UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO
FIZIKALNA MERILNA TEHNIKA

Žan Jerman

DINAMIKA TALJENJA SNEGA SLIKANA Z MAGNETNO RESONANCO

Zaključna naloga

MENTOR: doc. dr. Aleš Mohorič
SOMENTOR: izred. prof. dr. Igor Serša
Ljubljana, 2016

Izjava o avtorstvu in objavi elektronske oblike

Izjavljam:

- da sem zaključno nalogo naslovljeno *DINAMIKA TALJENJA SNEGA SLIKANA Z MAGNETNO RESONANCO* izdelal samostojno pod mentorstvom Aleša Mohoriča,
- da je elektronska oblika dela identična tiskani in
- da Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani dovoljujem objavo elektronske oblike svojega dela na spletnih straneh Repozitorija Univerze v Ljubljani

Ljubljana, dne Podpis:

Zahvala

Za pomoč pri pri praksi in izvajanju meritev za zaključno nalogo bi se rad zahvalil somentorju dr. Igorju Serši ter Ani Sepe. Za pomoč pri pisanju, potrpežljivost in pripravljenost pa mentorju dr. Alešu Mohoriču.

Zahvala gre tudi drugim sodelavcem iz odseka F5, ki so me spremljali in mi pomagali med prakso.

Povzetek

Taljenje snega je zanimiv termodinamski proces faznega prehoda in prenosa toplote. Je uporaben za spoznavanje spreminjanja strukture snovi, ki jo izpostavimo toplotnemu toku z namenom, da bi jo stalili. Hitrost taljenja in njena modifikacija z različnimi primesmi pa sta uporabni pri področjih, kot so kulinarika, smučanje...

V zaključni nalogi sem z metodo slikanja z magnetno resonanco opazoval dinamiko taljenja snega. Cilj je bil najti dovolj hitro sekvenco, da se snegu struktura ne spremeni bistveno med samim zajemanjem slik. Izbral sem metodo RARE. Metoda je neinvazivna in ne vpliva na proces, zato je primerna za opazovanje spreminjanja strukture snega, kot tudi za opazovanje hitrosti, s katero se sneg tali brez dodatnega segrevanja.

Dobljene rezultate sem primerjal z izračunanim modelom, ter obrazložil odstopanja.

Abstract

Melting of snow is an interesting process of phase transition and heat conduction. It is useful for understanding of change in matter's structure, if we put said matter somewhere warm to incline melting. The rate of snow melting and its modification are used in a variety of fields like cooking, skiing...

In this work, melting of snow has been observed with magnetic resonance imaging (MRI). The task was to find fast enough sequence, so the snow's structure does not change too much while the picture is being taken. We chose the RARE method (Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement). The method is non invasive and does not affect the rate of snow melting, hence it is appropriate for observation of structure changes and the rate at which the snow melts, without being additionally warmed from other sources.

The results were then compared with a calculated model.

Kazalo

Uvod 11
1. Osnove jedrske magnetne resonance 12
1.1. Jedro v magnetnem polju 12
1.2. Precesija, magnetizacija in njena relaksacija 14
1.3. Potek NMR eksperimenta 16
1.4. Spinski odmev 18
2. Osnove slikanja z magnetno resonanco 20
2.1. Slikanje v eni dimenziji 21
2.2. Slikanje v dveh dimenzijah 22
2.3. Naprava za slikanje magnetne resonance 23
3. Prenos toplote 25
3.1. Kondukcija 25
3.2. Konvekcija 26
3.3. Razmerje konvekcije in kondukcije 26
3.4. Sevanje 26
3.5. Prehod med agregatnimi stanji 27
3.5.1. Izparevanje 28
3.5.2. Kondenzacija 28
3.5.3. Taljenje 29
4. Meritve in rezultati 30
4.1. Priprave in pripomočki 30
4.2. Rezultati 32
4.3. Matematični model 33
5. Diskusija 35
6. Zaključek 36
7. Viri in literatura 37

Uvod

Jedrsko magnetno resonanco (NMR) sta leta 1945 odkrila Felix Bloch in Edward Mills Purcell. Na popularnosti je jedrska magnetna resonanca pridobila v zadnjih 30 letih, ko se je tehnologija dovolj razvila, da omogoča prikazovanje in neinvazivno zajemanje prostorsko ločljivih slik v kateremkoli prerezu (sagitalen, koronalen, transverzalen), ne da bi vzorec vrteli.

Jedrska magnetna resonanca se je uveljavila v medicini, saj je zmožna neinvazivnega prikaza notranjosti telesa. Jedrska magnetna resonanca tudi ne uporablja ionizirajočega sevanja ali radiofarmakov, kot druge tehnike slikanja v medicini (CT, Radiografija, SPECT), zato ima prednost pri uporabi. Slikanje z jedrsko magnetno resonanco je tudi relativno hitro, kar je v medicini ključnega pomena za natančnost slike, ker človek ne more dolgo mirovati v enem položaju. Kot zanimivost in obenem dokazilo za pomembnost jedrske magnetne resonance, sta za raziskave s slikanjem z jedrsko magnetno resonanco leta 2003 Peter Mansfield in Paul Lauterbur prejela Nobelovo nagrado za medicino.

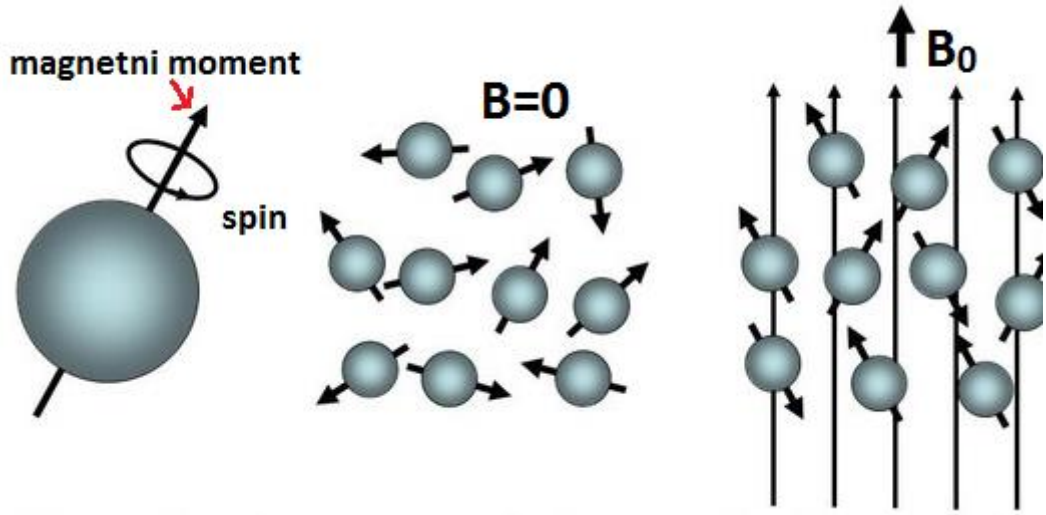
Jedsko magnetno resonanco uporabljamo tudi izven medicine; s posebnimi tehnikami in sekvencami lahko na primer raziskujemo dinamiko raznih kapljevin in tekočin. V tej zaključni nalogi bom opisal analizo dinamike taljenja snega na sobni temperaturi, brez dodatnega segrevanja, narejeno s hitrim slikanjem z MR.

1. Osnove jedrske magnetne resonance

Jedrska magnetna resonanca je tehnika slikanja, ki izkorišča močno magnetno polje ter kvantno-mehanske lastnosti delcev, običajno protonov. Pri NMR merimo absorpcijo radiofrekvenčnega elektromagnetnega sevanja v snovi, ki nastane zaradi prehodov med razcepljenimi stanji jedrskega magnetnega dipolnega momenta v zunanjem magnetnem polju.

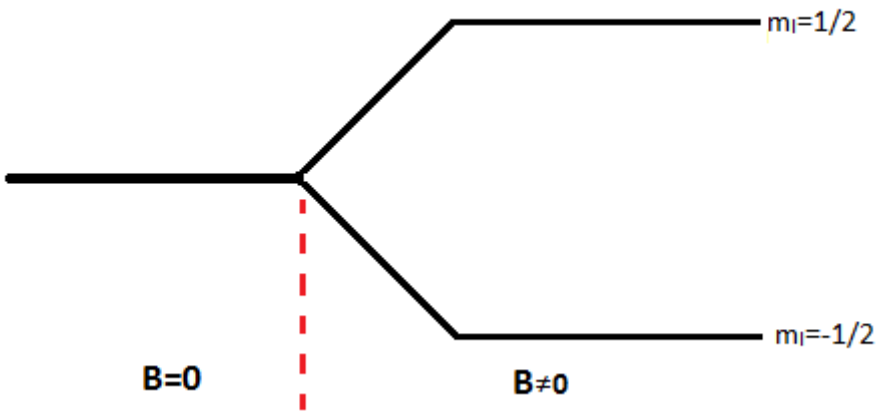
1.1. Jedro v magnetnem polju

Atomsko jedro je sestavljeno iz protonov in nevtronov. Tem delcem lahko pripišemo mehanske in magnetne lastnosti. Jedra si lahko predstavljamo kot magnetne dipole, ki se vrtijo okoli lastne osi in s tem razložimo večino pojavov povezanih s slikanjem z MR.



Slika 1;Magnetni moment jedra (levo), neurejeni spini izven (sredina) in urejeni spini v magnetnem polju (desno)

Za jedra veljajo kvantno mehanska načela, kar pomeni, da lahko jedrom pripišemo različna kvantna stanja različnih fizikalnih količin, med drugimi tudi spina. V magnetnem polju opazimo Zeemanov pojav: osnovno stanje jedra s spinom I se razcepi na $2I+1$ enako razmaknjenih energijskih nivojev. Ker ima proton spin ½ se energijsko stanje razcepi na dve stanji (±1/2) in sicer paralelno in antiparalelno stanje glede na zunanje magnetno polje B_0.



Slika 2; Zeemanov pojav - razcep energijskih stanj protona ob prisotnosti magnetnega polja

Spinsko kvantno število nam pove, da se v magnetnem polju, jedro nahaja v točno določenih energijskih stanjih. Jedra s spinom imajo tudi magnetni moment $\vec{\mu}$. Povezava med vrtilno količino ter magnetnim momentom jedra je:

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{\Gamma} = \gamma \hbar \, \vec{I}, \tag{1}$$

kjer je γ giromagnetno razmerje, specifično za vsako jedro posebej. Magnetno resonanco je mogoče meriti le, ko ima jedro skupen spin različen od 0, saj bo v tem primeru tudi magnetni moment $\vec{\mu}$ različen od 0. Spin in magnetni moment sta 0 pri sodo-sodih jedrih, to je jedrih, ki imajo sodo število protonov in nevtronov (^{4}He, ^{16}O, ^{12}C...).

Za raziskave z magnetno resonanco je eden izmed najugodnejših elementov vodik (H), saj ima veliko prisotnost v tkivih in tekočinah.

Brez magnetnega polja, so magnetni dipolni momenti jeder naključno usmerjeni. V magnetnem polju B_0, se spini usmerijo vzporedno vzdolž ali nasproti magnetnega polja B_0. Orientaciji imata različni energiji, razlika pa je sorazmerna z gostoto magnetnega polja:

$$\Delta E = \gamma \cdot \hbar \cdot B_0 \tag{2}$$

Za prehod med energijskima nivojema jedro vodikovega atoma v stanju z nižjo energijo absorbira foton z energijo:

$$\Delta E = \gamma \cdot \omega_L, \tag{3}$$

kjer je ω_L Larmorjeva frekvenca. Ta je enaka frekvenci, s katero magnetni moment precedira okoli zunanjega magnetnega polja B_0. Larmorjeva frekvenca znaša:

$$\omega_L = \gamma \cdot B_0 \tag{4}$$

1.2. Precesija, magnetizacija in njena relaksacija

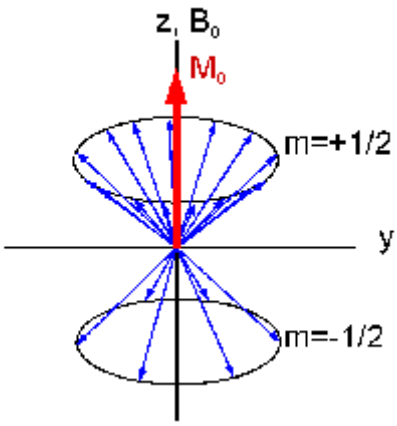
Ker pri merjenjih resonance ne opazujemo posameznih jeder, opišemo snov z magnetizacijo. Magnetizacija ustreza gostoti magnetnega momenta:

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{\mu}_i \,. \tag{5}$$

Zanjo velja gibalna enačba:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \cdot \vec{M} \times \overrightarrow{B_0}. \tag{6}$$

V ravnovesnem stanju je magnetizacija vzporedna gostoti magnetnega polja. Če magnetizacija ni vzporedna B_0, precedira okoli smeri tega polja z Larmorjevo frekvenco.



Slika 3: Skupna magnetizacija je vzporedna z magnetnim poljem.

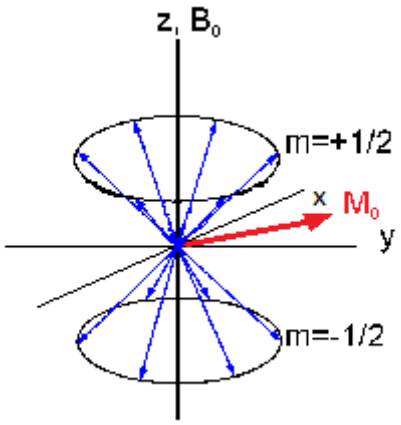
Ker razcepljena energijska nivoja nimata enake energije, je posledično eno stanje bolj ugodno, kot drugo, zato je povprečna skupna magnetizacija usmerjena v smer magnetnega polja. Razmerje med zasedenostjo nivojev N_i za primer, ko imamo proton s spinom ½ , kjer sta možna razcepa na s_1=1/2 (v smeri magnetnega polja) in s_2=-1/2 (v nasprotni smeri), je po Boltzmannovi statistiki enako:

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{\frac{\Delta E}{kT}}, \tag{7}$$

kjer je ΔE razlika med energijama obeh nivojev, k Boltzmannova konstanta in T temperatura sistema. Za sobno temperaturo in magnetnemo polje velikosti nekaj tesla znaša presežek protonov usmerjenih v smer magnetnega polja, ki prispevajo k ravnovesni magnetizaciji M_0, le nekaj stotisočink.

Usmerimo os z vzporedno gostoti zunanjega magnetnega polja. Komponento magnetizacije vzporedno stacionarnemu polju M_z imenujemo longitudinalna magnetizacija. Ko vzorcu s tako skupno magnetizacijo dovedemo ravno pravo količino energije v obliki elektromagnetnega valovanja z Larmorjevo frekvenco, lahko izenačimo zasedenost obeh energijskih nivojev. Ta pojav imenujemo saturacija oziroma nasičenje vzorca.

Ko na tak vzorec prenehamo delovati z elektromagnetnim valovanjem, se magnetizacija prične vračati nazaj v prvotno, ravnovesno lego, vzporedno s silnicami magnetnega polja. Karakteristični čas T_1, s katerim se magnetizacija eksponentno vrača v ravnovesno lego, je spinsko-mrežni relaksacijski čas. To relaksacijo lahko razumemo kot ohlajanje sistema, saj po prenehanju delovanja elektromagnetnega valovanja jedra energijo začnejo izgubljati – jo oddajajo atomom v snovi. Okoli magnetnega polja precedira transverzalna komponenta magnetizacije, ki je pravokotna na os z (M_x, M_y, 0).

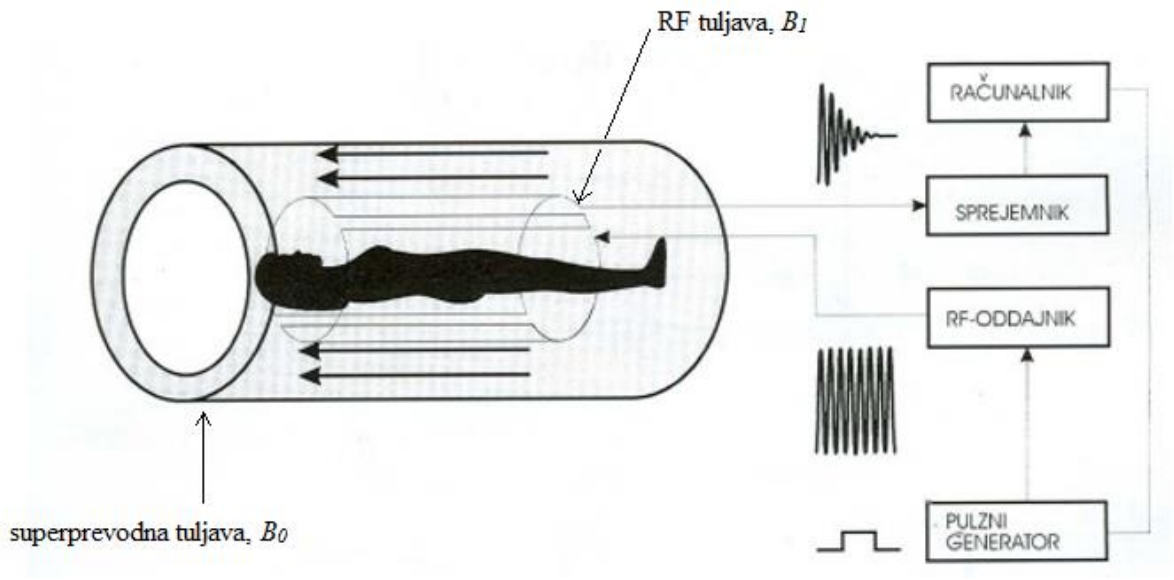


Slika 4: Transverzalna magnetizacija. Nasičenje ali saturacija vzorca.

Precesijska frekvenca je sicer enaka za vsa jedra v homogenem magnetnem polju, a tudi v homogenem zunanjem magnetnem polju jedra med sabo interagirajo, ker vsako s svojim magnetnim momentom ustvarja magnetno polje v svoji okolici. Posledica tega je, da posamezna jedra precedirajo z nekoliko drugačno Larmorjevo frekvenco, tako pa se izgublja fazna povezava med magnetnimi momenti in transverzalna magnetizacija se eksponentno manjša s karakterističnim spinsko-spinskim relaksacijskim časom T_2. V primerjavi s T_1 je T_2 krajši.

1.3. Potek NMR eksperimenta

Sunkovni eksperiment opišemo sledeče; vzorec, katerega notranjost želimo slikati, postavimo v homogeno statično magnetno polje, ki ga ustvarjajo permanentni magneti, elektromagneti ali superprevodne tuljave. V tem polju je ob vzorcu radio-frekvenčna tuljava, ki oddaja sunke nihajočega magnetnega polja z gostoto pravokotno na silnice zunanjega magnetnega polja magneta.

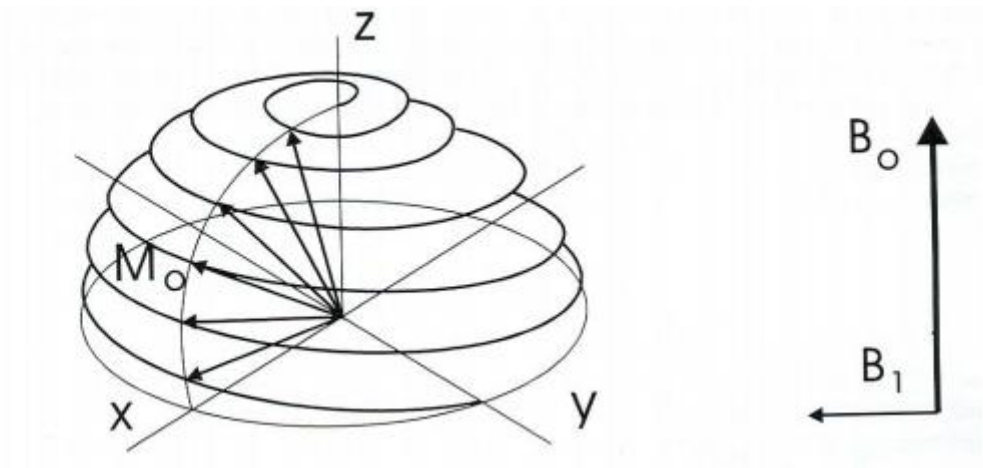


Slika 5: Prikaz postavitve NMR eksperimenta

V vzorcu, ki ni v magnetnem polju so jedra usmerjena kaotično in skupna magnetizacija je enaka nič. Vzorec se v magnetu namagneti. Nato z radio-frekvenčno (RF) tuljavo ustvarimo sunek RF-polja (B_1), ki kaže pravokotno na zunanje magnetno polje B_0. Frekvenca B_1 je enaka Larmorjevi frekvenci in skupna magnetizacija se odkloni za kot φ:

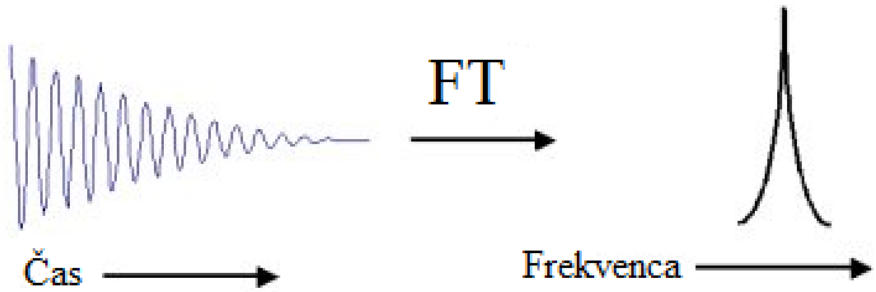
$$\varphi = \gamma \cdot B_1 \cdot t_{p,} \tag{8}$$

kjer je B_1 jakost RF-polja, t_p pa čas trajanja RF-sunka. Ko sunek preneha delovati na vzorec, se jedra začnejo zopet usmerjati vzdolž B_0, okoli katerega nadaljujejo s precesijo. Magnetizacija se z Larmorjevo frekvenco giblje po plašču stožca, ki ima za os smer B_0, in s to osjo oklepa prej omenjeni kot φ.



Slika 6: Vračanje magnetizacije, po prenehanju delovanja RF-sunka, v ravnovesno lego. Magnetizacija precedira okrog osi z po označeni krivulji. Desno sta smeri zunanjega magnetnega polja B_0 in RF-polja B_1

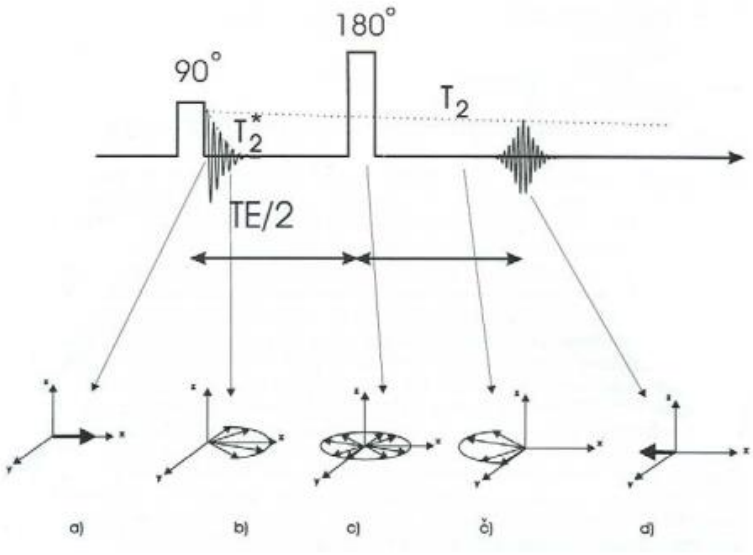
Zaradi precesije nastane inducirana napetost v tuljavi, ki je postavljena okrog vzorca. K inducirani napetosti prispeva le transverzalna komponenta magnetizacije. Amplituda signala je sorazmerna projekciji M_0 na ravnino x-y. Signal imenujemo signal proste precesije (ang.: Free Induction Decay – FID). Precesija v tuljavi inducira dušeno harmonično napetost. Napetost s Fourierevo transformacijo pretvorimo v frekvenčni spekter NMR.



Slika 7: Levo: inducirana dušena sinusna napetost. Desno: NMR frekvenčni spekter po Fourierevi transformaciji

1.4. Spinski odmev

Če je magnetno polje nehomogeno, se medsebojna fazna povezanost jedrskih spinov hitreje izgubi, posledično je T_2 vzorca težko natančno določiti. Merjenje T_2 je možno, če v procesu, ko se faza izgublja, zamenjamo smer precesije in povzročimo nastanek spinskega odmeva.



Slika 8: Zaporedje sunkov pri spinskem odmevu

Pri sunkovnem NMR najprej uporabimo sunek 90°, ki magnetizacijo zasuče za 90° iz osi z v ravnino x-y (slika 8a)). Jedra nato začnejo izgubljati medsebojno fazno povezavo, ki je posledica nehomogenosti magnetnega polja. Izgubljajo jo eksponentno s karakterističnim časom T_2^* (slika 8b)). Nato po polovici časa odmeva *TE/2* uporabimo sunek 180°, da obrnemo magnetizacijo v ravnini x-y za 180°(slika 8c)). Zaradi takšnega sunka, se jedrom spremeni predznak faze, ki so jo pridobila od začetka sunka 90° do začetka sunka 180°. Po sunku 180° bodo hitrejša jedra zaostajala, počasnejša pa bodo prehitevala. V drugi polovici TE-ja (torej v času *TE/2* po sunku 180°), bodo počasnejša jedra zaostala ravno toliko, kot so prehitevala takoj po sunku 180°, hitrejša pa bodo fazo pridobila in sicer toliko, kot so jo po sunku 180° izgubila. V času *TE/2* po sunku 180° bodo vsa jedra ponovno zbrana in nastane signal, ki ga imenujemo spinski odmev (slika 8d)). Signal sicer ni tako velik, kot takoj po sunku 90°; za tem tiči vpliv časovno spreminjajočih se lokalnih interakcij jeder med sabo. Te interakcije so odgovorne za relaksacijo T_2, katere sunek 180° ne more ponovno zbrati. Amplituda odmeva je od amplitude FID signala manjša za faktor $e^{-\frac{TE}{T_2}}$. Z meritvijo tega faktorja lahko določimo T_2.

2. Osnove slikanja z magnetno resonanco

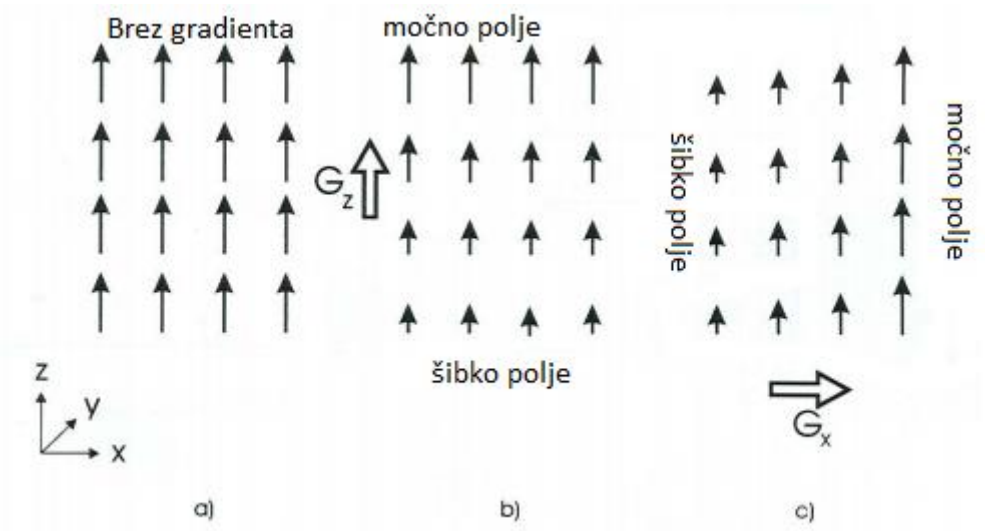
Ključna enačba, ki omogoča razumevanje slikanja z magnetno resonanco, je enačba precesije: $\omega = \gamma \cdot B_0$. Frekvenca precesije je odvisna od vrste atomov (vsak atom ima drugačno giromagnetno razmerje) ter od gostote magnetnega polja. S točno določeno frekvenco lahko zato vzbujamo le atome enake vrste (najpogosteje vodikove). Če nam v vzorcu uspe spreminjati jakost polja, lahko spremenimo precesijske frekvence na različnih mestih v vzorcu. Spreminjanje frekvence po prostoru dosežemo z gradientnim poljem, to je poljem, katerega gostota se spreminja v izbrani smeri. Tako polje generiramo z gradientnimi tuljavami (več jih je zato, ker vsaka ustvarja gradient v svoji smeri in v splošnem potrebujemo tri, med seboj pravokotne smeri), ki k homogenemu magnetnemu polju dodajo polje v isti smeri vendar z gostoto, ki se spreminja v eni smeri, torej gradientno polje, ki ga zapišemo na sledeč način:

$$\nabla B_i = \left(\frac{\partial B_i}{\partial x}, \frac{\partial B_i}{\partial y}, \frac{\partial B_i}{\partial z}\right) = \left(G_x, G_y, G_z\right) = \vec{G} \tag{9}$$

Komponento gostote magnetnega polja v smeri močnega, homogenega zunanjega polja v izbrani točki v prostoru zapišemo kot:

$$B(\vec{r}) = B_0 + \vec{G} \cdot \vec{r}. \tag{10}$$

Z gradientom torej dosežemo, da jedra na različnih delih vzorca čutijo različno magnetno polje in imajo posledično različno precesijsko frekvenco. Za slikanje z NMR uporabljamo tri gradiente: G_x, G_y in G_z. Vsak od njih ustvari linearno naraščajoče polje v svoji smeri.



Slika 9: Vpliv gradienta na homogeno magnetno polje. a)brez gradienta, b) gradient le v smeri osi z, c) gradient le v smeri osi x

2.1. Slikanje v eni dimenziji

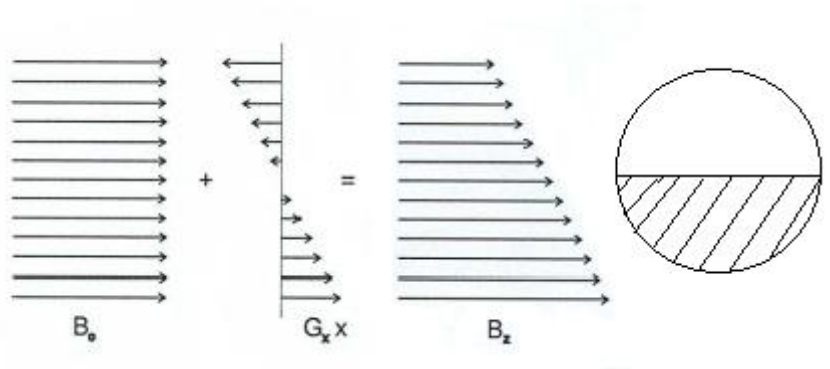
V sredini magneta je točka, izocenter, kjer se magnetno polje ne spremeni in je enako B_0, resonančna frekvenca pa ω_0. Drugod se magnetno polje linearno spreminja s krajem zaradi gradienta. Če vklopimo G_y, zapišemo resonančno frekvenco za katerokoli točko s koordinato y na sledeč način:

$$\omega = \gamma\left(B_0 + yG_y\right) = \omega_0 + \gamma y G_y. \tag{11}$$

Iz resonančne frekvence lahko obratno izrazimo lego atoma z želeno frekvenco:

$$y = \frac{(\omega - \omega_0)}{\gamma G_y}. \tag{12}$$

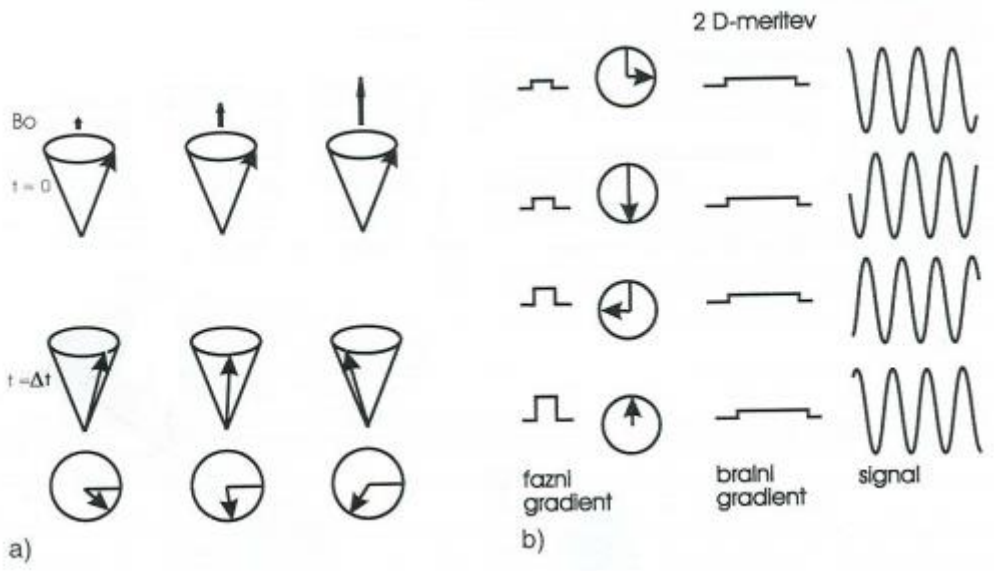
Gradient povzroči, da sta koordinata in frekvenca linearno povezani, kar je osnova enodimenzionalne NMR slike.



Slika 10: Vpliv gradienta na homogeno magnetno polje in prikaz, kako na različnih mestih vzorca nanj vpliva z gradientom modificirano magnetno polje.

2.2. Slikanje v dveh dimenzijah

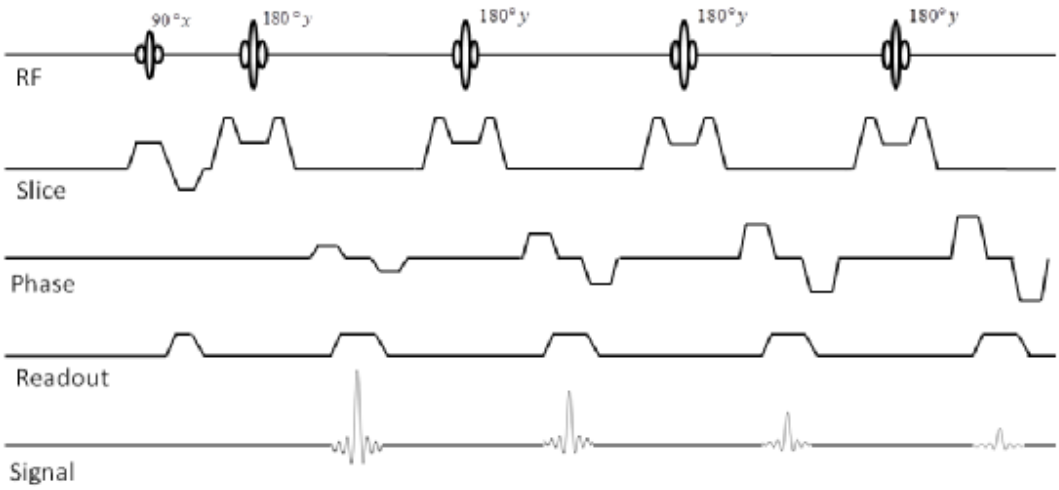
Če bi smer gradienta magnetnega polja vrteli, bi v ravnini dobili projekcije pri različnih kotih in tako bi lahko z računalnikom rekonstruirali 2D sliko. Težava te metode je, da vsaka napaka v linearnosti gradienta ali pa nenatančnost vrtenja lahko pripelje do izgube pri ločljivosti in posledično do popačenja slik. Namesto tega raje uporabljamo 2D Fourierevo transformacijo, kjer opazujemo fazo in frekvenco in jo uporabimo za prostorsko kodiranje signala. Najprej uporabimo sunek faznega gradienta, ki mu korakoma spreminjamo amplitudo. Večja amplituda ustreza večji precesijski frekvenci v neki točki. Iz vsake od teh točk nato dobimo svoj signal, ki se v času delovanja sunka faznega gradienta zavrtijo za različne kote in se tako ločijo med sabo po fazi.



Slika 11: Slika a) kaže fazno kodiranje. Po nekem času, zaradi različnih jakosti polja dobimo razlike v fazah. Slika b) kaže med seboj po fazi različne signale točk.

Osnova slikanja je, da gradient povzroči razliko v precesijski frekvenci in posledično tudi razliko v fazi oziroma kotu. Izmerimo 1D projekcijo vendar pred G_x dodamo gradient v smeri osi y (G_y), ki povzroči omenjeno razliko v fazi. G_y je pravokoten na G_x in vsaka kombinacija teh dveh gradientov nam da eno vrstico podatkov. Da dobimo še ostale vrstice, spremenimo amplitudo G_y gradienta. Vrstice si sledijo po vrsti in po koncu meritve tvorijo dvodimenzionalno matriko podatkov. Ko matriko transformiramo z 2D Fourierevo transformacijo, dobimo 2D sliko. Na zgornji sliki 11b) vidimo 4 od običajno 256ih korakov 2D transformacije. Na sliki je gradient dovolj velik, da zavrti fazo za 90° v vsakem koraku. Tako dobimo signal na vsakem koraku, ki je za 90° fazno premaknjen za isto točko v vzorcu. V realnosti pa ta proces ponavljamo z dosti manjšim faznim kotom tako, da na koncu pokrijemo polni kot (360°). Število korakov določa dimenzijo matrike, ki je vedno neka cela potenca števila dve zaradi hitrega računanja Fourierevе transformacije. 2D Fourierevа transformacija je dosti manj občutljiva na nehomogenost polja kot 1D, pomembno pa je, da se poleg amplitude signala ohranja informacija v fazi, kar nam omogoča uporabo posebnih tehnik slikanja, ki pridejo prav pri premikajočih se vzorcih, na primer pri slikanju krvnega pretoka. Ena od teh je tehnika RARE, ki je podobna navadni tehniki spinskega odmeva.

Razlikuje se po tem, da po sunku 180° dodamo več različnih sunkov faznih gradientov, ki rekonstruirajo vsak svojo sliko. Tako lahko dobimo več slik v krajšem času, kot pri navadni tehniki spinskega odmeva.

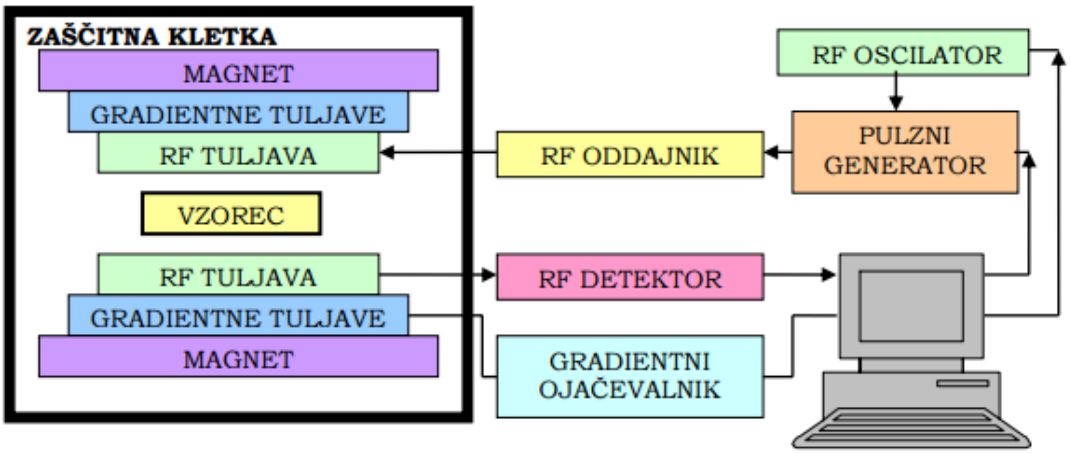


Slika 12: Sekvenca RARE; po vsakem sunku 180° dodamo med sabo različne pulze faznega gradienta

2.3. Naprava za slikanje magnetne resonance

NMR spektrometer meri precesijsko frekvenco in gostoto jeder. Njegova glavna sestavna dela sta radijski oddajnik in sprejemnik. Tako dobimo informacijo o prostorski porazdelitvi jeder, ki jih merimo.

Spreminjanje magnetnega polja dosežemo z gradientnimi tuljavami v magnetu. Te so glavni razlog za prostorsko ločljivost slike, ki je odvisna od jakosti gradientov magnetnega polja ter od gostote samega magneta. V ravnini lahko dosežemo tipično ločljivost nekaj desetink milimetra. Opremo, ki jo potrebujemo za slikanje z magnetno resonanco, lahko razdelimo na dva dela in sicer na magnet s pripadajočo opremo:



Slika 13: Komponente NMR naprave

- **Magnet:** Magnet je osnova za vsak eksperiment z magnetno resonanco. Potrebujemo takšnega, ki ima zelo močno magnetno polje, tipično nekaj tesla, kar ustreza precesijskim frekvencam vodikovih jeder okoli 100 MHz. Želimo si čim bolj homogeno magnetno polje, vendar je to nemogoče doseči. Najbolj stabilna in močna polja generira superprevodni magnet.
- **Gradientne tuljave:** Gradientne tuljave potrebujemo za generiranje slik, saj brez njih ne moremo prostorsko označiti vzorca, da bi kasneje konstruirali sliko iz razlik signalov. Uporabljamo 3 gradientne tuljave; vsaka linearno ustvarja svoje magnetno polje v smereh x, y ter z. Gradientne tuljave običajno proizvajajo magnetna polja jakosti okoli 10 mT/m, lahko pa tudi več, odvisno od potreb pri slikanju.
- **RF-sonda:** Je električni nihajni krog, ki ga pred slikanjem uglasimo na precesijsko frekvenco jeder, ki jih slikamo. Pri slikanju namreč potrebujemo kar se da homogeno, vrteče se magnetno polje. Za RF sonde se običajno uporabljajo sedlaste ali površinske tuljave ali pa resonatorji v obliki ptičje kletke.
- **Tuljava za homogenizacijo:** Ker je homogeno magnetno polje težko doseči in ker vsak vzorec lahko homogenost poruši zaradi različnih susceptibilnosti, je zaželeno magnetno polje dodatno homogenizirati, saj je homogenost polja ključnega pomena za kvaliteto slik.

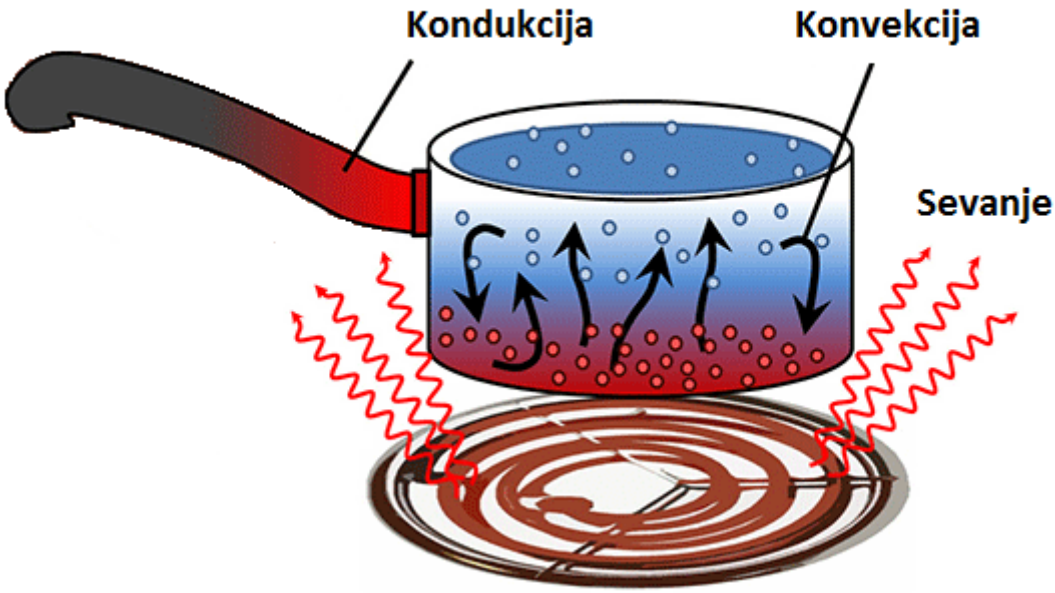
Ostali del opreme je elektronika, ki skrbi za proizvajanje RF-sunkov, branje signala in obdelavo signala:

- **RF-oscilator:** Generira stabilne RF-sunke s frekvenco ω_0 in s faznimi zakasnitvami 0, pi/2, pi,... . To so namreč referenčni signali, ki se uporabljajo pri generiranju RF-sunkov in pri fazni detekciji.
- **RF-oddajnik:** Ojača RF-sunke do moči od 100 W do nekaj kW.
- **Generator oblik signalov:** Gre za digitalno-analogni pretvornik, ki generira obliko za RF-sunke ali za signale za gradientne sunke.
- **Gradientni ojačevalnik:** Ta ojača gradientni sunek. Vsaka gradientna tuljava ima svoj gradientni ojačevalnik.
- **Računalnik:** Glavni del elektronske opreme, ki skrbi za izvajanje sunkovnih programov in ima nad slikanjem ves čas tudi nadzor nad vso elektroniko. Ko dobi signale, je njegova naloga le-te obdelati, transformirati in na koncu obdelati tudi same slike z izboljšanjem kontrasta in podobno.
- **Sprejemni del:** Sem štejemo predojačevalnik, ki je priključen že na magnet in ojača signal RF-sonde. V sprejemniku se nato ta signal še enkrat ojača ter filtrira. Filter prepušča signal s frekvenco ω_0 na pasu širokem toliko, kot je obseg frekvenc slike. Za predojačevalnikom gre nato signal v fazni detektor.

3. Prenos toplote

V zaključni nalogi sem raziskoval dinamiko taljenja snega, ki sem ga slikal z MR. Za razumevanje procesa taljenja, je smiselno obdelati načine prenosa toplote med deli vzorca z različnimi agregatnimi stanji. Skozi snov v različnih agregatnih stanjih se namreč toplota ne prenaša na enak način.

Prenos toplote je v principu izmenjava termične energije med dvema (ali več) sistemoma. Hitrost, s katero se energija prenaša, je odvisna od temperatur teh sistemov ter od lastnosti snovi, preko katere se energija prenaša. Osnovni načini prenosa toplote so: konvekcija, kondukcija in sevanje. Kondukcijo imenujemo tudi prevajanje toplote.



Slika 14: Enostavna predstava kondukcije, konvekcije in sevanja.

Toplota se spontano prenaša z mesta z višjo temperaturo do mesta z nižjo. O termičnem ravnovesju govorimo takrat, ko oba sistema dosežeta enako temperaturo.

3.1. Kondukcija

Prevajanje toplote je pojav, ki se dogaja zaradi trkov delcev med sabo ter zaradi premikanja elektronov v zaprtem sistemu. Objekti, ki med sabo trkajo, molekule, atomi, elektroni, tako prenašajo svojo kinetično in potencialno energijo drug na drugega, in ta prenos energije opišemo s toploto. Kondukcija se dogaja v vseh agregatnih stanjih, trdnem, tekočem, plinastem in v plazmi. Hitrost prevajanja je odvisna od razlike temperatur dveh teles ter od snovi, skozi katero se toplota prevaja.

Kondukcija v trdnih snoveh se izraža s kombinacijo vibracij in trkov molekul, trkov fononov, difuzije in trkov prostih elektronov. V plinih in tekočinah se kondukcija kaže prek trkov in difuzije molekul, ko se te naključno premikajo v sistemu (in s tem naključno trkajo med sabo).

3.2. Konvekcija

Konvekcija je pojav, ko se toplota prenaša zaradi gibanja tekočine oziroma premikanja snovi. Je dominanten pojav, ko toplota teče skozi pline in tekočine.

V naravi opazimo konvekcijo, ko se velika gmota tekočine giba zaradi vzgona, ki je posledica razlik v gostoti zaradi različnih temperatur v taki tekočini. Konvekcijo lahko tudi vsilimo, če s črpalko ustvarimo tok v sicer nepremični tekočini.

3.3. Razmerje konvekcije in kondukcije

Če tekočino segrevamo od spodaj, opazimo, da pojava konvekcije in kondukcije tekmujeta med sabo za prevlado. Če je vpliv kondukcije prevelik, se zaradi konvekcije navzdol premična tekočina segreva zaradi kondukcije. Segreva se tako hitro, da se gibanje navzdol ustavi zaradi lastnega vzgona. Tekočina, ki se zaradi konvekcije giblje navzgor, se zaradi kondukcije ohlaja tako hitro, da vzgonski pojavi izginejo.

Če je vpliv kondukcije prešibek, se lahko vzpostavi relativno velik gradient temperature in vpliv konvekcije postane močan.

Razmerje med pojavoma opisuje Rayleighovo število:

$$Ra = \frac{g\Delta\rho L^3}{\mu\alpha} = \frac{g\beta\Delta T L^3}{\nu\alpha}, \tag{13}$$

kjer so;

- g gravitacijski pospešek ($9{,}81\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$)
- ρ gostota tekočine in $\Delta\rho$ razlika med gostoto na vrhu in dnu posode
- μ viskoznost
- α toplotna difuzija (tudi D, z enotami $\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$)
- β termična razteznost
- T temperatura
- ν kinematična viskoznost ($\frac{\mu}{\rho}$) in
- L dolžina vzorca.

Tipična vrednost Rayleighovega števila pri kateri začne prevladati konvekcija je 1000-2000. Pri nižjih številih prevladuje kondukcija.

3.4. Sevanje

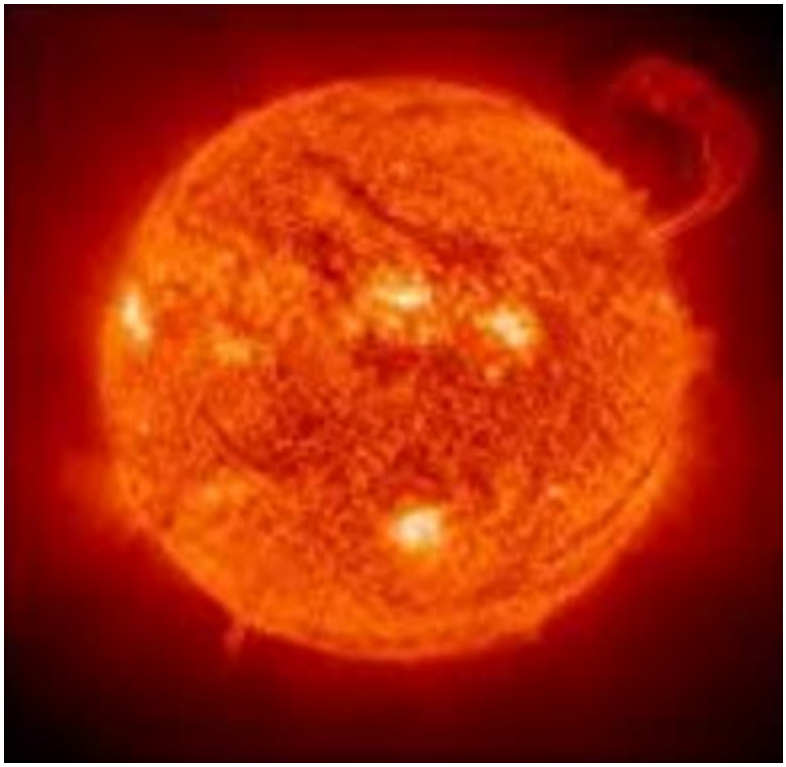
Toplotno sevanje je elektromagnetno valovanje, ki nastane pri termičnem gibanju nabitih delcev v snovi. Ko je temperatura snovi večja ob absolutne ničle, trki med atomi povzročijo povečanje kinetične energije atomov ali molekul. Posledica je dipolno nihanje, ki

tvori elektromagnetno sevanje. Toplotno sevanje oddaja vsako telo, ki ima temperaturo višjo od 0 kelvinov.

Izsev opiše Stefan-Boltzmannov zakon:

$$j = \varepsilon \sigma T^4, \tag{14}$$

kjer je j gostota energijskega toka, ε je emisivnost, σ Stefanova konstanta in T absolutna temperatura v kelvinih. Sevanje je značilno za telesa z zelo visoko temperaturo, na primer Sonce, ki seva tudi v vidnem spektru.



Slika 15: Sonce seva valovanje tudi v vidnem delu spektra.

3.5. Prehod med agregatnimi stanji

Prehod med agregatnimi stanji se zgodi iz enega v drugo agregatno stanje, ko prenos toplote doseže določeno mejo, nad katero urejenost snovi postane manj ali bolj kaotična. Primeri prehoda med agregatnimi stanji so: taljenje snega, vrenje vode...

Prehodi v agregatna stanja so:

- V trdno: zamrzovanje
- V kapljevinsko: kondenzacija, taljenje
- V plinsko: izparevanje, izhlapevanje, sublimacija, deionizacija
- V plazmo: ionizacija

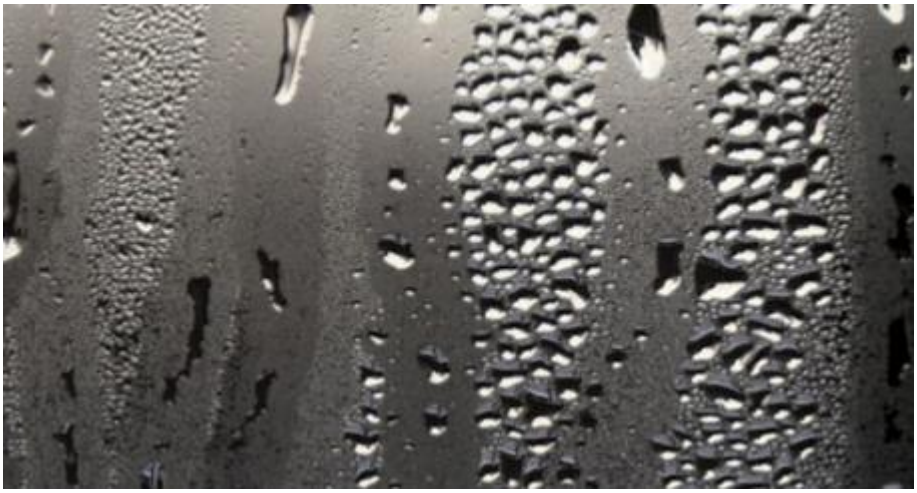
3.5.1. Izparevanje

Je prehod kapljevine v plin pri vrelišču. Od izhlapevanja se loči po tem, da izhlapevanje poteka pri temperaturi nižji od vrelišča in, da pri izparevanju prehod zajema celotno prostornino kapljevine, pri izhlapevanju pa prehajajo v plin le molekule s površine. Vrelišče je specifično za vsako snov pri določenem tlaku, za vodo znaša 100 °C pri normalnem zračnem tlaku. Pri vrenju se v tekočini začnejo oblikovati mehurčki plina, ki nato prodrejo iz tekočine v zrak. Izparjeno vodo imenujemo para.

Slika 16: Vrenje vode: opazimo mehurčke in paro – izparjeno vodo.

3.5.2. Kondenzacija

Je prehod iz plinastega v kapljevinsko stanje z odvajanjem toplote, torej obratno od vrenja. Zgodi se, ko se plin ohlaja, molekule se upočasnijo in iz plina se začnejo tvoriti kapljice. V zraku voda tipično kondenzira v oblakih, iz katerih nato pada dež.



Slika 17: Kondenzirane kapljice, ki se nabirajo na steklu ob hladnih dneh.

3.5.3. Taljenje

Taljenje je fizikalni proces, ko snov iz trdnega stanja preide v kapljevinsko stanje z dovajanjem toplote. Če trdi snovi povečujemo energijo z delom ali toploto, ji dvignemo temperaturo do tališča, kjer se začnejo trgati medsebojne vezi molekul, ki nato preidejo v tekoče stanje, kjer se urejenost molekul manjša. Za tekočino je značilno, da njihova viskoznost upada z naraščanjem temperature.

Slika 18: Taljenje snega

4. Meritve in rezultati

V zaključni nalogi sem s tehniko slikanja z MR opazoval dinamiko taljenja snega. Uporabil sem metodo slikanja RARE center out, ki zajame signal v dovolj hitrem času (rangu sekunde), da sneg med samim zajemanjem bistveno ne spremeni stanja, prostornine in lege. Podatke sem obdelal z računalnikom, slike po vrsti uredil v časovni "posnetek" pojava in na koncu analiziral delež snega v vzorcu.

4.1. Priprave in pripomočki

Pripravil sem programsko opremo, da sem lahko začel meriti čimprej, saj se sneg relativno hitro tali na sobni temperaturi, ki je bila v času meritev 27 °C. Najprej sem uglasil tuljavo na vzorec vode, katerega prostornina je bila približno enaka prostornini vode, ki ostane po taljenju vzorca snega. Isti vzorec sem slikal 90-krat zaporedoma. Razmik med vsakim zajemom slike je bil 20 sekund.

Acquisition | Frequency | Hardware | Processing | Grad. Preemph. | Misc. | Display | Sequence

Nucleus	H1	Acq. Time	1.28m	SW 2D	5000.0 Hz	SW 3D	5000.0 Hz	Dwell_4D	100u
Acq. Points	128	Scans 1D	1	Dwell_2D	100u	Dwell_3D	100u	Points 4D	1
Points 1D	128	Actual Scans 1D	1	Points 2D	90	Points 3D	1	Actual Points 4D	1
SW +/-	50000.0 Hz	Dummy Scans	0	Actual Points 2D	128	Actual Points 3D	90	Points Start 4D	1
Filter	50000.0	Scan Start 1D	1	Points Start 2D	1	Points Start 3D	1	S.A. Dimension	1
Dwell Time	10u	Last Delay	20s	Repeat Times	1	SW 4D	5000.0 Hz	S.A. Mode	0

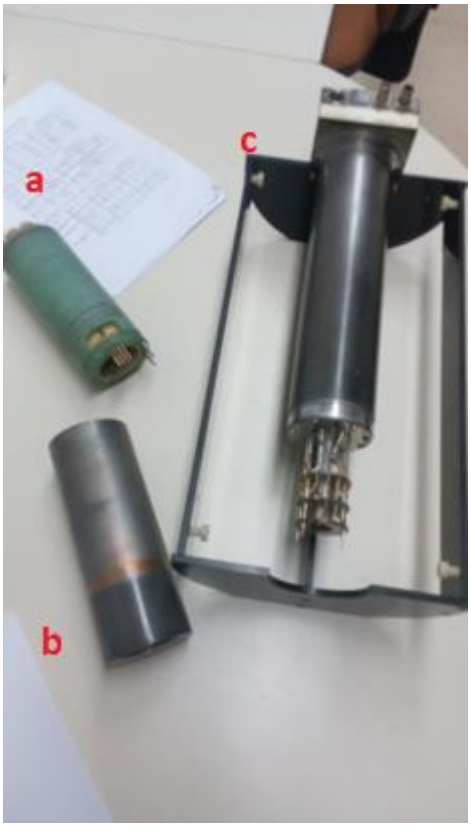
Slika 19: Meni akvizicije z nastavitvami mojih meritev

Sneg sem postrgal s cevi, ki so pripete na rezervoar za tekoči dušik, ga shranil v teflonski posodici, zatesnil s pokrovom in postavil v RF tuljavo.

Slika 20: Teflonska posodica

Slika 21: RF tuljava

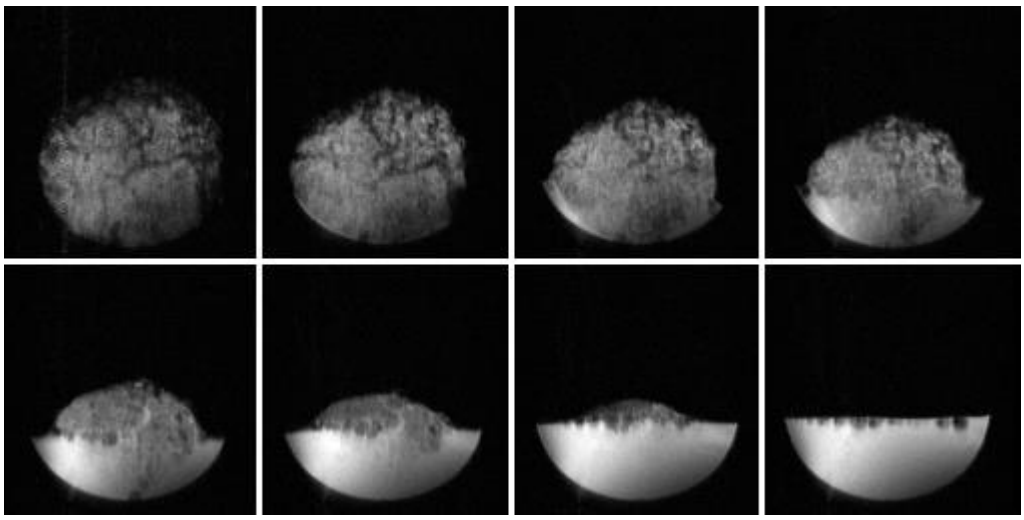
Okrog RF tuljave sem namestil gradientno tuljavo postavil v magnet, ter pognal meritev.



Slika 22: a) gradientna tuljava, b) zaščita, c) nosilec tuljav

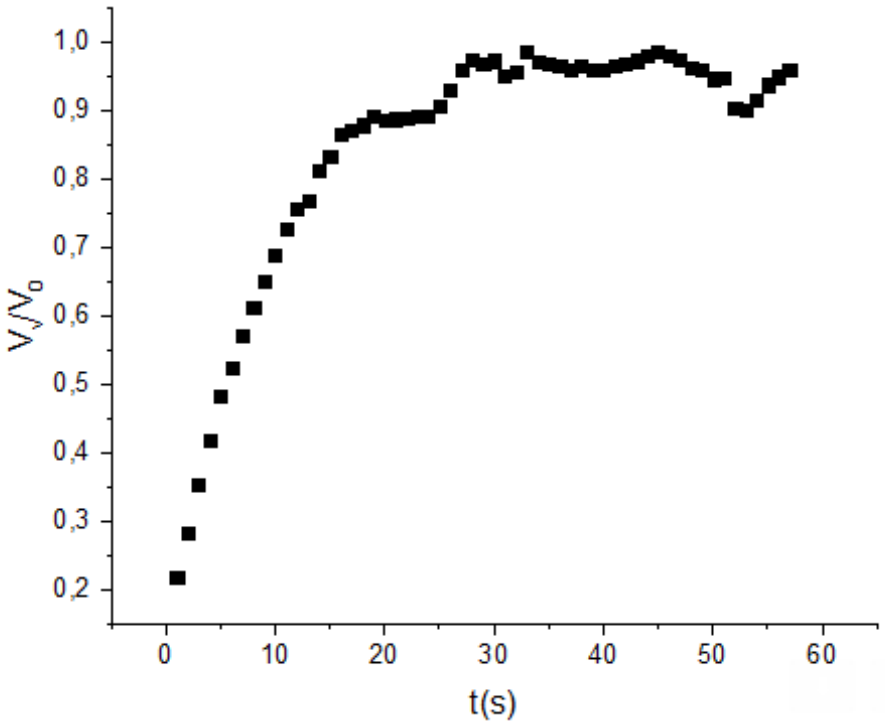
4.2. Rezultati

Ko se je meritev končala, sem s naredil Fourierevo transformacijo in s programom ImageJ popravil kontrast slik.



Slika 23; Zaporedje slik kaže vzorec snega med taljenjem – slike si sledijo v intervalih po 140 s

Na zadnji sliki, kjer je v vzorcu zanesljivo le še voda in nič snega, sem v programu ImageJ zakodiral najmanjšo svetlost kot vodo. Ves signal, ki je enake in večje svetlosti, kot zakodirani, torej pomeni vodo. Ves signal, ki je manj intenziven pa sem zakodiral kot "sneg", saj imajo trdne snovi krajši T_2, kot tekočine, sneg pa manjšo gostoto, kot voda in da šibkejši signal. Nato sem za vsako sliko izračunal prostornino, ki jo zavzemata sneg in voda ($1-V_{snega}$). Rezultate kaže graf, kjer je na abscisi čas ($t_0 = 0$ s) na ordinati pa delež prostornine vode glede na celoten vzorec.



Slika 24: Graf deleža tekoče vode v vzorcu v odvisnosti od časa

4.3. Matematični model

Na začetku imamo polno posodico snega. Zunanja temperatura je enaka sobni, T_1. Za temperaturo vzorca T_0 privzamemo temperaturo tališča 0 °C. Sneg se tali od zunanjega roba navznoter. Privzamemo, da se vsa prejeta toplota porabi za taljenje snega:

$$dQ = dmq_t. \tag{15}$$

Privzamemo, da ima preostanek snega obliko valja s polmerom r in dolžino l in teče toplotni tok radialno v vzorec. Privzamemo, da je tok sorazmeren zunanji površini vzorca:

$$\frac{dQ}{dt} = -\alpha l 2\pi r, \tag{16}$$

Sorazmernostni koeficient α je odvisen od razlike temperatur vzorca in okolice, geometrijskih in termičnih lastnosti sonde, toka zraka okoli sonde in še drugih parametrov, katerih vpliva ne moremo enostavno opisati. Natančnejši modeli [19] pokažejo, da je privzetek (16) upravičen. l je dolžina valja, r pa polmer osnovne ploskve. dm izrazimo kot ρdV in dV kot $l2\pi rdr$ se enačba (14) spremeni v:

$$dQ = \rho l 2\pi r dr q_t, \tag{17}$$

kjer je ρ gostota snega, dQ dovedena toplota in q_t talilna toplota snega. Enačbo (16) vstavimo v (15) in po krajšanju dobimo:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{\alpha}{\rho q_t}. \tag{18}$$

Polmer osnovne ploskve snega se s časom spreminja kot $r = r_0 - \frac{\alpha}{\rho q_t} t$, kjer je r_0 začetni polmer.

Prostornina snega na začetku je torej $V_0 = \pi r_0^2 l$. Zaradi taljenja ima časovno odvisnost; $V_s(t) = \pi l (r_0 - \frac{\alpha}{\rho q_t} t)^2$. Označimo $v = \frac{\alpha}{\rho q_t}$. Prostornina vode, ki nastaja zaradi taljenja je:

$$V_v = (V_0 - V_s) = \pi l 2 r_0 v t - \pi l v^2 t^2. \tag{19}$$

Računamo v približku enakih gostot. Prostornino nastale vode normiramo na začetno prostornino;

$$\frac{V_v}{V_0} = \frac{2 r_0 v t - v^2 t^2}{r_0^2}. \tag{20}$$

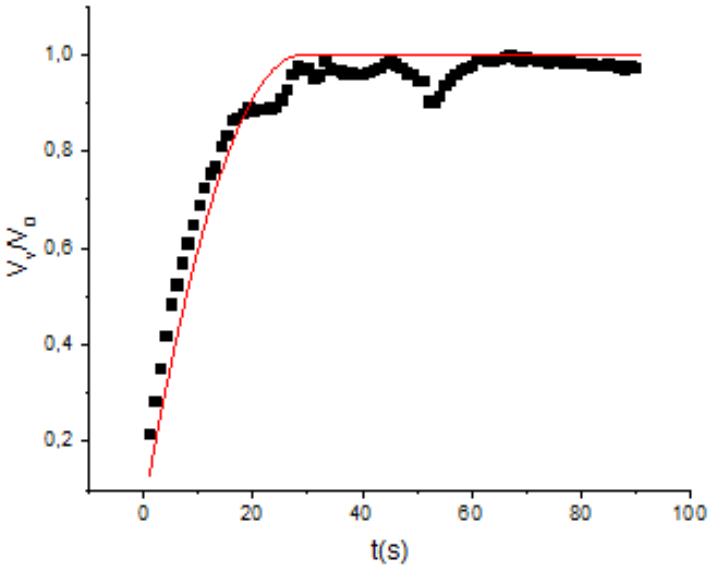
Delež vode v vzorcu narašča parabolično v odvisnosti od časa. Na začetku vode ni, zato je takrat $V_v = 0$. Ko parabola doseže prevoj, zmanjka snega v vzorcu in od tega časa dalje je delež enak 1. Ker privzamemo, da bo na koncu volumen vode enak volumnu snega na začetku, velja:

$$\frac{2 r_0 v t - v^2 t^2}{r_0^2} = 1 \Leftrightarrow t = \frac{r_0}{v}. \tag{21}$$

Izračunamo lahko čas v katerem se voda stali do konca. Ob teh predpostavkah in izračunih lahko primerjamo model z meritvami.

5. Diskusija

Ko primerjamo rezultate na enem grafu, vidimo, da se izračuni in rezultati ujemajo po obliki, a je naš model zamaknjen, kar je lahko posledica več dejavnikov.



Slika 24; Primerjava izračuna in izmerkov

Koeficient v izračunanem modelu je v=0.26±0.01. Iz tega lahko izračunamo $\alpha = v\rho q_t = 6{,}1\cdot10^3 \pm 0.3\cdot10^3$. Parameter r_0 je 16 mm, gostota snega ρ~700 kg/m^3 in talilna toplota q_t=334 kJ/kg.

Pri reševanju diferencialne enačbe smo za parametre upoštevali nekaj privzetkov. Tališče snega smo postavili na 0 °C, kar pa ni čisto res, saj se s primesmi lahko tališče oziroma zmrzišče spremeni (dvigne ali spusti pod 0 °C). Za gostoto snega smo vzeli ~700 kg/m^3.

V konstanti α in posledično v, se skriva razlika temperatur, ki je v resnici ne poznamo natančno, toplotna prevodnost teflonske posodice in zraka, ki ju težko natančno modeliramo.

Ko se sneg tali, nastaja voda, ki se segreva in zaradi konvekcije od spodaj in od strani segreva preostali sneg, kar lahko pospeši proces taljenja in je opazno iz grafa meritev, ki hitreje dosežejo tekoče stanje, kot računski model. Konvekcija se dogaja tudi v zraku, kar dodatno pospeši taljenje.

Na koncu lahko rezultati odstopajo od modela zaradi načina obdelave izmerkov. Meja svetlosti, katero sem izbral za vodo, je bila izbrana naključno med nekaj različnimi svetlostmi (razvidno iz slike 23) in posledično smo lahko zakodirali signal, ki je bil enako močan pri nekaterih volumskih izsekih snega. Slika, ki smo jo dobili je dvo-dimenzionalna, zato tudi ne vemo, kaj se dogaja izven izbrane ravnine, kar tudi lahko vpliva na moč signala, ter na samo primerjavo z izračunanim modelom, saj longitudinalna simetrija zagotovo odpove proti robu vzorca.

6. Zaključek

V zaključni nalogi sem obrazložil proces taljenja snega in ga posnel s slikanjem z magnetno resonanco. Uporabil sem primerno sekvenco (RARE), ki slika dovolj hitro, da sem lahko natančno opazoval prehod med agregatnimi stanji. Naredil sem tudi računski model, kjer sem kot rezultat hitrosti taljenja dobil parabolično odvisnost, kar pa so pokazali tudi izmerjeni rezultati. Da bi model izboljšal, bi moral bolj natančno meriti temperaturne spremembe v sondi in okoli vzorca, ter upoštevati še več fizikalnih procesov, ki sem jih zanemaril.

Model je dovolj natančen, da vsebuje vse spremenljivke, ki pri taljenju nastopajo. Odvisnost, ki sem jo izračunal, se ujema z mojimi posnetimi rezultati.

7. Viri in literatura

[1] Slichter, C. (1996). Principles of Magentic Resonance. Berlin: Springer.

[2] F. Bloch, W. W. (1946). Nuclear Induction. Physical Review, 127.

[3] Beiser, A. (2003). Concepts of Modern Physics. New York: McGraw-Hill.

[4] M. T. Vlaadringerbroek, J. A. (1999). Magnetic Resonance Imaging. Berlin: Springer.

[5] J. Hennig, A. N. (1986). RARE Imaging, A Fast Imaging Method for Clinical MR. Magnetic Resonance in Medicine, 823-833.

[6] Ott, J. Bevan; Boerio-Goates, Juliana (2000), Chemical Thermodynamics: Advanced Applications, Academic Press, 92–93

[7] http://www.engineeringtoolbox.com/conductive-heat-transfer-d_428.html

[8] http://sciencelearn.org.nz/Contexts/Icy-Ecosystems/Looking-closer/Snow-and-ice-density

[9] Callaghan, P. Principle of Magnetic Resonance Microscopy (Clarendon Press, 1991)

[10] Glavič, M. Merjenje pretoka tekočin v različnih geometrijah z magnetno resonanco. Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, (2005)

[11] https://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/condensedmatt/imr_cdt/students /peter_james_ross/rapidimaging/rare/

[12] https://qph.ec.quoracdn.net/main-qimg-0735cd99001a84e2ada0c440b699ca33-c?convert_to_webp=true

[13] http://chemistry.umeche.maine.edu/CHY431/NMR/NMR-9.jpg

[14] http://machinedesign.com/site-files/machinedesign.com/files/uploads/2015/03/Convetion_Conduction_Radiation_web.gif

[15] http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/gallery/PIA03149.jpg

[16] https://media.whatscookingamerica.net/2015/05/31221534/Boiling-Water.bmp

[17] https://www.petercox.com/wp-content/uploads/2014/03/condensation-glass-1400x600.jpg

[18] https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQOk75fkmLZQc2cFyUvFz5T8fss2A7kJFzfJIGJRpUXDIldneJxEw

[19] Klančar, K. Študij zmrzovanja z dinamičnim slikanjem z magnetno resonanco. Diplomsko delo, Ljubljana, UL, FMF, (2016), 29-43