

**Projekta**

**„Atomāro un nepārtrauktās vides tehnoloģisko fizikālo procesu modelēšana, matemātisko metožu pilnveide un kvalitatīvā izpēte”**

**Nr.2009/0223/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/008**

**Tehniskā atskaite aktivitātē**

**4.3. Mīkstu materiālu matemātiskie modeļi un to verifikācija**

**Apstiprinu:**

**Projekta padomes priekšsēdētājs:**

\_\_\_\_\_ **Jānis Mencis**

**Apstiprinu:**

**LU Zinātņu prorektors:**

\_\_\_\_\_ **Indriķis Muižnieks**

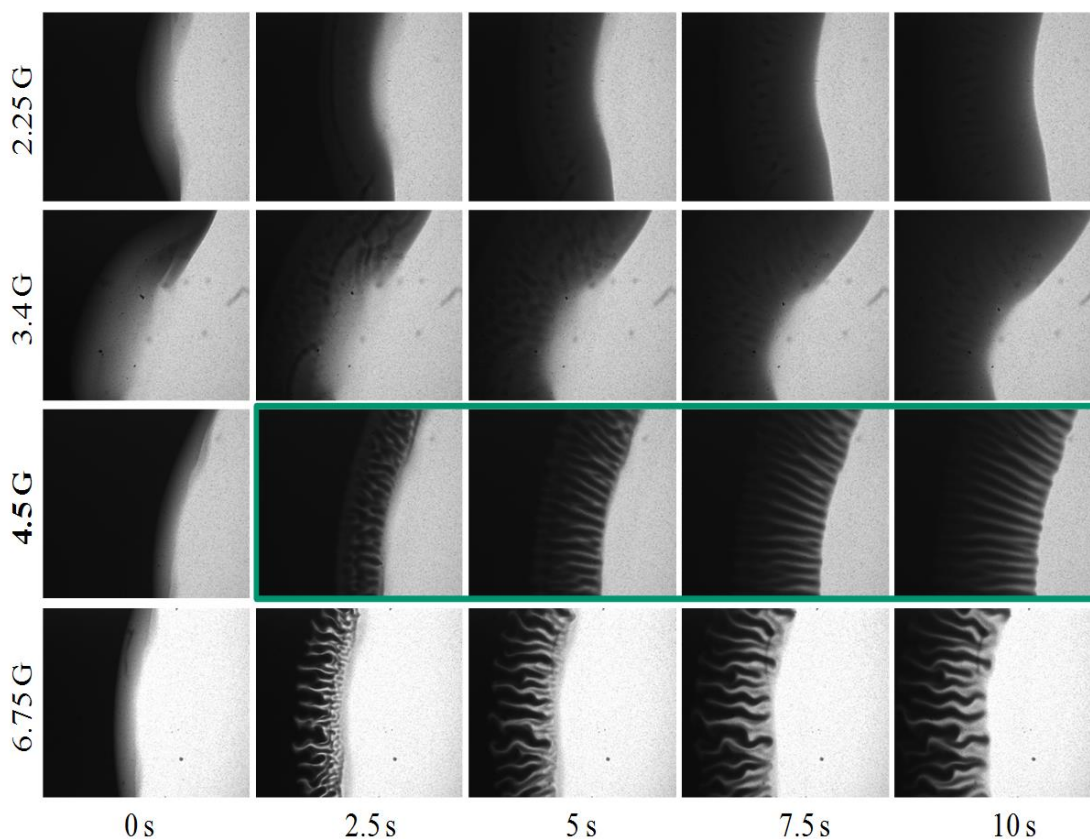
## **Pētījuma apakšaktivitāte**

### **4.3. Mīkstu materiālu matemātiskie modeļi un to verifikācija**

*Aktivitātes vadītājs: profesors Andrejs Cēbers*

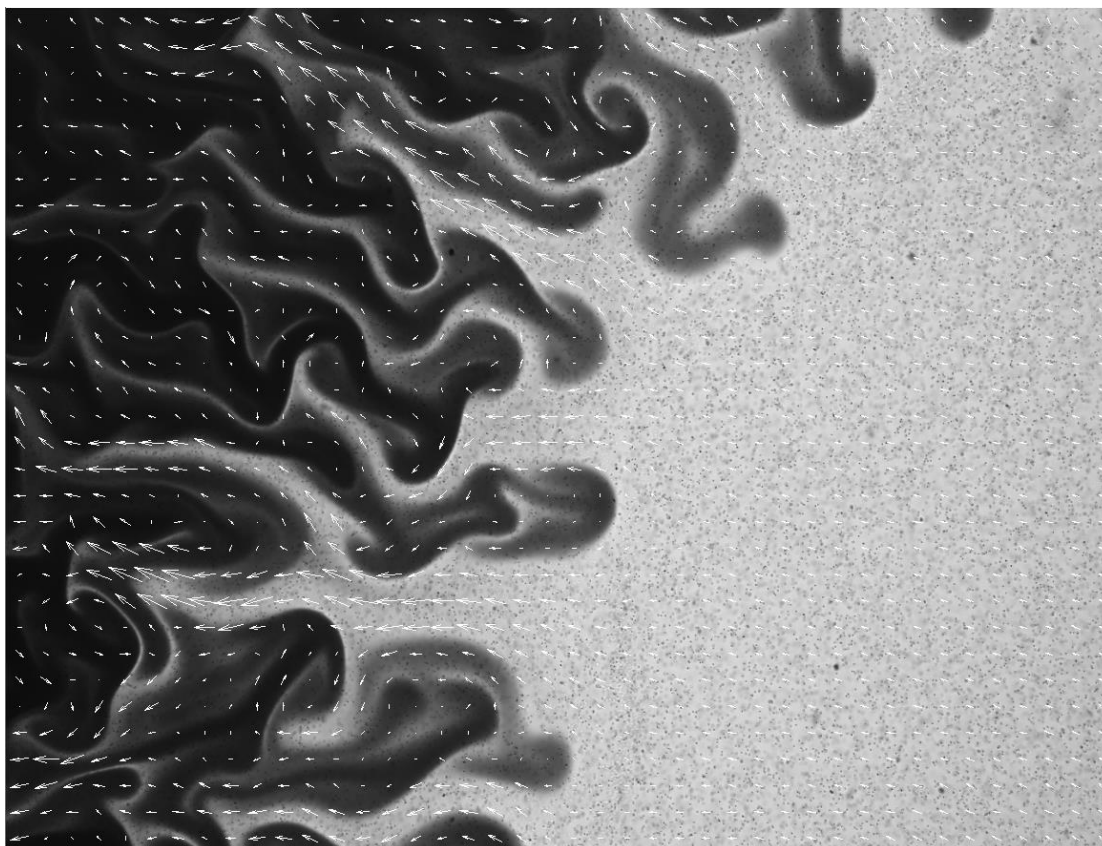
## Magnētiskā mikrokonvekcija.

Magnētisks šķidrums, ievietots ārējā homogenā magnētiskā laukā, rada, atkarībā no tā konfigurācijas, nehomogenu magnētisku lauku. Šāda situācija veidojas, piemēram ja homogens magnētisks šķidrums Hele-Šou slānī robežojas ar tīru nesējšķidrumu. Starp šiem samaisošiem šķidrumiem veidojas difūzs robežslānis, kurā daļiņu koncentrācija samazinās līdz nullei. Ja uz slāni darbojas tam perpendikulārs magnētisks lauks, difūzā robežslānī veidojas nehomogens inducētais lauks. Tā rezultātā uz magnētisko koloidu darbojošais lauks pieaug nesējšķidruma virzienā. Tā kā ponderomotorais spēks, kurš darbojas uz magnetizējošos vidi ir proporcionāls tā magnetizācijai un tātad magnētisko daļiņu koncentrācijai, tad līdzīgi kā nehomogēni sasildīta šķidruma konvektīvās nestabilitātes gadījumā veidojas konvektīvā nestabilitāte. Kritisko lauka vērtību nosaka magnētiskais Releja skaitlis, kurš raksturo attiecību starp raksturīgo šķidruma kustības laiku un daļiņu difūzijas laiku. Šī parādība tika atklāta Fizikas institūtā 1983 gadā [1\*], bet tās adekvāts modelis tika izveidots 1997 gadā [2\*]. Šajā laikā teorētiski ir apskatīti mikrokonvekcijas attīstības sliekšņi pie dažādām lauka konfigurācijām [3\*,4\*], bet eksperimentāli dotā parādība ir palikusi praktiski neizpētīta. Dotā projekta ietvaros, izmantojot Magnētisko Mīksto Materiālu Laboratorijas (MMML) eksperimentālās iespējas un tajā sintezētos magnētiskos šķidrumus, pirmo reizi pasaulē tika reģistrēti mikrokonvektīvās kustības ātrumu lauki un to evolūcija laikā. Mikrokonvektīvās kustības dinamika laikā ir parādīta Zīm.1.



Zīm.1

Zīm.1 var skaidri redzēt, ka mikrokonvektīvā kustība rodas magnētiskam laukam pārsniedzot sliekšņa vērtību, kura ir apmēram 3 G. Mikrokonvektīvās kustības ātruma lauki tika reģistrēti izmantojot MMML rīcībā esošo PIV iekārtu (Dantec). Reprezentatīva ātruma lauka reģistrācija parādīta Zīm.2.

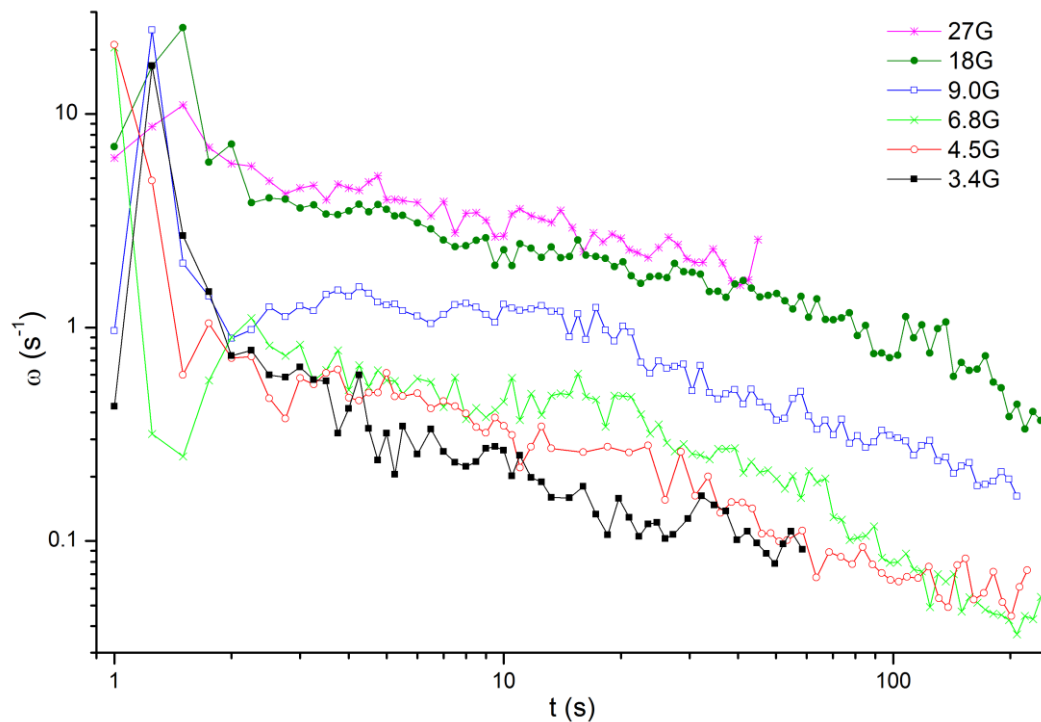


Zīm.2

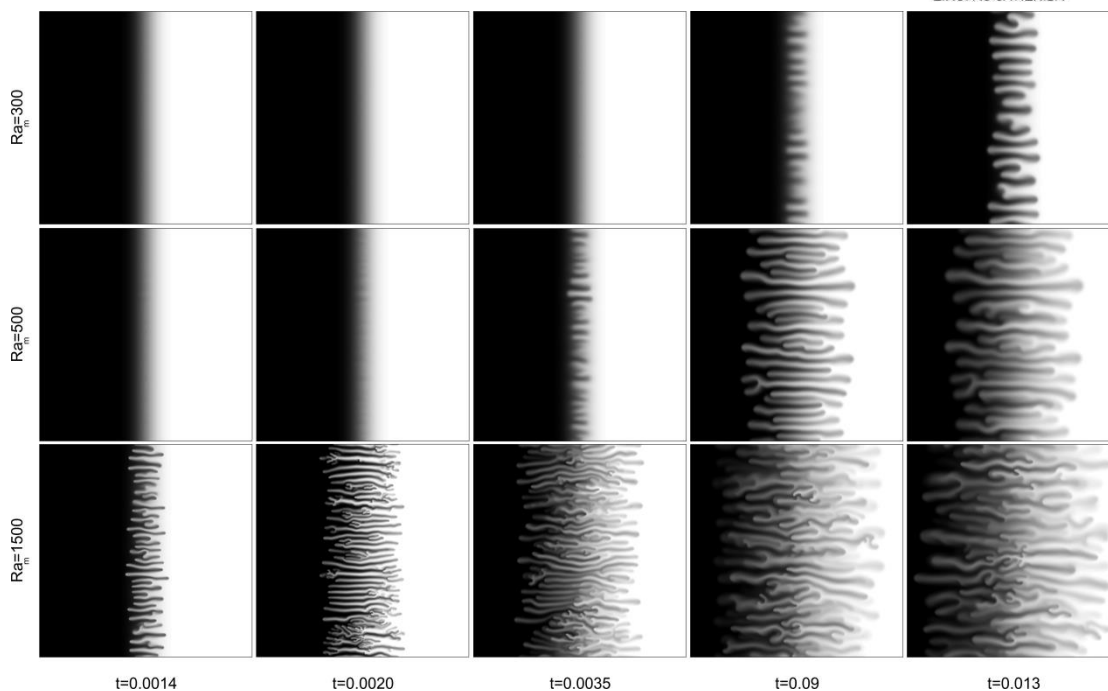
Noteiktie ātruma lauki ļāva noteikt kustības virpuļainības evolūciju laikā, kura parādīta Zīm.3. No Zīm.3 redzams, ka mikrokonvektīvā kustība attīstoties sasniedz savu maksimumu, bet tālāk dziest, daļiņu difūzijas dēļ izlīdzinoties koncentrācijām starp veidojošiem magnētiskiem pirkstiem. Tas ilustrē magnētiskās mikrokonvekcijas potenciālo izmantošanu mikrofluidikā, jo attīstoties mikrokonvekcijai un tai dziestot, tiek panākta būtiska magnētisko daļiņu un nesējšķidruma samasišanās. Ir labi zināms, ka dažādu šķidrumu samasišana ir būtiska problēma mikrofluidikā. Veiktās dotās parādības skaitliskās simulācijas parāda kvalitatīvu atbilstību eksperimentam, kā parādīts Zīm.4. Lai arī novērojama laba atbilstība, tomēr ir arī atšķirības, piemēram, Darsī tuvinājumā neizdodas iegūt pirkstu virsotnēm raksturīgās cepures formas. Darbs šajā virzienā tiks turpināts izveidojot pilnīgākus šķidruma kustības modeļus (Brinkmana modelis). Jāpiezīmē, ka veicot ātruma lauku mērījumus tika atrasts, ka, neskatoties uz niecīgām blīvumu starpībām starp magnētisku kolloīdu un nesējšķidrumu, būtisku lomu spēlē arī gravitācijas spēku izsauktā kustība. Tai attīstoties veidojas praktiski horizontāla robeža starp magnētisku un nemagnētisku šķidrumiem, kura atrodas tai perpendikulārā laukā. Šādas robežas veidošanās diamika tika skaitliski modelēta Comsol vidē un ir parādīta Zīm.5. Rezultātā tika formulēts jauns uzdevums – samaisošos šķidrumu horizontālas robežas nestabilitāte vertikālā magnētiskā laukā. Horizontālas magnētiska šķidruma virsmas nestabilitāte vertikālā laukā, kad raksturīgais parādības mērogs ir centimetri, ko nosaka tā saucamais kapilārais garums, ir tikusi daudzkārt apskatīta agrāk. Dotā situācija ir principiāli atšķirīga, jo starp samaisošiem šķidrumiem virsmas spraiguma nav. Šajā gadījumā raksturīgais parādības mērogs, ko nosaka daļiņu difūzija, ir mēram desmitos mikronu. Dotais torētiskais modelis, kurš tika izveidots asai difūzijas fronteī, ļauj izskaidrot īpatnības, ko gravitācija izraisa attīstoties mikrokonvekcijai. Turpmāk ir interesanti apskatīt doto nestabilitāti arī izsmērētas frontes gadījumā. Līdztekus augstāk minētajam būtu jārealizē

magnētiskā mikrokonvekcija gadījumā, kad ar piemeklētu ūdens šķīdumu tiek kompensēta šķīdumu blīvumu starpība. Šobrīd izmantotais glicerīna šķīdums ūdenī nav optimālākais risinājums, jo kaut arī blīvumu starpība izslēgta, tomēr šķīdumu viskozitātes ir dažādas.

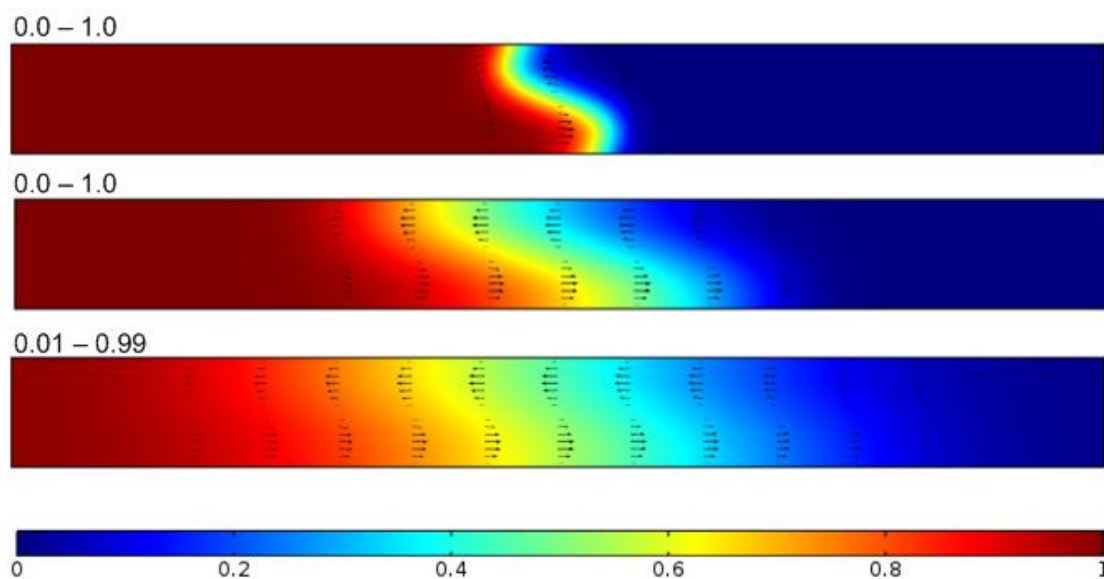
Šī pētījuma rezultāti savienojumā ar parādības teorētisko aprakstu un skaitliskām simulācijām ir pieņemti publicēšanai Journal of Fluid Mechanics [1]. Manuprāt tas ir pirmais gadījums, kad Latvijā veikts eksperimentāli-teorētisks darbs tiek pieņemts publicēšanai šāda ranga žurnālā.



Zīm.3



Zīm.4

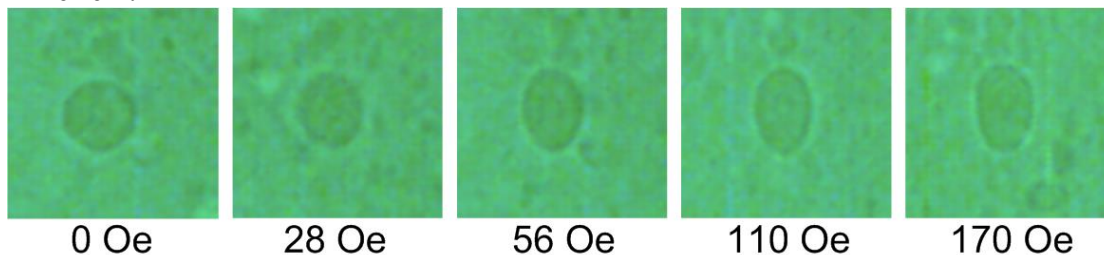


Zīm.5

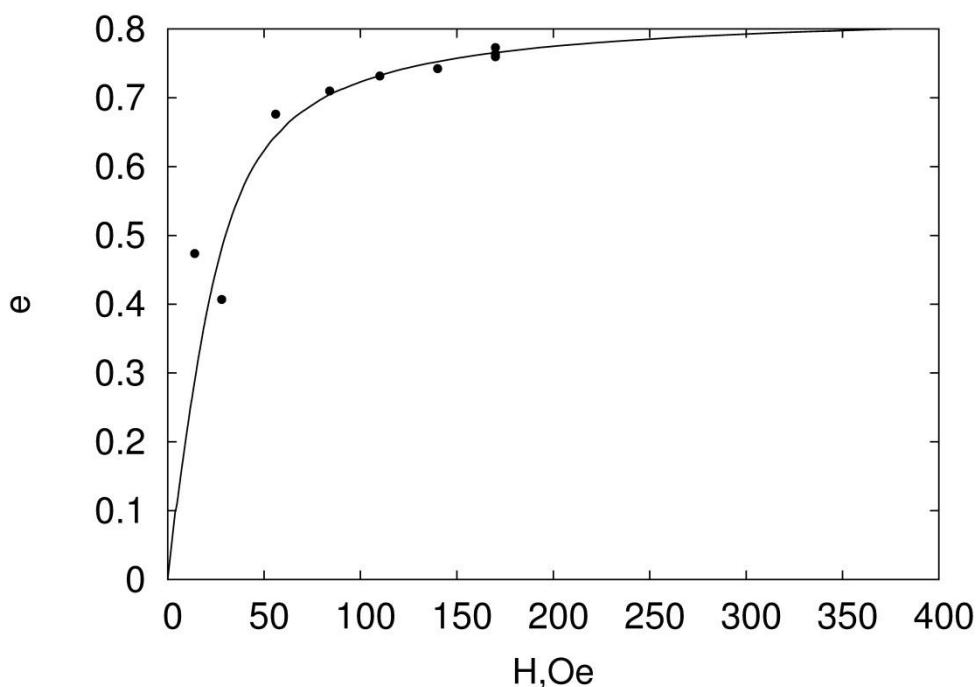
### Magnetoliposomas, to sintēze un īpašības.

Šobrīd biomedicīnā lielu interesi izraisa dažādi nesēji mērķtiecīgam zāļu transportam, ģenētiskās informācijas pārvešanai. Šim mērķim potenciāli interesantas ir liposomas ar katjontipa lipīda bislāņiem. Atskaites periodā MMML izstrādāta lielu vezikulu sintēzes metodika, izmantojot OSI sintēzēta katjontipa lipīdu. To izmēri mērami desmitos mikronu. Tas ļauj noteikt šī lipīda bislāņu liekumu elastību, kura, kā zināms, spēlē būtisku lomu liposomu endocitozes procesos šūnās, ar optiska mikroskopa palīdzību. Tās noteikšanai ar spontānš piebriešanas metodi tika sintezētas magnētiskas liposomas un to liekuma elastība noteikta, mērot liposomu deformāciju ārējā laukā. Šī parādība ilustrēta Zīm.6. Apstrādājot liposomas ekscentrisitātes atkarību no lauka, kā parādīts Zīm.7, atrasts, ka dotā tipa vezikulas raksturojas ar īpaši zemu liekuma elastības moduli. To var saistīt ar īpaši lieliem lipīda polārās galvas

izmēriem.



Zīm.6

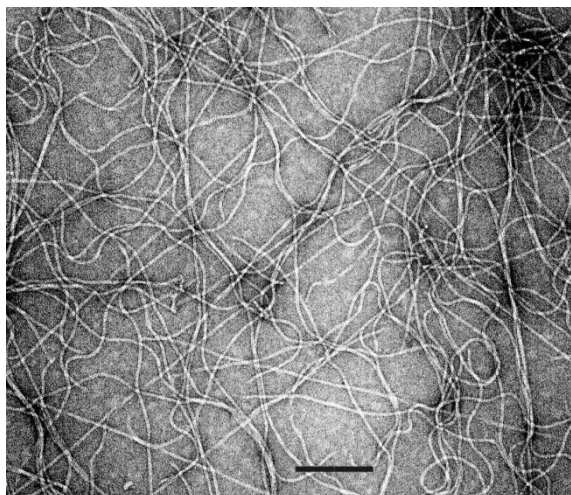


Zīm.7

Liposomu magnētiskās īpašības noteiktas ar magnetoфорēzes palīdzību. Atrasts, ka liposomās iesēgto daļiņu koncentrācija ir aptuveni 10 reizes mazāka nekā sintēzes procesā izmantotajam magnētiskam kolloidam. Dotā pētījuma rezultāti apkopoti publikācijā [2], kura iesniegta European Physical Journal E.

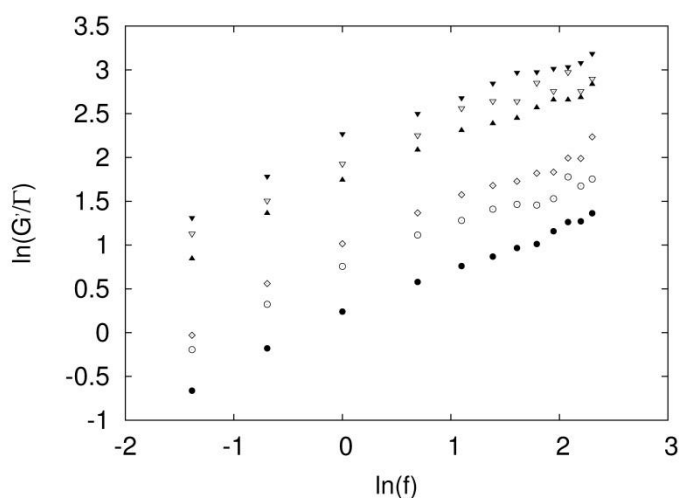
### Mikroreoloģija.

Viens no pētījumu virzieniem, kuru plānots attīstīt teorētiskās fizikas katedrā un ar to saistītajā MMML, ir mikroreoloģija, īpašu uzmanību veltot magnētiskai mikroreoloģijai. Kā zināms mikroreoloģijas metodes var dalīt divās daļās. Aktīvās metodes mēra vides atbildi uz tai uzliktu ārēju iedarbību, pasīvajās metodēs tiek apskatīta neitrālas daļiņas siltumkustības raksturīgās īpašības pētāmajā vidē un pēc tās rakstura tiek iegūta informācija par vides reoloģiskajām īpašībām. Darbā [3] pirmo reizi ar aktīvas magnētiskās mikroreoloģijas metodi tika pētīta bakteriofaga Pfl gela viskoelastīgās īpašības. Pfl gela elektronmikrogrāfija parādīta Zīm.8.



Zīm.8

Būtisks gela parametrs tā īpašību noteikšanai ar mikroreoloģijas metožu palīdzību ir tā tīkla acs izmēri salīdzinājumā ar zondējošās daļiņas izmēriem. Darbā [3] kā zonde tika izmantota MMML sintezēta superparamagnētiska stīga ar garumu desmit mikroni, kas bija daudz lielāks par gela tīkla acs izmēriem. Mērot stīgas svārstību amplitūdu un to fāzi ārejā magnētiskā laukā tika atrasta Pfl gela viskoelastīgo īpašību atkarība no frekvences. Iegūtie dati elastības modulim pie dažādām gela koncentrācijām parādīti Zīm.9.

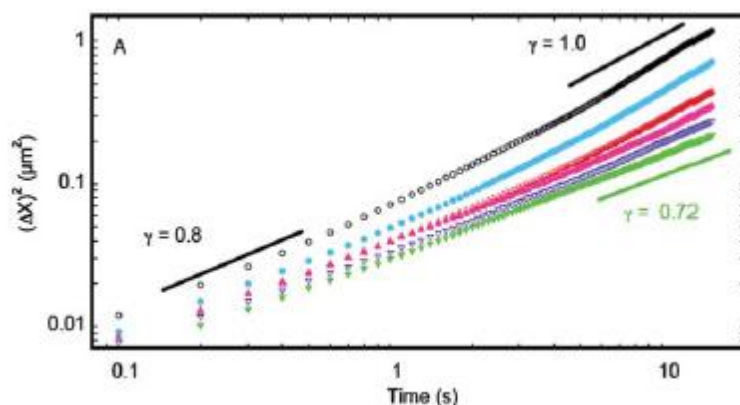


Zīm.9

Pfl gelu viskoelastīgo īpašību pētījumi ir interesanti sakarā ar lomu, ko šie virusi spēlē pie Pseudomonas aeruginosa baktēriju bioslāņu veidošanās. Šobrīd ir noskaidrots, ka baktēriju sasaisti bioslāņos, kas ir nopietna patoloģija, nodrošina Pfl virusi, kuri attīstās ekspresējot baktēriju atbilstošos genus. Attīstot darbā [4] izveidoto pasīvo metodi vides viskoelastīgo īpašību noteikšanai darbā [5] tika atrasts jauns efekts – Pfl gelu viskoelastīgo īpašību izmaiņa daudzvalentu katjonu ietekmē. Par to liecina Zīm.10 parādītā Brauna daļiņas vidējā kvadrātiskā pārvietojuma laika atkarības izmaiņa mainot pievienotās sāls koncentrāciju. Jāatzīmē, ka atšķirībā no klasiskās Brauna kustības vidējā kvadrātiskā pārvietojums ir



proporcionāls laika pakāpei, kura mazāka par vienu. Tas ir raksturīgs tā saucamajiem subdifūzijas procesiem. Šī parādība prasa dziļākus teorētiskus pētījumus nākotnē.



Zīm.10

### Magnētisku stīgu mehānika.

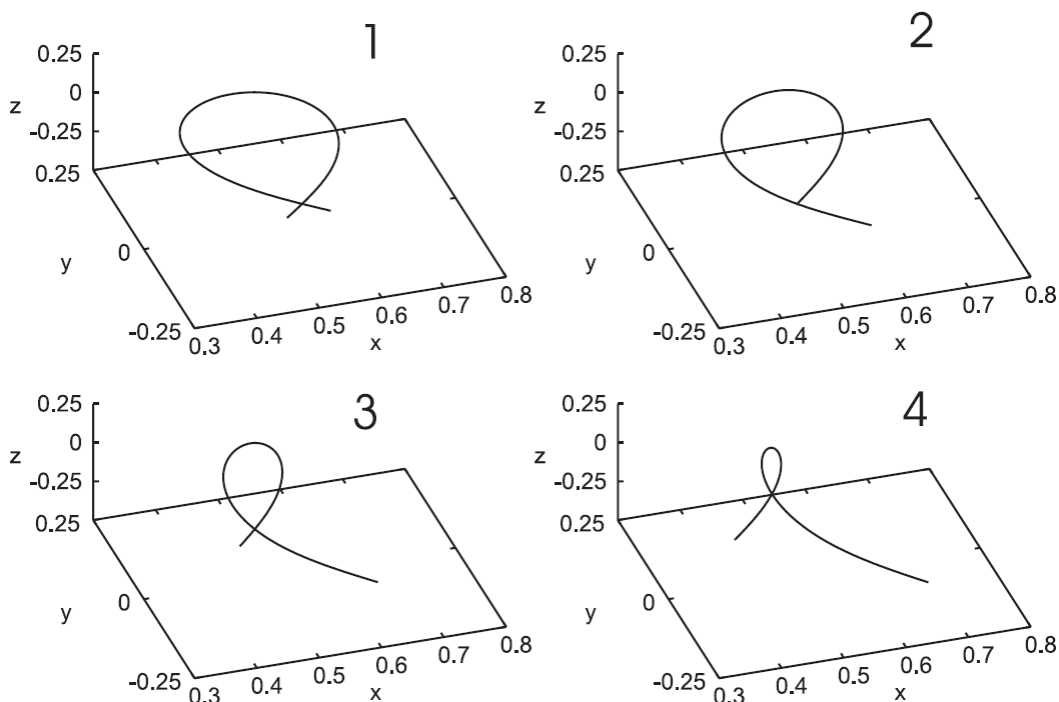
MMML izmantojot komerciāli pieejamas mikronu lielas funkcionalizētas feromagnētiskas daļiņas, ir izdevies sintezēt lokanas feromagnētiskas stīgas un veikt dažus eksperimentus ar tām [6]. Viena interesanta parādība ir novērojama, kad šādu feromagnētisku stīgu orientējot magnētiskā laukā ātri izmaina tā orientāciju pretējā virzienā. Šajā gadījumā stīga izveido cilpu kā parādīts Zīm.11.

Modelējot stīgas dinamiku skaitliski un salīdzinot modelēšanas rezultātus ar eksperimentu tika novērtēts būtisks lielums – stīgas liekuma elastības modelis. Skaitliskās modelēšanas veikšanai tika izveidots algoritms stīgas dinamikas modelēšanai trijās dimensijās. Skaitliskās simulācijas rezultāts pie magnetoelastīgā skaitļa vērtības, kura dod konfigurāciju inamiku tuvu eksperimentā novērojamai parādīta Zīm.12. Dotā parādība – feromagnētiskas stīgas cilpas veidošanās kalpoja par ideju bimētiskas magnētiska mikrodzinēja konfigurācijas izveidošanai, kura aprakstīta nākamajā sadaļā.

Darbā [5\*] tika izveidots viskoza diega modelis tā kustības rotējošā laukā aprakstīšanai. Ar šo modeli tika atrasts, ka gadījumā kad lauka rekvence ir lielāka par kritisko pa diegu izplatās tā pieskares leņķa triecienvilnis. Darbā [7] dotais modelis



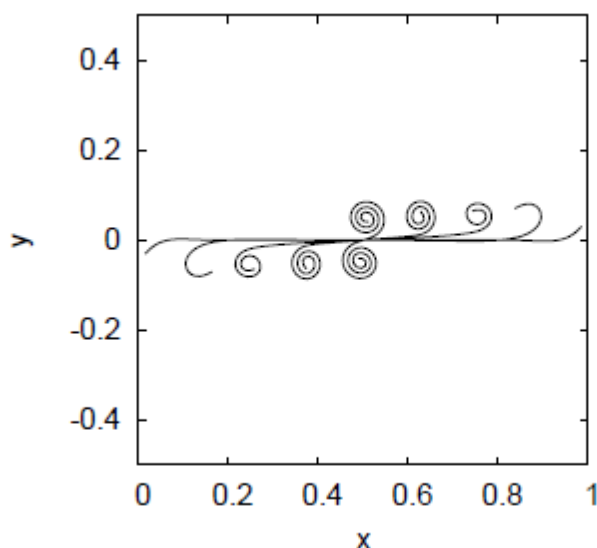
Zīm.11



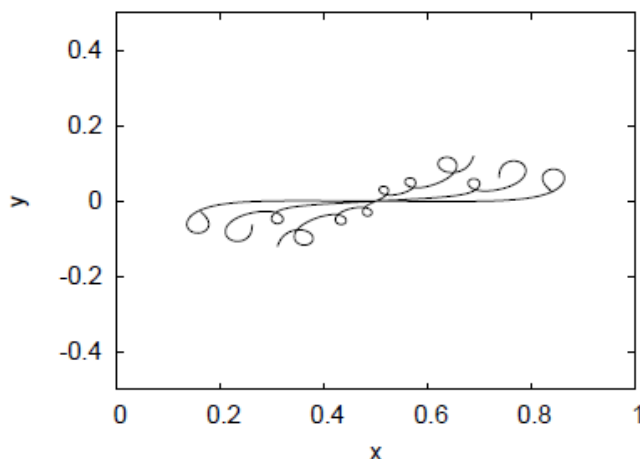
Zīm.12

tika piemērots, lai aprakstītu darbā [6\*] novēroto parādību – spirāles veidošanās uz magnētisku daļiņu ķēdītes galiem rotējošā laukā. Ņemot vērā dissipatīva raksturamomentu, kurš rodas, ja daļiņu magnetizācijai ir galīgs relaksācijas laiks, darbā [7] iegūtais rezultāts parādīts Zīm.13 – uz stīgas galiem veidojas spirāles, kuras ar konstantu ātrumu, kā

eksperimentā, kustas uz stīgas centru. Būtiski ir pieminēt ka šo spirāļu veidošanos ir iespējams novērot, ja modelī tiek ņemti vērā atgrūšanās spēki starp diega elementiem, kuri neļauj stīgai sevi krustot. Ja šo atgrūšanās spēku nav, tad uz diega galiem periodiski veidojas saritinājumi, kuri kustoties uz diega centru tur anihilē. Šī parādība parādīta Zīm.14. Skaitlisku simulāciju veikšanai darbā [5\*] tika piedāvāta uz fizikālie apsvērumiem balstīta regularizācijas metode. Darbā [8] regularizācijas jautājums tika pētīts dziļāk un tika atrasts, ka regularizācijai var izmantot funkciju ar atsevišķos apgabalos nepārtrauktu atvasinājumu.



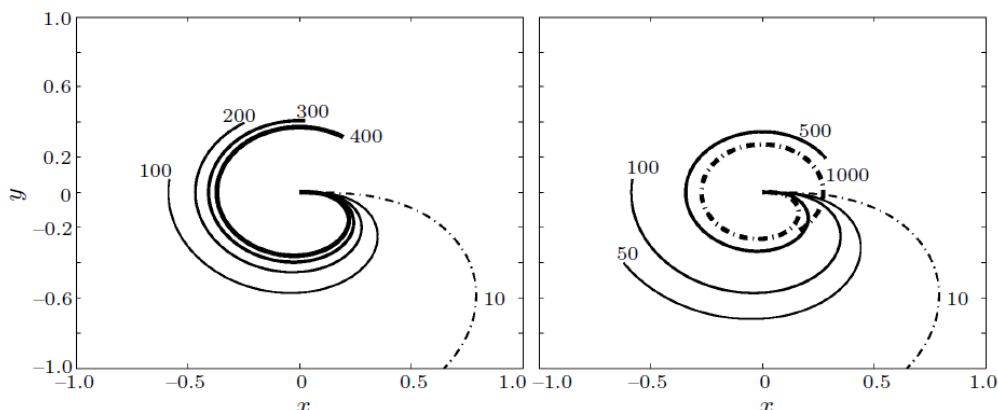
Zīm.13



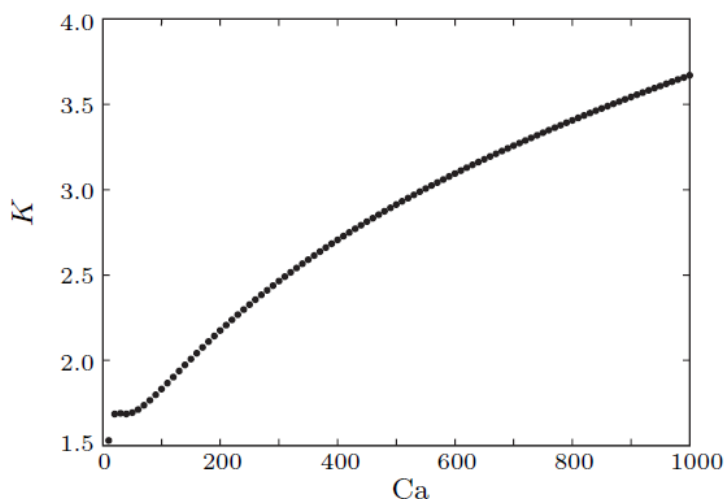
Zīm.14

Jauna pieeja elastīgu stīgu modelēšanai tika izveidota darbā [9]. Tika risināti vienādojumi stīgas iekšējiem parametriem –liekumam un spriegumam tajā. Kā ļoti interesanta apskatāmo uzdevumu klases modifikācija tika apskatīta situācija, kad uz stīgu darbojas spēki tās pieskares vektora virzienā. Šī parādība realizējas, piemēram, aktīva stīgai pārvietojoties pa ar molekulāriem motoriem nosētu virsmu. Šajā situācijā veidojas riņķveidīga stīgas konfigurācija līdzīga kā novērots eksperimentos [7\*]. Stīgas konfigurācija šajā gadījumā parādīta Zīm.15. Salīdzinot konfigurācijas ar atrasto automodeļa atrisinājumu tika noteikta

šim atrisinājumam nenoteiktā konstante, kura labi saskaņojas ar eksperimentu [7\*].  
Konstantes atrašanai izmantotie dati parādīti Zīm.15.



Zīm.15

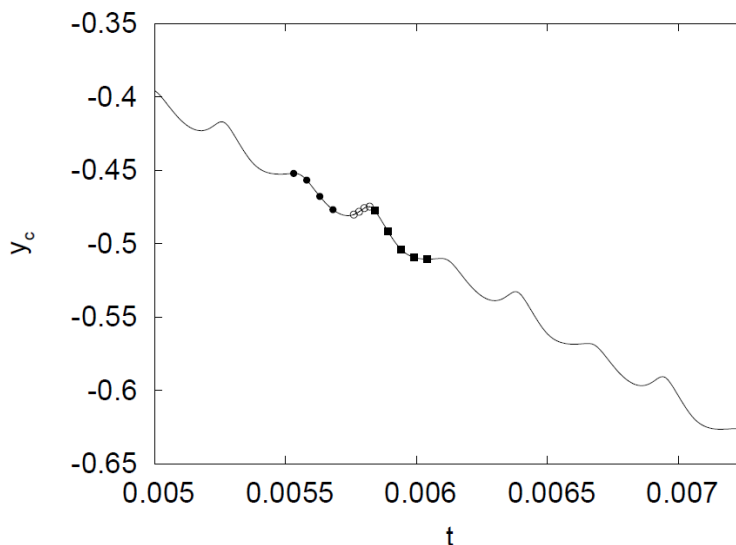


Zīm.16

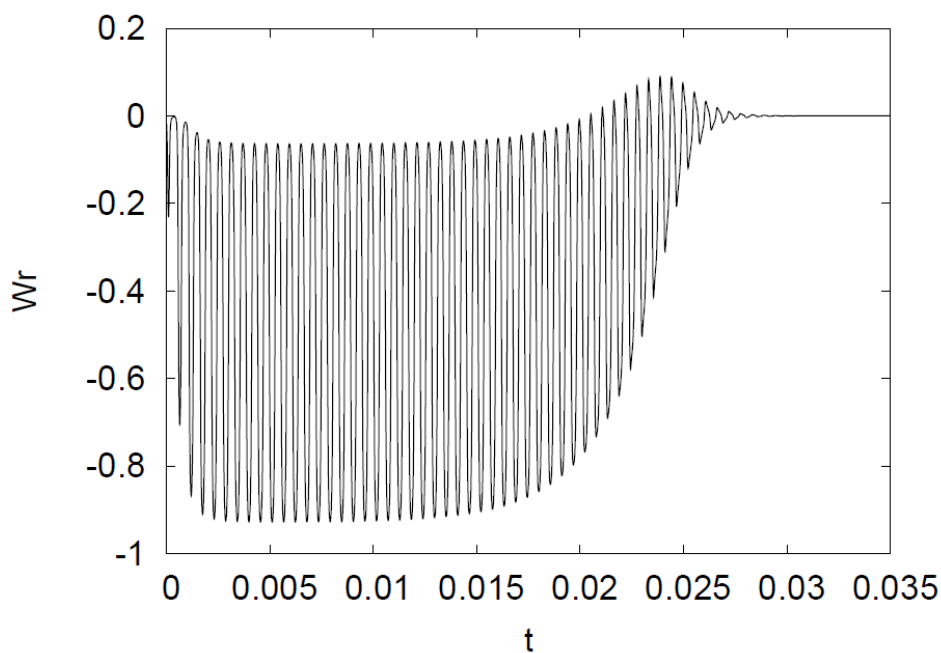
### Magnētiski mikrodzinēji un mikromaisītāji.

Sākot ar darbu [8\*], kurā tika izstrādāts magnētisku elastīgu stīgu modelis, teorētiskās fizikas katedrā norit darbs pie ar magnētisku lauku darbināmu mikrodzinēju un maisītāju izveides. Daži no piedāvātajiem mikrodzinēju modeļiem ir tikuši izveidoti arī eksperimentāli, lai gan šie rezultāti nekad nav tikuši publicēti atklātā presē.

Darbā [10] tika apskatīta iespēja izveidot uz iepriekšējā sadaļā aprakstītās parādības pamata biomimētisku magnētiska mikrodzinēja modeli. Ja stīgu ievieto mainīgā magnētiskā laukā, tad periodiski veidojoties cilpai un tai iztaisnojoties, rodas stīgas pašdzenoša kustība. Stīgas masas centra koordinātes atkarība no laika, kura iegūta skaitliski, parādīta Zīm.17. Redzams ka līdztekus stīgas kustībai uz priekšu ir novērojama arī kustība atpakaļ, - līdzīgi kā dzīvā dabā notiek protistu Chlamydomonas pārvietošanās. Jāpiezīmē, ka pie dotās kustības pēc noteikta laika novērojama stīgas nostāšanās perpendikulāri laukam un kustība uz priekšu izbeidzas. Šis process tika raksturots ar writhe skaitļa palīdzību, kura atkarība no laika parādīta Zīm.18.

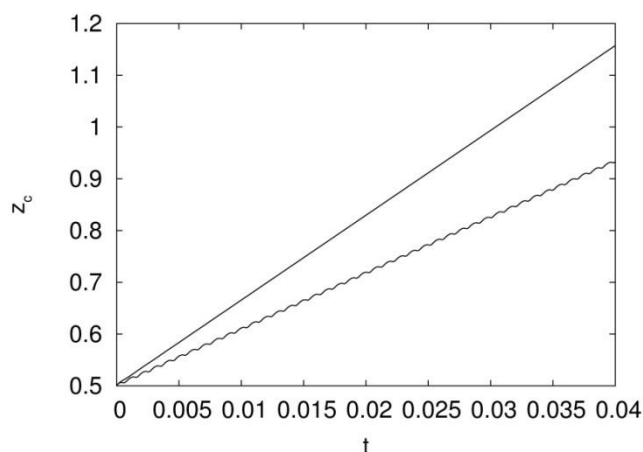


Zīm.17



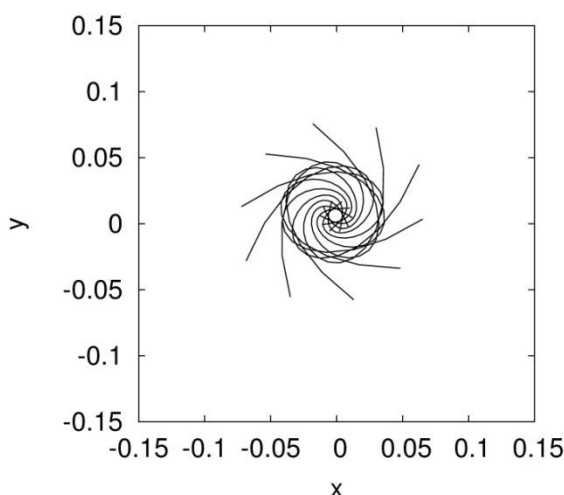
Zīm.18

Darbā [11] kā ar magnētisku lauka darbināma mikrozinēja variants tika piedāvāta jauna konfigurācija,- magnētisks dipols ar tā galā piesaistītu elastīgu stīgu. Svārstot dipolu mainīgā laukā aste deformējas un nodrošina tā pārvietošanos šķidrumā. Interesanti ir atzīmēt, ka šajā dipola pārvietošanās kinematikā ir novērojamas kustības uz priekšu un kustības atpakaļ stadijas, kā tas raksturīgs dažiem dzīvā dabā esošiem protistiem (Chlamydomonas). Rotējošā magnētiskā laukā ir novērojama vienīgi kustība uz priekšu un tā notiek ātrāk nekā oscilējošā laukā. Šie rezultāti parādīti Zīm.19.



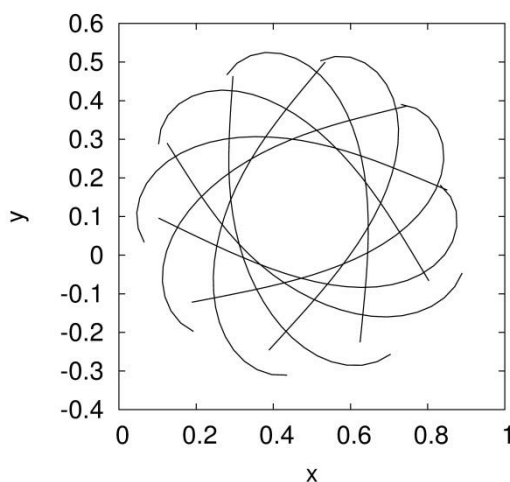
Zīm.19

Dzinēja konfigurāciju projekcijas uz rotējošā magnētiskā lauka plakni viena periodā laikā parādītas Zīm.20. Redzams kā stīgas deformācijas izraisa tās taisnvirziena kustību.



Zīm.20

Dotajam dzinējam ir vairākas interesantas īpašības, kuras saistītas ar elastīgās stīgas kustību. Tā kā stīgai atrodies rotējošā magnētiskā laukā tās galvas magnētiskais moments atpaliek fāzē no rotējošā magnētiskā lauka, tad uz stīgu darbojas spēka moments, kurš liek tai kustēties rotējošā lauka plaknē. Rezultātā dzinējs kustas rotējošā laukā pa riņķveidīgu trajektoriju, līdzīgi tam kā uzvedas magnetotaktiskas baktērijas rotējošā magnētiskā laukā [9\*]. Šī kustības trajektorija parādīta Zīm.21.

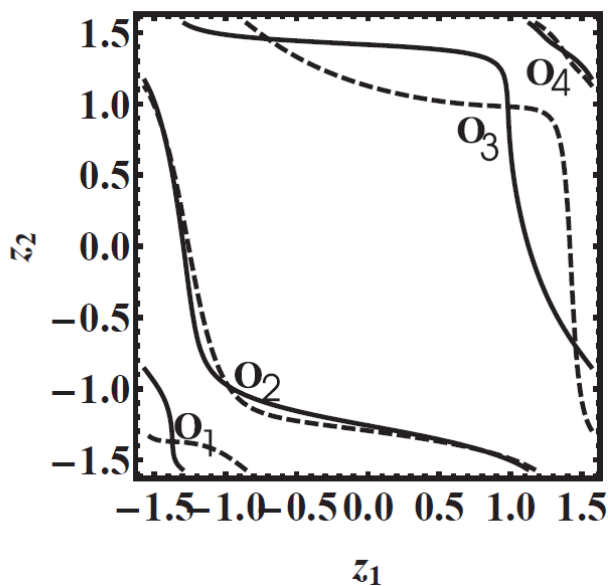


Zīm.21

Trajektorija, kura vienam periodam parādīta Zīm.21, ir nestabīla un perturbējot to perpendikulāri rotējošā magnētiskā lauka plaknei tā vidēji laikā orientējas perpendikulāri laukam un norit dzinēja kustība, kura parādīta Zīm.19.

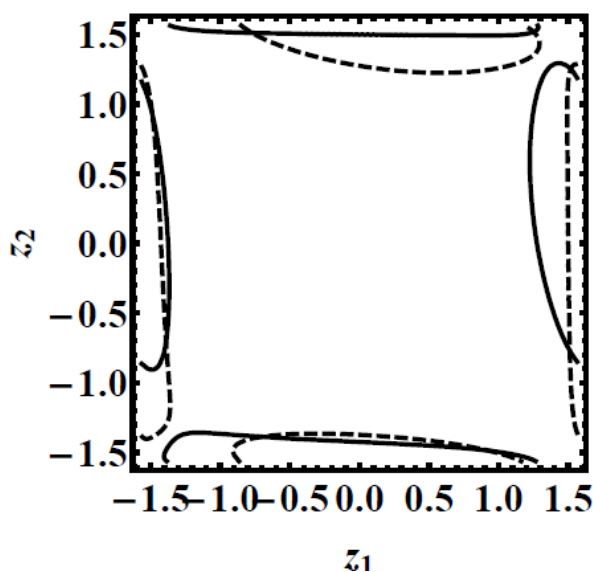
### Sinhronizācija

Sinhronizācijas parādības spēlē vitāli svarīgu lomu dažādās dzīvības norisēs un tehnikā. Ir eksperimenti, kuri apliecina, ka tām var būt izšķiroša loma arī dažādās parādībās, kuras norit dipolārās sistēmās mainīgos magnētiskos laukos. Darbā [12] tika apskatīta divu dipolu sistēma, radius vektors starp kuriem veido leņķi ar mainīga magnētiskā lauka virzienu. Tika atrasts, ka dipolu kustībai ir dažādi režīmi, - vājos laukos tie neatkarīgi no sākotnējās dipolu orientācijas sāk svārstīties sinhroni. Doto parādību var izprast apskatot raksturīgās laika skalas sistēmā. Lauka periodu un raksturīgo laiku, ko nosaka dipolu mijiedarbība. Reālā situācijā raksturīgais laiks, ko nosaka dipolu mijiedarbība ir daudzkārt lielāks par lauka periodu. Tas nozīmē ka kvalitatīvu izpratni par sistēmas uzvedību var iegūt kustības vienādojumus vidējojot pa lauka periodu un apskatot tā saucamo lēno mainīgo dinamiku. Iegūtās diferenciāl vienādojumu lēniem mainīgiem izoklinas parādītas Zīm.22 (zemkritiskās lauka vērtības) un 23 (virskritiskās lauka vērtības).



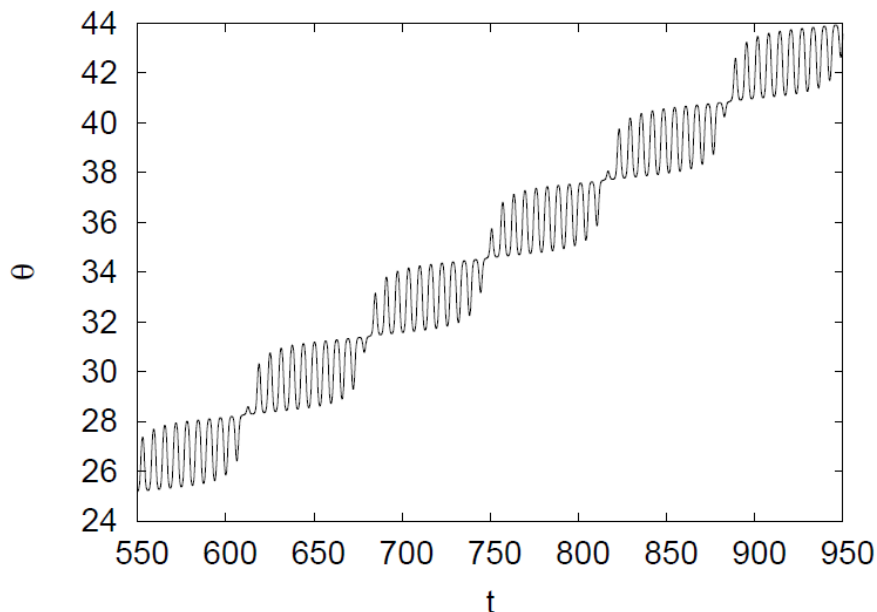
Zīm.22

Zīm.22 redzami sistēmas nekustīgie punkti, kuri veidojas kā izoklinu krustpunkti. Stabīliem nekustīgiem punktiem atbilst O2 un O4. Šiem stāvokļiem atbilst dipolu sinhronas oscilācijas. Šajā stāvoklī dipoli nonāk neatkarīgi no to sākumorientācijas. Ja lauka vērtība pieaug, tad stabīlie nekustīgie punkti pazūd un stacionāra stāvokļa sistēmai nav. Tas atbilst tam, ka dipoli sāk sinhroni rotēt vienā virzienā. Tiem rotējot dipolu stāvokļi nonāk Zīm.23 redzamajos "pudeles kakliņos", kad tie praktiski oscilē ar nemainīgu svārstību amplitūdu. Tai lēni pieaugot dipoli atstāj „pudeles kakliņu” un pārlec uz nākamo kakliņu. Tā rezultātā parādās atšķirīgs no nulles dipolu rotācijas ātrums. Aprakstītā parādība tika novērota arī skaitliskā eksperimentā (Zīm.24).



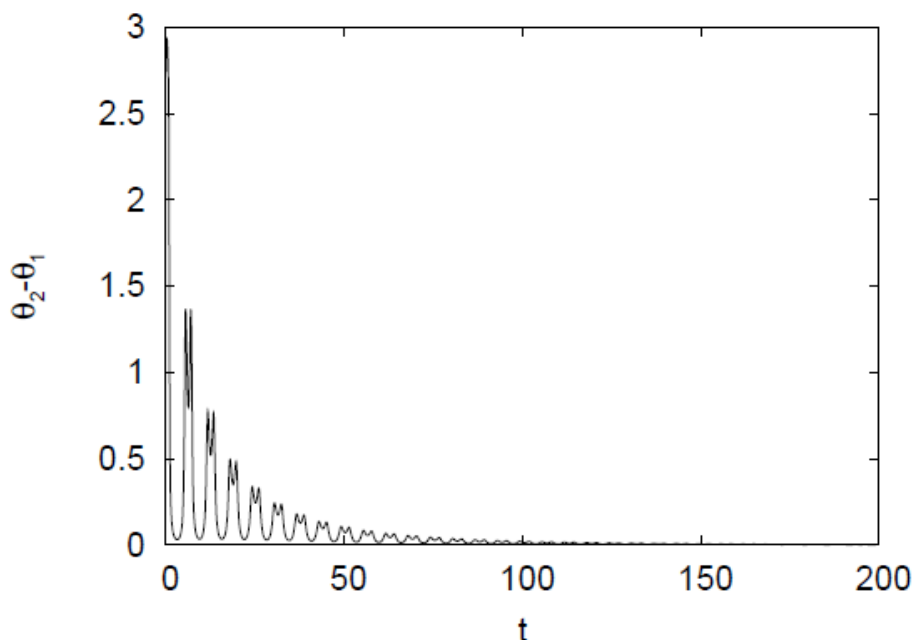
Zīm.23



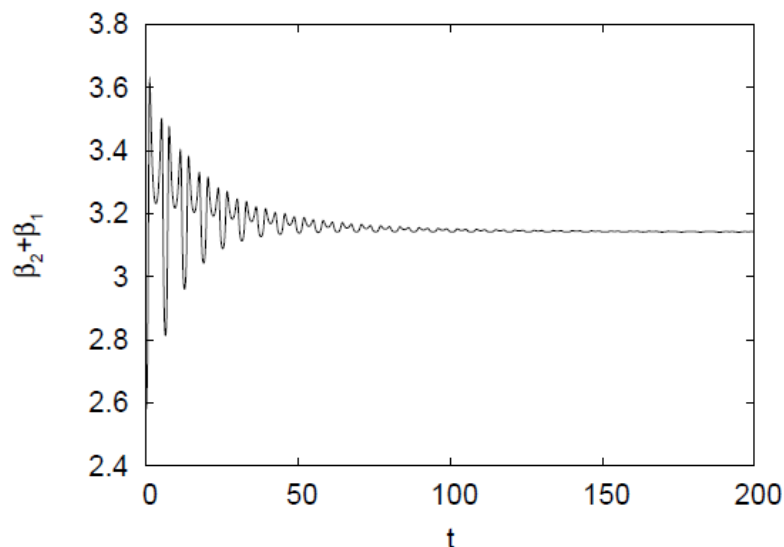


Zīm.24

Jāatzīmē ka pie vidējām magnētiskā lauka vērtībām dipolu sinhronizācijas parādībai ir sarežģītāks raksturs. Apskatot vispārīgu dipolu orientācijas gadījumi, kad dipolu orientācija raksturojas ar diviem leņķiem, dipolu kustības vienādojumi parāda sinhronizācijas parādību, kas ilustrēta Zīm.25 un 26. Tas parāda, ka dipoli sinhronizējas orientējoties pretējos virzienos no lauka un dipolu radius vektora plaknes. Kustības trajektorija šajā gadījumā parādīta Zīm.27.

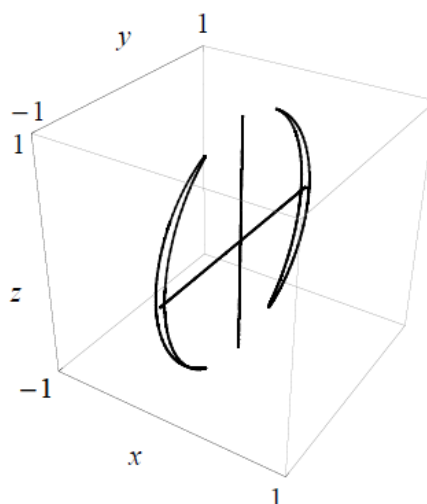


Zīm.25

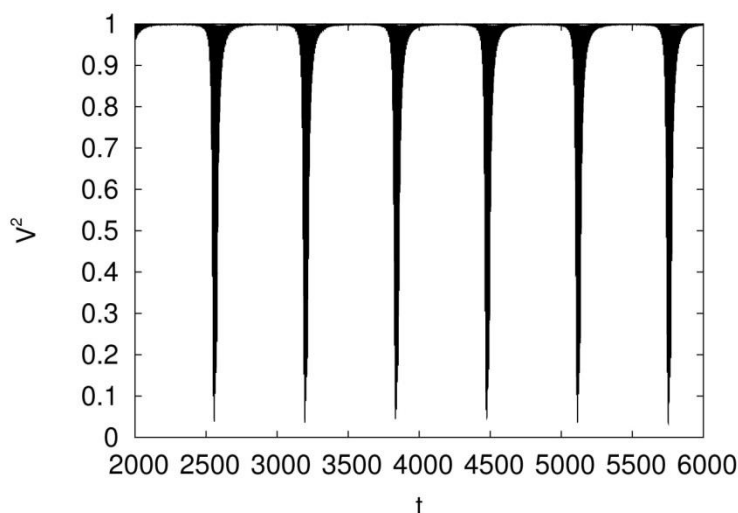


Zīm.26

Ļoti interesantas parādības notiek, kad aprakstītajā situācijā dipolu skaits ir liels. Zīm.28 parādīts kā laikā mainās 7 dipolu vektorsakārtoības parametrs atkarībā no laika. Sakārtoības parametra moduļa vērtība vienāda ar vienu nozīmē, ka dipoli sinhroni svārstās vienā fāzē (visi dipoli vērsti vienā virzienā un sakārtoības parametra modulis ir viens). Pēc regulāri atkārtojušiem laika intervāliem, kā redzams Zīm.28, šī sinhronizācija nojūk un dipoli orientēti dažādos virzienos, kas sakārtoības parametram dod vērtību tuvu nullei. Dotajā brīdī par doto parādību ir ziņots vienīgi konferencēs. Ja izdotos saprast, kas nosaka raksturīgo sinhronizācijas laika ilgumu, par doto parādību varētu sagatavot interesantu publikāciju.



Zīm.27



Zīm.28

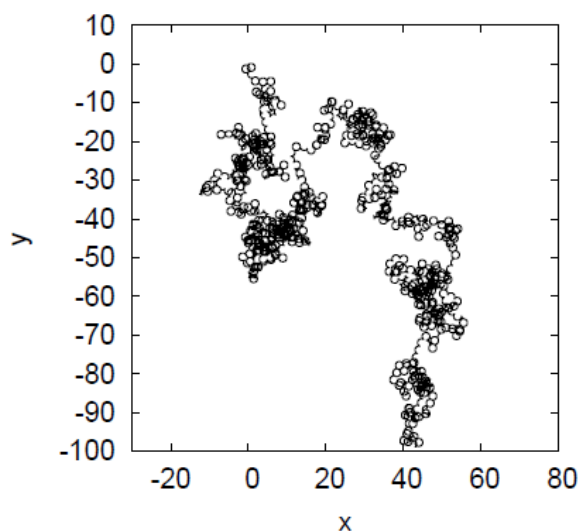
### Magnetotaktiskas baktērijas.

Darbā [9\*] tika atrasts, ka magnetotaktiskām baktērijām, kustoties rotējošā magnētiskā laukā, ir novērojama to rotācijas motoru pārslēgšanās, kā rezultātā mainās baktēriju kustības virziens. Tā kā šī pārslēgšanās notiek pēc gadījuma likuma, tad tā izsauc savdabīgu baktērijas kustības trajektorijas liekuma centra gadījuma klejojumus. Darbā [13] dotā parādība tika pētīta teorētiski, to modelējot skaitliski. Apskatot gadījumu, kad pārslēgšanās laika momenti ir sadalīti saskaņā ar Puassona likumu, tika skaitliski modelēta šī gadījuma rakstura baktērijas kustība un atrasti šī gadījumu klejojuma procesa raksturīgie difūzijas koeficienti. Skaitliski novērotā gadījuma rakstura trajektorija parādīta Zīm.29. Redzams kā baktērija kustoties pa riņķi izdara gadījuma rakstura pārlēcienus uz citiem riņķiem. Analizējot šīs gadījuma rakstura trajektorijas tika atrasti no rotējošā lauka frekvences atkarīgi efektīvie difūzijas koeficienti plaknē. Difūzijas koeficients vienā no virzieniem atkarībā no lauka frekvences parādīts Zīm.30.

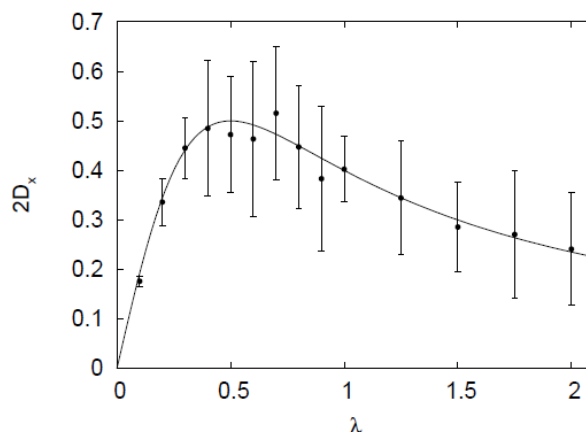
### Izmantotā literatūra.

1. M.M.Mayorov, A.Cebers. Magnetic microconvection on the diffusion front of ferroparticles//Magnitnaya Gidrod. (in Russ.). – 1983, v.19, N4 – P.36–40; Magnetohydrodynamics (Engl. translation) – 1983, v.19, N4 – P.376–380
2. A.Cebers. Stability of diffusion fronts of magnetic particles in porous media (Hele Shaw cell) under the action of external magnetic field//Magnitnaya Hidrodinamika – 1997, v.33, N1 – P.67–74; Magnetohydrodynamics (Engl. translation) – 1997, v.33, N1 – P.48–55.
3. A.Cebers, M.Igonin. Convective instability of magnetic colloid and forced Rayleigh scattering experiments. Magnetohydrodynamics – 2002, v.38 – P.265 – 270.
4. A.Cebers, M.Igonin. Convective instability of magnetic colloid and forced Rayleigh scattering experiments. Magnetohydrodynamics – 2002, v.38 – P.265 – 270.
5. A.Cebers. Dynamics of an elongated magnetic droplet in a rotating field. Phys. Rev. E – 2002, v.66 – P.061402-1-6.
6. N.Casic, S.Schreiber, P.Tierno, W.Zimmermann, T.M.Fisher, Europhysics Letters = 2010, v.90- P.58001

7. L.Bourdieu, T.Duke, M.B.Elowitz, D.A.Winkelmann, S.Leibler, A.Libchaber. Phys.Rev.Lett., 1995- v.75-P.176-179.
8. A.Cebers. Dynamics of a chain of magnetic particles connected with elastic linkers. Journal of Physics: Condensed Matter – 2003, v.15 – P.S1335–S1344
9. A.Cebers, K.Erglis, Qi Wen, V.Ose, A.Zeltins, A.Sharipo, P.A.Janmey. Dynamics of magnetotactic bacteria in a rotating field. Biophysical Journal. – 2007, v.93-1402-1412.



Zīm.29



Zīm.30

### Publikācijas.

1. K.Ērglis, A.Tatulcenkov, G.Kitenbergs, O.Petrichenko, A.Cēbers. Magnetic field driven microconvection in the Hele-Shaw cell. J.Fluid Mech., (accepted)
2. O.Petrichenko, K.Ērglis, A.Plotniece, K.Pajuste, G.Bealle, Ch.Menager, E.Dubois, R.Perzynski, and A.Cēbers. Properties of bilayers formed by cationic pyridine amphiphile. European Physical Journal E (submitted)

3. K.Ērglis, V.Ose, A.Zeltins, A.Cēbers. Viscoelasticity of the bacteriophage Pf1 network measured by magnetic microrheology. *Magnetohydrodynamics* – 2010, v.46, P.23-29.
4. G.Kitenbergs, K.Dzilna, K.Ērglis, A.Cēbers. Thermal fluctuation effects in magnetophoresis of superparamagnetic microbeads. *AIP Conference Proc.*- 2010, v.1311;141-145.
5. E.M.Huisman, Qi Wen Yu-Hsiu Wang, K.Cruz, G.Kitenbergs, K.Ērglis, A.Zeltins, A.Cēbers, and P.A.Janmey. Gelation of semiflexible polyelectrolytes by multivalent counterions. *Soft Matter* – 2011, v.7,7257-7261..
6. K.Ērglis, R.Livanovičs, A.Cēbers. Three dimensional instability of the flexible ferromagnetic loop. *Magnetohydrodynamics* -2010, v.46, 245-256
7. A.Cēbers, H.Kalis. Dynamics of superparamagnetic filaments with finite magnetic relaxation time. *European Physical Journal E*- 2011,v.34:30.
8. A.Cebers,H.Kalis. Mathematical modelling of an elongated magnetic droplet in a rotating magnetic field. *Mathematical Modelling and Analysis* – 2012, v.17, P.47-57.
9. A.Cebers, and H.Kalis. Intrinsic curve dynamics of magnetic filaments. *Magnetohydrodynamics* -2011,v.47, 223-236.
10. K.Ērglis, R.Livanovičs, A.Cēbers. Three dimensional dynamics of ferromagnetic swimmer. *JMMM* – 2011, v.323, 1278-1282
11. R.Livanovics, and A.Cēbers. Magnetic dipole with a flexible tail as a self-propelling microdevice. *Phys.Rev.E*-2012, v.85,041502
12. M.Belovs,A.Cēbers. Synchronization of magnetic dipole rotation in an ac magnetic field. *J.Phys.A:Math.Theor.*, - 2011, v.44, 295101
13. A.Cēbers. Diffusion of magnetotactic bacterium in rotating magnetic field. *JMMM* – 2011, v.323, 279-282.

#### Tēzes.

1. K.Ērglis, R.Livanovičs,A.Cēbers. Three dimensional dynamics of ferromagnetic swimmer. 8<sup>th</sup> International Conference on the Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers, P.95,2010.
2. G.Kitenbergs, K.Dzilna, K.Ērglis, A.Cēbers. Thermal fluctuation effects in magnetophoresis of superparamagnetic microbeads. 8<sup>th</sup> International Conference on the Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers, P.120,2010.
3. K.Ērglis,R.Livanovičs,A.Cēbers. Three dimensional dynamics of ferromagnetic swimmer. 12<sup>th</sup> International Conference on Magnetic Fluids. P.55-56, 2010.
4. B.Frka-Petesic,  
K.Erglis,J.F.Berret,A.Cēbers,V.Dupuis,J.Fresnais,R.Perzynski,O.Sandre. Dynamics of organic/inorganic magnetic microrods under rotating field. 12<sup>th</sup> International Conference on Magnetic Fluids. P.264-265,2010.
5. A.Cēbers, R.Livanovičs. Flexible ferromagnetic filaments as artificial cilia. Proceedings of the 12<sup>th</sup> international Conference electr-rheological fluids and Magneto-rheological suspensions. Philadelphia, USA,P.272-279,2010.
6. M.Belovs,A.Cēbers. Synchronization phenomena in dipolar systems. *Euromech Colloquium 526:Patterns in soft matter*,P.13-14, 2011.
7. A.Cebers,M.Belovs. Synchronization phenomena in systems with magnetodipolar interactions. *APS March Meeting, Dallas*,2011. Abstract X9.4.
8. M.Belovs, A.Cēbers, and H.Kalis. Dynamics of flexible magnetic microrods. 16<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Modelling and Analysis, Sigulda,Latvia, P.13, 2011..

9. A.Cēbers, and H.Kalis. Intrinsic curve dynamics of magnetic filaments. 16<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Modelling and Analysis, Sigulda, Latvia, P.25, 2011.
10. A.Cēbers, M.Belovs. Dipolar colloids in ac magnetic field. Moscow International Symposium on Magnetism. P.866-867, 2011.
11. A.Cebers, M.Belovs. Synchronization phenomena in dipolar systems. 8<sup>th</sup> international pamir Conference on Fundamental and applied MHD., Borgo, France e, P.939-943, 2011.
12. O.Petrichenko, G.Bealle, C.Menager, A.Cebers, R.Perzynsky, A.Plotniece, V.Ose. Synthesis of magnetoliposomes and studies of their properties. Synchronization phenomena in dipolar systems. 8<sup>th</sup> international pamir Conference on Fundamental and applied MHD., Borgo, France, P.1015-1019, 2011.
13. K.Erglis, O.Petrichenko, A.Cēbers. investigation of magnetic microconvection with PIV method. 8<sup>th</sup> international pamir Conference on Fundamental and applied MHD., Borgo, France, P.1021-1025, 2011.
14. A.Cēbers. Dipolar systems in AC magnetic fields. XXXII Dynamic Days Europe, Gthenburg, Sweden, 2012, P.81
15. R.Livanovičs, A.Cēbers. Magnetic field driven mrodevices. 23<sup>rd</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, Beijing, China, P.41.