

Magnetofoforeza na ferri- i ferrromagnetykach na bazie Co

Magnetoforeza na ferri- i ferrromagnetykach na bazie Co

Maciej Urbaniak

Daniel Kiphart

Michał Matczak

Feliks Stobiecki

Gabriel David Chaves-

O'Flynn

Piotr Kuświk

- Motywacja
- Wpływ bombardowania jonami Ga^+ na cienkie warstwy Co/Tb
- Magnetoforeza na strukturyzowanych warstwach Co/Tb
- KONIEC

Motywacja – np. gruźlica

Pacjentka (Pani Langnese) z zapaleniem ucha nie uzyskała prawidłowej diagnozy przez kilka miesięcy

badania z użyciem: „rezonansu magnetycznego”, zwykłego „Röntgena”, Röntgena CT (tomografia), ultrasonografii (USG) – w miarę postępu choroby nawet podejrzenie udaru mózgu

dwukrotna operacja wszczepienia sztucznej błony bębenkowej

diagnoza końcowa (z wyleczeniem) – zakażenie prątkami gruźlicy



W rutynowych badaniach laboratoryjnych nie prowadzi się testów na obecność bakterii gruźlicy !!

Zcentralizowane i zdecentralizowane badania (kliniczne)

Decentralizacja badań klinicznych cz. I

Badania zdecentralizowane polegają na ograniczeniu lub wyeliminowaniu fizycznej obecności pacjenta w ośrodku realizującym dane badanie kliniczne. Pierwsze projekty tego typu były realizowane już w pierwszych latach XXI w., jednak prawdziwy rozwój tego wciąż innowacyjnego podejścia i dedykowanych narzędzi nastąpił po wybuchu pandemii COVID-19, a tym samym pojawieniu się realnych trudnień w prowadzeniu badań w sposób tradycyjny. Szacuje się, że ponad 70% firm farmaceutycznych, producentów urządzeń medycznych oraz firm CRO (Contract Research Organization), w tym okresie wdrożyła rozwiązania umożliwiające decentralizację badań, tj. wykorzystanie narzędzi cyfrowych w postaci elektronicznych zgód, aplikacji, urządzeń przenośnych, elektronicznych raportów (Electronic Patient-Reported Outcomes – ePRO) oraz przeniesienie części aktywności poza ośrodki, w tym wykorzystanie lokalnych placówek opieki zdrowotnej czy dostarczanie leków/produktów badanych bezpośrednio do domu pacjenta.

Źródło: M. Janiec, Agencja Badań Medycznych (data opracowania artykułu 06.03.2023 r.)

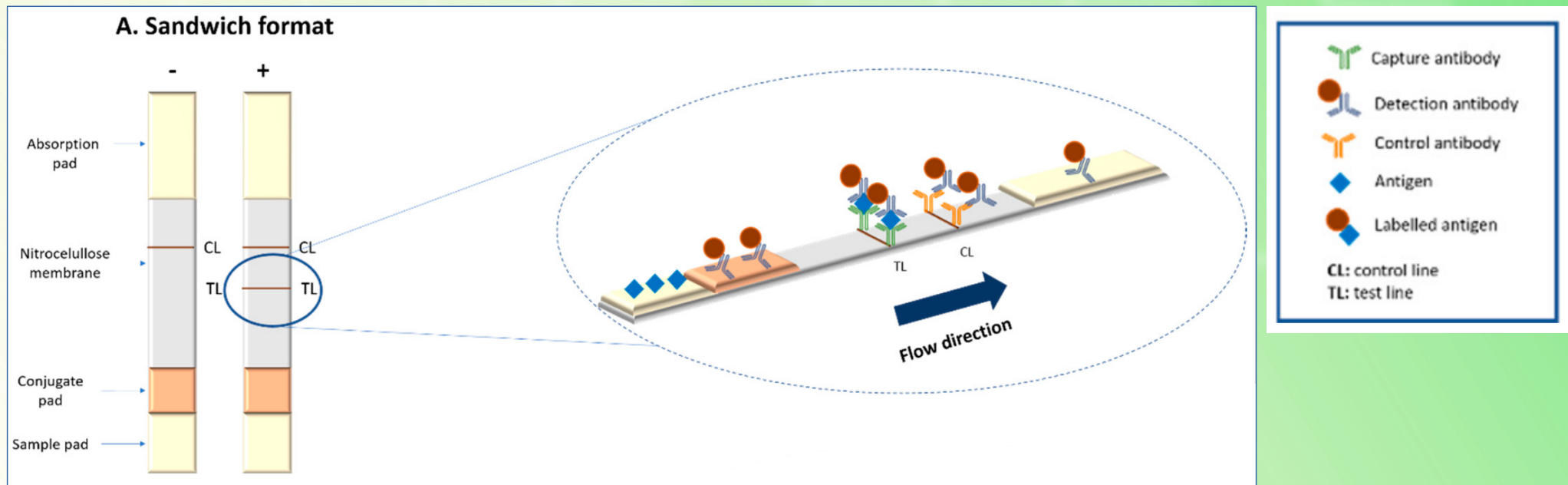
<https://pacjentwbadaniach.abm.gov.pl/pwb/aktualnosci/aktualne-wydarzenia-i-i/2143,Decentralizacja-badan-klinicznych-cz-i.html?search=37157792>

ania (kliniczne)



IFM PAN, Poznań 2023.03.0

Wykorzystanie cząsteczek magnetycznych w testach z przepływem poprzecznym



A. Moyano, E. Serrano-Pertierra, M. Salvador, J-C. Martínez-García, M. Rivas, M. Carmen Blanco-López, *Diagnostics* 2020, **10**, 288

Detekcja magnetyczna:

- możliwość oznaczenia ilościowego: czytniki oporowe (GMR, TMR) i indukcyjne (rezonanse)
- **magnetoseparacja (polepszenie SNR)**

Detekcja optyczna: możliwość oznaczenia ilościowego (np. $\text{ATP} + \text{lucyferyna} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{lucyferaza}} \dots + \text{światło}$)

Szybkie/łatwe testy na obecność biomarkerów - obawy

Wczesna identyfikacja osób zagrożonych rozwojem demencji może przynosić tym osobom i ich rodzinom zarówno zagrożenia, jak i korzyści. Jest to natomiast

jednoznaczne dobrodziejstwo dla badaczy i firm sprzedających leki. Diagnoza wyprzedzająca rozwój objawów zwiększy sprzedaż profilaktycznych specyfików i wy-

-/+

generuje populację osób dostatecznie zaniepokojonych, które będą zbierać pieniądze i wywierać presję na agencje rządowe, aby finansowały badania, dopuszczały do użytku terapie i zapewniały ich refundację.

-/+

Identyfikacja osób najbardziej narażonych na rozwój demencji może również zwiększyć wydajność i obniżyć koszty badań klinicznych dotyczących tej choroby.

+

Wpływ bombardowania jonami na właściwości magnetyczne warstw Tb/Co

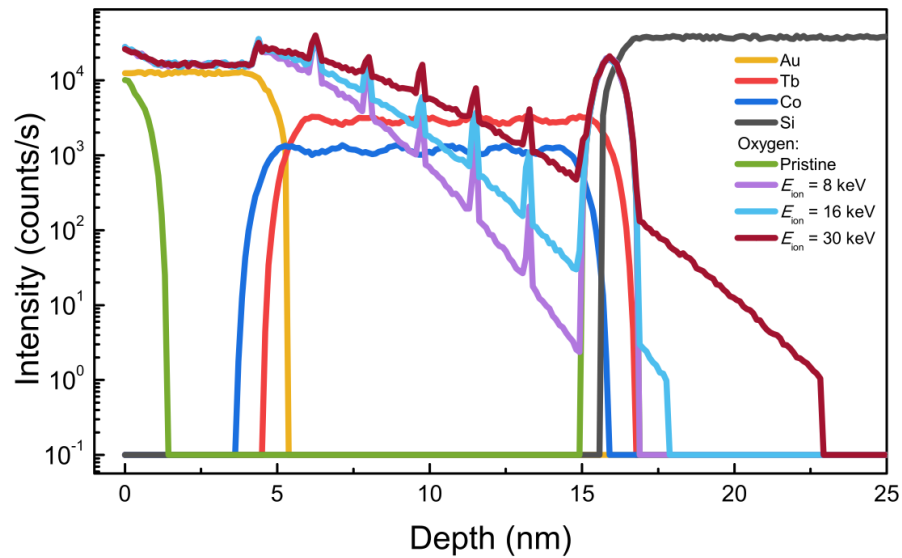
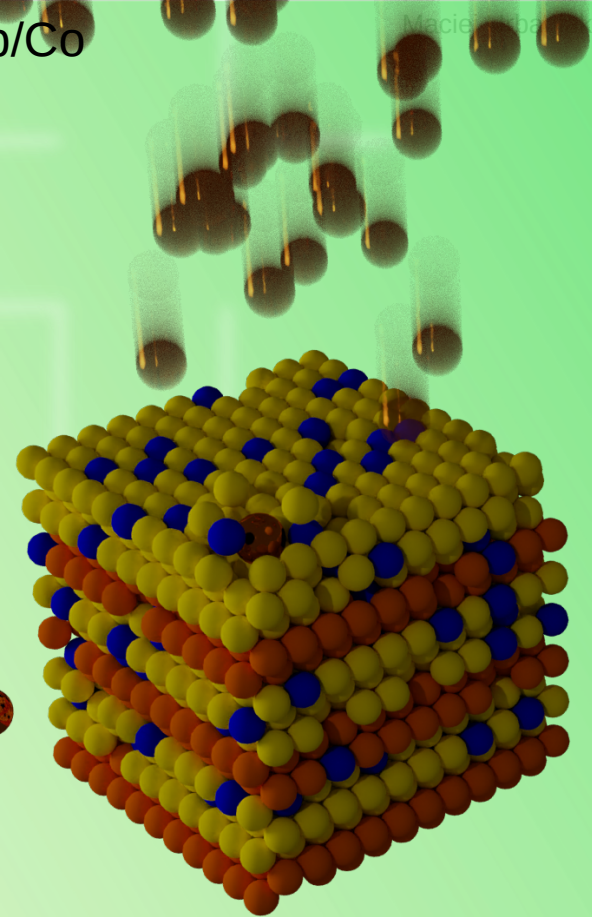


Fig. 4. SIMS depth profile for (Tb-0.8 nm/Co-0.8 nm)₆/Au-5 nm in the pristine state and after Ga⁺ FIB using different E_{ion} with constant $D_{\text{Ga}} = 8 \times 10^{13}$ Ga⁺/cm².

Kiphart, D., Krupiński, M., Mitura-Nowak, M., Michalowski, P.P., Kowacz, M., Schmidt, M., Stobiecki, F., Chaves-O'Flynn, G.D., Kuświk, P., Applied Surface Science 685, 162090 (2025)

O ●
Tb ●
Co ●
Ga⁺ ●



SIMS – spektroskopia masowa jonów wtórnych (Secondary-ion mass spectrometry)

Wpływ bombardowania jonami na właściwości magnetyczne warstw Tb/Co

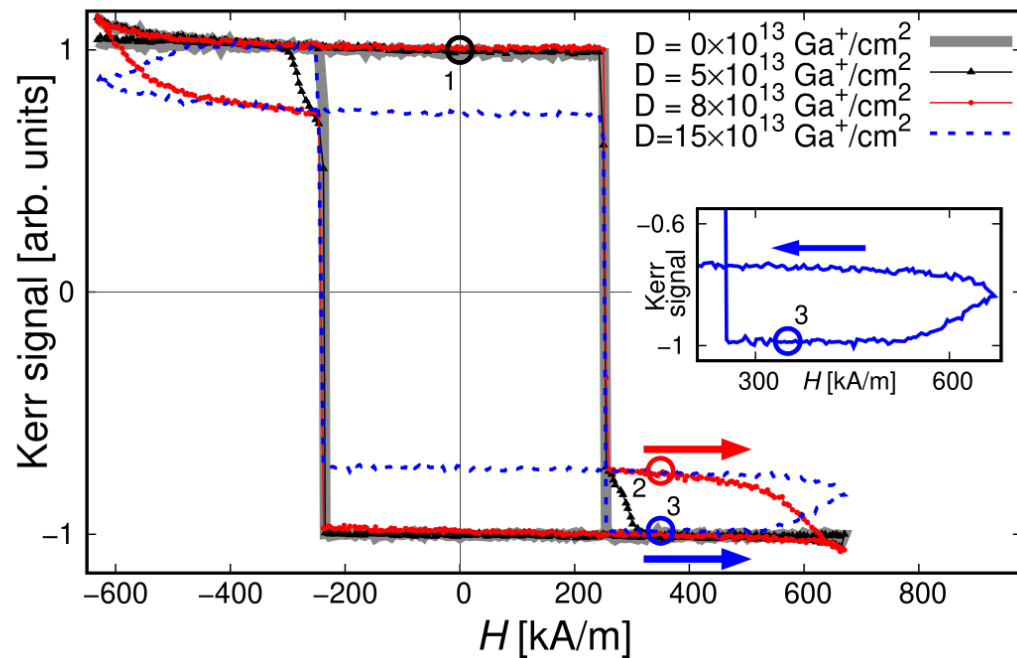
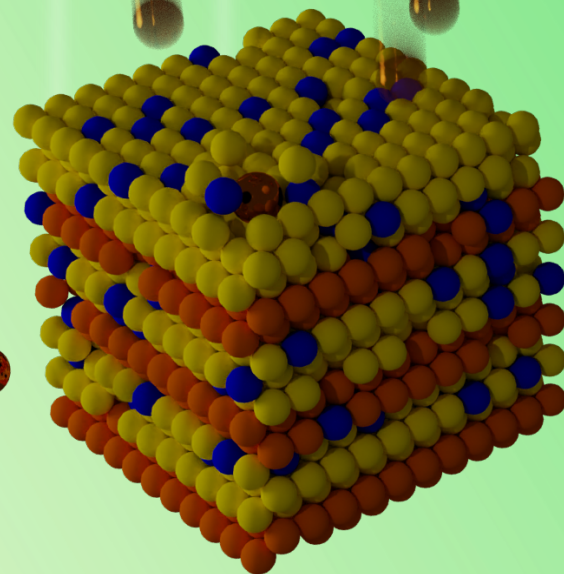
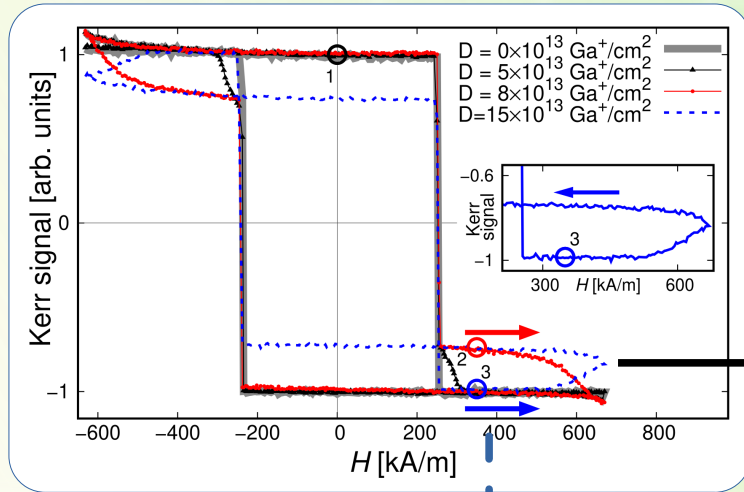


Figure 1: Magnetization reversal of the as-deposited Tb/Co ML and that of the bombarded arrays of $2 \mu\text{m}$ squares [calculated from Kerr effect microscope images](#). Note that in our P-MOKE setup, the Co subsystem magnetic moments determine the magneto-optical signal. In the as-deposited state we observe just a square loop with the coercive field of some 240 kA/m. Thick circles relate to the bombarded structures [magnetic configurations of which](#) are retained after the external field is switched off. The circle no. 1 corresponds to Fig. 2a, the circle no. 2 corresponds to either of the configurations shown in Figs. 2b ($D = 8 \times 10^{13} \text{ Ga}^+/\text{cm}^2$) and 2d ($D = 15 \times 10^{13} \text{ Ga}^+/\text{cm}^2$), and the circle no. 3 corresponds to Fig. 2c. For better visibility, the inset shows only the dependence for $D = 15 \times 10^{13} \text{ Ga}^+/\text{cm}^2$.

O ●
Tb ●
Co ●
 Ga^+ ●



Wpływ bombardowania jonami na właściwości magnetyczne warstw Tb/Co



Sygnal kerrowski:

- scałkowane wartości szarości obrazu różnicowego (obraz referencyjny otrzymany w nasyceniu)
- sygnał kerrowski pochodzi w znacznej mierze od podsieci Co

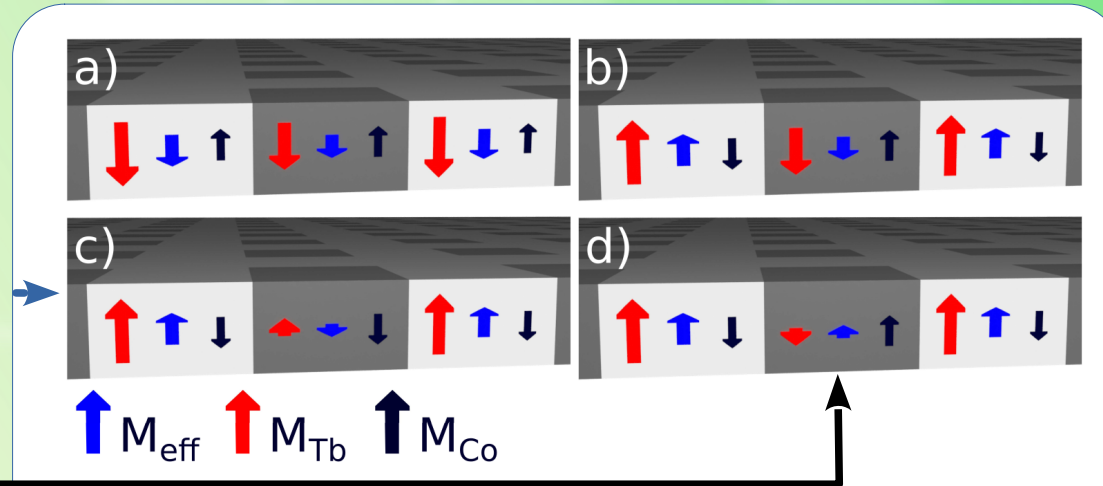
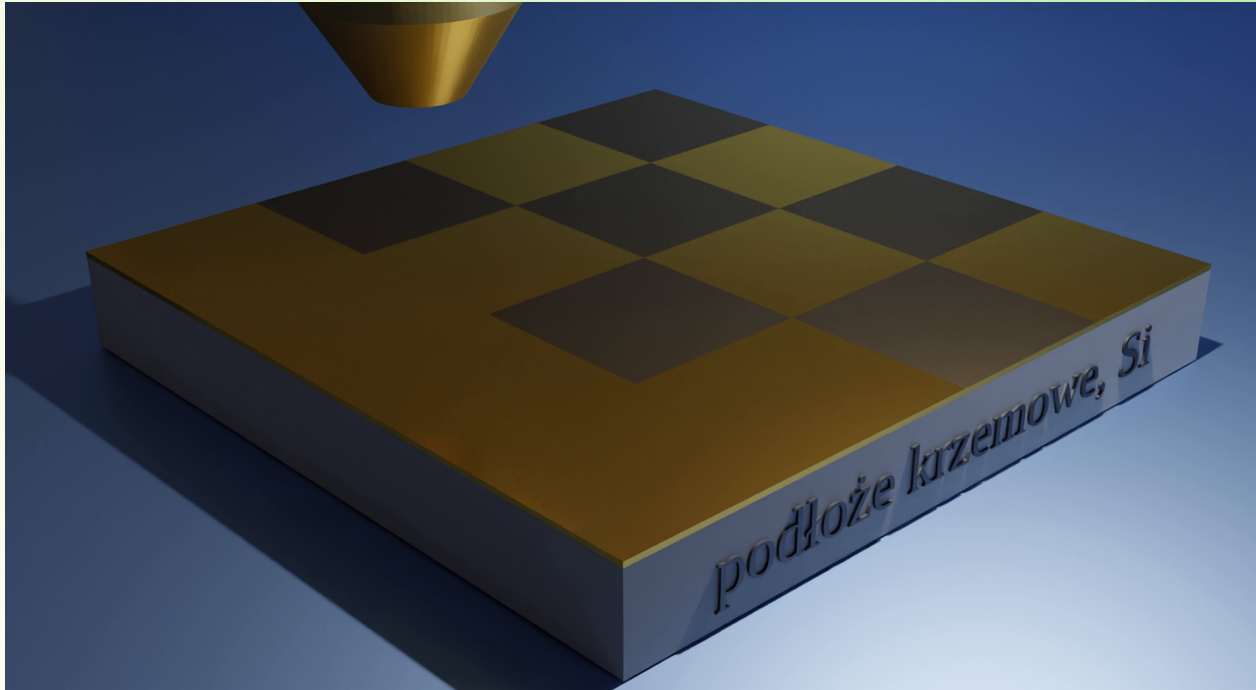


Figure 2: Schematic cross section of the magnetic structure of the Co/Tb bombarded MLs. For smaller doses of Ga^+ ions the squares can still show Tb moment domination [(a) and (b)]. Depending on the relative orientation of the moments of the squares and matrix, we can observe the rotational-type domain walls [(b) and (d)] or the abrupt transition between oppositely magnetized domains without associated gradual spatial rotation of spins within the transition region [(a) and (c)] [compare Fig. S1 in SI].

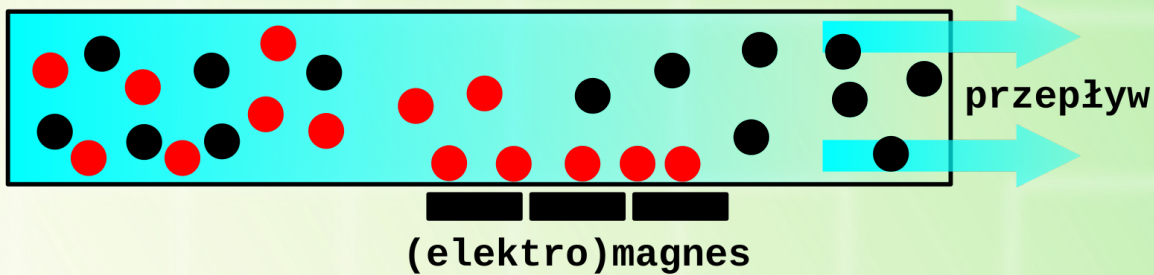
Bombardowanie zogniskowaną wiązką jonów (FIB)



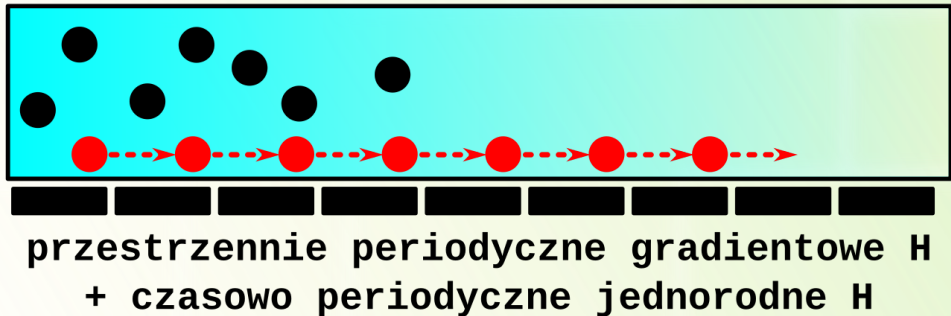
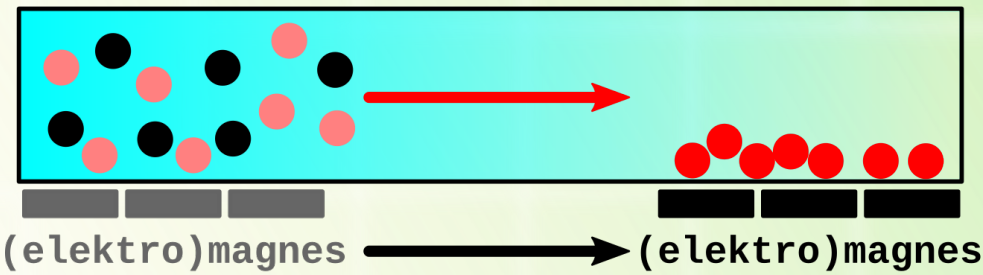
Kliknij ilustrację by odtworzyć wideo

- W porównaniu z bombardowaniem przez maskę FIB umożliwia znaczną elastyczność w zakresie zmiany dawki w funkcji położenia
- Trudność skalowania do większych wydajności – strukturyzowana powierzchnia w jednostce czasu stała

Magnetoforeza – standardowe procedury



Magnetoforeza:
wywołany polem magnetycznym ruch cząsteczki magnetycznej w cieczy. [en.wiktionary.org]



Kulka superparamagnetyczna nad jednorodną warstwą (magnetyczną) w wodzie

Równanie „Hogg-Healy-Fuerstenau” - „elektrostatyczne” oddziaływanie między dwiema podwójnymi warstwami elektrycznymi

$$V_1(H) = 2\pi \varepsilon_r \varepsilon_0 a_p \zeta_p \zeta_c \left\{ \ln \left[\frac{1 + \exp(-\tau H)}{1 - \exp(-\tau H)} \right] + \frac{(\zeta_p^2 + \zeta_c^2)}{2\zeta_p \zeta_c} \ln[1 - \exp(-2\tau H)] \right\},$$

Gu, Y. The electrical double-layer interaction between a spherical particle and a cylinder.
Journal of Colloid and Interface Science 231, 199 (2000)

$\zeta_{\text{PMMA}} = 24 \text{ mV}$, $\zeta_{\text{KSP}} = -36 \text{ mV}$ (Dynabeads M-270, -COOH)

$a_p = 1.4 \text{ }\mu\text{m}$ – promień KSP

$\tau = a_p / \lambda_{\text{Debye}}$

$\lambda_{\text{debye}} \approx 200 \text{ nm}$ (w prezentowanych obliczeniach) – miara zasięgu oddziaływań elektrostatycznych w roztworze

Siły van der Waalsa – oddziaływanie sfera - płaszczyzna

$$V_A = -\frac{A_{12}}{12} \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{x+1} + 2 \ln \frac{x}{x+1} \right]$$

Particles in Water Properties and Processes, J. Gregory, Tylor&Francis 2006

$x = H/2a_p$

A_{12} – stała Hamakera

w prezentowanych obliczeniach $A_{12} \approx 3.4 \times 10^{-19} \text{ J}$

Oddział. Van der Waals zaniedbywalne w porównaniu z innymi siłami w układzie

Siła działająca na kulka superparamagnetyczną w polu magnetycznym

$$\chi = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \rightarrow \chi_p = \frac{M}{H}$$

$$E = -\vec{m} \cdot \vec{B}$$

$$\vec{m} = \vec{M} \cdot V$$

V – objętość kulki

$$\vec{F} = \frac{1}{2\mu_0} V \chi_p \nabla B^2$$

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \mu_0 V \chi_p \nabla H^2$$

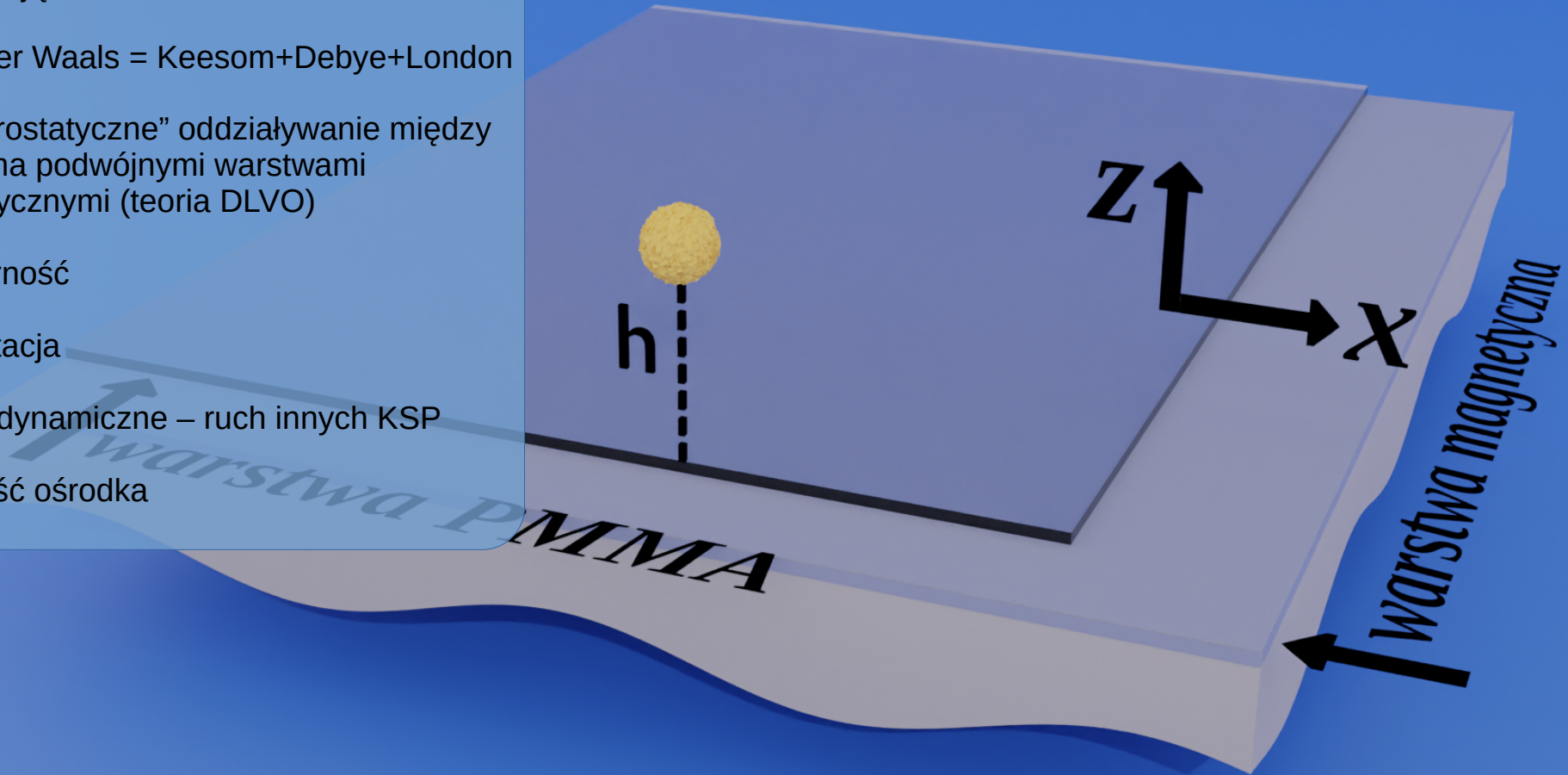
Dodanie **bezgradientowego pola magnetycznego** do pola gradientowego pozwala regulować kierunkiem siły magnetycznej działającej na kulkę oraz w wielu przypadkach istotnie zwiększyć jej wartość:

$$\nabla (\vec{H}_{podł} + \vec{H}_{zew})^2 = \nabla \vec{H}_{podł}^2 + 2 \nabla (\vec{H}_{podł} \cdot \vec{H}_{zew})$$

Kulka superparamagnetyczna nad jednorodną warstwą (magnetyczną) w wodzie

Siły działające na KSP:

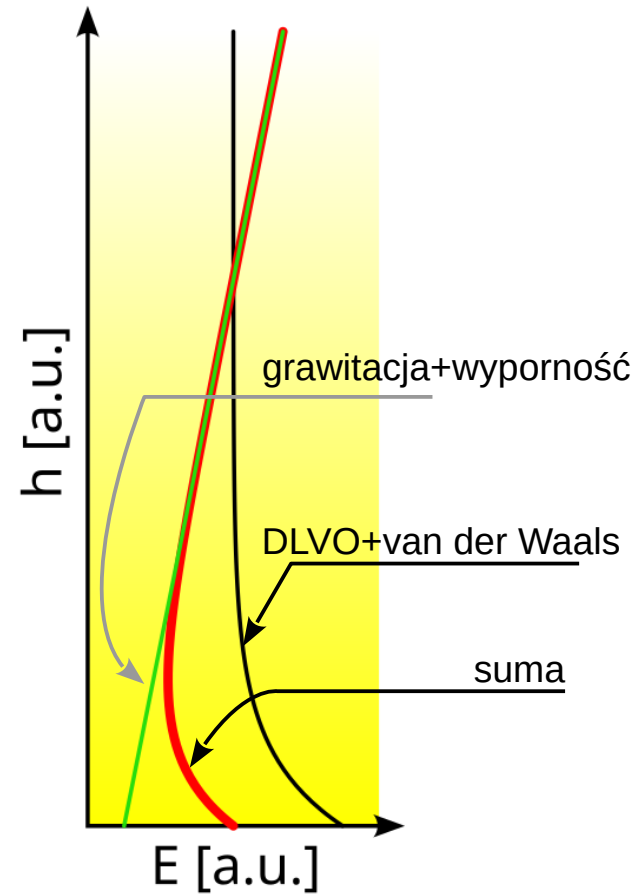
- van der Waals = Keesom+Debye+London
- „elektrostatyczne” oddziaływanie między dwiema podwójnymi warstwami elektrycznymi (teoria DLVO)
- wyporność
- grawitacja
- hydrodynamiczne – ruch innych KSP
- lepkość ośrodka



Kulka superparamagnetyczna nad jednorodną warstwą (magnetyczną) w wodzie

Siły działające na KSP:

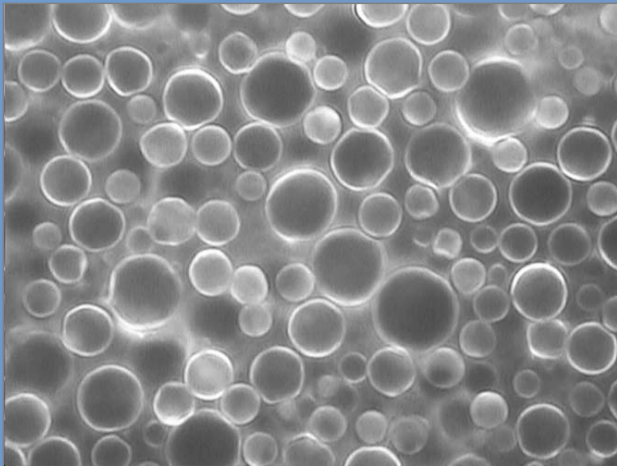
- van der Waals = Keesom+Debye+London
- „elektrostatyczne” oddziaływanie między dwiema podwójnymi warstwami elektrycznymi (teoria DLVO)
- wyporność
- grawitacja
- hydrodynamiczne – ruch innych KSP
- lepkość ośrodka



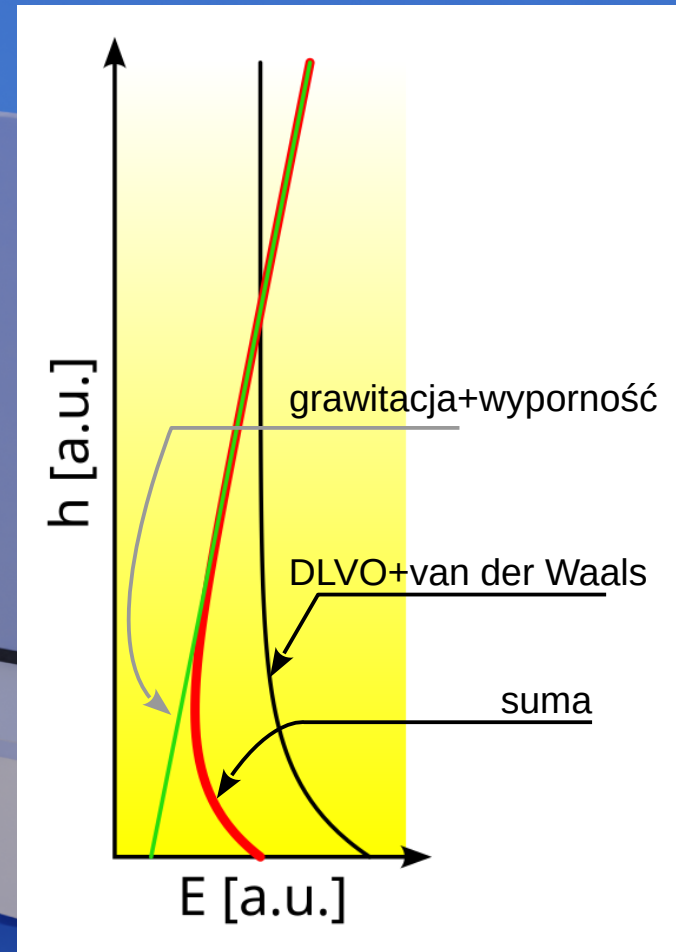
Kulka superparamagnetyczna nad jednorodną warstwą (magnetyczną) w wodzie

Odziaływania DLVO, odpowiedzialne za stabilizację zawiesin, powodują, że KSP nie stykają się z podłożem.

Surowe mleko, średnica agregatów tłuszczu 3 – 7 μm



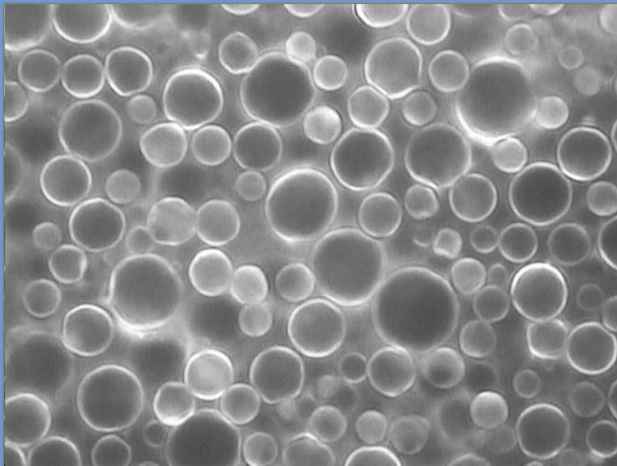
źródło: Microphotography of Raw and Processed Milk, Beverly Rubik, 2012,
<https://www.westonaprice.org/health-topics/modern-foods/microphotography-of-raw-and-processed-milk/#gsc.tab=0>
 (2024.04.20, 11:56 CET)



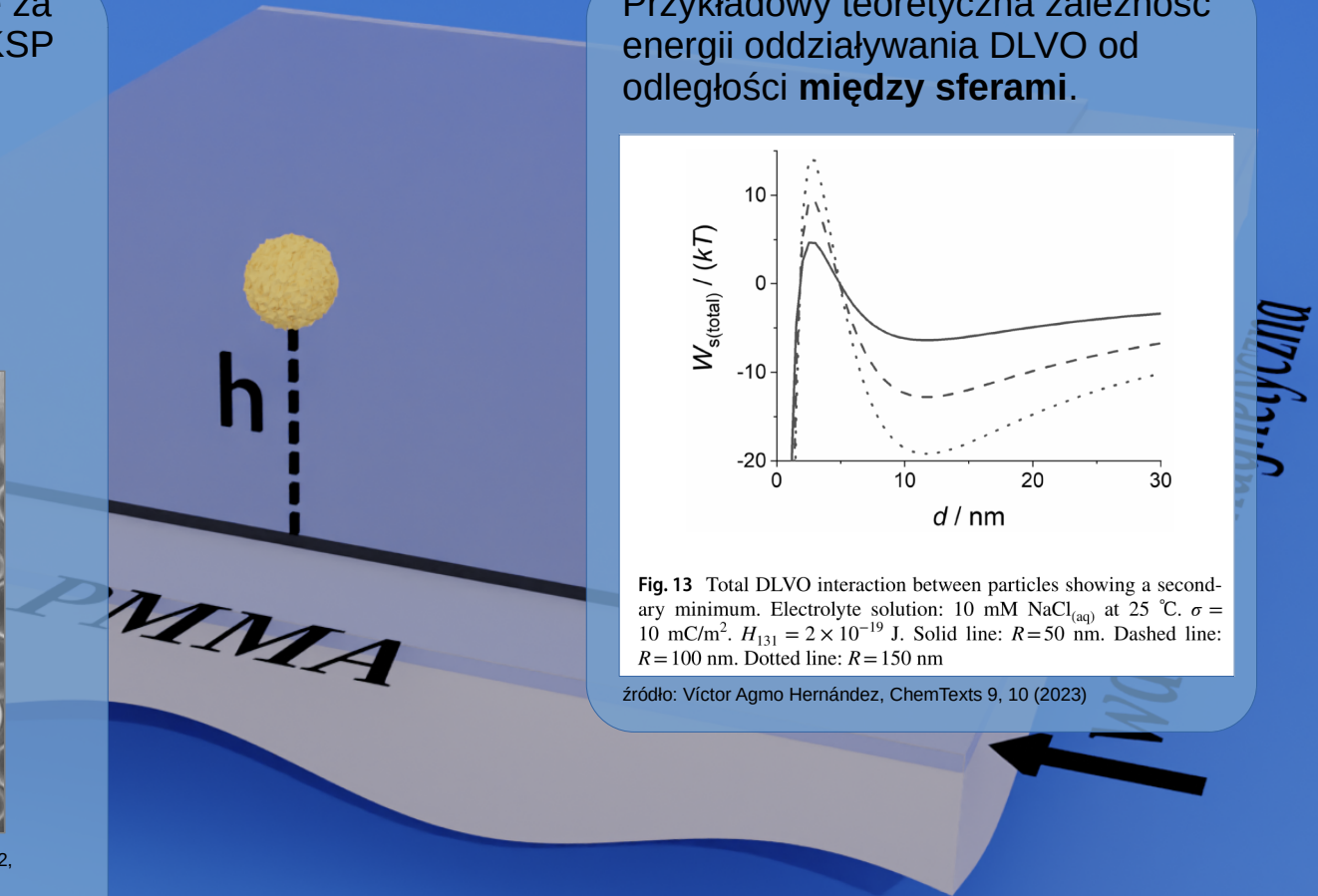
Kulka superparamagnetyczna nad jednorodną warstwą (magnetyczną) w wodzie

Oddziaływania DLVO, odpowiedzialne za stabilizację zawiesin, powodują, że KSP nie stykają się z podłożem.

Surowe mleko, średnica agregatów tłuszczu 3 – 7 μm



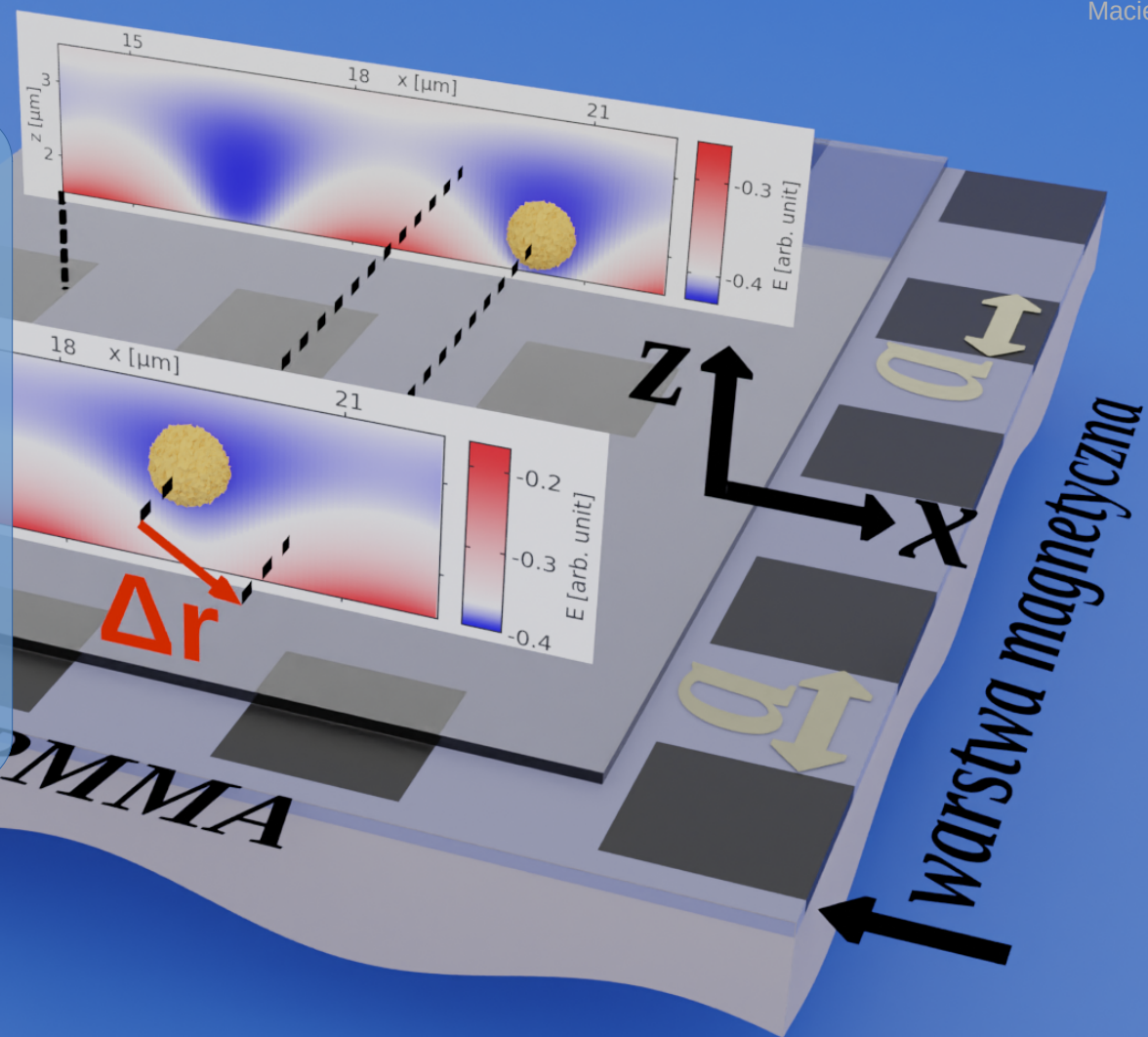
źródło: Microphotography of Raw and Processed Milk, Beverly Rubik, 2012,
<https://www.westonaprice.org/health-topics/modern-foods/microphotography-of-raw-and-processed-milk/#gsc.tab=0>
 (2024.04.20, 11:56 CET)



Warstwa niejednorodna

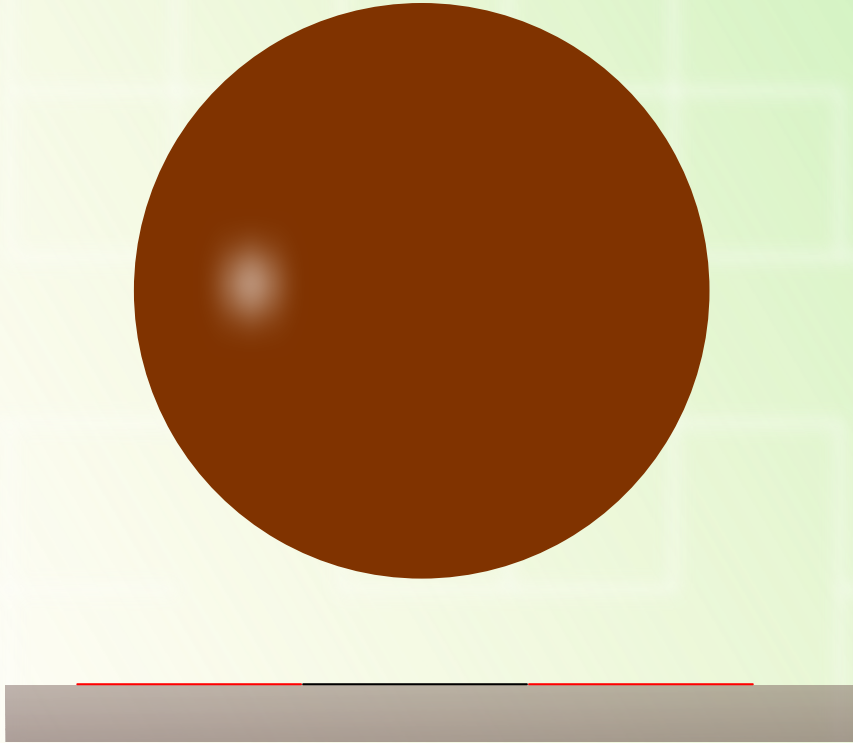
Warstwa niejednorodna magnetycznie (różne kierunki i/lub wartości namagnesowania):

- Pola magnetyczne nad warstwą jednorodną magnetycznie są zanedbywalne
- Strukturyzacja, obecność domen, lub defektów prowadzi do pojawienia się pola magnetycznego nad warstwą w pobliżu obszarów z ΔM
- Zmiany kierunku/wartości zewnętrznego bezgradientowego pola magnetycznego zmieniają położenia minimów energii KSP

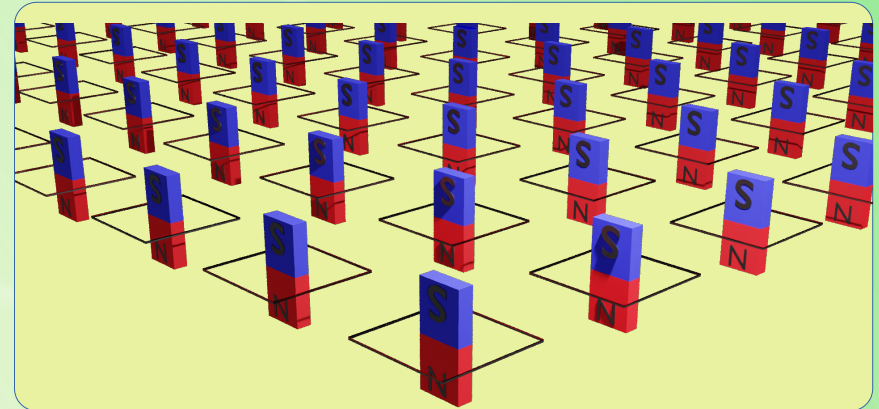


Rozmiar kulek i grubość warstw nie zachowuje skali

Magnetoforeza – rozmiar KSP, grubość warstwy magnetycznej

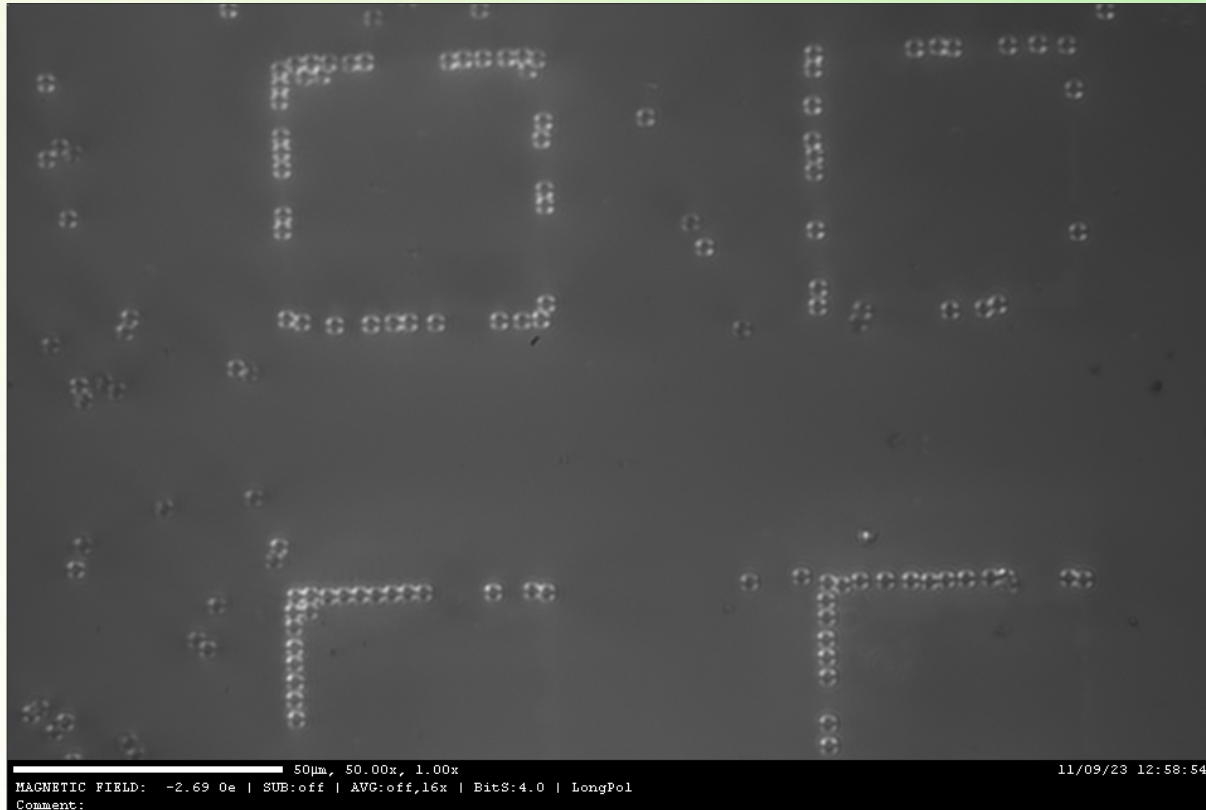


- średnice KSP: 1 – 2.8 μm
- grubości magnetycznej części warstwy: 2 -10 nm
- „prądy namagnesowania” ($\Delta M \approx 1 \times 10^6 \text{ A/m}$) ok. 5 mA



Rozmiar kulek i grubość warstw zachowują w przybliżeniu skalę

Ti 4 nm/Au 30 nm/(Tb 1.05 nm/Co 0.66 nm)₆/Au5 nm



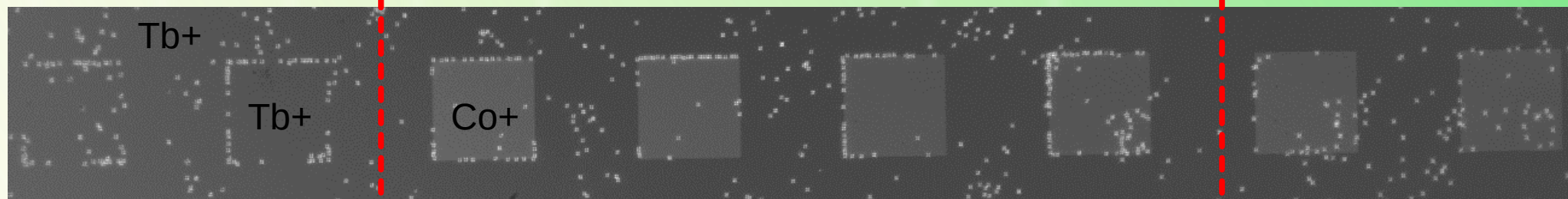
- kwadraty $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ bombardowane dawką $D = 8 \times 10^{15} \text{ Ga}^+/\text{cm}^2$
- momenty efektywne $\mathbf{m}$ kwadratów antyrównoległe do $\mathbf{m}$ matrycy
- kulki superparamagnetyczne dekorują obszary ścian domenowych — potwierdzenie obecności **stosunkowo silnych pól magnetycznych**
- w zawieszinie jest około 2×10^6 kulek/mL — tj. średnio około 180 kulek nad widzianym obszarem

Ti 4 nm/Au 30 nm/(Tb 1.05 nm/Co 0.66 nm)₆/Au5 nm

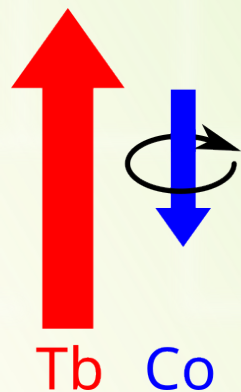
rosnąca dawka jonów →

Próbka zbombardowana, potem **nasycona** w ≈ 1.65 T

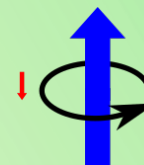
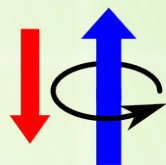
7/622D (20240816)



bombardowane kwadraty, $50 \times 50 \mu\text{m}^2$



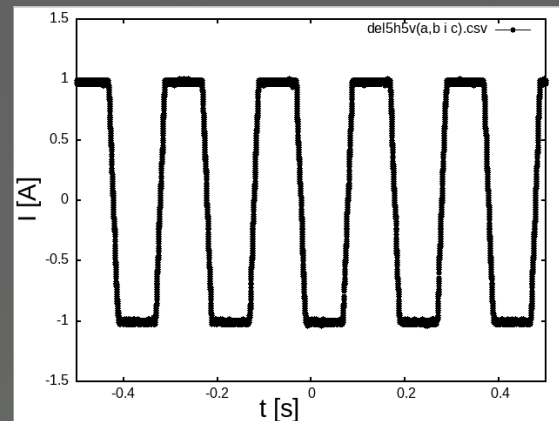
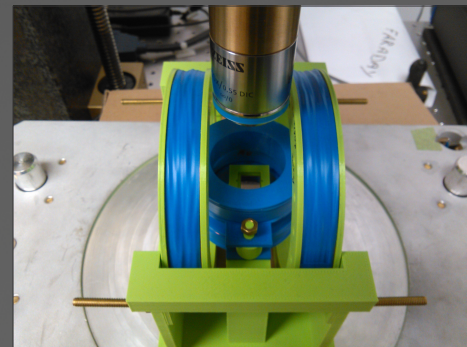
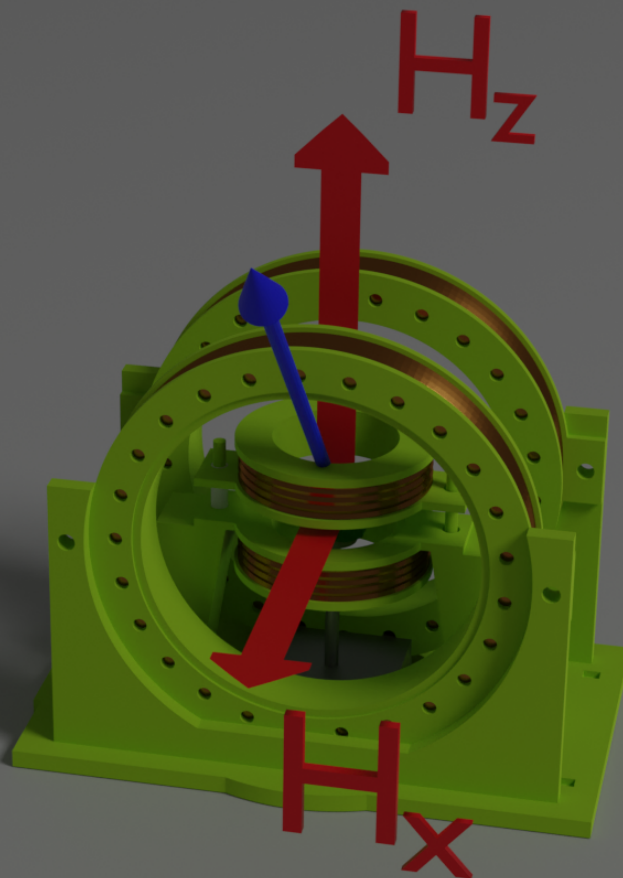
Sygnal kerrowski czuły jest głównie na kierunek momentów Co



„Słabe” dekorowanie - dla wyższych dawek jonów namagnesowanie kwadratów rośnie i mniejsze są pola magnetyczne na ich granicach

Układ eksperymentalny

- Cewki helmholtzopodobne*
- Zwykle stałe co do modułu pola magnetyczne rzędu 1.6 – 3.2 kA/m ($\approx 20 - 40$ Oe).
- Pole przełączane z częstotliwościami rzędu kilku herców.
- Obserwacja za pomocą mikroskopu optycznego pozwalającego na obrazowanie domen za pomocą efektu Kerra.



Przebieg prądu cewek pola H_x dla 5 Hz.

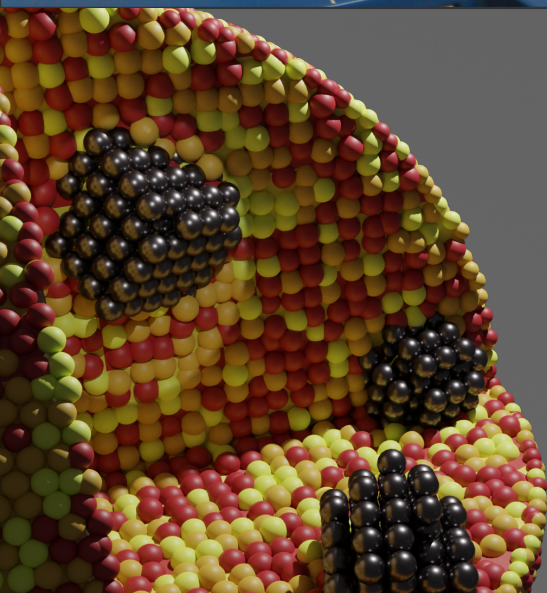
*różne od zera szerokość i grubość uzwojeń etc.

P. Beran, Identifizierung und Kalibrierung der Orthogonalitätsfehler von mehrachsigen Spulen- und Sensor- systemen zur Erzeugung und Messung von Magnetfeldern
praca doktorska, TU-Braunschweig 2021

Układ eksperymentalny



- Oryginalna zawiesina kulek (np. Dynabeads M-270, średnica $2.8\ \mu\text{m}$) rozcieńczana jest w wodzie wysokiej czystości w stosunku ok. 1:1000. Podatność 0.2 – 0.4
- Stężenia robocze są rzędu 1-2 mln kulek/mL.



- we wnętrzu polimerowych kulek umieszcza się w procesie produkcyjnym **cząstki magnetyczne**
- cząsteczki te w praktyce mają rozmiary rzędu kilkunastu nanometrów (zawierają kilkadziesiąt tysięcy atomów)

Magnetoforeza – wpływ medium

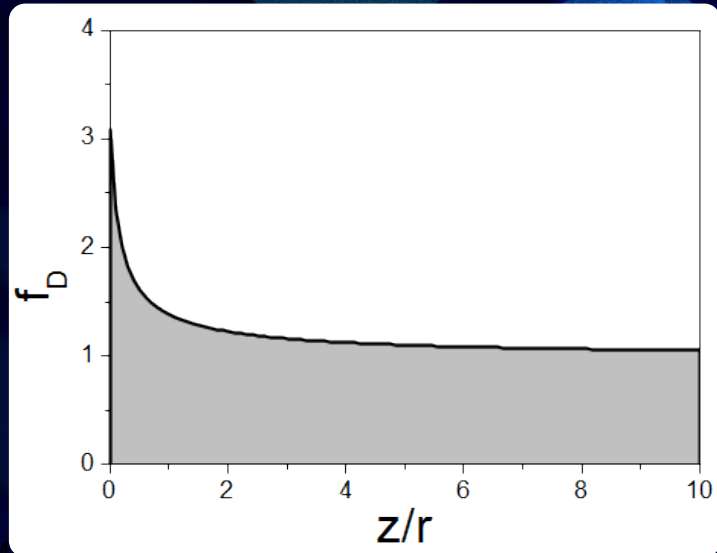
Zasadnicze znaczenie dla przebiegu magnetoforezy w środowisku wodnym ma lepkość – prawo Stokesa

$$F_d = 6\pi \eta r \Delta v f_D$$

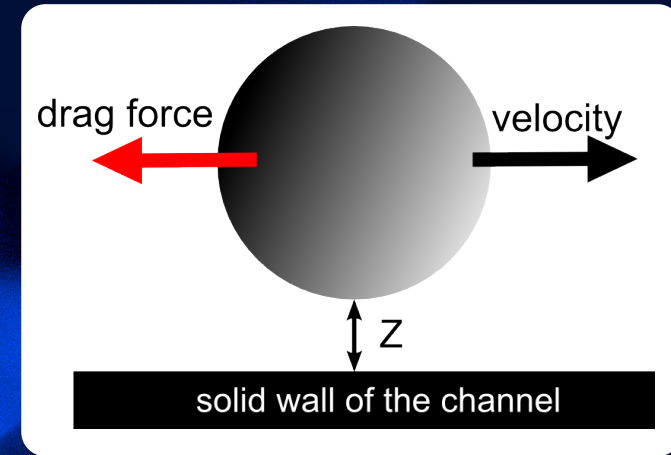
$$f_D = \left(1 - \frac{9}{16} \left(\frac{r}{r+z}\right) + \frac{1}{8} \left(\frac{r}{r+z}\right)^3 - \frac{45}{256} \left(\frac{r}{r+z}\right)^4 - \frac{1}{16} \left(\frac{r}{r+z}\right)^5\right)$$

η – lepkość ($8.9 \times 10^{-4} \text{ N s m}^{-2}$ dla wody)

f_D – czynnik geometryczny



Wpływ ścian kanału jest istotny dla stosunku z/r mniejszego od 2.



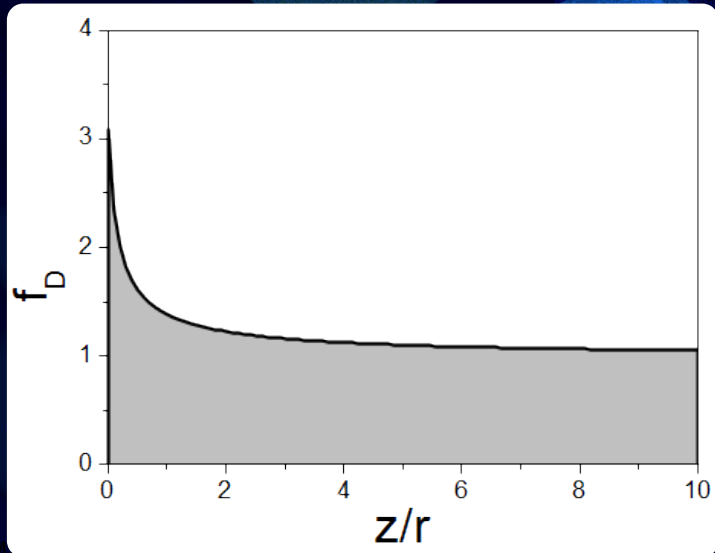
Magnetoforeza – wpływ medium

Zasadnicze znaczenie dla przebiegu magnetoforezy w wodnym ma lepkość – prawo Stokesa

$$F_d = 6\pi \eta r \Delta v f_D$$

$$f_D = \left(1 - \frac{9}{16} \left(\frac{r}{r+z}\right) + \frac{1}{8} \left(\frac{r}{r+z}\right)^3 - \frac{45}{256} \left(\frac{r}{r+z}\right)^5\right)$$

η – lepkość
 f_D – współczynnik



ON THE PRACTICAL APPLICABILITY OF STOKES' LAW OF RESISTANCE, AND THE MODIFICATIONS OF IT REQUIRED IN CERTAIN CASES

BY M. S. SMOLUCHOWSKI.

§ 1. Stokes' law for the resistance of a sphere in a viscous liquid rests, as is well known, on the fundamental assumptions:

I. Slowness of motion, so that the inertia terms in the hydrodynamical equations may be neglected, in comparison with the effects of viscosity.

II. Complete adhesion without slip, of the liquid to the sphere, this being considered as a rigid body.

III. Unboundedness of the liquid and immobility at infinity.

In what follows I should like to contribute some remarks on this law with regard to certain cases of practical importance, where the underlying conditions are changed to some extent, which may be of some interest to those who are engaged with research work on subjects connected with Stokes' law.

First let us touch briefly the question of slipping, connected with the second of the above assumptions. Stokes' calculation can be generalised, by allowing the

Int'l Congress of Mathematicians, Cambridge 1912

Wpływ ścian kanału jest istotny dla stosunku z/r mniejszego od 2.

Magnetoforeza – wpływ medium: prędkość stacjonarna

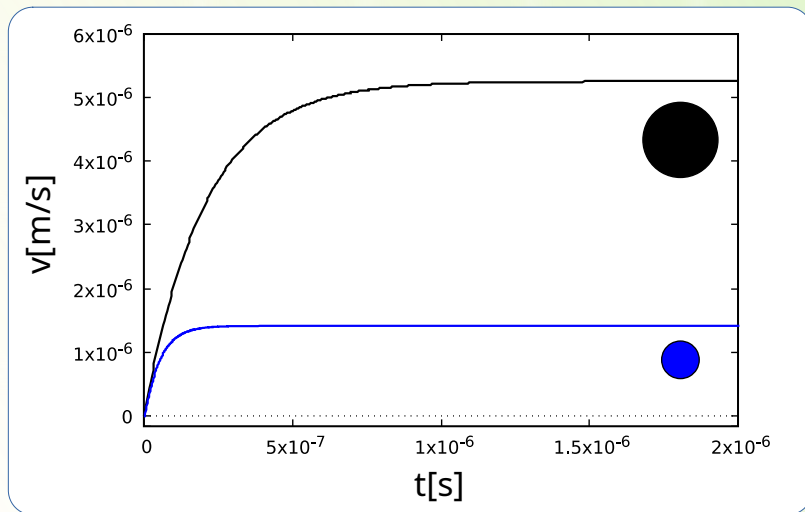
Równanie ruchu cząstki w lepkim płynie (z użyciem wyrażenia Stokesa)

$$F_{zewn} = m \frac{dx^2}{dt^2} + \text{Stokes} \times \frac{dx}{dt}$$

$$\text{Stokes} = 6 \pi \eta r f_D$$

$f_D = 1.5$, η – lepkość ($1.0093 \times 10^{-3} \text{ N s m}^{-2}$ dla wody destylowanej), $\rho_{kulka} \approx 1.1 \text{ g/cm}^3$

Typowe siły magnetyczne działające w układzie są rzędu 10^{-13} N



$r = 2 \mu\text{m}$

$r = 1 \mu\text{m}$

$$v(t) = \frac{F_{zewn}}{\text{Stokes}} \left(1 - e^{-\frac{\text{Stokes} \times t}{m}} \right)$$

Prędkość stacjonarna

Założono, że siły działające na kulki są proporcjonalne do ich objętości

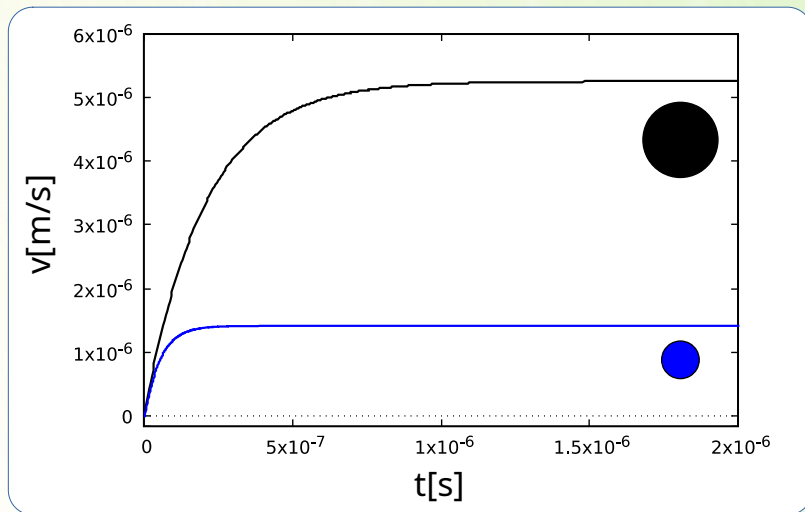
Magnetoforeza – wpływ medium: prędkość stacjonarna

Równanie ruchu cząstki w lepkim płynie (z użyciem wyrażenia Stokesa)

$$F_{zewn} = m \frac{dx^2}{dt^2} + \text{Stokes} \times \frac{dx}{dt}$$

$f_D = 1.5$, η – lepkość ($1.0093 \times 10^{-3} \text{ N s m}^{-2}$ dla wody destylowanej)

Typowe siły magnetyczne działające w układzie są rzędu 10^{-13} N



$r=2 \mu\text{m}$

$r=1 \mu\text{m}$

- W naszych eksperymentach kulki [$r = 1.4 \mu\text{m}$, $H \approx 2.2 \text{ kA/m}$ (ok. 28 Oe)] osiągają prędkości średnie wynoszące ok. $50 \mu\text{m/s}$
- W wodzie odpowiada to sile ok. 10^{-12} N ; odpowiada to z kolei przyspieszeniu ok. **10 g**
- Siła grawitacji – wyporność to ok. 0.1 g

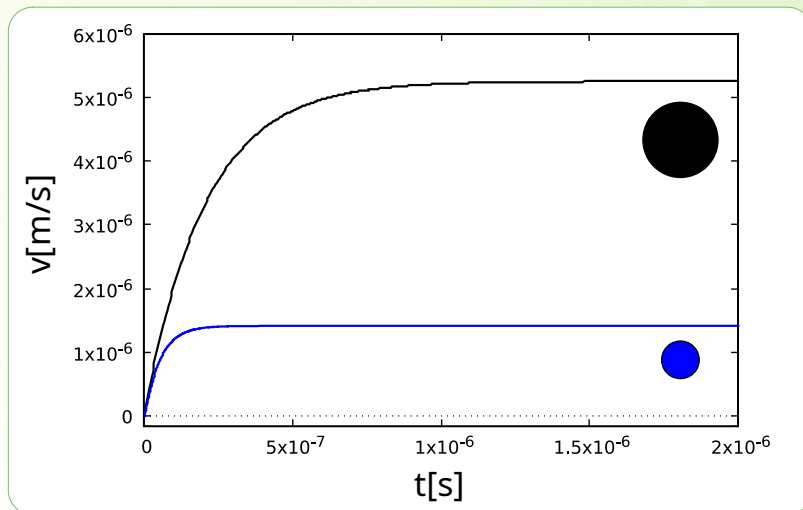
Magnetoforeza – wpływ medium: prędkość stacjonarna

Równanie ruchu cząstki w lepkim płynie (z użyciem wyrażenia Stokesa)

$$F_{zewn} = m \frac{dx^2}{dt^2} + \text{Stokes} \times \frac{dx}{dt}$$

$f_D = 1.5$, η – lepkość ($1.0093 \times 10^{-3} \text{ N s m}^{-2}$ dla wody destylowanej)

Typowe siły magnetyczne działające w układzie są rzędu 10^{-13} N

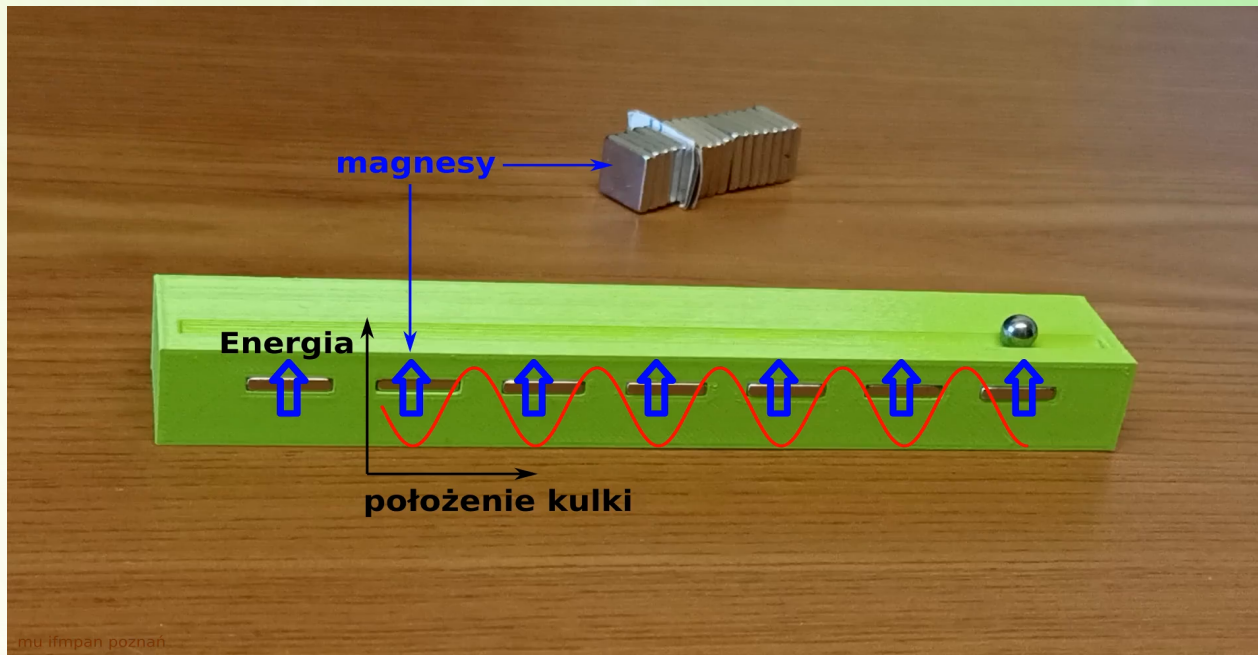


$r=2 \mu\text{m}$

$r=1 \mu\text{m}$

- SPB używane w naszych eksperymentach przyspieszają do prędkości stacjonarnej w czasie rzędu $1 \mu\text{s}$
- Odległość przebyta w fazie przyspieszenia jest zanedbywalna w stosunku do charakterystycznych rozmiarów układu (średnice kulek, period struktury magnetycznej)
- Ponieważ zewnętrzne pole magnetyczne zmienia się w trakcie eksperymentu z częstotliwościami rzędu $0.1\text{--}10 \text{ Hz}$ **można założyć, że SPB poruszają się zawsze z prędkością stacjonarną**

„Makromagnetoforeza”

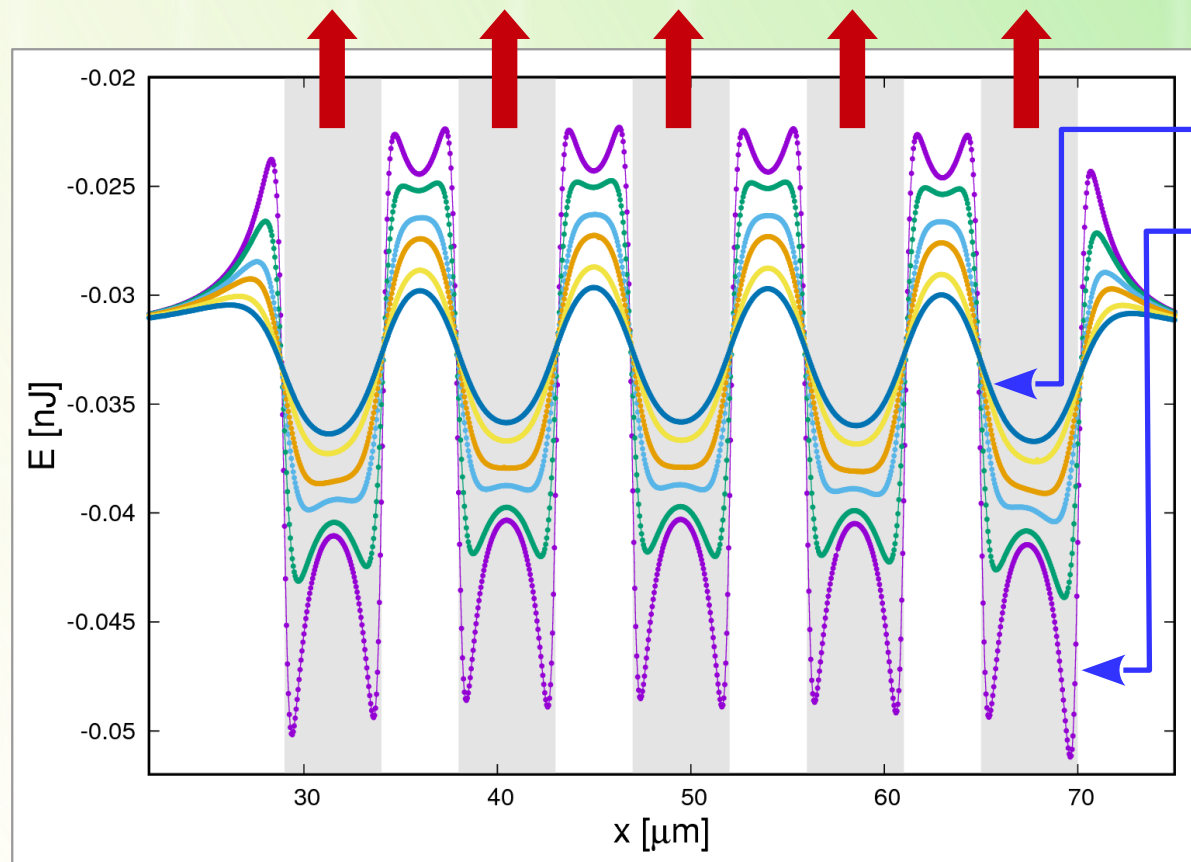


- Wpływ gradientu pola magnetycznego na ruch cząstek magnetycznych* silnie zależy od lepkości płynu
- Lepkość wody jest ok. 55 razy większa od lepkości powietrza
- Ruch małych cząstek w wodzie jest silnie tłumiony – dynamika Brownowska (przetłumiona dynamika Langevin'a)

*ferro-, superpara-, diamagnetycznych

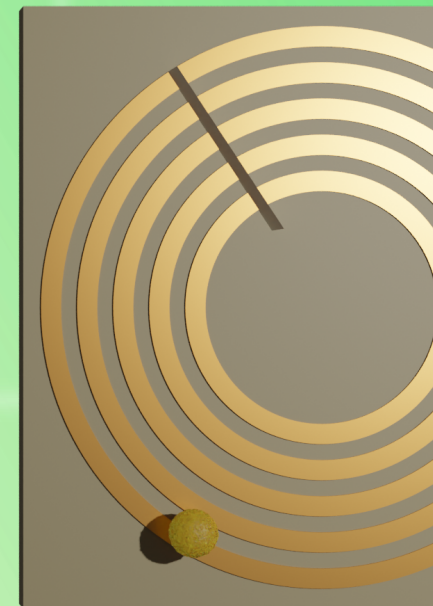
Kliknij ilustrację by odtworzyć wideo

Magnetoforeza – zależność sił magnetostatycznych od wysokości nad podłożem



2.4 μm nad
pierścieniami

0.5 μm nad
pierścieniami



Niższe częstotliwości przestrzenne dominują potencjał kulek dla większych wysokości nad podłożem.

Energia „punktowej” paramagnetycznej kuli nad prostopadle namagnesowanymi paskami ($t_{\text{Co}} \approx 2.1$ nm). Bez pola zewnętrznego.

Magnetoforeza – wyrażenia na pola magnetyczne prostopadłościanu

Projections of field intensity $\vec{H}$ on coordinate axes x , y and z are, respectively:

$$H_x(x, y, z, \sigma) = -\sigma \ln \left(v + \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} \right) \Bigg|_{u=-x}^{u=a-x} \Bigg|_{v=-y}^{v=b-y} \Bigg|_{\omega=-z}^{\omega=c-z}, \quad (1)$$

$$H_y(x, y, z, \sigma) = -\sigma \ln \left(u + \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} \right) \Bigg|_{u=-x}^{u=a-x} \Bigg|_{v=-y}^{v=b-y} \Bigg|_{\omega=-z}^{\omega=c-z}, \quad (2)$$

$$H_z(x, y, z, \sigma) = \sigma \frac{v}{|v|} \frac{\omega}{|\omega|} \times \arctg \frac{u|v|}{|\omega| \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2}} \Bigg|_{u=-x}^{u=a-x} \Bigg|_{v=-y}^{v=b-y} \Bigg|_{\omega=-z}^{\omega=c-z}, \quad (3)$$

where a , b and c are the sides of the magnet.

N. E. Kulezneva, P. A. Polyakova, and V. S. Shevtsov,
Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2018, **82**, 974

wersja oryginalna: Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Fizicheskaya, 2018, Vol. 82, No. 8, pp. 1076

Wyznaczając pola magnetyczne zakładamy, że:

- namagnesowanie, $M(x, y, z)$, jest idealnie prostopadłe do powierzchni warstwy magnetycznej
- kierunek i wartość M nie zależą od wsp. z
- M nie zależy od pola zewnętrznego ($H_s \approx 200$ kA/m)

Magnetoforeza – wyrażenia na pola magnetyczne prostopadłościanu

Projections of field intensity $\vec{H}$ on coordinate axes x , y and z are, respectively:

$$H_x(x, y, z, \sigma) = -\sigma \ln \left(v + \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} \right) \Bigg|_{u=-x}^{u=a-x} \Bigg|_{v=-y}^{v=b-y} \Bigg|_{\omega=-z}^{\omega=c-z}, \quad (1)$$

$$H_y(x, y, z, \sigma) = -\sigma \ln \left(u + \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} \right) \Bigg|_{u=-x}^{u=a-x} \Bigg|_{v=-y}^{v=b-y} \Bigg|_{\omega=-z}^{\omega=c-z}, \quad (2)$$

$$H_z(x, y, z, \sigma) = \sigma \frac{v}{|v|} \frac{\omega}{|\omega|} \times \operatorname{arctg} \frac{u|v|}{|\omega| \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2}} \Bigg|_{u=-x}^{u=a-x} \Bigg|_{v=-y}^{v=b-y} \Bigg|_{\omega=-z}^{\omega=c-z}, \quad (3)$$

where a , b and c are the sides of the magnet.

N. E. Kuleznev, P. A. Polyakova, and V. S. Shevtsov,
Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2018, **82**, 974

wersja oryginalna: Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Fizicheskaya, 2018, Vol. 82, No. 8, pp. 1076

Przykładowa mapa składowej x gradientu H^2 dla $H_{zew} \neq 0$

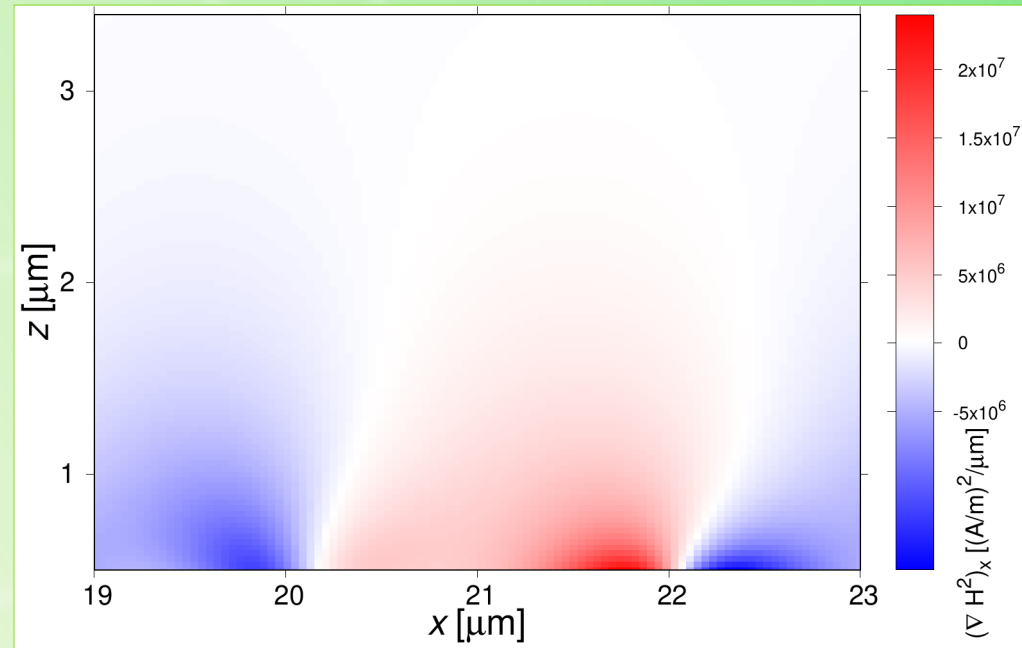
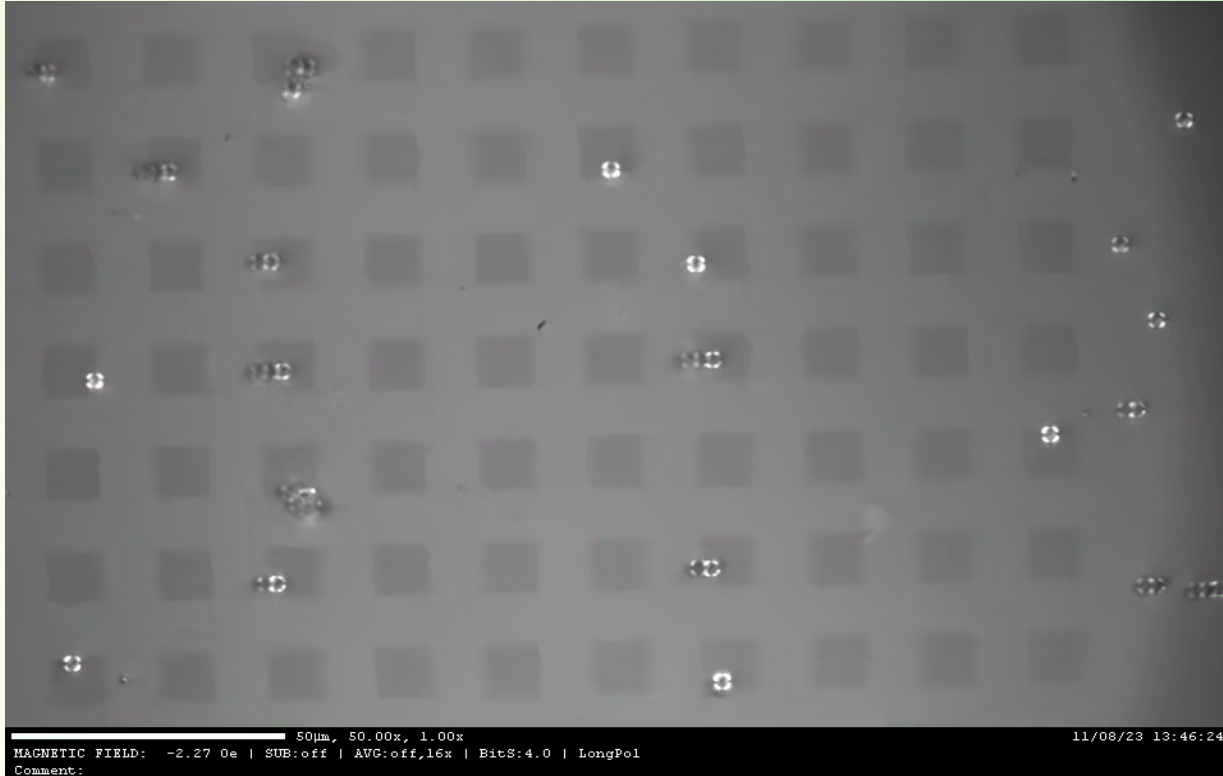


FIG. 4. x -component of the gradient of square the magnetic field strength produced by the array of 11×11 , 10 nm thick, square cuboids with $a = 2 \mu\text{m}$, over a central square, in its xz symmetry plane (square edges are at $x = 20 \mu\text{m}$ and $x = 22 \mu\text{m}$). The squares, embedded in a non-magnetic matrix, are magnetized perpendicularly to the plane of the sample with a constant magnetization of $M_{\text{eff}} = 1 \text{ MA/m}$. The external field is: $H_x = 1.59 \text{ kA/m}$, $H_z = -1.59 \text{ kA/m}$. The height h relates to the distance from a bottom face of the cuboid. A numerical derivative is calculated using symmetric difference quotient with coordinate changes of $0.0001 \mu\text{m}$.

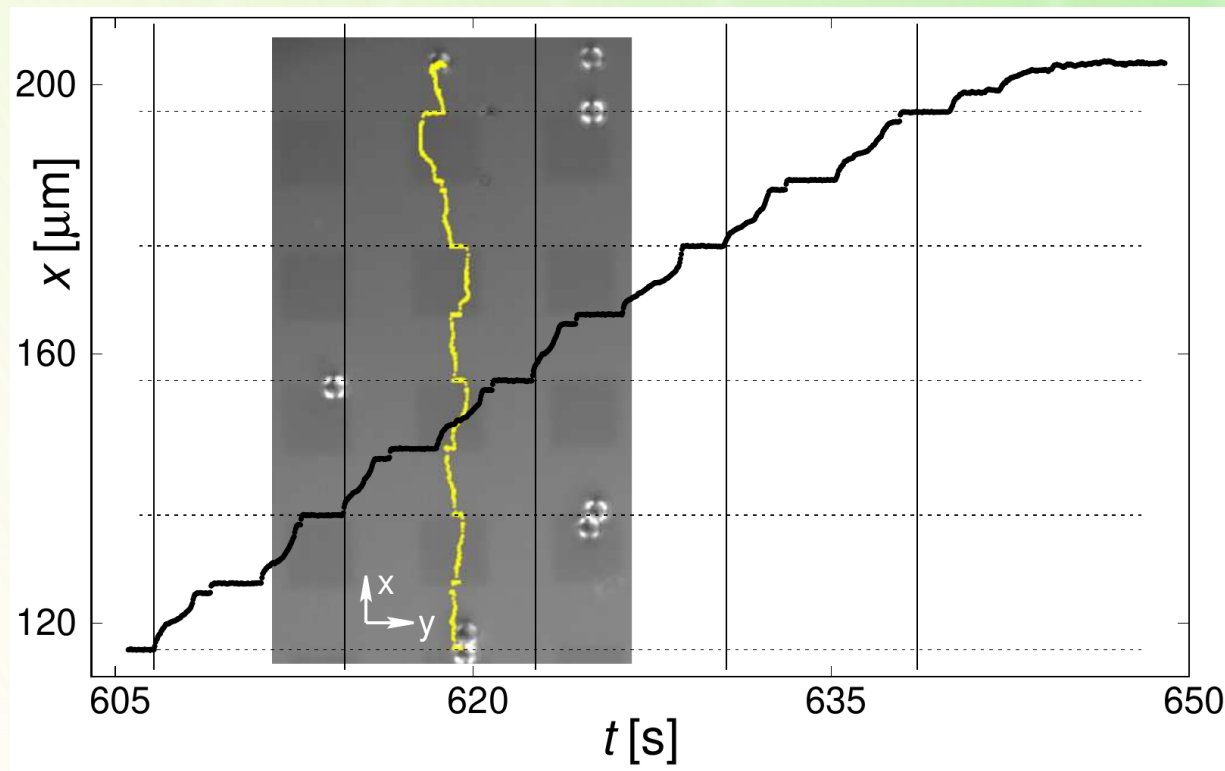
Magnetoforeza – trajektorie eksperymentalne



Kliknij ilustrację by odtworzyć wideo

- $f_{\text{przełączania}} = 0.125 \text{ Hz}$
- stałe co do wartości $H \approx 2.25 \text{ kA/m}$
($\approx 28 \text{ Oe}$)
- okres przestrzenny ($20 \mu\text{m}$)
znacznie większy niż rozmiar KSP
(średnica = $2.8 \mu\text{m}$)

Magnetoforeza – trajektorie eksperymentalne



- $f_{\text{rot}} = 0.125 \text{ Hz}$
- okres przestrzenny znacznie większy niż rozmiar KSP

FIG. 3. Exemplary magnetophoretic trajectory of one SPB over the array of $10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}^2$ squares bombarded with $15 \times 10^{13} \text{ Ga}^+/\text{cm}^2$ ion dose. The trajectory is shown as an x -coordinate versus time (black curve) or as a line in the xy -plane (yellow curve). The M_{eff} of the squares is parallel to that of the pristine matrix. The trajectory was recorded with the external field of $\sqrt{2} \times 1.59 \text{ kA/m}$ repeatedly switching direction with $f_{\text{rot}} = 0.125 \text{ Hz}$. The field switched by 90° starting with an angle of $\pm 45^\circ$ to the normal. The vertical lines, spaced by 8 s , correspond to one period of the field cycle (T_{rot}). The horizontal dashed line spacing is equal to the the array's lattice spacing. The trajectory was traversed from the bottom to the top.

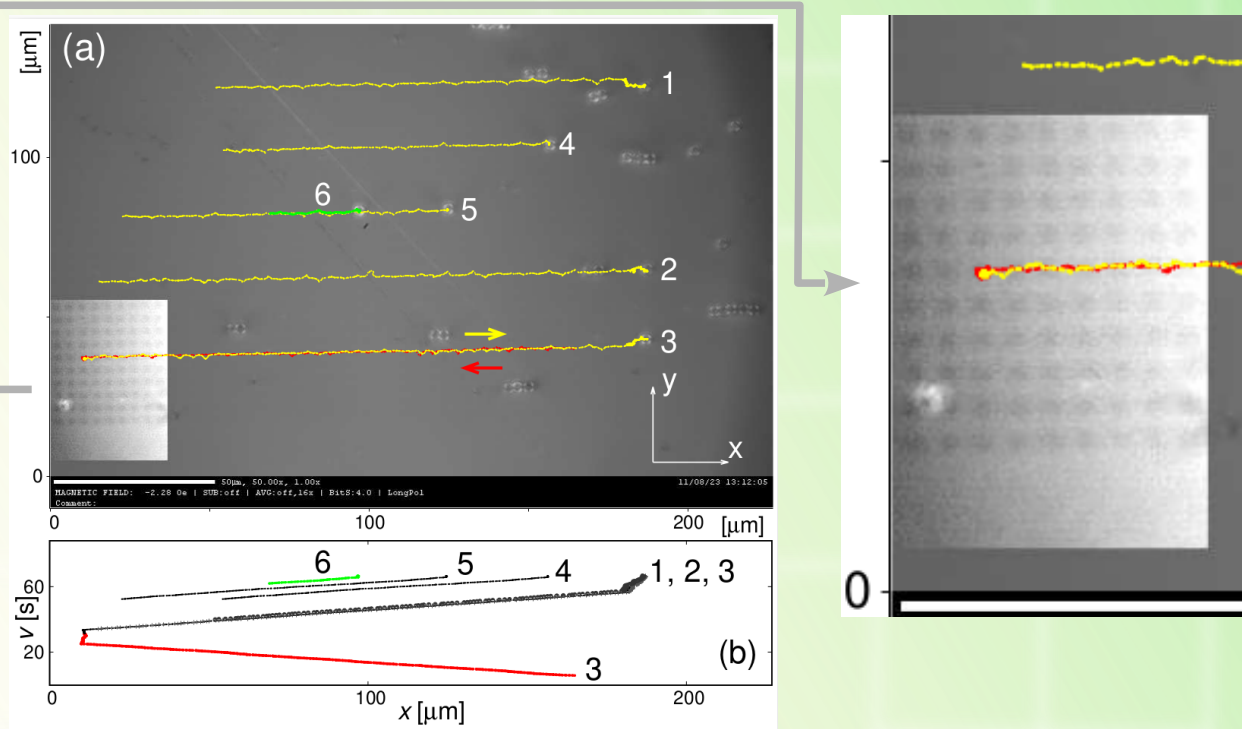
Magnetoforeza – trajektorie eksperymentalne



- $f_{\text{przełączania}} = 2 \text{ Hz}$
- 30 – 60 klatek/s
- period przestrzenny – $4 \mu\text{m}$
- wszystkie KSP poruszają się z jednakową prędkością efektywną (uśrednioną po kilku okresach przełączania pola)

Kliknij ilustrację by odtworzyć wideo

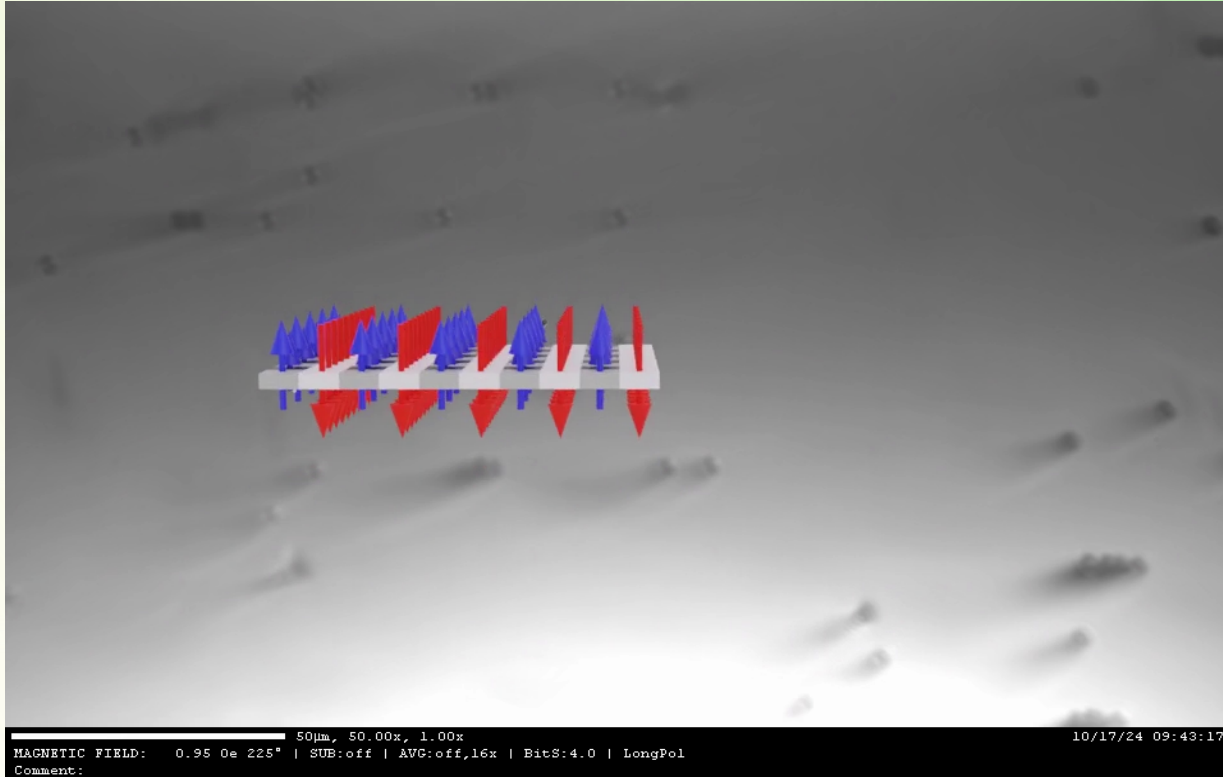
Magnetoforeza – trajektorie eksperymentalne



- $f_{\text{rot}} = 0.125 - 12 \text{ Hz}$
- 30 – 60 klatek/s
- wszystkie KSP poruszają się z jednakową prędkością efektywną (uśrednioną po kilku okresach przełączania pola)

Figure 3. (a) Selected, meaning not representative (see the text), traces of the SPB's trajectories superimposed on the frame from the corresponding movie (see the movie no. 2 in SI). All traces end to the right (the individual tracked beads are visible there). During the experiment the field of $\sqrt{2} \times 1590 \text{ A/m}$ strength was switched (see Fig. 7) at 2 Hz frequency. The traces are colored for better visibility. The red part of one trace corresponds to the movement in the opposite direction [compare (b)]. The bright rectangle in the lower-left corner of the image accentuates the underlying magnetic structure with $2 \mu\text{m}$ wide squares; it was obtained by increasing the contrast of the average of 9 frames of the movie centered at the one shown in the rest of the image. (b) The x-coordinates of the beads/traces as a function of time showing that they all move with the same average velocity; note that three traces, ending at $x \approx 180 \mu\text{m}$, correspond to in unison motion of the beads.

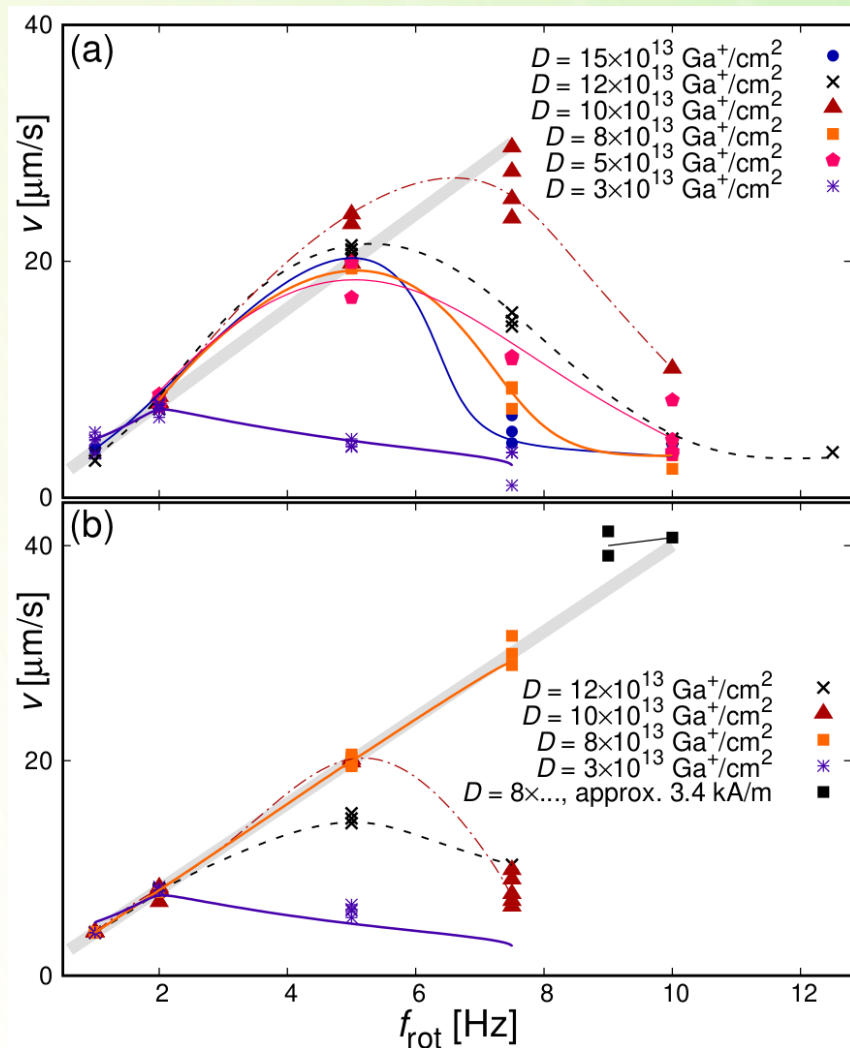
Magnetoforeza – trajektorie eksperymentalne



Kliknij ilustrację by odtworzyć wideo

- $f_{\text{przełączania}} = 1 - 7 \text{ Hz}$
- poniżej krytycznej częstotliwości przełączania KSP poruszają się z jednakową prędkością efektywną
- powyżej $f_{\text{przełączania}} \approx 7 \text{ Hz}$ kulki nie zdążą przemieścić się do nowego minimum energii przed jego zmianą na punkt nieekstremalny

Magnetoforeza – trajektorie eksperymentalne



- magnetoforeza obserwowana jest zarówno dla równoległego jak i antyrównoległego ustawienia namagnesowań matrycy i bombardowanych kwadratów
- maksymalna częstotliwość dla której obserwuje się ruch w modzie zgodności fazy („phase-locked”), f_c , zależy od algebraicznej różnicy namagnesowań matrycy i kwadratów

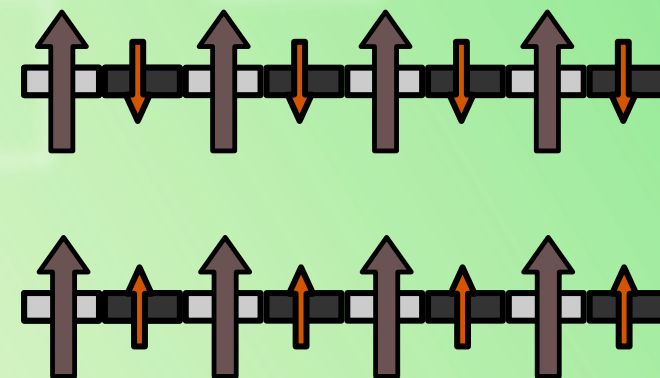
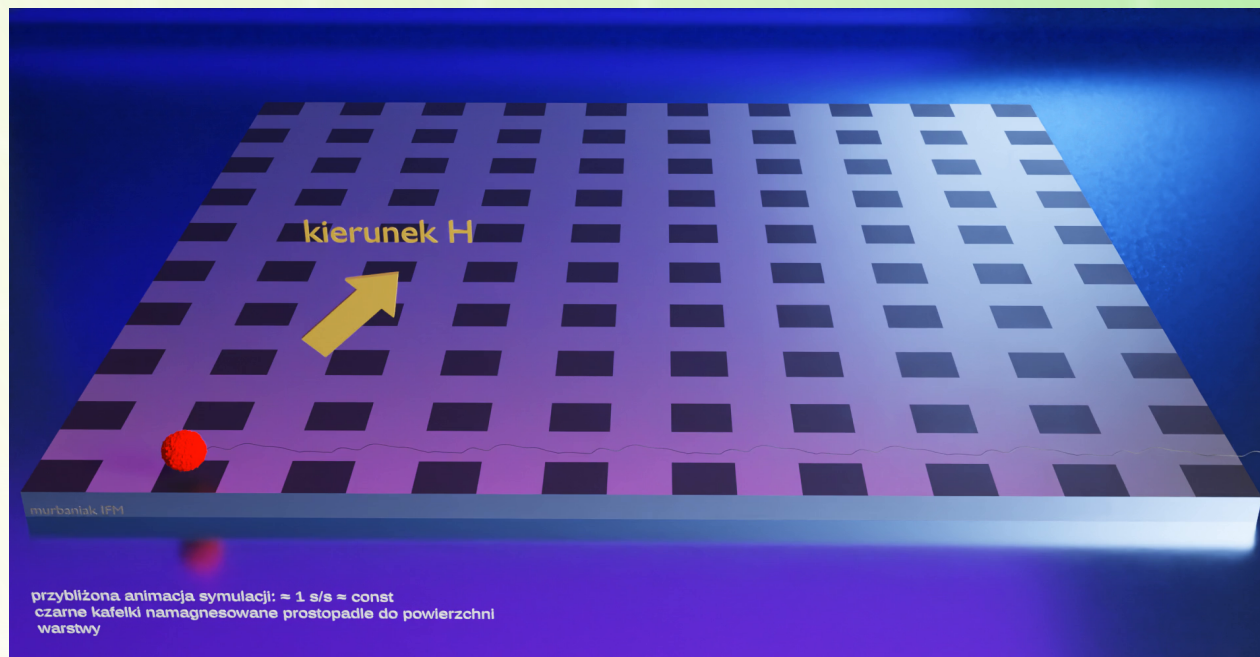


Figure 4. Dependencies of average velocity of the SPBs on the switching frequency of the magnetic field of $\sqrt{2} \times 1590$ A/m, for parallel (a) and antiparallel (b) nominal orientations (see the text) of the effective magnetization in the matrix and in the bombarded squares (see Fig. 2). The squares were $2 \mu m$ wide. The dependencies for bombardments with various doses of Ga^+ ions are shown. The faint thick straight lines correspond to the “phase-locked” regime (see the text) with $v = 4 \cdot f_{rot}$ [μm/s]; the other lines are just for better viewing. The eye-guiding line for $D = 3 \times 10^{13} Ga^+/cm^2$ is the same in (a) and (b). Note that in (b) black squares correspond to higher applied field. For the discussion of errors see Section 4.

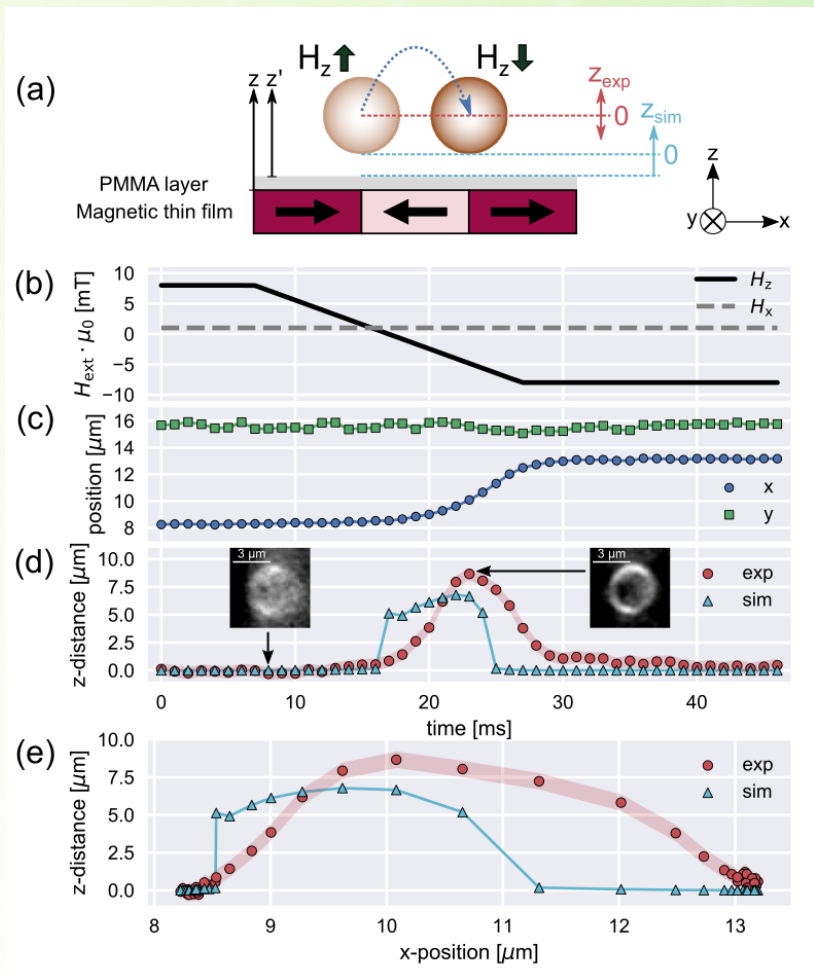
Magnetoforeza – trajektorie symulowane



- symulacje w przybliżeniu prawidłowo odzwierciedlają przebiegi położenia cząsteczek w funkcji czasu dla $f_{\text{przełączania}} < f_c$
- symulacje wskazują, że podczas ruchu zmienia się odległość KSP od podłoża
- dla ustalonego pola zmiennego trajektorie istotnie zależą od parametrów KSP (podatność magnetyczna, oddziaływanie z podłożem etc.)

Kliknij ilustrację by odtworzyć wideo

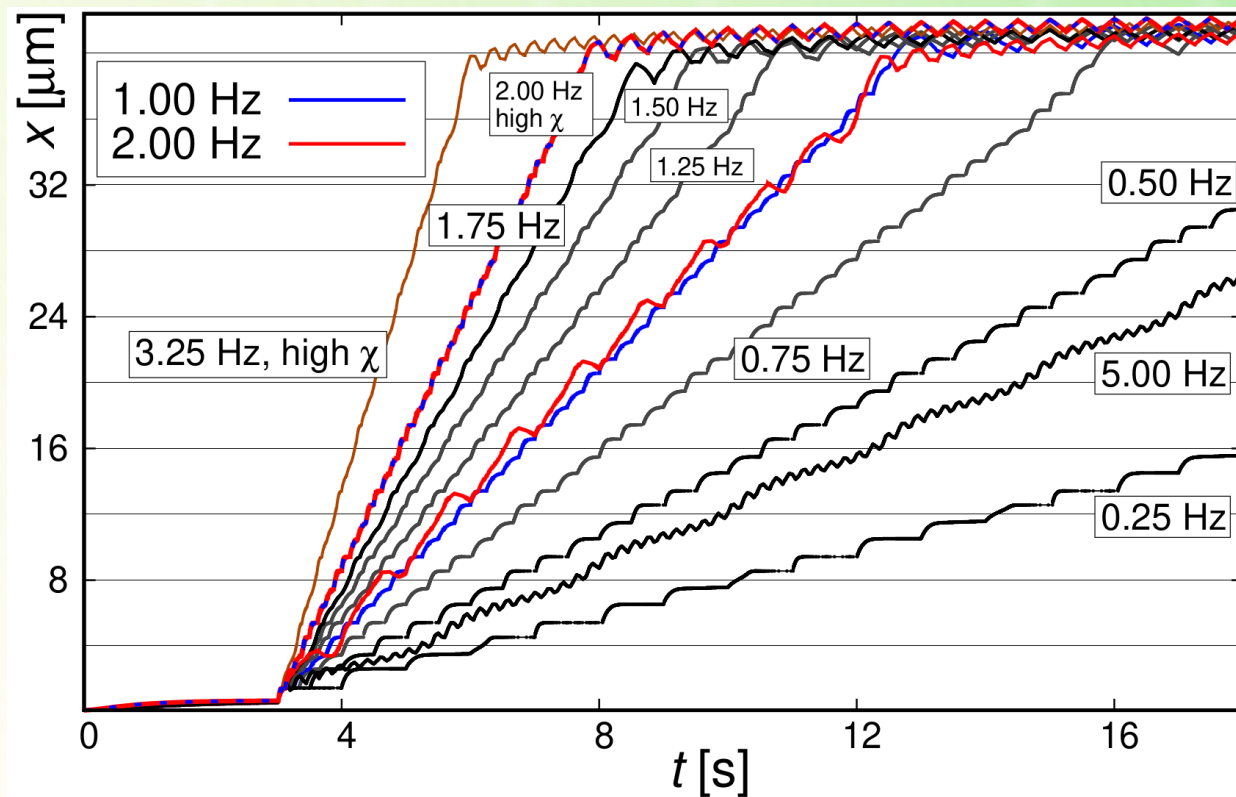
Odległość kulka – podłoże - eksperyment



- mikroskopia optyczna pozwala wyznaczyć położenie kulki względem podłoża (odległość) – gradient Tenebauma (standardowa miara ostrości obrazu)
- układ „podłoże magnetyczne i kulki” przesuwany w z -cie względem układu optycznego za pomocą piezoelementu (krok 25 - 50 nm)

Figure 3. 3D analysis of transport dynamics for 4 μm sized SPPs within a dynamically transformed MFL. **(a)** Sketch of one transport step for the SPP above a hh/tt magnetic stripe pattern (black arrows) after changing the external magnetic field in z -direction. The blue arrow indicates the expected “hopping” like motion of the SPP. Reference positions for the normalization of the experimentally determined vertical movement (z_{exp}) and the theoretically estimated equilibrium distance (z_{sim}) are indicated. Relevant forces for the estimation of z_{sim} were calculated along the indicated vertical axes z and z' (see Supporting Information S5). **(b)** Applied external magnetic fields as a function of time for one pulse sequence. Black solid line: field in z -direction, grey dashed line: field in x -direction. **(c)** Plot of an exemplary SPP trajectory: determined x - (blue circles) and y - (green squares) SPP-center coordinates as functions of time. **(d)** Experimentally determined z -SPP center coordinates, relative to the equilibrium position of the SPP before the z -field change, superposed on the lateral movement (red circles). The initial z -position before the z -field change has been normalized to zero. Red shaded areas indicate the fit uncertainty for the used z -coordinate calibration function. For comparison, theoretical equilibrium distances between SPP and the substrate surface were computed (cyan triangles). The insets show background-subtracted microscopic images of the SPP at the indicated time. Changes in SPP sharpness and thereby z -position are observable. **(e)** Plot of determined z -positions in dependence on the x -positions for an SPP during a transport step. Again, red circles represent normalized experimental data (with the red shaded area as the uncertainty), while the cyan triangles depict simulated equilibrium distances. The data normalization was performed as described for **(d)**. Data points of x -, y -position, and the simulated z -distance were connected to provide a guide to the eye.

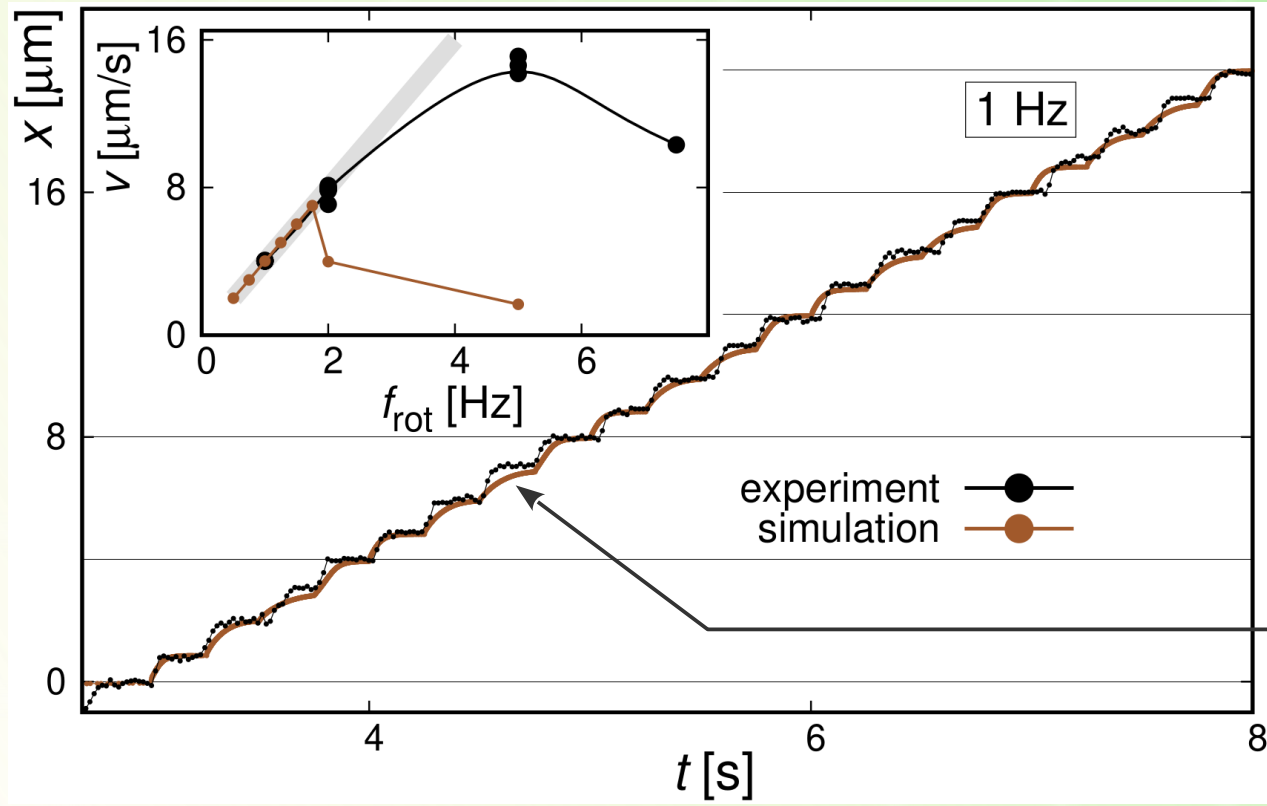
Magnetoforeza – trajektorie symulowane



- symulacje nie przewidują prawidłowo częstotliwości krytycznej f_c – przybliżony charakter parametrów (podatność KSP, namagnesowanie warstwy, potencjał DLVO etc.)
- charakter zmian trajektorii w funkcji częstotliwości odwzorowany jest prawidłowo
- zwiększenie podatności KSP, podobnie jak amplitudy przełączanego pola jednorodnego, zwiększa wartość f_c

Figure 5. Simulated trajectories (see the Section 4.3) of the beads (x -coordinates), moving over the array of $2 \mu\text{m}$ cubes, for various frequencies f_{rot} of the field switching. The beads reaching the outer edge of the magnetic array (at $x = 40 \mu\text{m}$) oscillate there as the field rotates. The horizontal lines spacing corresponds to the spatial period of the structure. The magnetization of the squares was set to $0.5424 \times 10^6 \text{ A/m}$. The brownish and blue-red curves correspond to the SPB with susceptibility of 0.35^{46} ; for the other dependencies $\chi_{\text{eff}} = 0.22^{50}$.

Magnetoforeza – trajektorie symulowane



- symulacje nie przewidują prawidłowo częstotliwości krytycznej f_c – przybliżony charakter parametrów (podatność KSP, namagnesowanie warstwy, potencjał DLVO etc.)
- charakter zmian trajektorii w funkcji częstotliwości odwzorowany jest prawidłowo

Figure 6. Simulated and measured x -trajectories of the bead moving over the array of $2 \mu\text{m}$ cubes with the external field switching at $f_{\text{rot}} = 1 \text{ Hz}$. The inset show the dependencies of the SPB velocities, averaged over several periods of the field variations, on f_{rot} . The experimental curve corresponds to the curve for $D = 12 \times 10^{13} \text{ Ga}^+/\text{cm}^2$ from Fig. 4b and the simulated one is calculated from the data of Fig. 5.

- Bombardowanie zogniskowaną wiązką jonów pozwala na kontrolowane zmiany namagnesowania i pól przełączania warstw Tb/Co.
- Zmiany namagnesowania i pól przełączania nie są niestety niezależne.
- Bombardowanie zogniskowaną wiązką jonów pozwala na łatwe tworzenie układów z trzema różnymi magnetycznie podukładami.
- Ferrimagnetyki Tb/Co są dobrym podłożem do prowadzenia magnetoforezy cząsteczek superparamagnetycznych. Ich stosowanie w środowisku wodnym wymaga użycia warstw ochronnych.

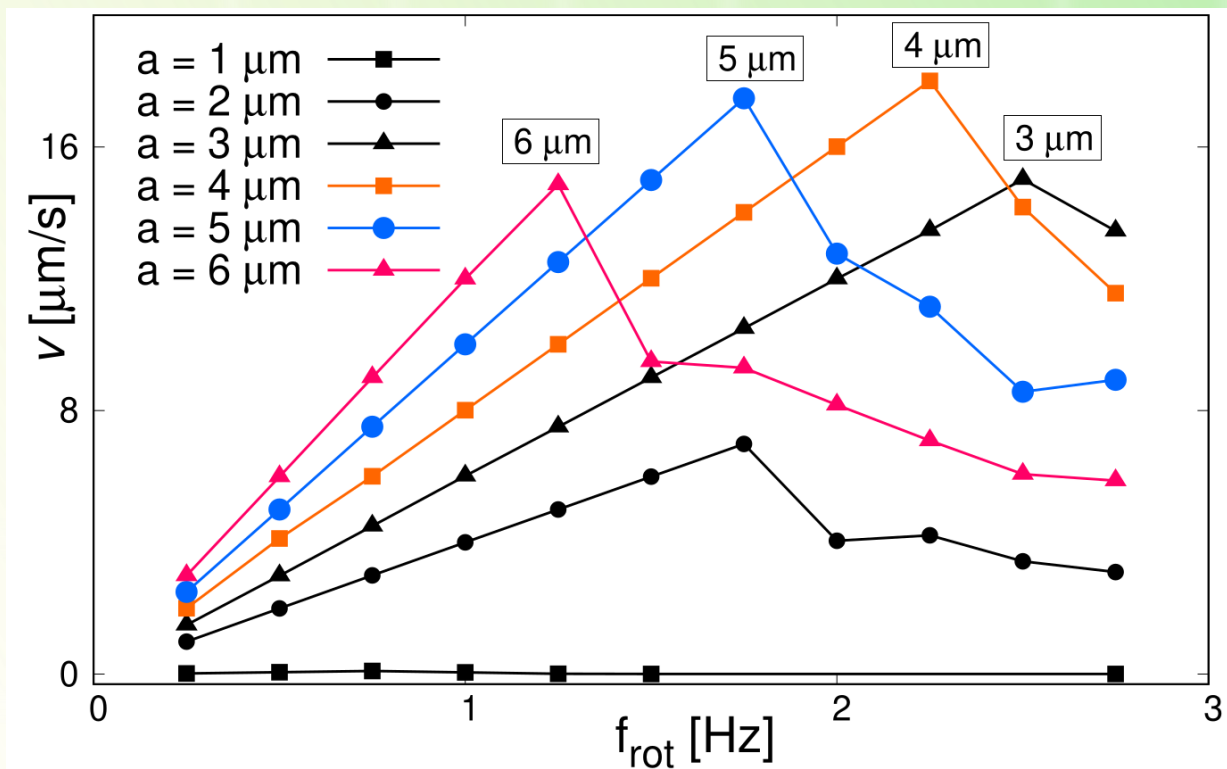


FIG. 7. Simulated dependencies of the $2.8 \mu\text{m}$ diameter SPBs' velocities on f_{rot} for several in-plane spatial periods of square array, 2-a. The dependence for $a = 2 \mu\text{m}$ corresponds to Figs. 5 and 6 of the main text.