



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

**Promocijas darba
kopsavilkums**

Abdelqader Zaben

**SPONTĀNI MAGNETIZĒTU
MIKROSTĪGU DINAMIKA
ĀRĒJĀ MAGNĒTISKAJĀ LAUKĀ:
EKSPERIMENTĀLA IZPĒTE**

Rīga 2022



LATVIJAS UNIVERSITĀTE

FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE

Abdelqader Zaben

SPONTĀNI MAGNETIZĒTU MIKROSTĪGU DINAMIKA ĀRĒJĀ MAGNĒTISKAJĀ LAUKĀ: EKSPERIMENTĀLA IZPĒTE

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Iesniegts doktora grāda iegūšanai fizikā
Apakšnozare: šķidrumu un gāzu mehānika

Rīga, 2022

Promocijas darbs izstrādāts Teorētiskās fizikas katedrā, Fizikas nodaļā, Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē, Latvijas Universitātē laika posmā no 2018. līdz 2022. gadam.

Darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta, 2 pielikumiem. Promocijas darba forma: Disertācija.

Darba vadītāji: Prof. Andrejs Cēbers un *Dr. Guntars Kitenbergs*.

Recenzenti:

- 1) *Dr. phys. Juris Prikulis*, vadošais pētnieks, Ķīmiskās fizikas institūts, Latvijas Universitāte;
- 2) *Dr. Peter Kopčanský*, profesors, Eksperimentālās fizikas institūts, Slovākijas Zinātņu akadēmija, Slovākija;
- 3) *Dr. Mojca Vilfan*, zinātniskā līdzstrādniece, Jozefa Stefana institūts, Slovēnija.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Universitātes Fizikas un astronomijas zinātņu nozares promocijas padomes atklātajā sēdē 2022. gada 2. decembrī plkst. 15.30 Latvijas Universitātes Zinātņu mājas ____ auditorijā, Jelgavas ielā 3, Rīgā, Latvijā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumiem var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā (Kalpaka bulvārī 4, Rīgā) un Latvijas Universitātes Akadēmiskajā bibliotēkā (Rūpniecības ielā 10, Rīgā).

Latvijas Universitātes Fizikas un astronomijas
specializētās promocijas padomes
priekšsēdētājs

Dr. phys. Andris Jakovičs

Promocijas padomes sekretāre

Sintija Siliņa

© Latvijas Universitāte, 2022

© Abdelqader Zaben, 2022

ISBN 978-9934-18-892-3

ISBN 978-9934-18-893-0 (PDF)

Anotācija

Mikroierīces, kuras manipulē ar ārēju spēku, ir interesants pētniecības temats, ņemot vērā to potenciālos pielietojumus, piemēram, samaisīšanai mikrofluidikā un mērķtiecīgai kravu piegādei biomedicīnā. Magnētiski darbināmi roboti, kā šeit pētīts, sniedz priekšrocības gan kustības kontrolē pēc pieprasījuma, gan drošā bioloģiskā saderībā. Šajā darbā eksperimentāli tiek pētīta magnētisko stīgu dinamika gan rotējošā, gan pulsējošā magnētiskā laukā. Stīgas ir veidotas no feromagnētiskām daļiņām, kas savienotas ar dezoksiribonukleīnskābes (DNS) fragmentiem. Eksperimenti tika realizēti pie dažādiem nosacījumiem, kas ļāva veikt adekvātu salīdzinājumu ar skaitliskās modelēšanas rezultātiem, identificēt iepriekšējos pētījumos izstrādāto modeļu ierobežojumus un sniegt provizorisku priekšstatu par feromagnētisko stīgu izmantošanu samaisīšanai un pielietojumos kravu piegādei.

Saturs

1 Ievads	5
1.1 Pētniecības novitāte un literatūras apskats	5
1.2 Mērķis un pētāmie jautājumi	7
1.3 Eksperimentālās metodes	8
1.4 Rezultātu aprobācija	10
1.4.1 Ar promocijas darbu saistīto publikāciju saraksts . .	10
1.4.2 Semināru un konferenču saraksts	11
1.4.3 Pētniecības projekts	12
1.5 Autora iepriekšējā izglītība un zinātniskā pieredze	12
2 Stīgu dinamika rotējošā laukā	13
3 Stīgu dinamika impulsa lauka ietekmē	19
4 Lokālās plūsmas mērījumi	26
5 Kopsavilkums un secinājumi	31
5.1 Tēze	31
Literatūras saraksts	32

1 Ievads

1.1 Pētniecības novitāte un literatūras apskats

Magnētiski darbināmu mikrorobotu pētījumi pēdējos desmit gados ir kļu-
vuši par arvien aktuālāku tematu (Koleoso u. c. 2020), tādēļ ka tie var tikt
izmantoti, piemēram, samaisīšanā (Biswal un Gast 2004; Chen un Zhang
2017; Shanko u. c. 2019), mērķtiecīgā kravu piegādē (Nguyen u. c. 2021;
Ahmed u. c. 2017) un mikroreoloģijā (Brasovs u. c. 2015). Tāpēc šādu
ierīču dinamikas izpratne to darbības vidē kļuva ļoti svarīga no iespēju,
projektēšanas un izstrādes viedokļa. Pašpiedziņas mikroierīces, kas dar-
bojas zemu Reinoldsa skaitļu sfērā, ir izaicinošs pētījuma objekts, tāpēc
ka šķidrums radītie viskozie spēki dominē pār inerci. Ja inerces ietekme
ir niecīga, plūsmas režīms ir atgriezenisks, ko kā pirmais eksperimentāli
pierādīja Teilors (Taylor 1967). Pērsels (Purcell 1977) savā pazīstamajā
darbā *"Life at low Reynolds number"* formulēja "ķemmšgliemeņu teorē-
mu", pievēršoties jautājumam par atgriezeniskumu attiecībā uz pretēji vēr-
stu kustību, lai panāktu pašdzenošu kustību, un pievēršoties veidam, kā
to pārvarēt, izmantojot vairāk nekā vienu brīvības pakāpi. Līdzīgi ar sa-
maisīšanos mikrofluidikā, kur impulsa pārnese galvenokārt ir atkarīga no
molekulārās difūzijas, lokāla samaisīšanās arī kļūst svarīga, lai nodrošinā-
tu ierīču darbību "laboratorijā uz mikroshēmas" ierīcēs (Drew u. c. 2016),
ņemot vērā telpas un laika ierobežojumus difūzijas norisei. Šādi nozīmīgi
potenciālie pielietojumi biomedicīnas un mikrofluīdikas jomā motivē veikt
šo pētījumu.

Viena no ierīču konstrukcijām, ko darbina ar ārējo magnētisko lauku
un kas tika izmantota šajā darbā, ir ķēdes, kuras sastāv no savienotām
mikronu lieluma magnētiskajām daļiņām. Šāda konstrukcija nodrošina
tādu priekšrocību, kā vieglu izgatavošanu pašu laboratorijās, kā arī ērtu
piemērojamību dažādu konfigurāciju dinamiku sākotnējiem pētījumiem.
Piemēram, kā pirmie publicētie pielietojumu pētījumi bija par $1 \mu\text{m}$ pa-
ramegnētisko daļiņu ķēdi, ko darbina svārstīgs šķērsvirziena magnētiskais
lauks (Dreyfus u. c. 2005) un kas tika izmantota, lai izpētītu peldēšanas

īpašības ar pievienotu kravu. Papildus tam, no 1,4 μm paramagnētiskām daļiņām veidotas ķēdes, ko darbina rotējošs magnētiskais lauks, izmantoja, lai pētītu sajaukšanās dinamiku (Biswal un Gast 2004).

Elastīgo magnētisko stīgu dinamika ir interesanta, tādēļ ka to uzvedību nosaka gan magnētiskie, gan elastības spēki. Kā eksperimentāli novēroja Gubo, vienas dimensijas statiskā lauka ietekmē paramagnētiskās stīgas vai nu izlīdzinās ar magnētiskā lauka virzienu, vai arī deformējas, iegūstot S vai U veida formu (Goubault u. c. 2003). Savukārt plaknē rotējošā lauka iedarbībā stīga piedzīvo magnētiskas izcelsmes griezes momentu, kam stīgas rotācijas rezultātā pretdarbojas hidrodinamiskais berzes spēks (Spatafora-Salazar u. c. 2021). Pie relatīvi zemām frekvencēm no superparamagnētiskām daļiņām izgatavotai stīgai eksperimentāli tika novēroti dažādi rotācijas veidi, proti, stingrs, vijīgs (S līdzīgas formas) un salocīts veids. Rotācijas veids ir atkarīgs no stīgas elastības, kamēr stīga var rotēt sinhroni vai asinhroni ar magnētisko lauku (Kuei u. c. 2017).

Teorija, ko vairāki autori izmantoja elastīgu magnētisko stīgu modelēšanai, ir balstīta uz modificētu Kirhofa stieņa teoriju, ņemot vērā magnētisko enerģiju (Cēbers 2003; Barreto u. c. 2022). Spēks un griezes moments, kas darbojas stieņa šķersgriezumā, tiek iegūts ar enerģijas variāciju, kas ietver elastīgo lieces enerģiju un magnētiskā stieņa enerģiju pieliktajā laukā (Cēbers 2003). Feromagnētiska materiāla gadījumā magnētiskais moments uz stieņa garuma vienību \vec{M} ir antiparalēls lokālajam pieskares virzienam \vec{t} : $\vec{M} = -M\vec{t}$. Griezes momenta līdzsvars ir šāds (Ērglis u. c. 2010),

$$\frac{d\vec{K}}{dl} + \vec{t} \times \vec{F} - M\vec{t} \times \vec{H} = 0 \quad (1)$$

un magnētiskais spēks nodrošina $\vec{F}_m = M\vec{H}$. Viskoza, elastības un magnētisko spēku līdzsvars ir šāds

$$\zeta \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} = -A_b \frac{\partial^4 \vec{r}}{\partial l^4} + \frac{\partial(\Lambda \vec{t})}{\partial l} \quad (2)$$

kur $\vec{\zeta}_{ik} = \zeta_{\perp} \delta_{ik} + (\zeta_{\parallel} - \zeta_{\perp}) t_i t_k$ ir hidrodinamiskās pretestības koeficientu

matrica, Λ ir spriegums, kas nodrošina stieņa neizstiepjamību, un A_b ir lieces modulis.

Garumu mērogo ar stīgas garumu L , laiku ar elastīgās relaksācijas laiku $\tau = \zeta_{\perp} L^4 / A_b$, elastīgo spēku ar A_b / L^2 . Rezultātā stieņa uzvedību nosaka magnetoelastiskais skaitlis $Cm = MHL^2 / A_b$ un $\omega\tau$, kur ω ir maiņstrāvas lauka raksturīgā frekvence.

1.2 Mērķis un pētāmie jautājumi

Šī darba galvenais **mērķis** ir eksperimentāli izpētīt dinamiku dažādos magnētiskā lauka profilos daļēji lokanām magnētiskām ķēdēm, kas veidotas no feromagnētiskām daļiņām un savienotas ar elastīgiem polimēriem. Šis darbs tiek piedāvāts, lai tiktu izpētīti jautājumi, kas literatūrā nav atrodami, jo uzmanība šajā jomā galvenokārt ir vērsta uz paramagnētisko daļiņu izmantošanu. Attiecīgi, šajā darbā tiek mēģināts atbildēt uz šādiem **jautājumiem**,

- Kā stīgas uzvedas rotējošā magnētiskajā laukā? Vai mainot lauka frekvenci novērojamas stīgas uzvedības izmaiņas ar raksturīgu kritisko frekvenci?
- Vai feromagnētiska stīga var virzīties uz priekšu periodiskas lauka inversijas apstākļos, kā to skaitliski piedāvāja Belovs un Cēbers 2009?
- Kādi ir plūsmas raksturlielumi ap stīgām rotējošā magnētiskajā laukā?

Šajā kopsavilkumā īss metožu apraksts ir sniegts sadaļā 1.3. Stīgu dinamika rotējošā magnētiskajā laukā ir aprakstīta 2. nodaļā. 3. un 4. nodaļā attiecīgi aprakstīta stīgu uzvedība impulsu lauka un ātruma mērījumos. Visbeidzot, šī darba secinājumi ir izklāstīti 5. nodaļā.

1.3 Eksperimentālās metodes

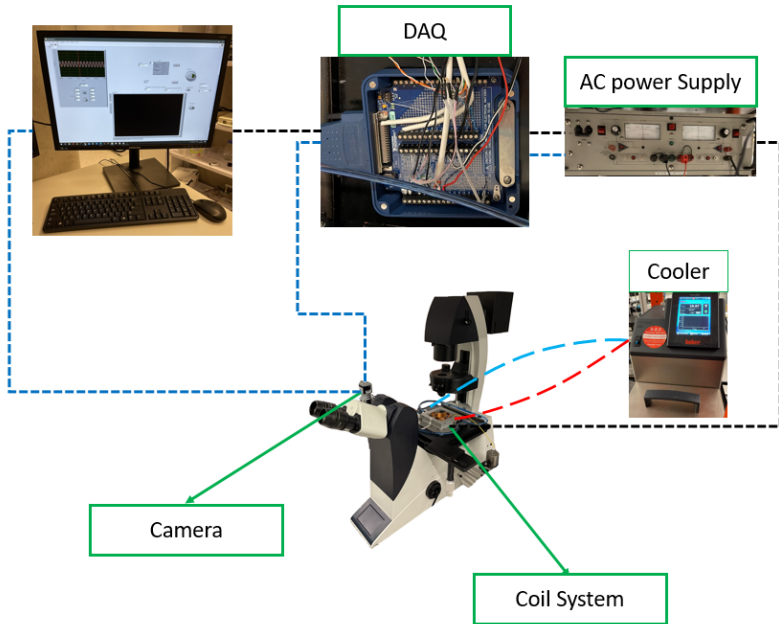
Visā šajā darbā aprakstīto stīgu veidošanai izmantotā metode tika adaptēta no Ērglis 2010. Stīgu veido, savienojot magnētiskās daļiņas ar DNS fragmentiem. Izmantotās feromagnētiskās daļiņas piegādā Spherotech, un to vidējais diametrs izmantotajām partijām ir $4,21 \mu\text{m}$ un $4,39 \mu\text{m}$. Šīs daļiņas ir izgatavotas no polistirola, kas pārklāts ar plānu hroma oksīda slāni un pēc tam funkcionalizēts ar streptavidīnu. Dezoksiribonukleīnskābes (DNS) fragmentus piegādā Latvijas Biomedicīnas pētījumu un studiju centrs, tie ir 1000 bāzu pāru (bp) gari un biotilēti abos galos.

Pieņemtas šādas procedūras,

- Pirmkārt, $10 \mu\text{L}$ DNS fragmenta šķīdums ($182 \pm 10 \mu\text{g/ml}$) ir sajaukts ar $2 \pm 0.5 \mu\text{L}$ magnētiskām daļiņām ($1\% w/v$) un $0.5 \text{ ml } 10\%$ TE buferšķīdumu (pagatavots, sajaucot $7,5 \text{ pH}$ TE buferšķīdumu ar destilētu ūdeni) $1,5 - 2 \text{ ml}$ mēģenēs.
- Pēc tam mēģeni ievieto starp diviem spēcīgiem pastāvīgiem magnētiem, kas izgatavoti no neodīma sakausējuma. Katra magnēta izmēri ir $5 \times 5 \times 1 \text{ cm}$. Magnēti ir fiksēti 7 cm attālumā viens no otra un nodrošina viendabīgu lauku $\approx 500 \text{ Oe}$ apjomā.

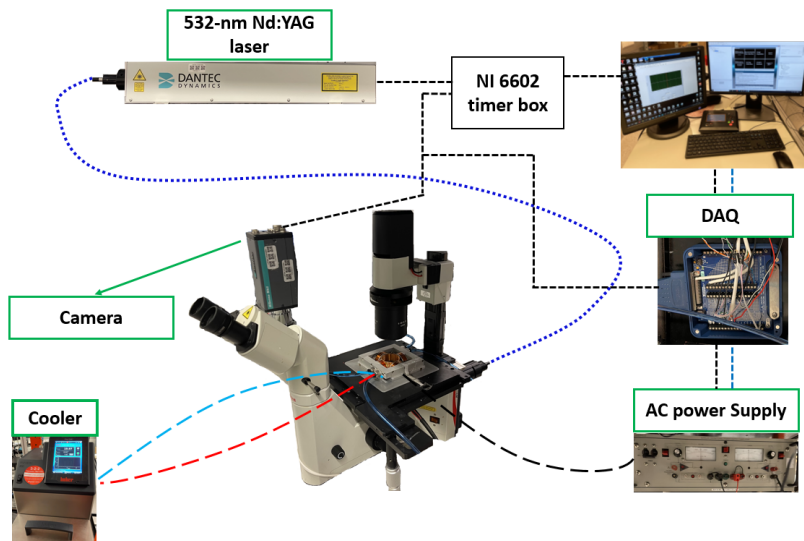
1. attēlā parādīts eksperiments, kas sastāv no pašu būvētas spoļu sistēmas, kurā ir 6 spoles magnētiskā lauka ģenerēšanai trīs dimensijās. Spoles ir savienotas ar maiņstrāvas barošanas avotiem (Kepco BOP 20-10M), spoļu sistēma ir spējīga radīt magnētisko lauku līdz pat 51 Oe . Vēlamo lauka profilu ģenerē Labview kods un profils tiek nosūtīts barošanas avotiem, izmantojot National Instruments datu iegūšanas karti (NI PCI-6229). Attēli tika iegūti ar Basler ac1920-155um kameru, kas var nodrošināt līdz pat 200 kadrus sekundē. Kameru sinhronizē ar sistēmu, vai nu saņemot digitālu impulsu signālu caur datu iegūšanas kartēm, vai izvades signālu, lai reģistrētu tā brīža rādījumus. Paraugu novērošanai tika izmantots optiskais mikroskops (Leica DMI3000B) ar $40\times$ un $10\times$ palielinājumu spilgta lauka režīmā. Šķidrums šūnas ir izgatavotas, izmantojot divus mikroskopa

stikla priekšmetstikliņus, kas atdalīti ar $211 \mu\text{m}$ biezu divpusēji līmējošu līmlenti, maksimālais tilpums ir $\approx 20 \mu\text{l}$.



Att. 1: Eksperimentālā iekārta

Ātruma mērījumiem izmantoto μ -PIV (mikroskopisku izmēru daļiņu ātrumu lauku mērīšanas iekārtu (no angļu *Particle Image Velocimetry*) komplektu no Dantec Dynamics (2. attēlā), un tas sastāv no HiSense MkII kameras, kurai ir CCD sensors ar maksimālo attēlu reģistrēšanas frekvenci $12,2 \text{ Hz}$ un minimālo starpkadru laiku 200 ns dubultkadra režīmā, kā arī dubultā impulsa lāzera ($\lambda = 532 \text{ nm}$), ko izmanto kā gaismas avotu marķierdaļiņu ierosināšanai ar maksimālo frekvenci 50 Hz . Kame-ru un lāzeru sinhronizē, izmantojot taimera bloku (NI PCI-6602). Stīgu paraugus novēro ar invertu optisko mikroskopu (Leica DMIL), izmantojot Y3 filtru kubu un $40\times$ objektīvu.



Att. 2: Ātruma mērījumu eksperimentālā iekārta

1.4 Rezultātu aprobācija

1.4.1 Ar promocijas darbu saistīto publikāciju saraksts

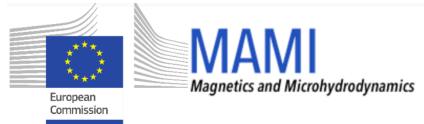
- [A. Zaben](#), G. Kitenbergs, A. Cēbers (2021) Instability caused swimming of ferromagnetic filaments in pulsed field. *Scientific Reports*, 11, 23399.
- [A. Zaben](#), G. Kitenbergs, A. Cēbers (2020) 3D motion of flexible ferromagnetic filaments under rotating magnetic field. *Soft Matter*, 16, 4477-4483.
- [A. Zaben](#), G. Kitenbergs, A. Cēbers (2020) Deformation of flexible ferromagnetic filaments under a rotating magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 499, 166233.

1.4.2 Semināru un konferenču saraksts

- A. Zaben, A. Cēbers, G. Kitenbergs. Deformation of flexible ferromagnetic filaments under rotating field. Magnetic Soft Matter, Latvijas Universitātes 77. Starptautiskā zinātniskā konference, 2019. gada 1. februāris, Rīga, Latvija.
- A. Zaben, G. Kitenbergs, A. Cēbers. Deformation of flexible ferromagnetic filaments under a rotating magnetic field. International Conference on Magnetic Fluids, 2019. gada 8.-12. jūlijs, Parīze, Francija.
- A. Zaben, G. Kitenbergs, A. Cēbers. Flexible ferromagnetic filaments as micro-mixers. Magnetic Soft Matter, Latvijas Universitātes 78. Starptautiskā zinātniskā konference, 2020. gada 14. februāris, Rīga, Latvija.
- A. Cēbers, A. Zaben, G. Kitenbergs. Ferromagnetic swimmers: experiment, theory and simulation. Magnetic Soft Matter. Latvijas Universitātes 79. Starptautiskā zinātniskā konference, 2021. gada 11. februāris, Rīga, Latvija.
- A. Zaben, G. Kitenbergs, A. Cēbers. Movement diversity of flexible ferromagnetic filaments - from rotation to propulsion. Priority research topic "Nano, Quantum Technologies, and Innovative Materials". Latvijas Universitātes 79. Starptautiskā zinātniskā konference, 2021. gada 15. februāris, Rīga, Latvija.
- A. Zaben, A. Cēbers, G. Kitenbergs, Rotation and swimming of flexible ferromagnetic filaments, Latvian-Brazilian meeting on Active and Soft Matter Physics, 80. Starptautiskā zinātniskā konference, 2022. gada 3. februāris, Rīga, Latvija.
- A. Cēbers, A. Zaben, G. Kitenbergs, M. Belovs. Magnetic filaments: shapes, stability and self-propulsion. APS March Meeting 2022, 2022. gada 14.-18. marts, Čikāga, ASV.

1.4.3 Pētniecības projekts

Šeit veiktais darbs ir saistīts ar inovatīvo apmācību tīkla projektu "*Magnetics and Microhydrodynamics*", ko finansē Eiropas Savienības pētniecības un inovāciju programma "Horizon 2020", saskaņā ar grantu līgumu Nr. 766007.



1.5 Autora iepriekšējā izglītība un zinātniskā pieredze

Izglītība

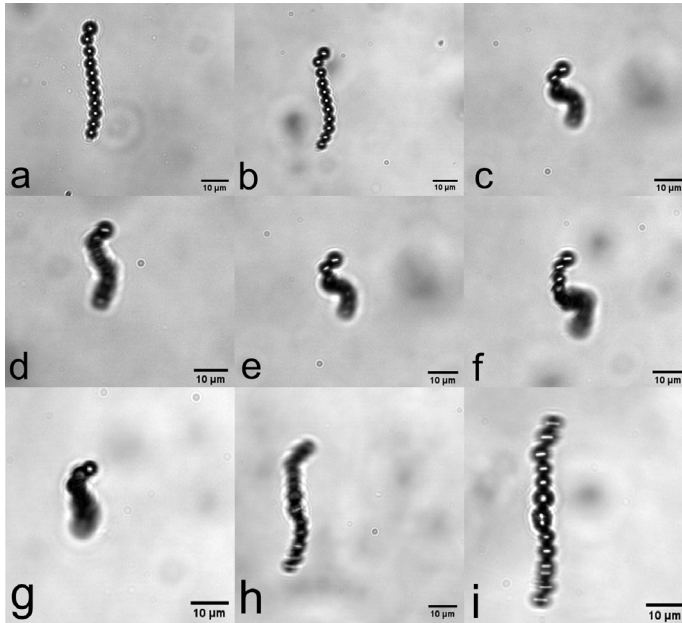
- MSc Fluid Mechanics and Energetics, Grenoble INP, Grenoble, Francija, 2017.
- MSc Thermal Power (Gas turbine technology option), Cranfield University, Kranfilda, Apvienotā Karaliste, 2014.
- BEng Aerospace and Aeronautical Engineering, University of Leeds, Līdsa, Apvienotā Karaliste, 2011.

Zinātniskā pieredze

- Pētniecības vizīte, Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organizations (MPIDS), Getingene, Vācija. 'Investigation of flow field around *Chlamydomonas reinhardtii* in confined spaces'
- Prakse, Institute of Physics of Rennes. Renna, Francija. 'Investigation of the training history on the properties of dense suspensions.'

2 Stīgu dinamika rotējošā laukā

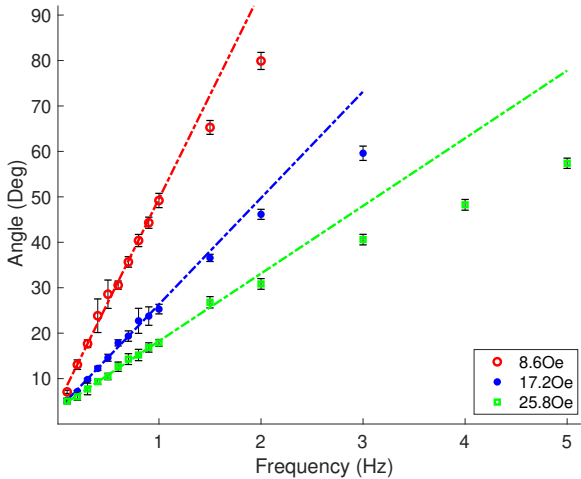
Tika pētīta stīgu uzvedība rotējošā magnētiskā lauka ietekmē. Tika konstatēts, ka stīgai šajā lauka profilā ir divi režīmi, pāreja starp kuriem ir pie raksturīgās kritiskās vērtības f_c : 2D rotāciju plaknē pie zemākām frekvencēm un 3D kustību pie augstākām frekvencēm. Eksperimenti tika veikti, izmantojot stīgas ar atšķirīgiem garumiem L , pie dažādām frekvencēm f un lauka intensitātes H . Novēroto deformēto stīgu formu piemērs parādīts 3. attēlā. Piemēros (a)-(c) redzama deformēto formu atšķirība stīgai ar $L = 41 \mu\text{m}$, palielinot frekvenci pie konstantas lauka intensitātes H .



Att. 3: Rotējošā magnētiskajā laukā deformētu stīgu formas. Stīga ar $L = 41 \mu\text{m}$ pie $H = 17,2 \text{ Oe}$ frekvencēm (a) $f = 1 \text{ Hz}$, (b) $f = 4 \text{ Hz}$, (c) $f = 9 \text{ Hz}$. Stīgas pie $H = 17,2 \text{ Oe}$ un $f = 8 \text{ Hz}$ ar garumu (d) $L = 33 \mu\text{m}$, (e) $L = 41 \mu\text{m}$, (f) $L = 65 \mu\text{m}$. Stīga ar $L = 46 \mu\text{m}$ pie $f = 5 \text{ Hz}$ un magnētiskajiem laukiem (g) $H = 4,3 \text{ Oe}$, (h) $H = 12,9 \text{ Oe}$, (i) $H = 25,8 \text{ Oe}$.

3. attēlā (a) un (b) redzams, ka stīga veic vienmērīgu rotāciju plaknē ar nelielu 'S' veida deformāciju. Savukārt 3. attēlā (c) stīga veic 3D kustību, kas eksperimentāli novērojama, pateicoties neskaidrai stīgas formai, kad iestatot fokusu uz vienu no stīgas galiem, otrs ir izplūdis. Garākiem pavedieniem pie tādas pašas konstantas frekvences virs f_c un tāda pašā lauka intensitātes tiek novērotas lielākas stīgas deformācijas. Tas redzams 3. attēlā (d), (e) un (f), kur attiecīgi $L = 33 \mu\text{m}$, $L = 41 \mu\text{m}$ un $L = 65 \mu\text{m}$. Līdzīgi novērotā forma stīgai ar garumu $L = 46 \mu\text{m}$ ir parādīta 3. attēlā (g)-(i) ar frekvenci $f = 5 \text{ Hz}$, palielinot lauka intensitāti.

Attiecībā uz stīgas rotāciju zem kritiskās frekvences, stīgas dinamiku šeit raksturo, mērot leņķi starp magnētiskā lauka virzienu un pieskares leņķi stīgas centrā ϑ . Leņķis ϑ tika aprēķināts stīgām ar trim dažādiem garumiem L pie dažādām frekvencēm un lauka intensitātes. Iegūtie rezultāti, kas parāda magnētiskā lauka intensitātes izmaiņas ietekmi frekvenču diapazonā (no 0,1 Hz līdz 5 Hz) vienam un tam pašam pavedienam ar

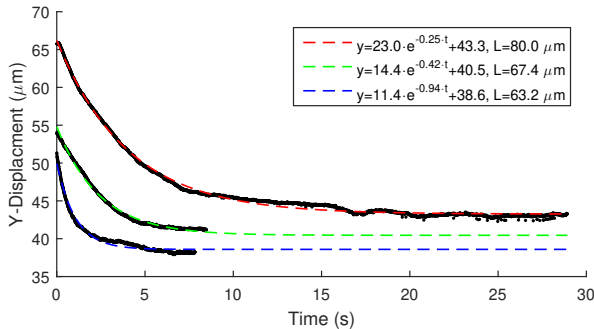


Att. 4: Saistība starp leņķi ϑ un frekvenci f rotējošā magnētiskajā laukā ar dažādu intensitāte $H = 8,6 \text{ Oe}$ (sarkanā krāsā), $H = 17,2 \text{ Oe}$ (zilā krāsā) un $H = 25,8 \text{ Oe}$ (zaļā krāsā) stīgai ar garumu $L = 46,3 \mu\text{m}$.

garumu $L = 46.3 \mu\text{m}$, ir parādīti 4. attēlā. Apli, punkti un kvadrātiņi norāda aprēķinātās ϑ vērtības pie trim magnētiskajiem laukiem, attiecīgi 8,6 Oe, 17,2 Oe un 25,5 Oe. No attēlā redzamajiem rezultātiem redzams, ka, palielinoties magnētiskā lauka intensitātei, samazinās leņķis ϑ . Lai no iegūtajiem eksperimentālajiem rezultātiem aptuveni aprēķinātu pavediena magnetizāciju, izmanto (3) sakarību, kas iegūta teorētiski, ņemot vērā cieta stieņa modeli un kur ζ ir hidrodinamiskais koeficients, tuvināti aprakstāms ar $4\pi\eta$, šķidrums viskozitāte η , tuvināti aprakstāma ar ūdens viskozitāti 0,01 P, un konstante $a \frac{\theta}{f} = a \frac{1}{H}$, kas eksperimentāli noteikta kā 6,8 Oe-s.

$$\vartheta = 0.086 \frac{\omega\tau}{Cm} \quad (3)$$

Stīgas lieces modulis tiek mērīts, reģistrējot stīgas gala pārvietojumu gar y asi laika gaitā pēc rotējošā lauka izslēgšanas. Izmērītais pārvietojums laika gaitā uz y ass ir parādīts 5. attēlā – tika konstatēts, ka trīs dažāda garuma stīgām ir eksponenciāla atkarība. Tika konstatēts, ka pavedienu rimšanas ātrums ir 0,25 s^{-1} , 0,42 s^{-1} un 0,25 s^{-1} attiecīgi pavedieniem ar garumu $L = 80 \mu\text{m}$, 76,4 μm un 63,2 μm . Izmantojot elastīgo mikrošūnu

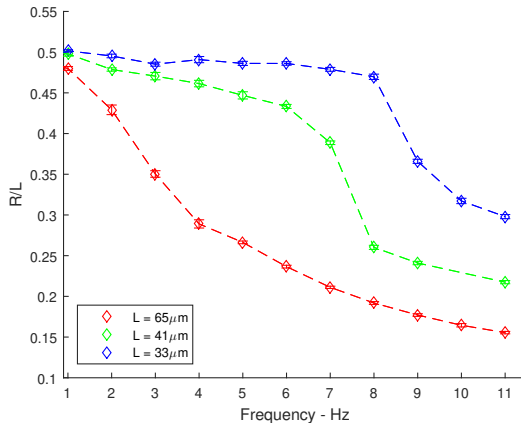


Att. 5: Stīgu relaksācijas raksturlielumi dažādiem pavedienu garumiem L un sākotnējiem rotējošā lauka nosacījumiem: $L = 80,0 \mu\text{m}$, $f = 1,0 \text{ Hz}$ un $H = 8,6 \text{ Oe}$ (sarkanā likne). $L = 63,2 \mu\text{m}$, $f = 1,0 \text{ Hz}$ un $H = 13,7 \text{ Oe}$ (zilā likne). $L = 67,4 \mu\text{m}$, $f = 1,5 \text{ Hz}$ un $H = 8,6 \text{ Oe}$ (zaļā likne).

problēmas risinājumu stienim ar brīviem galiem kā robežnosacījumu (4. piemērs), kā to aprakstījis Viginss (Wiggins u. c. 1998), lieces modulis A_b tiek aprēķināts, izmantojot no eksperimentālajiem datiem iegūto rimšanas ātrumu $1/\tau$, kur aprēķinātā lieces moduļa vērtība ir $A_b = 6,5 \pm 3,4 \cdot 10^{-13}$.

$$\frac{1}{\tau} = 3.93^4 L^{-4} A_b / \zeta \quad (4)$$

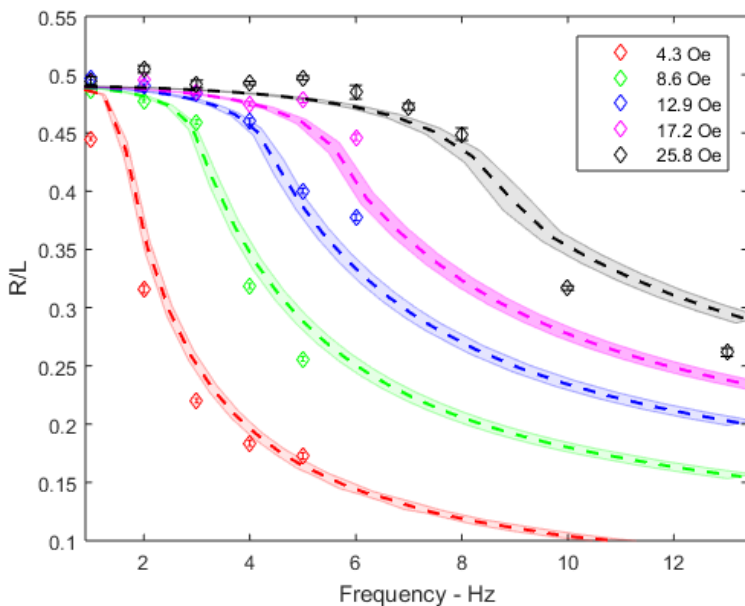
Mēs raksturojam pavedienu deformācijas kā attiecību $\frac{R}{L}$ starp stīgas gala trajektorijas rādiusu R un stīgas garumu L . Iegūtie eksperimentu rezultāti R/L atkarībai no frekvences ir parādīti 6. attēlā trīs dažāda garuma stīgām. Sarkanie, zaļie un zilie rombiņi apzīmē datu punktus $L = 65 \mu\text{m}$, $41 \mu\text{m}$ un $33 \mu\text{m}$, kas izmērīti attiecīgi pie konstantas lauka intensitātes $H = 17,2 \text{ Oe}$. Šī sakarība rāda, ka, palielinoties frekvencei, vispirms nedaudz samazinās R/L , kam seko straujš R/L kritums, kas skaidri redzams $L = 41 \mu\text{m}$ un $33 \mu\text{m}$ datu uzvedībai 6. attēlā. Eksperimentāli tika novērots, ka šī straujā izmaiņa notiek pārejā no 2D planārā režīma uz 3D kustību frekvencēm virs kritiskās frekvences f_c . Tika novērots, ka turpmākai frek-



Att. 6: Eksperimentālie dati par R/L atkarību no frekvences. Dažāda garuma pavedienu deformācija ir mērīta, darbojoties pie lauka intensitātes $H = 17,2 \text{ Oe}$.

vences palielināšanai ir mazāka ietekme uz R/L . Turklāt tika konstatēts, ka garākiem pavedieniem ir zemākas kritiskās frekvences f_c vērtības.

No iegūtajiem rezultātiem redzams, ka elastīgās ķēdes, ko veido saistītas feromagnētiskās daļiņas, 2D rotējošā magnētiskā lauka iedarbībā rotē sinhroni ar magnētisko lauku tā rotācijas plaknē vai pāriet uz 3D kustību. Šī pāreja uz 3D rotējošu kustību tika iepriekš skaitliski prognozēta magnētiskām daļiņām rotējošā laukā (Cīmurs un Cēbers 2013) un eksperimentāli realizēta nesen veiktā pētījumā par nanostieņiem, kas izgatavoti no feromagnētiska materiāla (Palkar u. c. 2019). Turklāt to uzvedība atšķiras no ķēdēm, kas veidotas, savienojot paramagnētiskās daļiņas, kurās notiek kustības rotācijas turp un atpakaļ pa plakni pie frekvencēm virs kritiskajām (Frka-Petesic u. c. 2011). Skaitliskās simulācijas tika veiktas, izmantojot 1. nodaļā izklāstīto modeli, pievienojot nelielas perturbācijas, ko sistēma var piedzīvot. Iegūtie rezultāti par R/L atkarību no frekvences, salīdzinot ar eksperimentālajiem datiem, liecina par labu sakritību, kā parādīts 7. attēlā, pavedienam ar $L = 46 \mu\text{m}$, kas darbojas pie dažāda lauka intensitātes H .



Att. 7: Eksperimenta un skaitlisko rezultātu salīdzinājums, izmantojot R/L atkarību no frekvences. Krāsainie rombiņi apzīmē eksperimentālos datus pavedienam ar $L = 46 \mu\text{m}$, kas darbojas pie dažāda lauka intensitātes H . Ar pārtraucamajām līnijām attēlotas skaitliskās simulācijas. Ēnotais laukums attēlo kļūdas robežas, kas iegūtas aproksimācijas rezultātā.

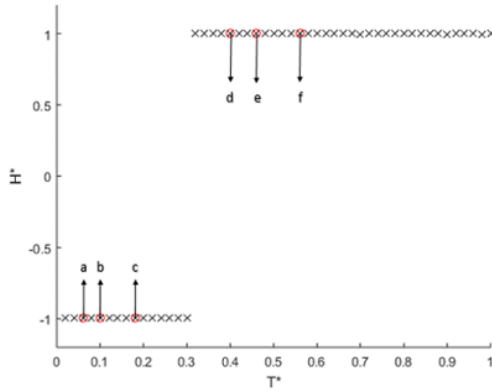
3 Stīgu dinamika impulsa lauka ietekmē

Viena no svarīgām feromagnētisko stīgu īpašībām ir nestabilitāte, ko izsauc magnētiskā lauka inversija attiecībā pret tā magnetizāciju, kas izraisa vai nu 'S', vai 'U' veida stīgas deformāciju. Pēdējās minētās deformācijas gadījumā eksperimentāli ir novērota objekta pašdzenoša kustība, ja tiek pielietots impulsa magnētiskā lauka profils ar 30% darba ciklu. Deformēto pavedienu formu piemērs ar tiem atbilstošo magnētiskā lauka virzienu ir parādīts 8. attēlā. Magnētiskā lauka rādījumi 8. attēlā (A) H^* ir normalizēti ar maksimālo lauka intensitātes vērtību, savukārt laiks t ir normalizēts ar impulsa magnētiskā lauka periodu T . Kā parādīts 8. attēlā (B)(a-c), stīga izliecas U formā perioda 30% laikā, kam seko relaksācijas posms, kā parādīts 8. attēla (B)(d-f). Vietā, kas parādīta 8. attēlā (B)(f), pavediens relaksējas un iztaisnojas magnētiskā lauka virzienā. Tika konstatēts, ka peldēšanas virziens ir perpendikulārs magnētiskajam laukam y virzienā. Tomēr tika novērotas arī nobīdes x virzienā, kas, iespējams, varētu būt stīgas "roku" garuma atšķirību rezultāts, jo vai nu daļiņu skaits vai izmēri abās 'U' formas pusēs nav vienādi, vai arī daļiņu savienojošo DNS fragmentu skaita atšķirību dēļ.

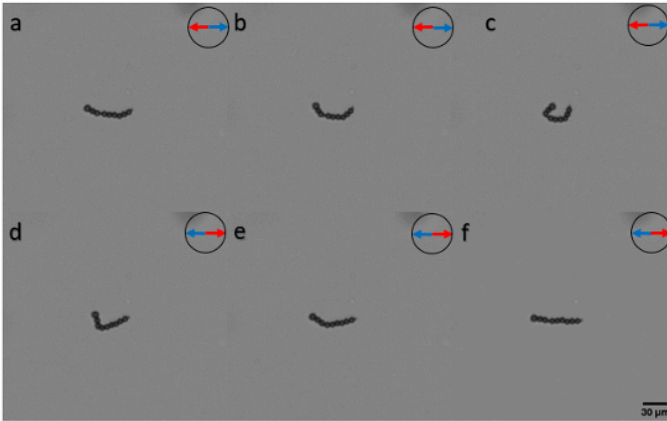
Peldēšanas īpašības tiek raksturotas, aprēķinot ātrumu perpendikulāri lauka virzienam. Vispirms reģistrē masas centra koordinātu y virzienā laika gaitā, kā parādīts 9. attēlā (a). Pēc tam ātrumi tiek aprēķināti, izmantojot lineāro atbilstību (attēlots ar pārtrauktu sarkanu līniju 9. attēlā (a)). Iegūtie ātrumi frekvenču diapazonā stīgām ar dažādu garumu L parādīti 9. attēlā (b), proti, $L = 48 \mu\text{m}$ (sarkanā krāsā), $59 \mu\text{m}$ (zilā krāsā) un $70 \mu\text{m}$ (melnā krāsā). No iegūtajiem rezultātiem 9. attēlā (b) redzams, ka $L = 48 \mu\text{m}$ un $59 \mu\text{m}$ gadījumā ātrumi sasniedz maksimumu un pēc tam, pieaugot frekvencei, samazinās. Maksimālā ātruma vērtība netika novērota pavedienam ar $L = 70 \mu\text{m}$, jo, pavediena galiem savienojoties, veidojas gredzenveida forma.

Skaitliskās simulācijas rezultāti tika iegūti, izmantojot to pašu modeli, kas parādīts 1. nodaļā, ņemot vērā starpību starp perpendikulārās ζ_{\perp} un paralēlās ζ_{\parallel} hidrodinamiskās pretestības koeficientiem. Pretestības koefi-

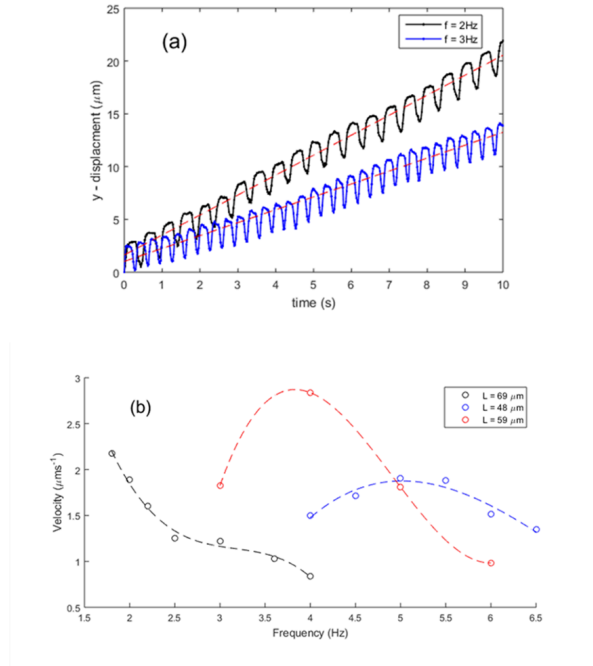
(A)



(B)



Att. 8: (A) Magnētiskā lauka mērījumi atkarībā no laika vienā periodā, kur $H^* = H/H_{\max}$ un $T^* = t/T$. Sarkanie apli parāda rādījumus, kas atbilst attēliem (a-f)(B). (B) Piemērs stīgas 'U' deformācijām magnētiskā laukā ar 30% darba cikla impulsu viļņu profilu dažādās vietās viena perioda laikā stīgai ar garumu $L = 60 \mu\text{m}$, lauka frekvenci $f = 2 \text{ Hz}$ un lauka intensitāti $H = 5,2 \text{ Oe}$.

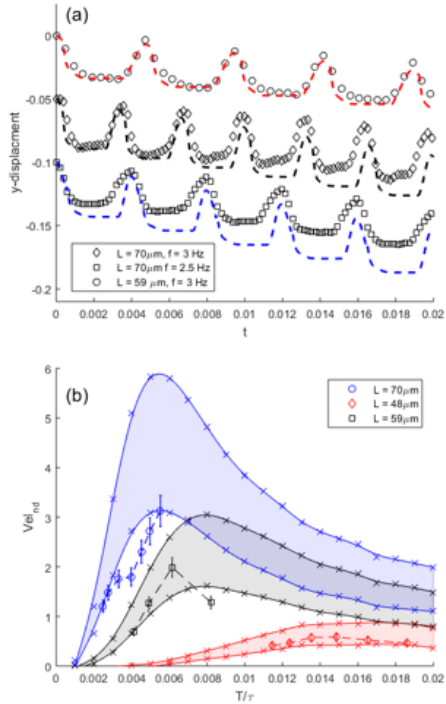


Att. 9: (a) Stīgas masas centra y nobīde kā laika funkcija pavedienam ar garumu $L = 70 \mu\text{m}$ un frekvencēm $f = 2$ Hz (melnā līnija) un $f = 3$ Hz (zilā līnija) pie fiksētas lauka intensitātes $H = 5,2$ Oe. (b) Ātrums kā lauka frekvences funkcija pavedieniem ar garumu $L = 48 \mu\text{m}$ (sarkanā krāsā), $59 \mu\text{m}$ (zilā krāsā) un $70 \mu\text{m}$ (melnā krāsā) pie fiksētas lauka intensitātes $H = 5,2$ Oe.

cienta attiecību definē kā λ , kur $\lambda = -(\zeta_{\perp}/\zeta_{\parallel} - 1)$. Turklāt modelim tiek pievienots nosacījums, lai izvairītos no tā, ka pavediens pirms katra lieces posma sākuma pilnībā relaksējas un vienmēr ir nedaudz izliekts. Ja sākotnējās izliektās formas nosacījums netiktu piemērots, 'U' formas deformāciju nevarētu panākt un pavediens deformētos 'S' veida formā, kā rezultātā nebūtu pašdzenošās kustības. Parasti eksperimentāli tika novērots neliels defekts, kas rada nedaudz izliektu formu un apstiprina izvēlēto nosacījuma pareizību.

Eksperimentāli iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar skaitliskajām simulācijām, kā parādīts 10. attēlā. Šī attēlā (a) daļā redzamas eksperimentāli iegūtās pavediena masas centra y nobīdes, kas mērogtas ar pavediena garumu L , ir salīdzinātas ar skaitliski iegūtajiem rezultātiem trim datu kopām - $L = 70 \mu\text{m}$ & $f = 3 \text{ Hz}$ (rombi), $L = 70 \mu\text{m}$ & $f = 2.5 \text{ Hz}$ (kvadrāti) un $L = 59 \mu\text{m}$ & $f = 3 \text{ Hz}$ (aplī). Skaitliskās modelēšanas rezultāti tika iegūti, aprēķinot mediānu, kas iegūta no stīgu konfigurācijām. Tas atbilst eksperimentāli iegūtajām vērtībām, attiecīgi $Cm = 70$, $T/\tau = 0,0039$ (melns), $Cm = 70$, $T/\tau = 0,031$ (zils) un $Cm = 50$, $T/\tau = 0,0047$ (sarkans). Līdzīgi kā eksperimentālo datu apstrādē, ar skaitlisko modelēšanu iegūtos ātrumus aprēķina, izmantojot lineāro atbilstību laika gaitas nobīdēs no y , un rezultātus salīdzina stīgām ar trim dažādiem garumiem, kā parādīts 10. attēlā (b). Eksperimentālā ātruma datu punkti, kā parādīts 10. attēlā (b), iepriekš tika parādīti 9. attēlā (b), kur tie ir mērogoti ar L/τ uz y ass un τ uz x ass, ar pavedienu garumu $L = 70 \mu\text{m}$ (aplī), $L = 59 \mu\text{m}$ (kvadrāts) un $L = 48 \mu\text{m}$ (rombs). Tas skaitliskajā simulācijā atbilst attiecīgi $Cm = 70$ (zilā krāsā), $Cm = 50$ (melnā krāsā) un $Cm = 30$ (sarkanā krāsā). Augšējā un apakšējā robeža atbalsta simulācijas rezultātus, kas iegūti, definējot attiecīgi $\lambda = -0,4$ un $\lambda = -0,2$.

Iepriekš pieejamie pētījumi par mikroskopisko peldētāju peldēšanas nosacījumu izpēti tika veikti, izmantojot paramagnētisko daļiņu ķēdes. Piemēram, kā aprakstīja Ido, Lī un Dreifuss (Ido u. c. 2016; Li u. c. 2013; Dreyfus u. c. 2005). Atšķirībā no paramagnētiska materiāla veidotām ķēdēm, kuru magnetizācija ir nulle, kad lauks ir izslēgts, spontāni magnetizētas stīgas, invertējot magnētisko lauku, saliecas, līdzīgi kā Eilera nestabilitātes gadījumā, kad stienis pakļauts saspiešanai (Pilyugina u. c. 2017). Šo izlieces nestabilitāti eksperimentāli realizēja Ērglis u. c. 2010, kā rezultātā veidojas cilpa, stīgai pārvietojoties trešajā dimensijā, lai izlīdzinātos ar lauku. Skaitliski šādu peldētāja konstrukciju pirmie ierosināja Belovs un Čēbers 2009, parādot, ka stīga var virzīties ar periodisku lauka inversijas profilu, laužot laika apgriešanas simetriju, kas rodas no lieces un relak-



Att. 10: Stīgas masas centra y nobīdes kā laika funkcija t . Apļa, rombveida un kvadrātveida punkti apzīmē eksperimentālos datus. Pārvietojums ir mērogots ar stīgas garumu L uz y ass un ar $\tau = 54$ s (rombs un kvadrāts) un 42 s (aplis) uz x ass. Ar pārtrauktām līnijām attēlota eksperimentam atbilstošā pavediena centra skaitliskā dinamika - $Cm = 70$, $T/\tau = 0,0039$ (melna), $Cm = 70$, $T/\tau = 0,031$ (zila) un $Cm = 50$, $T/\tau = 0,0047$ (sarkana). (b) Izkliedes punkti parāda ātrumu kā frekvences funkciju pavedieniem ar garumu $L = 48 \mu\text{m}$ (rombs), $59 \mu\text{m}$ (aplis) un $70 \mu\text{m}$ (kvadrāts), kas mērogots ar L/τ uz y ass un τ uz x ass, darbojoties pie dažādām frekvencēm un fiksētas lauka intensitātes $H = 5,2$ Oe. Nepārtrauktās līnijas attēlo skaitlisko simulāciju T/τ diapazonā $Cm = 70$ (zilā krāsā), $Cm = 50$ (melnā krāsā) un $Cm = 30$ (sarkanā krāsā). Krāsainās reģionu robežas atbilst simulācijām, definējot nedaudz atšķirīgu $\lambda = -0,2$ un $-0,4$ attiecīgi apakšējai un augšējai līnijai.

sācijas posmu atšķirības. Mēs varam salīdzināt peldēšanas veikspēju, izmantojot maksimālo sasniegto ātrumu, ar citiem literatūrā aprakstītajiem gadījumiem. Piemēram, tika izmērīti $18 \mu\text{ms}^{-1}$, $L = 38 \mu\text{m}$, $f = 30 \text{ Hz}$ cietam spirālveida astes peldētājam ar pievienotu magnētisko lodīšu galviņu, ko virza rotējošs lauka profils (Zhang u. c. 2009). Elastīga propellera konstrukcija, ko darbina rotējošs lauka profils ar konstantu perpendikulāru lauku, deva $21 \mu\text{ms}^{-1}$, $L = 5,8 \mu\text{m}$, $f = 21 \text{ Hz}$, kā parādīja Paks (Pak u. c. 2011). Šeit iegūtais maksimālais ātrums ir $\approx 3 \mu\text{ms}^{-1}$, kas ir mazāks nekā citos literatūrā aprakstītajos mikropeldētāju piemēros. Tomēr peldēšanas ātrumu var optimizēt, modificējot magnētiskā lauka profilu, lai samazinātu pilnīgas relaksācijas laiku pirms lieces posma. Tas redzams 8. attēlā (A), kas atbilst $\approx T^* = 0,67...1$.

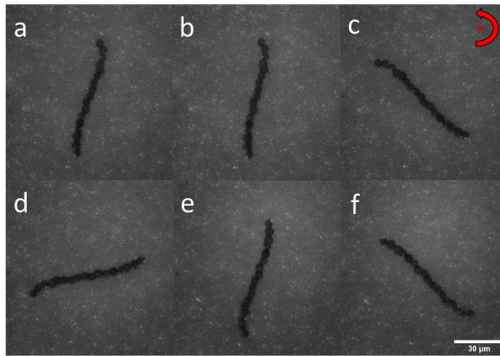
Svarīgs aspekts ir darba cikla izvēle, lai stīgai būtu pietiekami daudz laika U veida deformācijas attīstībai, bet ne pietiekami daudz laika S veida nelineārās nestabilitātes attīstībai. Šī izvēle tika izdarīta, pamatojoties uz eksperimentāliem novērojumiem, lai paraugā kopumā būtu vairāk peldošo stīgu. Sākotnēji, kad eksperimenti tika veikti pirmo reizi, darba cikls tika noteikts 70 %, un tika konstatēts, ka izlieces nestabilitāte rodas perioda garākajā daļā. Tomēr šajā gadījumā tika konstatēts, ka stīga galu galā apgriežas un maina magnetizācijas virzienu, lai izlīdzinātos ar magnētiskā lauka virzienu ilgākā stabilā perioda daļā. Eksperimentos tika izmēģināti dažādi darba cikli. Piemēram, pie 50% kvadrātprofila tika konstatēts, ka stīgas centrālā daļa orientējas perpendikulāri magnētiskajam laukam, bet gali cenšas sekot magnētiskā lauka virzienam pretējā virzienā, tādējādi 2D un 3D kustībās veidojot S veida formu. Peldēšanas pārtraukšana un pāreja uz S veida deformācijām tika novērota arī skaitliskās modelēšanas rezultātos, definējot sinusoidālu inversijas profilu (Ērglis u. c. 2011).

Salīdzinot eksperimentālos un skaitliskos rezultātus, ir konstatēta laba sakritība, kā parādīts 10. attēlā (b) attiecībā uz trīs dažādu garumu

stīgu ātrumiem frekvenču diapazonā. Tomēr atšķirības var rasties stīgu fizikālo īpašību atšķirību dēļ, piemēram, attiecībā uz lieces moduli A_b , ko izraisa nevienāds saišu skaits starp daļiņām vai nevienāds attālums starp blakus esošajām daļiņām. Turklāt no skaitliskās modelēšanas rezultātiem tika konstatēts, ka hidrodinamiskās pretestības koeficienta attiecība $\zeta_{\perp}/\zeta_{\parallel}$ diapazonā 1, 2...1, 4 vislabāk atbilst eksperimentālajiem ātrumiem, kas atšķiras no bezgalīgi gara stienim atbilstošās vērtības 2 .

4 Lokālās plūsmas mērījumi

Šeit mēs aprakstām ātruma mērījumus ap stīgām rotējoša magnētiskā lauka ietekmē. Mērījumi veikti ar PIV metodi, izmantojot sadaļā 1.3 aprakstīto eksperimentālo iekārtu. Iegūto attēlu piemēri stīgai ar garumu $L = 73 \mu\text{m}$ rotējošā laukā ar intensitāti $H = 34,4 \text{ Oe}$ un $f = 1 \text{ Hz}$ ir parādīti 11. attēla. Kadru uzņemšanas ātrums FR ir noteikts 6 Hz, un starplaiks starp pirmo un otro ekspozīciju, kas parādītas attiecīgi (a) un (b) attēlā, ir 15 ms. 11. attēlā (a), (c)-(f) parādīts pirmais eksponētais kadrs dažādās vietās perioda laikā.



Att. 11: Iegūto attēlu piemēri vietējiem plūsmas mērījumiem. Stīga rotējošā magnētiskajā laukā ar intensitāti $H = 34,4 \text{ Oe}$, frekvenci $f = 1 \text{ Hz}$ un $L = 73 \mu\text{m}$. (a) un (b) ir pirmais un otrais kadrs, kas iegūti divkārtšas ekspozīcijas režīmā ar starpkadru laiku 15 ms. (a), (c)-(f) attēlo pirmo kadru, kas iegūts dažādās vietās viena perioda laikā ar kadru ātrumu 6 Hz.

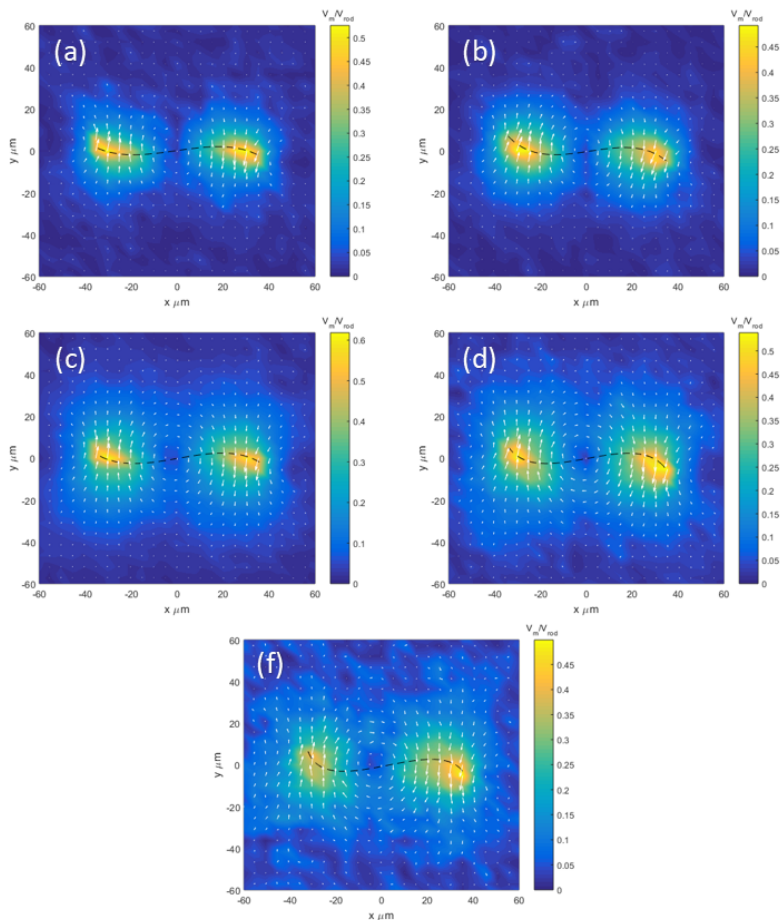
Izmantojot PIVlab rīku, vispirms, izmantojot dubultās ekspozīcijas režīmu, tiek iegūts ātruma lauks dažādās perioda vietās. Tam izmantota *MatLab* papildpakete, ko izmanto starpkorelācijas aprēķiniem un PIV analīzei un ko izstrādājis Tīliks un Stamhuss (Thielicke un Stamhuis 2014). Lai iegūtu vidējos ātruma laukus vienā vietā (atskaites rāmis, kas izvēlēts patvaļīgi, šajā gadījumā pamatojoties uz pavediena pieskares leņķi centrā), ātruma laukus vispirms pārvieta, pamatojoties uz stīgas centra punkta kustībām, un pēc tam pagriež par leņķa starpību starp pavediena pieskari

centra punktā un atskaites punktu. Pēc tam iegūtie rezultāti tiek vidējoti atskaites rāmja koordinātās, pēc tam aprēķinot plūsmas raksturlielumus, piemēram, ātruma lielumus un virpuļainību. Eksperimenti tika veikti ar trīs dažāda garuma stīgām L , ar fiksētu lauka intensitāti $H = 34,4$ Oe un frekvenču diapazonā $f = 1 \rightarrow 5$ Hz. Ātruma lauku piemērs un to lielums, kas normalizēts ar aprēķināto rotējošā stieņa ātrumu (v_{rod}), kur (v_{rod}) ir teorētiski aprēķinātais maksimālais rotējošā stieņa ātrums, ir parādīts 12. attēlā pavedienam ar $L = 73 \mu\text{m}$ un frekvencēm $f = 1 \rightarrow 5$ Hz (a-e).

Kā parādīts 12. attēlā, palielinot frekvenci, palielināsies stīgas nelielas S veida deformācijas un ātruma lielums. Turklāt ir novērots, ka maksimālais ātruma lielums atrodas pavedienu galu tuvumā. Nelielas izmaiņas maksimālajos ātrumos tika konstatētas, salīdzinot lielumu pie stīgu galiem, kas, iespējams, ir nesimetriskas rotācijas rezultāts. Plūsmas profils, kas iegūts ātruma lielumam v_m gar stīgas centra līniju (f_L), ir parādīts 13. attēlā, stīgai ar garumu $L = 73 \mu\text{m}$, $H = 34.4$ Oe and $f = 1 \rightarrow 3$ Hz for (a \rightarrow c). Konstatēts, ka maksimālie ātrumi atrodas pavediena liektās daļas vidū, tuvu galam. Pēc tam ātrumi lineāri samazinās, līdz rotācijas centrā sasniedz nulli. Aiz maksimālā ātruma virzienā uz stīgu ātruma samazināšanās arī bija lineāra. Šim plūsmas profilam bija līdzīga uzvedība dažādās frekvencēs, kā parādīts 13. attēlā (a-c), stīgai ar novērojamu S veida deformāciju.

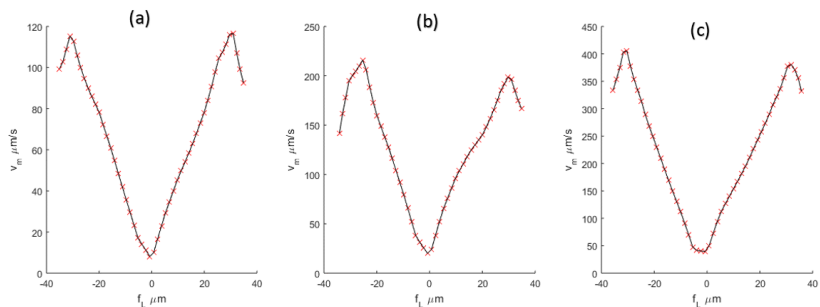
Tālā lauka ātrumi kļūst svarīgi, ņemtot vērā stīgu mijiedarbību ar citiem pavedieniem vai citām cietajām robežām. Tālā lauka ātrumus šeit raksturo telpiskā ātruma samazināšanās kā funkcija attālumā R prom no stīgas. Šeit y komponentes ātrumu v nolasa pa x asi no stīgas maksimālā ātruma pie stīgas gala (x_t). Pēc tam punktus pielāgo ar $v = \frac{a}{(R-x_t)^n}$, izmantojot $n = 1, 2, 3$. Rezultāti, kas iegūti stīgai ar garumu $L = 73 \mu\text{m}$ pie lauka intensitātes $H = 34,4$ Oe, ir parādīti 14. attēlā, darbojoties pie dažādām frekvencēm. Iegūtie rezultāti kvalitatīvi parāda, ka vislabākā atbilstība ir iegūta, kad šķidruma ātrums samazinās kā $1/R^2$ funkcija (parādīts ar zaļām līnijām), ko var aprakstīt kā plūsmas singularitāti, ko rada spēku dipols.

Skaitliskā modelēšana tika veikta, izmantojot regularizēto Stokslētu

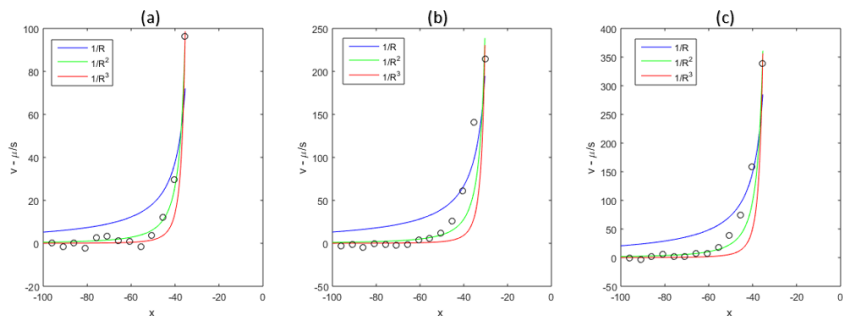


Att. 12: Ātruma lauks, kas iegūts pavedienam ar garumu $L = 73 \mu\text{m}$, lauka intensitāti $H = 34,4 \text{ Oe}$ un frekvenci f : (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 3 Hz, (d) 4 Hz un (e) 5 Hz.

metodi ar regularizācijas parametru $\delta = r/L$, kas definēts kā daļiņu rādiusa attiecība pret stīgas garumu. Salīdzinot eksperimentālos un skaitliskos rezultātus, tika konstatēts, ka to uzvedība kvalitatīvi labi sakrīt. Vienlaikus tika pamanīts, ka skaitliski iegūtajiem rezultātiem ātruma lielums ir aptuveni par vienu kārtu lielāks. Turpmāka izmantotās skaitliskās meto-



Att. 13: Ātruma v_m plūsmas profils gar stīgas f_L centra līniju ar garumu $L = 73 \mu\text{m}$, frekvenci f : (a) = 1 Hz, (b) = 2 Hz un (c) = 3 Hz lauka intensitāti $H = 34,4 \text{ Oe}$.



Att. 14: Šķidruma ātrums (v) pa x asi no pavediena gala virzienā no stīgas, melnie apli ir nolasīti no eksperimentālajiem datiem. Līnijās parādīta labākā atbilstība, kas iegūta pie dažādām R pakāpēm, stīgai ar $L = 73 \mu\text{m}$ pie lauka intensitātes $H = 34,4 \text{ Oe}$ un frekvences (a-c) attiecīgi 1...3 Hz.

des izpēte vai kvantitatīvs salīdzinājums ar eksperimentālajiem rezultātiem nav šī darba mērķis, bet šo virzienu var piedāvāt kā turpmāku pētniecības tematiku. Turklāt, risinot ar regularizētā Stoksleta metodi, tiek ieviests regularizācijas parametrs δ , kas šeit tiek pieņemts par daļiņu diametra un stīgas garuma attiecību. Modelēšanu var veikt plašākam δ diapazonam, lai izpētītu plūsmas uzvedības atšķirības un tās piemērojāmību šajā sistēmā. Ātruma atšķirību var izskaidrot ar lielāku δ vērtību, kas samazina

rezultātu precizitāti (Zhao u. c. 2019). Vai arī kā mijiedarbības ar sienām rezultāts, kas modelī nav ņemta vērā.

Tika konstatēts, ka maksimālā ātruma lielums ir aptuveni puse no sagaidāmā ātruma rotējošam stingram stienim, pieņemot, ka bezslīdes robežnosacījums, jo ātrums pie stīgas robežas ir vienāds ar šķidruma ātrumu. Šajā eksperimentālajā darbā ir sagaidāms mazāks izmērītais maksimālais ātrums salīdzinājumā ar stingrā stieņa gadījumu, jo maksimālais ātrums neatrodas pavediena galā. Turklāt, tā kā no marķierdaļiņu pozīciju datiem aprēķinātie ātrumi neatrodas uz stīgas, bet gan tuvu ap to, un šķidruma ātrumi samazinās kā $1/R^2$, sagaidāms mazāks maksimālais ātrums. Jāatzīmē, ka eksperimentāli tika novērots, ka, palielinot frekvenci, stīga rotē lielākā attālumā no apakšējās virsmas. Varētu pieņemt, ka šo efektu izraisa mijiedarbības ar šo sienu.

5 Kopsavilkums un secinājumi

Promocijas darba autors ir centies eksperimentāli izpētīt no feromagnētiskām daļiņām veidotu stīgu dinamiku. Darbā izklāstītā darba nozīmi var apkopot šādos **secinājumos**:

- Ir konstatēts, ka rotējoša lauka ietekmē feromagnētiskās stīgas atrodas divos režīmos: pie zemākas frekvences stīga rotē sinhroni ar rotējošo lauku un paliek tā plaknē, savukārt pie augstākas frekvences stīga pārvietojas ārpus rotējošās plaknes trešajā dimensijā ar apļveida pretfāzes galu trajektoriju.
- Ir novērots, ka periodiskas magnētiskā lauka inversijas iedarbībā, stīga pārvietojas virzienā, kas ir perpendikulārs lauka virzienam. Tomēr, lai panāktu pašdzenošu kustību, ir nepieciešama sākotnējās stīgas konfigurācija un īpašs lauka profils.
- Mikroplūsmas mērījumus ap stīgām var izmērīt ar mikrodaļiņu attēlu ātrumu lauku mērīšanas metodi, un tie kvalitatīvi atbilst skaitliskās modelēšanas rezultātiem.

5.1 Tēze

Iegūtie rezultāti pamato sekojošu **tēzi**: elastīgi feromagnētiskie pavedieni var būt noderīgi mīkstās mikrorobotikas plānošanā un izstrādē. Pielietojumi ir paredzami biomedicīnā un biotehnoloģijās.

Literatūras saraksts

- Ahmed, Daniel, Cornel Dillinger, Ayoung Hong un Bradley J. Nelson (2017). “Artificial Acousto-Magnetic Soft Microswimmers”. *Advanced Materials Technologies* 2.7, 1700050. lpp. DOI: 10.1002/admt.201700050.
- Barreto, Darius Diogo, Shashank Saxena un Ajeet Kumar (2022). “A magnetoelastic theory for Kirchhoff rods having uniformly distributed paramagnetic inclusions and its buckling”. *International Journal of Solids and Structures* 234-235, 111147. lpp. DOI: j.ijssolstr.2021.111147.
- Belovs, M. un A. Cēbers (2009). “Ferromagnetic microswimmer”. *Phys. Rev. E* 79 (5), 51503. lpp. DOI: 10.1103/PhysRevE.79.051503.
- Biswal, Sibani Lisa un Alice P. Gast (2004). “Micromixing with Linked Chains of Paramagnetic Particles”. *Analytical Chemistry* 76.21, 6448.—6455. lpp. DOI: 10.1021/ac0494580.
- Brasovs, Artis, Jānis Cīmurs, Kaspars Ērglis, Andris Zeltins, Jean-Francois Berret un Andrejs Cēbers (2015). “Magnetic microrods as a tool for microrheology”. *Soft Matter* 11 (13), 2563.—2569. lpp. DOI: 10.1039/C4SM02454K.
- Cēbers, Andrejs (2003). “Dynamics of a chain of magnetic particles connected with elastic linkers”. 15.15, 1335.—1344. lpp. DOI: 10.1088/0953-8984/15/15/303.
- Chen, Xueye un Lei Zhang (2017). “A review on micromixers actuated with magnetic nanomaterials”. *Microchimica Acta* 184, 1.—11. lpp. DOI: 10.1007/s00604-017-2462-2.
- Cīmurs, J. un A. Cēbers (2013). “Three-dimensional dynamics of a particle with a finite energy of magnetic anisotropy in a rotating magnetic field”. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* 88, 62315. lpp. DOI: 10.1103/PhysRevE.88.062315.
- Drew, Owen, Ballard Matthew, Alexeev Alexander un J. Hesketh Peter (2016). “Rapid microfluidic mixing via rotating magnetic microbeads”. *Sensors and Actuators A: Physical* 251, 84.—91. lpp. DOI: 10.1016/j.sna.2016.09.040.

- Dreyfus, Rémi, Jean Baudry, Marcus L. Roper, Marc Fermigier, Howard A. Stone un Jérôme Bibette (2005). “Microscopic artificial swimmers”. *Nature* 437.7060, 862.—865. lpp. DOI: 10.1038/nature04090.
- Ērglis, K., R. Livanovičs un A. Cēbers (2011). “Three dimensional dynamics of ferromagnetic swimmer”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 323.10, 1278.—1282. lpp. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.11.021.
- Ērglis, Kaspars (2010). “Experimental study of properties and motion of flexible magnetic microfilaments”. *PhD Thesis, University of Latvia*. URL: <https://mml1.lu.lv/publications>.
- Ērglis, Kaspars, Rūdolfs Livanovičs un Andrejs Cēbers (2010). “Three dimensional instability of flexible ferromagnetic filament loop”. *Magneto-hydrodynamics* 46, 245.—256. lpp.
- Frka-Petescic, B., K. Erglis, J.F. Berret, A. Cēbers, V. Dupuis, J. Fresnais, O. Sandre un R. Perzynski (2011). “Dynamics of paramagnetic nanostructured rods under rotating field”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 323.10, 1309.—1313. lpp. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.11.036.
- Goubault, C., P. Jop, M. Fermigier, J. Baudry, E. Bertrand un J. Bibette (2003). “Flexible Magnetic Filaments as Micromechanical Sensors”. *Phys. Rev. Lett.* 91 (26), 260802. lpp. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.260802.
- Ido, Yasushi, Yan-Hom Li, Hiroaki Tsutsumi, Hirotaka Sumiyoshi un Ching-Yao Chen (2016). “Magnetic microchains and microswimmers in an oscillating magnetic field”. *Biomicrofluidics* 10.1, 11902. lpp. DOI: 10.1063/1.4939945.
- Koleoso, M., X. Feng, Y. Xue, Q. Li, T. Munshi un X. Chen (2020). “Micro/Nanoscale Magnetic Robots for Biomedical Applications”. *Materials Today Bio* 8, 100085. lpp. DOI: 10.1016/j.mtbio.2020.100085.
- Kuei, Steve, Burke Garza un Sibani Lisa Biswal (2017). “From strings to coils: Rotational dynamics of DNA-linked colloidal chains”. *Phys. Rev. Fluids* 2 (10), 104102. lpp. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.104102.

- Li, Yan-Hom, He-Ching Lin un Ching-Yao Chen (2013). “Steering of Magnetic Micro-Swimmers”. *IEEE Transactions on Magnetics* 49.7, 4120.—4123. lpp. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2241028.
- Nguyen, Kim Tien u. c. (2021). “A Magnetically Guided Self-Rolled Micro-robot for Targeted Drug Delivery, Real-Time X-Ray Imaging, and Microrobot Retrieval”. *Advanced Healthcare Materials* 10.6, 2001681. lpp. DOI: 10.1002/adhm.202001681.
- Pak, On Shun, Wei Gao, Joseph Wang un Eric Lauga (2011). “High-speed propulsion of flexible nanowire motors: Theory and experiments”. *Soft Matter* 7 (18), 8169.—8181. lpp. DOI: 10.1039/C1SM05503H.
- Palkar, Vaibhav, Pavel Aprelev, Arthur Salamatin, Artis Brasovs, Olga Kuksenok un Konstantin G. Kornev (2019). “Rotating magnetic nanorods detect minute fluctuations of magnetic field”. *Phys. Rev. E* 100 (5), 51101. lpp. DOI: 10.1103/PhysRevE.100.051101.
- Pilyugina, Ekaterina, Brad Krajina, Andrew J. Spakowitz un Jay D. Schieber (2017). “Buckling a Semiflexible Polymer Chain under Compression”. *Polymers* 9.3, 99. lpp. DOI: 10.3390/polym9030099.
- Purcell, E. M. (1977). “Life at low Reynolds number”. *American Journal of Physics* 45.1, 3.—11. lpp. DOI: 10.1119/1.10903.
- Shanko, Eriola-Sophia, Yoeri van de Burgt, Patrick D. Anderson un Jaap M. J. den Toonder (2019). “Microfluidic Magnetic Mixing at Low Reynolds Numbers and in Stagnant Fluids”. *Micromachines* 10.11, 731. lpp. DOI: 10.3390/mi10110731.
- Spatafora-Salazar, Aldo, Dana M. Lobmeyer, Lucas H. P. Cunha, Kedar Joshi un Sibani Lisa Biswal (2021). “Hierarchical assemblies of superparamagnetic colloids in time-varying magnetic fields”. *Soft Matter* 17 (5), 1120.—1155. lpp. DOI: 10.1039/D0SM01878C.
- Taylor, G.I. (1967). “Low Reynolds Number Flows”. *Educational Services Incorporated. Distributor: Encyclopaedia Britannica Educational Corporation, Chicago, Illinois*.
- Thielicke, William un E J Stamhuis (2014). “PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in

- MATLAB”. *Journal of Open Research Software* 2, e30. DOI: 10.5334/jors.bl.
- Wiggins, Chris H, Daniel Riveline, Albrecht Ott un Raymond E. Goldstein (1998). “Trapping and wiggling: elasto-hydrodynamics of driven micro-filaments.” *Biophysical journal* 74 2 Pt 1, 1043.—60. lpp. DOI: 10.1016/S0006-3495(98)74029-9.
- Zhang, Li, Jake J. Abbott, Lixin Dong, Kathrin Eva Peyer, Bradley Kratochvil, Haixin Zhang, Christos Bergeles un Bradley J. Nelson (2009). “Characterizing the swimming properties of artificial bacterial flagella”. *Nano letters* 9 10, 3663.—3667. lpp. DOI: 10.1021/nl901869j.
- Zhao, Boan, Eric Lauga un Lyndon Koens (2019). “Method of regularized stokeslets: Flow analysis and improvement of convergence”. *Phys. Rev. Fluids* 4 (8), 84104. lpp. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.4.084104.

