proces apsorpcije upadnog zračenja i ponovne emisije zračenja u svim smjerovima. Rendgenske zrake pobuđuje električki nabijene čestice na koje nailazi te se atom na koji nailazi ponaša se kao da je točkasti izvor raspršenog rendgenskog zračenja. Elektroni koji su na putu rendgenskog zračenja prisiljen je na oscilacije koje uključuju njegovo ubrzavanje i usporavanje zbog promjenjivog elektromagnetskog polja. Takva ubrzana električki nabijena čestica postaje izvor elektromagnetskog zračenja koje je iste frekvencije, valne duljine i energije kao i izvorni (upadni) elektromagnetski val jer elektron oscilira u fazi sa upadnim rendgenskim valom. Ova se pojava naziva raspršenje rendgenske zrake na elektronu.

Thomsonovo raspršenje je koherentno, u smislu da postoji dobro definirana promjena faze između upadnog i raspršenog zračenja. Klasična elektromagnetska teorija nam kazuje da

ubrzana nabijena čestica emitira elektromagnetsko zračenje. Međutim, taj proces može biti opisan kao apsorpcija i sukcesivna ponovna emisija zračenja. Ako k tomu upadno zračenje ima precizan smjer, raspršeno zračenje će biti emitirano u svim smjerovima. U jednostavnom slučaju kada je upadno zračenje jedan jedini val, kontinuirani i monokromatski tj. polarizirano zračenje, ubrzanje elektrona će pretrpjeti harmoničke oscilacije pa će emitirano zračenje očitno imati istu frekvenciju kao upadno zračenje energija se ne gubi. Pošto vjerojatnost događaja Thomsonovog i Rayleighovog raspršenja opada sa veličinom energije fotona koja je kod X zraka velika i nema utjecaja na gubitke energije fotona, te nam nisu od koristi pri rendgenskom snimanju zanemarit ćemo ih pri daljnjoj analizi. Kao što je prikazano na slici za gubitke energije fotona odgovorne su tri pojave: fotoelektrični efekt, Comptonovo raspršenje i tvorba parova.

### 2.2.2.1. Fotoelektrični efekt [2]

Fotoelektrični efekt je proces koji se događa pri sudaru fotona sa atomom pri čemu foton predaje svu svoju energiju atomu, te nestaje. Elektron u atomu u tom procesu biva izbačen iz atoma ili dolazi do podizanja elektrona na višu energetska ljusku. Podizanje energetskog nivoa elektrona dovodi do emitiranja svijetla.



Slika 2.3. Fotoelektrični efekt [1]

Energija fotona se utroši na energiju vezanja dotičnog elektrona i na davanje kinetičke energije tad već slobodnom elektronu. Ako se radi o metalu tada vrijedi :

$$E_{\gamma} = W + E_{kin} \quad (1.2)$$

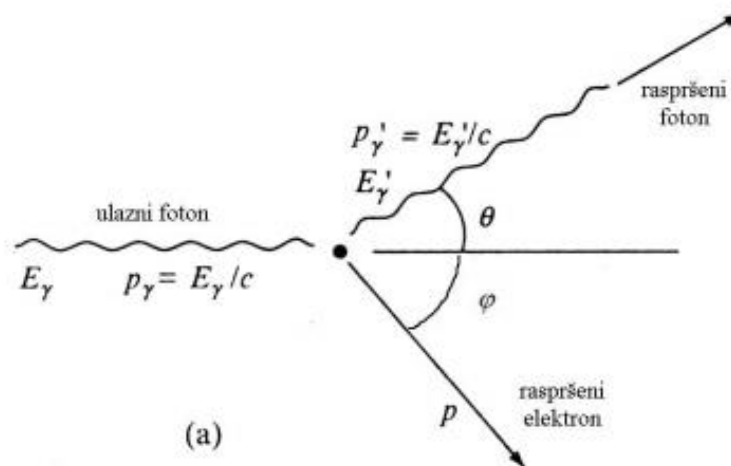
Energija fotona  $E_{\gamma}$  utrošena je na rad izlaza  $W$  i na kinetičku energiju elektrona  $E_{kin}$ . Rad izlaza  $W$ , tipično za metal iznosi nekoliko elektronvolti, što je zanemarivo prema energijama gama i X-zraka. Energija fotona  $E_{\gamma}$  jednaka je produktu Planckove konstante  $h$  i frekvencije  $f$ :

$$E_y = h * f \quad (1.3)$$

Očito je da minimalna energija potrebna za fotoelektrični efekt iznosi upravo  $W$ , kad elektron postane slobodan, no bez ikakve energije ne može doći do potpunog transfera energije fotona na slobodnom elektronu, to jest elektron mora biti vezan za atom koji je nužan za preuzimanje dijela količine gibanja. No, zbog njegove neusporedivo veće mase od mase elektrona, pritom on preuzme zanemarivo malu količinu energije.

### 2.2.2.2. Comptonov efekt [2]

Comptonov efekt je smanjenje energije odnosno porast valne duljine fotona X zraka pri interakciji s tvari. Comptonov efekt uočio je Arthur Holly Compton 1923; za što je dobio Nobelovu nagradu 1927. Comptonov efekt se događa kada se upadni foton odbije ili rasprši na elektronu. Interakciju između visokoenergetskih fotona i elektrona promatramo kao elastični sudar u kojem foton dio energije predaje elektronu (čija je kinetička energija prije sudara nula), a ostatak energije foton emitira pod kutom  $\vartheta$  u odnosu na smjer ulaznog zračenja tako da je ukupna količina gibanja sustava konstantna. Izlazni foton ima manju energiju od upadnog fotona i to za iznos koji je prenesen pogođenom elektronu, i kreće se u različitom smjeru od smjera upadnog fotona i smjera elektrona.



Slika 2.4. Sudar fotona sa elektronom [2]

U slučaju raspršenja na slobodnom elektronu nije moguć potpun transfer energije fotona, već kao rezultat imamo novi foton veće valne duljine (manje energije  $E_{\gamma'}$ ) raspršen pod kutem  $\vartheta$  i elektron raspršen pod kutom  $\varphi$ . Vežu između početne energije fotona  $E_{\gamma}$ , konačne energije raspršenog fotona  $E_{\gamma'}$  i elektrona dobivamo iz jednadžbi očuvanja energije i količine gibanja:

$$E_e = E_y - E_{\gamma'} = E - mc^2 \quad (1.4)$$

Ovdje s  $E$  označavamo totalnu energiju elektrona ( $E = mc^2\gamma$ ) (1.5).

Zakon očuvanja količine gibanja možemo napisati po komponentama:

$$\frac{E_Y}{c} = \frac{E_{Y'}}{c} \cos\vartheta + p_e \cos\varphi \quad (1.6)$$

$$0 = \frac{E_{Y'}}{c} \sin\vartheta + p_e \sin\varphi \quad (1.7)$$

Međutim, lakše je račun provesti, ako ga pišemo u vektorskom obliku. Primjenom kosinusova poučka možemo pisati :

$$(p_e c)^2 = E_Y'^2 + (E_Y)^2 - 2E_Y E_Y' \cos\vartheta = E^2 m^2 c^4 \quad (1.8)$$

Ovdje je primjenjena Einsteinova relativistička relacija između ukupne energije i količine gibanja:

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (1.9)$$

Nakon eliminiranja  $E_e$  iz jednadžbi (dvije predzadnje) imamo konačno:

$$E_Y' = \frac{E_Y}{1 + \left(\frac{E_Y}{mc^2}\right)(1 - \cos\vartheta)} \quad (1.10)$$

Valna duljina fotona dana je formulom:

$$\lambda = \frac{hc}{E_Y} \quad (1.11)$$

Pomoću formule za energiju raspršenog fotona i formule za valnu duljinu fotona dobivamo jednadžbu za valnu duljinu raspršenog fotona:

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos\vartheta) \quad (1.12)$$

Gdje je  $\lambda_c$  Comptonova valna duljina elektrona:

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} \quad (1.13)$$

Klein-Nishina formula omogućuje nam procjenu kuta i energije raspršenih zraka. Preciznije, broja fotona početne energije  $E_Y$  raspršenih u materijal debljine  $dl$  prema prostornom kutu  $d\omega$  za određeni kut raspršenja  $\vartheta$

$$dN(\vartheta) = N_{inc} \frac{d\sigma_{KN}(E_Y, \vartheta)}{d\Omega} d\omega n_e dl \quad (1.14) \quad [4]$$

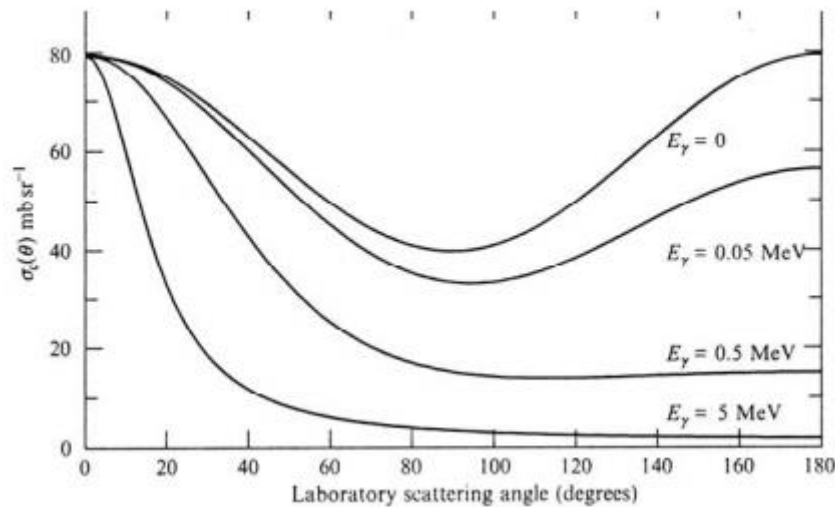
Gdje je  $n_e$  volumenska gustoća elektrona u materijalu:

$$n_e = \frac{N_a Z \rho}{M} \quad (1.15) \quad [4]$$

Diferencijalni udarni presjek  $\left(\frac{d\sigma_c}{d\Omega}\right)$  za Comptonско raspršenje dan je formulom:

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = \frac{k^2 e^4}{2m^2 c^4} \left(\frac{E_\gamma'}{E_\gamma}\right)^2 \left(\frac{E_\gamma}{E_\gamma'} + \frac{E_\gamma'}{E_\gamma} - \sin^2\vartheta\right) \quad (1.16)$$

To je vjerojatnost po jediničnom prostornom kutu u steradianima (sr), da će foton koji prolazi slojem materijala, koji sadrži 1 elektron po  $m^2$ , biti raspršen u prostorni kut  $d\Omega$ , pod kutom  $\vartheta$ . Slika 2.5. prikazuje taj udarni presjek za četiri energije upadnog fotona (izražen mbarima po steradianu;  $1\text{mbar} = 10^{-31}m^2$ ).



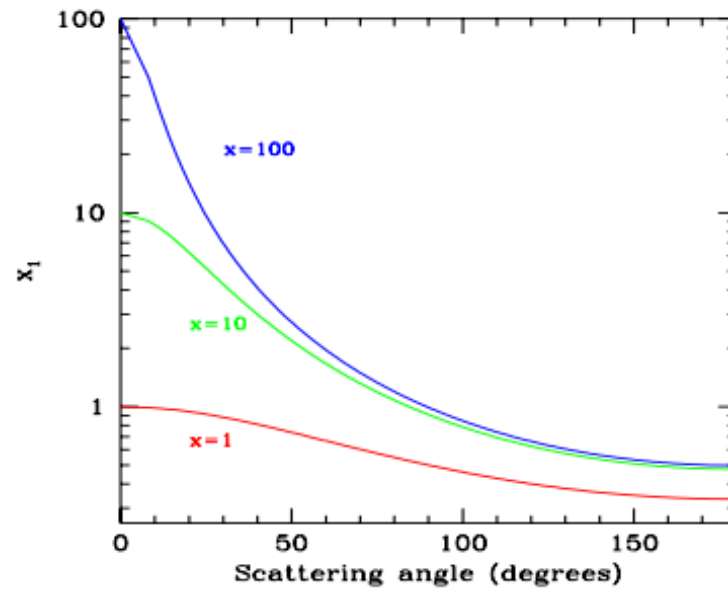
Slika 2.5. Totalni udarni presjek u funkciji kuta raspršenja i upadne energije fotona[2]

Iz dijagrama se vidi i sve vjerojatnosti raspršenja prema naprijed (mali kutevi  $\vartheta$ ), kako energija fotona raste. To nam govori kako pri ispitivanju tehnikom raspršenog zračenja nema smisla povećavati energiju iznad određenog stupnja jer će se broj fotona koji utječu na stvaranje slike smanjiti.

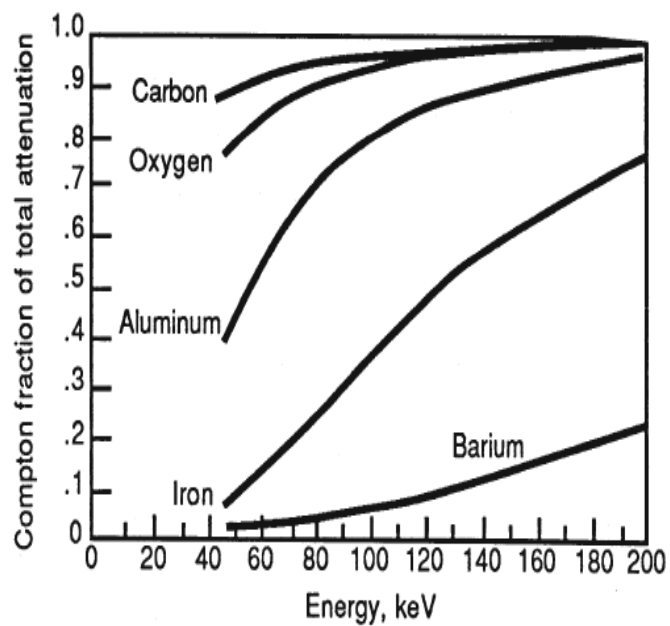
Integral :

$$\sigma_c = \int_0^\pi \frac{d\sigma_c}{d\Omega} \sin\vartheta d\vartheta \quad (1.17)$$

daje totalni udarni presjek za Comptonско raspršenje kao vjerojatnost da će foton doživjeti Comptonско raspršenje po jednom elektronu.



Slika 2.6. Prikazana je ovisnost energije odbijenog fotona o kutu raspršenja i energiji upadnog fotona. [3]



Slika 2.7. Udio Comptonog efekta u cijeloj apsorpciji u funkciji vrste materijala i energije zračenja [4]

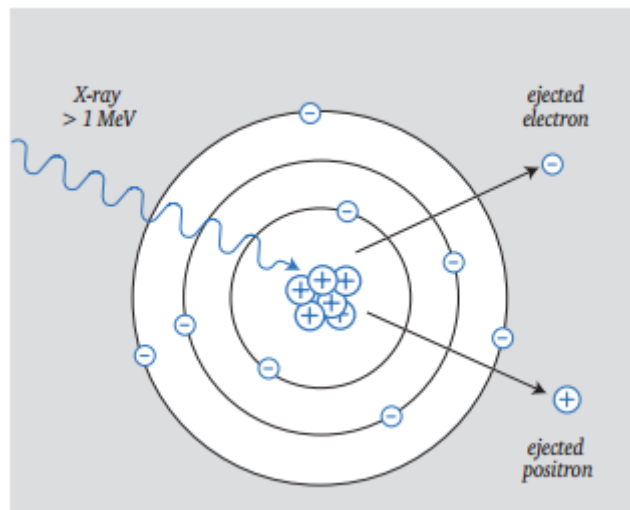


### 2.2.2.3 Tvorba parova[2]

Fotoni energije veće od mogu stvoriti par elektron-pozitron u polju atomske jezgre. Ona je nužna iz različitih razloga, iz kojih je kod fotoelektričnog efekta bila nužna prisutnost trećeg tijela, atoma. To znači da stvoreni par elektron-pozitron nije u mogućnosti preuzeti svu količinu gibanja fotona, koji u tom procesu nestaje. Energija fotona troši se na:

$$E_{\gamma} = 2mc^2 + E_{+} + E_{-} \quad (1.18)$$

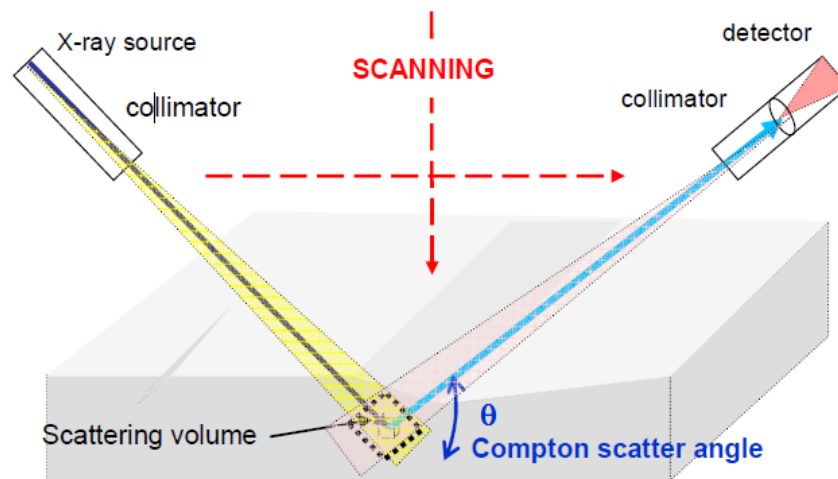
gdje  $E_{+}$  i  $E_{-}$  predstavljaju kinetičke energije novostvorenog para. Raspodjela energije između elektrona i pozitrona je kontinuirana, tako da jedan može preuzeti svu energiju. Međutim, energetske spektri elektrona i pozitrona su gotovo identični. Efekt postaje vjerojatniji s porastom energije fotona i s porastom (približno) kvadrata rednog broja jezgre, u čijem se polju tvorba para odigrava, te se također događa inverzni proces. Pozitron se najvjerojatnije ponajprije uspori, privuče jedan elektron i formira pozitronij. To je sustav sličan vodikovu atomu, s tim da umjesto protona imamo pozitron, koji zajedno s elektronom kruži oko zajedničkog centra mase.



Slika 2.8. Tvorba parova [1]

### 2.3. Tehnika raspršenog zračenja

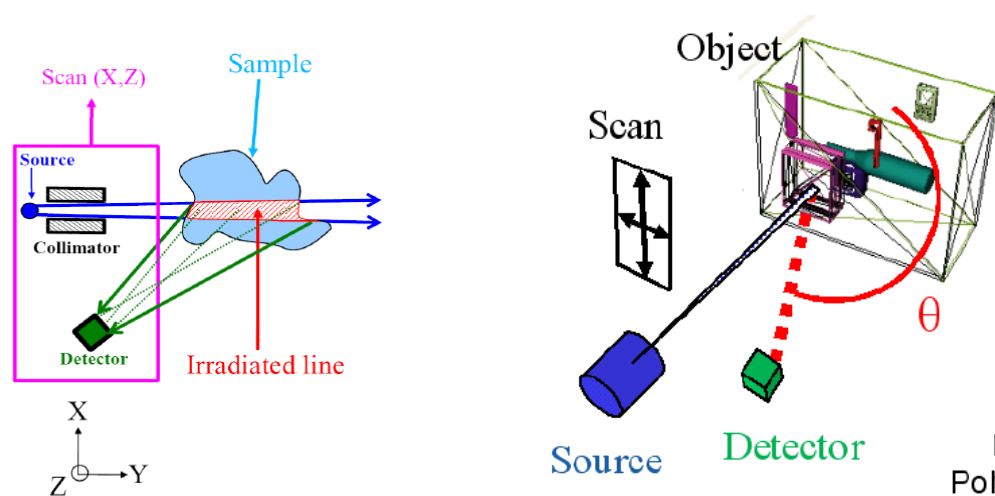
Tehnika raspršenog zračenja bazirana je na efektu raspršenja (Comptonov efekt), pri snimanju predmeta rendgenskim zrakama koje se dijelom apsorbiraju, a dijelom raspršuju u materijalu. To raspršeno zračenje mjeri se na detektoru koji se nalazi na istoj strani kao i izvor zračenja. Tehnika omogućuje detekciju podpovršinskih nepravilnosti i nehomogenosti, kao i mjerenje debljine slojeva materijala.



Slika 2.9. Princip tehnike raspršenog zračenja[4]

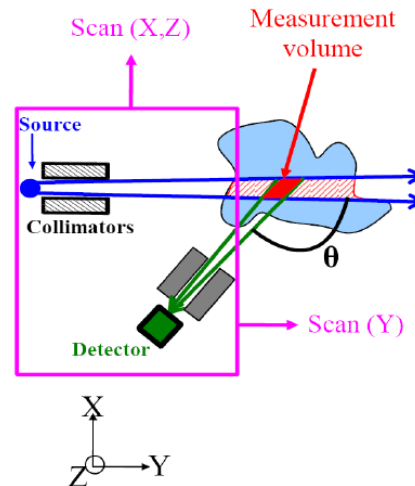
Tehnika se zasniva na mjerenju energija raspršenih fotona, točnije kao je prikazano u Klein-Nishinoj formuli broj fotona koji će se raspršiti do detektora u funkciji je mnogo parametara: vrsti materijala snimanja, izvora zračenja, kolimatora, međusobnog položaja izvora zračenja predmeta snimanja i detektora. Kako bi olakšali konstruiranje sustava za snimanje raspršenim zračenjem razvijeni su razni softveri za predviđanje tog raspršenog zračenja za zadani sustav i predmet zračenja. Ti softveri su bazirani ili na Monte Carlo kodu, ili su numerički. Softveri su bazirani na formulama koje opisuju mogućnosti dolaska fotona do elektrona na određenoj dubini u materijalu, mogućnosti njegovog raspršenja na elektronu (Klein-Nishina formula), te mogućnosti prolaska tog raspršenog fotona nazad kroz materijal do detektora. [4]

### 1.3.2. Različiti sustavi u snimanju raspršenim zračenjem



Slika 2.10. Sustav za snimanje dvodimenzionalnih slika tehnikom raspršenog zračenja[6]

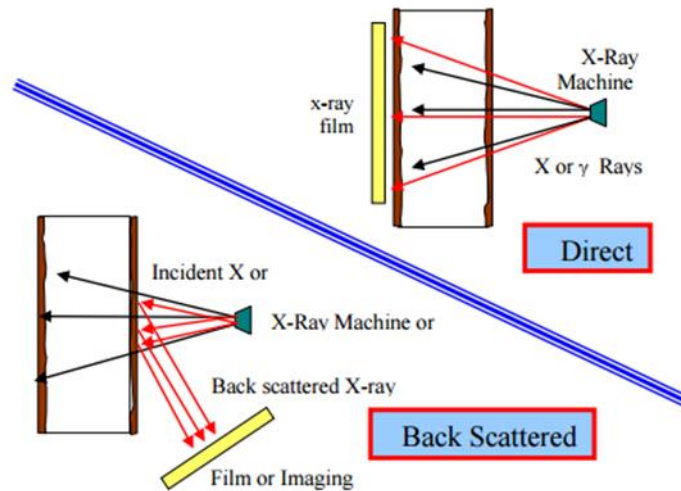
Kod 2D tehnike snimanja raspršenim zračenjem (Slika 2.10), detektor broji sve raspršene fotone koji dolaze iz ozračenog volumena. Za dobivanje slike potrebno je relativno kretanje između uzorka i podsustava (izvor sa kolimatorom i detektor). Skeniranje je realizirano u dvije dimenzije (X i Z osi). U 2D postavu kut raspršenja nije konstantan. [6]



Slika 2.11. Sustav za snimanje trodimenzionalnih slika tehnikom raspršenog zračenja[6]

Kod 3D tehnike raspršenog zračenja (slika 2.11.) uređaj je dizajniran za mjerenje fotona koji dolazi samo od mjernog volumena. Volumen je definiran veličinom ulaznog snopa i veličinom detektora, tj. kolimatora. Kao i kod 2D tehnike potrebno je relativno gibanje sustava u odnosu na predmet snimanja ali kod ovog sustava imamo gibanje i u pravcu treće osi (Y). Kod 3D sustava kut raspršenja je gotovo konstantan, a to je dobiveno postavljanjem kolimatora ispred detektora zračenja koji propušta fotone samo iz jednog pravca. [6]

### 3 .USPOREDBA TEHNIKE RASPRŠENOG ZRAČENJA SA TEHNIKOM PROZRAČIVANJA



Slika 3.1. Usporedba sustava za snimanje tehnikom raspršenog zračenja i tehnike prozračivanja [7]

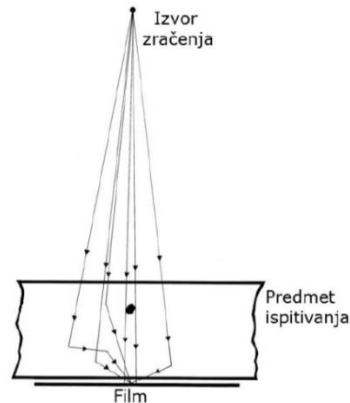
Pri snimanju materijala razni parametri utječu na snimku, u daljnjem tekstu opisane su fundamentalne razlike između tehnike raspršenog zračenja i tehnike prozračivanja. Tri su osnovna elementa koja su potrebna za radiografsko snimanje. To su: izvor zračenja, predmet snimanja i element koji prikuplja podatke (detektor).

Na radiografsko ispitivanje, a time i na dobiveni prikaz utječu sljedeće varijable:

1. Energija zračenja
2. Vrijeme izlaganja
3. Jakost struje [mA] (utječe na intezitet zračenja, dok napon utječe na spektar zračenja)
4. Vrsta i gustoća materijala ispitnog uzorka
5. Debljina materijala
6. Tip filma
7. Ekрани koji se koriste
8. Kemijska obrada filma(vrijeme obrade, temperatura itd...)
9. Udaljenost izvora zračenja od ispitnog uzorka
10. Udaljenost ispitnog uzorka od filma
11. Veličina mete u cijevi generatora zraka(za X-zrake)

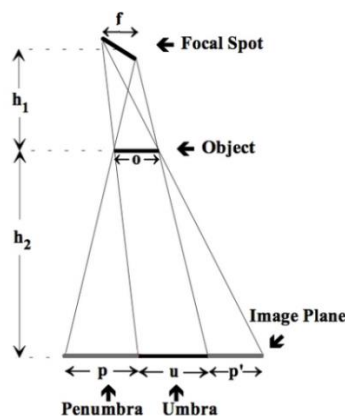
### 3.1. Utjecaj izvora zračenja na snimanje

Izvor zračenja u oba snimanja je isti, rendgenska cijev. Prva razlika je u energiji fotona koji sudjeluju u nastajanju snimke. Pri snimanju tehnikom prozračivanja potrebna je veća energija zračenja kako bi kontrast slike bio što bolji, naime pri niskim energijama zračenja učinak Comptonovog efekta je veći, te je i broj raspršenih fotona koji negativno utječu na kvalitetu slike kod ove tehnike veći.



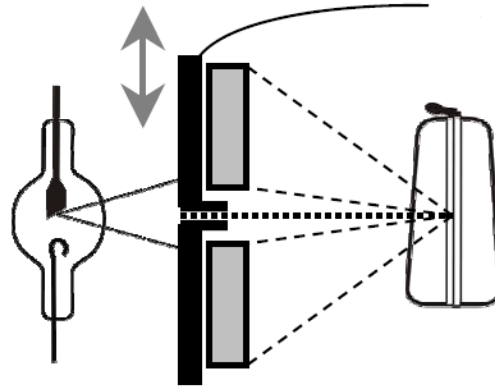
Slika 3.2. Utjecaj raspršenog zračenja na snimanje tehnikom prozračivanja [2]

Za razliku od tehnike prozračivanja tehnika raspršenog zračenja koristi baš te niske energije u rasponu od 100keV do 250keV kako bi broj raspršenih fotona bio čim veći, te time i veća kvaliteta slike. Za razliku od tehnike raspršenog zračenja kod koje reflektirani fotoni čine sliku elementa tehnika prozračivanja koristi fotone koji prolaze kroz materijal i koji udaraju o detektor. Izvor zračenja kod tehnike prozračivanja trebao biti što manjih dimenzija kako bi slika koju dobivamo bila oštija i kako bi imali što bolji kontrast slike. Priroda rendgenskih zraka je da se šire divergentno što uzrokuje nastanak veće polusjene snimanog objekta (slika3.2.). Snimanje se vrši na način da rendgenske zrake penetriraju od jednom kroz cijeli element koji želimo snimiti iza kojega se nalazi film na koje se stvara slika pomoću zračenja koje je prošlo kroz element.



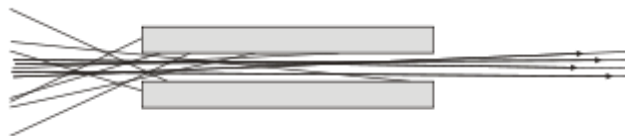
Slika 3.3. Utjecaj veličine žarišta na kvalitetu slike kod tehnike prozračivanja [1]

Kod tehnike raspršenog zračenja pomoću kolimatora kojeg postavljamo između izvora zračenja i predmeta snimanja pokušavamo dobiti snop fotona koji bi udarao od samo dio predmeta snimanja. Dvodimenzionalne slike generiraju pomoću obrazaca za skeniranje. Na primjer snop fotona se pomiče sa jednog kraja predmeta do drugog u horizontalnoj ravnini nakon čega se giba za određeni pomak u vertikalnoj ravnini, te se ponovo počinje gibati u horizontalnoj ravnini do drugog kraja predmeta. Ovaj proces se ponavlja, dok cijela slika predmeta ispitivanja nije dovršena.



Slika 3.4. Veličina izlazne zrake fotona je smanjena na određenu veličinu[8]

Kao što je prikazano na slici 3.4 snop fotona udara u samo jedan dio predmeta. U slučaju da kao kod tehnike prozračivanja obasjamo cijeli predmet zrakama imalo bi previše raspršenih fotona koje detektor ne bi mogao raspoznati. Iz tog razloga koristimo kolimator pomoću kojeg možemo dobiti snop elektromagnetskih zraka određene veličine. Veličina snopa utječe na brzinu i kvalitetu snimanja, ako je snop manjih dimenzija ozračiti će manji dio površine te će detektori imati kvalitetniju sliku, ali sa smanjivanjem snopa brzina snimanja se smanjuje, jer zraka mora ozračiti svaki dio površine (površine jedne strane ispitnog objekta).

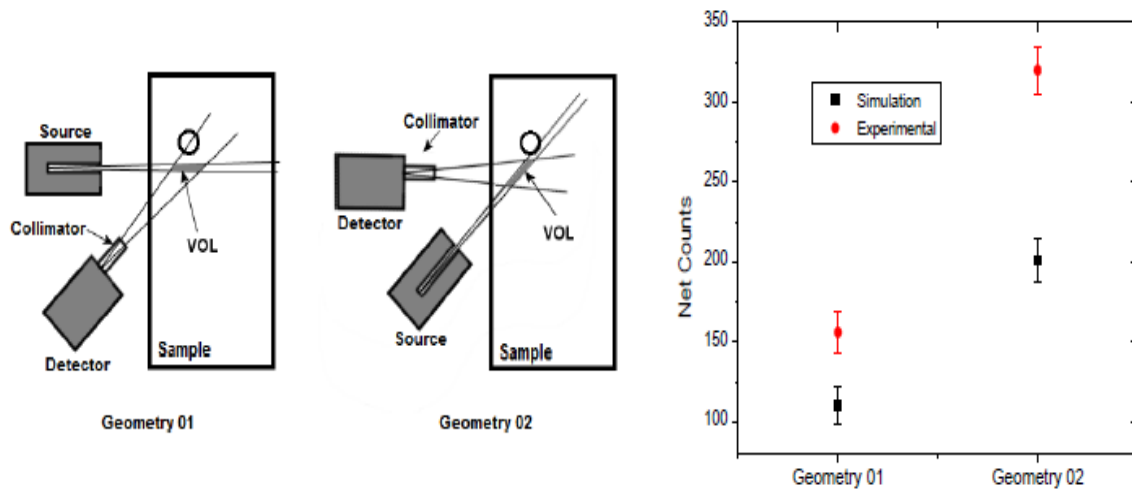


Slika 3.5. Utjecaj kolimatora na izlazne X zrake[6]

Proces kolimacije dramatično smanjuje broj fotona na raspolaganju za snimanje, a omogućuje nam da snop fotona bude manjih dimenzija. [7]

## 3.2. Utjecaj međusobnog položaja izvora zračenja i detektora na snimanje

### 3.2.1. Utjecaj geometrije



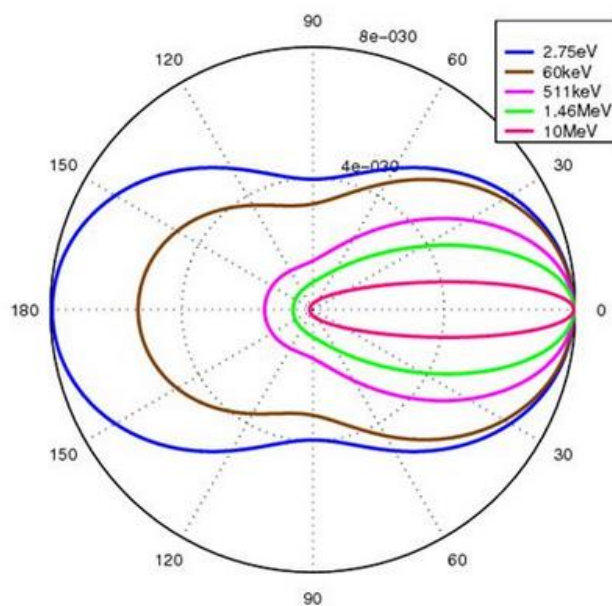
Slika 3.6. Utjecaj geometrije na snimanje[5]

Slika 3.6. prikazuje dva izvora zračenja u dva različita položaja u odnosu na predmet snimanja. U prvom postavi snop zraka je okomit na predmet ispitivanja, dok su u drugom postavi zamijenili pozicije te su raspršene zrake koje dolaze do detektora okomite na predmet ispitivanja. U oba slučaja centar ispitnog volumena se nalazi na istoj dubini uzorka. U prvom postavi je veći dio volumena bliže površini te je iz tog razloga veći broj fotona koji dolaze do detektora, jer moraju proći manju udaljenost kroz materijal do detektora. Veći broj fotona koji dolazi do detektora nam omogućuje kraći vremenski interval snimanja za dobivanje statistički značajnih vrijednosti. U prvom postavi izvor je ujedno i vanjska referenca snimanja što omogućuje lakše rukovanje opremom. Veličina ispitnog volumena ovisi o kolimatoru detektora, a kao što vidimo sa slike kolimator u drugom slučaju pokriva veće područje te može doći do situacije da snimamo dio predmeta a detektor nije točno iznad njega. [5]

### 3.2.2. Utjecaj kuta raspršenja

Kut raspršenja je bitan za 3-D snimanje materijala, dok je za 2-D nebitan jer detektor kod 2-D sustava prima fotone koji se raspršuju pod svim kutovima. U daljnjem razmatranju uvidit ćemo utjecaj kuta na 3-D snimanje materijala raspršenim zračenjem. U postavi sustava povratnog raspršenja, mali kutovi raspršenja od  $90^\circ$  nisu adekvatni, jer postoji značajan porast udaljenosti koju raspršene zrake unutar uzorka moraju prijeći, što podrazumijeva

povećanu apsorbciju raspršenih zraka. Za niske energije upadnog zračenja, veći kutovi također povećavaju vjerojatnost raspršenja. Osim toga i sami konstrukcijski dizajn uređaja je lakše izvesti ako su detektor i izvor zračenja u blizini. Pri snimanju želimo uhvatiti što veći broj fotona u detektoru u što kraćem vremenskom periodu. Broj reflektiranih fotona u određeni kut funkcija je više parametara, te se vrijednost kuta pod kojim ćemo postaviti detektor određuje simulacijama, koristeći se Klein-Nishinom formulom. Iz poznatih mi eksperimenata taj kut se najčešće uzima između 135 i 180 stupnjeva. Iz izvedenih pokusa imamo prikazane vrijednosti broja fotona koji dolaze do detektora u funkciji veličine, vrste materijala i kuta pod kojim se nalazi detektor[5]. Na slici imamo prikazanu ovisnost broja raspršenih fotona o kutu raspršenja i energiji.



Slika 3.7. Utjecaj energije na broj raspršenih fotona pod odrađenim kutom[11]



### 3.2. Utjecaj predmeta snimanja na samo snimanje.

Predmet snimanja utječe na snimanje kroz vrstu materijala od kojega je izrađen i kroz poziciju u odnosu na izvor zračenja i detektor.

#### 3.2.1 Utjecaj vrste materijala

Vrsta materijala od kojeg je izrađen element utječe na količinu fotona koji će biti raspršeni u tome materijalu. Pri višim energijama zračenja koji se koriste kod tehnike prozračivanja na apsorpciju zraka utječe samo gustoća materijala, dok pri nižim vrijednostima i njegova volumenska gustoća elektrona, koja je funkcija atomskog broja  $Z$ . [5]

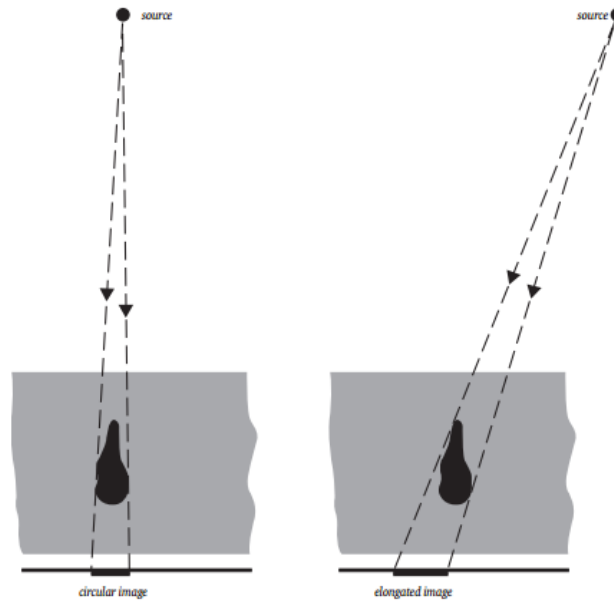
Tablica 3.1. Utjecaj energije na dubinu pojave raspršenja u različitim materijalima [7]

energija X zraka (keV)	Dubina do koje prodiru zrake			
	Ugljik	Aluminij	Titan	Čelik
100	2.5	2.2	0.8	0.35
130-150	2.8	2.6	1.2	0.55
250-300	3.4	3.3	1.9	1.00

Prednost tehnike prozračivanja je u tome što se pomoću nje mogu raditi snimke materijala većih debljina, dok je tehnika raspršenog zračenja limitirana debljinom predmeta snimanja, kao što je vidljivo iz tablice 3.1. Iz nje primjećujem da se za materijale manjega atomskog broja može odrediti nepravilnost na većoj dubini nego za materijale visokog atomskog broja (metali, zbog veće apsorpcije tih materijala). Kako je navedeno prije, tehnika raspršenog zračenja koristi niske energije fotona te ne može dublje penetrirati u materijal. Kao što je vidljivo iz tablice 3.1; tehnika raspršenog zračenja ne može se koristiti pri ispitivanju materijala velikog atomskog broja i velike debljine[6], ali je zato povoljna za ispitivanje materijala poput kompozita čiji je atomski broj nizak.

#### 3.2.2. Utjecaj položaja predmeta snimanja u odnosu na izvor zračenja i detektor

Kod tehnike prozračivanja ako se ispitni objekt nalazi u istoj ravnini kao i film, to jest ako su oni paralelni nemamo iskrivljenje slike. Ako su pak oni u različitim ravninama javlja se različit stupanj iskrivljenja pa slika objekta nije vjerna njegovom stvarnom izgledu. Na vjernost prikaza objekta na rendgenskoj snimci veoma utječe položaj objekta u odnosu na središnju zraku rendgenskog snopa. Za vjerni prikaz nekog objekta središnja zraka snopa mora prolaziti sredinom objekta i padati okomito na film. [1]



Slika 3.8. Utjecaj položaja predmeta na kvalitetu slike[1]

Dodatan problem predstavljaju pukotine koje imaju jednu dimenziju izraženiju više nego ostale dvije, što znači da će se gledano iz ravnine okomite na manje izražene dimenzije pukotina prikazati kao mala točkica koju se možda može i zanemariti dok će u stvarnosti ona biti dugačka i čime će izravno ugrožavati stanje strukture. Iz tih razloga kod tehnike prozračivanja je potrebno ponavljati snimanja iz više kutova ako se sumnja na nastanak takvih pukotina. Ovaj se problem javlja također i kod 2-D snimanja raspršenim zračenjem, kod kojeg također ne možemo otkriti dubinu nepravilnosti, a to je omogućeno u 3-D tehnici.

### 3.3. Utjecaj detektora rendgenskog zračenja

Glavna prednost tehnike raspršenog zračenja nad tehnikom prozračivanja je položaj detektora koji se nalazi na istoj strani kao i izvor zračenja te nam nije potreban pristup drugoj strani objekta. Kod tehnike raspršenog zračenja materijali sa niskim atomskim brojem su u konačnici na slici prikazani svjetlijim, dok su kod tehnike prozračivanja oni tamniji. U obje tehnike mogu se iskoristiti isti detektori, samo što kod tehnike raspršenog zračenja detektori moraju biti zaštićeni od udara fotona direktno iz izvora. Veličina detektora također je bitan faktor kod rendgenskih snimaka. Kod tehnike prozračivanja što je veći detektor brže će se prikupiti određeni broj raspršenih fotona koji je potreban za snimanje predmeta, dok kod tehnike prozračivanja veličina filma utječe na veličinu predmeta koga možemo snimiti sa samo jednim snimanjem. Svi detektori imaju istu funkciju, a to je pretvorba energije koja dolazi do detektora u neku drugu formu koja je prihvatljivija ljudskoj percepciji. Rendgenske

zrake se mogu detektirati uz pomoć različitih detektora koji koriste različite metode registracije difrakcije slika, pa tako detektori mogu biti:

- fotografski film
- elektroničke fotoosjetljive ploče
- digitalni detektori

### **3.3.1 Filmska radiografija**

U nekim literaturama se navodi kao klasična radiografija, a označava metodu radiografskog snimanja pri kojem se koristi jednokratni film na koji je nanosena emulzija koja sadrži kristale srebrovog klorida i srebrovog bromida, osjetljivih na zračenje. Film se postavlja s druge strane objekta i na njemu zračenje ostavlja otisak predmeta koji zovemo latentna slika i ona nama nije vidljiva. Da bi postala vidljiva i upotrebljiva, film se treba razviti postupkom kemijskog razvijanja u mračnoj prostoriji ručno ili automatiziranim procesima. Ukoliko se film prije razvijanja izloži direktnoj svjetlosti on se osvijetli i snimka koja je nastala zračenjem X ili gama zraka ne može se više iskoristiti. Ova vrsta radiografije je i dalje u širokoj upotrebi i bila je dominantna dugi niz godina, no glavni nedostatak joj je dugotrajan postupak razvijanja filma i cijena takvog postupka za svakodnevnu primjenu, a filmovi se nakon razvijanja ne mogu upotrijebiti ponovno, ostaju takvi kakvi su snimljeni i ako snimka ne valja bacaju se, što ponovno povećava cijenu postupka. Prednost je što je za izradu nekoliko snimaka ili manje serije mnogostruko jeftinije razviti nekoliko filmova nego kupovati skupu opremu.

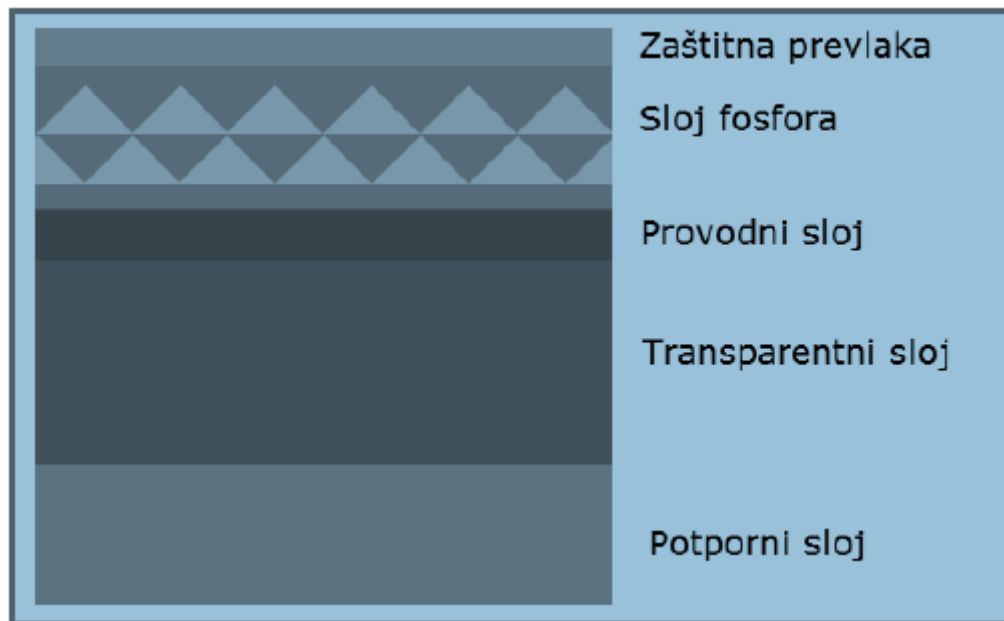
### **2.3.2. Računalna radiografija**

Pojavom računala radiografija je znatno ubrzana te se u računalnoj radiografiji umjesto filma s emulzijom koristi film na koji je nanosen sloj foto osjetljivog fosfora. Ključni elementi sustava računalne radiografije su:

- slikovne ploče
- skener za očitavanje eksponiranih slikovnih ploča
- računalo s odgovarajućim grafičkim podsustavom i monitorom za prikaz, analizu i interpretaciju radiografskih slikovnih zapisa

Film je zaštićen u kazeti ili kartonskoj oblozi da se zaštiti od okolne svjetlosti (iako ako ga se izvadi neće trenutno biti uništen već se s njim može minutu - dvije rukovati). Nakon snimanja, kazeta se stavlja u digitalni laserski skener ili se film vadi iz kartonske obloge i ručno stavlja na skener koji skenira film i pretvara sliku na njemu u digitalni signal koji analizira software i daje prikaz na ekranu. Snimka je na raspolaganju za prikaz već nekoliko

minuta nakon snimanja, što nije bio slučaj kod klasične, filmske radiografije. Prikaz na računalu se može obrađivati, približavati, udaljavati, može mu se mijenjati kontrast i druge slične opcije koje nude softverski paketi, čime se može pregledavati snimka i tražiti prikaz na kojem se najbolje vide detalji koji su od interesa. Filmovi korišteni u računalnoj radiografiji se teoretski mogu koristiti više tisuća puta jer izlaganje filma sobnoj svjetlosti na nekoliko minuta resetira film, a većina današnjih skenera već nakon skeniranja pobriše sadržaj na filmu tako da kad ga se izvadi iz skenera može ga se već ponovno upotrebljavati.



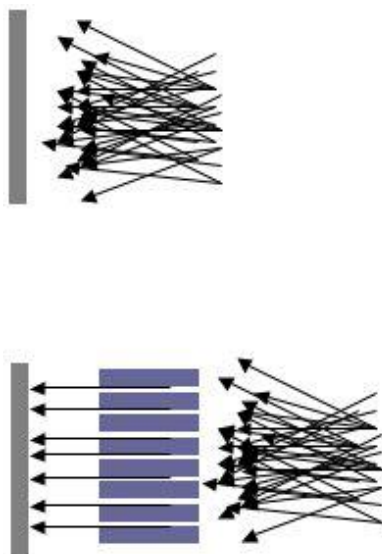
Slika 3.9. Slikovna ploča [12]

Njihova prednost u odnosu na filmove je u barem deset puta većoj osjetljivosti, a također im je i dinamičko područje mnogo šire. To znači da se čitavo područje od slabih do vrlo jakih refleksa može mjeriti na istoj ploči i da se refleksi mogu pouzdano registrirati za vrijeme iste ekspozicije

### 3.3.3. Radiografija u realnom vremenu(RTR)

Idealan slučaj u radiografiji je nula vremena čekanja na prikaz slike i to se može postići sustavom za radiografiju u realnom vremenu ili *Real Time Radiography*. Kontinuirani snop zračenja obasjava predmet koji se snima, a s druge strane predmeta je ploča presvučena fluorescentnim materijalom koji odaje svjetlo kako zračenje pada na njega. Senzori hvataju proizvedenu svjetlost i pretvaraju je u sliku koja je "pozitiv", za razliku od filmske i računalne radiografije gdje je dobiveni prikaz "negativ". To znači da su u RTR-u tamnija područja deblja, a svjetlija tanja, dok je kod filmske i računalne radiografije obrnuta situacija, tj. tamnija područja su tanja, a svjetlija su deblja.

### 3.3.4. Utjecaj kolimatora na raspršene fotone



Slika 3.10. Funkcija kolimatora ispred detektora[7]

Da nemamo kolimatora postoji mogućnost kao što je na slici prikazano da zraka koja je došla iz gornjeg dijela snimanog objekta završi na donjem dijelu snimke. Time će slika biti nejasna i beskorisna. Kolimator ispred detektora omogućuje da fotoni udaraju na pravo mjesto na ploči te tako stvaraju jasnu sliku.

## 4. Mogućnost primjene tehnike raspršenog zračenja u ne razornim ispitivanjima materijala

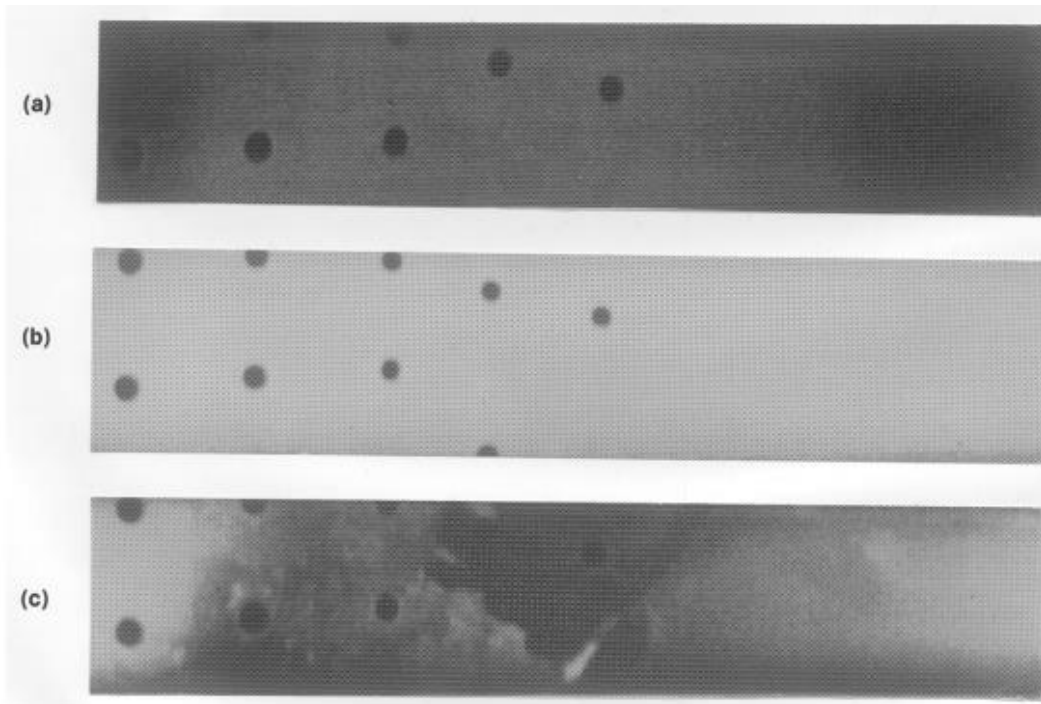
Metoda raspršenog zračenja predstavlja napredak u radiografskom ispitivanju pri nerazornim ispitivanjima i kontroli kvalitete. Radiografija kao metoda nerazornih ispitivanja se pokazala kao višestruko korisna u mnogim slučajevima, a u zrakoplovstvu je zastupljena u velikoj mjeri upravo zbog potrebe stalnih pregleda zrakoplova kako se nebi neko sitno oštećenje pretvorilo u ogroman trošak za zrakoplovne kompanije. Zbog svojih svojstava i načina rada opisanih u prethodnim poglavljima radiografijom se mogu uočiti mnogi detalji skriveni u konstrukciji: korozija između spojeva, sitne pukotine na rubovima provrta za zakovice i vijke, pukotine u unutrašnjosti materijala nastale naprezanjima uslijed dugotrajne izloženosti promjeni tlakova (tlak na visini i tlak na zemlji)[8]. Glavna prednost ove tehnike je ta što se senzori nalaze na istoj strani kao i izvor zračenja te se koristi pri snimanju ako ne možemo pristupiti drugoj strani predmeta snimanja. pošto je manja energija radijacije manja je opasnost od utjecaja na zdravlje osoba, tj. manje je područje koje treba označiti kao nepristupačno u vrijeme ispitivanja. Iz stručne prakse koju sam odradio znam da se tijekom ispitivanja tehnikom prozračivanja ograničava pristup osoblju na cijele hangare, što u slučaju korištenja tehnike raspršenog zračenja ne bi bilo potrebno. Nedostatak je u brzini snimanja, koja ovisi o veličini opreme i o željenoj kvaliteti

### 4.1. Ispitivanje prisutnosti korozije

Pomoću tehnike raspršenog zračenja može se istražiti prisutnost korozije u aluminijskim dijelovima zrakoplova. Tehnika se zasniva na različitosti u volumenskoj gustoći elektrona između korozije i aluminijskog materijala. Volumenska gustoća elektrona korozije je manja od aluminijskog materijala, te je intenzitet raspršenog zračenja manji. Nedostatak radiografije je nemogućnost otkrivanja sitnih oštećenja u njihovoj inicijalnoj fazi nastanka, tijekom početnog djelovanja korozije.



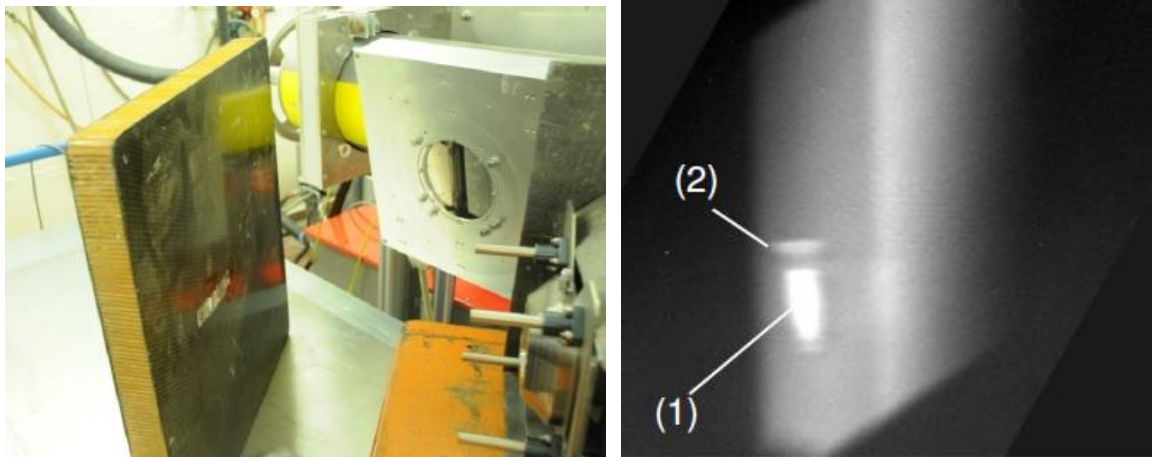
Slika 4.1. Uređaj za rendgensko snimanje tehnikom raspršenog zračenja [8]



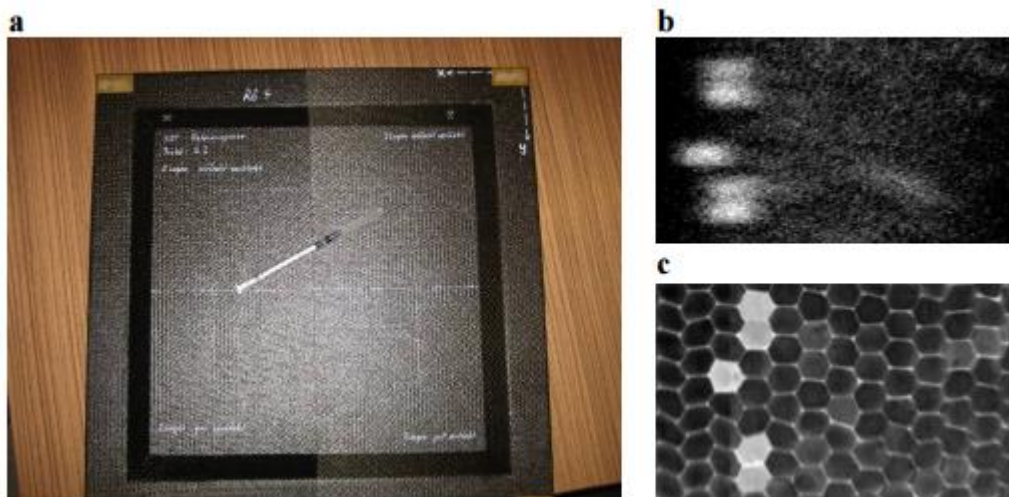
Slika 4.2 Ispitivanje korozije u aluminijskoj oplati[9]

Na slici su prikazana tri uzorka debljina 0.8 mm, uzorak a je sa vanjskog djela oplate zrakoplova debljine 3 mm, uzorak b je iz sredine oplate zrakoplova, dok je uzorak c iz stražnjeg dijela oplate. Uzorci su snimani 3D tehnologijom te su na taj način dobivene snimke sa različitih sa različitih dubina oplate. Uzorak b je svjetliji jer ispitni volumen se nalazi samo u području aluminija, dok u uzorcima a i b imamo i prisutstvo zraka. Na uzorku c možemo uočiti kako je došlo do stanjenja oplate uslijed korozije. [9]

#### 4.2. Ispitivanje prisutnosti vode u saćastim kompozitima



Slika 4.3 Upotreba tehnike raspršenog zračenja sa digitalnim detektorom pri ispitivanju vode u kompozitnim saćama. 1-voda, 2-poliester [13]



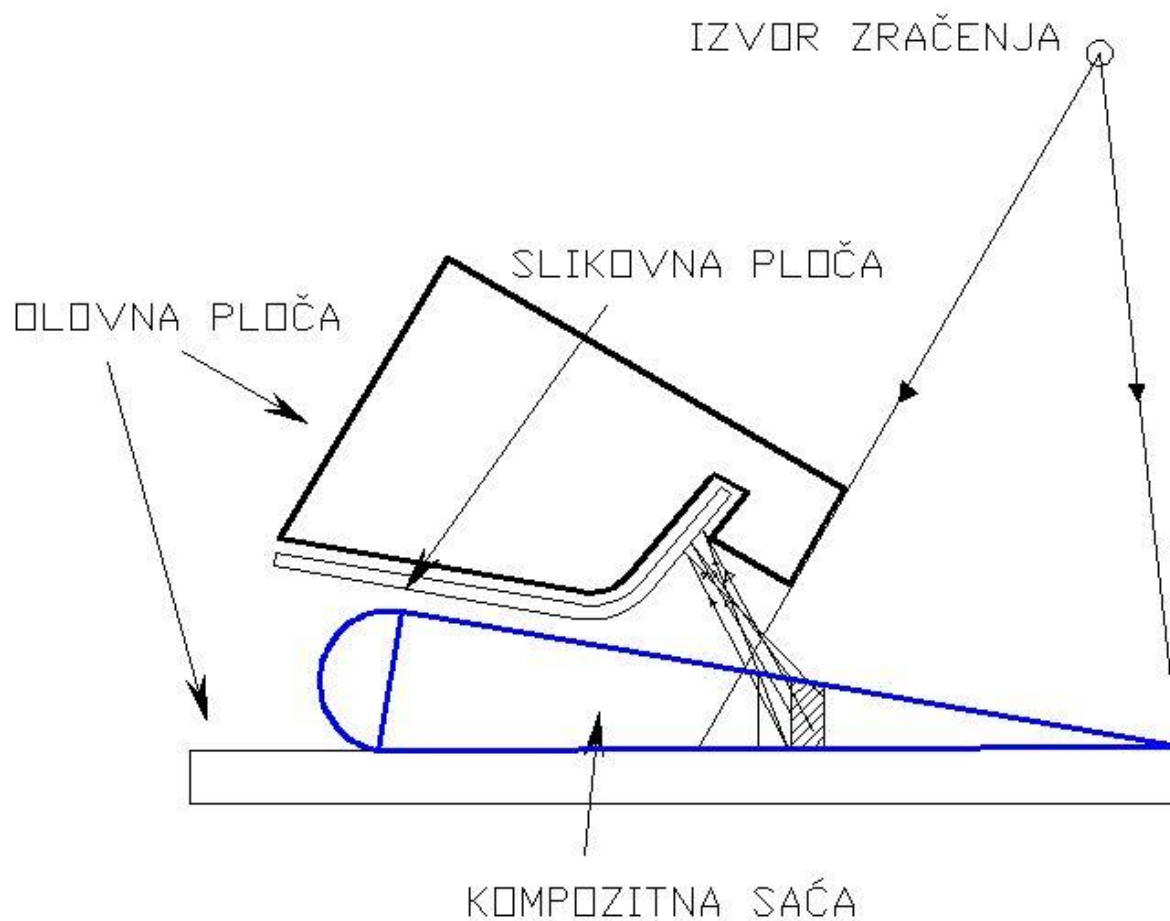
Slika 4.4. Snimka saće tehnikom raspršenog zračenja(b) i tehnikom prozračivanja(c) [13]

Sa slike primjećujemo razliku u kontrastu između vode i kompozita, pošto voda ima manji atomski broj raspršit će veći broj fotona do detektora te će prikaz vode biti svjetliji od kompozita. [10]



## 5. ISPITIVANJE PRISUTNOSTI VODE U SAĆASTIM KOMPOZITNIM KONSTRUKCIJAMA POMOĆU SUSTAVA ZA RAČUNALNU RADIOGRAFIJU

Pošto je određivanje vode u saćastim konstrukcijama problem kod kojeg želimo dobiti samo potvrdu o eventualnoj prisutnosti vode i njenoj približnoj poziciji, a nije nam bitna savršena kvaliteta slike možemo biti zadovoljni sa slabijom kvalitetom slike koja nastaje tehnikom raspršenog zračenja. Prisutnost vode u saćama očituje se u različitosti inteziteta broja raspršenih fotona između vode i prazne kompozitne saće. Zbog nesofisticiranosti opreme nismo u mogućnosti izvršiti snimanje materijala, ali je moguće predložiti postav. Kao što je iz ostalih eksperimenata utvrđeno kako bi imali čim veći broj fotona koji se reflektiraju u materijalu trebamo koristiti energije fotona između 100 i 250 keV. Pošto u upotrebi imamo rendgenski uređaj bez kolimatora moramo zaštititi film od direktnog zračenja iz izvora. Olovna ploča treba biti postavljena na način da u potpunosti štiti film od izvora. Kako pri ovom ispitivanju nemam kolimator, teško da ćemo uvidjeti na slici točan položaj vode u saći, ali ćemo moći uočiti razliku između saće u kojoj je voda i u kojoj nije, jer će se fotoni više raspršiti na vodi te će se to moći uočiti na slici. Nažalost to nismo u mogućnosti potvrditi snimkama zbog tehničkih ograničenja. Kod 2-D snimanja, raspršene zrake dolaze pod različitim kutovima do detektora te nije od velikog utjecaja hoćemo li staviti kut između detektora na 130 ili 150 stupnjeva, bitno je da se on nalazi u tom rasponu, jer je u tom rasponu najveći broj raspršenih zraka. Detektor je slikovna ploča koja se nalazi u neposrednoj blizini predmeta ispitivanja kako bi lokalizirali to raspršeno zračenje na manju površinu. U slučaju da je detektor udaljen tijekom skeniranja bi dobili raspršenje zraka po cijeloj ploči, a kada bi krenuli u daljnje skeniranje ponovo bi se fotoni raspršili po cijeloj ploči te tako nebi dobili nikakav prikaz predmeta. Iz tog razloga film postavljamo čim bliže predmetu snimanja. Olovne ploče je potrebno postaviti još ispod predmeta snimanja kako nebi došlo do raspršenja zračenja od materijala koji se nalazi ispod predmeta ispitivanja. Vrijeme ispitivanja pojedinog dijela predmeta iznosi 1000s kao i kod ostalih sličnih ispitivanja tehnikom raspršenog zračenja.



Slika 5.1. Skica predloženog postava

Sustav se sastoji od izvora zračenja, predmeta snimanja, slikovne ploče te dvije olovne ploče.

## 6.ZAKLJUČAK

Tehnika raspršenog zračenja je rendgenska metoda nerazornog ispitivanja materijala. Kao što je utvrđeno, njena glavna prednost je položaj izvora zračenja i detektora na istoj strani ispitnog objekta. Pogodna je za ispitivanje materijala niskog atomskog broja kao što su kompoziti i organski materijali koji imaju veliki koeficijent raspršenja. Tehnika dvodimenzionalnog i trodimenzionalnog snimanja je složena te je potrebno veliko tehničko znanje u optimiziranju sustava. Za trodimenzionalnu tehniku su razvijeni razni softweri koji jse baziraju na Monte Carlo simulaciji kako bi što lakše odredili parametre snimanja. Nedostatak tehnike je i vremenska duljina trajanja ispitivanja objekta, naime pošto se tehnika bazira na „skeniranju“ potrebno je svaki dio objekta snimanja zračiti snopom zračenja određene veličine, određeno vremensko razdoblje. Pošto se pri tehnici snimanja raspršenim zračenjem koriste niže energije X zračenja ona je uvelike sigurnija za primjenu od tehnike prozračivanja. [9] Toliko je sigurnija da su patentirani ručni prijenosni uređaji malih dimenzija sa sustavom za trenutno dobivanje slike u digitalnom zapisu. Tehnika raspršenog zračenja tek u naredno vrijeme doživljava svoju punu primjenu u nerazornom trodimenzionalnom snimanju materijala.

- [https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/industrial\\_radiography\\_image\\_forming\\_techniques\\_english\\_4.pdf](https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/industrial_radiography_image_forming_techniques_english_4.pdf)..... [1]
- [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/interakcija\\_fotona.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/interakcija_fotona.pdf).....[2]
- <http://www.ndtma.org/wp-content/uploads/2014/02/Cass.pdf>.....[3]
- [http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_04\\_29.pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_04_29.pdf).....[4]
- <http://www.uel.br/grupos/gfna/backscattering.pdf>.....[5]
- A. Bonnin, Ph. Duvauchelle, V. Kaftandjian, and J. Giot, new developments in digital x-ray techniques:A simulation tool for scattering imaging.....[6]
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Collimator>.....[7]
- <http://www.par.com/technologies/non-destructive-testing/non-destructive-testing-services/>.....[8]
- <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ct94-11.pdf>.....[9]
- [http://www.icdd.com/resources/axa/vol49/v49\\_02.pdf](http://www.icdd.com/resources/axa/vol49/v49_02.pdf).....[10]
- [http://images.slideplayer.com.br/5/1595566/slides/slide\\_72.jpg](http://images.slideplayer.com.br/5/1595566/slides/slide_72.jpg).....[11]
- General Electric Corporation, Industrial Radiography - Image Forming Techniques.[12]
- [http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_04\\_06.pdf-za](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_04_06.pdf-za).....[13]