

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS  
FAKULTĀTE

FIZIKAS NODAĻA

**ŠĶĪDRA METĀLA PLŪSMAS UN  
KRISTALIZĀCIJAS IZPĒTE AR  
NEITRONU RADIOGRĀFIJU**

MAĢISTRA DARBS

Darba autors: **Reinis Baranovskis**

Studenta apliecības nr.: rb11144

Darba vadītājs: Dr. phys. Ilmārs Grants

Rīga 2019

## ANOTĀCIJA

Darbā pētīta orientētā kristalizācija, izmantojot neinvazīvu attēlveidošanas tehniku - neitronu radiogrāfiju. Rezultāti pirmo reizi atklāj daļiņu iesalšanas procesu metāla sacietēšanas laikā makro izmērā, ir parādīts, ka daļiņu iesalšana tilpumā notiek, kad cietā un šķidrā fāze veido pusšķidru maisījumu. Eksperimenti veikti ar alvu (Sn) taisnstūrveida traukā, kas tiek elektromagnētiski maisīta un orientēti kristalizēta. Informācija par recirkulējošo plūsmu ievākta, izsekojot 355 - 500  $\mu\text{m}$  gadolīnija (Gd) daļiņas, kas vizualizē plūsmas lauku jebkurā laika momentā. Rezultāti liecina, ka metalurģiskās problēmas, piem., cieta materiāla iemaisīšanu kausējumā vai dielektrisku daļiņu vienmērīgā disperģēšana metālu matricas kompozītos, var tikt atrisinātas ar elektromagnētisku iedarbību uz kausējumu, tam esot pusšķidrā stāvoklī.

**Atslēgvārdi:** daļiņu iesalšana, metāla maisīšana, neitronu radiogrāfija, orientētā kristalizācija

## ABSTRACT

Directional solidification of the melt is investigated using a non-invasive imaging technique - neutron radiography. The results reveal the particle trapping in the solidifying melt at macro scale, it is shown that particle solidification in volume can be achieved when liquid and solid phases form a mushy zone. Experiments were performed using a rectangular vessel containing tin (Sn) which was electromagnetically stirred and directionally solidified. Information about the recirculating flow was gathered by tracing 355 - 500  $\mu\text{m}$  gadolinium (Gd) particles which visualize the flow field in any given time. The findings show that metallurgical challenges, e.g. stirring and homogeneously dispersing ceramic reinforcement material in metal matrix composites, could be solved by applying electromagnetic treatment while melt is in a semi-solid state.

**Keywords:** directional solidification, melt stirring, neutron radiography, particle trapping

## APZĪMĒJUMU SARAKSTS

Apzīmējums	Mērvienība	Skaidrojums
MHD	-	Magnetohidrodinamika
PSI	-	Paula Šērera institūts
SINQ	-	<i>Spallation Neutron Source</i>
NEUTRA	-	<i>NEUtron Transmission Radiography</i>
HZDR	-	Helmholca Centrs Drēzdene-Rosendorfa
UDV	-	<i>Ultrasound Doppler Velocimetry</i>
PIV	-	<i>Particle Image Velocimetry</i>
$t$	$s$	Laiks
$f$	$Hz$	Frekvence
$\eta$	$Pa \cdot s$	Dinamiskā viskozitāte
$\nu$	$m^2/s$	Kinemātiskā viskozitāte
$\rho$	$kg/m^3$	Blīvums
$\rho_{\text{šķ}}$	$kg/m^3$	Šķidrums blīvums
$\rho_d$	$kg/m^3$	Daļiņas blīvums
$p$	$Pa$	Spiediens
$\mathbf{g}$	$m^2/s$	Gravitācijas paātrinājums
$\mathbf{u}$	$m/s$	Plūsmas ātrums
$\mathbf{E}$	$V/m$	Elektriskais lauks
$\mathbf{B}$	$T$	Magnētiskā lauka indukcija
$\mathbf{J}$	$A/m^2$	Strāvas blīvums
$\mathbf{A}$	$V \cdot s/m$	Magnētiskais vektorpotenciāls
$q$	$C$	Lādiņš
$\rho_q$	$C/m^3$	Lādiņa blīvums
$\rho_e$	$C/m^3$	Pilnais lādiņa blīvums (brīvie + saistītie lādiņi)
$\tau_e$	$s$	Lādiņa relaksācijas laiks
$l$	$m$	Raksturīgais garums
$\sigma$	$S/m$	Elektriskā vadītspēja
$\delta$	$m$	Skinslāņa biezums
$\Phi$	$V$	Skalārais elektrostatisks potenciāls
$\mu_0$	$H/m$	Magnētiskā caurlaidība vakuamam
$\epsilon_0$	$F/m$	Magnētiskā caurlaidība vakuamam
$I_0$	$n/cm^2$	Neitronu plūsma
$I$	$n/cm^2$	Neitronu plūsma pēc parauga
$\alpha$	$1/cm$	Neitronu absorbcijas koeficients
$d$	$cm$	Parauga biezums

# Saturs

Apzīmējumu saraksts	3
1 Ievads	5
1.1 Aktualitāte	5
1.2 Darba mērķis un uzdevumi	6
1.3 Darba struktūra	6
1.4 Darba autora ieguldījums	6
2 Teorētiskais apraksts	8
2.1 Neitronu starojums, tā raksturīgie parametri	8
2.2 Neitronu stara mijiedarbība ar vielu	10
2.3 Neitronu starojuma detektēšana	12
2.4 Metālu kristalizācija	14
2.5 Galvenie elektromagnētisma un plūsmas vienādojumi	16
3 Literatūras apskats	19
3.1 Neitronu radiogrāfijas vēsture	19
3.2 NEUTRA	19
3.3 Elektriskā un magnētiska lauka ietekme uz kristalizācijas procesu	21
3.4 MHD plūsmas izpēte ar neitronu radiogrāfiju	22
4 Eksperimentālā daļa	24
4.1 Eksperimentālā shēma	24
4.2 Neitronu radiogrāfijas attēlu uzņemšana un apstrādāšana	27
4.3 Ultraskaņa Doplera ātruma (UDV) mērījumi	28
5 Rezultāti un diskusija	31
5.1 Neitronu radiogrāfijas rezultāti	31
5.1.1 Gallija kristalizācija	31
5.1.2 Alvas kristalizācija	33
5.2 Daļiņu izsekošana (PIV)	39
5.3 Ultraskaņa Doplera ātruma (UDV) mērījumi	40
6 Kopsavilkums un secinājumi	43
6.1 Dalība konferencēs un publikācijas	44
6.2 Turpmākie pētījumu virzieni	46
Literatūras saraksts	47
Pateicības	51
Pielikumi	52
1. pielikums. NEUTRA shēma	52
Dokumentārā lapa	53

# 1. IEVADS

## 1.1. Aktualitāte

Tirgus analīze uzrāda, ka pieprasījums pēc augstas veiktspējas sakausējumiem pieaug un pārskatāmā nākotnē šāda tendence turpināsies [1] - [2]. Lielāko pieprasījumu rada industrija - aviācija, naftas un dabasgāzes, auto, elektronikas u.c. nozares, kas meklē lētākos un piemērotākos risinājumus. Tiek pētīti ne tikai jauni sakausējumi, bet arī dažādi sakausējumu ieguves veidi, tādējādi ietekmējot veidotā sakausējuma īpašības.

Kristalizācijas apstākļi metāla ražošanas procesā tieši ietekmē rezultējošā materiāla īpašības, un metālā esošās plūsmas ievērojami ietekmē šos apstākļus. Taču ne visi procesa parametri ir viegli nomērāmi vai aprēķināmi. Tehnoloģiskie procesi, kas saistīti ar karstiem un šķidriem metāliem, ir grūti izpētāmi galvenokārt divu iemeslu dēļ. Pirmkārt, metāli ir necaurspīdīgi redzamās gaismas diapazonā, kas nozīmē, ka vizuālā informācija ir iegūstama tikai par brīvo virsmu. Otrkārt, šķidri metāli ir ķīmiski agresīvi, it īpaši pie augstām temperatūrām. Šie faktori apgrūtina reāllaika metalurģisku procesu izpēti, un tādēļ kausējuma un daļiņu dinamika divfāžu plūsmā ir ne līdz galam izpētīts process, it īpaši, ja tajā pašā laikā notiek materiāla sacietēšana.

Neitronu radiogrāfijas metodes attīstība ir radījusi iespēju pētīt šādas sarežģītas fizikālās sistēmas, modelējot industriālos apstākļus. Šī neinvazīvā metode dod unikālu iespēju "ieskatīties metālā", ko sāka izmantot pēdējā desmitgadē, lai pētītu dinamiskas sistēmas. Arī Latvijas Universitātes pētnieki pēdējos piecos gados ir izmantojuši dinamisko neitronu radiogrāfiju, lai labāk izprastu gan dažādas MHD problēmas, piemēram, plūsmu un daļiņu dinamiku, kas norisinās indukcijas krāsnī. Savukārt šajā maģistra darbā tiek pirmo reizi novērots daļiņu iesalšanas process orientētās kristalizācijas laikā makroskopiskā izmērā. Lai iegūtu kvantitatīvus mērījumus pētāmajai sistēmai un spētu pilnīgāk to raksturot, iegūtie neitronu radiogrāfijas rezultāti ir papildināti ar daļiņu izsekošanas datiem un ultraskaņas Doplera ātruma mērījumiem GaInSn sakausējumā.

## 1.2. Darba mērķis un uzdevumi

**Darba mērķis** ir divfāžu plūsmas eksperimentāla izpēte orientētas kristalizācijas laikā.

**Darba uzdevumi** ir:

- Izstrādāt eksperimentālo iekārtu, kas ļautu pētīt šķidra metāla orientētu kristalizāciju, izmantojot neitronu radiogrāfiju.
- Veikt unikālus dinamiskās neitronu radiogrāfijas eksperimentus, pārbaudot plūsmas ietekmi uz daļiņu iesalšanu orientētas kristalizācijas laikā.
- Veikt plūsmas ātruma mērījumus ar UDV.
- Veikt datu apstrādi, un sniegt rezultātu fizikālo interpretāciju.

## 1.3. Darba struktūra

Lai izprastu rezultātus, kas iegūti ar neitronu radiogrāfiju, vispirms jāizprot, uz kā balstās metode. 2. sadaļā apkopots teorētiskais apraksts neitronu radiogrāfijas metodei, par izejvielu - neitroniem, to mijiedarbību ar vielu un detektoriem. Sadaļā aprakstīti pētāmie fizikālie procesi - kristalizācija un metāla plūsma. Lasītājs 3. sadaļā tiek īsi iepazīstināts ar neitronu radiogrāfijas vēsturi, lai vieglāk spētu salīdzināt ar pašreizējo problēmas izpētes līmeni un tehniskajām iespējām šķidra metāla plūsmas izpētei ar neitronu radiogrāfiju. Eksperimentālajā daļā aprakstīta eksperimentālā iekārta, eksperimenta apstākļi un izmantotās datu iegūšanas un apstrādes metodes, kuras izmanto rezultātu iegūšanai (sk. 4. sadaļā). 5. jeb rezultātu un diskusijas sadaļā tiek prezentēti neitronu radiogrāfijas kvalitatīvie rezultāti gallija (Ga) un alvas (Sn) kristalizācijai. Tiek veikta kvantitatīva analīze, veicot frontes augstuma un ātruma mērījumus, kas tālāk salīdzināti ar literatūrā pieejamiem pētījumiem. Aprakstīti veiktie daļiņu izsekošanas un metāla plūsmas ātruma mērījumu rezultāti. Iegūto rezultātu kopsavilkums un potenciālais pielietojums aktuālo tehnoloģisko problēmu risināšanai, kā arī turpmākie pētījumi virzieni apkopoti 6. sadaļā.

## 1.4. Darba autora ieguldījums

Šis darbs ir daļa no starptautiska pētījuma, kas īstenots, sadarbojoties LU FI MHD tehnoloģiju laboratorijai (LUF I MHD TL), LU Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorijai (LU VPTMML), Helmholca Centram Drēzdene Rosendorfa

(HZDR) un Paula Šēra institūtam (PSI), Šveicē. VPTMML veica projekta koordinēšanu un skaitlisko modeļu izstrādi, FI MHDTL veica eksperimentālās iekārtas izstrādi un eksperimenta veikšanu, HDZR tika veikta ultraskaņas Doplera plūsmas ātruma mērījumi un PSI deva piekļuvi neitronu avotam SINQ, kurā tika veikta dinamiskā neitronu radiogrāfija ar instrumentu NEUTRA. Darba autors veica:

- Literatūras izpēti, kas nepieciešama eksperimenta realizēšanai, kā arī iegūto rezultātu interpretēšanai un publicēšanai.
- Eksperimentālās iekārtas izstrādi, konkrēti eksperimentālās iekārtas uzlabošanu orientētās kristalizācijas realizēšanai.
- Eksperimentālās iekārtas testus un kalibrāciju pirms došanās uz PSI.
- Specializētu gadolīnija saturošu daļiņu izgatavošanu.
- Ultraskaņas Doplera plūsmas ātruma mērījumus Helmholca Centrā Drēzdenē Rosendorfa (HZDR) un iegūto datu apstrādi.
- Dinamiskās neitronu radiogrāfijas eksperimentus Paula Šēra institūtā, kas ietver eksperimentālās iekārtas uzstādīšanu un datu ievākšanu, izmantojot SINQ instrumentu NEUTRA.
- Iegūto datu šķirošanu un apstrādi. Kopā tika uzņemti ~100 000 attēli, kurus autors izšķiroja, apstrādāja un konvertēja.
- Iegūto rezultātu prezentēšanu starptautiskā konferencē un publicēšanu zinātniskā žurnālā.

## 2. TEORĒTISKAIS APRAKSTS

### 2.1. Neitronu starojums, tā raksturīgie parametri

Par spīti tam, ka neitroni ir ļoti stabili, kad tie ir saistīti atoma kodolā, brīvie neitroni nav stabili, to vidējais pussabrukšanas periods ir 885.7 s jeb aptuveni 15 minūtes. Tas ir pietiekami, lai neitrons mijiedarbotos ar pētāmo materiālu un varētu veikt mērījumus. Neitroniem notiek beta sabrukšana (2.1), kuras rezultātā rodas protons, elektrons un elektronu antineitrīno.



Neitroni ir daļiņas bez lādiņa, līdz ar to tie nemijiedarbojas ar elektroniem atomā, bet tikai ar pašu atoma kodolu. Tas nozīmē, ka neitronam, kurš pārvietojas vidē, ir vai nu jātrāpa pašā kodolā vai trajektorijai jābūt pietiekami tuvu kodolam, lai ar to notiktu mijiedarbība. Neitrona gadījumā elektromagnētiskā mijiedarbība nenotiek, līdz ar to dominējošais ir stiprais spēks. Tas ir stiprākais no fundamentālajiem spēkiem, taču tā iedarbības zona ir tikai daži femtometri, jo spēks dilst eksponenciāli atkarībā no attāluma. Ņemot vērā, ka kodola izmērs ir ļoti mazs ( $\sim 10^{-15}..10^{-14} m$ ), ir saprotams, ka neitroniem ir zema sadursmes varbūtība, tādējādi garš brīvais noskrējienis. Ja neitrons trāpa pašā kodolā, ir iespējama absorbcija – rodas nestabils kodols, un var tikt izsisti neitroni, protoni un citi kodola fragmenti. Otrs mijiedarbības veids ir neelastīgā izkliede, kad neitrons atsitās pret kodolu. Iespējamās mijiedarbības scenārijus var aprakstīt ar varbūtībām, izmantojot kodola efektīvo šķērsgriezumu  $\sigma$ . Tas raksturo iespējamību notikt kodolreakcijai, un tam ir laukuma mērvienība. Parasti tas tiek mērīts barnos [b].  $1b = 10^{-28} m^2$ , kas ir aptuvenais šķērsgriezuma laukums urāna kodolam.

2.1. tabula

#### Neitronu enerģijas un temperatūras diapazonu sakarība

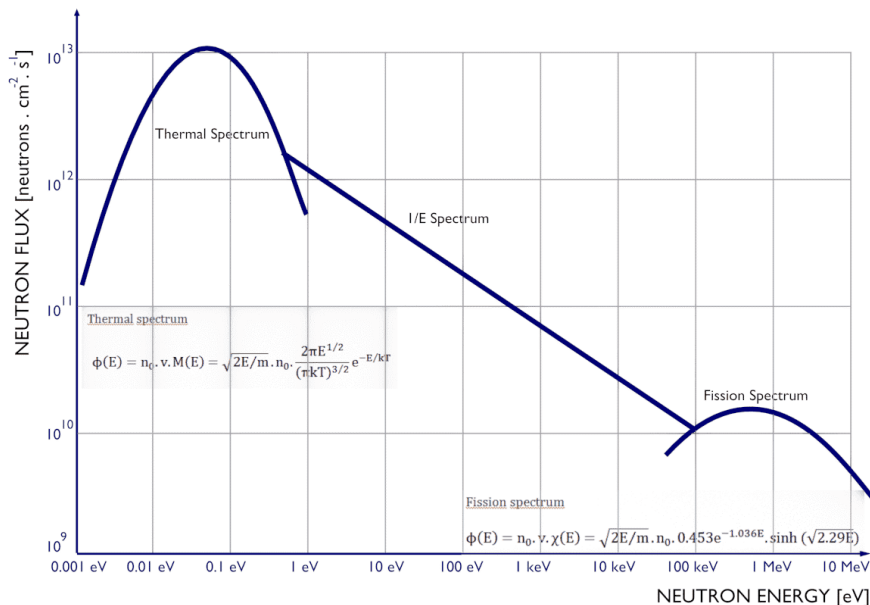
Neitronu enerģija	Enerģijas diapazons
0.0-0.025 eV	Aukstie neitroni
0.025 eV	Termālie neitroni
0.025-0.4 eV	Epitermālie neitroni
0.4-0.6 eV	Kadmija neitroni
0.6-1 eV	Epi-kadmija neitroni
1-10 eV	Lēnie neitroni
10-300 eV	Rezonanses neitroni
300 eV - 1 MeV	Vidējie neitroni
1-20 MeV	Ātrie neitroni
>20 MeV	Ultrarelatīvistiskie neitroni

Brīvajiem elektroniem piemīt kinētiskā enerģija, kuru dēvē par neitronu temperatūru. Neitronu enerģija parasti ir izteikta elektronvoltos, taču enerģijas diapazona apzīmēšanai izmanto terminu “temperatūra”, kas ir cēlies no atbilstošā diapazona moderējošā materiāla (sk. 2.1. tabulu). Piemēram, kadmija moderatorus izmanto pie enerģijām, kas ir robežās no 0.4 līdz 0.6 eV, tāpēc neitronus ar šādu enerģiju dēvē par kadmija neitroniem. Tā kā neitronu radiogrāfijā izmanto ātros neitronus, kas “atdzisuši” līdz termālo elektronu enerģijai, tad turpmākajās rindkopās sīkāk aprakstīti termālie un ātrie neitronu, kuru enerģijas shematiski ir parādītas attēla 2.1.

Termālie neitroni – neitroni ar enerģiju, kas veido Maksvela-Bolcmaņa sadalījumu (2.2) ar visvarbūtīgāko vērtību 0.025 eV pie  $T = 20^\circ \text{C}$ . Tas atbilst 2.2 km/s lielam kustības ātrumam. Salīdzinājumā ar ātrajiem neitroniem termālajiem neitroniem ir daudz lielāks efektīvais šķērsgriezums. Tieši tāpēc kodolreaktoros tiek izmantoti neitronu moderatori, kas neitronus nobremzē efektīvā šķērsgriezuma palielināšanai (izņemot jaunākajos ātro neitronu reaktoros).

$$f(p) = \frac{1}{(2\pi kT)^{3/2}} p^2 e^{-\frac{p^2}{2mkT}} \quad (2.2)$$

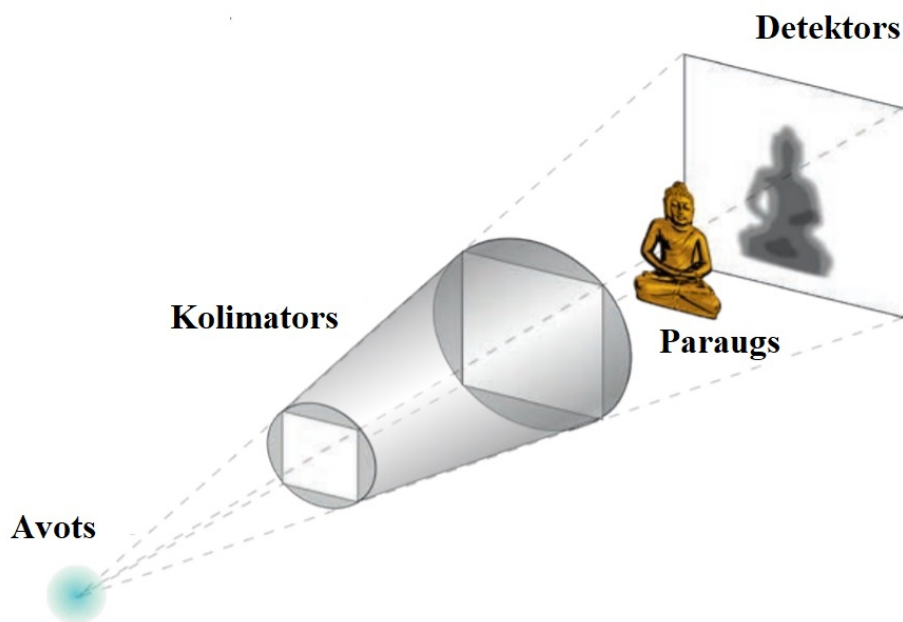
Par “ātrajiem” sauc neitronus ar kinētisko enerģiju no 1 MeV līdz 20 MeV, kas atbilst ātrumiem, kas ir lielāki par 14 000 km/s. Šādas enerģijas piemīt neitroniem, kas radušies kodoldalīšanās, kodolsintēzes un spontānās dalīšanās reakcijās. Kodolenerģijas ieguvei šādas enerģijas neitroni ir par ātru, tāpēc izmanto moderējošus materiālus, piemēram, smago ūdeni, parasto ūdeni un grafitu, lai neitronu enerģiju samazinātu līdz termālo neitronu enerģijām. Arī pētniecībai izmanto zemākas enerģijas neitronus.



2.1. attēls: Neitronu plūsmas atkarība no enerģijas dažādiem neitronu avotiem [3]

## 2.2. Neitronu stara mijiedarbība ar vielu

Visas radiogrāfijas metodes, neatkarīgi no tā, vai tiek izmantoti rentgenstari, gamma stari vai neitroni, ir balstītas uz vienu principu: radiācijai izplatoties cauri dažādiem materiāliem, tā tiek nevienmērīgi absorbēta [4]. Pētāmais objekts tiek novietots stara ceļā, un pēc objekta šķērsošanas detektors piefiksē starojuma daudzumu, kas nav ticis absorbēts, bet ir izgājis cauri (sk. 2.2. attēlu).



2.2. attēls: Radiogrāfijas metodes shēma. Kolimators rada taisnu kūli

Jebkura objekta nevienādība vai defekts (piemēram, plaisas, poras, ieslēgumi) detektoros tiks attēlots kā apgabals ar atšķirīgu intensitāti. Radiogrāfijas izmantošana materiālu pētīšanai balstās uz starojuma mijiedarbības atšķirībām dažādiem ķīmiskajiem elementiem, kas ir pētāmo materiālu sastāvā. Absorbcijas koeficients  $\alpha$  ir atkarīgs no atoma kodolā esošā neitronu un protonu skaita. Stara intensitāti pēc iziešanas caur materiālu ar biezumu  $d$  un absorbcijas koeficientu  $\alpha$  var aprakstīt ar vienādojumu (2.3):

$$I = I_0 e^{-\Sigma \alpha_i d_i} \quad (2.3)$$

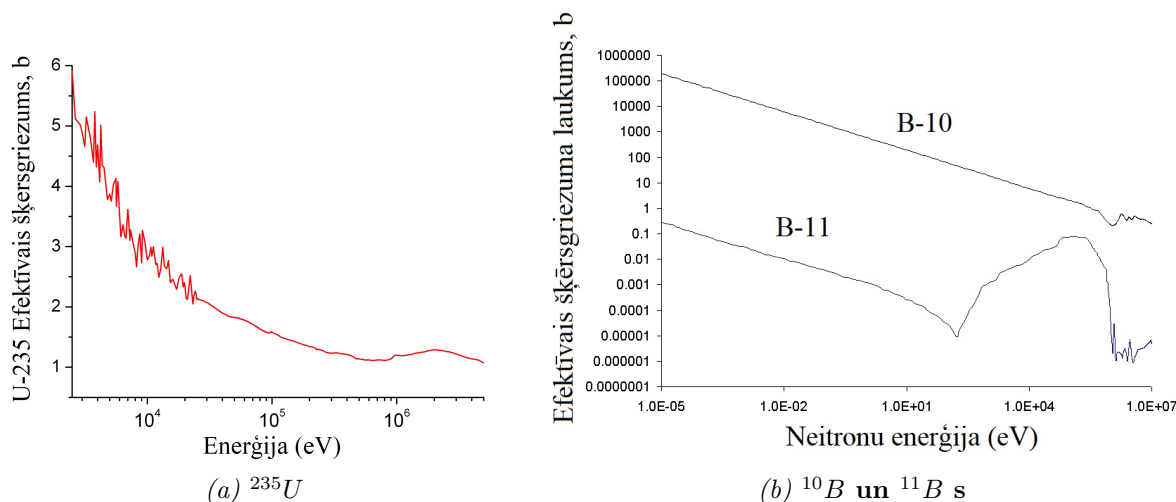
Tātad sākotnējā starojuma intensitāte  $I_0$  eksponenciāli dilst, ejot cauri materiālam, un materiāla absorbcijas koeficients  $\alpha$  ir dilšanas konstante. Dažādiem ķīmiskajiem elementiem šis absorbcijas koeficients ir atšķirīgs, un tas ir atspoguļots 2.3. attēlā, kurā salīdzina termālo neitronu un rentgena starojumu. Šeit ir ļoti svarīgi atzīmēt gan absolūto absorbcijas vērtību dažādiem elementiem, gan absorbcijas atkarību, pieaugot atomnumuram. Pirmkārt, starpība absorbcijas koeficientos nozīmē, ka dažādus materiālus, kuri



nelaiž cauri rentgenstarojumu, var pētīt ar neitronu palīdzību. Piemēram, svins, volframs un urāns ir praktiski necaurspīdīgi rentgena diapazonā, bet relatīvi viegli pētāmi ar neitronu palīdzību (sk. 2.4. attēlu). Otrkārt, eksistē gadījumi, kad pētāmais objekts sastāv no vairākiem ķīmiskajiem elementiem ar ļoti līdzīgām rentgenstarojuma absorbēšanas spējām. Tas nozīmē, ka starp šiem elementiem nebūs kontrasta attēlos, kas uzņemti ar rentgenstarojumu, taču neitronu mijiedarbības mehānisms ir cits, un pastāv iespēja šos elementus izšķirt ar neitronu radiogrāfijas palīdzību.

Efektīvais šķērsriezuma laukums ir atkarīgs no neitronu enerģijas. Piemēram, urāna  $^{235}\text{U}$  (kodolreaktoru degviela) efektīvais šķērsriezuma laukums ir attēlots 2.5(a). attēlā, var novērot, ka termālo un ātro neitronu efektīvais šķērsriezuma laukums var atšķirties pat sešas reizes. Ir redzams, ka pie lielām enerģijām šķērsriezuma laukums tiecas uz vienu barnu, kas pēc definīcijas (sk. 2.1. sadaļu) ir aptuvenais urāna kodola šķērsriezuma laukums. Tas ir skaidrojams ar to, ka pie lieliem ātrumiem neitrons tiek absorbēts/izkliedēt tikai tad, ja tas trāpa atoma kodolam, bet pie maziem ātrumiem stipri spēki, ko rada mijiedarbība ar kodolu, palielina efektīvo šķērsriezuma laukumu.

Pat vienam ķīmiskajam elementam izotopu dēļ ir novērojama liela atšķirība efektīvajā šķērsriezuma laukumā (sk. 2.5(b). attēlā). Piemēram, ir redzamas, ka viena papildus neitrona esamība, salīdzinot  $^{10}\text{B}$  un  $^{11}\text{B}$ , rada absorbcijas atšķirību līdz pat  $10^5$  reizēm!



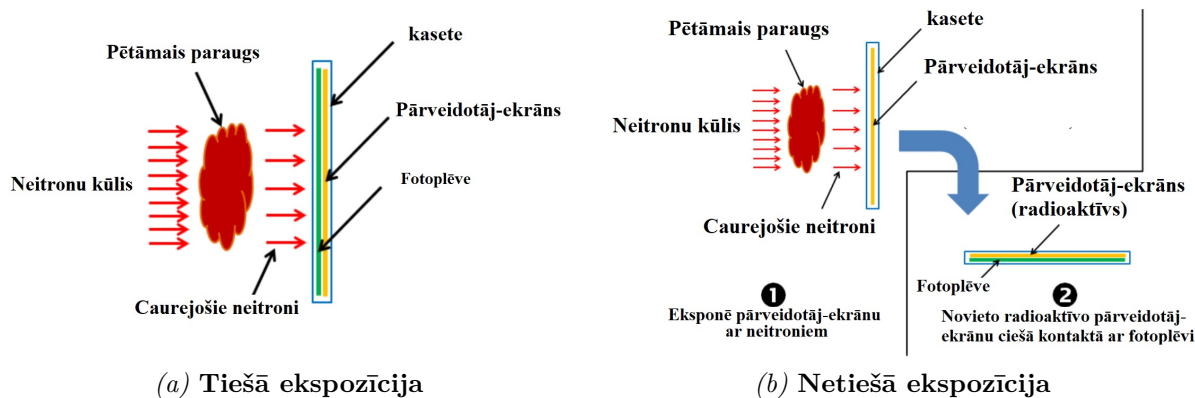
2.5. attēls: (a)  $^{235}\text{U}$ , (b)  $^{10}\text{B}$  un  $^{11}\text{B}$  efektīvais šķērsriezuma laukums atkarībā no neitronu enerģijas, kas mērīts barnos [7]

### 2.3. Neitronu starojuma detektēšana

Informācijas iegūšana ir kritisks posms mērīšanas procesā, un tas notiek pēc tam, kad stars ir šķērsojis paraugu un nonācis detektorā. Nepieciešamās enerģijas neitronus,

maksimālo izšķirtspēju, minimālo ekspozīcijas laiku un pašu pētīšanas veidu (2D vai 3D attēls) nosaka neitronu starojuma detektori. Iespējamie detektoru veidi, īpašības un darbības princips ir sīkāk aprakstīti šajā sadaļā.

Fotoplēves ir viena no senākajām neitronu uzņemšanas metodēm. Attēls tiek iegūts uz plēves, kas ir jūtīga neitronu starojumam. Fotoplēves izmantošana iedalās divos veidos – tiešās ekspozīcijas metode (sk. 2.6(a). attēlā) un pārnese metode (sk. 2.6(b). attēlā). Tiešās metodes gadījumā neitroni apstaro slāni, ko sauc par pārveidotāju ekrānu. Tas absorbē neitronu un rada cita veida starojumu (gamma starojumu vai elektronus), ko uztver ar nākamo fotoplēves slāni. Pārveidotājekrāna materiāls tiek izvēlēts tā, lai to ir viegli aktivēt un lai tas viegli emitētu starojumu. Netiešajā pārnese metodē pārveidotājekrāns tiek novietots pie fotoplēves vēlāk pēc apstarošanas. Abos gadījumos šīs plēves ir iespējams digitalizēt. Procesa specifikas dēļ metode ir piemērota, ja nepieciešams uzņemt tikai dažus attēlus ar ilgu ekspozīcijas laiku.

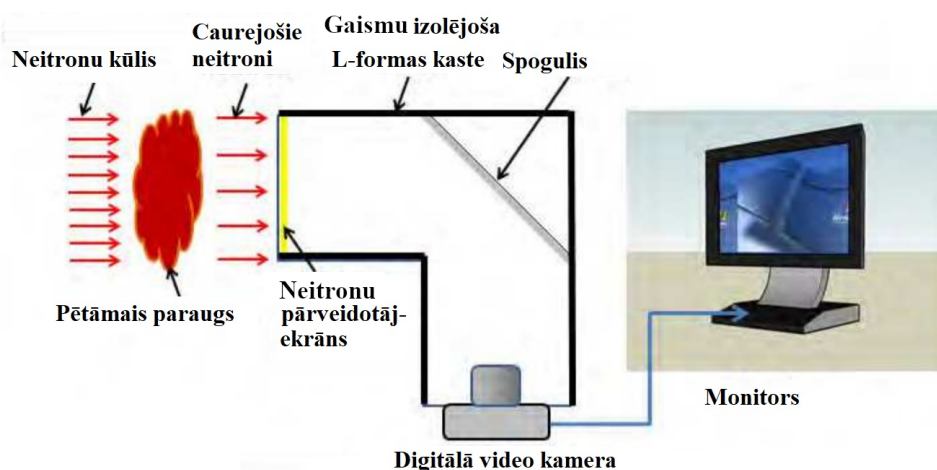


2.6. attēls: (a) tiešā ekspozīcijas un (b) netiešā divu soļu ekspozīcijas metode jeb pārnese metode [8]

Attēlveidošanas plates izmanto gadolīniju (Gd) kā neitronu absorbētāju. Apstarots Gd emitē elektronus, kuri apstaro industriālu rentgena fotoplēvi [8]. Tāpat kā tiešajā ekspozīcijas metodē, arī netiešajā ir jāveic attēlu digitalizācija. To dara ar plašu skeneri, kurš uzņem ierosinātas plates spektru. Šī metode dod iespēju ierakstīt attēlu par kārtu ātrāk nekā fotoplēves, un, piemēram, 2007. gadā Fuji nāca klajā ar Gd piesātinātu plati, kas kvalitātes ziņā spēj sasniegt samērojamus rezultātus ar fotoplēvēm, tajā pašā laikā samazinot ekspozīcijas laiku 50x reizes. Vēl arī eksistē pārveidotājekrāni, kas neitronu starojumu pārvērš alfa starojumā. Tālāk ir nepieciešams slānis, kas uztver alfa starojumu, ko sauc par *track-etch film*, jo attēla attīstīšanas stadijā tiek pielietota kodināšana (*etching*).

Dinamiskajām attēlveidošanas sistēmām ir nepieciešami īsāki ekspozīcijas laiki par minūtēm un sekundēm. Tādēļ ir nepieciešams izmantot pārveidotājekrānus, kas spēj ātri reaģēt uz izmaiņām starojumā. Dažādi daļiņu detektori izmanto scintilējošos ekrānus.

Enerģētiskajai daļiņai (elektronam, alfa daļiņai, protonam, neitronam) ejot caur scintilatoram, rodas gaismas signāls. Tas notiek luminiscences dēļ, kad scintilators atdod absorbēto enerģiju. No scintilatoriem caur gaisu vai optiskajiem kabeļiem signāls tiek padots uz CCD kameru, kas to reģistrē. Ar šo metodi ir iespējams iegūt reāllaika attēlus līdz pat 4000 kadriem sekundē [9]. Shematiska metodes ilustrācija ir parādīta attēlā 2.7. Aptumšotā kamera ir L-formas, jo optiskajā sistēmā ir iebūvēts spogulis, kas atstaro elektromagnētisko starojumu kameras virzienā, bet cauri laiž jonizējošo starojumu. Gadījumā ar optiskajiem kabeļiem, to režģis ir izvietots pie paša scintilatora, lai uzlabotu telpisko izšķirtspēju.



2.7. attēls: Reāllaika attēlu uzņemšanas sistēma dinamisko sistēmu pētīšanai [8]

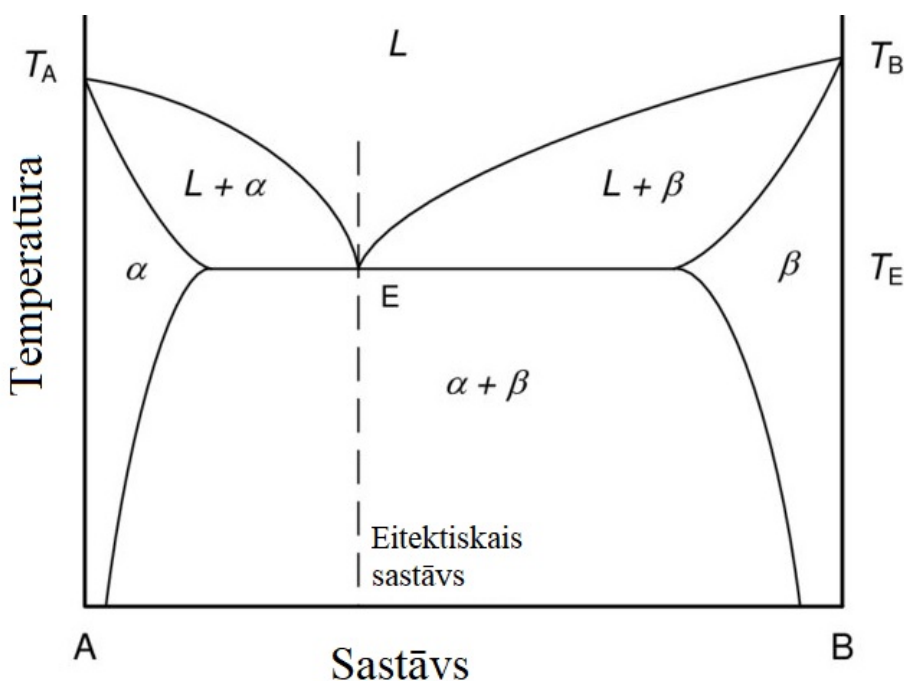
## 2.4. Metālu kristalizācija

Metālu liešana (kristalizācija) ir viens no senākajiem ražošanas procesiem, jo tas ir neaizstājams metālapstrādes posms. Kristalizācija ir materiāla fāžu pāreja no šķidra uz cietu agregātstāvokli, un rezultējošā mikrostruktūra nosaka materiāla mehāniskās īpašības. Kristalizācijas ietekmi uz mikrostruktūru var iedalīt vairākos lieluma mērogos:

1. Makro-mērogs ir diapazonā  $10^{-3} - 10^0$  m. Šādā mērogā ir novērojami tādi defekti kā makrosegregācija, plaisas, virsmas nelīdzenumi, porainība.
2. Mezo-mērogs ir ar kārtu  $10^{-4}$  m. Te ir novērojama mikrosegregācija, porainība un cietie piejaukumi. Svarīgi, ka šādā mērogā ir iespējams novērot dažādus graudu struktūras efektus, piemēram, grauda izmēru un tipu (*columnar* vai *equiaxed*).
3. Mikro-mērogs ir ar kārtu  $10^{-6} - 10^{-5}$  m. Novērojama mikrostruktūra, kas metalogrāfijā apzīmē īpašības, kas redzamas ar optisko mikroskopu.

4. Nano-mērogs ir ar kārtu  $10^{-9}$  m. Šāds izmērs ir ekvivalents atomārai izšķirtspējai.

Šajā darbā kristalizācija, daļiņu iesalšana un maisīšanas efekti tiek aplūkoti makro un mezo mērogā.



2.8. attēls: Bināra eitektiska sakausējuma fāžu diagramma [10].  $\alpha$  un  $\beta$  - Materiāla A un B cietā fāze; L - šķidrā fāze;  $T_A$  un  $T_B$  kušanas temperatūras materiāliem A un B;  $T_E$  - eitektiskā temperatūra

Līdzsvara fāžu diagrammas tiek lietotas, lai raksturotu sakausējuma fāžu pārejas. Aplūkotās sistēmas ir izotermiskas un ar vienādiem ķīmiskajiem potenciāliem. Taču šādi priekšnosacījumi ir spēkā tikai tad, kad sacietēšanas ātrums ir mazāks par difūzijas ātrumu. Šī darba aplūkotajā problēmā eksistē gan temperatūras, gan sastāva gradients, tāpēc sakausējumu ir nepieciešams pārdzesēt, lai tas sāktu kristalizēties. Vispārīgi materiāla agregātstāvokļa maiņa no šķidra uz cieta ir iespējami vairāki mehānismi: [11]:

1. Termālā pārdzesēšana (*Thermal undercooling*), kad sakausējuma temperatūra tiek pazemināta zem kušanas temperatūras. Binārā fāžu diagrammā (sk. attēlu 2.8) atbilstošā transformācija ir gar vertikālo temperatūras asi.
2. Šķīduma pārdzesēšana (*Constitutional undercooling*), kad tiek mainīta sakausējuma molārā attiecība, lai rezultējošā sakausējuma jaunā kušanas temperatūra ir augstāka. Atbilstošā transformācija fāžu diagrammā (sk. attēlu 2.8) ir gar horizontālo sastāva asi.
3. Spiediena pārdzesēšana (*Pressure undercooling*), kad spiediens tiek palielināts tik

daudz, lai materiālam pie tās pašas temperatūras būtu enerģētiski izdevīgāk atrasties cietā stāvoklī.

4. Virsmas liekuma pārdzesēšana (*Curvature undercooling*), kad virsmas spraiguma vai liekuma rādiusa maiņa rada izmaiņu kušanas temperatūrā. Šis efekts ir būtisks mezo un mikro mērogā.
5. Kinētiskā pārdzesēšana (*Kinetic undercooling*), kad notiek atomu transports nano mērogā. Šis efekts metālos maina kušanas temperatūru 0.01..0.05 K apmērā.

Šajā darbā aprakstītajai problēmai aktuāla ir termālā un šķīduma pārdzesēšana. Lai notiktu orientētā kristalizācija, kausējumam tiek atņemta siltumenerģija, līdz tā temperatūra ir nokritusies zem kušanas temperatūras. Eksperimentos siltums tiek atņemts no vienas puses, līdz ar to ir sagaidāma frontes pārvietošanās virzienā, kas ir pretējs siltuma plūsmas virzienam. Dažkārt fronte nav ideāla robežvirsmā starp cieto un šķidro daļu. Pārejot no šķidra agregātstāvokļa cietā, sistēma eksistē divfāžu stāvoklī, kur sacietējuši kristāli ar šķidro kausējumu veido pusšķidro zonu (*mushy zone* vai *slurry* - angļu val.). Atkarībā no apstākļiem šī zona ir aktuāla mezo un makro mērogā. Svarīgākie apstākļi, kas ietekmē pusšķidro zonu un tās biezumu, ir materiāla sastāvs, temperatūras gradients un plūsma pie frontes.

## 2.5. Galvenie elektromagnētisma un plūsmas vienādojumi

Lai izprastu plūsmas dinamiku, kas rodas traukā, ko maisa pastāvīgo magnētu sistēma, ir nepieciešams aplūkot elektromagnētisma un plūsmas dinamikas vienādojumus. Mūsu gadījumā rotējoši pastāvīgie magnēti telpā rada mainīgu magnētisko lauku, kuru vispārīgā gadījumā apraksta Maksvela vienādojumi (2.4) - (2.7).

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_q}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) \quad (2.7)$$

Atbilstoši Faradeja indukcijas likumam (2.6) elektrovadošajā vidē tiek inducētas strāvas. Tas nozīmē, ka mūsu pētāmajā apgabalā vienlaikus eksistē ātruma un strāvas

blīvuma sadalījums. Ir zināms, ka uz kustīgu, lādētu objektu darbojas Lorenca spēks (2.8), kas sastāv no elektriskā un magnētiska lauka radītājiem spēkiem.

$$\mathbf{f} = q(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (2.8)$$

Aprakstot nepārtrauktu vidi, Lorenca spēku var izteikt kā (2.9), kur strāvas blīvums tiek iegūts no Oma likuma (2.10).

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (2.10)$$

Lai saprastu, kurš no saskaitāmajiem Lorenca spēka izteiksmē (2.9) dominē, aplūko to kārtas lielumus. Pirmais saskaitāmais ir  $\rho_e \mathbf{E} \sim \frac{u\tau_e}{l} JB$  [12], kur  $\frac{u\tau_e}{l} JB \sim 10^{-18}$ , tāpēc Lorenca spēkam pilnībā dominē otrais saskaitāmais  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ , un tā rezultātā vienādojums (2.9) reducējas uz (2.11).

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2.11)$$

Strāvai spēkā ir nepārtrauktības vienādojums (2.12), kas izriet no lādiņa nezūdamības likuma. Taču tā kā  $\rho_e$  ir tik mazs, labās puses saskaitāmais  $\frac{\partial \rho_e}{\partial t}$  tiecas uz 0.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{\partial \rho_e}{\partial t} \quad (2.12)$$

Ampēra likums (2.7) arī vienkāršojas, jo mums nav jāņem vērā nobīdes strāvas  $\epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ . Tātad mūsu elektromagnētisma vienādojumu sistēma ir reducēta uz vienādojumiem (2.13).

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{\partial \rho_e}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \\ \mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Ar šo vienādojumu sistēmu ir iespējams aprakstīt visu, ko mēs zinām par elektromagnētismu, kas nepieciešams MHD [12]. Praktiski šo vienādojumu risināšana reālam problēmām notiek ar skaitlisko metožu palīdzību. Ja mēs apvienojam Oma, Faradeja un Apmēra likumus, ir iespējams iegūt sakarību magnētiskajam laukam  $\mathbf{B}$  un plūsmas ātrumam  $\mathbf{u}$ , ko sauc par magnētiskā lauka transporta vienādojumu (2.14). Tas apraksta

magnētiskā lauka izmaiņu laikā, un tā pirmais loceklis ir lauka advektīvā pārnese, kas raksturo, kā elektrovadoša plūsma ar ātrumu  $\mathbf{u}$  pārnēs lauku. Otrais loceklis raksturo lauka difūzo pārnēsi, kur  $\frac{1}{\sigma\mu}$  ir difūzijas koeficients ar mērvienību  $m^2/s$ .

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \underbrace{\nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B})}_{\text{Advēkcija}} + \underbrace{\frac{1}{\sigma\mu} \nabla^2 \mathbf{B}}_{\text{Difūzija}} \quad (2.14)$$

Tādi lielumi kā plūsmas ātrums, raksturīgais izmērs un materiāla elektrovadītspēja nosaka to, vai problēma pieder pie ideālā MHD vai bezindukcijas MHD. Mūsu eksperimentālā problēma atbilst bezindukcijas MHD, ko var redzēt, novērtējot magnētisko Reinoldsa skaitli  $R_m$  (2.15). Tas ir bezdimensionāls lielums, kas tiek iegūts, salīdzinot koeficientus pie advēkcijas un difūzijas locekļiem magnētiskā lauka pārnēses vienādojumā (2.14).

$$R_m = UL\sigma\mu \quad (2.15)$$

Skaitliskajiem aprēķiniem ir ērti pāriet uz magnētiskā lauka vektorpotenciālu (2.16).

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (2.16)$$

Tādā gadījumā elektrisko lauku no Faradeja likuma var izteikt šādi (2.17).

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \Phi \quad (2.17)$$

Šķidrums plūsmas dinamiku nespiežama šķidrums gadījumā apraksta Navjē-Stoksa vienādojums (2.18).

$$\underbrace{\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right)}_1 = - \underbrace{\nabla p}_2 + \underbrace{\eta \nabla^2 \mathbf{u}}_3 + \underbrace{\rho \mathbf{g}}_4 + \underbrace{\mathbf{J} \times \mathbf{B}}_5 \quad (2.18)$$

Vienādojuma pirmais loceklis ir plūsmas ātruma konvektīvais atvasinājums. Otrais loceklis ir spiediena gradients. Trešais loceklis raksturo ātruma lauka difūziju. Ceturtais un piektais loceklis ir tilpuma spēki un mūsu gadījuma tie ir gravitācijas un Lorenca spēks (2.11). Lorenca spēks sasaista kopā plūsmas dinamiku ar elektromagnētismu un padara šo problēmu sarežģītu, piemēram, radot nepieciešamību atgriezeniskajai saitei, veicot MHD skaitliskos aprēķinus.

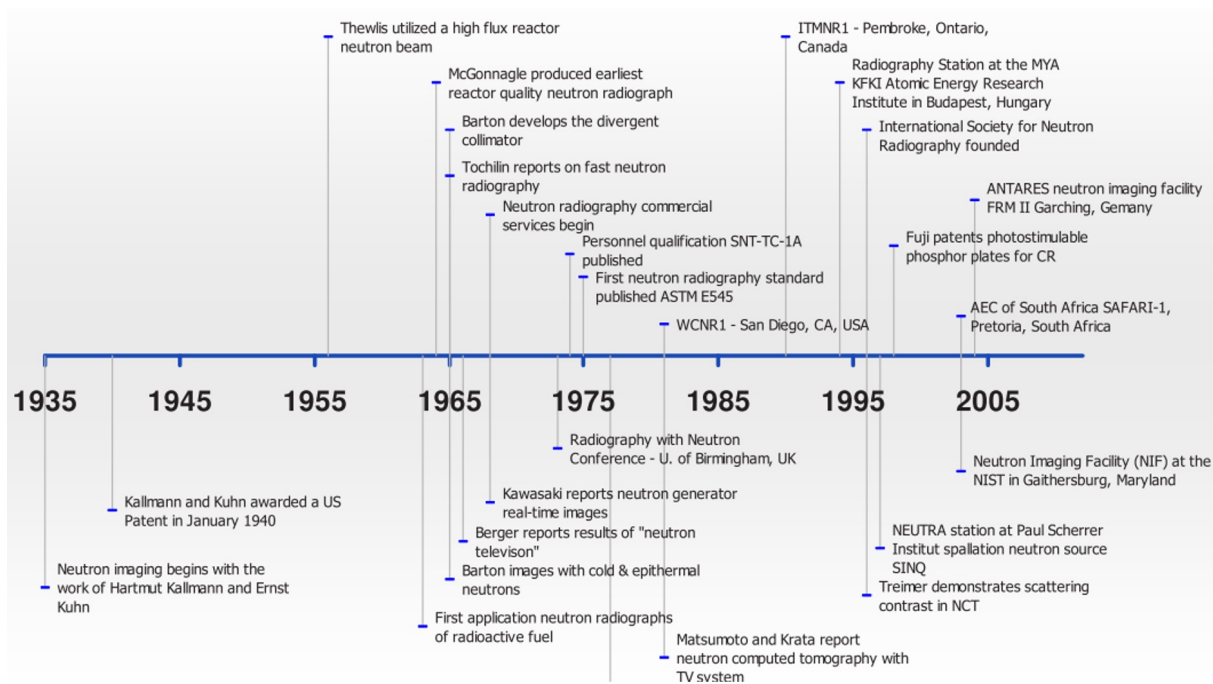
### 3. LITERATŪRAS APSKATS

#### 3.1. Neitronu radiogrāfijas vēsture

Neitronu radiogrāfijas pirmie demonstrējumi tika veikti 1930. gados, kad secināja, ka daži materiāli pēc to bombardēšanas ar neitroniem emitē radiāciju, ko var attēlot uz fotoplates. Pirmās kvalitatīvās neitronu radiogrāfijas bildes tika uzņemtas 1955. gadā [13], ar  $10^8..10^9$   $n/cm^2$  lielu neitronu plūsmu. Tieši lielākas pieejamās neitronu plūsmas avoti padarīja metodi plaši izmantojamu, un tā kļuva par vienu no neinvazīvajam (*non-destructive*) metodēm, ar kuru var realizēt praktiski sarežģītus mērījumus. Līdz ar zinātnisko rakstu un žurnālu parādīšanos 1960. un 1970. gados daudzi kodolpētniecības centri sāka izmantot neitronu radiogrāfiju. Galvenais tās pielietojums bija radioaktīvu degvielu pētījumi, kam šāds netiešās mērīšanas veids bija nepieciešams, saskaroties ar ļoti augstas radioaktivitātes materiāliem [14]. 1968. gadā pirmās iestādes sāka piedāvāt neitronu radiogrāfijas pakalpojumus komerciāli [15] – prakse, kas vēl turpinās mūsdienās. Neitronu radiogrāfijai attīstoties, 1970. gados notika pāreja no kvalitatīvas uz kvantitatīvu izpētes metodi, kas ir standartizēta tāpat kā rentgenstaru radiogrāfija vai ultraskaņas testēšana. Kā uzskatāmāko piemēru var minēt neitronu radiogrāfijas izmantošanu Apollo kosmosa programmā, kur stingri standarti un procedūras bija prakse citām neinvazīvajām (*non-destructive*) metodēm [16]. Pirmā dinamiskā neitronu radiogrāfija saukta par “neitronu televīziju” tika veikta 1966. gadā, kad H. Bergers izveidoja sistēmu ar 525 līnijām un 0.5 mm izšķirtspēju, 30 kadru sekundē ierakstīšanas ātrumu [17]. Attēlā 3.1 ir redzama laika līnija ar nozīmīgākajiem notikumiem neitronu radiogrāfijas attīstībā, kur var redzēt, ka pētniecības centru skaits, kas izmanto šo metodi, pieaug.

#### 3.2. NEUTRA

Darba neitronu radiogrāfijas eksperimentālā daļa tika veikta Paula Šērera institūtā (PSI) Šveicē. Viņi sāka nodarboties ar neitronu radiogrāfiju 1996. gadā, kad tika palaists atskaldīšanas neitronu avots SINQ (Spallation Neutron Source) kopā ar galveno radiogrāfijas staciju NEUTRA (NEUtron Transmission Radiography) (sk. pielikumu 6.1), kas ir viena no jaudīgākajām šāda veida neitronogrāfijas stacijām pasaulē [19]. Šajā metodē svarīgākā sastāvdaļa ir detektors. Eksistē vairāki detektoru veidi, kurus kombinē, lai palielinātu veiktspēju. 3.1. tabulā ir apkopotas trīs galvenās digitālās metodes neitronogrāfijas attēla iegūšanai, ko izmanto PSI. Instrumentu, ko izmantos, lai iegūtu attēlu, nosaka sasniedzamie parametri, kas atkarīgi no konkrētās problēmas. Piemēram,

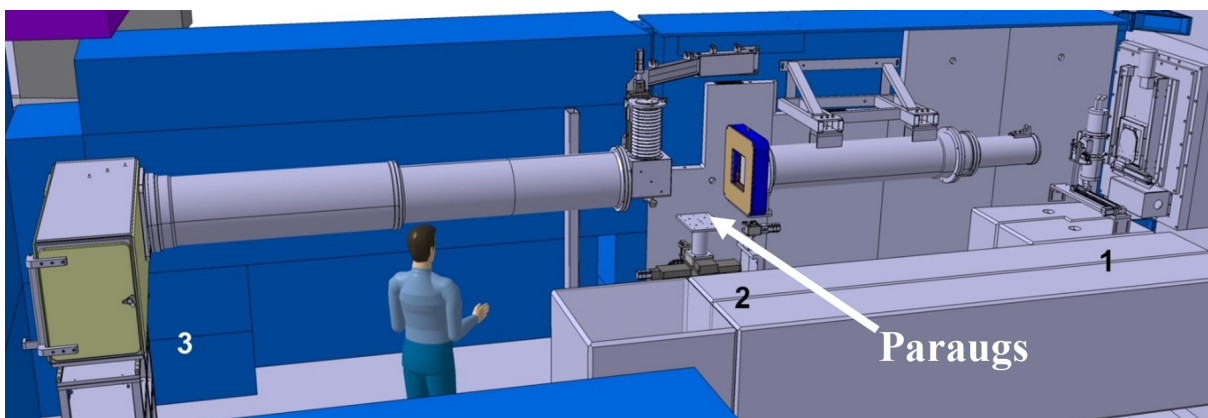


### 3.1. attēls: Nozīmīgākie notikumi neitronu radiogrāfija attīstībā [18]

lai iegūtu augstāko iespējamo izšķirtspēju, izmanto fotoplates, taču ekspozīcijas laiks tad būs liels, kas nozīmē ilgāku parauga apstarošanu un, protams, izslēdz iespēju sekot līdzi laikā mainīgiem procesiem. Tā kā šajā darbā tika pētīta dinamiska sistēma, vienīgais detektors, ko var izmantot ir CCD kamera. Ar to ir iespējams iegūt 1024×1024 px lielus attēlus līdz 30-40 kadriem sekundē un 512×512 px attēlus līdz 60-80 kadriem sekundē. Ņemot vērā, ka maksimālais parauga apgabals ir 15x15 cm, telpiskā izšķirtspēja labākajā gadījumā tuvojas 0.5 mm. Dinamiskās neitronu radiogrāfijas gadījumā ir jāreķinās ar lielu troksni, jo ekspozīcijas laiks ir daudz mazāks (desmiti milisekunžu) nekā kvalitatīvu attēlu uzņemšanas raksturīgais laiks, kas parasti mērāms sekundēs.

3.1. tabula  
Digitālo metožu salīdzinājums kvantitatīvajai neitronu radiogrāfijai SINQ pieejamajos instrumentos [19]

Detektora sistēma	Attēlveidošanas plates	Scintilators + CCD-kamera	Rentgenstarojuma fotoplēve + digitālās transmisijas skeneris
Telpiskā izšķirtspēja	50 μm	500 μm	20 μm
Tipiskais ekspozīcijas laiks	20 s	10 s	5 min
Pikseļu skaits uz līniju	4000x8000	512x512	9000x12000
Detektora laukums	20 cm x 40 cm	15 cm x 15 cm	18 cm x 24 cm
Dinamiskais diapazons	10 <sup>5</sup> (lineārs)	10 <sup>5</sup> (lineārs)	10 <sup>2</sup> (nelineārs)
Pielietojums kvantitatīviem pētījumiem	Jā	Jā	Nē



3.2. attēls: NEUTRA mērīšanas pozīcijas: 1. parauga apstarošana ar rentgenstarojumu, 2. kombinētā neitronu un rentgenstarojuma uzņemšanas vieta (izmantota šajā darbā veiktajos eksperimentos), 3. radiogrāfijas/tomogrāfijas vieta lielākiem paraugiem [20]

NEUTRA iekārtā papildus neitronogrāfijai ir iespējama arī materiālu pētīšana ar rentgenstarojumu. Šāda starojumu kombinēšana ir efektīva metode papildus informācijas iegūšanai, kas balstās uz dažādām pētāmā objekta absorbcijas īpašībām. Attēlā 3.2 ir redzama paraugu novietošanas shēma atkarībā no nepieciešamajām opcijām. Tomogrāfijas gadījumā paraugu ir iespējams rotēt, lai iegūtu 3D attēlu.

### 3.3. Elektriskā un magnētiska lauka ietekme uz kristalizācijas procesu

Vienkāršotā gadījumā, kad visas, izņemot vienu sienu, ir termiski izolētas, frontes augstums atkarībā no laika ir izteikts šādi:

$$h = K\sqrt{t} \quad (3.1)$$

kur  $K$  ir konstante, kas ir atkarīga no siltumietilpības, kušanas siltuma, materiāla siltumvadītspējas un  $t$  ir laiks [21]. Ja sacietēšanas laikā tiek radīts ātruma lauks, tad plūsmas ātrums un tips ievērojami ietekmē sacietēšanas procesu. Ja eksistē plūsma perpendikulāri frontes augšanas virzienam, tad pusšķidrās zonas biezums dramatiski samazinās [22] un fronte līdzīgā ģeometrijā tiek saplacināta [23]. Pusšķidrās zonas biezuma samazinājums tiek skaidrots ar to, ka zonas biezums ir inversi proporcionāls temperatūras gradientam pie frontes, un šis temperatūras gradients ir ievērojami zemāks, ja kausējumu maisa. Tas ir svarīgi, jo siltuma un masas pārnese šķidrumā un pusšķidrājā zonā nosaka kausējuma kvalitāti [24].

Papildus sacietēšanai tiek pētīta daļiņu dinamika turbulentā recirkulējošā plūsmā. Praktiski tas ir svarīgi gadījumos, kad ir nepieciešams iemaisīt metālu kausējuma tilpumā. Makro izmērā tas būtu leģējošo daļiņu iemaisīšana kausējumā, kas ir raksturīgā situāci-

ja pārkausēšanas krāsnī, mikro izmērā tas būtu nodaļiņu disperģēšana viscaur tilpumā - nepieciešamība metāla matricas kompozītu (MMC) ražošanā. Pēdējā problēma ietver dielektrisku daļiņu iemaisīšanu un vienmērīga sadalījuma iegūšanu matricas metālā. Dielektriskās daļiņas bieži vien neslapina matricas metālu, kas nozīmē, ka tās var salipt kopā (aglomerēties), pielipt pie sienas vai vienkārši virsmas spraiguma dēļ palikt uz brīvās virsmas. Intensīva metāla plūsma spēj atrisināt šīs problēmas [25], un, ja materiāls tiek sacietēts pietiekoši strauji, var tikt iesaldēta vēlamā struktūra. Šādos procesos ir viegli aplūkot rezultātu, taču paša procesa pētīšana ir daudz sarežģītāka.

### 3.4. MHD plūsmas izpēte ar neitronu radiogrāfiju

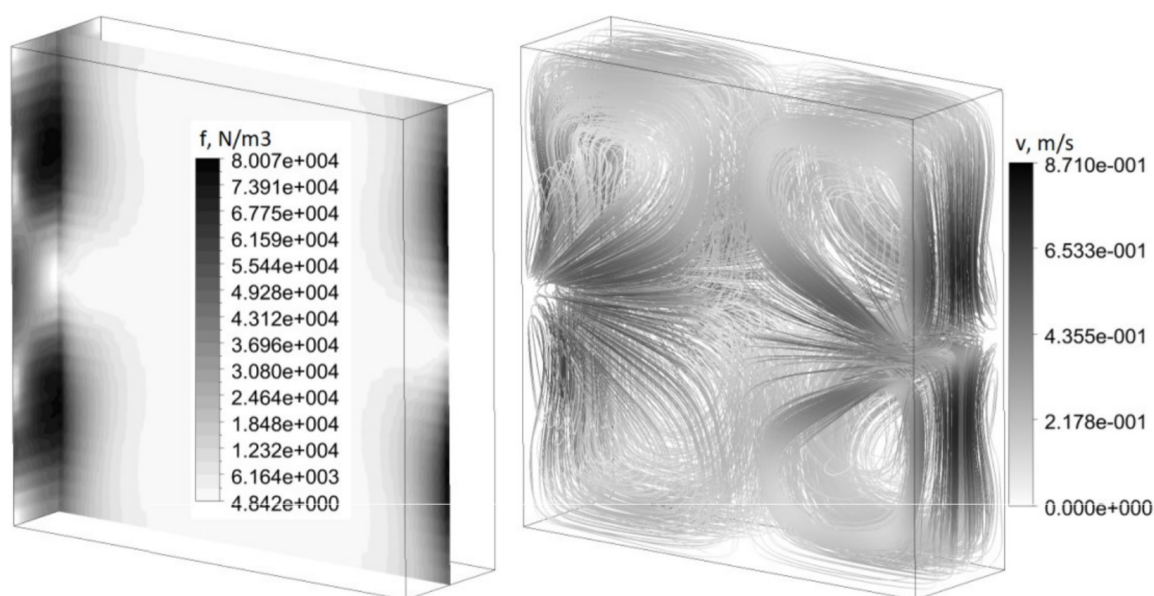
M. Ščepanskis savā doktora darbā [26] pētīja cietu piemaisījumu dinamiku noslēgtās turbulentās plūsmās. Aplūkotās plūsmas ir sastopamas indukcijas kausēšanas krāsnīs, kuru ātruma un temperatūras sadalījumi ir plaši pētīti, taču cieto daļiņu dinamika pētīta ir maz. Minētājā darbā izstrādātā pieeja pirmo reizi ļāva izpētīt daļiņu dinamiku šķidro metālu plūsmās. Viens no realizētājiem darba mērķiem bija izveidot modeli daļiņu trajektoriju aprēķināšanai turbulentā plūsmā. Atrastais Lagranža vienādojums nevadošais sfēriskai daļiņai ir (3.2) [26]

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\left(1 + \frac{C_A \rho_{\text{sk}}}{2 \rho_d}\right) \frac{d\mathbf{u}_d}{dt}}_{\frac{d\mathbf{u}_d}{dt} + \text{saistītā masa}} = & \underbrace{C_d \mathbf{U}}_{\text{Pretestības spēks}} + \underbrace{\left(1 - \frac{\rho_{\text{sk}}}{\rho_d}\right) \mathbf{g}}_{\text{Arhimēda spēks}} - \underbrace{\frac{3}{4} \frac{1}{\rho_d} \mathbf{f}_{EM}}_{\text{EM spēks}} + \underbrace{\frac{\rho_{\text{sk}}}{\rho_d} C_L \cdot (\mathbf{U} \times \nabla \times U)}_{\text{Cēlējspēks}} + \\
 & + \underbrace{\left(1 + \frac{C_A \rho_{\text{sk}}}{2 \rho_d}\right) \frac{D\mathbf{u}_d}{Dt}}_{\text{Konvektīvais atv. ar saistīto masu}}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Tika secināts, ka visi Lagranža vienādojumā esošie spēki ir būtiski precīzam daļiņas dinamikas aprakstam. Tika novērots, ka lielām nevadošām daļiņām ir tendence pielipt pie sānu sienas liela EM spēka ietekmē. Šis mūsu gadījumā ir ļoti nevēlams rezultāts. Kā arī tika secināts, ka turbulentās pulsācijas veic daļiņu pārnesi no virpuļa uz virpuli. Tas ir svarīgi, lai iegūtu homogēnu daļiņu sadalījumu.

Pirmos dinamiskās neitronu radiogrāfijas eksperimentus ar daļiņām plūsmā uzsāka M. Ščepanskis 2015. gadā [27]. Šī tematika, kurā tika pētīta recirkulējoša turbulenta plūsma tika attīstīta tālāk [5]. Šajos pētījumos tika eksperimentāli iegūta laikā vidējotā plūsma un daļiņu sadalījums GaInSn sakausējumā. Kā izpētes metode tika izvēlēta daļiņu digitāla izsekošana (PIV). Rezultāti parādīja, ka telpiskā un laika izšķirtspēja ir pietiekoši liela, lai pētītu 300 mm/s ātras plūsmas ar dinamisko neitronu radiogrāfiju. Tika arī se-

cināts, ka izmantotā četru pastāvīgo magnētu maisīšanas sistēma tās galvenajos darbības režīmos rada turbulentu un haotisku plūsmu. Haotiskums izpaužas ar to, ka pie vieniem apstākļi var izveidoties vairāki plūsmas veidi un sistēma ir ļoti jutīga uz nelielām pozīcijas izmaiņām. M. Ščepanskis šos eksperimentālos izsekošanas rezultātus salīdzināja ar izstrādāto 3D skaitlisko modeli [28]. Uzdevums ir ļoti sarežģīts, jo neeksistē viena pakete vai programmatūra, kas spēj atrisināt MHD problēmas. Tā vietā izmanto divas programmas/ paketes, kur viena risina EM vienādojumus, bet otra plūsmas dinamiku. Minētajā darbā tika izmantots *ANSYS Multiphysics* EM daļas risināšanai un *ANSYS CFX* plūsmas risināšanai. Pašreiz līdzīgas problēmas skaitliski pēta V. Dzelme [29], izmantojot *ANSYS Multiphysics* EM daļai un *OpenFoam* plūsmas dinamikai. Laikā vidējotais spēka blīvums un plūsmas līnijas ir ilustrētas attēla 3.3. Ir redzams, ka ideālā gadījumā sistēmā eksistē četri virpuļi. Abu autoru darbos iegūtie skaitliskās modelēšanas rezultāti sakrīt kvalitatīvi, bet kvantitatīvi ir novērota atšķirība no eksperimentālajam vērtībām pat vairāku reižu lielumā.



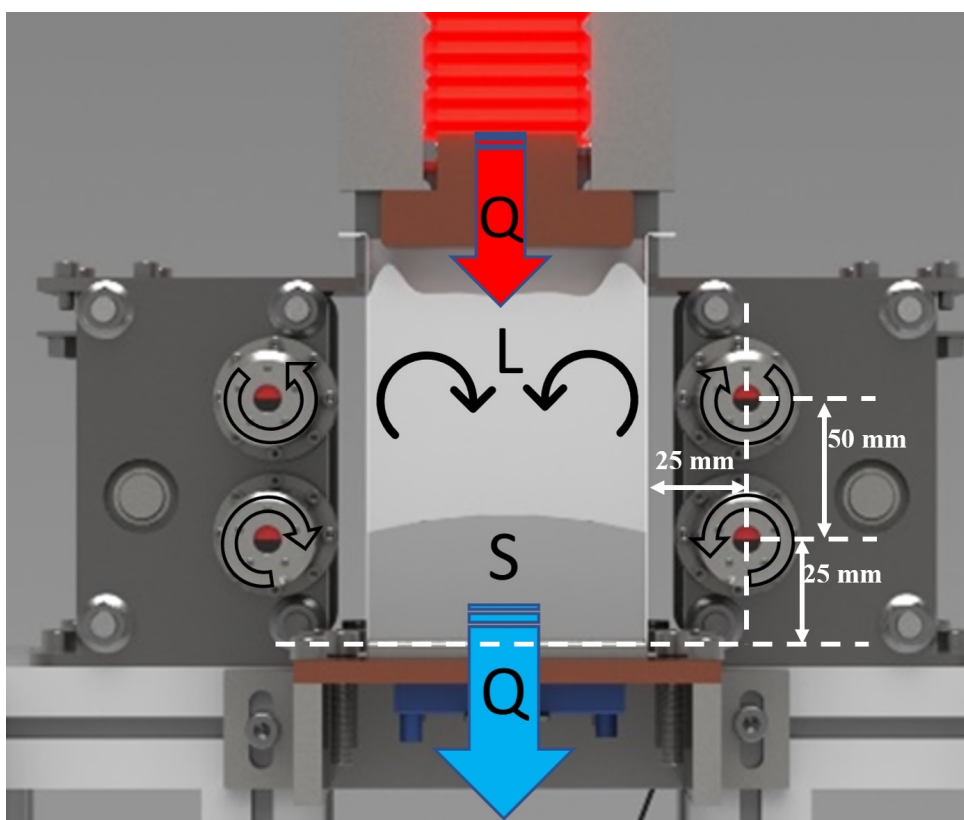
3.3. attēls: Laikā vidējotais spēka blīvums (pa kreisi) un ātruma līnijas (pa labi) [29]

Līdzīgā ģeometrijā D. Musaeva ir veikusi gallija sacietēšanas eksperimentus [23]. Šeit autore pētīja elektromagnētiskās maisīšanas ietekmi uz sacietēšanas procesu. Mazā temperatūras gradienta dēļ tika novērota tilpuma sacietēšana, kad materiāls sāka kristalizēties ārpus frontes. Tika eksperimentāli pierādīts, ka gan ar skrejošu magnētisko lauku, gan pulsējošu ir iespējams samazināts frontes liekuma rādiusu.

## 4. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

### 4.1. Eksperimentālā shēma

Lai realizētu plūsmas pētījumus orientētās kristalizācija laikā, tika uzbūvēta eksperimentālā iekārta. Iekārta sastāv no aktīvās daļas, kas satur trauku, metālu un daļiņas, rotējošas magnētu sistēmas un sildīšanas/ dzesēšanas sistēmas (sk. 4.1. att.). Iekārta ir veidota tā, lai tikai aktīvā daļa (trauks ar šķidro metālu) atrastos neitronu stara ceļā, bet tajā pašā laikā pārējās komponentes, kas pilda sildīšanas, dzesēšanas, maisīšanas funkcijas, neatrastos kūļa ceļā.



4.1. attēls: Shēma orientētās kristalizācijas realizēšanai traukā, kuru elektromagnētiski maisa. L - šķidrā metāla daļa. S - cietā daļa, Q - siltumplūsma, bultiņas uz magnētiem ilustrē visos eksperimentos izmantoto maisīšanas konfigurāciju

Katras daļas funkcijas ir:

1. Iekārtas aktīvā daļa ir apgabals, kas atrodas stara ceļā un veido neitronu radiogrāfijas attēlu. Šajā eksperimentā tas ir nerūsējoša tērauda trauks ar dimensijām  $H = 150$  mm,  $L = 100$  mm,  $W = 30$  mm. Par modeļa metālu tika izmantota alva (Sn), kā arī tika veikts viens eksperiments ar galliju (Ga). Šo metālu īpašības ir

atrodamas tabulā 4.1. Šķidrā metāla aizpildījums traukā ir līdz  $H = 120$  mm. Aktīvās daļas biezumu galvenokārt nosaka pētāmā materiāla neitronu caurlaidība. Šajā gadījumā stara ceļā atrodas 30 mm alvas, divas 0.5 mm tērauda sienas un 20 mm siltumizolācijas. Atbilstoši formulai (2.3) rezultējošā stara intensitāte ir 53 % no sākotnējās. Tas ir pilnībā pietiekami, lai bez problēmām izšķirtu alvu un gadolīniju. Grūtāks uzdevums ir alvas šķidrās un cietās fāzes izšķiršana. Pie kušanas temperatūras  $T = 232^{\circ}\text{C}$  šķidrās un cietās fāzes blīvumu attiecība ir 0.97. Tas rezultējas ar to, ka no individuāla kadra nav iespējams izšķirt fāzes. Tāpēc tika vidējoti vairāki attēli (izmantojot 16, 25 vai 50 attēlus), lai mazinātu trokšņa ietekmi.

4.1. tabula

**Alvas, gallija un galinstana īpašības pie kušanas temperatūras**

Metāls	$T_{\text{kuš.}}, ^{\circ}\text{C}$	$\rho_{\text{šk}}, \text{kg}/\text{m}^3$	$\rho_{\text{c}}, \text{kg}/\text{m}^3$	$\sigma, \text{S}/\text{m}$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	$\eta, \text{Pa} \cdot \text{s}$
Gallijs (Ga) [30]	30	6095	5904	$3.7 \cdot 10^6$	$3.23 \cdot 10^{-7}$	$1.97 \cdot 10^{-3}$
Alva (Sn) [31]	232	6990	7200	$2.0 \cdot 10^6$	$2.98 \cdot 10^{-7}$	$2.09 \cdot 10^{-3}$
GaInSn [32]	-19	6400	-	$3.46 \cdot 10^6$	$3.75 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$

2. Visos eksperimentos tika izmantotas mazas daļiņas, kas, pirmkārt, simulēja cieta piemaisījumu dinamiku sacietēšanas procesā un, otrkārt, pildīja plūsmas vizualizācijas funkciju. Tika izmantotas divu veidu daļiņas - jau gatavas, tīra gadolīnija sfēras un paštaisītas sfēras no gadolīnija, volframa un epoksīda maisījuma. Abos gadījumos kontrastam izmanto gadolīniju, jo tas ir ķīmiskais elements ar visaugstāko neitronu absorbcijas koeficientu [33]. Paštaisīto daļiņu priekšrocība ir pielāgojams blīvums (mainot koncentrāciju) un iespēja izsijāt dažādas frakcijas. Diemžēl eksperimenta gaitā tika secināts, ka paštaisītās daļiņas nevar ne noslapināt, nedz ieraut metāla tilpumā. Tādēļ tika izmantotas tīra Gd sfēras ar izmēru no 355 līdz 500  $\mu\text{m}$ . Arī Gd sfēras bija sarežģīti noslapināt, tāpēc papildus tika lietots gallijs. Procedūra bija nelielā gallija tilpumā iemaisīt daļiņas, sasaldēt šo galliju, un tad radušos lietni pievienot alvai. Jāņem gan vērā, ka tas nedaudz, bet maina Sn sastāvu, un praktiski tas kļūst par SnGa sakausējumu ar gallija sastāvu līdz 1 %.
3. Plūsma tika ierosināta, izmantojot rotējošus pastāvīgos magnētus, kas novietoti trauka sānos. Magnētu rotācijas ātrumu ir iespējams mainīt, un tas tiek darīts aprakstītajos eksperimentos. Šāda magnētu sistēma spēj radīt lielu plūsmu daudzveidību, mainot izmantoto magnētu skaitu un rotācijas virzienu [5]. Tālāk aprakstītajos eksperimentos tika izmantots viens maisīšanas režīms, kas parādīts attēlā 4.1. Ja trauku pilnībā aizpilda šķidrā metāls, tad plūsmas veids ir četri vienlieli virpuļi simetriski izvietoti pret trauka centru. Ja ir sacietējusi neliela daļa no metāla vai trauks nav nocentrēts, tad rodas trīs virpuļi. Ja ir sacietējusi vismaz trešdaļa no

tilpuma, tad plūsmas veids ir divi dominējoši virpuļi.

4. Metāla kristalizācijai bija nepieciešama iespēja trauku sildīt un dzesēt. Trauka pamatne ir aprīkota ar ūdens dzesēšanu, nodrošinot konstantu trauka pamata skaldnes temperatūru  $T = 0^\circ C$ . Visas sānu sienas tika pārklātas ar 10 mm siltumizolāciju. Augšā bija paredzēts rezistīvais sildītājs un vara detaļa, kas vienmērīgi nodod siltumu virsmai. Taču pēc vairākiem eksperimentiem sildītājs sadega. Tad sistēma tika darbināta tikai ar dzesētāju un eksperimenti tika sākti ar pārkarētu alvu  $T = 400^\circ C$ , kas izkausēta citviet. Dzesēšanas jauda sākumā ir lielāka un tad dilst, jo sacietējušais materiāls kalpo kā papildus termiskā pretestība, kas eksperimenta gaitā tikai pieaug. Pieaugot frontes biezumam, samazinās arī temperatūras gradients cietajā daļā, jo pieaug cietās daļas biezums, bet temperatūru starpība pirmajā tuvinājumā ir konstanta. Kārtas novērtējums (4.1), pie frontes augstuma  $h = 50 \text{ mm}$  dod temperatūras gradientu  $46 \text{ K/m}$ .

$$T' = \frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{\Delta T}{h} \quad (4.1)$$

Izmantojot iegūto temperatūras gradientu var novērtēt siltumplūsmas blīvumu (4.2), kur  $k$  ir siltumvadītspējas koeficients. Ievietojot alvas termiskās īpašības, siltumplūsmas blīvums pie frontes augstuma  $h = 50 \text{ mm}$  ir  $2500 \text{ W/m}^2$ .

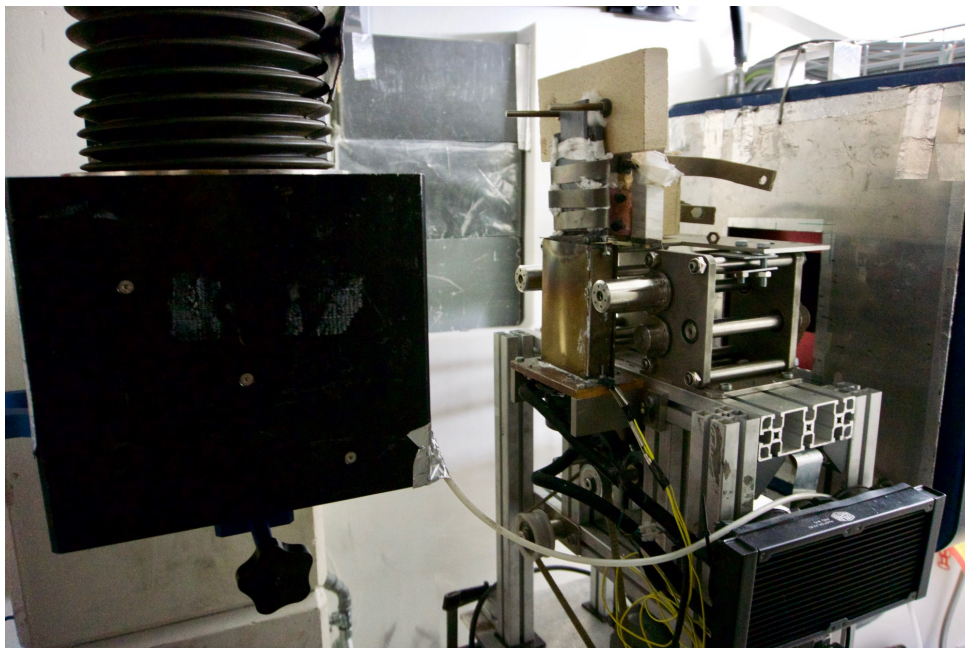
$$\phi_q = -k \cdot T' \quad (4.2)$$

Maisīšanas rotācijas frekvence bija robežās no 10.5 līdz 53 rev/s. Mums to ir svarīgi ņemt vērā, jo skinslāņa biezums (4.3) pie augstākajām frekvencēm ir salīdzināms ar trauka izmēriem. Izmantojot alvas vadītspēju iegūst  $\delta_{10 \text{ Hz}} = 11.2 \text{ cm}$  un  $\delta_{53 \text{ Hz}} = 4.9 \text{ cm}$ . Šis garums ir jāsalīdzina ar trauka pusplatumu, kas ir 5 cm. Ja skinslāņa biezums ir mazāks par šo vērtību tad elektromagnētiskā iedarbība nenotiks visā trauka, bet tikai pie sienām, kur atrodas magnēti. No skinslāņa formulējuma seko, ka 1 skinslāņa biezumā magnētiskais lauks krītas  $e$  reizes un elektromagnētiskais spēks krītas  $e^2$  reizes.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4.3)$$

Iekārta, kas uzstādīta instrumentā NEUTRA ir redzama attēlā 4.2. Tika izmantota mērīšanas pozīcija 2, kas ilustrēta attēlā 3.2. Tāpat kā neitronu radiogrāfija, eksperimentālās iekārtas vadība (magnētu rotācijas ātrumus, sildīšana un dzesēšana) tika regulēta no kontroles telpas. Veicot neitronu radiogrāfiju, dažkārt notika neitronu stara pazušana, kas attiecīgajās eksperimentu sērijās radīja aptumšojumus. Stara pazušana notika

visā neitronu avotā SINQ un tā ietekmē visus ar to saistītos instrumentus. Tas ir īpaši novērojams, gallija eksperimentā, kur uzņemšanas laiks bija lielāks par stundu.



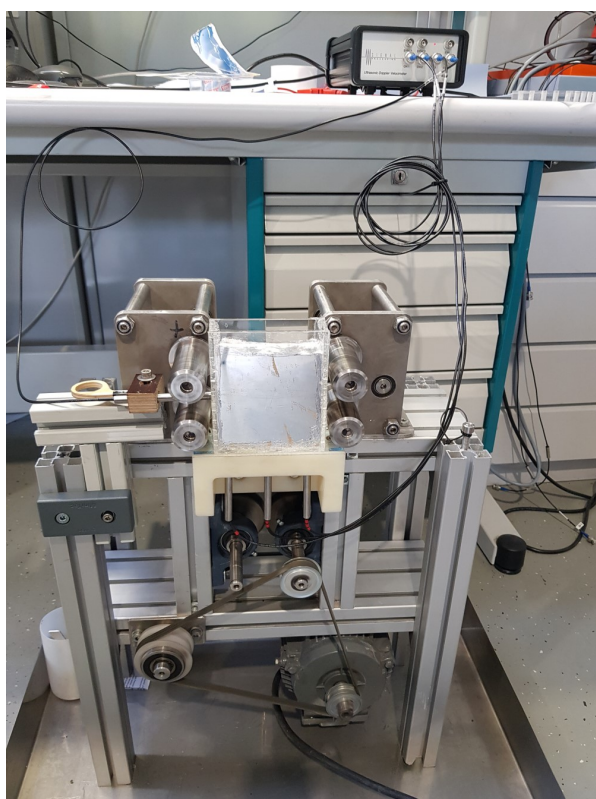
4.2. attēls: Eksperimentālā iekārta daļēji uzstādīta instrumentā NEUTRA. Melnā kaste ir neitronu radiogrāfijas kamera, kura eksperimenta laikā tiek pilnībā piebīdīta pie iekārtas

#### 4.2. Neitronu radiogrāfijas attēlu uzņemšana un apstrādāšana

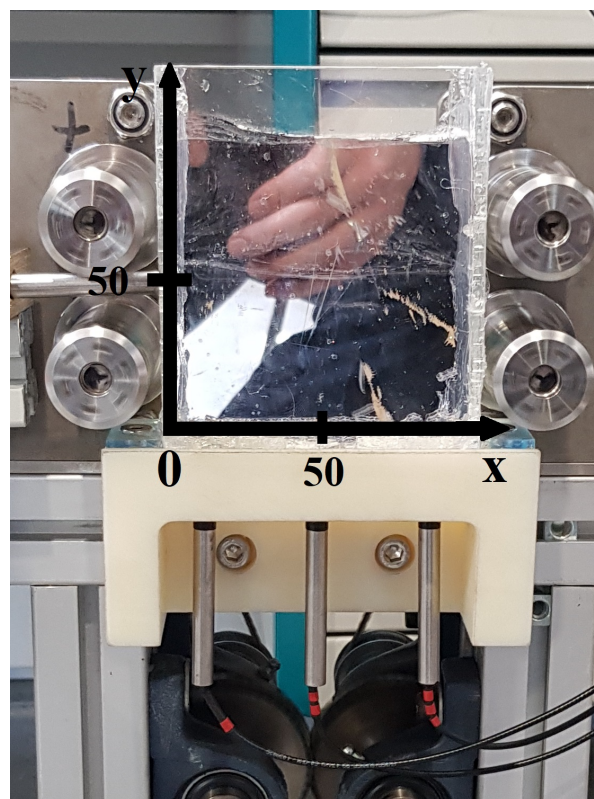
Lai iegūtu pietiekamu laika izšķirtspēju daļiņu izsekošanai (kas gan nebija tik sek-mīga, kā iepriekšējos pētījumos), attēlu uzņemšanas ātrums bija no 25 līdz 60 kadriem sekundē. Tas nozīmē, ka pilns alvas sacietēšanas eksperiments, kas notiek 300 s pie 40 kadriem sekundē, rada 12 000 attēlu. Pie izšķirtspējas 1024x1024 px, katrs attēls aizņem 2 MB, kas kopsummā rada 24 GB datu. Kopumā ir ievākti aptuveni 200 GB datu un to apstrāde nav triviāla. Datu pēcapstrāde tika veikta ar brīvpieejas programmatūras *ImageJ* versiju *Fiji*. Visiem iegūtajiem attēliem tiek mainīts kontrasts, jo vizuāli neapstrādātie attēli ir praktiski melni. Daļiņu izsekošanas eksperimentiem tika izmantoti reāllaika attēli, bet frontes izsekošanai attēli tika vidējoti. Tas tika darīts, izmantojot *Fiji* funkciju *Hyperstack*. Lai kvantitatīvi analizētu iegūtos neitronu radiogrāfijas attēlus, tika izsekota robežvirsmas starp šķidro un cieto fāzi. Tika aplūkotas trīs vertikālās asis:  $x = 0$  jeb "kreisā puse",  $x = 50$  jeb "vidus" un  $x = 100$  jeb "labā puse". Frontes augstums tiek mērīts no pamatnes, un tas tika darīts ar programmatūras *ImageJ* rīku *Measure*. Tika arī mēģināts noteikt robežvirsmu, aplūkojot pelēkuma vērtības uz nogriežņa, taču šāda metode neizrādījās pārāka par manuālu punkta atlikšanu.

### 4.3. Ultraskaņas Doplera ātruma (UDV) mērījumi

Lai saprastu plūsmas veidu, ātrumu un salīdzinātu to ar literatūrā pieejamajiem datiem, tika veikti ultraskaņas Doplera ātruma mērījumi (*ultrasound Doppler velocimetry* – angļu val.). Eksperimenti tika veikti Vācijā, Helmholtca Centrā Drēzdene-Rosendorfa (HZDR), kur detalizēti tika pētīti dažādi plūsmas veidi dotajā ģeometrijā. Šajā darbā tiks analizēti UDV mērījumi, kas atbilst maisīšanas režīmam, kas attēlots 4.1. attēlā. Savukārt 4.3(a). attēlā ir redzama iekārta, kur GaInSn sakausējumam tiek veikti UDV mērījumi. Datu attēlošanā tiek izmantota koordinātu sistēma, kas redzama attēlā 4.3(b) Ātruma mērījumi tika veikti, izmantojot ultraskaņas Doplera ātruma mērītāju, konkrēti, Signal Processing anemometrus DOP2000 v2125 (sk. attēlu 4.4(a)) un DOP4000 (sk. attēlu 4.4(b)). To darbības princips ir padot augstas frekvences (1-10 MHz) periodiskus akustiskos signālus un analizēt atstarotos signālus, tādējādi iegūstot plūsmas ātruma profilu. Ātruma aprēķināšanai tiek izmantota Doplera nobīde, objektam atstarojot mums zināmas frekvences signālu. Signāla izstarošana un saņemšana mūsu gadījumā notiek ar vienu sensoru, un sensors mēra komponenti, kas tam ir paralēla. Ideālos apstākļos ir iespējams iegūt mērījumus ar precizitāti līdz pat 1% [34]. Taču praktiski ir jāņem vērā vairāki ierobežojumi.



(a) Iekārta UDV ātrumu mērījumiem



(b) Ultraskaņas zonžu novietojums

4.3. attēls: Eksperimentālā iekārta

Pirmkārt, ir jāiegūst ideāls kontakts starp sensoru un mērāmo vidi. Šo kontaktu nosaka šķērsoto materiālu akustisko impedanču attiecība ikkatrā robežā starp materiāliem. Lai salāgotu akustiskās impedances un nezaudētu pārāk daudz signāla, veicot GaInSn plūsmas mērījumus, tika izmantots trauks ar organiskā stikla sienām un starp sensoru un sienu izmantots speciāls gels. Jebkura siena samazina signāla stiprumu, un zudumi ir atkarīgi no akustisko impedanču attiecības, caurejošā materiāla biezumu un izmantotās mērīšanas frekvences. Pie augstas frekvences (10 MHz) pat 4 mm siena spēj samazināt signālu par 80 % [35], taču pie mazākām frekvencēm šie zudumi nav tik lieli. Vājāks signāls nozīmē lielāku troksni vai vispār liedz nomērīt ātrumu visā profila garumā.

Otrkārt, ir jāņem vērā sensora mērīšanas diapazons un kūļa diverģence. Šie lielumi tiek piemēroti atkarībā no izvēlēta trauka izmēriem. Ultraskaņas viļņi pirmo daļu no mērāmā diapazona konverģē un pēc tam diverģē. Konverģences apgabals veido zonu, kurā mērījumi netiek iegūti. Tas ir jāņem vērā, plānojot eksperimentu un interpretējot datus. Mērījumu rezultāti, kas izmantoti šajā darbā, tika iegūti ar frekvenci 4 MHz, kas nozīmē, ka tuvā zona ir 21 mm. Pēc 21 mm kūlis diverģē un mērāmais apgabals, kurā tiek vidējots ātrums telpā, kļūst lielāks un lielāks.

Metāls, kas izmantots UDV mērījumos, ir trīs komponentu eitektiskais sakausējums GaInSn, kas istabas temperatūrā ir šķidrā agregātstāvoklī. Lai mērījumus, kas iegūti GaInSn sistēmā, salīdzinātu ar alvas rezultātiem, ir jāņem vērā atšķirības elektriskajā vadītspējā, viskozitātē un blīvumā. To ir iespējams izdarīt, lietojot dimensionālo analīzi. Neņemot vērā skinslāņa biezumu attiecīgajās sistēmās, mēs varam aplūkot attiecību starp elektromagnētiskajiem un inerciālajiem spēkiem. GaInSn gadījumā šī attiecība ir 1.8 reizes lielāka. Tādēļ tuvināti var sagaidīt 1.35 reizes lielāku raksturīgo plūsmas ātrumu GaInSn salīdzinājumā ar šķidru alvu.

GaInSn modelis atšķiras no alvas kristalizācijas eksperimentiem ar to, ka tajā nav temperatūras gradients. Tādēļ ir jāsaprot vai konvekcija, kas notiek alvas kristalizācijā temperatūras gradienta dēļ, ir salīdzināma ar magnētu radīto plūsmu. Lai veiktu šo salīdzinājumu aplūko divus bezdimensionālus lielumus - Grashofa skaitli  $Gr$  un magnētisko Teilora skaitli  $Ta_m$ . Grashofa skaitlis 4.4 raksturo attiecību starp cēlējspēkiem un viskozajiem spēkiem, kas darbojas uz šķidrumu sistēmā, un to parasti izmanto, aprakstot konvekciju. Magnētiskais Teilora skaitlis 4.5 raksturo attiecību starp rotējoša  $B$  lauka radītu spēku uz elektrovadošu šķidrumu un šķidruma viskozajiem spēkiem.

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad (4.4)$$

$$Ta_m = \frac{\sigma\omega B^2 L^4}{2\rho\nu^2} \quad (4.5)$$



(a) DOP2000



(b) DOP4000

#### 4.4. attēls: Ultraskaņas Dopplera anennometri

Ievietojot alvas materiāla īpašības, raksturīgo izmēru, magnētiskā lauka intensitātes un lauka rotācijas ātruma vērtības, iegūts, ka  $Gr = 1.4 \cdot 10^6$  un  $Ta_m = 1.3 \cdot 10^9$ . Šo lielumu attiecība ir  $Ta_m/Gr \approx 10^3$ , kas nozīmē, ka elektromagnētisko spēku radītā plūsma dominē un izotermsika modeļa izmantošana UDV mērījumiem ir pietiekami precīza.

## 5. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

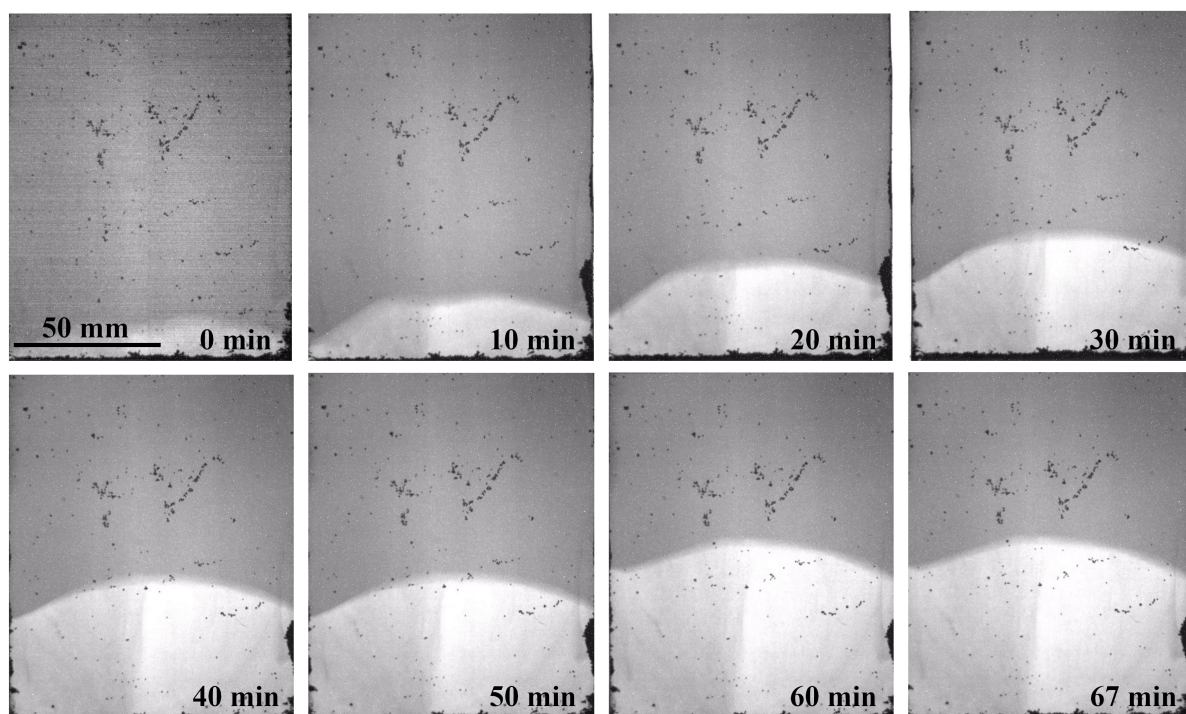
### 5.1. Neitronu radiogrāfijas rezultāti

Kopā tika veikti 19 neitronu radiogrāfijas eksperimenti no kuriem 18 bija ar alvu un viens ar galliju. Gallija eksperimenti atšķiras ar sacietēšanas laiku, kas alvai ir aptuveni piecas minūtes, bet gallijam divas stundas. Zemās gallija kušanas temperatūras dēļ dzesētāja jauda ir zema, un, kā novērtos darbā [23], kristalizācija šādos apstākļos var notikt pat tilpumā. No veiktajiem eksperimentiem šajā darbā tiks aplūkoti tikai daži - gallija kristalizācija un labākie alvas kristalizācijas eksperimenti pie trim dažādiem magnētu rotācijas ātrumiem.

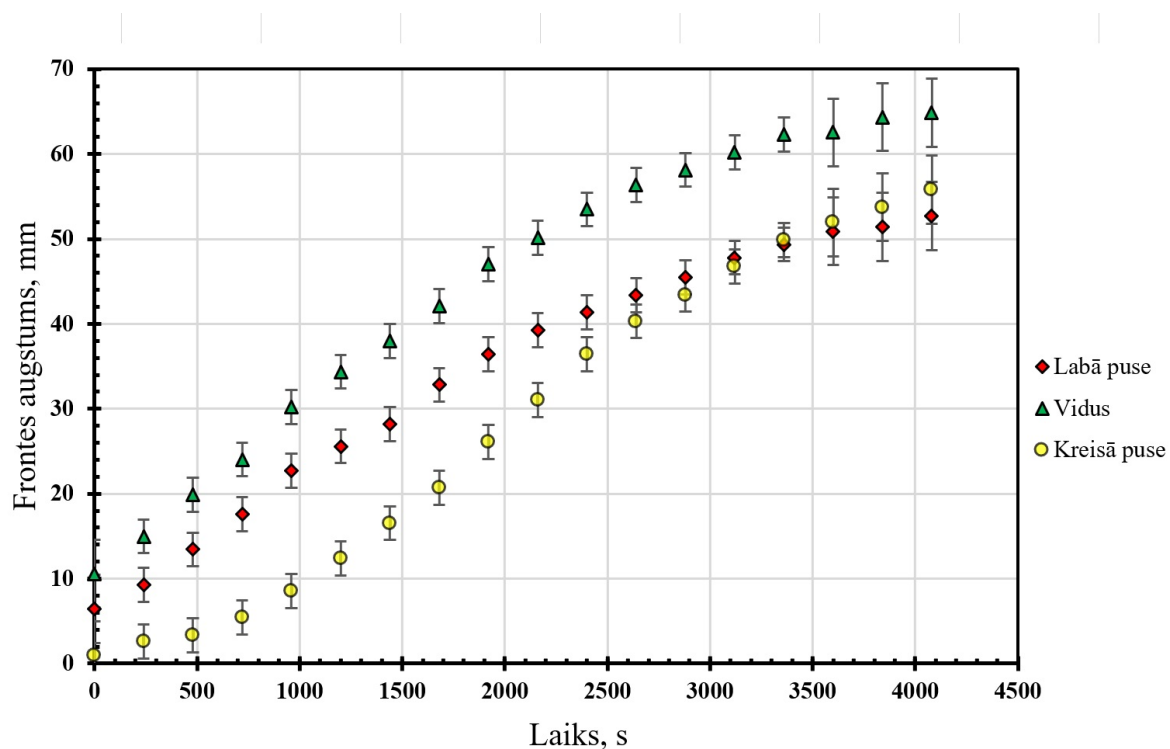
#### 5.1.1. Gallija kristalizācija

Gallija sacietēšana ir parādīta attēlā 5.1, kur atrodami astoņi laika punkti no visa eksperimenta. Eksperiments tika veikts 67 minūtes, un tā laikā gallijs pilnībā nesacietēja. Vidējais sacietēšanas ātrums šajā eksperimenta bija 0.015 mm/s sekundē, kas ir salīdzināms ar silīcija kristālu audzēšanas ātrumu. Eksperimenta novērojumi:

1. Kontrasts starp cieto un šķidro fāzi ir ļoti labs. Tas ir skaidrojams ar to, ka šajos eksperimentos katram attēlam tika atvēlēts ilgāks ekspozīcijas laiks (1 s) nekā alvas gadījumā (40 ms). Šis eksperiments ir vienkāršāks gadījums procesa izprašanai, piemēram, salīdzināšanai ar literatūru vai koda “trenēšanai” frontes izsekošanai.
2. Daļiņu skaits plūsmā ir mazs. Vairums daļiņu ir kaut kur pielipušas vai neatrodas tilpumā. Tās daļiņas, kas atradās plūsmā, neiesala jaunizveidotajā cietajā materiālā. Iespējamais iemesls tam ir tāds, ka eksperimentā novērotajos apstākļos neveidojas pusšķidrā zona.
3. Sacietēšanas ātrums sākumā ir straujāks, un līdz ar cietās daļas biezuma pieaugumu sacietēšana palēninās (sk. 5.2. att.). Tas bija sagaidāms, un ir skaidrojams ar to, ka sacietējušais materiāls ir papildu termiskā pretestība, kas samazina siltuma plūsmu. Līkne "Vidus" šajā gadījumā ļoti ( $R^2 = 0.969$ ) līdzinās vienādojumam (3.1), kas paredz to, ka frontes augstums ir proporcionāls kvadrātsaknei no pagājušā laika.  $R^2$  tiek iegūts, linearizējot grafiku 5.2 un aproksimējot rezultējošo līkni ar taisni. Šeit ir svarīgi pieminēt, ka, uzsākot laika atskaiti (no brīža, kad tiek uzņemti neitronu radiogrāfijas attēli), centrā jau ir kristalizējusies neliela daļa no gallija.



5.1. attēls: Daļiņu sadalījums gallija (Ga) orientētas kristalizācijas laikā. Intensīvākais maisīšanas režīms (53 rev/s)

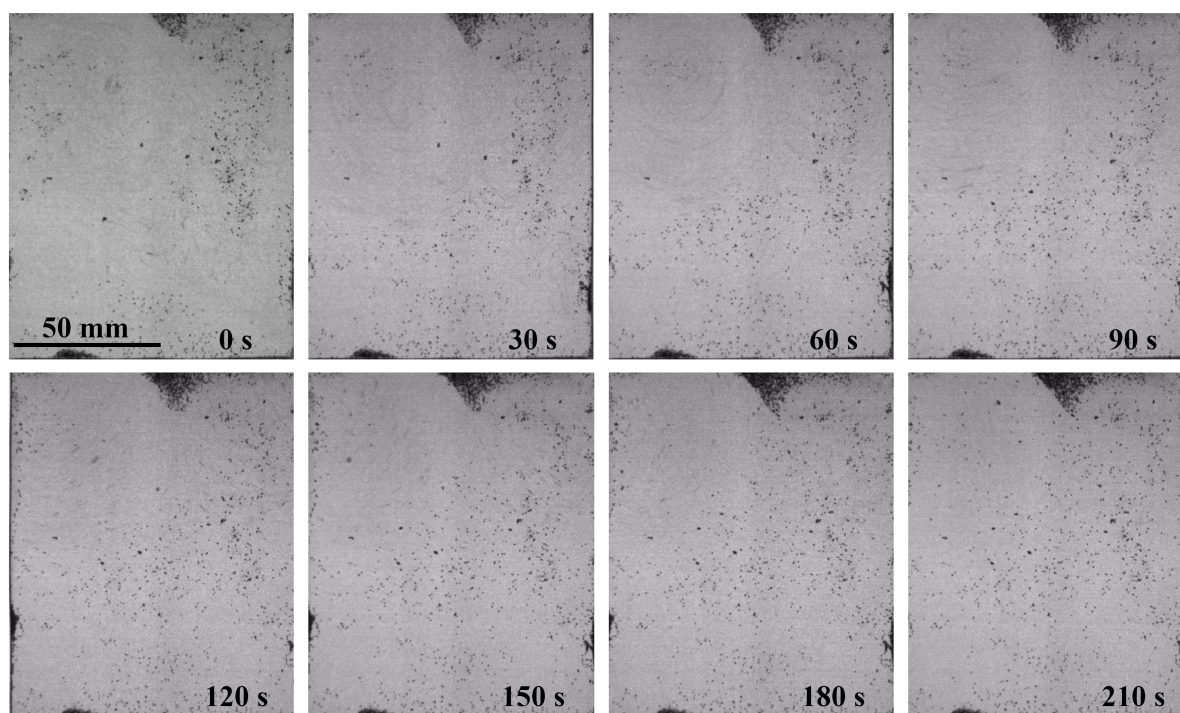


5.2. attēls: Gallija (Ga) frontes augstums atkarībā no laika intensīvākajā maisīšanas režīmā (53 rev/s)

4. Šķidrās un cietās fāzes veidotā robežvirsmā nav plakana, jo trauku izmēri ir galīgi. Ir novērojama asimetrija, respektīvi, labā pusē sākotnēji sacietē nedaudz ātrāk (sk. 5.2. att.). To var skaidrot ar eksperimentālo precizitāti, jo trauks ir noņemams un radītais plūsmas veids traukā ir ļoti jutīgs no novietojuma attiecībā pret magnētiem. Pieaugot frontes augstumam, frontes liekuma rādiuss palielinās. To var redzēt, salīdzinot frontes izliekumu procesa sākuma un beigās. Šis novērojums sakrīt ar rakstā [23] izpētīto.

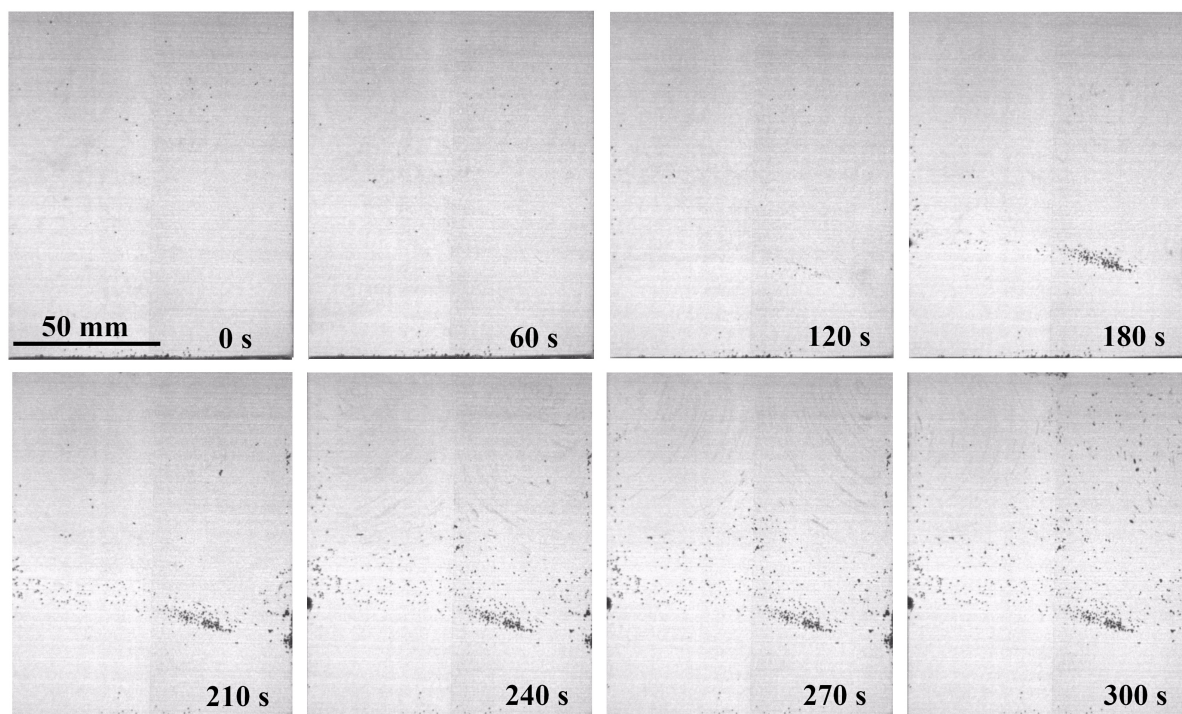
### 5.1.2. Alvas kristalizācija

Alvas kristalizācija ir aplūkota pie trim dažādām magnētu rotācijas frekvencēm 10.5 *rev/s*; 35 *rev/s* un 53 *rev/s*. Pie lielākas magnētu rotācijas frekvences paredzama intensīvāka metāla plūsma traukā.

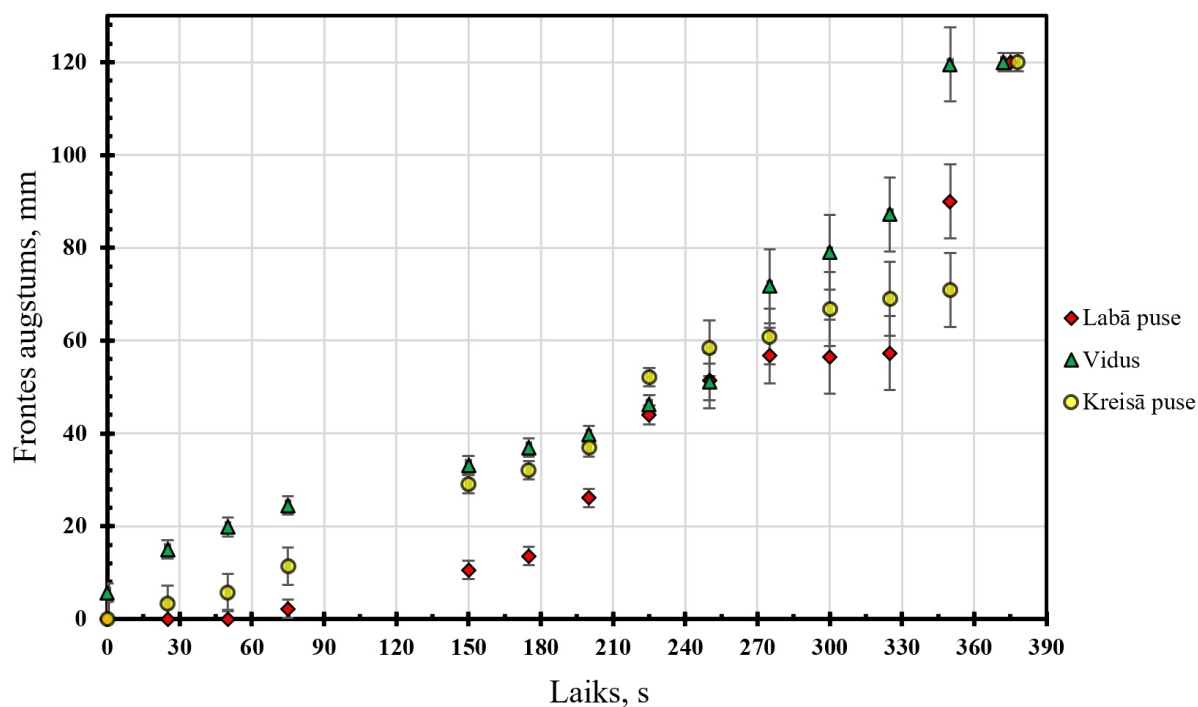


5.3. attēls: Daļiņu sadalījums alvas (Sn) orientētas kristalizācijas laikā. Lēnais maisīšanas režīms (10.5 *rev/s*)

5.3. attēla ir redzams daļiņu sadalījums alvas kristalizācijā pie lēnākā maisīšanas režīma 10.5 *rev/s*. Aplūkojot video formātā, šis gadījums ir vizuāli interesants, jo lēnās maisīšanas dēļ ir iespējams izsekot daļiņām, kas vizualizē plūsmu. Ir ieraugāmi vairāki plūsmas režīmi, jo, pārvietojoties fronte, recirkulējošā plūsma un spēku sadalījums ievērojami mainās. Ir redzams, ka daudzas daļiņas ir pielipušas pie sienām un nepārvietojas eksperimenta gaitā. Tas ir skaidrojams ar to, ka relatīvi lēnā plūsma nespēj tās noraut no sienām. Kā arī, pievēršot uzmanību augšējās daļas centram, ir redzams apgabals ar



5.4. attēls: Daļiņu sadalījums alvas (Sn) orientētas kristalizācijas laikā. Vidējais maisīšanas režīms (35 rev/s)



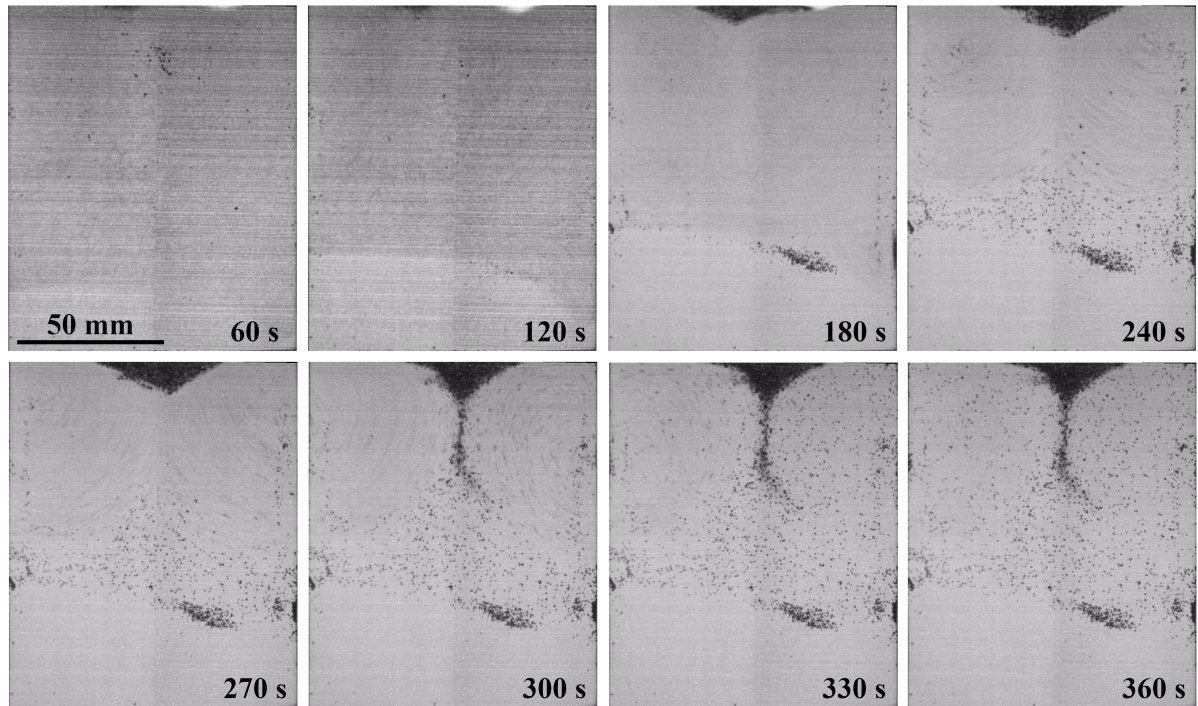
5.5. attēls: Frontes augstums (Sn) orientētas kristalizācijas laikā. Vidējais maisīšanas režīms (35 rev/s). Pārtraukums no 75 s līdz 150 s radās no neitronu stara pazušanas visā avotā

paaugstinātu daļiņu koncentrāciju. Salīdzinot laika momentus  $t = 0$  s un  $t = 210$  s, var ievērot pieaugumu daļiņu skaitā šajā apgabalā. Analizējot daļiņu dinamiku, ir iespējams redzēt, ka eksperimenta gaitā starp cieto un šķidro fāzi izveidojas pusšķidra zona, kurā daļiņas haotiski kustās, taču ar daudz lēnākiem ātrumiem. Diemžēl šajā eksperimentā kontrasts nav pietiekams, lai varētu veikt frontes izsekošanu.

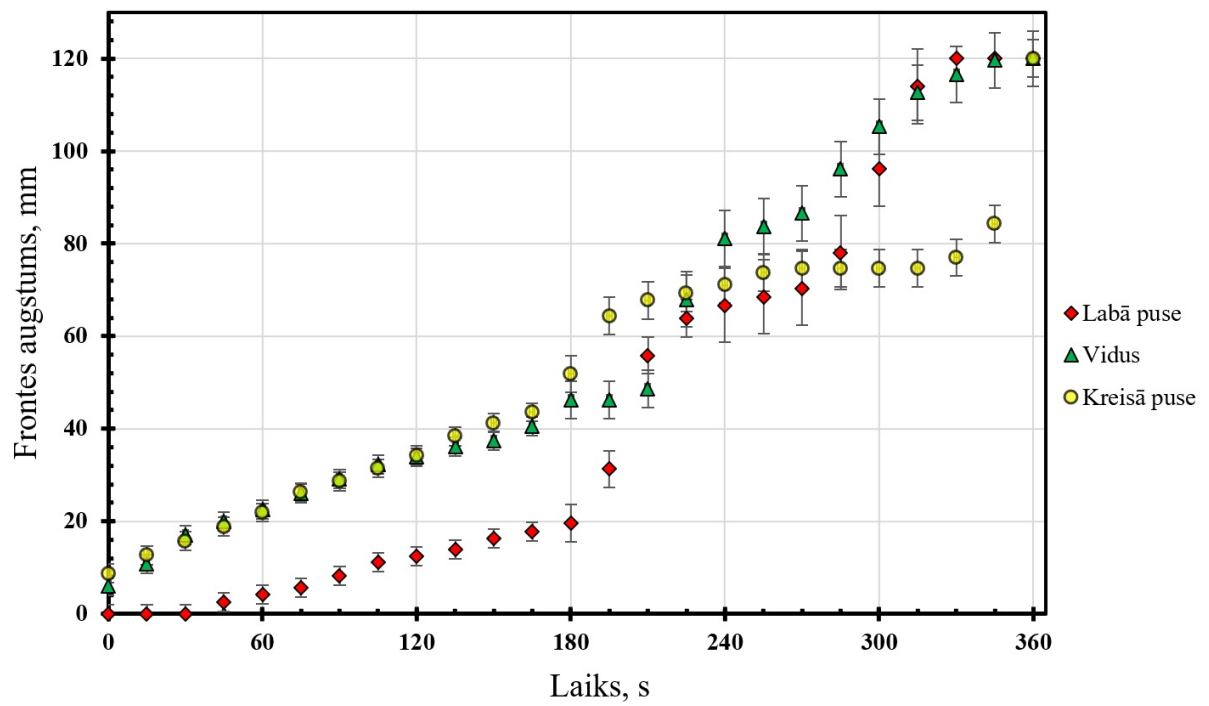
5.4. attēlā ir redzams daļiņu sadalījums laikā vidējam maisīšanas režīmam (35 rev/s). Šajā eksperimentā ir mazāk gadolīnija daļiņu nekā pārējos aplūkotojos, jo tas hronoloģiski veikts pirmais. Līdz  $t = 120$  s fronte ir grūti saskatāma, taču, rūpīgi analizējot attēlus, ir nosakāma. Tālāk ir iespējams novērot, ka pie  $t = 150$  s sāk notikt daļiņu iesalšanas process. Pie  $t = 210$  s ir novērojams, ka alva uz simetrijas ass ( $x = 50$  mm) sāk sacietēt antiparalēli plūsmai. Papildus ir redzama pusšķidrā zona, kurā daļiņas tiek ievērojami bremsētas. Viscaur eksperimentam ir novērojams, ka fronte ir asimetrija attiecībā pret pamatni - kreisā puse sacietē ātrāk. Tas ir skaidrojams ar trauka nobīdi attiecībā pret magnētiem. Šī eksperimenta frontes augstums atkarībā no laika ir izmērīts un attēlots 5.5. attēlā. Grafikā ir redzams, ka frontes augstums vidū laikā aug lineāri ( $R^2 = 0.986$ ) līdz  $t = 180$  s. Pēc  $t = 210$  s ir novērojams straujāks frontes augstuma pieaugums. Laikā no 75 s līdz 150 s bija ievērojams kritums neitronu plūsmā, kas tajā brīdī liedza iegūt jebkādas neitronu radiogrāfijas attēlus. Grafiks arī parāda asimetriju, salīdzinot labās un kreisās puses augstumu laikā.

5.6. attēlā ir redzams šī darba vissvarīgākais rezultāts. Šis eksperiments ar intensīvāko maisīšanas režīmu satur vislielāko dinamisko daļiņu skaitu tilpumā, tādējādi ļaujot izsekot fronte, kā arī vizuāli parādīt pusšķidrās zonas esamību kausējumā. Tādēļ šis eksperiments tiek analizēts visdziļāk, un uz tā tiek balstīti vairums no secinājumiem. 5.1. tabulā ir aprakstīts daļiņu sadalījums un fronte, katrā no attēla 5.6 redzamajiem laika momentiem. Frontes augstums atkarībā no laika ir parādīts attēlā 5.7. Eksperimenta novērojumi:

1. Frontei laika momentos  $t = 0$  s,  $t = 120$  s un  $t = 180$  s ir novērojama asimetrija, respektīvi, kreisā puse sacietē straujāk. Tālāk frontes forma ir simetriska ar smaili centrā. Šādu formu rada divu augšējo magnētu radītie plūsmas virpuļi.
2. Procesa sākumā cietajā daļā nenotiek daļiņu iesalšana. Laika momentā  $t = 180$  s sāk notikt daļiņu apstāšanās un notveršana tikko sacietējušajā materiālā. Tālākajos laika momentos, notiek daudzu daļiņu iesalšana kausējumā.
3. Daļiņu skaits plūsmā ir liels, kas ir labi, jo tas palīdz vizualizēt plūsmas līnijas un saprast daļiņu iesalšanas procesu. Intensīvais maisīšanas režīms ir labvēlīgs daļiņu noturēšanai trauka tilpumā, jo lielāks plūsmas ātrums rada lielāku viskozo pretestības spēku, kas tiek izdarīts uz daļiņu (3.2).



5.6. attēls: Daļiņu sadalījums alvas (Sn) orientētas kristalizācijas laikā. Intensīvākais maisīšanas režīms (53 rev/s)



5.7. attēls: Alvas (Sn) frontes augstums intensīvākajā maisīšanas režīmā (53 rev/s)

4. Sākot ar laika momentu  $t = 180$  s, analizējot procesa video, ir redzams, ka izveidojas pusšķidrš apgabals, kurā iekļuvušās daļiņas pārvietojas daudz lēnāk nekā primārajā plūsmā. Daļiņa, kas iekļuvusi šajā apgabalā, vai nu lēnām apstājas un iesalst jaunizveidotajā cietajā materiālā, vai arī atkal tiek ierauta atpakaļ apgabalā ar intensīvu plūsmu.
5. Līdz laika momentam  $t = 180$  s fronte ir izliekta un gluda. Tas tā ir, jo parasti kausējumam ir augstāka temperatūra par sacietējušo daļu un plūsmas virziena materiāls tiek izkausēts (rodas “izgrauzums”). Taču brīdī  $t = 240$  s ir novērojams kas neparasts - kausējums sāk sacietēt antiparalēli plūsmai. Kaut kas tāds ir iespējams tikai tad, ja kausējums ir pārdzesēts.
6. Laika momentos  $t = 180$  s,  $t = 240$  s un  $t = 270$  s uz brīvās virsmas simetrijas ass tiek novērota daļiņu aglomerēšanās, bet tās netiek ierautas iekšā. Taču no laika momenta  $t = 300$  s daļiņas no virsmas sāk ieraut iekšā ievērojamā skaitā. Aplūkojot procesa video šajā periodā, raksturīgais plūsmas ātrums ir lēnāks nekā pilnīgi šķidrā metālā. Tas nozīmē, ka apstākļi traukā ir mainījušies tā, ka plūsmas ātrums nav vienīgais mainīgais parametrs, kas nosaka pretestības spēku uz daļiņu.

*5.1. tabula*

**Attēla 5.6 kvalitatīva analīze**

Laiks, s	Frontes augstums, mm	Plūsma	Daļiņu iesalšana un frontes forma
60	20	4 virpuļi	Praktiski nav novērojama.
120	20	4 virpuļi	Ievērojams daudzums daļiņu sāk iesalt cietajā daļā.
180	40	3 virpuļi	Daļiņas iesalst pusšķidrā zonā visā cietā/šķidrā robežslāņā garumā.
240	50	2 virpuļi	Fronte ir simetriska, ar pīķi vidū, ko rada divi dominējošie virpuļi plūsmā. Pusšķidrās zonas biezums kļūst ievērojams, parādās reģioni ar lēnu pusšķidru plūsmu, kas satur daļiņas.
270	55	2 virpuļi	Frontes forma ir tāda pati kā iepriekšējā laika solī.
300	65	2 virpuļi	Daļiņu klāsteris, kas akumulējies centrā, tiek ierauts tilpumā. Šajā brīdī efektīvā viskozitāte ir pietiekami liela, lai pārvarētu Arhimēda un virsmas spraiguma spēkus.
330	75	1 virpuļi	Virpulis labajā pusē pārstāj griezties, kreisajā pusē vēl notiek kustība.
360	120	Plūsmas nav	Lielākais daļiņu blīvums ir novērojams nesien sacietējušajos apgabalos, it īpaši uz simetrijas ass.

7. Frontes augstuma grafiks laikā (sk. 5.7. att.) parāda to, ka frontes augstums līdz

brīdīm  $t = 180$  s ir diezgan lineārs ( $R^2 = 0.983$ ;  $R^2 = 0.978$ ;  $R^2 = 0.991$ ) ar vidējo sacietēšanas ātrumu 0.24; 0.22 un 0.11 mm/s attiecīgi kreisajai pusei, vidum un labajai pusei. Salīdzinājumam raksturīgais frontes ātrums metalurģiskajos liešanas procesos ir ar kārtu 1 mm/s. Tālāk pēc  $t = 180$  s (vai  $t = 200$  s vidū) ir novērojams lēcieni, kad sacietēšana notiek ievērojami straujāk. Tā kā sacietējušais materiāls kalpo kā siltumizolācija, un temperatūras starpība starp dzesētāju un kausējumu ir konstanta, papildu siltums, kas nepieciešams straujākai sacietēšanai, ir jāatdod kaut kam citam.

Novērojumi 2, 4 un 7 parāda to, ka konkrētajā laika brīdī kausējums sistēmā ir pārdzesēts, tajā veidojas pusšķidrā zona un sāk notikt daļiņu iesalšanas process. Arī daļiņu ieraušana tilpumā no brīvās virsmas notiek, kad metāls atrodas pusšķidrā stāvoklī. Tas liek domāt, ka fizikālie apstākļi pusšķidrajā zonā ir labvēlīgāki daļiņu ieraušana, noturēšanai tilpumā un iesaldēšanai. Tiek izvirzīti divi fizikālā fenomena skaidrojumi:

1. Efektīvās viskozitātes pieaugums. Sakausējumam pusšķidrā stāvoklī ir divas komponentes - šķidrā daļa un cietā daļa, kas sastāv no lielākiem un mazākiem kristāliem. Intensīva maisīšana neļauj dendrītiem izaugt, jo plūsma tos vienkārši nolauž. Lai intuitīvi saprastu šādu pusšķidru materiālu, var iztēloties sorbertu (saldēts deserts). Šāda suspensija ir neņūtona šķidrums, kas nozīmē, ka šādi šķidrums vairs neseko Ņūtona viskozitātes likumam. Šādiem šķidrums empiriski var ieviest efektīvo viskozitāti (5.1) [36], kur  $C$  ir cietās daļas koncentrācija un  $\nu_{\text{šk.}}$  ir tīra šķidruma viskozitāte.

$$\nu_{eff} = \nu_{\text{šk.}}(1 + 2.5C + 10.05C^2 + 0.00273e^{16.6C}) \quad (5.1)$$

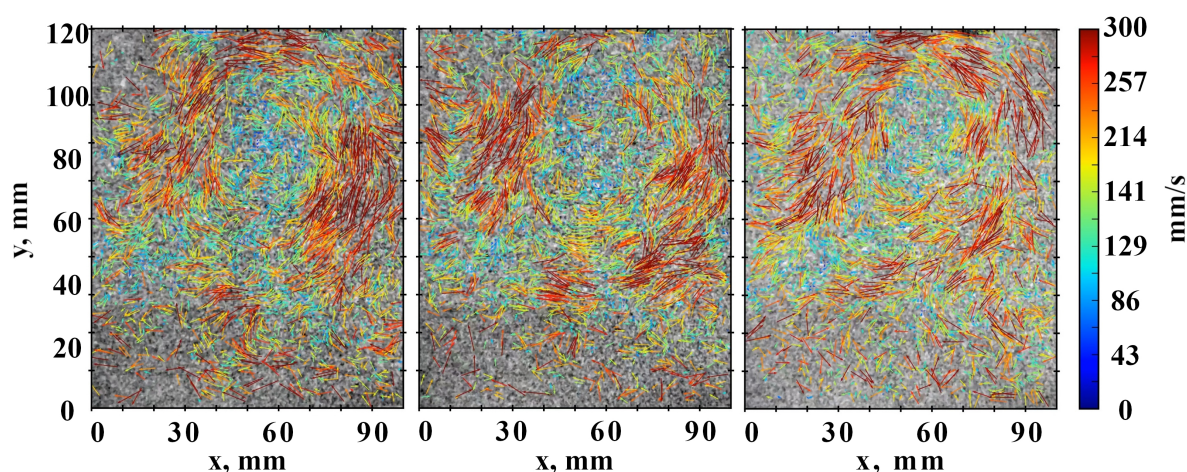
Ir redzams, ka, palielinot cietās fāzes koncentrāciju  $C$ , strauji pieaug efektīvā šķidruma viskozitāte. Tas nozīmē, ka pusšķidrajā kausējumā atbilstoši Stoksa likumam, uz daļiņu darbosies lielāki viskozie spēki. Šeit gan ir jāņem vērā, ka plūsmas ātrums pie palielinātas viskozitātes arī būs zemāks. Tas nozīmē, ka efektīvās viskozitātes izmaiņu dēļ, rezultējošais spēks uz daļiņu būs atkarīgs no pretestības spēka pieauguma un plūsmas ātruma samazinājuma.

2. Kristālītu piesalšana daļiņām. Ja kristalizācijas process norit ar intensīvu plūsmu pie šķidrās un cietās daļas robežvirsmas, tiek nolauzti kristalīti, kas tiek aiznesti pārējā tilpumā. Tā, kā šo kristālītu daudzums pusšķidrajā metālā ir ļoti liels, tiek izvirzīta hipotēzē, ka cietās Gd daļiņas, aplīp ar šiem kristalītiem. Ja tas tā notiek, pirmkārt, pieaug katras Gd daļiņas tilpums un šķērsriezuma laukums, kas noteikti

ietekmē to dinamiku. Otrkārt, ir iespējams, ka Gd daļiņa, kas ir aplipusi ar šādiem kristālītiem, nonākot pie frontes, spēj tajā iesalt ar lielāku varbūtību.

## 5.2. Daļiņu izsekošana (PIV)

Daļiņu izsekošana (PIV) ir pēcapstrādes metode, ar kuras palīdzību katrai no plūsmā redzamajām daļiņām piekārto laikā mainīgu ātruma vektoru. Šāda metode ir pielietota plūsmas ātruma iegūšanai, kur šie dati ir salīdzināti ar skaitliskā modeļa rezultātiem [5]. Attēlu pirmsapstrāde tiek veikta ar *ImageJ*, kur katram attēlam ir atņemts fons, izņemti 1px lieli trokšņa radītie punkti (*removing outliers*) un uzlikts vidējošanas filtrs. Pati daļiņu izsekošana ir veikta ar *PivTec* programmatūru *PIVview@2C 3.3.2*. Daļiņu izsekošanai novēroti vairāki ierobežojumi - PIV nespēja uztvert lielākos plūsmas ātrumus, kam bija jābūt magnētu tuvumā, minimālā teorētiska izšķirtspēja ir  $220 \mu m$  un starp divām blakus esošajām daļiņām jābūt vismaz 20 px lielam atstarpei. HZDR doktorants M. Sarma pēc šāda principa veica daļiņu izsekošanu sērijai, kas attēlota 5.6. attēlā. Iegūti rezultāti laika momentā  $t = 100$  s,  $t = 101$  s un  $t = 102$  s ir redzami attēla 5.8. Salīdzinot reāllaika video ar daļiņu izsekošanas video, ir redzams, ka galvenais plūsmas veids tiek uztverts, taču izsekošana notiek ar pārrāvumiem. Daļiņu izsekošanas rezultātos periodiski tiek novēroti visi trīs virpuļi, kas redzami laikā vidējotajos neitronu radiogrāfijas rezultātos. Salīdzinot šos trīs laika momentus, ir redzams, ka daļiņu ātruma vektori, tiek veiksmīgi noteikti tikai daļā no galvenā plūsmas virpuļa. Kā arī ir redzami mainīgi ātruma vektori kausējuma cietajā daļā, kas rodas trokšņa dēļ. Raksturīgais plūsmas ātruma mērogs ir no 100 līdz 300 mm/s. Kopumā ir jāsecina, ka pie šāda daļiņu izmēra un attēla trokšņa, kvalitatīva neitronu radiogrāfija nav realizējama.

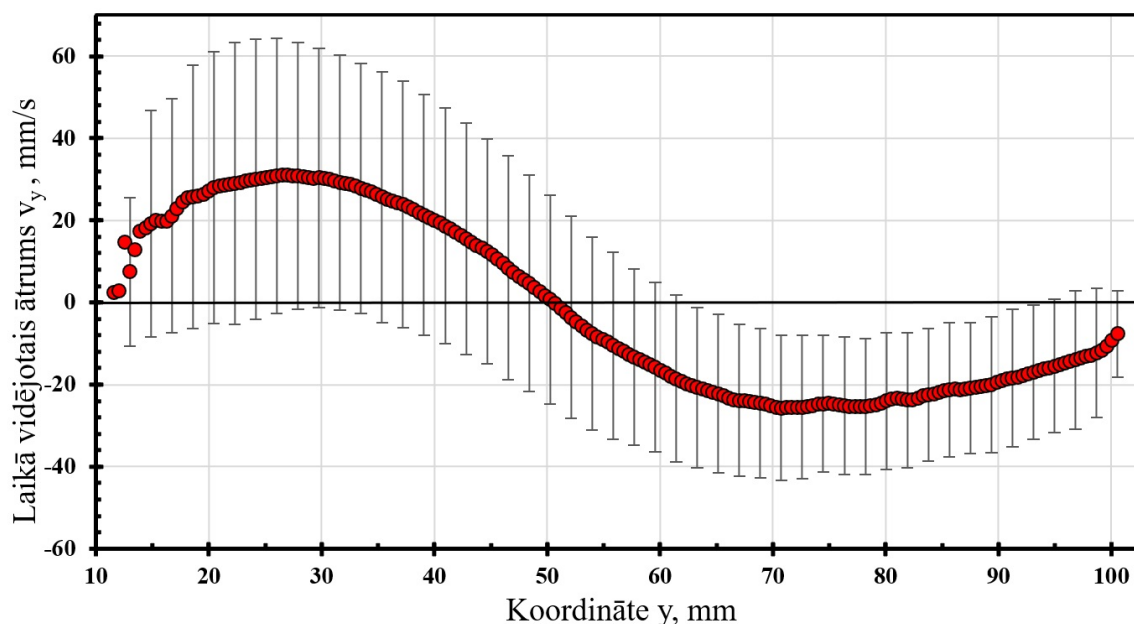


5.8. attēls: Momentānais daļiņu ātrums, kas iegūts veicot daļiņu digitālu izsekošanu (PIV). Trīs momentuzņēmumi ir veikti laika punkts  $t = 100$  s,  $t = 101$  s un  $t = 102$  s

### 5.3. Ultraskaņa Doplera ātruma (UDV) mērījumi

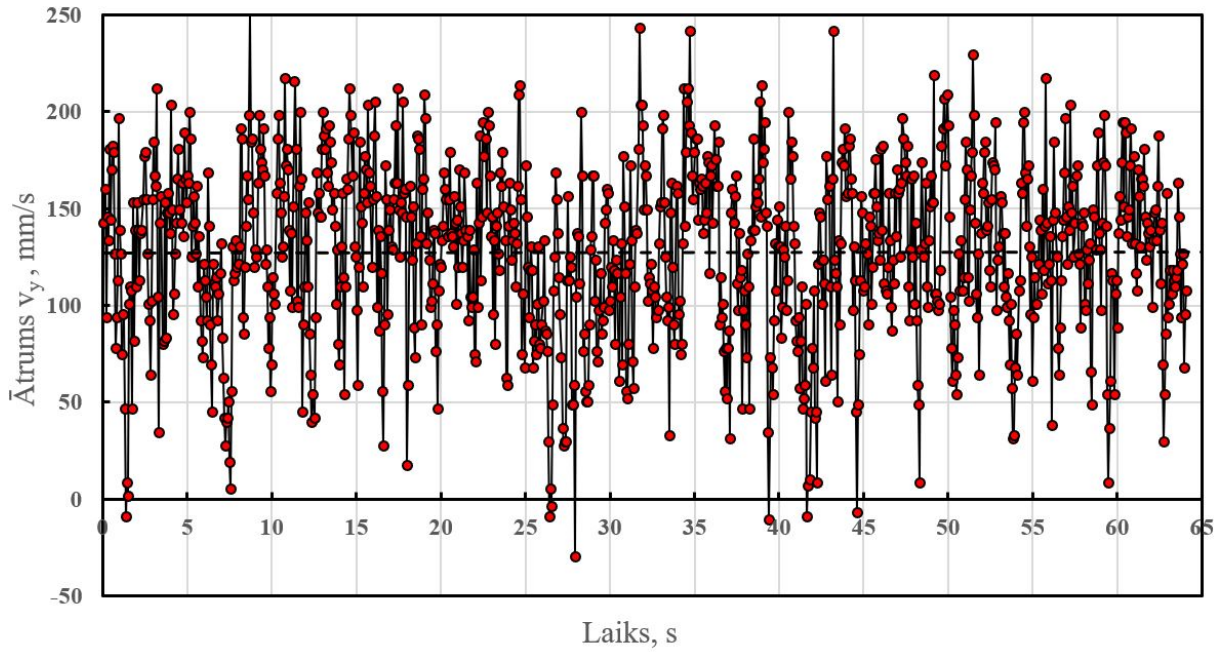
Laikā vidējotā plūsma uz simetrijas ass pie fiksēta rotācijas ātruma ir parādīta attēlā 5.9. Ātruma profils tiek iegūts, laikā vidējojot katru attāluma punktu. Mērīšanas laiks šajos UDV mērījumos ir 64 s, kuru laikā tiek ierakstīti 1000 mērījumi. Konkrētam attālumam ātruma mērījums laikā ir parādīts 5.10. attēlā. Ir redzams, ka mērāmajā laikā notiek lielas ātruma pulsācijas. Lai ņemtu vērā šo pulsāciju intensitāti, katram no laikā vidējotajiem mērījumiem tiek aprēķināta standartnovirze, kura attēlota kā kļūdas nogrieznis. Kā arī, lai saprastu, vai mērīšanas laiks 64 sekundes ir pietiekoši ilgs, tika analizēti ātruma mērījumi laikā, tos sadalot ceturtdaļās. Tālāk katras ceturtdaļas vidējais ātrums tiek salīdzināts ar kopējā mērījuma vidējo vērtību, lai pārlicinātos, vai ātruma pulsāciju raksturīgais laiks ir daudz mazāks par mērāmo laiku. Tika novērtots, ka pie zemākajām maisīšanas frekvencēm, mērāmais laiks nedrīkst būt mazāks par 1 minūti.

Analizējot attēlu 5.9, ir iespējams redzēt, ka līdz trauka vidum ( $y = 50 \text{ mm}$ ) ātruma  $y$  komponente ir pozitīva, pēc tam maina zīmi un pie ( $y = 100 \text{ mm}$ ) tiecas uz nulli. Šāda situācija kvalitatīvi atbilst skaitliskā modeļa rezultātiem (sk. 3.3 att.) un iepriekšējiem neitronu radiogrāfijas pētījumiem [5].

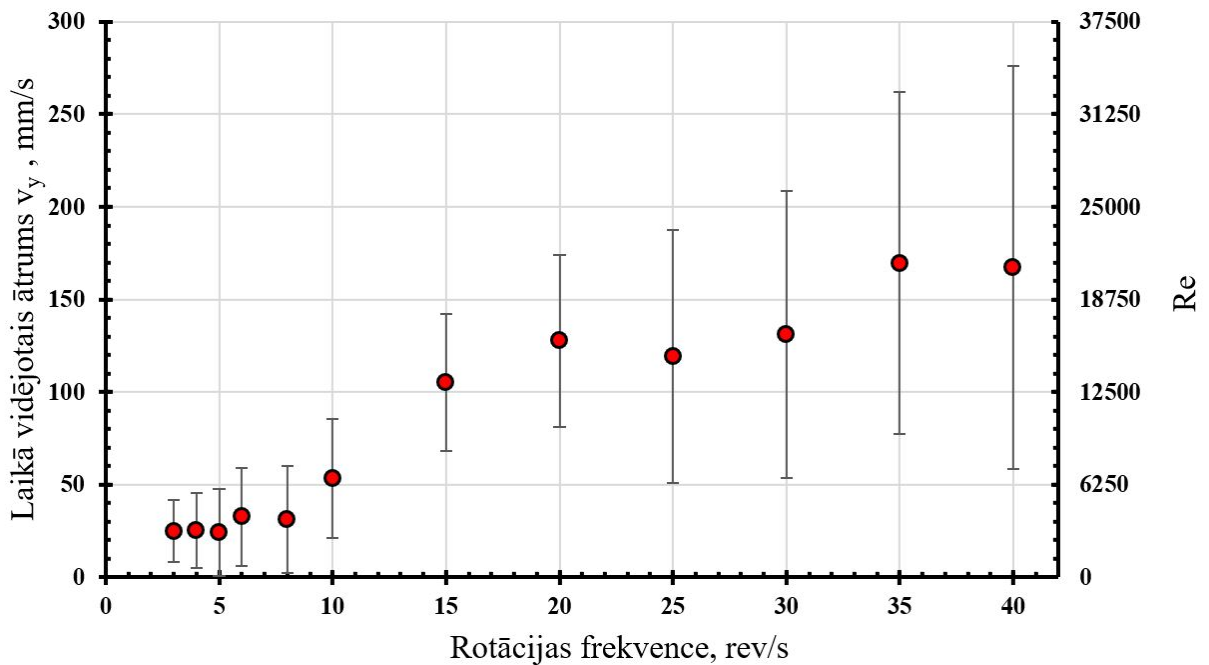


5.9. attēls: Plūsmas ātruma profils uz simetrijas ass, magnētu rotācijas frekvence ir 8 rev/s, kļūdas nogrieznis ir  $1\sigma$ , mērīšanas pozīcija ir  $(x, y) = (50, 0..100)$  mm

Lai saprastu sistēmas raksturīgo ātrumu atkarībā no magnētu rotācija frekvences, tika veikta eksperimenta sērija, kur magnētu rotācijas frekvence ir mainīgais lielums, un tika variēts no 3 līdz 40 rev/s. Aplūkojot ātrumu konkrētā pozīcijā, ir iegūts attēls 5.11. Mērāmā punkta pozīcija ir  $(x, y) = (50, 25)$  mm, kas atbilst krustpunktam starp



5.10. attēls: Momentānais plūsmas ātrums viena mērījuma laikā fiksētā koordinātē  $(x, y) = (50, 25)$  mm. Vidējais ātrums  $v_{y \text{ vid}}$  ir atzīmēts ar raustītu līniju.  $\sigma = 44.9 \text{ mm/s}$



5.11. attēls: Vidējais ātrums un Reynoldsa skaitlis atkarībā no magnētu rotācijas ātruma. Kļūdas nogrieznis ir  $1 \sigma$ , mērīšanas pozīcija  $(x, y) = (50, 25)$  mm

simetrijas asi un asi, kas savieno apakšējos magnētus. Katrs mērījums ir laikā vidējots pa visu mērījuma laiku - 64 s, un standartdeviācija ir attēlota kā kļūdas nogrieznis. Grafikā 5.11 ir redzams, ka:

1. Pieaugot magnētu rotācijas frekvencei, pieaug raksturīgais plūsmas ātrums. Pie lielākajiem apgriezieniem sistēma tiecas uz piesātinājumu (bet nesasniedz to), kad papildus pieaugums frekvencē vairs nedodu ievērojamu pieaugumu plūsmas ātrumā. Kvalitatīvi šie rezultāti ir līdzīgi viena cilindra [37] un divu cilindru [38] rotējošu magnētu sistēmām.
2. Ātruma pulsācijas (grafikos attēlota 1 standartdeviācija) ir salīdzināmas ar plūsmas ātrumu, kā arī palielinās, pieaugot maisīšanas frekvencei. Tas ir sagaidāms, jo ir zināms, ka turbulentākās plūsmas, pulsāciju enerģijas īpatsvars pieaug. Pulsāciju esamība šādā sistēmā ir svarīga, jo pulsācijas nodrošina masas pārnesi starp recirkulējošajiem virpuļiem, ja laikā vidējotā plūsma ir simetriska kā attēlā 3.3.
3. Reynoldska skaitlis pie šādiem plūsmas ātrumiem ir mērāms desmitos tūkstošu. Tas nozīmē, ka mēs darbojamies ar pilnībā attīstītu recirkulējošu turbulentu plūsmu. Mūsu apstākļos plūsmas, kad  $Re > 10^4$ , paliek sarežģīti nomērīt ar UDV, tādēļ mērījumi, pie lieliem rotācijas ātrumiem nesatur pilnu ātruma profilu.

## 6. KOPSAVILKUMS UN SECINĀJUMI

Maģistra darba mērķis tika sasniegts, izpildot visus darba uzdevumus. Eksperimentālā iekārta tika pilnveidota, un bija iespējams pētīt orientēto kristalizāciju ar neitronu radiogrāfijas palīdzību. Neveiksme ar sildītāja saplīšanu piespieda izmantot citu eksperimentālo pieeju, kā rezultātā tika novērots iepriekš negaidīts efekts. Darbā tika novērots daļiņu iesalšanas mehānisms, kā arī iespēju robežās ir kvantificēti eksperimentālie rezultāti. Visbeidzot, galvenajiem eksperimentālajiem novērojumiem tiek piedāvāts fizikālais modelis procesa skaidrošanai. Darba gaitā iegūtie secinājumi:

1. Neitronu radiogrāfija var tikt sekmīgi izmantota kā metode šķidra metāla plūsmas un kristalizācijas izpētei.
2. Gallija kristalizācijas neitronu radiogrāfija rada kvalitatīvus rezultātus. Pirmkārt, lielāka ekspozīcijas laika dēļ fronte ir skaidri redzama, otrkārt, sacietēšanas (frontes) ātrums ļoti līdzinās teorijā paredzētajam.
3. Ar neitronu radiogrāfiju ir grūti izšķirt cieto un šķidro fāzi vairumā alvas kristalizācijas eksperimentu. Šo problēmu daļēji var atrisināt, laikā vidējojot vairākus attēlus.
4. Vairākos alvas kristalizācijas eksperimentos ir novērota pusšķidrās zonas parādīšanās. Kvalitatīvi analizējot daļiņu iesalšanas procesu un frontes pārvietošanās ātrumu, ir novērojama ievērojami biežāka daļiņu iesalšana, ja sistēmā eksistē pusšķidrā zona.
5. Alvas kristalizācijas eksperimentos ir novērots, ka pusšķidra metāla plūsma spēj ieraut iekšā daļiņas no brīvās virsmas pat tādā gadījumā, kad pilnībā šķidra metāla plūsma to nespēj. Šis ir svarīgākais no secinājumiem, jo šo efektu var potenciāli pielietot specifisku tehnoloģisku procesu realizēšanai.
6. Tiek piedāvāti divi skaidrojumi daļiņu iesalšanas un ieraušanas novērojumiem. Pirmais ir pusšķidrās plūsmas efektīvās viskozitātes pieaugums un otrs ir kristalītu pielipšana pie daļiņām.
7. Daļiņu digitāla izsekošanas šajos apstākļos nespēj notvert neko vairāk kā raksturīgo plūsmas ātrumu.
8. Ultraskaņa Doplera ātruma mērījumi līdzīgās sistēmās ir noderīgi skaitliskā modeļa verifikācijai. Taču, plūsmas ātrumam šajos apstākļos pārsniedzot 100 mm/s, mērī-

jumu veikšana ir apgrūtināta. Tas mums liedz izmantot UDV tieši pie intensīvākā maisīšanas režīma.

## 6.1. Dalība konferencēs un publikācijās

### Publikācijas

1. R. Baranovskis, M. Sarma, M. Ščepanskis, T. Beinerts, A. Gaile, S. Eckert, D. Räßiger, E.H. Lehmann, K. Thomsen, P. Trtik  
Investigation of Particle Dynamics and Solidification in Two-Phase System by Neutron Radiography  
Magnetohydrodynamics, (2019)
2. Kaldre, I., Bojarevics, A., Beinerts, T., Baranovskis, R., Nikoluskins, R., Milgravis, M., Kalvans, M.  
Contactless electromagnetic method for aluminium degassing  
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 424 (1), (2018)
3. Beinerts, T., Bojarevičs, A., Baranovskis, R., Milgravis, M., Kaldre, I.  
Permanent magnet dipole stirrer for aluminium furnaces  
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 424 (1), (2018)
4. Bojarevičs, A., Baranovskis, R., Kaldre, I., Milgravis, M., Beinerts, T.  
Two cylinder permanent magnet stirrer for liquid metals  
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 228 (1), (2017)

### Konferences

1. 11th International PAMIR International Conference - Fundamental and Applied MHD July 01 – 05, 2019, Reims, France  
R. Baranovskis, M. Sarma, M. Ščepanskis, T. Beinerts, A. Gaile, S. Eckert, D. Räßiger, E.H. Lehmann, K. Thomsen, P. Trtik  
Investigation of Particle Dynamics and Solidification in Two-Phase System by Neutron Radiography

2. Latvijas Universitātes 77. starptautiskā konference, sekcija "Fundamentālā un lietišķā magnetohidrodinamika"(2019)  
R. Baranovskis, V. Dzelme, A. Jakovičš, A. Gaile, I. Kaldre  
 Rotējošu pastāvīgo magnētu radītas šķidrā metāla plūsmas skaitliska un eksperimentāla izpēte
  
3. Latvijas Universitātes 76. starptautiskā konference, sekcija "Materiālu elektromagnētiskās apstrādes un izpētes metodes" (2018)  
R.Baranovskis, M. Ščepanskis, M. Sarma, T. Beinerts, M. Kalvāns, K. Thomsen, P. Vontobel  
 Daļiņu iesalšanas procesa eksperimentālie pētījumi orientētās kristalizācijas laikā
  
4. XVIII International UIE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing  
R.Baranovskis, M.Milgrāvis, A. Bojarevičš, I. Kaldre  
 Liquid Metal Homogenization and Crystallization under Low-Frequency Alternating Magnetic Field
  
5. Latvijas Universitātes 75. Konference, Sekcija "Šķidri, elektrovadoši un feromagnētiski materiāli un ar tiem saistītās iekārtas", (2017)  
R. Baranovskis, I. Kaldre, A. Bojarēvičš  
 Divcilindru pastāvīgo magnētu maisītājs alumīnijam
  
6. Latvijas Universitātes 74. Konference, Sekcija "Lietišķa Magnetohidrodinamika", (2016)  
R. Baranovskis, A. Bojarevičš, T. Beinerts, M. Kalvāns  
 Divu pastāvīgo magnētu cilindru maisītājs šķidru metālu homogenizācijai

### **Patents**

LV15144 ELEKTROVADOŠU METĀLISKU UN PUSVADĪTĀJU KAUSĒJUMU MAIŠĪŠANAS IERĪCE

Andris BOJAREVIČŠ (LV), Jurijs GEĻFGATS (LV), Toms BEINERTS (LV), Matīss KALVĀNS (LV), Reinis BARANOVSKIS (LV)

## 6.2. Turpmākie pētījumu virzieni

Neitronu radiogrāfija kā metode šķidra metāla plūsmu izpētei ir agrīnā stadijā. Ir iespējams veikt kvalitatīvu attēlu analīzi, taču kvantitatīvu rezultātu iegūšanas metodes ir nepieciešams pilnveidot. Tas nozīmē, izmantot eksperimentālos UDV ātruma mērījumus, daļiņu izsekošanu un skaitlisko modelēšanu, lai savstarpēji verificētu iegūtos rezultātus. Lai tālāk attīstītu šo pētījumu virzienu būtu nepieciešams:

1. Izmantot UDV ātruma mērījumus, lai verificētu skaitlisko modeli. To ir iespējams panākt, salīdzinot skaitliskā modeļa rezultātus ar zināmu vienkāršāku plūsmu. Konkrēti šajā pašā ģeometrijā ir iespējams mainīt magnētu skaitu un rotācijas virzienu tā, lai traukā radītu plūsmu ar vienu, diviem vai četriem virpuļiem. Izmantojot zemas kušanas temperatūras metālus, ir iespējams veikt UDV mērījumus, ar kuriem pārbauda to, vai skaitliskais modelis strādā, piemēram, pie dažādiem plūsmas ātrumiem. Kad tas ir izdarīts, ar skaitlisko modeli iespējams veikt aprēķinus situācijā ar karstiem metāliem, kur UDV nevar izmantot, un, piemēram, modelēt situāciju, kur daļa no metāla ir sacietējusi. Šādi rezultāti tālāk būtu salīdzināmi ar daļiņu izsekošanas rezultātiem.
2. Veikt maisīšanas un sacietēšanas testus, un to laikā veikt temperatūras mērījumus vairākos augstumos. Lai gan temperatūras mērījumi pie trauka sienas tika veikti, sagatavojot eksperimentu pirms došanās uz PSI, nav mērījumu, kas ir veikti neitronu radiogrāfijas laikā. Ideālā gadījumā būtu jāiegūst neitronu radiogrāfijas uzņēmumi reizē ar temperatūras mērījumiem iekšā traukā. Tas ļautu aprakstīt pie frontes notiekošos termiskos procesus un piefiksēt, kādi ir apstākļi, kuros daļiņas sāk salt iekšā kausējumā.
3. Veikt šādus eksperimentus ar tīru metālu un ar dažādas koncentrācijas binārajiem sakausējumiem, jo šādos gadījumos fundamentāli atšķiras pusšķidrās zonas esamība. Bināro sakausējumu gadījumā, būtu nepieciešams arī sekot līdzī iespējamai segregācijai pa augstumu.
4. Veikt atkārtotus mērījumus ar citiem metālu un daļiņu pāriem. Daļiņu slapināšanu nosaka individuālā daļiņas un šķidruma mijiedarbība. Lai saprastu to, vai elektromagnētiskā iedarbība uz pusšķidru metālu ir perspektīva metode mazu daļiņu iemaisīšanai tilpumā, ir nepieciešams pārbaudīt materiālu pārus ar dažādu slapināšanas pakāpi.

## Literatūras saraksts

- [1] Grand-View-Research, High performance alloys market size, share, trend analysis report by product (non-ferrous, platinum group, refractory, super alloys), by material, by application, and segment forecasts, 2018 - 2024, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/high-performance-alloys-market> (03 2018).
- [2] ResearchAndMarkets, Global high-performance alloys market 2016-2020, <https://www.researchandmarkets.com/reports/3883925/global-high-performance-alloys-market-2016-2020> (09 2016).
- [3] Nuclear-Power, Neutron flux spectra, <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/nuclear-engineering-fundamentals/neutron-nuclear-reactions/neutron-flux-spectra/>.
- [4] J. C. Domanus, Neutron Radiography, Techniques and Applications, Risø-M 1 (2672).
- [5] M. Ščepanskis, M. Sarma, P. Vontobel, P. Trtik, K. Thomsen, A. Jakovičs, T. Beinerts, Assessment of Electromagnetic Stirrer Agitated Liquid Metal Flows by Dynamic Neutron Radiography (2017). doi:10.1007/s11663-016-0902-8.
- [6] Paul-Sherer-Institut, Comparison of the linear attenuation coefficients for thermal neutrons (top) to 150 keV x-ray (bottom), <https://www.psi.ch/en/niag/comparison-to-x-ray> (09 2016).
- [7] wikipedia.org, Neutron-crosssection-boron, [https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron\\_capture](https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_capture).
- [8] N. Chankow, Neutron radiography, in: M. Omar (Ed.), Nondestructive Testing Methods and New Applications, IntechOpen, Rijeka, 2012, Ch. 4, p. 264. doi:10.5772/35650.
- [9] J. Brunner, A. Hillenbach, E. Lehmann, B. Schillinger, Dynamic neutron radiography of a combustion engine, 7th World Conf. on Neutron Radiography (2001) 439.
- [10] F. Edler, Y. G Kim, G. Machin, J. Pearce, D. White, Guide on secondary thermometry: specialised fixed points above 0°C, Guide on Secondary Thermometry (2017) 36.
- [11] W. Kurz, D. J. Fisher, Fundamentals of solidification, Trans Tech Publications 21 (9) (1986) 1176–1176. doi:10.4028/www.scientific.net/RC.35.

- [12] P. A. Davidson, *An Introduction to Magnetohydrodynamics*, Cambridge Texts in Applied Mathematics, Cambridge University Press, 2001. [doi:10.1017/CB09780511626333](https://doi.org/10.1017/CB09780511626333).
- [13] J. Thewlis, Neutron radiography, in: *British Journal of Applied Physics*, Vol. 7, 1956, pp. 345–350. [doi:10.1088/0508-3443/7/10/301](https://doi.org/10.1088/0508-3443/7/10/301).
- [14] H. Berger, W. N. Beck, Neutron Radiographic Inspection of Radioactive Irradiated Reactor Fuel Specimens, *Nuclear Science and Engineering* 15 (4) (1963) 411–414. [doi:10.13182/NSE63-A26458](https://doi.org/10.13182/NSE63-A26458).
- [15] J. Barton, Neutron Radiography—An Overview, in: *Practical Applications of Neutron Radiography and Gaging*, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1976, pp. 5–5–15. [doi:10.1520/STP33908S](https://doi.org/10.1520/STP33908S).
- [16] J. Haskins, Standards for Neutron Radiography, *Nondestructive Testing Standards—A Review* (1977) 108–108–7 [doi:10.1520/STP27022S](https://doi.org/10.1520/STP27022S).
- [17] H. Berger, Characteristics of a Thermal Neutron Television Imaging System, *Materials Evaluation* 24 (1966) 475–281.
- [18] J. Brenizer, A review of significant advances in neutron imaging from conception to the present, *Physics Procedia* 43 (2013) 10–20. [doi:10.1016/j.phpro.2013.03.002](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.002).
- [19] E. H. Lehmann, P. Vontobel, L. Wiesel, Properties of the radiography facility NEUTRA at SINQ and its potential for use as European reference facility (2001). [doi:10.1080/10589750108953075](https://doi.org/10.1080/10589750108953075).
- [20] Paul-Sherer-Institut, The neutra beamline, <https://www.psi.ch/en/sinq/neutra/description> (01 2015).
- [21] W. Kurz, D. Fisher, *Fundamentals of Solidification*, third edit Edition, Trans Tech Publications, 1992.
- [22] M. Wu, A. Vakhrushev, G. Nummer, C. Pfeiler, A. Kharicha, A. Ludwig, Importance of Melt Flow in Solidifying Mushy Zone, *The Open Transport Phenomena Journal* 2 (November 2014) (2010) 16–23. [doi:10.2174/1877729501002010016](https://doi.org/10.2174/1877729501002010016).
- [23] D. Musaeva, E. Baake, A. Köppen, P. Vontobel, Application of neutron radiography for in-situ visualization of gallium solidification in travelling magnetic field, *Magnetohydrodynamics* [doi:10.22364/mhd](https://doi.org/10.22364/mhd).

- [24] W. Xiaodong, F. Yves, M. René, E. Jacqueline, B. Ana-Maria, B. Florin, N. Xianzhao, Flow, heat and mass transfers during solidification under traveling/rotating magnetic field, *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 6 (4) (2015) 367–373. doi:[10.1007/s40095-015-0181-1](https://doi.org/10.1007/s40095-015-0181-1).
- [25] I. Kaldre, A. Bojarevičs, I. Grants, T. Beinerts, M. Kalvāns, M. Milgrāvis, G. Gerbeth, Nanoparticle dispersion in liquid metals by electromagnetically induced acoustic cavitation, *Acta Materialia* 118 (2016) 253–259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.045>.
- [26] M. Ščepanskis, The Modelling of the Behaviour of Solid Inclusions in the EM Induced Recirculated Turbulent Flows of Liquid Metal, Ph.D. thesis, University of Latvia (2013). doi:[10.1097/01.ASW.0000442875.94332.fd](https://doi.org/10.1097/01.ASW.0000442875.94332.fd).
- [27] M. Ščepanskis, M. Sarma, R. Nikoluškins, K. Thomsen, A. Jakovics, P. Vontobel, T. Beinerts, A. Bojarevičs, E. Platacis, A report on the first neutron radiography experiment for dynamic visualization of solid particles in an intense liquid metal flow (2015). doi:[10.22364/mhd](https://doi.org/10.22364/mhd).
- [28] M. Ščepanskis, E. Koroteeva, V. Geža, A. Jakovičs, Simulation of Liquid Metal Flow Induced by Counter-Rotating Permanent Magnets in a Rectangular Crucible, *Magnetohydrodynamics* 51 (2015) 37–44. doi:[10.22364/mhd](https://doi.org/10.22364/mhd).
- [29] V. Dzelme, M. Sarma, A. Jakovics, K. Thomsen, Modelling of Rotating Permanent Magnet Induced Liquid Metal Stirring, in: VIII International Scientific Colloquium Modelling for Materials Processing, 2017, pp. 301–306. doi:[10.22364/mmp2017.34](https://doi.org/10.22364/mmp2017.34).
- [30] K. E. Spells, The determination of the viscosity of liquid gallium over an extended range of temperature, *Proceedings of the Physical Society* 48 (2) (1936) 299–311. doi:[10.1088/0959-5309/48/2/308](https://doi.org/10.1088/0959-5309/48/2/308).
- [31] M. F. Culpin, The viscosity of liquid indium and liquid tin, *Proceedings of the Physical Society. Section B* 70 (11) (1957) 1069–1078. doi:[10.1088/0370-1301/70/11/307](https://doi.org/10.1088/0370-1301/70/11/307).
- [32] S. Cheng, Z. Wu, *Microfluidic electronics, Lab on a chip* 12 (2012) 2782–91. doi:[10.1039/c2lc21176a](https://doi.org/10.1039/c2lc21176a).
- [33] H. Rauch, M. Zawisky, C. Stellmach, P. Geltenbort, Giant absorption cross section of ultracold neutrons in gadolinium, *Phys. Rev. Lett.* 83 (1999) 4955–4958. doi:[10.1103/PhysRevLett.83.4955](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4955).

- [34] SIGNAL-PROCESSING-SA, DOP4000 series, User's manual, 1, SIGNAL PROCESSING S.A, 2018.
- [35] M. Messer, Pulsed ultrasonic doppler velocimetry for measurement of velocity profiles in small channels and capillaries, Master thesis, Georgia Institute of Technology (2005).
- [36] A. Kitanovski, D. Vuarnoz, D. Ata-Caesar, P. Egolf, T. Hansen, C. Doetsch, The fluid dynamics of ice slurry, *International Journal Of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid* 28 (1) (2005) 37–50. [doi:10.1016/j.ijrefrig.2004.07.010](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.07.010).
- [37] A. Bojarevičs, R. Baranovskis, I. Kaldre, M. Milgrāvis, T. Beinerts, Two cylinder permanent magnet stirrer for liquid metals, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 228 (1) (2017) 012022. [doi:10.1088/1757-899X/228/1/012022](https://doi.org/10.1088/1757-899X/228/1/012022).
- [38] T. Beinerts, A. Bojarevičs, R. Baranovskis, M. Milgrāvis, I. Kaldre, Permanent magnet dipole stirrer for aluminium furnaces, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 424 (1) (2018) 012037. [doi:10.1088/1757-899X/424/1/012037](https://doi.org/10.1088/1757-899X/424/1/012037).

## PATEICĪBAS

Izsaku lielu pateicību savam darba vadītājam Ilmāram Grantam par norādījumiem, ieteikumiem un skaidrojumiem visa darba garumā. Īpaši vēlos uzsvērt atbalstu teorētiskās darba daļas padziļinātai apgūšanai. Pateicība kolēģim Tomam Beinertam par veiksmīgu laboratorijas darbu organizēšanu, kas sniedza iespēju darbu eksperimentālo daļu realizēt PSI. Paldies Antrai Gailei par ievadu un palīdzību LaTeX rakstvides apgūšanā, kā arī par morālo atbalstu brīžos, kad darba rakstīšana negāja uz priekšu.

# PIELIKUMI

## 1. PIELIKUMS. NEUTRA SHĒMA

**Neutron Scattering and Imaging Instruments at SINQ**

**ZEBRA**  
Single crystal diffractometer  
Thermal neutrons  
Contact: Oksana Zaharko  
oksana.zaharko@psi.ch

**HRPT**  
High resolution powder diffractometer  
Thermal neutrons  
Contact: Vladimir Pomjakushin  
vladimir.pomjakushin@psi.ch

**NEUTRA**  
Neutron radiography  
Thermal neutrons  
Contact: Peter Vontobel  
peter.vontobel@psi.ch

**POLDI**  
Residual stress diffractometer  
Thermal neutrons  
Contact: Tobias Panzer  
tobias.panzer@psi.ch

**MORPHEUS**  
Two-axis diffractometer  
Cold neutrons  
Contact: Saumya Mukherjee  
saumya.mukherjee@psi.ch

**AMOR**  
Reflectometer  
Cold neutrons  
Contact: Jochen Stahn  
jochen.stahn@psi.ch

**MuPAD**  
Mu-metal Polarization Analysis Device  
Cold polarized neutrons  
Contact: Bertrand Roessli  
bertrand.roessli@psi.ch

**BOA**  
Neutron optics  
Cold polarized neutrons  
Contact: Uwe Filges  
uwe.filges@psi.ch

**ICON**  
Neutron radiography  
Cold neutrons  
Contact: Anders Kaestner  
anders.kaestner@psi.ch

**EIGER**  
Triple-axis spectrometer  
Thermal neutrons  
Contact: Uwe Stuhr  
uwe.stuhr@psi.ch

**RITA-II**  
Triple-axis spectrometer  
Cold neutrons  
Contact: Christof Niedermayer  
christof.niedermayer@psi.ch

**DMC**  
High intensity powder diffractometer  
Cold neutrons  
Contact: Lukas Keller  
lukas.keller@psi.ch

**NARZISS**  
Reflectometer  
Cold neutrons  
Contact: Jochen Stahn  
jochen.stahn@psi.ch

**ORION**  
Two-axis diffractometer  
Cold neutrons  
Contact: Daniel Mazzone  
daniel.mazzone@psi.ch

**TASP**  
Triple-axis spectrometer  
Cold polarized neutrons  
Contact: Jonathan White  
jonathan.white@psi.ch

**FOCUS**  
Time-of-flight spectrometer  
Cold neutrons  
Contact: Jan P. Embs / Fanni Juranyi  
jan.embs@psi.ch

**SANS-I**  
40 m SANS facility  
Cold neutrons  
Contact: Joachim Kohlbrecher  
joachim.kohlbrecher@psi.ch

**SANS-II**  
12 m SANS facility  
Cold neutrons  
Contact: Urs Gasser  
urs.gasser@psi.ch

**MARS**  
Backscattering spectrometer  
Cold neutrons  
Contact: Fanni Juranyi / Jan P. Embs  
fanni.juranyi@psi.ch

Further Information: [www.psi.ch/sinq/instrumentation](http://www.psi.ch/sinq/instrumentation)

6.1. attēls: Neitronu izkliedes un attēla uzņemšanas instrumenti, kas izvietoti ap SINQ.

## DOKUMENTĀRĀ LAPA

Maģistra darbs „**Šķidra metāla plūsmas un kristalizācijas izpēte ar neitronu radiogrāfiju**” izstrādāts Latvijas Universitātes **Fizikas, matemātikas un optometri-  
jas fakultātē**.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā no-  
rādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: \_\_\_\_\_ /Reinis Baranovskis/

Rekomendēju/nerekomendēju darbu aizstāvēšanai:

Vadītājs: Dr. phys. Ilmārs Grants \_\_\_\_\_ \_\_\_\_.2019.

Recenzents: Dr. phys. Sandris Lācis \_\_\_\_\_ \_\_\_\_.2019.

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā \_\_\_\_\_.2019.

Dekāna pilnvarotā persona: \_\_\_\_\_

Darbs aizstāvēts maģistra gala pārbaudījuma komisijas sēdē

\_\_\_\_\_.2019. prot. nr. \_\_\_\_\_, vērtējums \_\_\_\_\_

Komisijas sekretārs: \_\_\_\_\_