

# Magnetoforeza cząsteczek superparamagnetycznych w układach cienkowarstwowych na bazie Co

IFM PAN, Poznań  
2021.04.09

maciej urbaniak  
IFM PAN  
Poznań



# Magnetoforeza cząsteczek superparamagnetycznych w układach cienkowarstwowych na bazie Co

## PLAN

- Układ do realizacji transportu koloidalnego
- Diagnostyka typu lab-on-a-chip
- Magnetoforeza na topograficznie strukturyzowanych podłożach
- Magnetoforeza na ścianach domenowych w układach z oddziaływaniem Działoszyńskiego-Moryi
- Topologicznie chroniona magnetoforeza na nietopograficznie strukturyzowanych periodycznych strukturach magnetycznych

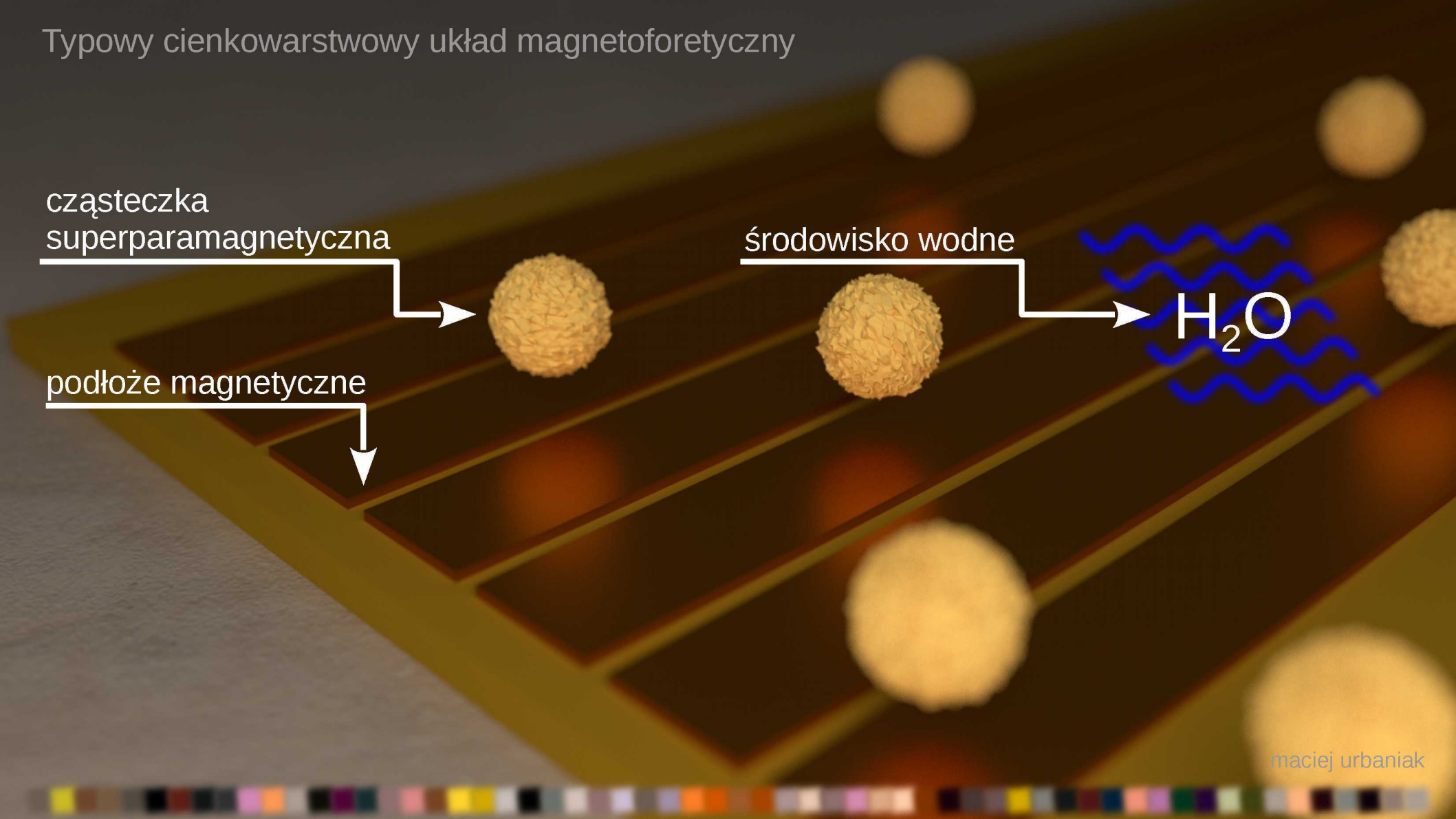
# Typowy cienkowarstwowy układ magnetoforetyczny

cząsteczka  
superparamagnetyczna

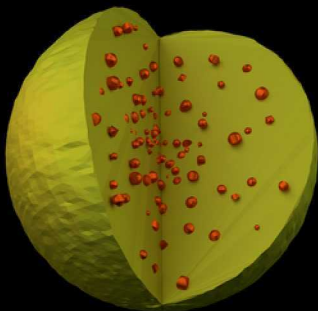
podłoże magnetyczne

środowisko wodne

H<sub>2</sub>O



# Kulki superparamagnetyczne



Cząsteczki superparamagnetyczne to zwykle ferri-  
magnetyczny maghemit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ):

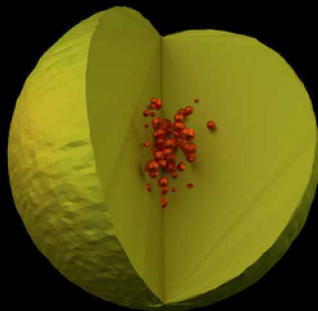
$$M_s \approx 0.48 \text{ MA/m}$$

$$T_c \approx 860 \text{ K}$$

lub ferrimagnetyczny  
maghemit ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ):

$$M_s \approx 0.4 \text{ MA/m}$$

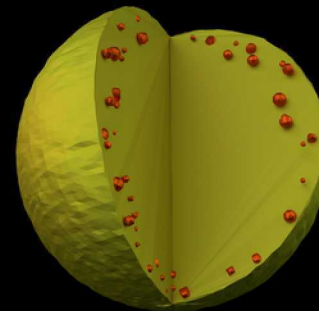
$$T_c \approx 985 \text{ K}$$



Matryca wykonana może  
być z różnorodnych mate-  
riałów:

np.. krzemionka, polysty-  
ren, polietylen, dextran.

Średnice cząsteczek wyno-  
szą od 20 nm (układ bez  
matrycy, np. micromod) do  
10  $\mu\text{m}$ .



Cząsteczki magnetyczne  
rozmszczone mogą być  
jednorodnie w całej matrycy  
lub być skoncentrowane w  
jej środku lub przy po-  
wierzchni.

# Kulki superparamagnetyczne

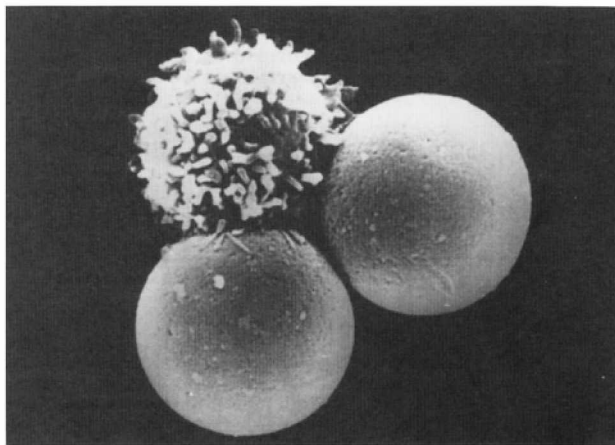
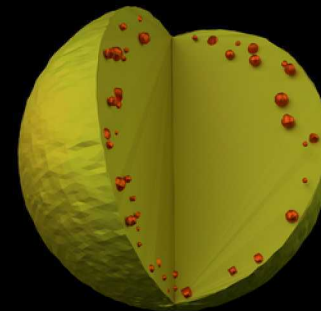
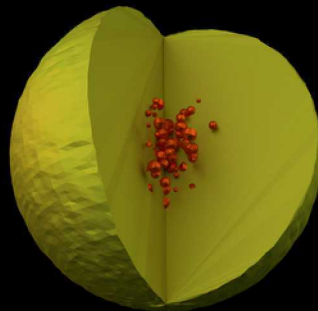
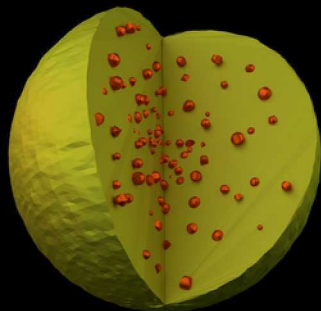


Fig. 3. An electron micrograph showing a T-lymphocyte bound to two Dynabeads M-450. Reproduced, with permission, from Ref. [8].

Do wielu zastosowań powierzchnie kulek są funkcjonalizowane (np. przeciwciałami) tak by selektywnie wiązać się z wybranymi komórkami, wirusami etc.

Źródło: I. Šafařík, M. Šafaříková, *Journal of Chromatography B*, **722**, 33–53 (1999)

## Siła działająca na próbki superparamagnetyczne w polu magnetycznym

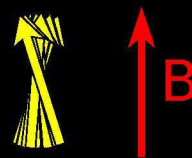
$$\chi = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \rightarrow \chi_p = \frac{M}{H} \quad E = -\vec{m} \cdot \vec{B} \quad \vec{m} = \vec{M} \cdot V \quad V - \text{objętość magnesu}$$

Zaindukowany moment cząsteczki superparamagnetycznej (SPB) jest równoległy do kierunku zewnętrznego pola magnetycznego

Przenosimy SPB z nieskończoności ( $B=0$ ) do miejsca, w którym panuje pole o wartość  $B$ :



$$E = - \int_0^{B(\vec{r})} V \chi_p \frac{B}{\mu_0} dB = - \frac{1}{2\mu_0} V \chi_p B^2$$



Siła działająca na SPB dana jest przez wyrażenie:  $\vec{F} = -\nabla E$

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

Siła działająca na cząsteczkę paramagnetyczną/  
superparamagnetyczną jest proporcjonalna do gradientu  $B^2$

## Siła działająca na próbki superparamagnetyczne w polu magnetycznym

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

Siła działająca na cząsteczkę paramagnetyczną/  
superparamagnetyczną jest proporcjonalna do gradientu  $H^2$

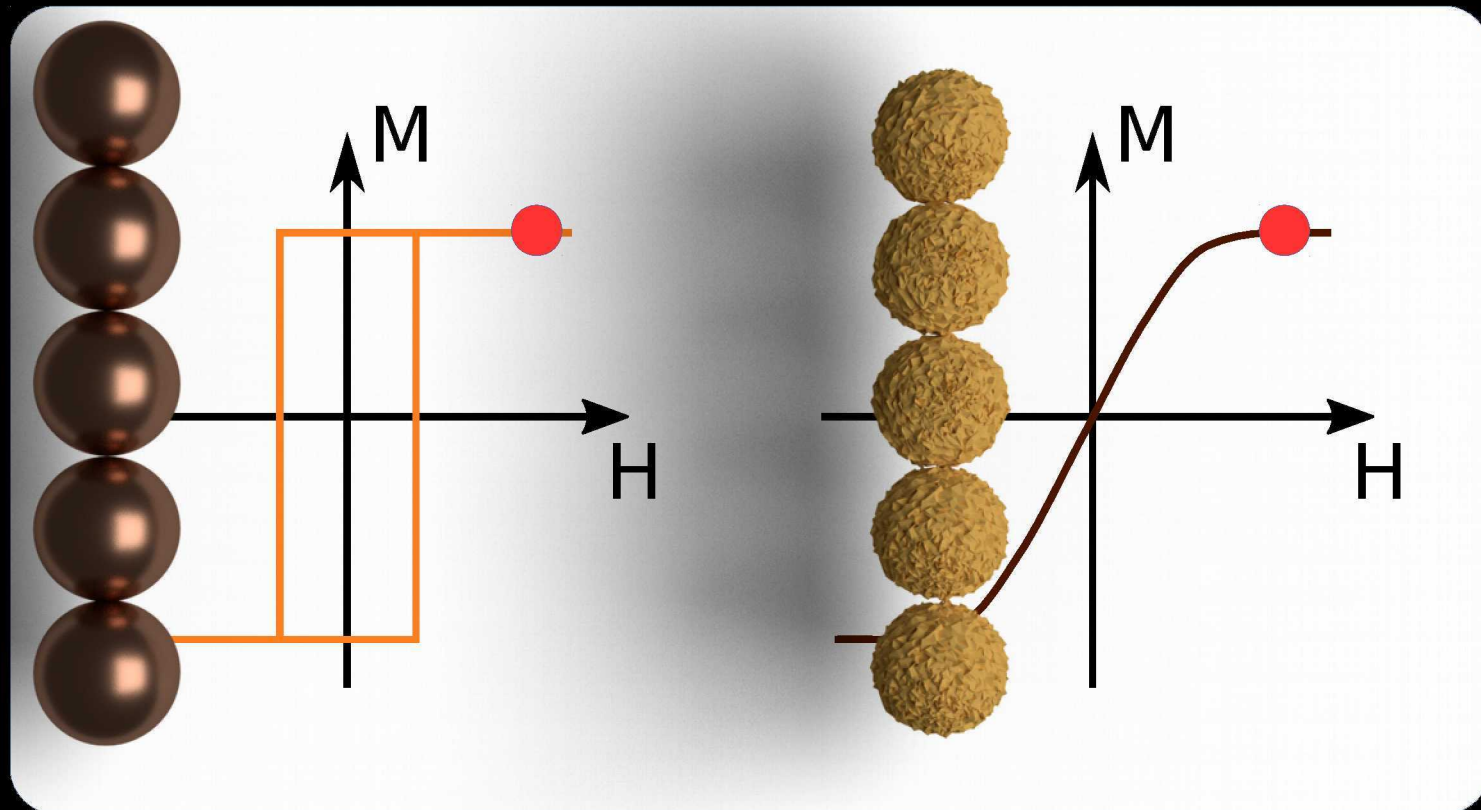
Dodanie bezgradientowego pola magnetycznego do gradientowego pola podłoża magnetycznego pozwala regulować kierunkiem siły magnetycznej działającej na SPB oraz w wielu przypadkach istotnie zwiększyć jej wartość

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

# Kulki ferromagnetyczne i superparamagnetyczne

$$H \neq 0$$

W zewnętrznym polu magnetycznym oba rodzaje kulek wykazują moment magnetyczny – oddziaływanie magnetostatyczne między kulkami może prowadzić do powstawania kompleksów (gdy ruch cząsteczek ograniczony jest do płaszczyzny występować mogą siły odpychania)





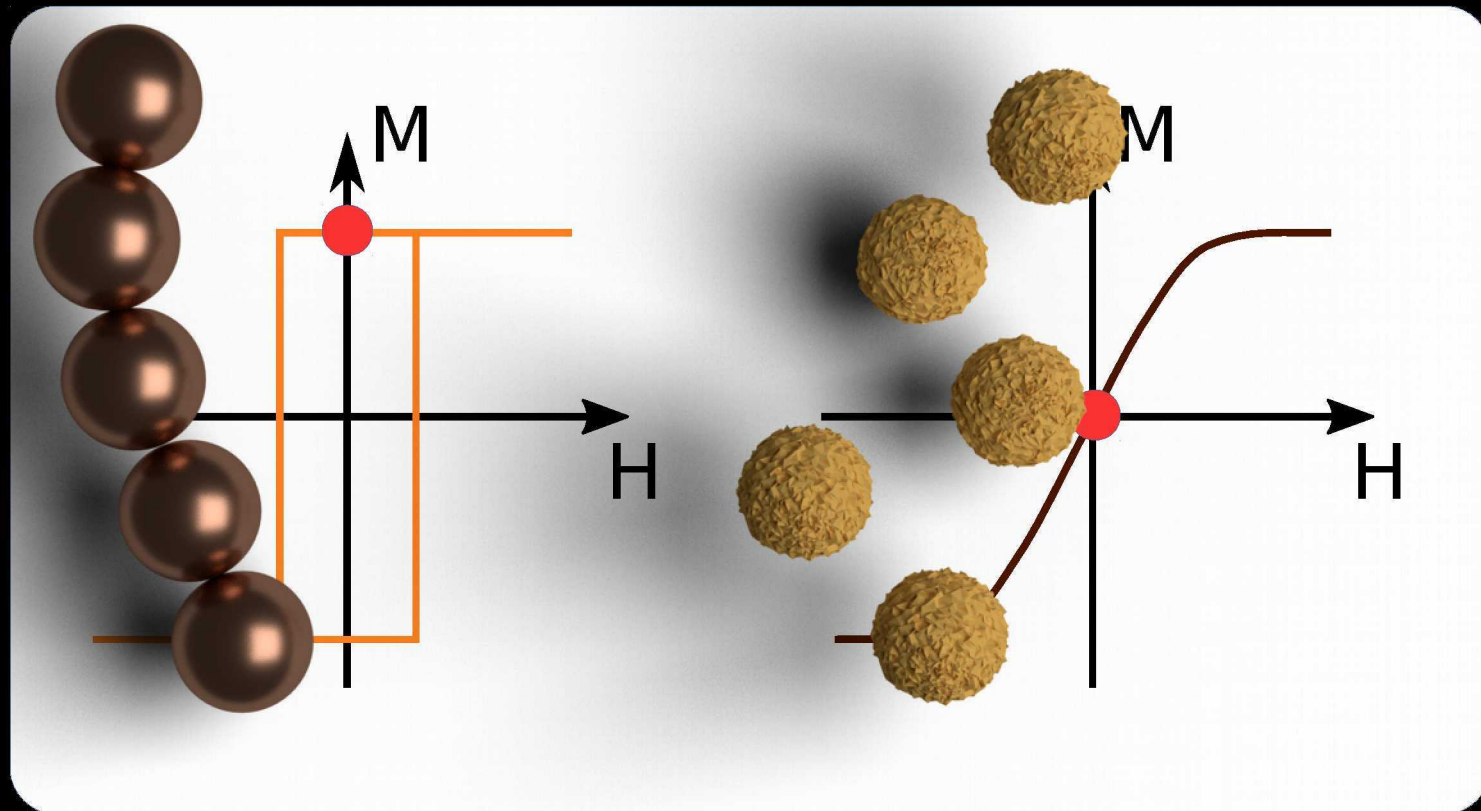
# Kulki ferromagnetyczne i superparamagnetyczne

$$H = 0$$

Wyłączenie pola prowadzi zwykle do fragmentacji agregatów/łańcuchów superparamagnetycznych

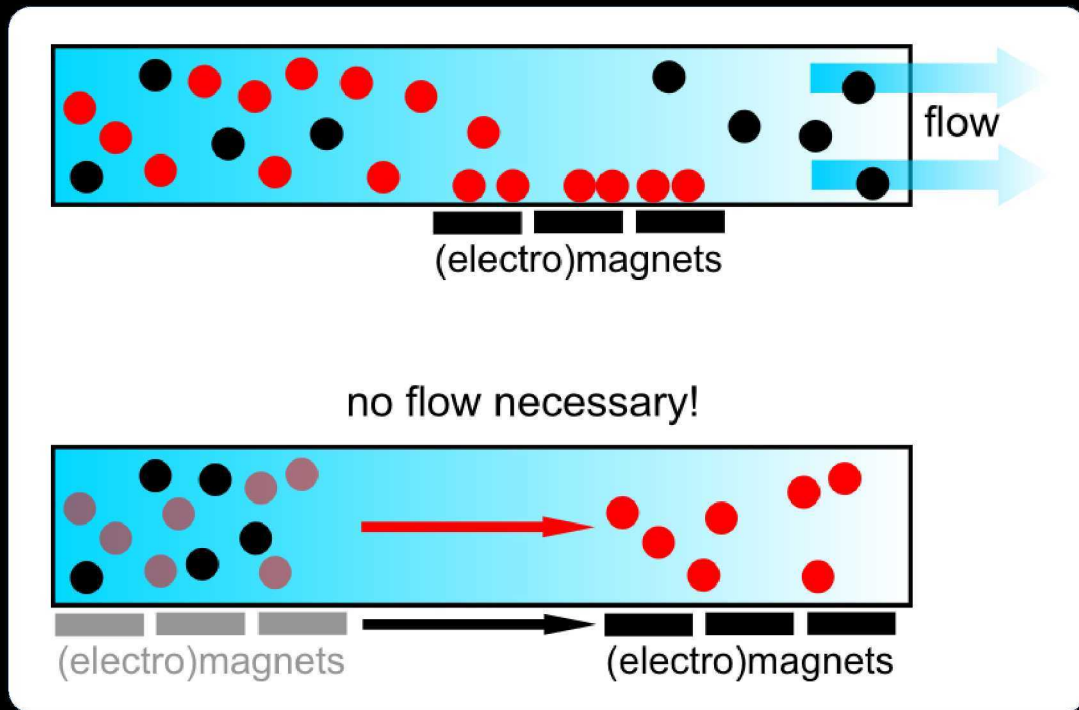
Niekontrolowana agregacja (np. różna od zera remanencja, sklejanie się kulek) prowadzi do:

- utrudnień kontroli ruchu - promień hydrodynamiczny zależy od wielkości agregatu i jego kształtu
- zmiana efektywnej powierzchni wpływa na powtarzalność testów



## Magnetoforeza – typowe procedury

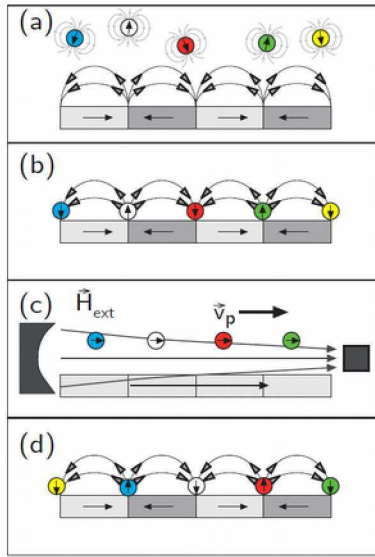
**Magnetoforeza** – wywołany polem magnetycznym ruch cząsteczki magnetycznej w cieczy.  
[en.wiktionary.org]



Wychwytywanie cząsteczek magnetycznych - **oddzielanie**

**Transport** cząsteczek magnetycznych

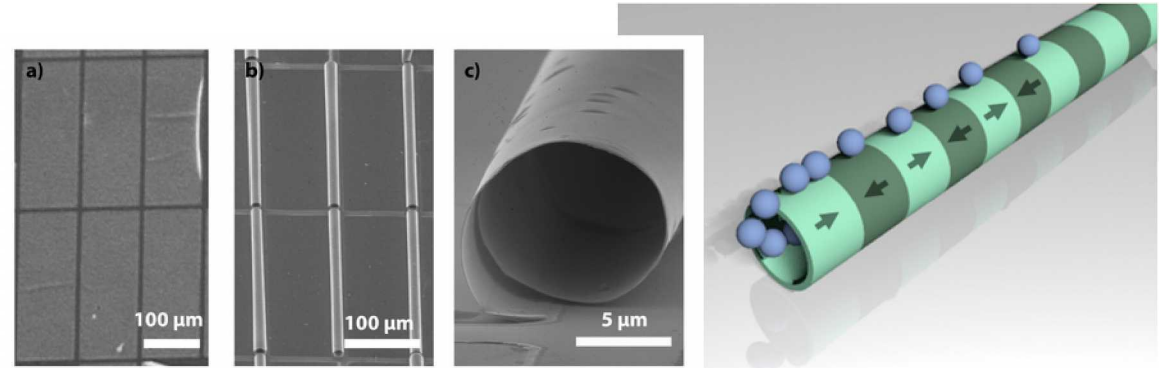
# Magnetoforeza dziś



**Abb. 5.16:** Schematische Darstellung des Konzeptes zum Partikeltransport. (a) Die magnetischen Momente der Partikel richten sich in den Streufeldern der magnetisch strukturierten Probe aus. (b) Die Partikel lagern sich aufgrund der magnetischen Kräfte an den Orten hoher magnetischer Streufelder, d.h. an den Domänenwänden an. (c) Ein externes inhomogenes Magnetfeld sätigt das Substrat und richtet die magnetischen Momente der Partikel neu aus, die dann dem Feldgradienten folgend transportiert werden. (d) Nach Abschalten des externen Feldes lagern sich die Partikel wieder an den Streufeldern der Probe an. Die magnetischen Streufelder der Partikel sind zugunsten der besseren Übersicht nur in (a) eingezeichnet.

T. Weis, praca doktorska, Kassel (2009)

- ruch SPB w **gradientowym** polu zewnętrznym w zmiennym potencjale sztucznej struktury domenowej w warstwach IrMn/NiFe ze sprzężeniem wymiennym (exchange bias)



**Figure 2.** Scanning electron microscopy (SEM) images of  $300 \times 100 \mu\text{m}^2$  sized prestrained layer systems (a) before and (b) after rolling up upon selective release from the substrate. (c) The magnetically stripe patterned exchange bias tubes possess a diameter of about  $10 \mu\text{m}$ .

T. Ueltzhöffer, R. Streubel, I. Koch, D. Holzinger, D. Makarov, O.G. Schmidt, A. Ehresmann, ACS Nano 10, 8491 (2016)

- ruch SPB w **bezgradientowym** polu zewnętrznym w zmiennym potencjale sztucznej struktury domenowej zaindukowanej na powierzchni cylindra
- układ  $\text{Cu}(50\text{nm})/\text{Ir}_{17}\text{Mn}_{83}(10\text{nm})/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}(7.5\text{nm})/\text{Ta}(10\text{nm})$  ze sprzężeniem wymiennym
- → pompy mikrofluidyczne, kontrolowane rezerwuary cząstek

maciej urbaniak

## Magnetoforeza – porównanie z innymi metodami transportu

- elektroforeza wymaga bezpośredniego kontaktu, który może powodować grzanie Joula i elektrolizę
- termoforeza wymaga dużych gradientów temperatury
- dielectroforeza – zmienny pole elektryczne polaryzuje komórki i zmienia ich metabolizm
- pułapkowanie optyczne prowadzi do nadmiernego grzania próbek (zmiana metabolizmu, śmierć komórek), drogi i skomplikowany układ
- akustoforeza (powierzchniowe fale akustyczne) – nadmierne grzanie próbek

### Magnetoforeza:

- ♦ metoda bezkontaktowa
- ♦ nie wpływa na właściwości zawiesiny (pH, koncentracja jonów, ładunek powierzchniowy, temperatura)
- ♦ niski koszt, prosty układ, łatwa operacja

# Magnetoforeza – wpływ medium: prędkość stacjonarna

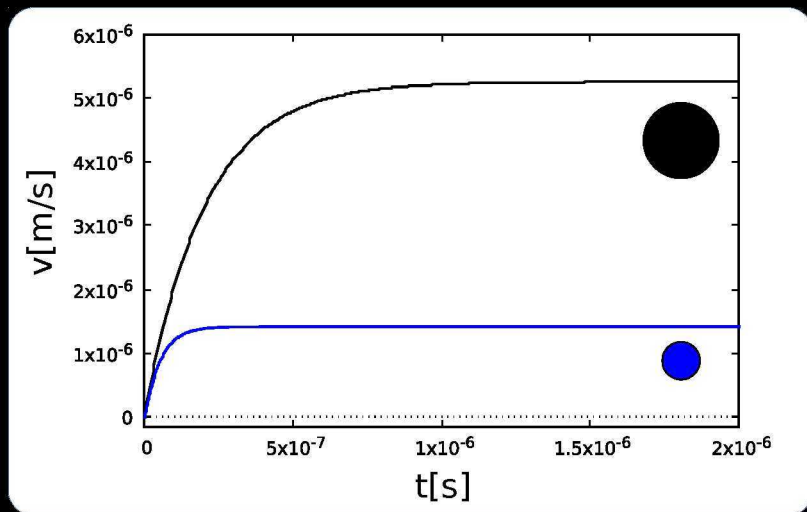
Równanie ruchu cząstki w lepkim płynie (z użyciem wyrażenia Stokesa)

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

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

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

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



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

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

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

Prędkość stacjonarna

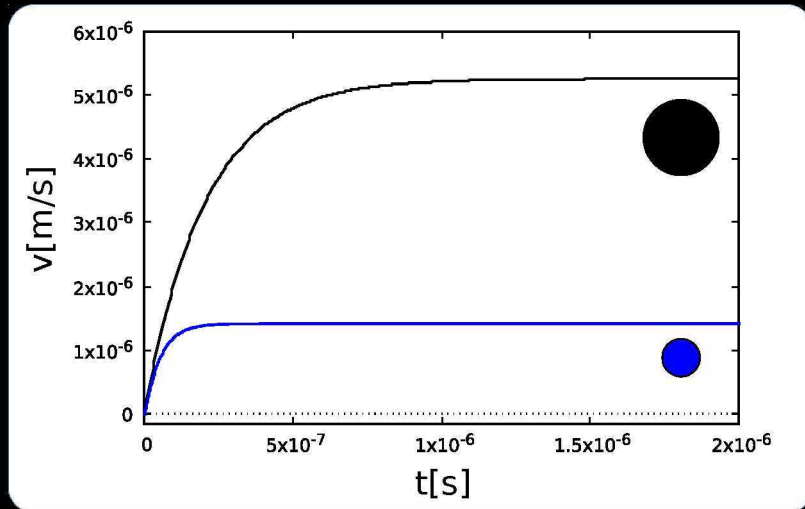
Założono, że siły działające na kulki są proporcjonalne do ich objętości

# Magnetoforeza – wpływ medium: prędkość stacjonarna

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

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

- 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 0.1-10 Hz **można założyć, że SPB poruszają się zawsze z prędkością stacjonarną**



# Magnetoforeza – przykładowy układ eksperymentalny (Kassel)

- 3 zestawy cewek Helmholtza
- krokowa lub ciągła zmiana kierunku pola magnetycznego (czas przełączania mniejszy niż 0.5 ms)
- częstotliwość przełączania 0.1 -100 Hz
- rejestracja obrazu 1000 fps (kamera Optronic CR450x2)

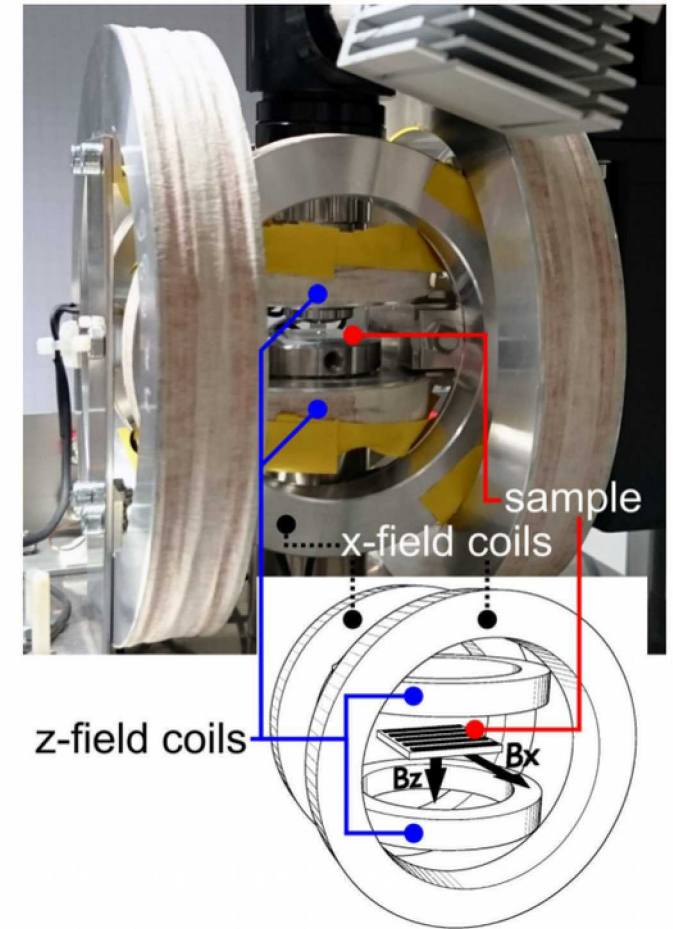


FIG. 2. Photograph of the experimental setup used for the particle transport experiments. The additional sketch shows the orientation of the fields produced by the Helmholtz coils relative to the magnetic stripe structure (shown magnified, black stripes). The outer diameter of  $x$ -field coils is 94 mm.

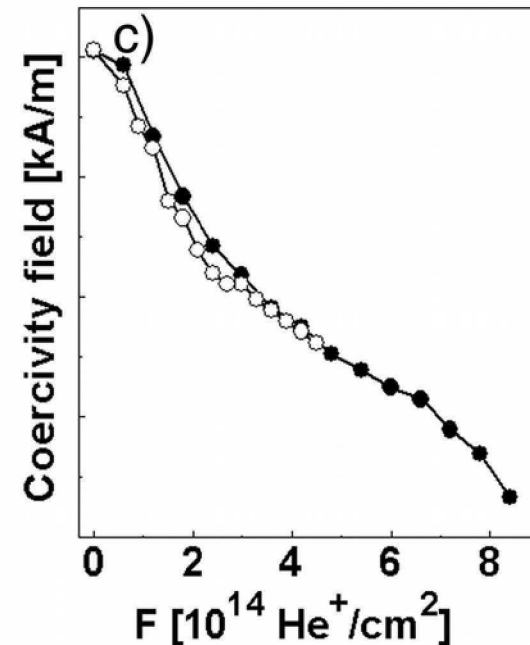
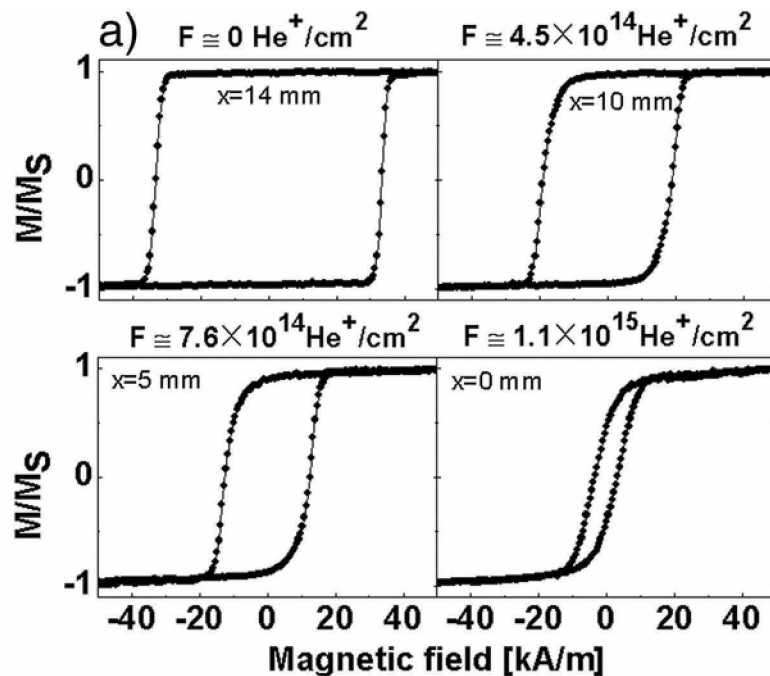
## Przykładowe zastosowania scalonych układów diagnostycznych (lab-on-a-chip)

- badania przesiewowe, testowanie personelu i pensjonariuszy domów seniora – np. SARS COV 2, malaria, denga
- szybkie dostosowanie terapii antybiotykowej do patogenu – np. sepsa
- ograniczenie ordynowania antybiotyków – zapobieganie tworzeniu się lekoopornych szczepów
- testy na obecność toksyn – np. mykotoksyny (przewidywany wzrost przypadków ekspozycji w związku z ociepleniem klimatu)



## ...cienkowarstwowych na bazie Co – wpływ bombardowania jonowego

- umiarkowane dawki jonów pozwalają zmienić pole przełączania
- większe dawki, w zależności od grubości warstw Co, prowadzą do przejścia to anizotropii typu łatwa płaszczyna lub zniszczenia uporządkowania ferromagnetycznego



jony  $\text{He}^+$ , energia 10 keV

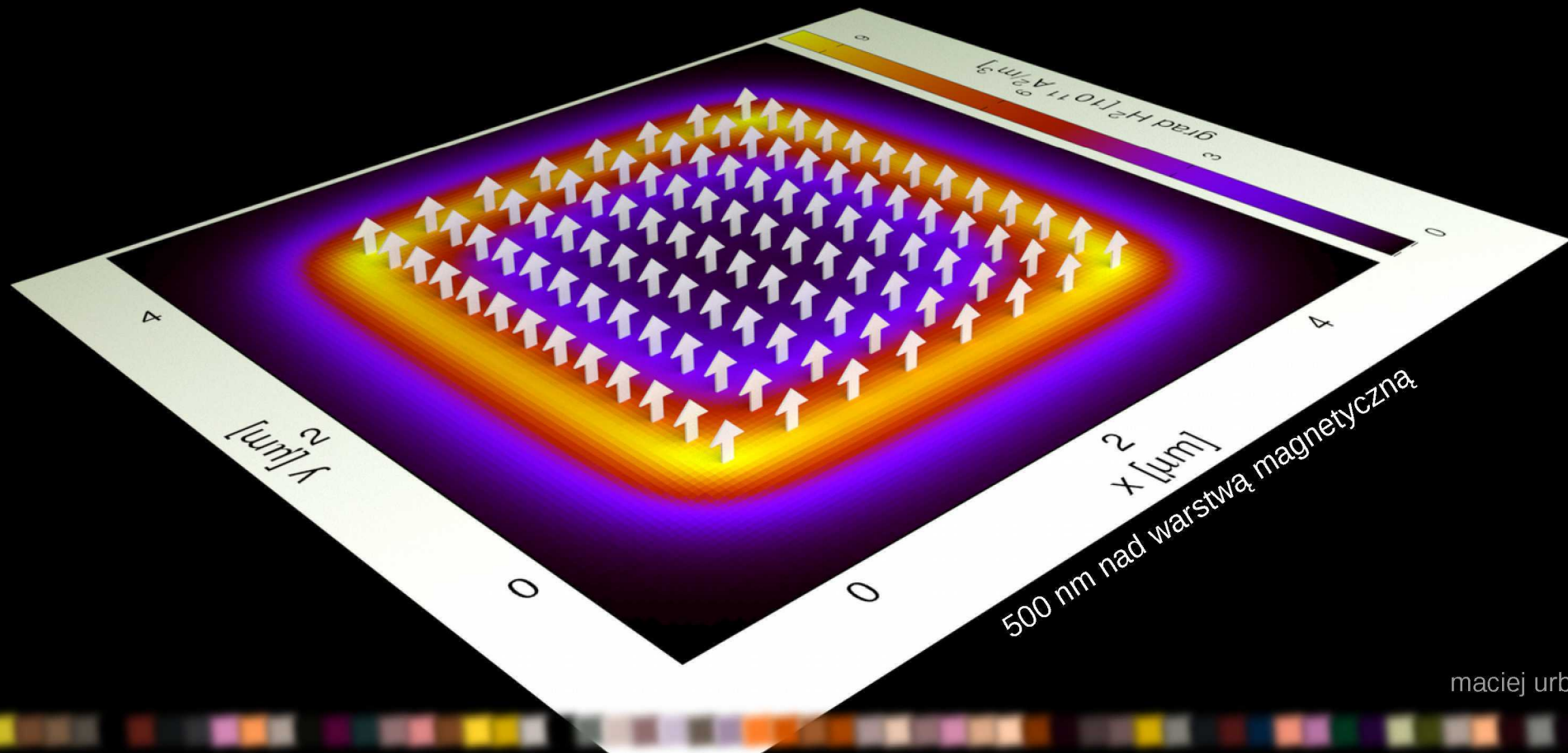
$\text{Si}(100)/\text{Ti}(4\text{nm})/\text{Au}(60\text{nm})/[\text{Co}(0.8\text{nm})/\text{Au}(1\text{nm})]_2$

Moduł gradientu  $H^2$  nad jednorodnie  
namagnesowaną cienką warstwą

Magnes Co

$M_s: 1.42 \times 10^6 \text{ A/m}$

Rozmiar:  $4000 \times 4000 \times 1 \text{ nm}^3$



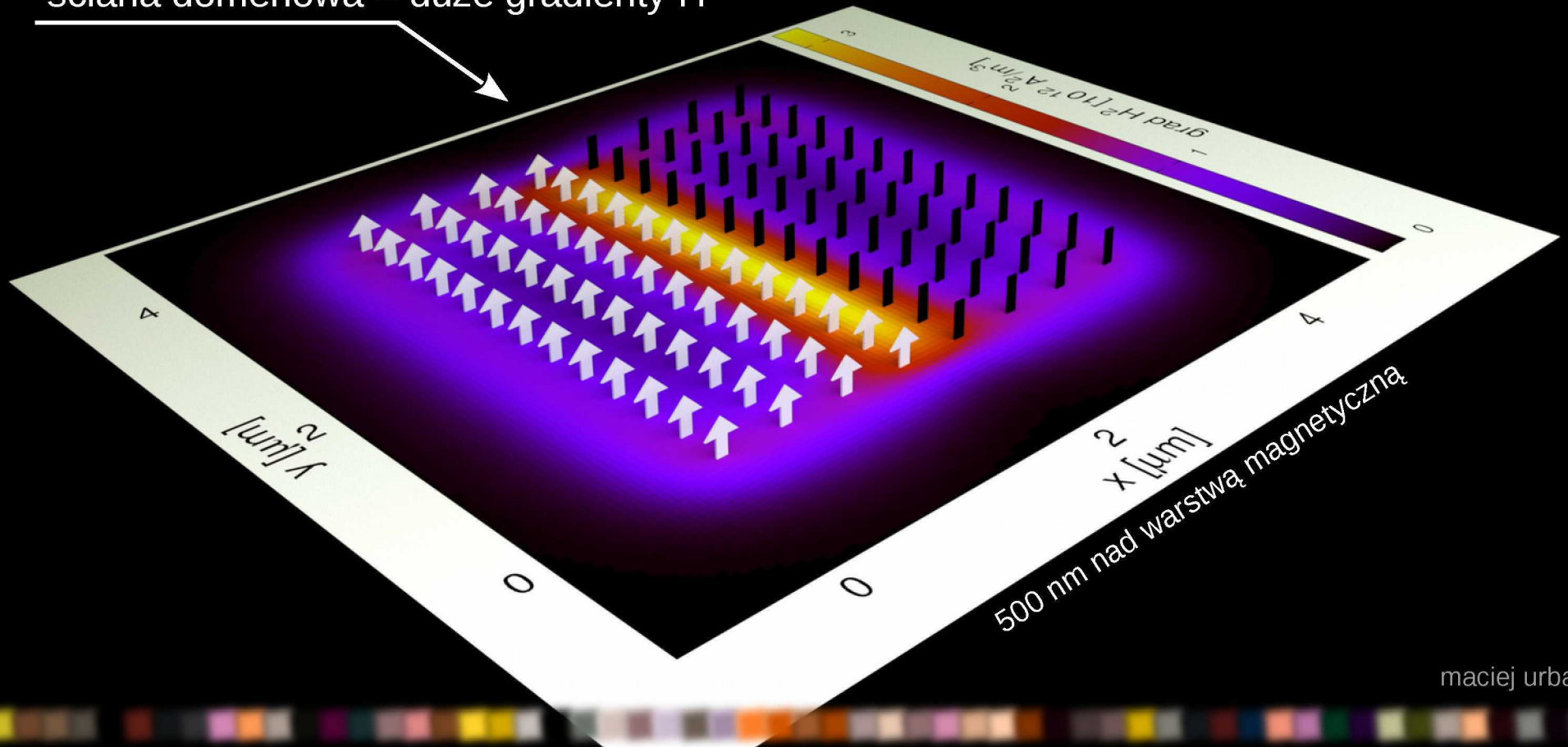
Moduł gradientu  $H^2$  nad **NIEJEDNORODNIE**  
namagnesowaną cienką warstwą

Magnes Co

$M_s: 1.42 \times 10^6 \text{ A/m}$

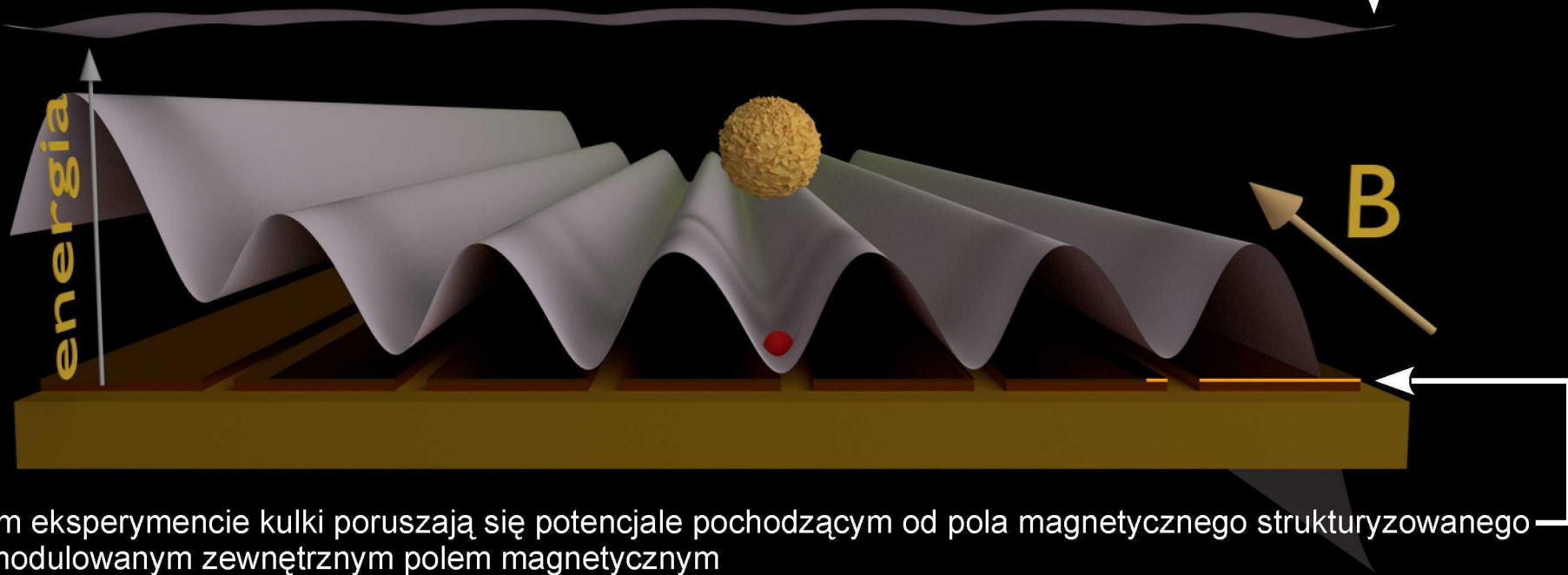
Rozmiar:  $4000 \times 4000 \times 1 \text{ nm}^3$

ściana domenowa = duże gradienty  $H^2$



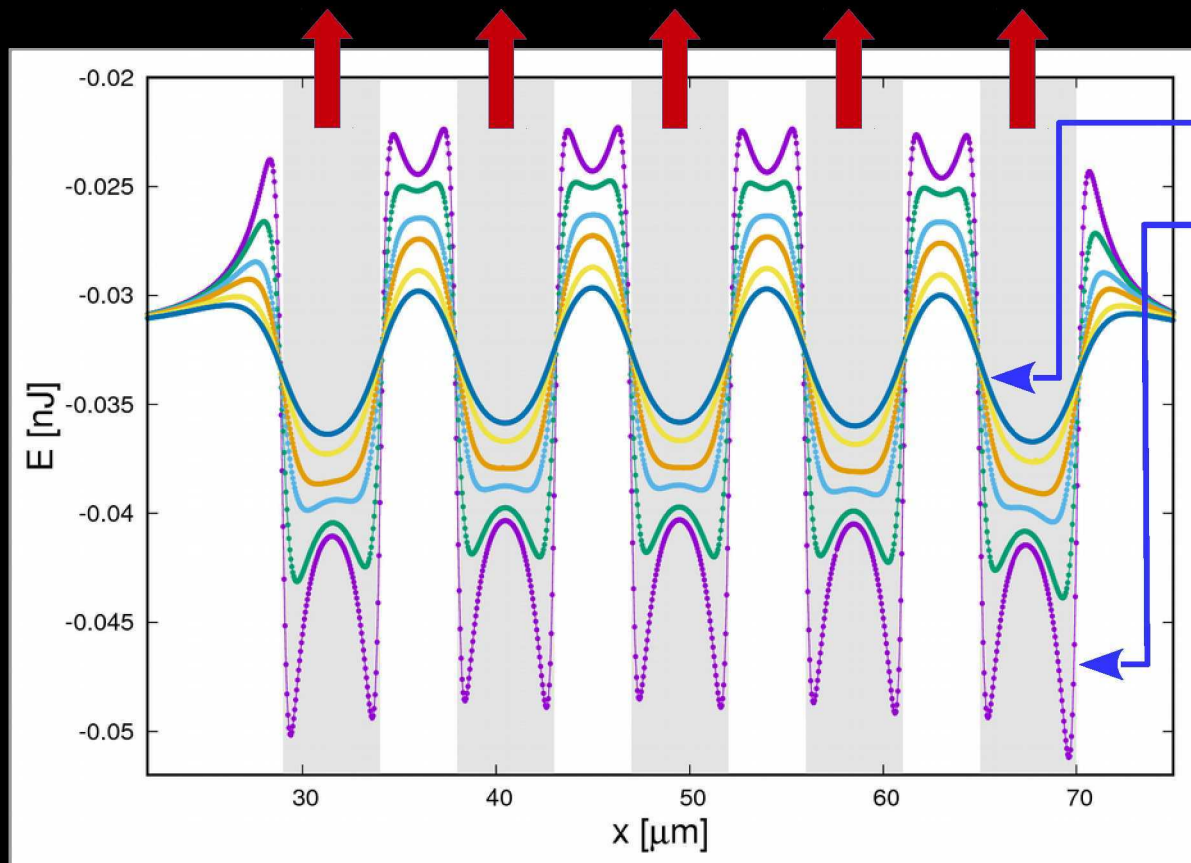
# Krajobraz energetyczny nad podłożem magnetycznym

pole magnetycznego podłoża bez pola zewnętrznego skutkuje znacznie słabszą modulacją energii SPB w funkcji położenia



- w typowym eksperymencie kulki poruszają się potencjale pochodzącym od pola magnetycznego strukturyzowanego podłoża modulowanym zewnętrznym polem magnetycznym
- w pokazanym przypadku „nieskończonych” topograficznych (powierzchnia podłoża nie jest płaska) pasków Co potencjał zależy tylko od dwóch współrzędnych

# Krajobraz energetyczny nad podłożem magnetycznym – wpływ wysokości nad podłożem



2.4  $\mu\text{m}$  nad paskami

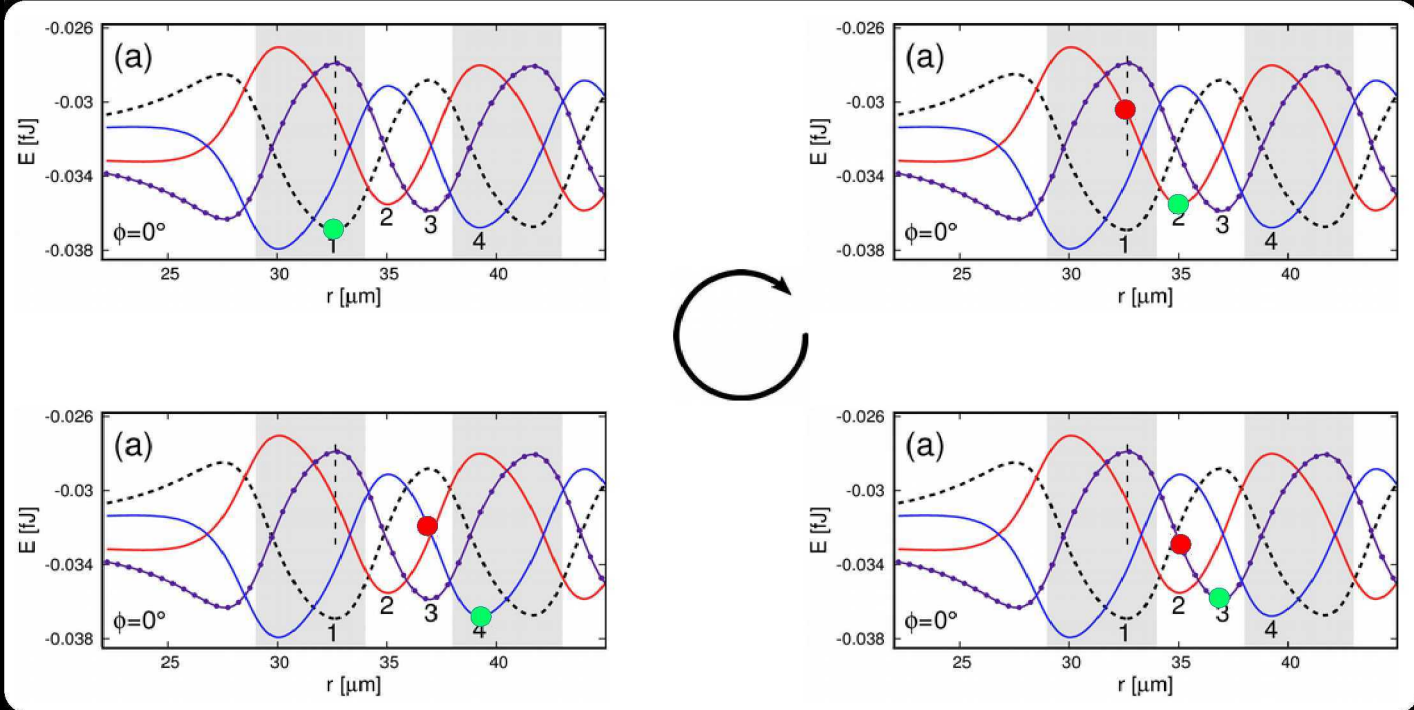
0.5  $\mu\text{m}$  nad paskami

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.

# Wpływ kierunku pola na krajobraz energetyczny – ruch kulek

cykliczne zmiany kierunku pola przesuwają kulkę w jednym okresie do analogicznej pozycji nad następnym paskiem magnetycznym

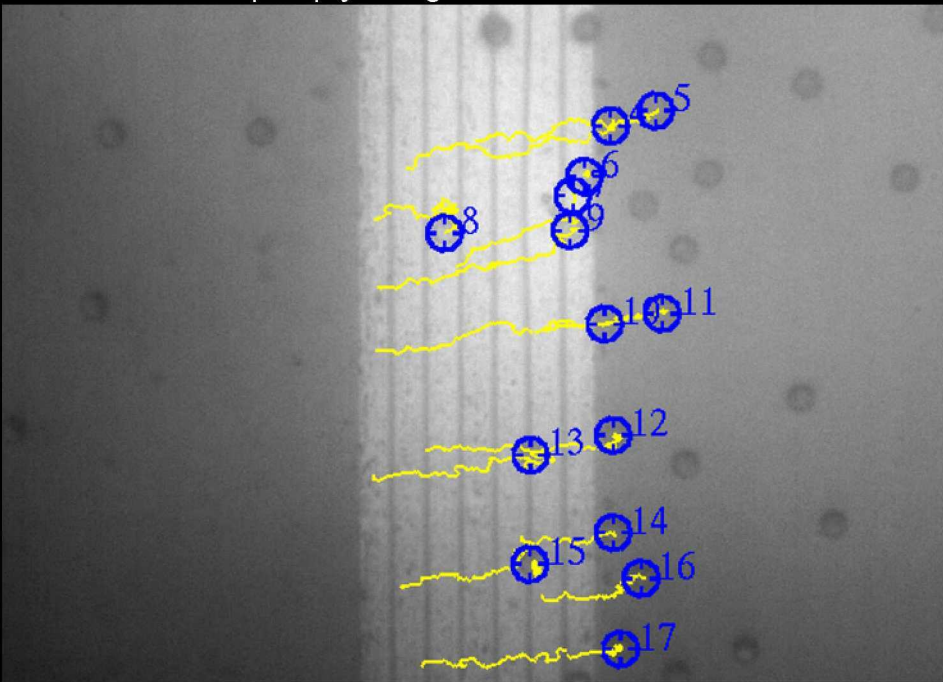


Calculated dependencies of the energy of a 4  $\mu\text{m}$  SPB in the dipole approximation on its  $r$ -coordinate for various orientations of the external magnetic field ( $z_B = 2.4 \mu\text{m}$ ): (a) for  $\phi=0$  Deg and (b) for  $\phi=75$  Deg. The components of the external field in the calculation were  $H_x = 1.2$  kA/m and  $H_z = 1.6$  kA/m. The curves 1–4 correspond to a clockwise change of the external field direction from  $([+H_x, +H_z], [+H_x, -H_z], \dots)$ . The gray-shaded stripes indicate the  $r$ -ranges of the magnetic stripes, and the dashed vertical line in (a) is placed at the minimum energy  $r$ -position of curve "1".

# Ruch kulek nad topograficznymi paskami Co/Au

Ruch kulek pod wpływem cyklicznych zmian pola magnetycznego

obraz z mikroskopu optycznego



Trajektorie kulek śledzone z użyciem programu Video Spot Tracker. CISMM at UNC-CH supported by the NIH NIBIB, No. NIH 5-P41-RR02170

Kulki referencyjne (nie znajdujące się nad paskami magnetycznymi) nie poruszają się quasi-jednostajnie, jak pozostałe SPB.

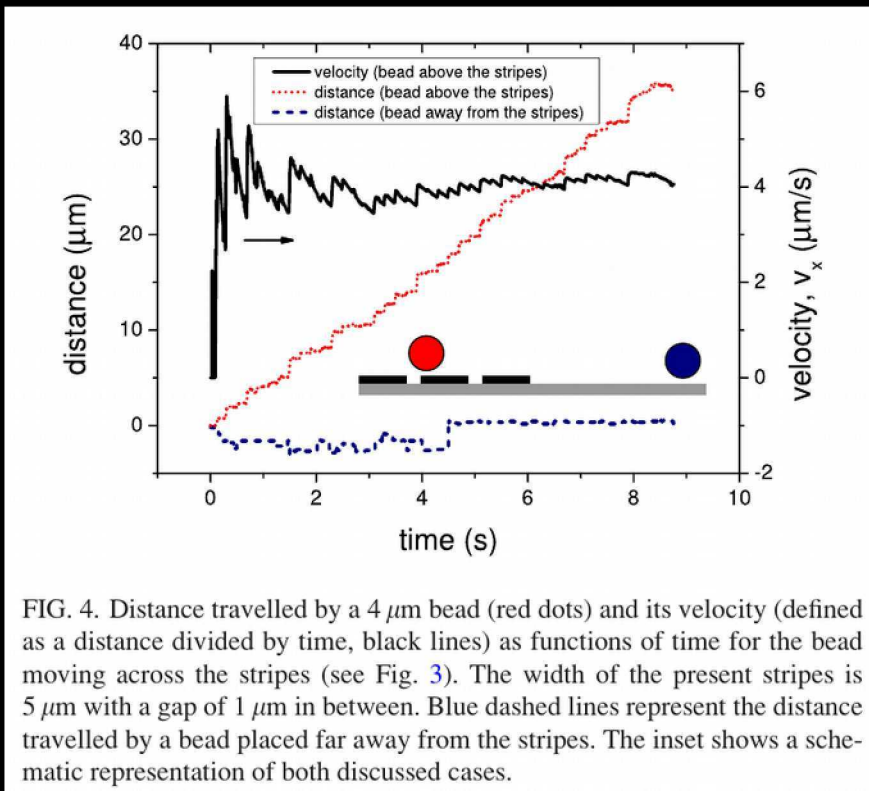
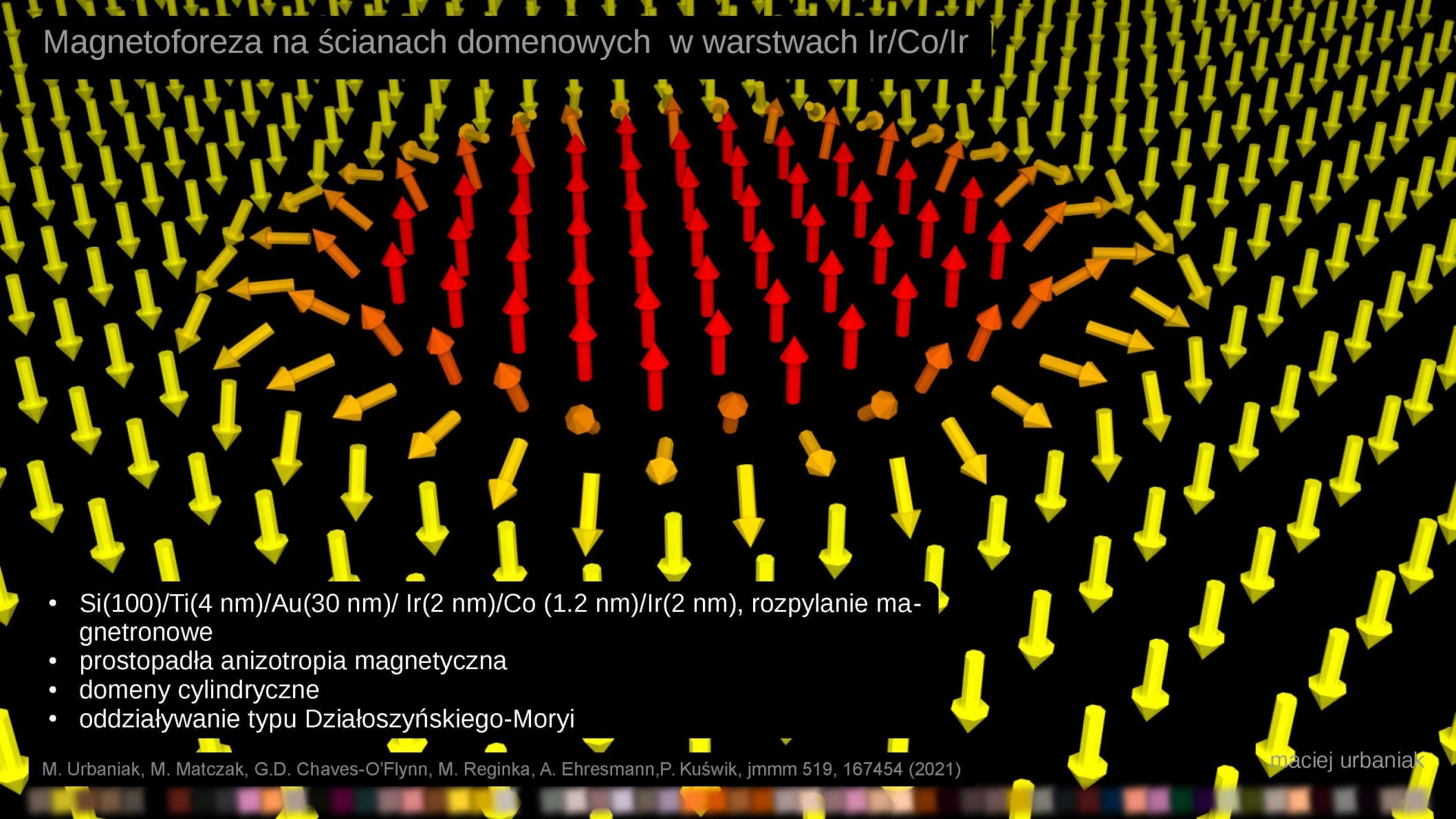


FIG. 4. Distance travelled by a  $4 \mu\text{m}$  bead (red dots) and its velocity (defined as a distance divided by time, black lines) as functions of time for the bead moving across the stripes (see Fig. 3). The width of the present stripes is  $5 \mu\text{m}$  with a gap of  $1 \mu\text{m}$  in between. Blue dashed lines represent the distance travelled by a bead placed far away from the stripes. The inset shows a schematic representation of both discussed cases.

A. Jarosz, D. Holzinger, M. Urbaniak, A. Ehresmann, F. Stobiecki  
J. Appl. Phys. 120, 084506 (2016)

maciej urbaniak

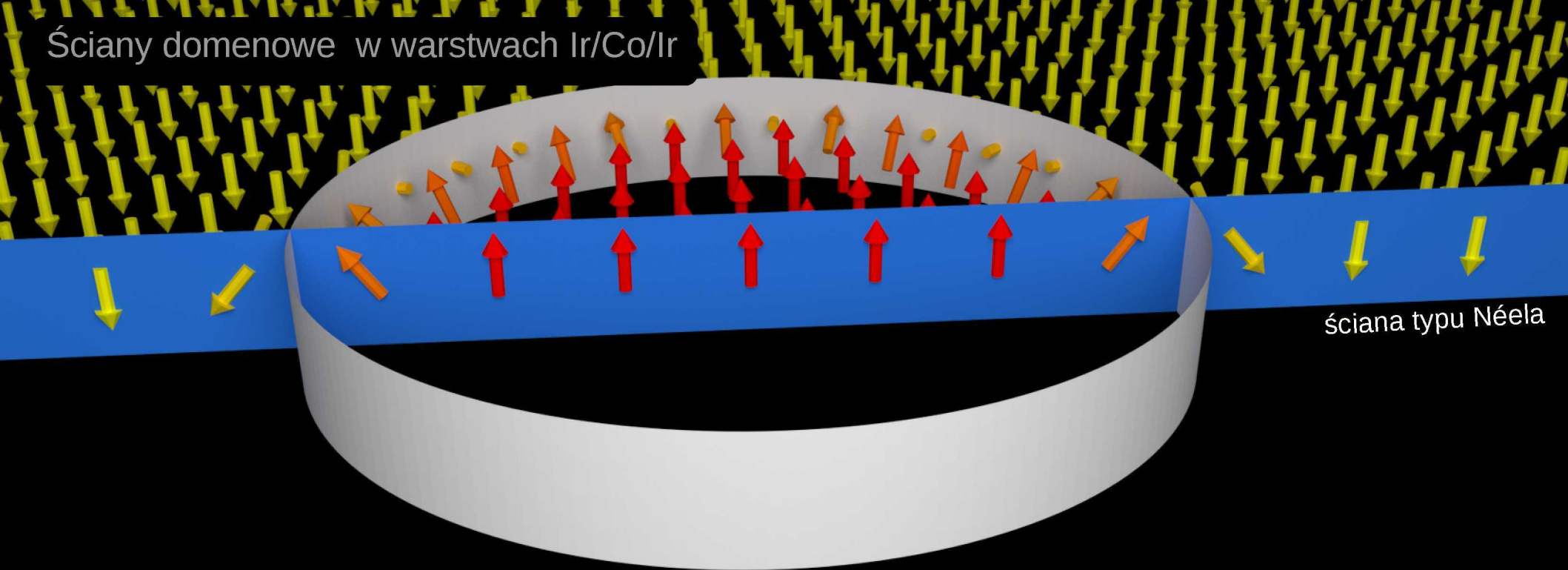
## Magnetoforeza na ścianach domenowych w warstwach Ir/Co/Ir



- Si(100)/Ti(4 nm)/Au(30 nm)/ Ir(2 nm)/Co (1.2 nm)/Ir(2 nm), rozpylanie magnetronowe
- prostopadła anizotropia magnetyczna
- domeny cylindryczne
- oddziaływanie typu Działoszyńskiego-Moryi



Ściany domenowe w warstwach Ir/Co/Ir



ściana typu Néela

- oddziaływanie typu Działoszyńskiego-Moryi preferuje prostopadłą orientację sąsiednich momentów magnetycznych
- w cienkich warstwach z anizotropią prostopadłą jego obecność prowadzi do powstawania ścian typu Néela

## Oddziaływanie typu Działoszyńskiego-Moryi

- fenomenologiczny opis oddziaływania dwóch spinów:

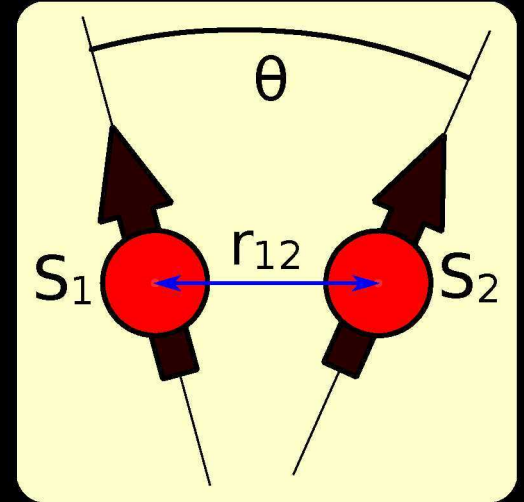
$$E = - \sum_{ij} K_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j - \sum_{ij} K_{ij}^1 (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j)^2 - \dots$$

- zwykle wystarczy użycie członów biliniowych

$$E_{bilinear} = - \sum_{ij} K_{ij} S_1^i S_2^j = K_{xx} S_1^x S_2^x + K_{xy} S_1^x S_2^y + \dots$$

W zapisie macierzowym:

$$E_{bilinear} = \vec{S}_1 [K] \vec{S}_2$$



# Oddziaływanie typu Działoszyńskiego-Moryi

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & D_1 & D_2 \\ -D_1 & 0 & D_3 \\ -D_2 & -D_3 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1 & A_4 & A_5 \\ A_4 & A_2 & A_6 \\ A_5 & A_6 & A_3 \end{bmatrix}$$

Suma skalowanej macierzy jednostkowej, antysymetrycznej i bezśladowej symetrycznej

oddziaływanie dipolowe

$$J \vec{S}_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \vec{S}_2 = S_1^x S_2^x + S_1^y S_2^y + S_1^z S_2^z = J \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2$$

oddziaływanie wymiany

$$\vec{S}_1 \begin{bmatrix} 0 & D_1 & D_2 \\ -D_1 & 0 & D_3 \\ -D_2 & -D_3 & 0 \end{bmatrix} \vec{S}_2 = -D_1 S_1^y S_2^x - D_2 S_1^z S_2^x + D_1 S_1^x S_2^y - D_3 S_1^z S_2^y + D_2 S_1^x S_2^z + D_3 S_1^y S_2^z$$

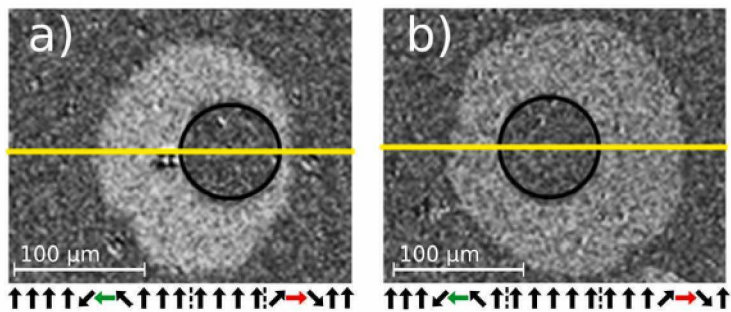
$$= D_1 (S_1^x S_2^y - S_1^y S_2^x) - D_2 (S_1^z S_2^x - S_1^x S_2^z) + D_3 (S_1^y S_2^z - S_1^z S_2^y)$$

$$= (\hat{i} D_3 - \hat{j} D_2 + \hat{k} D_1) \cdot \vec{S}_1 \times \vec{S}_2 = \vec{D} \cdot (\vec{S}_1 \times \vec{S}_2)$$

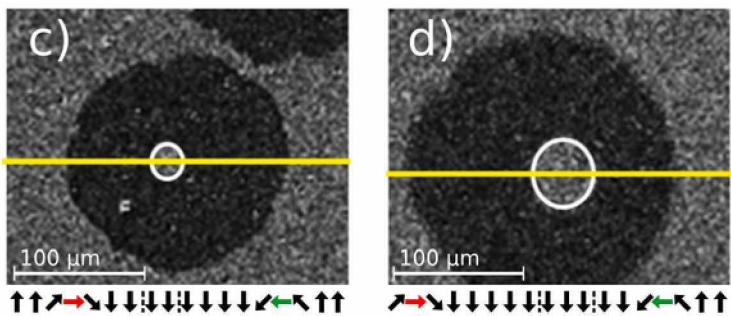
oddziaływanie Działoszyńskiego-Moryi

# Ruch domen cylindrycznych w warstwach Ir/Co/Ir

Saturation field $H_z$	80 kA/m	↓	80 kA/m	↓
Field pulse $H_z$	3.2 kA/m	↑	3.2 kA/m	↑
Field in-pulse $H_x$	16 kA/m	←	16 kA/m	→



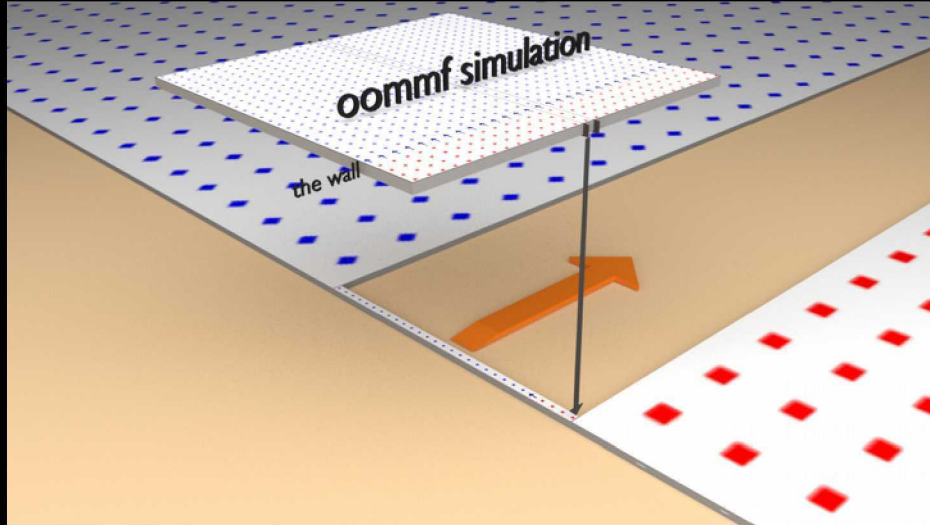
Saturation field $H_z$	80 kA/m	↑	80 kA/m	↑
Field pulse $H_z$	3.2 kA/m	↓	3.2 kA/m	↓
Field in-pulse $H_x$	16 kA/m	←	16 kA/m	→



- asymetria ruchu ścian typu Néela – kierunek ruchu zależy od orientacji momentu ściany względem kierunku składowej płaszczyznowej pola magnetycznego
- pomiary potwierdzają asymetrię ruchu ścian – możliwość przesuwania domen (poprzez asymetryczne rozszerzanie)

PMOKE difference images of the domain evolution for the Ti(4 nm)/Au(30 nm)/Ir(2 nm)/Co(1.2 nm)/Ir(2 nm) layer system in combined in-plane ( $H_x$ ) and perpendicular ( $H_z$ ) field pulses after saturation in an  $H_z$  field. Each image shows a 270  $\mu\text{m}$  wide area. Values of the fields are marked for each panel. The initial domain wall positions are indicated on images with black and white rings, and on schematics with dashed lines. The schematics below each image show the spin configurations along the yellow lines. The N-DWs are marked by red and green arrows and show clockwise chirality.

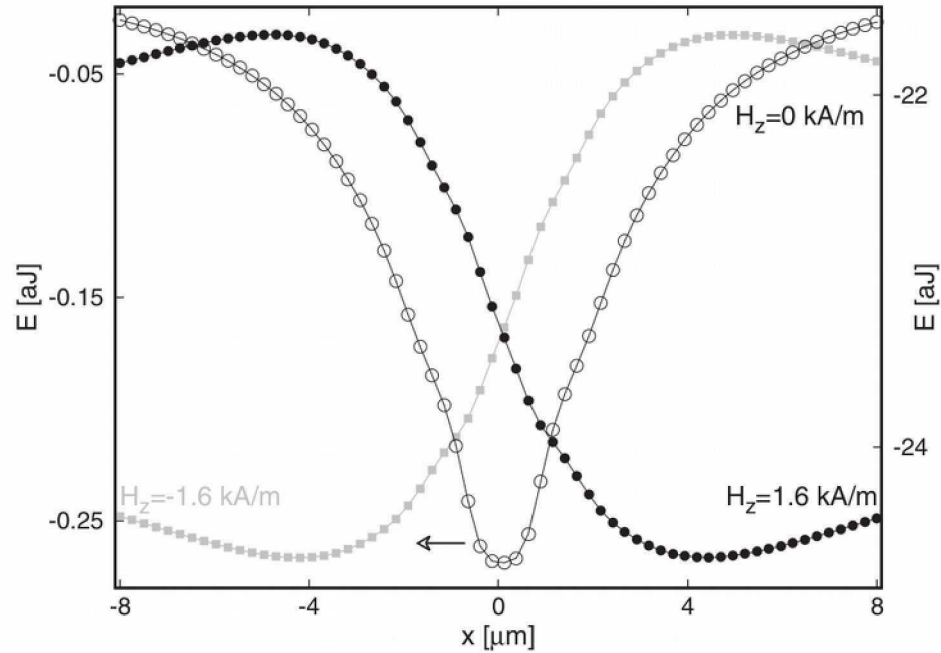
# Pole magnetyczne ściany Néela w warstwach Ir/Co/Ir



- symulacje mikromagnetyczne (pakiet oommf) pozwoliły określić profil ściany domenowej w warstwie o rozmiarach  $600 \times 600 \times 1 \text{ nm}^3$  (komórki  $3 \times 3 \times 1 \text{ nm}^3$ ) w obecności stosowanych w eksperymencie pól magnetycznych
- $H_z = 2.4 \text{ kA/m}$ ,  $A = 15 \times 10^{-12} \text{ J/m}$ ,  $M = 1.42 \times 10^6 \text{ A/m}$ ,  $K_{\text{eff}} = 1.8 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}$ ,  $\text{DMI} = -8.54 \times 10^{-4} \text{ Jm}^{-2}$ , relaksacja do  $0.01 \text{ deg/ns}$ .

Schematic of the procedure used to calculate the magnetic field produced by the domain wall. We take a representative row of magnetic cells (the tail of the black arrow) from the results of the micromagnetic simulation of the magnetic film with the  $0.6 \times 0.6 \text{ }\mu\text{m}^2$  area and elongate each cell to  $100 \text{ }\mu\text{m}$  in the direction indicated by the orange arrow. We add on both sides of the stretched row of cells additional  $50 \times 100 \text{ }\mu\text{m}^2$  cells with perpendicularly oriented magnetization of the same sign as that of the neighboring simulation cell. Such an assembly of magnetized cells is used to calculate the field in the mid-plane, perpendicular to the wall, of the whole structure.

# Energia SPB nad ścianą Néela w warstwach Ir/Co/Ir

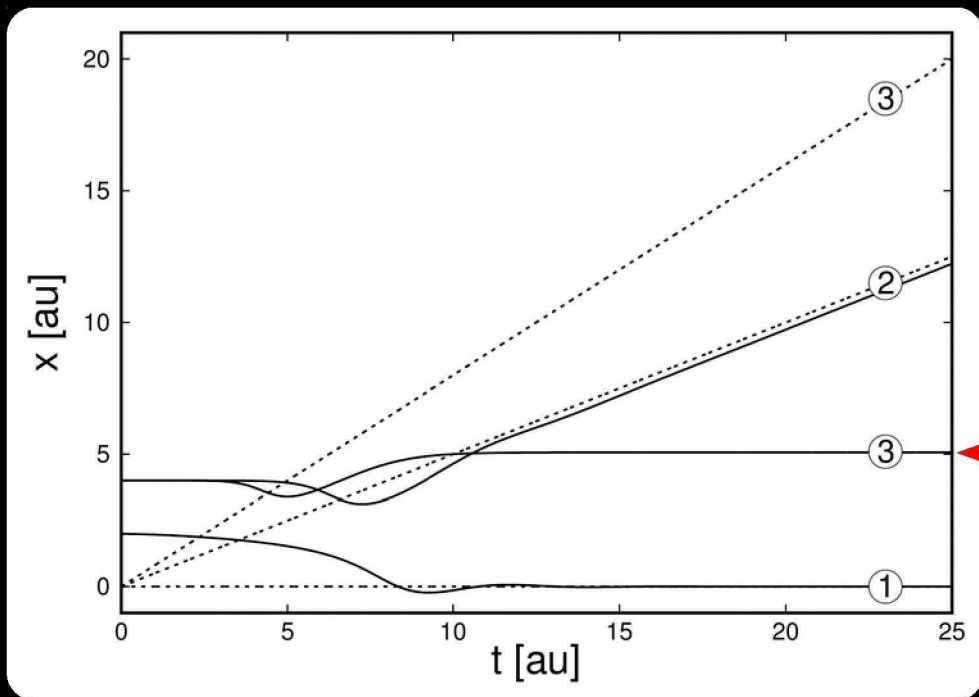


**Fig. 9.** The  $x$ -dependencies of the magnetostatic energy (compare Eq. 5) of the  $8 \mu\text{m}$  diameter bead, with a  $75 \text{ nm}$  superparamagnetic shell, for  $z$ -positions of the bead equal to  $4.52 \mu\text{m}$ , and for three values of the external magnetic field. The full black symbols correspond to the upper curve of Fig. 8, and the open ones to the triangles of this figure. Note that the energy ranges on both  $y$ -axes differ roughly by a factor of ten.

- na podstawie profilu ściany wyznaczonego z pomocą symulacji mikromagnetycznych obliczono pola magnetyczne nad ścianami (suma pól wszystkich komórek mikromagnetycznych traktowanych jako jednorodnie namagnesowane magnesy)
- bez pola zewnętrznego kulki superparamagnetyczne przyciągane są do środka ściany ( $z=\text{const}$ )
- w obecności pola ( $1.6 \text{ kA/m}$ ) siły działające na SPB wzrastają ok. dziesięciokrotnie a minimum energii magnetycznej nie leży nad środkiem ściany

$$E = -\frac{1}{2} \mu_0 V \chi_p H^2$$

# (Toy-)model ruchu cząsteczki w środowisku lepkim pod wpływem gausowskiego potencjału



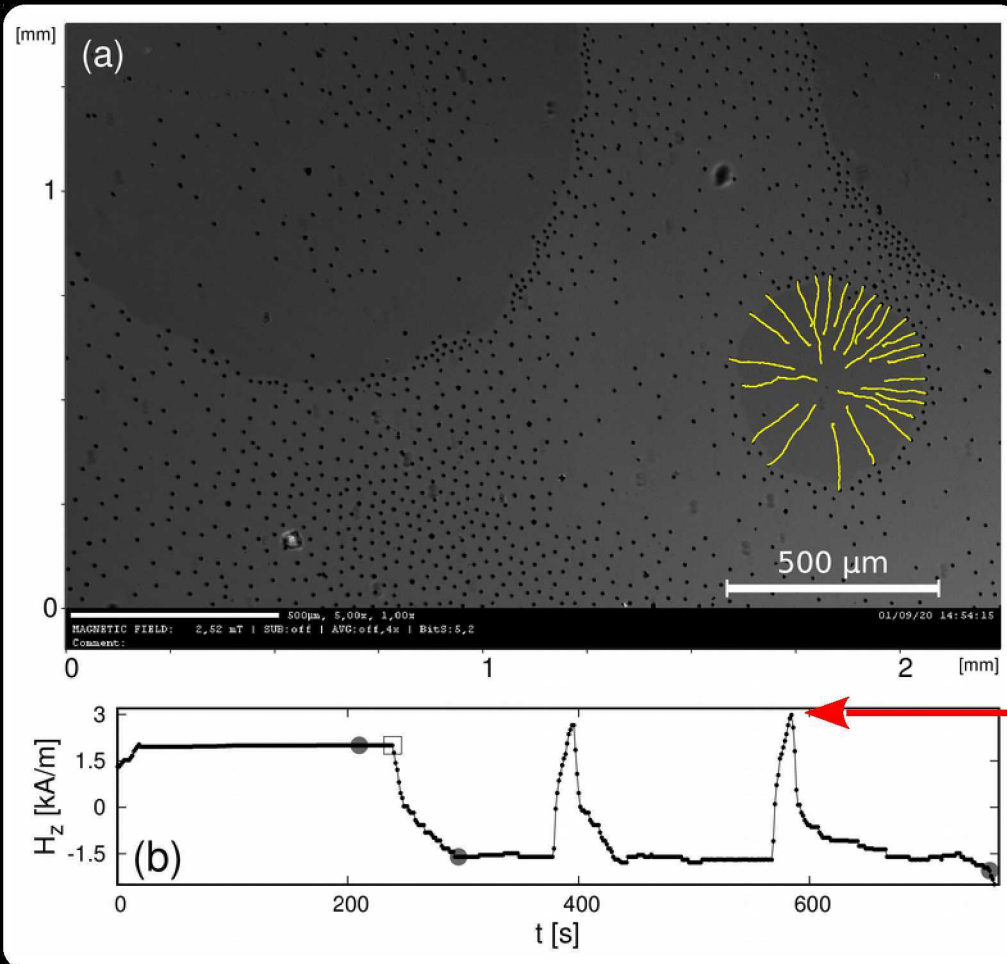
- potencjał ściany domenowej bez zewnętrznego pola przybliżyć można potencjałem gausowskim
- rozwiązanie: metoda Runge-Kutta, stałe  $\Delta t=0.01$
- powyżej krytycznej prędkości ściany SPB nie jest przez nią „łapana”

$$E(\Delta x) = -e^{-(\Delta x)^2}$$

$$\frac{d}{dt^2} x = F(x - t v_{DW}) - \frac{d}{dt} x$$

Illustrative examples of the motion of a bead in a viscous liquid under the action of a Gauss-like potential due to the domain wall. The dashed curves show the position of the domain wall and the full curves the corresponding position of the bead. The curves exemplify the three basic behaviors seen in the experiments. Curves No. 1 show the bead being attracted by a static wall - this may correspond to the situation prior to the experiments. **Curves No. 2 show the case when the travelling wall catches the bead and drags it away with constant velocity.** Finally, the curves No. 3, show the case when the wall velocity is too high for the bead to follow it.

# Magnetoforeza SPB na rozszerzającej się ścianie domenowej

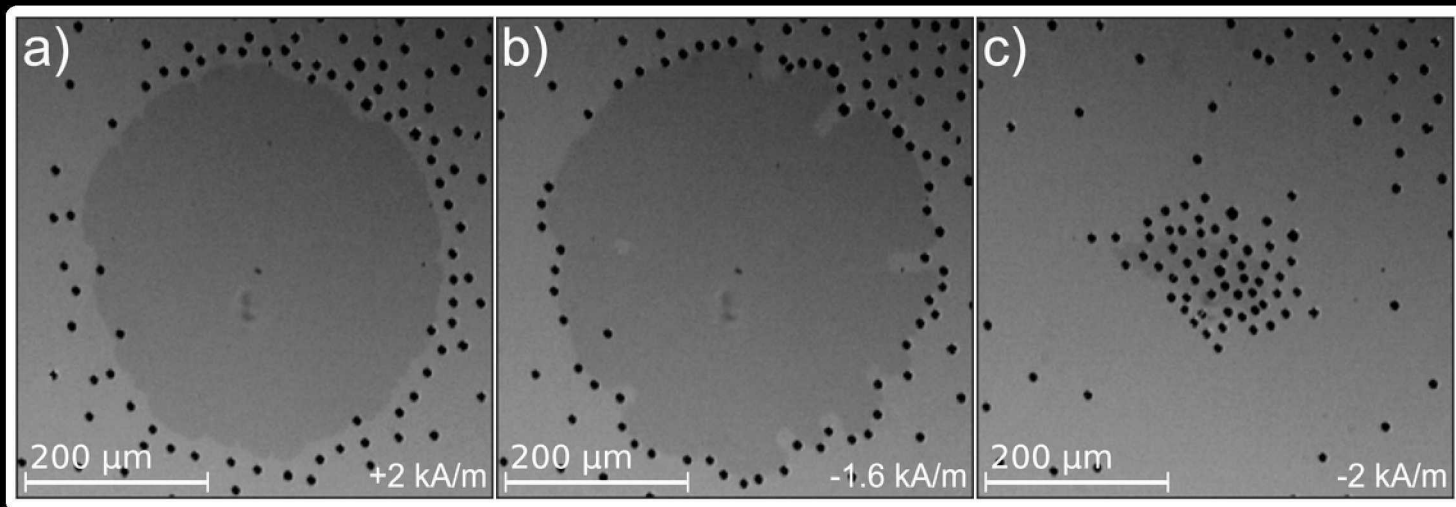


- ściana domenowa rozszerzającej się ( $0.8 \mu\text{m/s}$ ) domeny transportuje SPB oczyszczając z kulek jej wewnętrzny obszar (film: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167454>)
- ściana domenowa rozszerzająca się z prędkością przewyższającą krytyczną (większa wartość pola zewnętrznego  $H_z$ ) nie transportuje SPB

a) Exemplary experimental trajectories of 8  $\mu\text{m}$  diameter beads moving with the expanding domain wall. The wall moved for 240 s with an average velocity of  $0.8 \mu\text{m/s}$ . Note that the wall swept clean the circular area from all but one bead (see movie in Supplementary Materials). The two levels of gray correspond to opposite magnetization directions of the neighboring domains. The displayed image frame is the one corresponding to the final position after shown SPB motion. b) field sequence used in the experiment. The empty square corresponds to the frame of panel (a), and the gray dots to the three successive frames shown in the next slide.



## Gromadzenie SPB w mniejszym obszarze poprzez sekwencję ruchów ściany domenowej

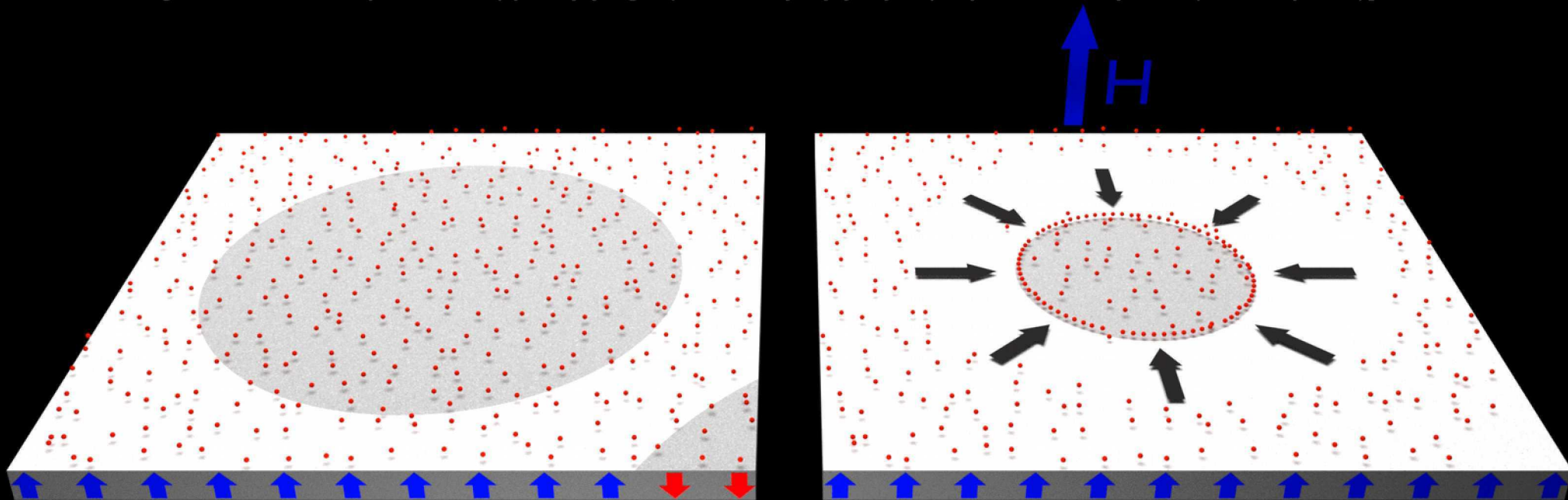


Positions of the SPB relative to the DW of the expanding, i.e. before reaching maximum radius, (a) and deflating (b, c) domain. The images show the same domain at different stages of the magnetization reversal (in positive and negative magnetic field, respectively). Note that in (a) the SPBs are more distant from the DW than in (b). The corresponding sequence of the external field strengths is shown in previous slide.

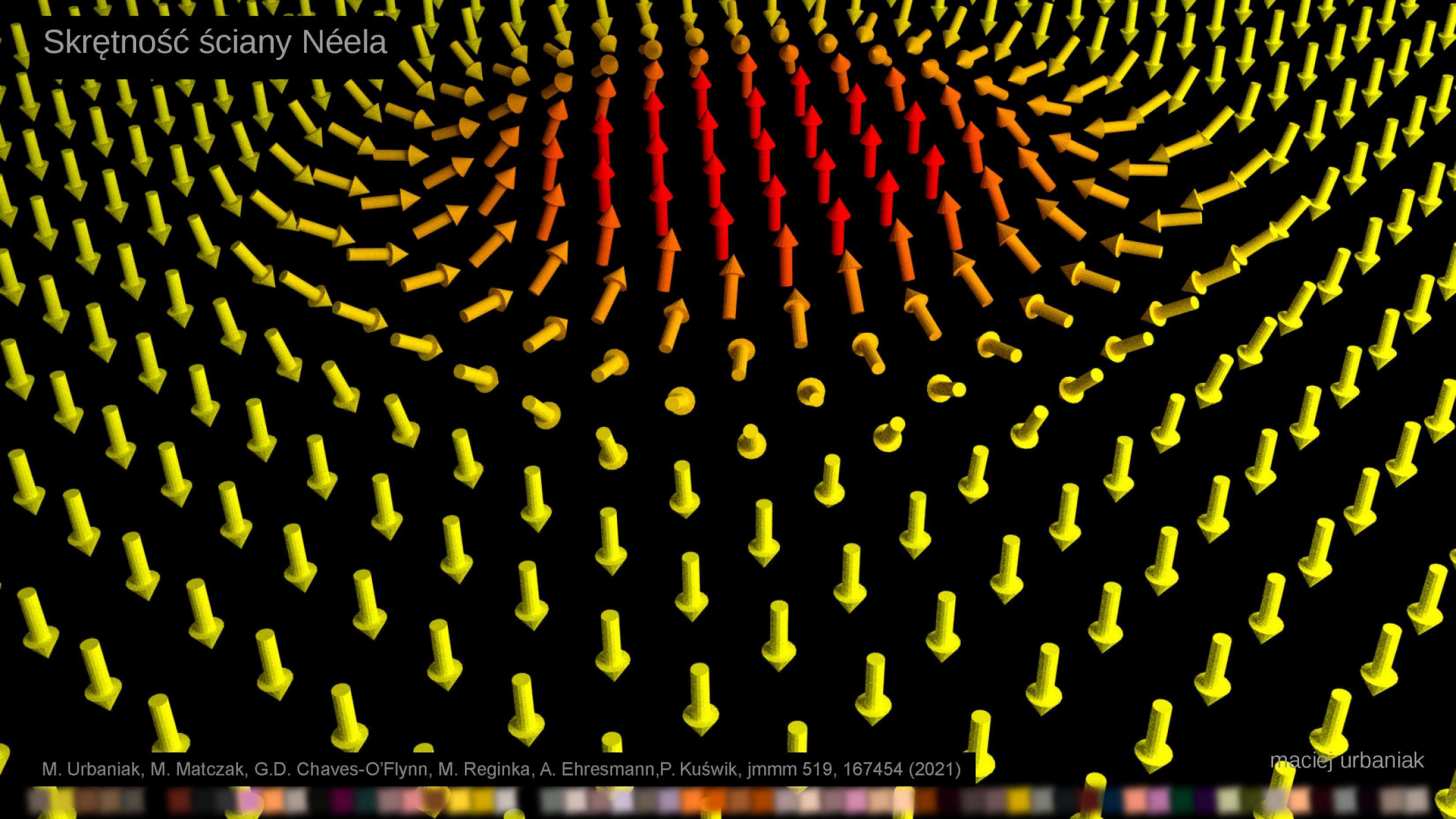
- ściana domenowa rozszerzającej się ( $0.8 \mu\text{m/s}$ ) domeny transportuje SPB oczyszczając z kulek jej wewnętrzny obszar (film: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167454>)
- kurcząca się domena pozwala gromadzić SPB w centralnym obszarze [końcowa gęstość powierzchniowa zależy od zależnego od  $H_z$  oddziaływania odpychającego (kulki znajdują się w przybliżeniu w jednej płaszczyźnie)]

# Gromadzenie SPB w mniejszym obszarze poprzez sekwencję ruchów ściany domenowej

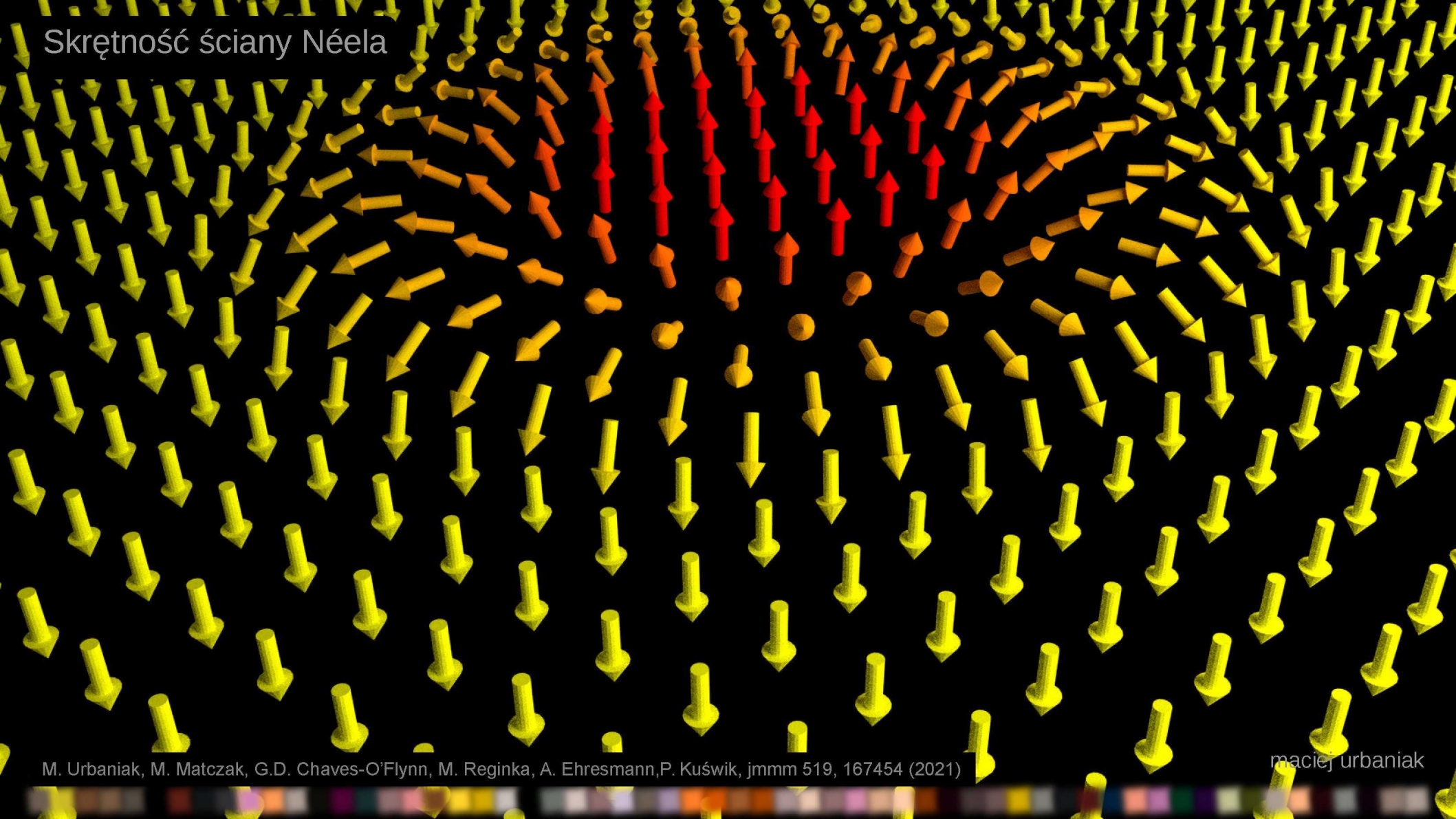
- ściana domenowa rozszerzającej się ( $0.8 \mu\text{m/s}$ ) domeny transportuje SPB oczyszczając z kulek jej wewnętrzny obszar (film: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167454>)
- kurcząca się domena pozwala gromadzić SPB w centralnym obszarze [końcowa gęstość powierzchniowa zależy od zależnego od  $H_2$  oddziaływania odpychającego (kulki znajdują się w przybliżeniu w jednej płaszczyźnie)]



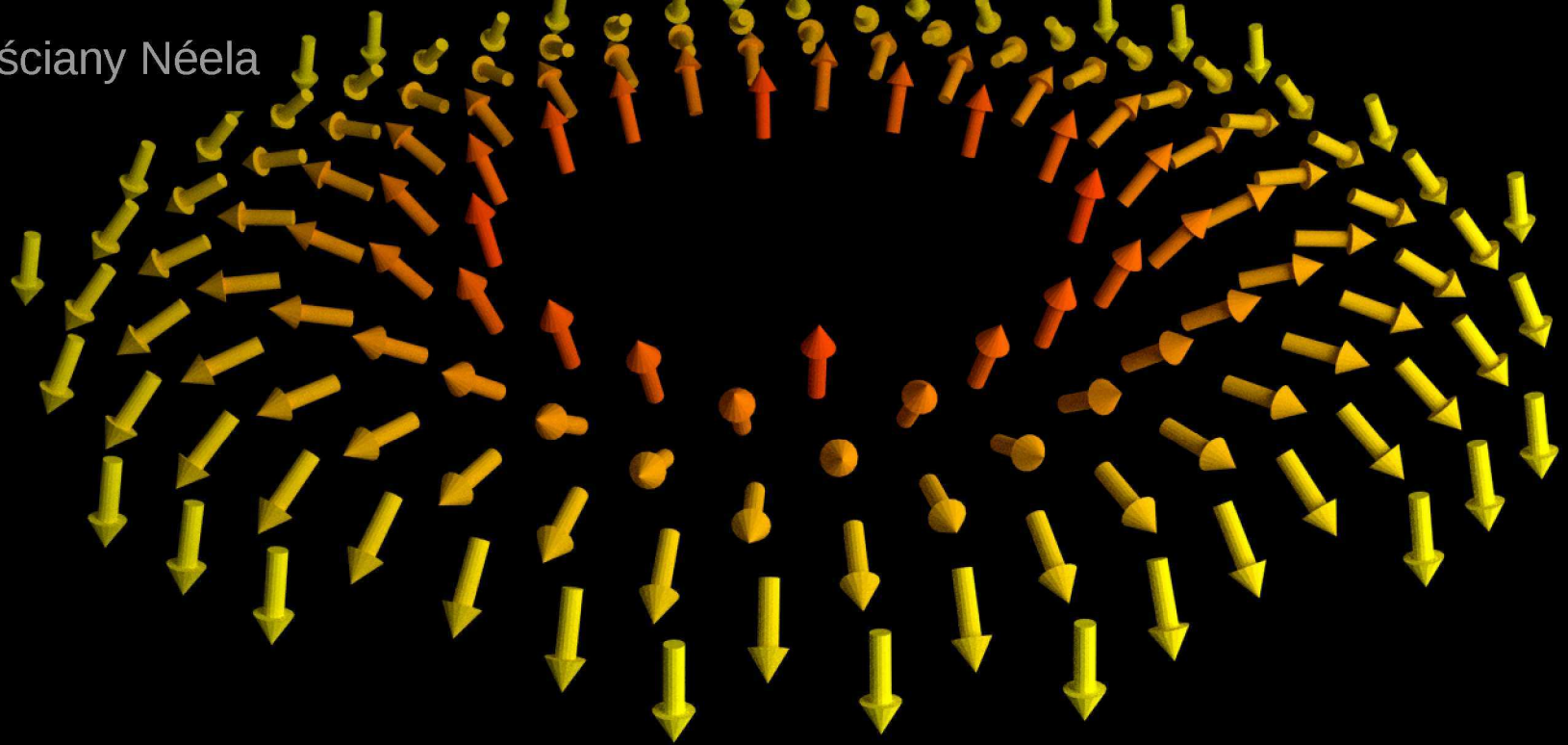
# Skrętność ściany Néela



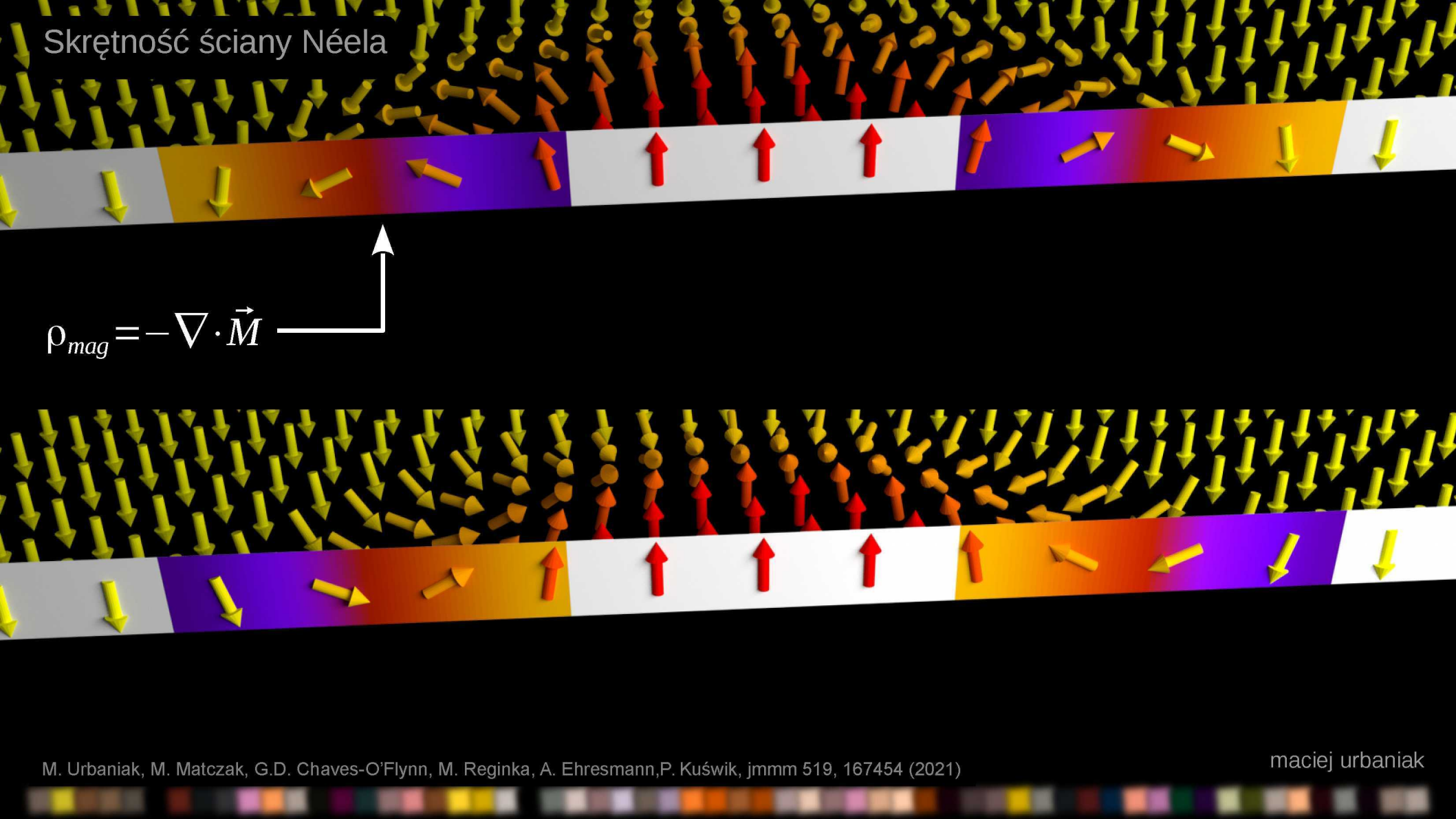
# Skrętność ściany Néela



# Skrętność ściany Néela



# Skrętność ściany Néela



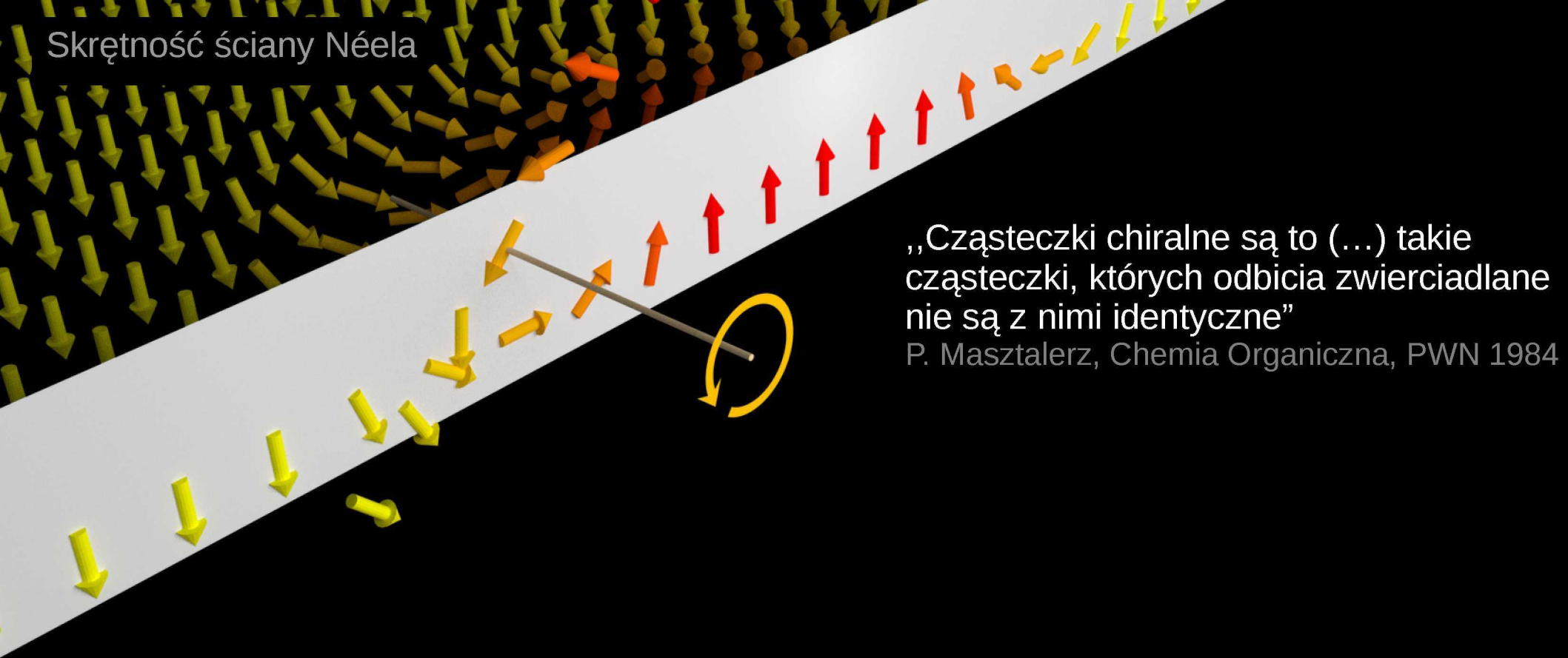
Skrętność ściany Néela



„Cząsteczki chiralne są to (...) takie cząsteczki, których odbicia zwierciadlane nie są z nimi identyczne”

P. Masztalerz, Chemia Organiczna, PWN 1984

Skrętność ściany Néela

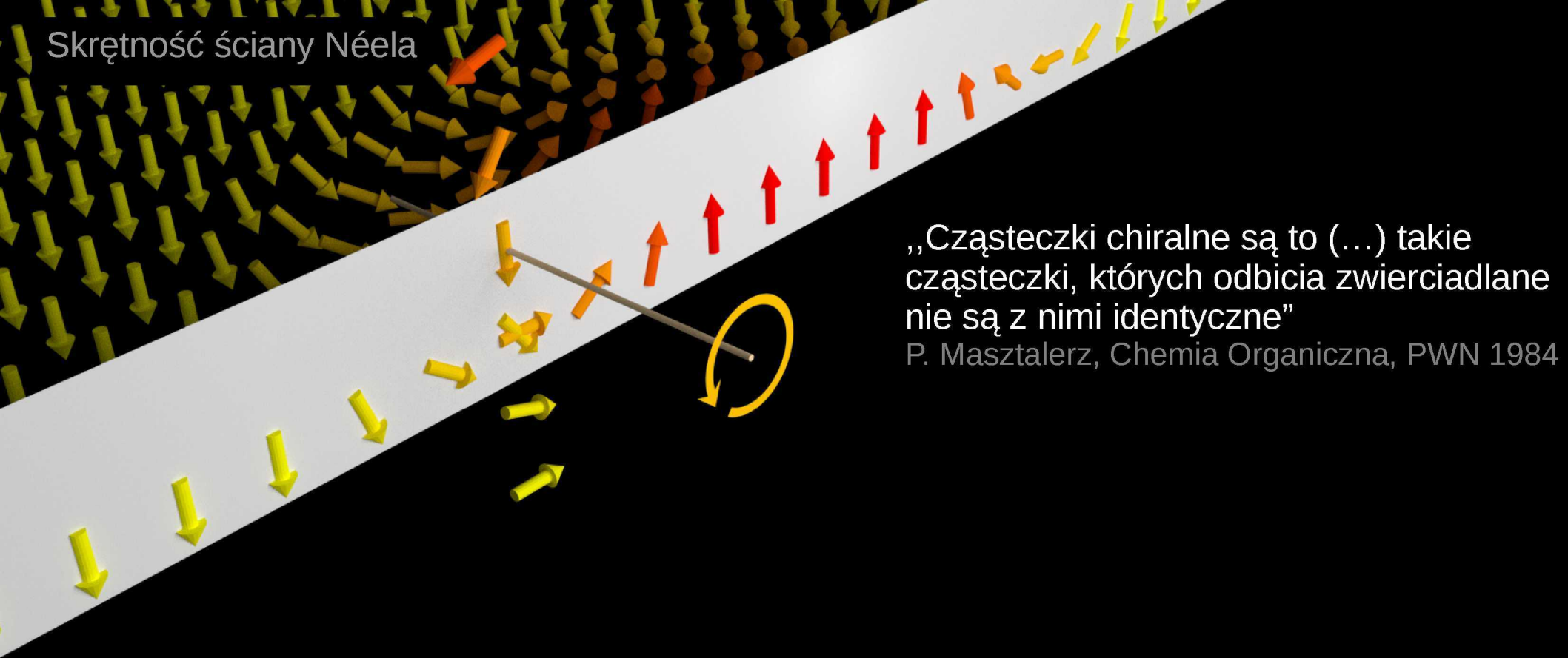


„Cząsteczki chiralne są to (...) takie cząsteczki, których odbicia zwierciadlane nie są z nimi identyczne”

P. Masztalerz, Chemia Organiczna, PWN 1984



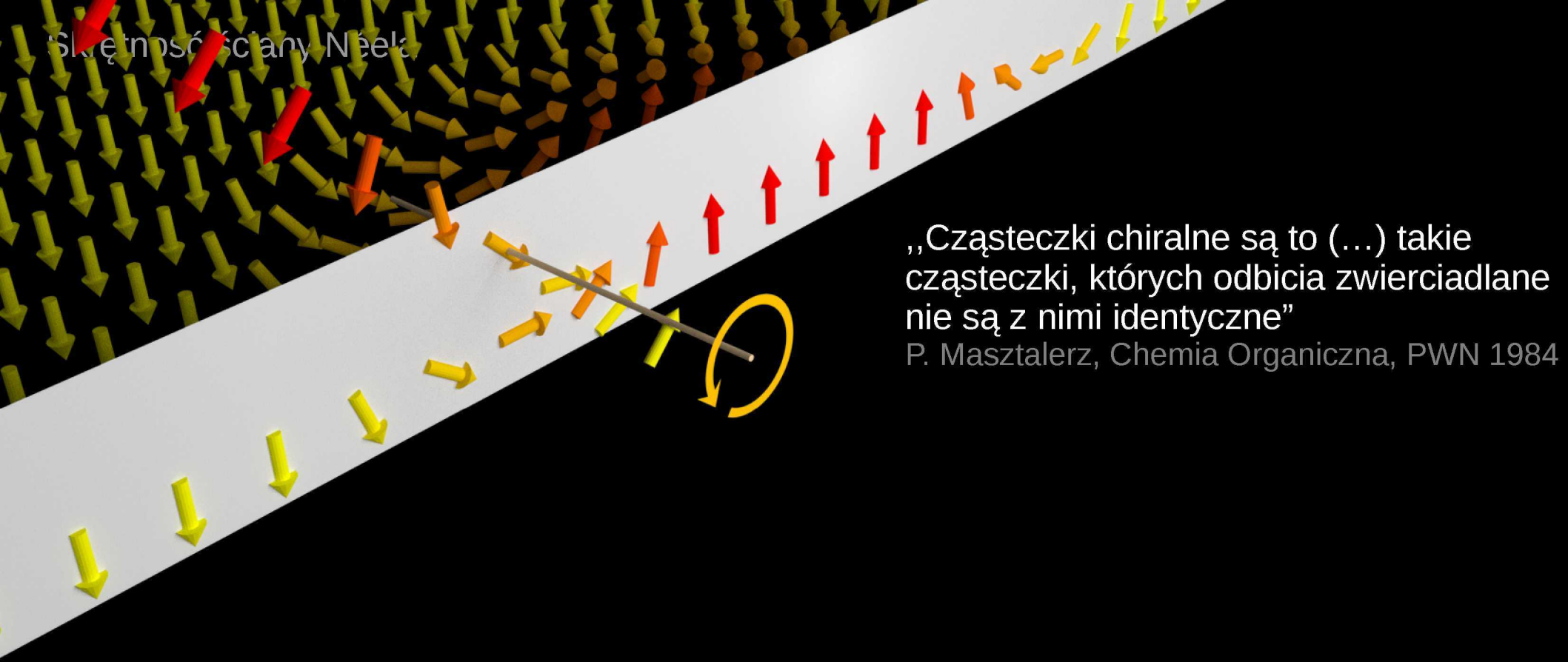
Skrętność ściany Néela



„Cząsteczki chiralne są to (...) takie cząsteczki, których odbicia zwierciadlane nie są z nimi identyczne”

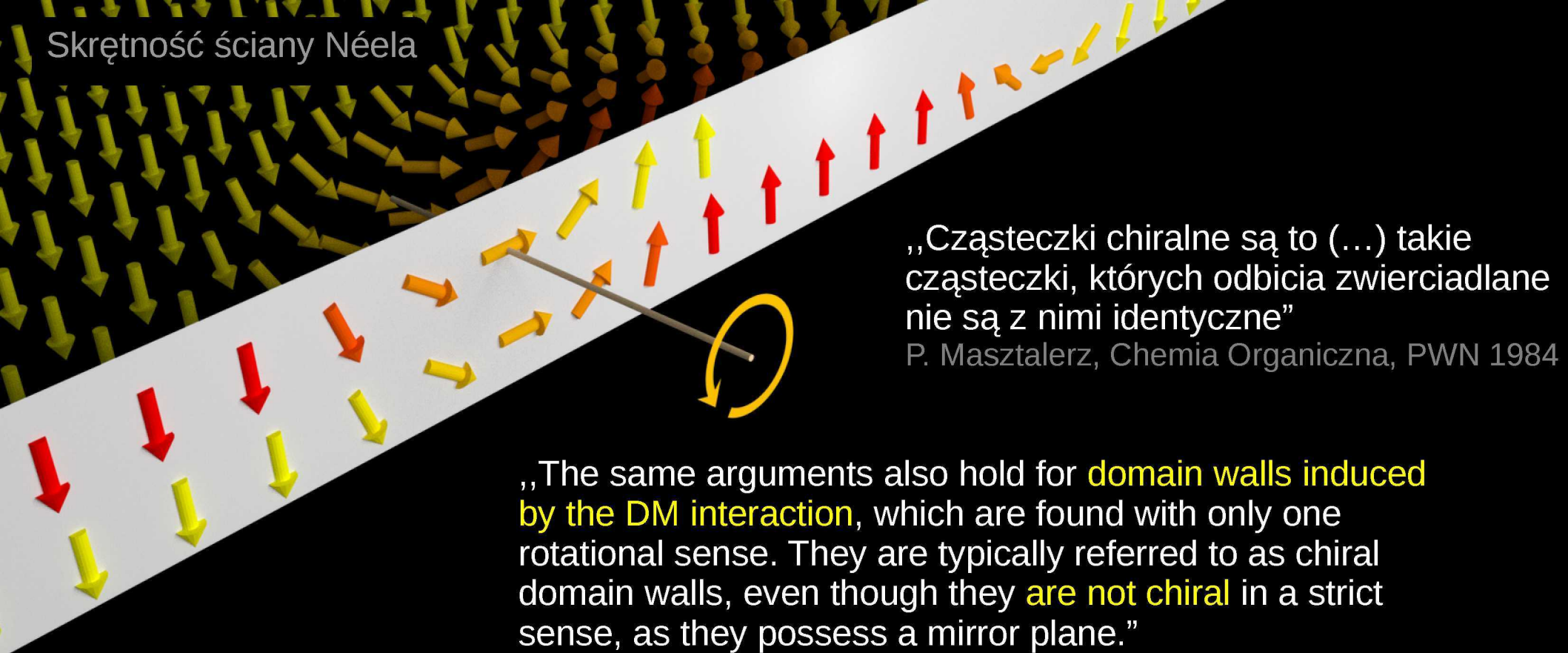
P. Masztalerz, Chemia Organiczna, PWN 1984

Skłębność ściany Néela



„Cząsteczki chiralne są to (...) takie cząsteczki, których odbicia zwierciadlane nie są z nimi identyczne”  
P. Masztalerz, Chemia Organiczna, PWN 1984

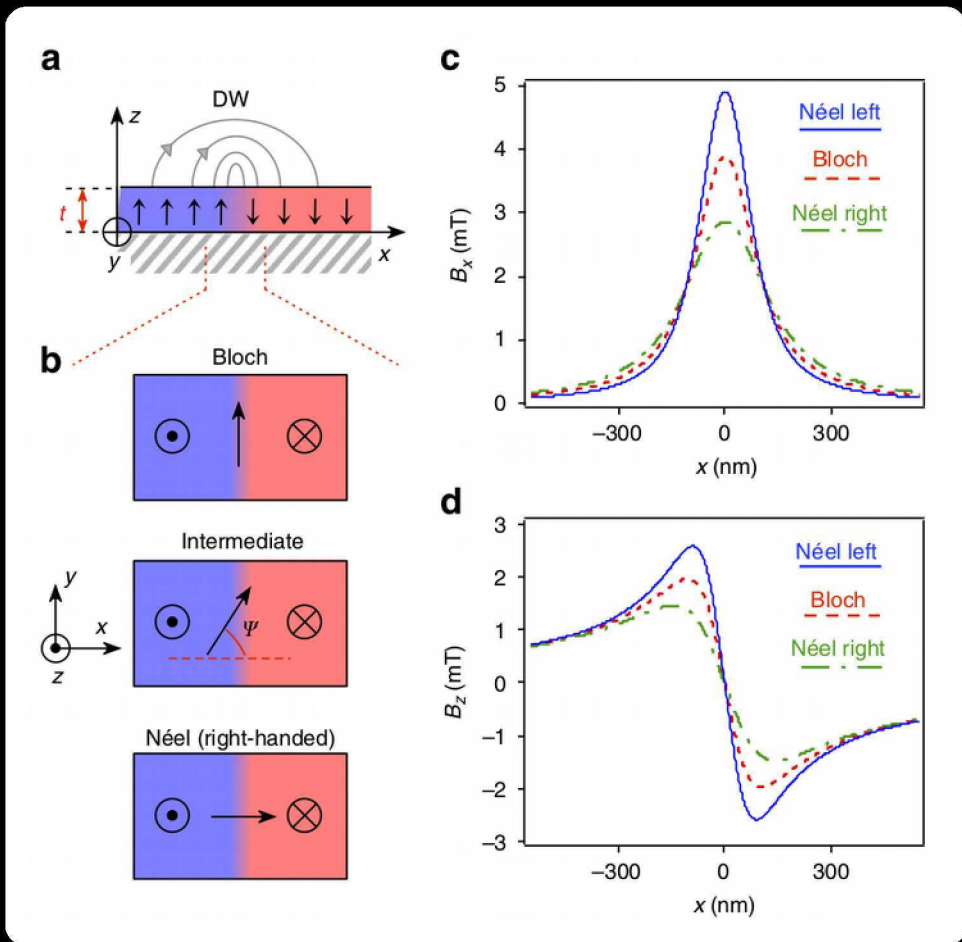
Skrętność ściany Néela



„Cząsteczki chiralne są to (...) takie cząsteczki, których odbicia zwierciadlane nie są z nimi identyczne”  
P. Masztalerz, Chemia Organiczna, PWN 1984

„The same arguments also hold for **domain walls induced by the DM interaction**, which are found with only one rotational sense. They are typically referred to as chiral domain walls, even though they **are not chiral** in a strict sense, as they possess a mirror plane.”  
K. von Bergmann, A. Kubetzka, O. Pietzsch, R. Wiesendanger, J. Phys.: Condens. Matter **26**, 394002 (2014)

# Skłonność ściany Néela – wpływ na rozkład pola magnetycznego



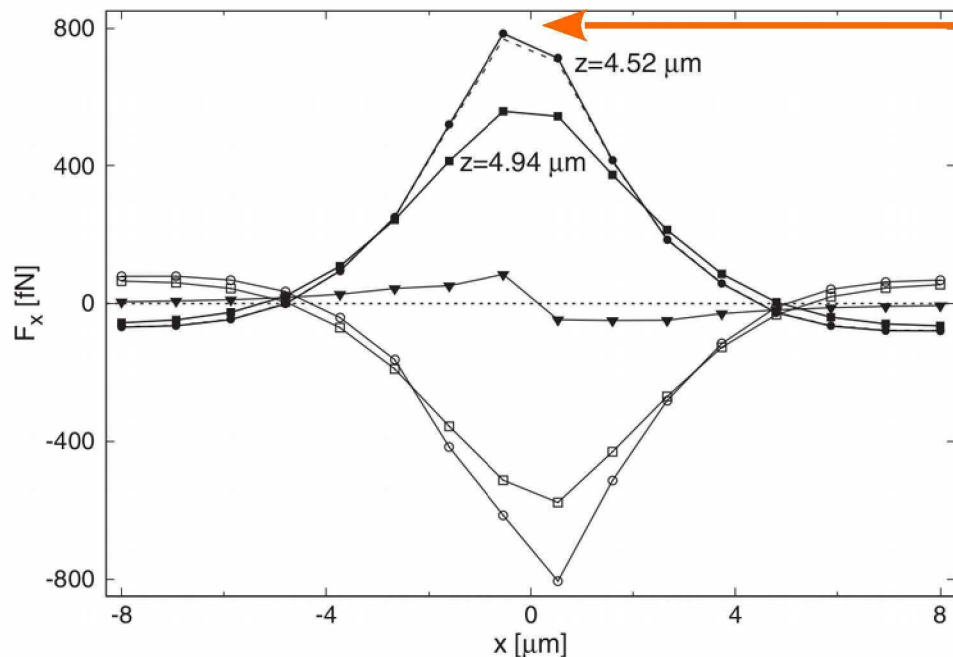
The magnetization within DWs always points from grey domains ( $+M_z$ ) to black domains ( $-M_z$ ), independent of the direction of the domain boundary (see white arrows in Fig. 1b). This spin structure corresponds to **right-handed chiral Néel walls** ...

Gong Chen, Tianping Ma, Alpha T. N'Diaye, Heeyoung Kwon, Changyeon Won, Yizheng Wu, Andreas K. Schmid, NATURE COMMUNICATIONS 4, 2671 (2013)

## Figure 1 | Determining the nature of a DW by scanning

**nanomagnetometry.** (a) Schematic side view of a DW in a perpendicularly magnetized film. The black arrows indicate the internal magnetization, while the grey arrows represent the magnetic field lines generated above the film. (b) Top view of the DW structure in a left-handed Bloch (top panel) or right-handed Néel (bottom panel) configuration, or an intermediate case characterized by the angle  $\psi$ . (c,d) Calculated stray field components  $B_x^\psi(x)$  (c) and  $B_z^\psi(x)$  (d) at a distance  $d = 120$  nm above the magnetic layer, with a DW centred at  $x = 0$ . Here we use  $M_s = 10^6$  A m $^{-1}$  and  $\Delta_{DW} = 20$  nm.

## Skrętność ściany Néela – wpływ na siły magnetostaticzne działające na SPB

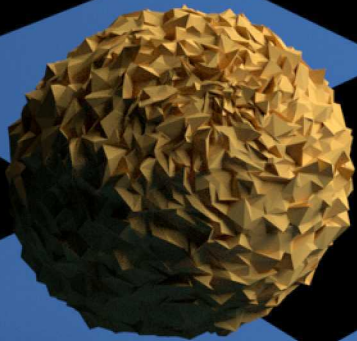
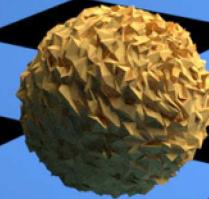


**Fig. 8.** The  $x$ -dependencies of the magnitude of the in-plane component of the magnetostatic force acting on the  $8 \mu\text{m}$  diameter bead, with a  $75 \text{ nm}$  superparamagnetic shell, for two  $z$ -positions of the bead, corresponding to the map of Fig. 7. Open symbols correspond to the case with  $H_z \approx -1.6 \text{ kA/m}$  while the black ones correspond to  $H_z \approx 1.6 \text{ kA/m}$ . Triangles show the force with no external field applied. The dashed line ( $z = 4.52 \mu\text{m}$ ) shows the force for the opposite chirality of the wall.

- wpływ „skrętności” ściany Néela na siły działające na mikrometrowej i większej średnicy SPB jest zaniedbywalny (różnice rzędu kilku procent) i nieistotny z punktu widzenia technologii transportu koloidalnego
- dla mniejszych SPB, poruszających się bliżej powierzchni warstwy magnetycznej różnice mogą być istotne

# Magnetoforeza nad nie-topologicznie strukturyzowanymi warstwami Co/Au

- różnorodne, dwuwymiarowe sieci sztucznych domen magnetycznych w układzie z anizotropią prostopadłą
- sąsiednie obszary (kolor czarny i niebieski) posiadają momenty magnetyczne o przeciwnym zwrocie
- struktura magnetyczna uzyskana poprzez zmianę właściwości z pomocą bombardowania jonowego



Prof. T. Fischer, zespół, Uni. Bayreuth - pomysł, teoria, eksperyment

Prof. A. Ehresmann, zespół, Uni. Kassel – strukturyzacja magnetyczna

Prof. F. Stobiecki, dr M. Urbaniak – podłoża magnetyczne



maciej urbaniak

# Magnetoforeza nad nie-topologicznie strukturyzowanymi warstwami Co/Au

## Materiał:

jednorodnie namagnesowane warstwy wielokrotne typu Co/Au z prostopadłą (do powierzchni warstwy) anizotropią magnetyczną

## Technologia:

- warstwy Co/Au naniesione na podłoża Si z użyciem rozpylania jonowego (sputtering)
- fotorezyst naświetlony przez maski fotolitograficzne
- po usunięciu części fotorezystu bombardowanie jonowe ( $\text{He}^+$  10 keV)
- bombardowane obszary (nie chronione rezystem) charakteryzują się niższą koercją/polem przełączania

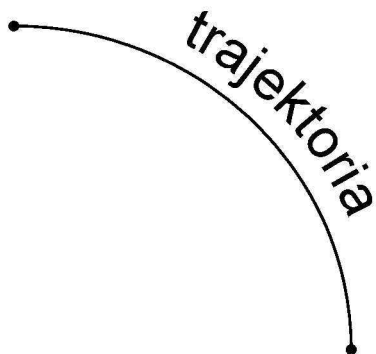
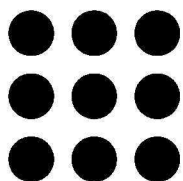
Prof. T. Fischer, zespół, Uni. Bayreuth - pomysł, teoria, eksperyment

Prof. A. Ehresmann, zespół, Uni. Kassel – strukturyzacja magnetyczna

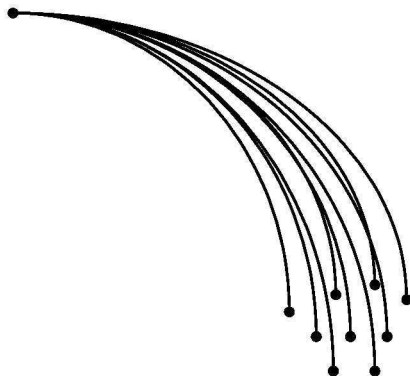
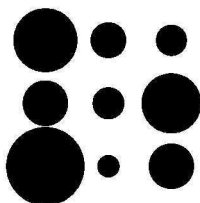
Prof. F. Stobiecki, dr M. Urbaniak – podłoża magnetyczne

# Magnetoforeza – wpływ dyspersji rozmiarów cząstek

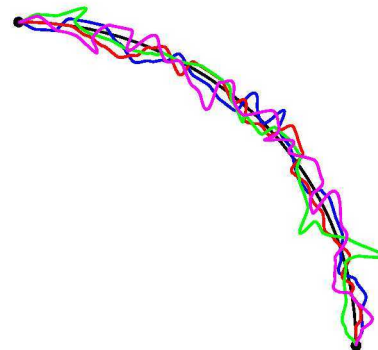
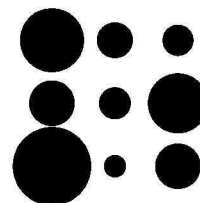
Monodispersja



Polidispersja



Polidispersja

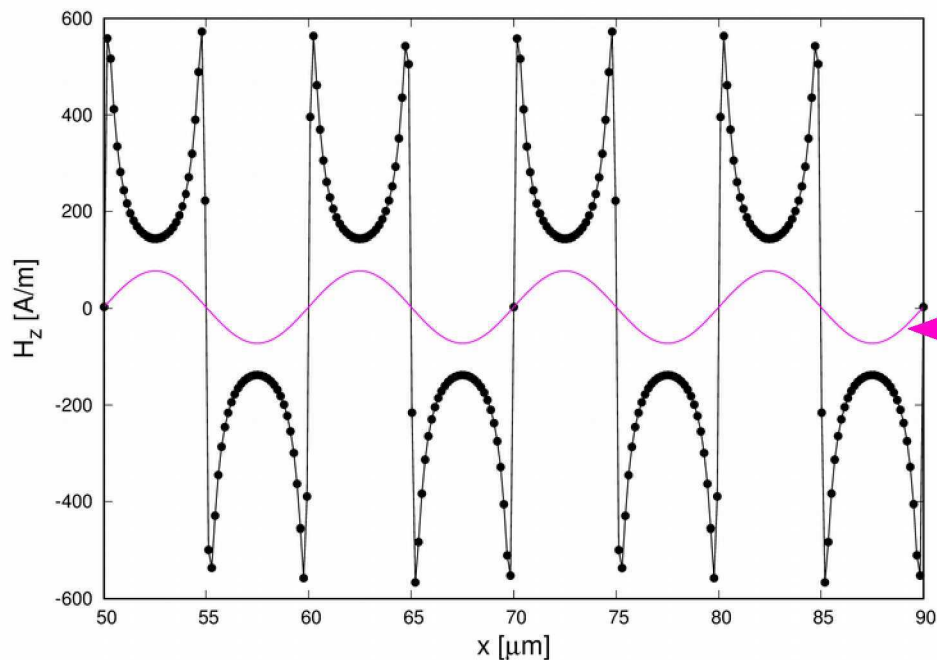


Transport chroniony (np. topologicznie) - dyspersja nie wpływa na położenia końców trajektorii\*

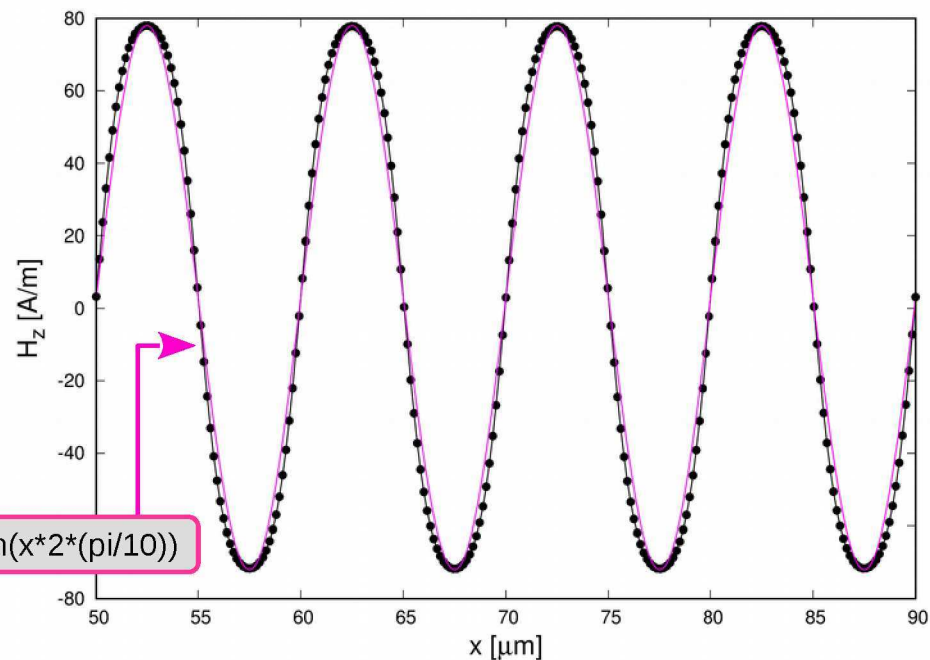
\* lub wpływa w sposób nieistotny dla zastosowań



# Pole magnetyczne pochodzące od podłoża



$$3+75*\sin(x*2*(\pi/10))$$



0.2  $\mu\text{m}$  nad podłożem

2  $\mu\text{m}$  nad podłożem

- pole magnetyczne nad pasiastą strukturą domenową o okresie przestrzennym 10  $\mu\text{m}$  (zerowy wypadkowy moment magnetyczny);  $d = 1 \text{ nm}$ ;  $M_s = 1.42 \times 10^6 \text{ A/m}$ ; 15, nieskończenie rozciągniętych w kierunku  $y$ , domen
- w odległościach od podłoża zbliżonych do (lub większych od) okresu dominują niskoczęstotliwościowe składowe pola – **tzw. położenie uniwersalne** (universal elevation)

# Pole magnetyczne H pochodzące od periodycznych podłoży

$$\Delta H = 0 \leftarrow \begin{cases} \mathbf{H}(\mathbf{x}_A, z \rightarrow \infty) = \mathbf{H}_{\text{ext}} \\ H_z(\mathbf{x}_A, z = 0) = m(\mathbf{x}_A) \end{cases} \leftarrow m(\mathbf{x}_A) = \begin{cases} +M & \text{if } \mathbf{x}_A \in \text{do góry} & \text{struktura} \\ -M & \text{if } \mathbf{x}_A \notin \text{do góry} & \text{domenowa} \end{cases}$$

warunki brzegowe

$$\tilde{M} = M/(1 + \chi) \quad \tilde{H}_{\text{ext}}^z = H_{\text{ext}}^z/(1 + \chi) \quad \text{wpływ podatności cieczy}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}_A, z) = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{\text{ext}}^{\parallel} \\ \tilde{H}_{\text{ext}}^z \end{pmatrix} + 2(\tilde{M} + \tilde{H}_{\text{ext}}^z) \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{n-1'} \frac{J_1(q_{nm}R)}{(q_{nm}R)^2} e^{-(q_{nm}z)} \sum_{j=1}^6 \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{\pi/3}^j \cdot \mathbf{q}_{nm} R \sin(\mathbf{R}_{\pi/3}^j \cdot \mathbf{q}_{nm} \cdot \mathbf{x}_A) \\ q_{nm} R \cos(\mathbf{R}_{\pi/3}^j \cdot \mathbf{q}_{nm} \cdot \mathbf{x}_A) \end{pmatrix}$$

- ze względu na periodyczność przestrzenną struktury domenowej pole będące rozwiązaniem równania Laplace'a przedstawia się w postaci szeregu Fouriera
- w odległościach od podłoża zbliżonych do (lub większych od okresu) do opisu pola potrzebne są tylko składowe odpowiadające wektorom z drugiej strefy Brillouina – **położenie uniwersalne**

$$\mathbf{q}_{nm} = n\mathbf{q}^{(1)} + m\mathbf{q}^{(2)}$$

$$\mathbf{q}^{(1)} = \frac{2\pi}{a \sin(\pi/3)} \begin{pmatrix} \cos(\pi/6) \\ -\sin(\pi/6) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{q}^{(2)} = \frac{2\pi}{a \sin(\pi/3)} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

# Pole magnetyczne H pochodzące od periodycznych podłoży

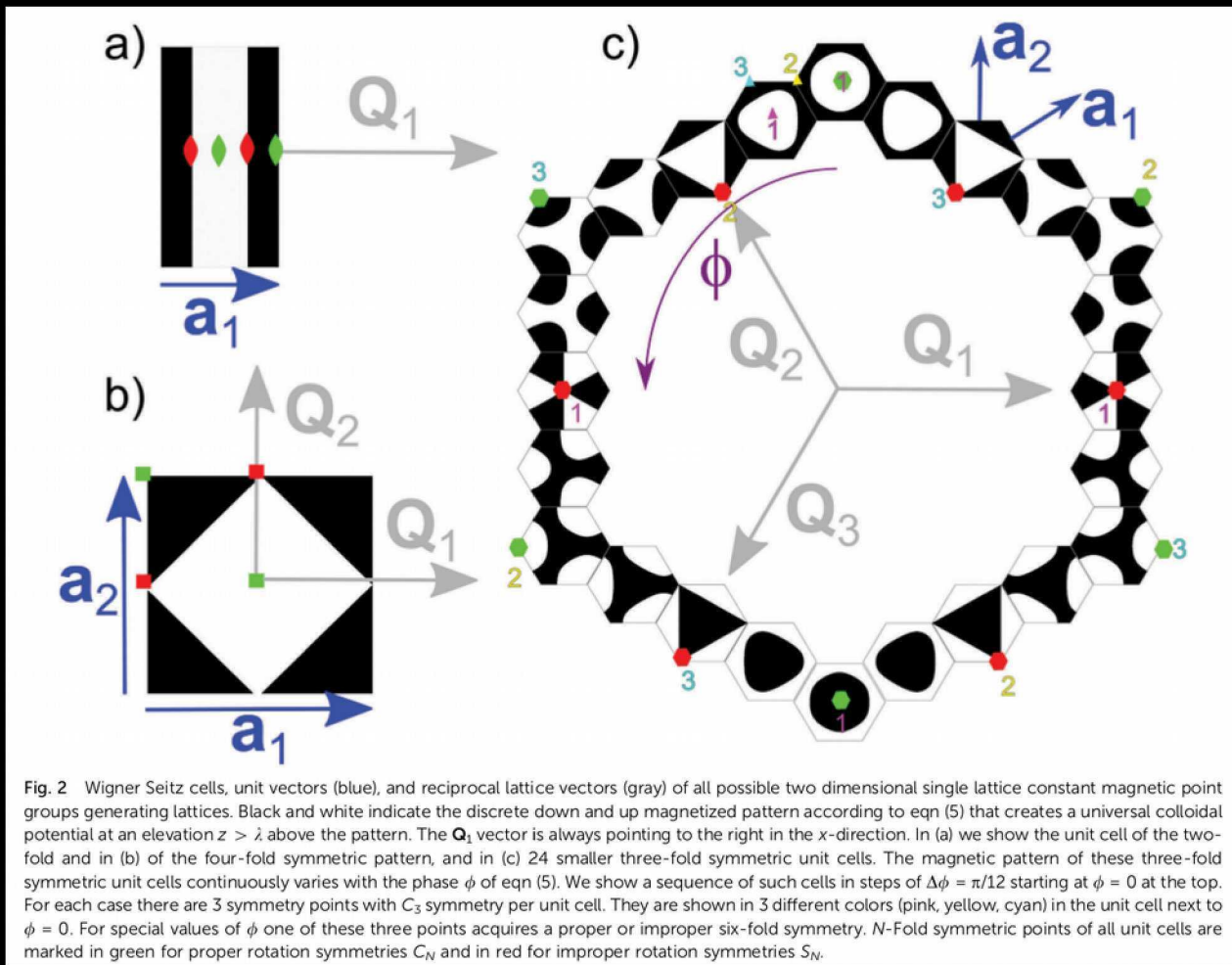
$$\Delta \mathbf{H} = 0 \leftarrow \begin{array}{l} \mathbf{H}(\mathbf{x}_A, z \rightarrow \infty) = \mathbf{H}_{\text{ext}} \\ H_z(\mathbf{x}_A, z = 0) = m(\mathbf{x}_A) \\ \text{warunki brzegowe} \end{array} \leftarrow m(\mathbf{x}_A) = \begin{cases} +M & \text{if } \mathbf{x}_A \in \text{do góry} \\ -M & \text{if } \mathbf{x}_A \notin \text{do góry} \end{cases} \begin{array}{l} \text{struktura} \\ \text{domenowa} \end{array}$$

$$\tilde{M} = M/(1 + \chi) \quad \tilde{H}_{\text{ext}}^z = H_{\text{ext}}^z/(1 + \chi) \quad \text{wpływ podatności cieczy}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}_A, z \gg 0) \approx \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{\text{ext}}^{\parallel} \\ \tilde{H}_{\text{ext}}^z \end{pmatrix} + 2(\tilde{M} + \tilde{H}_{\text{ext}}^z) \frac{J_1(q_2 R)}{(q_2 R)^2} e^{-(q_2 z)} \sum_{i=1}^6 \begin{pmatrix} \mathbf{q}_{2i} \sin(\mathbf{q}_{2i} \cdot \mathbf{x}_A) \\ q_2 \cos(\mathbf{q}_{2i} \cdot \mathbf{x}_A) \end{pmatrix}$$

- ze względu na periodyczność przestrzenną struktury domenowej pole rozwiązanie równania Laplace'a przedstawia się w postaci szeregu Fouriera np. dla struktury hexagonalnej suma po sześciu wektorach drugiej strefy Brillouina
- w odległościach od podłoża zbliżonych do (lub większych od okresu) do opisu pola potrzebne są tylko składowe odpowiadające wektorom z drugiej strefy Brillouina – **położenie uniwersalne**

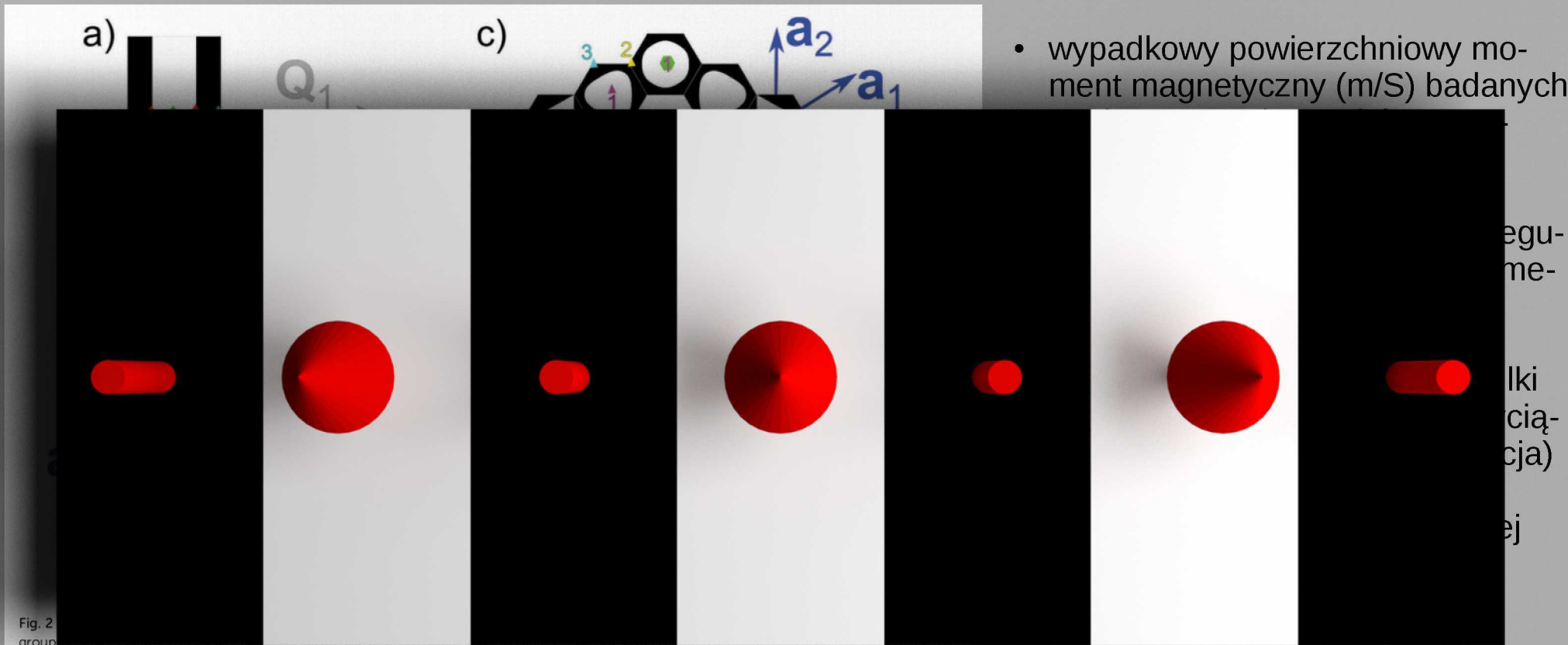
# Magnetoforeza nad nie-topologicznie strukturyzowanymi warstwami Co/Au



- wypadkowy powierzchniowy moment magnetyczny ( $m/S$ ) badanych struktur wynosi zero (równe powierzchnie obszarów  $\uparrow$  i  $\downarrow$ )
- odległość SPB od magnesów regulowana grubością pokrycia polimerowego
- cząsteczki diamagnetyczne (kulki polistyrenu w ferrocieczy\*) przyciągane są do minimów  $H^2$  (lewitacja) a SPB do maksimów – fazowe przesunięcie trajektorii dla danej pętli modulacji

\*w opisie uwzględniono załamanie linii magnetycznych na granicy cieczy ferromagnetycznej

# Magnetoforeza nad nie-topologicznie strukturyzowanymi warstwami Co/Au



- wypadkowy powierzchniowy moment magnetyczny (m/S) badanych

Fig. 2  
group  
potential at an elevation  $z > \lambda$  above the pattern. The  $Q_1$  vector is always pointing to the right in the x-direction. In (a) we show the unit cell of the two-fold

„The simplicity of  $C_2^r$  allows us to visualize many concepts that cannot be visualized for  $N > 2$  such as the full dynamics in phase space.”

\*w opisie uwzględniono załamanie linii magnetycznych na granicy cieczy ferromagnetycznej

# Magnetoforeza nad nie-topologicznie strukturyzowanymi warstwami Co/Au

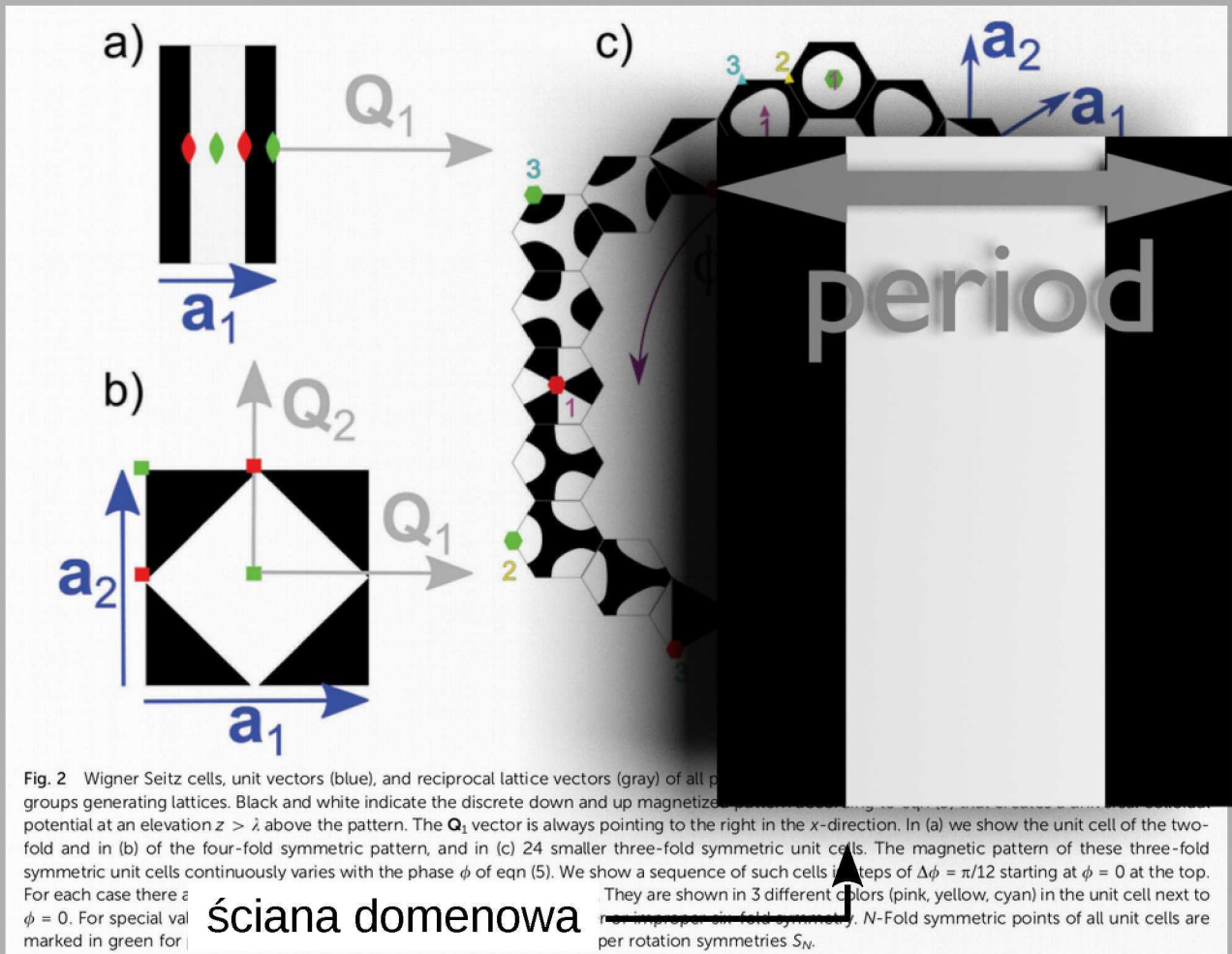


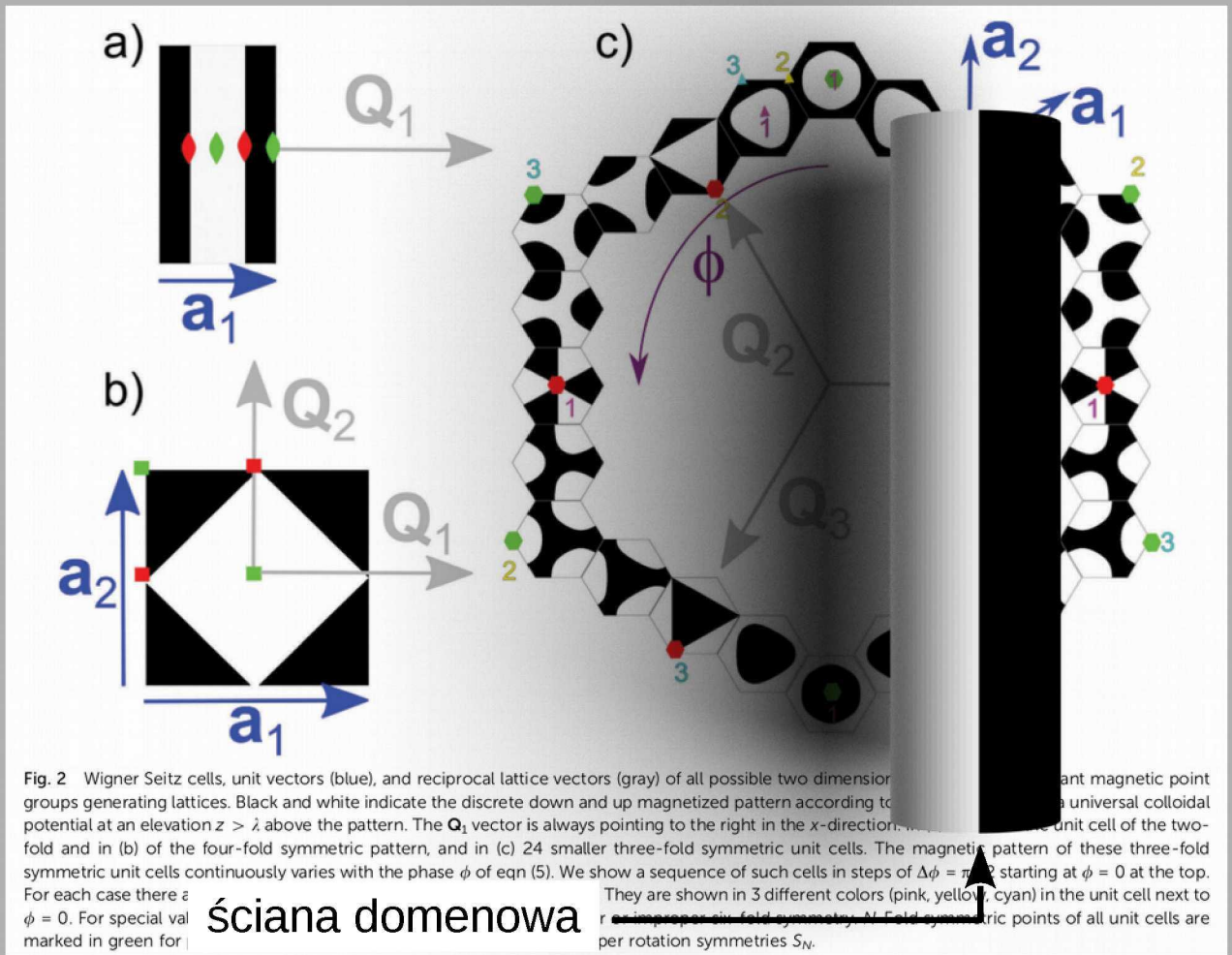
Fig. 2 Wigner Seitz cells, unit vectors (blue), and reciprocal lattice vectors (gray) of all groups generating lattices. Black and white indicate the discrete down and up magnetized potential at an elevation  $z > \lambda$  above the pattern. The  $Q_1$  vector is always pointing to the right in the x-direction. In (a) we show the unit cell of the two-fold and in (b) of the four-fold symmetric pattern, and in (c) 24 smaller three-fold symmetric unit cells. The magnetic pattern of these three-fold symmetric unit cells continuously varies with the phase  $\phi$  of eqn (5). We show a sequence of such cells in steps of  $\Delta\phi = \pi/12$  starting at  $\phi = 0$  at the top. For each case there is a special value of  $\phi$  marked in green for which the magnetic pattern has improper six-fold symmetry.  $N$ -Fold symmetric points of all unit cells are per rotation symmetries  $S_N$ .

- wypadkowy powierzchniowy moment magnetyczny ( $m/S$ ) badanych struktur wynosi zero (równe powierzchnie obszarów  $\uparrow$  i  $\downarrow$ )
- odległość SPB od magnesów regulowana grubością pokrycia polimerowego
- cząsteczki diamagnetyczne (kulki polistyrenu w ferrocieczy\*) przyciągane są do minimów  $H^2$  (lewitacja) a SPB do maksimów – fazowe przesunięcie trajektorii dla danej pętli modulacji

\*w opisie uwzględniono załamanie linii magnetycznych na granicy cieczy ferromagnetycznej

maciej urbaniak

# Magnetoforeza nad nie-topologicznie strukturyzowanymi warstwami Co/Au

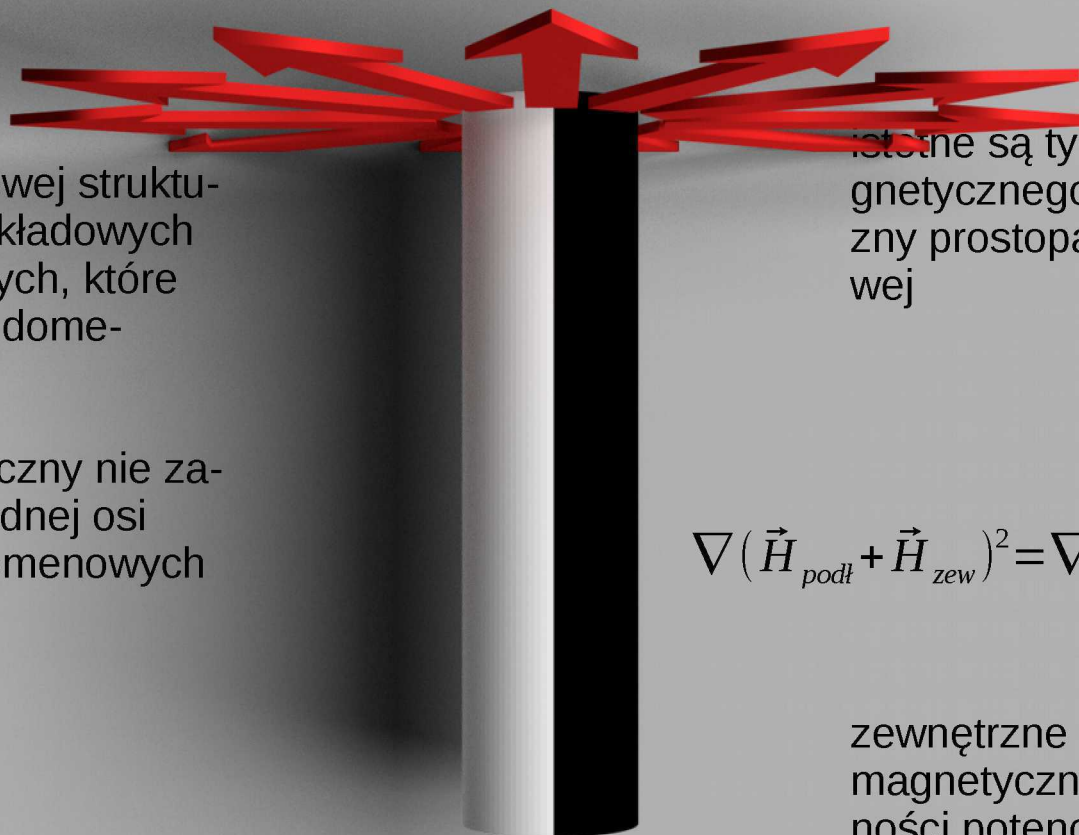


ściana domenowa

- wypadkowy powierzchniowy moment magnetyczny (m/S) badanych struktur wynosi zero (równe powierzchnie obszarów  $\uparrow$  i  $\downarrow$ )
- odległość SPB od magnesów regulowana grubością pokrycia polimerowego
- cząsteczki diamagnetyczne (kulki polistyrenu w ferrocieczy\*) przyciągane są do minimów  $H^2$  (lewitacja) a SPB do maksimów – fazowe przesunięcie trajektorii dla danej pętli modulacji

\*w opisie uwzględniono załamanie linii magnetycznych na granicy cieczy ferromagnetycznej  
maciej urbaniak

# Magnetoforeza nad nie-topologicznie strukturyzowanymi warstwami Co/Au



- dla quasi-jednowymiarowej struktury domenowej nie ma składowych pola od niej pochodzących, które są równoległe do ścian domenowych
- potencjał magnetostacyjny nie zależy zatem od współrzędnej osi równoległej do ścian domenowych (oś y)

istotne są tylko składowe pola magnetyczne równoległe do płaszczyzny prostopadłej do ścian domenowej

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

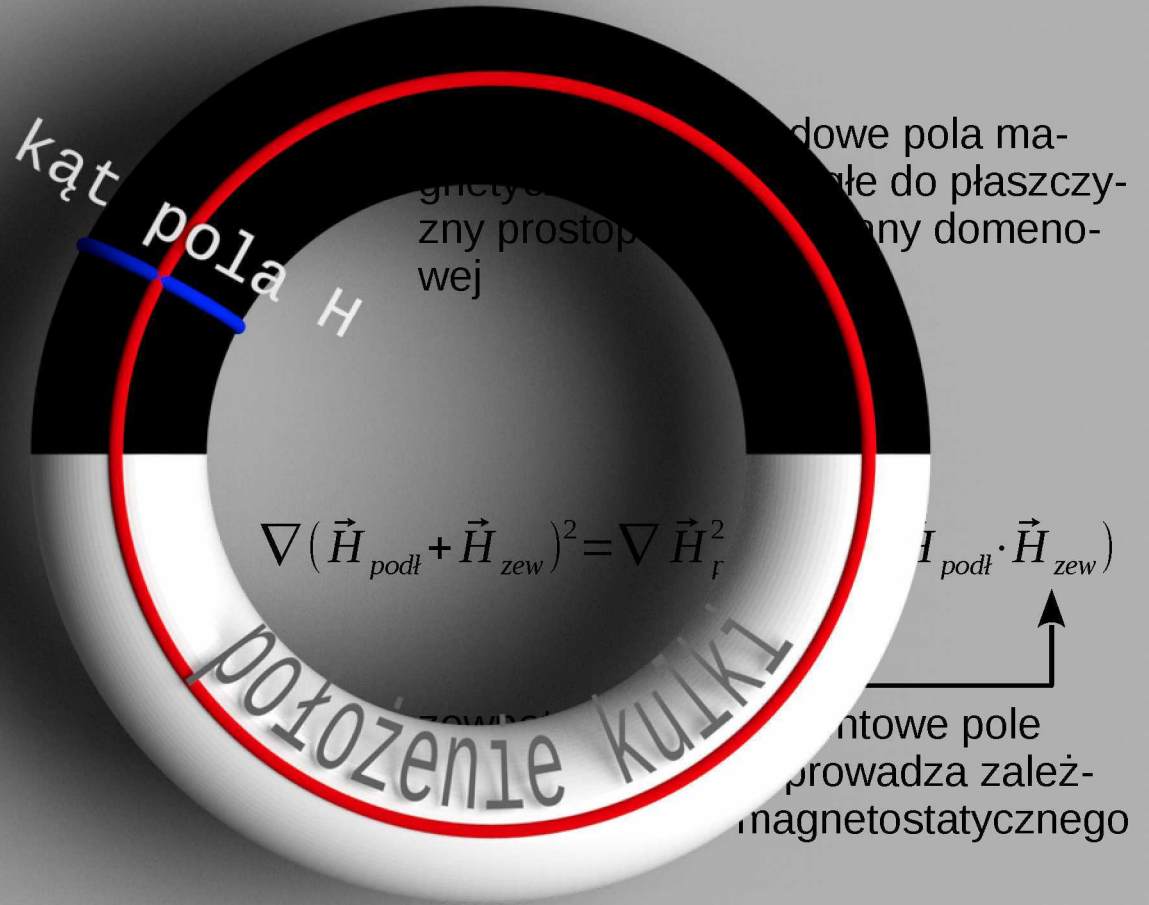
zewewnętrzne bezgradientowe pole magnetyczne nie wprowadza zależności potencjału magnetostacyjnego od wsp. y

ściana domenowa



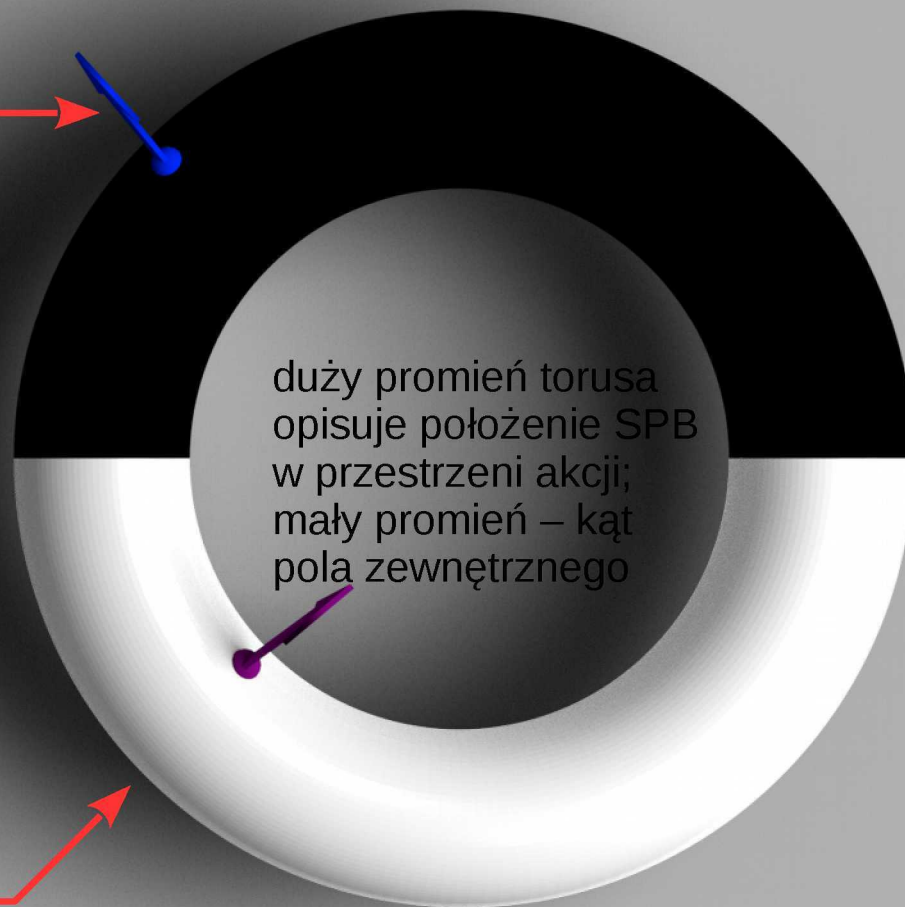
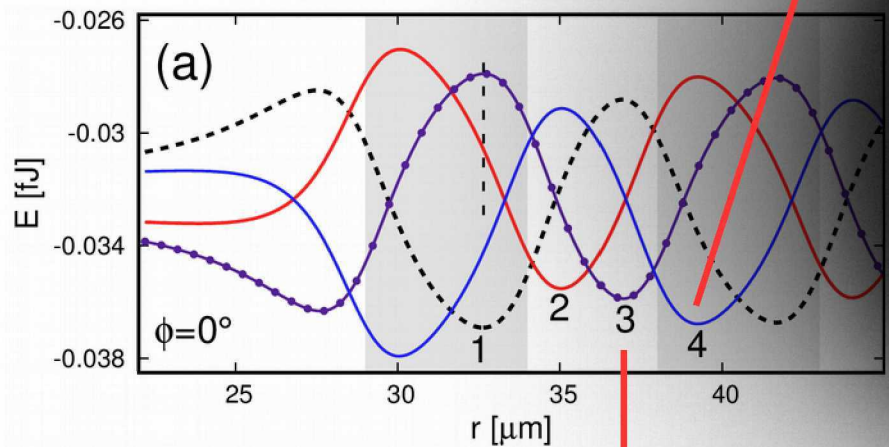
# Magnetoforeza nad nie-topologicznie strukturyzowanymi warstwami Co/Au

- dla quasi-jednowymiarowej struktury domenowej zredukowana przestrzeń fazowa może być przedstawiona jako **dwuwymiarowa powierzchnia torusa** (iloczyn okręgów przestrzeni akcji i przestrzeni kontrolnej)
- w opisywanych doświadczeniach kulki SPB poruszały się adiabaticznie (podążały za minimum potencjału) zatem istotne są **położenia punktów stacjonarnych** (minima, maksima – dla kulek diamagnetycznych)

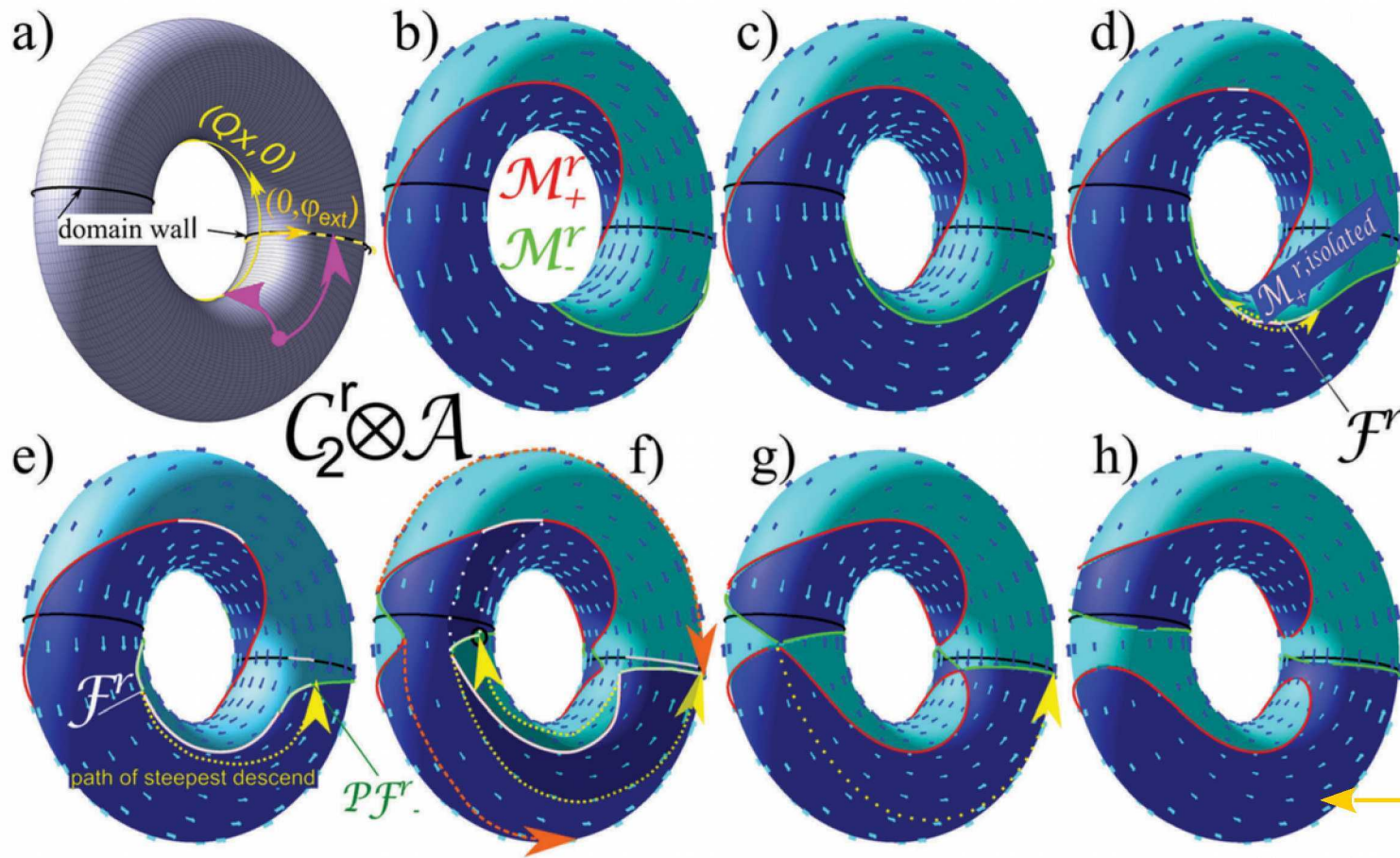


# Magnetoforeza nad nie-topologicznie strukturyzowanymi warstwami Co/Au

- trajektoria na powierzchni torusa opisuje zmiany położenia punktu stacjonarnego (**przestrzeń akcji**) w funkcji zmian kierunku zewnętrznego pola magnetycznego (**przestrzeń kontrolna**)



# Zredukowana przestrzeń fazowa dla różnych wysokości SPB nad podłożem



b) - h):  
obniżanie wysokości SPB nad  
podłożem od  $Q_z > 1$  do  $Q_z = 0.1$

$$Q = 2\pi/\lambda$$

$\lambda$  - przestrzenny okres struktury

linie **czerwone** i **zielone** to  
zbiory punktów stacjonarnych

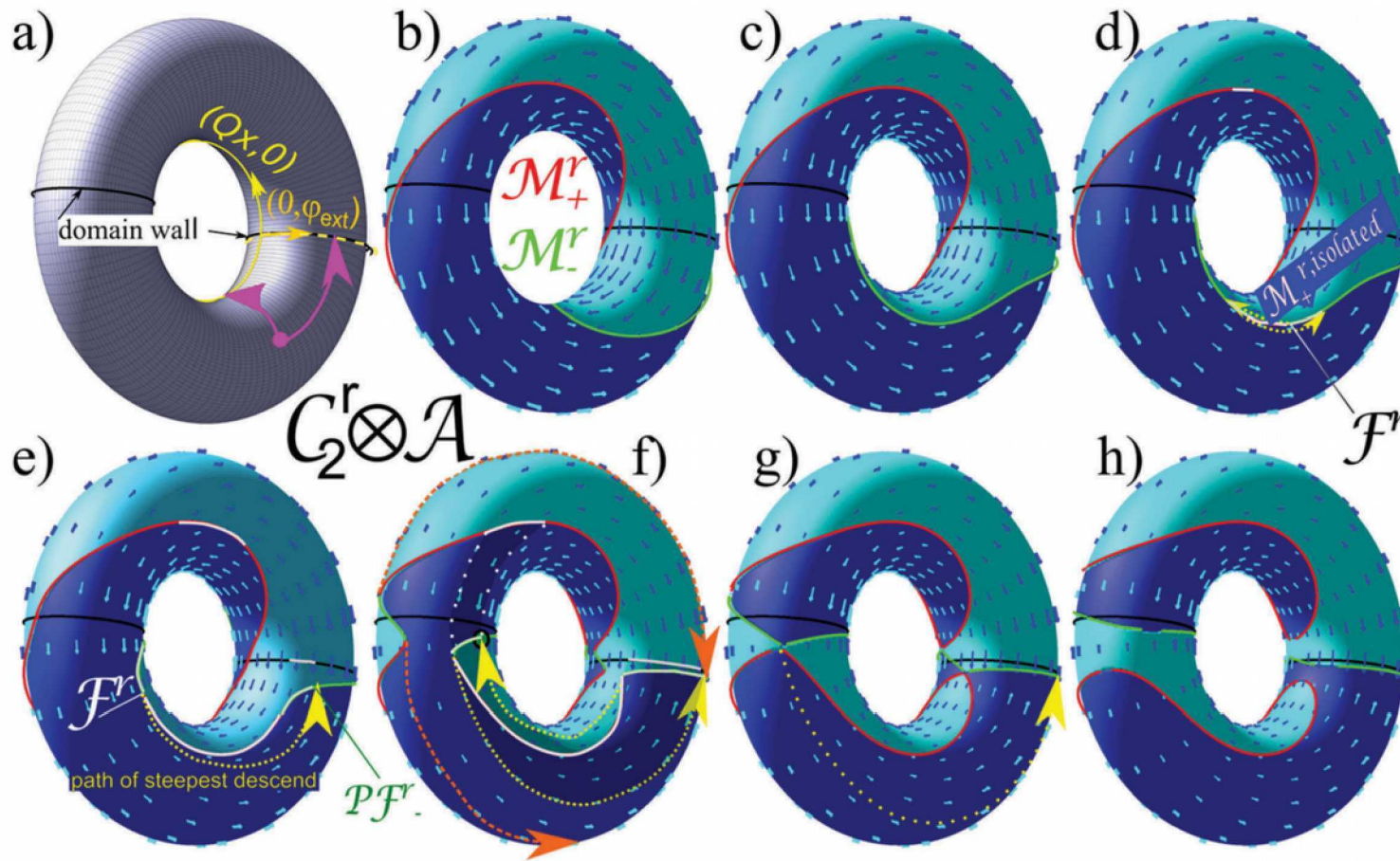
SPB poruszają się w dwóch re-  
żimach czasowych:

- reżim wewnętrzny (intrinsic) –  
ścieżka najszybszego spadku  
(strzałki na torusie)

- reżim adiabaticzny – znacz-  
nie wolniejsza dynamika

$$H_{\text{ext}} = M$$

# Zredukowana przestrzeń fazowa dla różnych wysokości SPB nad podłożem



SPB poruszają się na **zielonych** liniach (rozmaitościach)

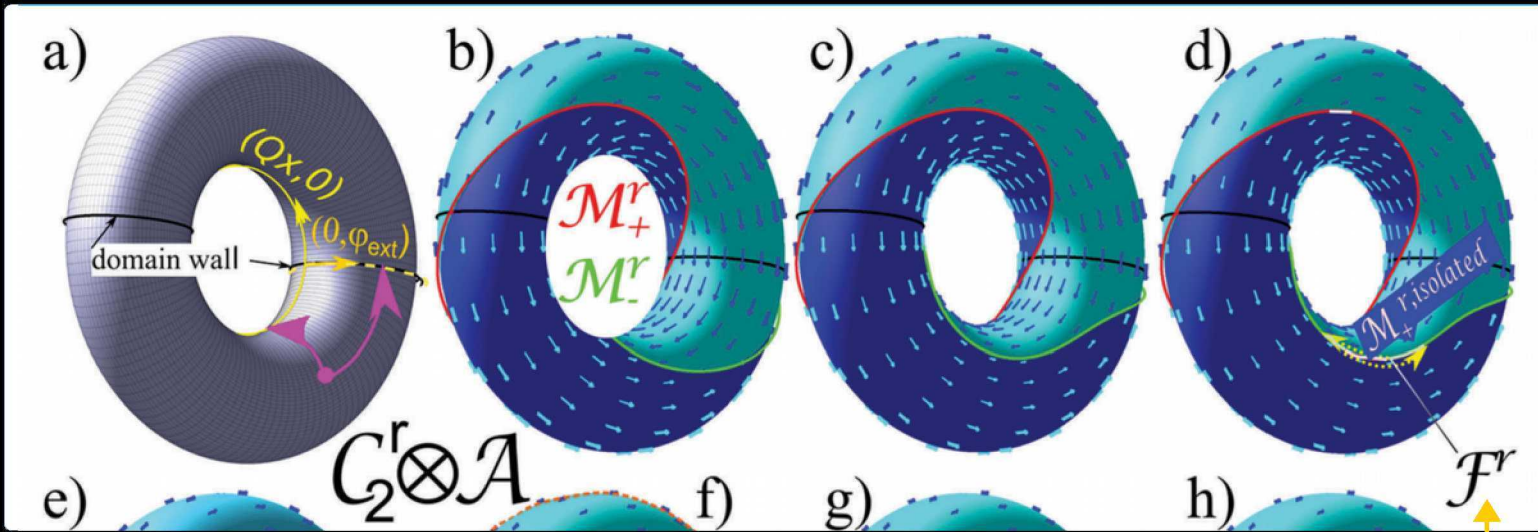
Cząsteczki diamagnetyczne na liniach czerwonych

- pętla wokół okręgu kontrolnego skutkuje pętlą wokół okręgu akcji – transport o wektor sieci

Płot (F) – punkt graniczny, w stacjonarnej rozmaitości, między obszarami odpowiadającymi minimom i maksimum a obszarami odpowiadającymi punktom siodłowym

$$F = \left\{ (x, \phi_{ext}) \mid \frac{\partial}{\partial x} U = \frac{\partial^2}{\partial x^2} U = 0 \right\}$$

# Zredukowana przestrzeń fazowa dla różnych wysokości SPB nad podłożem



SPB poruszają się na **zielonych** liniach (rozmaitościach)

Cząsteczki diamagnetyczne na liniach czerwonych

- pętla wokół okręgu kontrolnego skutkuje pętlą wokół okręgu akcji – transport o wektor sieci

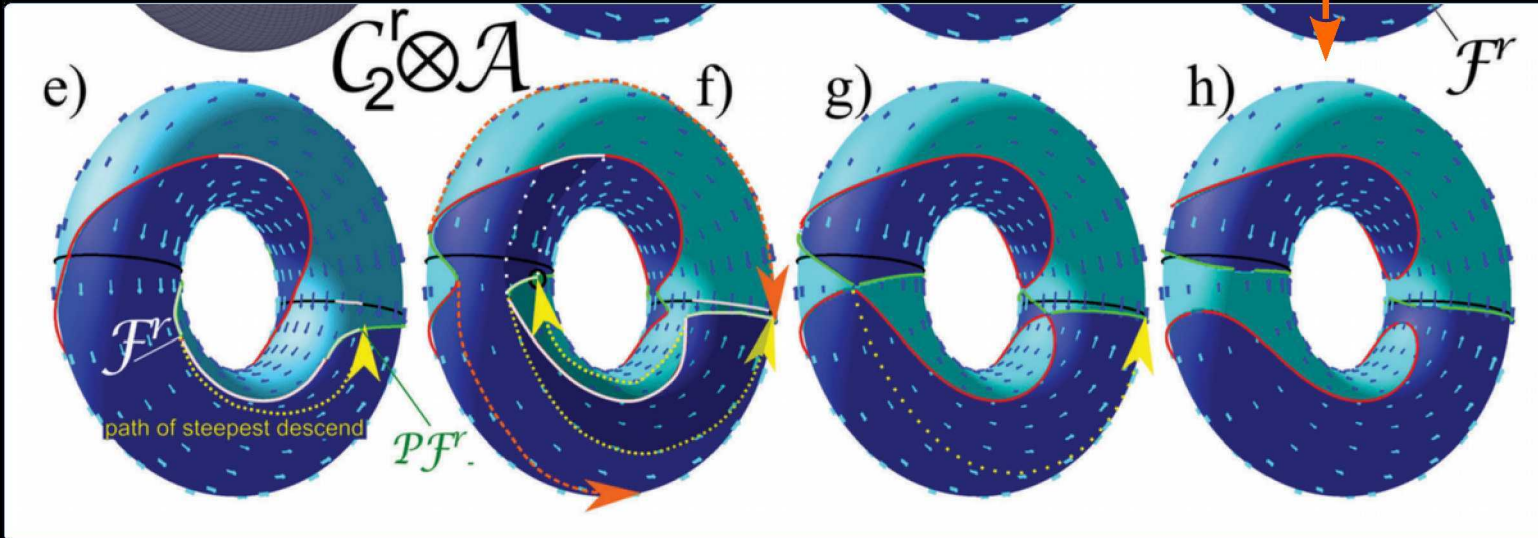
Płot (F) – punkt graniczny, w stacjonarnej rozmaitości, między obszarami odpowiadającymi minimom i maksimum a obszarami odpowiadającymi punktom siodłowym

$$F = \left\{ (x, \phi_{ext}) \mid \frac{\partial}{\partial x} U = \frac{\partial^2}{\partial x^2} U = 0 \right\}$$

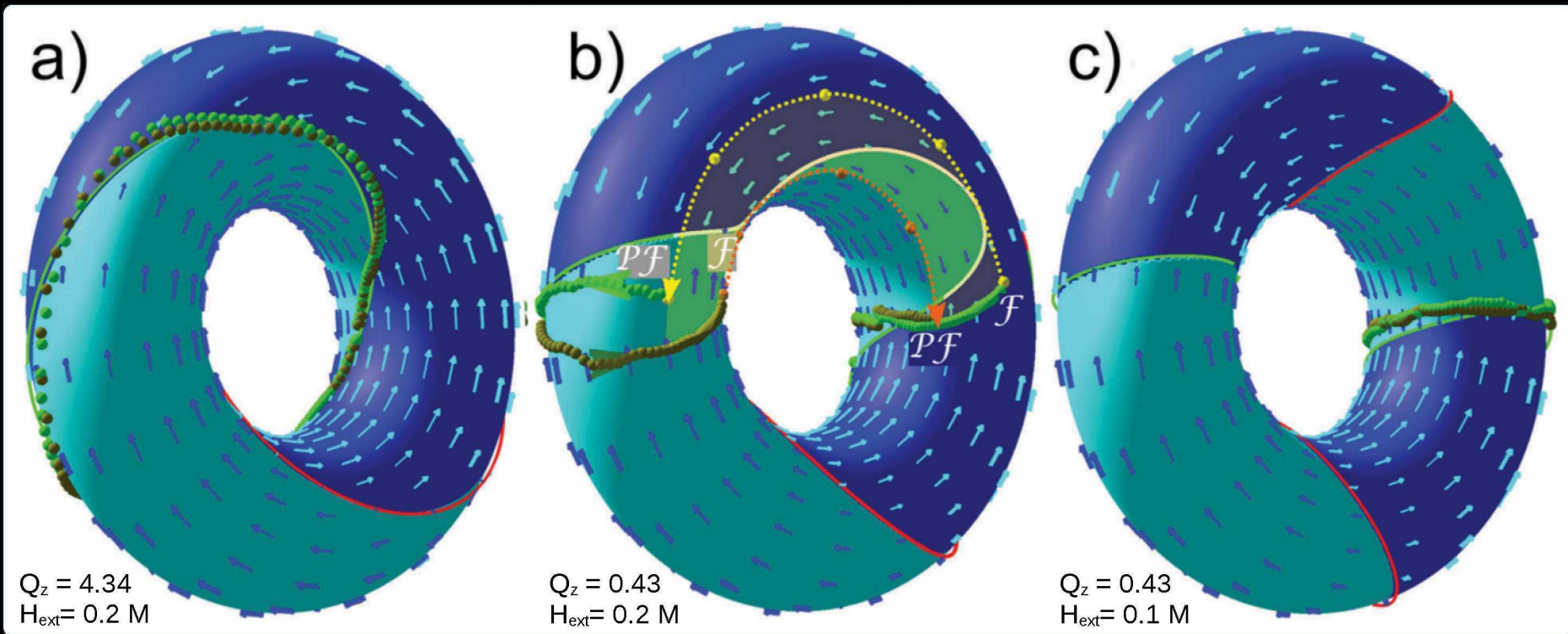
- dla krytycznej wartości  $Q_z = 0.34$  na rozmaitości  $M_+$  pojawia się płot, który przy dalszym jej zmniejszaniu przechodzi w izolowany odcinek  $M_+$  [(d)] (z dwoma płotami)
- dla SPB odcinek ten nie jest stacjonarny
- dla ustalonego kierunku pola (wolno zmiennego – reżim adiabatyczny) kulka przechodzi w reżimie wewnętrznym (szybki ruch) od jednego do drugiego płotu wzdłuż żółtej linii zgodnie z kierunkiem najszybszego spadku (ruch nieodwracalny)

# Zapadkowy ruch SPB

- dalsze zmniejszanie  $Q_z$  wydłuża ścieżkę bypassu (tzn. poza  $M'$ ) wzdłuż kierunku najszybszego spadku [(e)]
- choć powyższa ścieżka omija  $M'$  to prowadzi do takiego samego przesunięcia SPB po wykonaniu pętli w przestrzeni kontrolnej (przesunięcie o okres sieci) – transport w reżimie wewnętrznym (ang. **ratchet transport**) jest również topologiczny
- zmniejszanie  $Q_z$  do 0.09 prowadzi do zetknięcia się uprzednio rozłącznych  $M$  w czterech płotach
- dla  $Q_z < 0.09$   $M$  dzieli się na cztery rozłączne zbiory, ruch wzdłuż których **nie prowadzi do transportu** [pętla w przestrzeni kontrolnej wywołuje pętlę w przestrzeni akcji z zerową liczbą nawinięć (winding number)]



$$F = \left\{ (x, \phi_{ext}) \mid \frac{\partial}{\partial x} U = \frac{\partial^2}{\partial x^2} U = 0 \right\}$$



ruch adyabatyczny

ruch wewnętrzny  
(ratchet)

ruch „w miejscu”  
(poniżej przejścia topologicznego)

Teoria nie w pełni odpowiada doświadczeniu dla nie uniwersalnych wysokości  $Q_z (<1)$ , gdyż nie uwzględniono zmian geometrii struktury pasiastej granatu w zewnętrznym polu

# Ruch nad strukturą $C_2$ - eksperyment

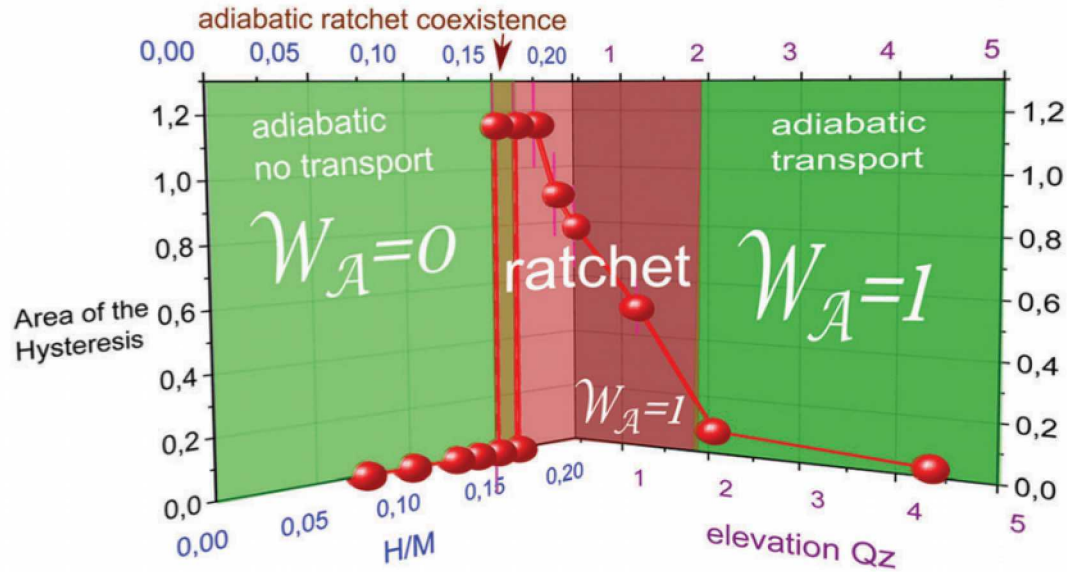
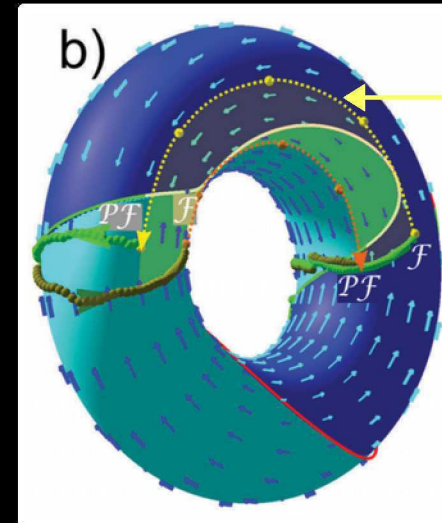


Fig. 5 Experimentally measured area of the hysteresis of the transport. The area of the hysteresis is measured on the surface of the torus  $C_2^I \otimes \mathcal{A}$ . The total area of a torus is  $(2\pi)^2 \approx 40$ . On the right we lowered the elevation  $Qz$ . This reveals the continuous transition from adiabatic transport toward ratchet motion. On the left side we decrease the external field amplitude at constant elevation. This reveals the discontinuous topological transition towards no transport.

- dla małych odległości SPB od podłoża (istotne przyczynki od wysokoczęstotliwościowych składowych potencjału magnetycznego) nie obserwuje się transportu adiabaticznego
- transport możliwy jest dla odpowiednio wysokich natężeń pola zewnętrznego



The two sections on  $M_r$  between fence and pseudo fence together with the paths of steepest descent connecting fence and pseudo fence **define the hysteresis** between forward and backward ratchet loops



Potencjał magnetyczny\* małej\*\* kulki  
superparamagnetycznej 500 nm na kwadratową  
sieciami domen o boku  $a = 4 \mu\text{m}$  i grubości 1 nm

$$E_{SPB}(\vec{r}) = -\frac{1}{2} \mu_0 \chi H^2$$

Bez zewnętrznego pola  
magnetycznego!

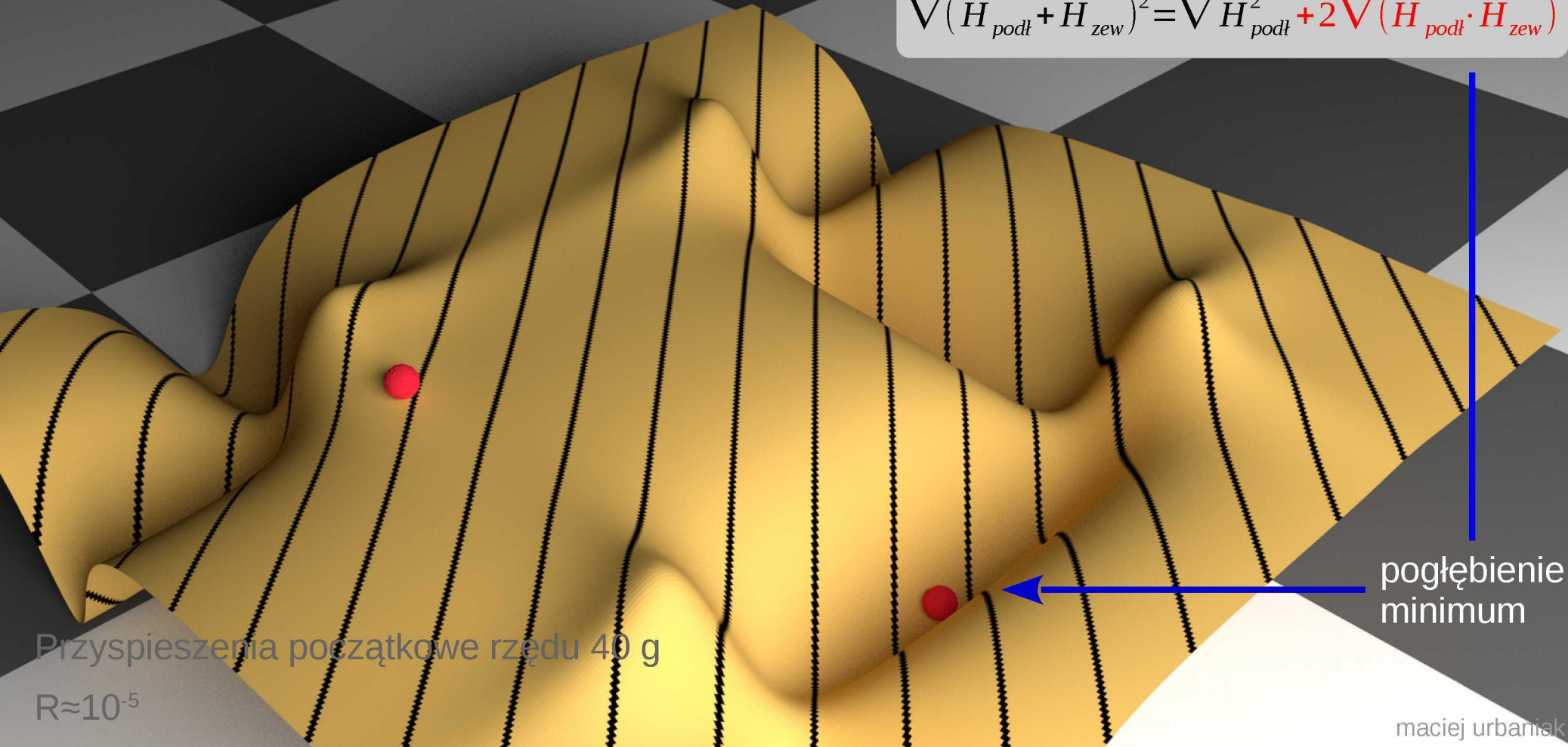
\* potencjał w polu magnetycznym  
\*\*  $r \ll a$

maciej urbańskiak

Potencjał magnetyczny małej kulki superparamagnetycznej 500 nm na kwadratową sieć domen o boku  $a = 4 \mu\text{m}$  i grubości 1 nm

Pole zewnętrzne:  $(0.5, 0.5, 0.5)$  mT

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



Przyspieszenia początkowe rzędu 40 g

$R \approx 10^{-5}$

pogłębienie minimum

maciej urbaniak



# Ruch nad strukturą $C_4$

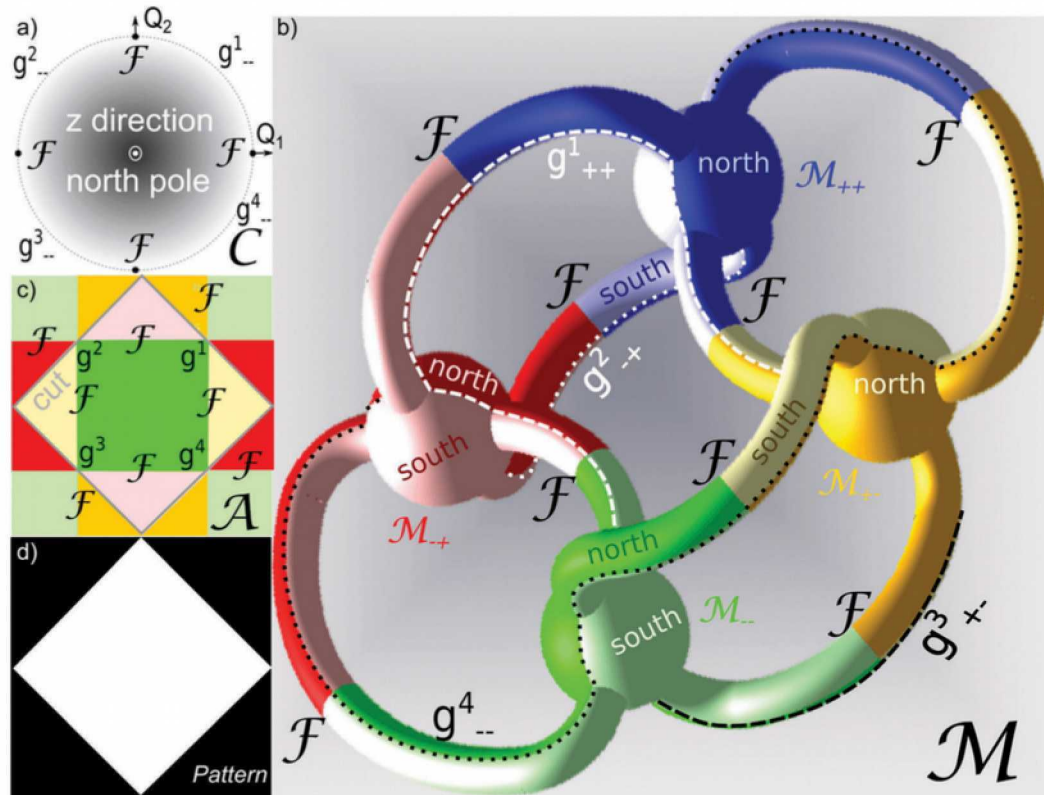
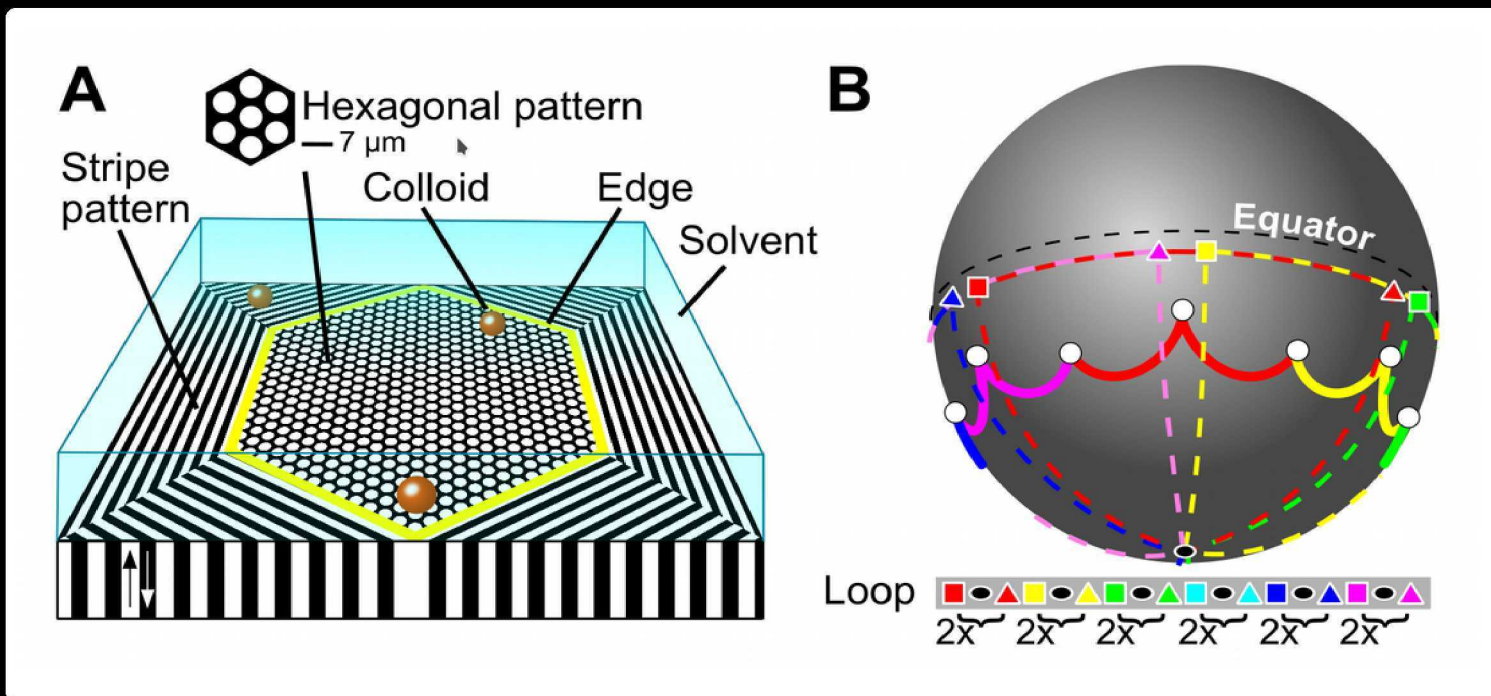


Fig. 8 (a) Top view of the four-fold symmetric control space including the fence points and the maximum segments  $g^i_-$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  of the four gates. (b) Genus five stationary manifold  $\mathcal{M}$ . Blue colors correspond to minima ( $\mathcal{M}_{++}$ ), green to maxima ( $\mathcal{M}_{--}$ ), red and yellow to saddle points. (c) Projection of the half of  $\mathcal{M}$  lying closer to  $\mathcal{M}_{--}$  into action space. The cut in  $\mathcal{A}$  is the projection of the points in  $\mathcal{M}$  separating both halves. (d) Magnetic pattern generating the four-fold symmetric universal potential. (see Appendix A.3 for a concise definition of the gates).

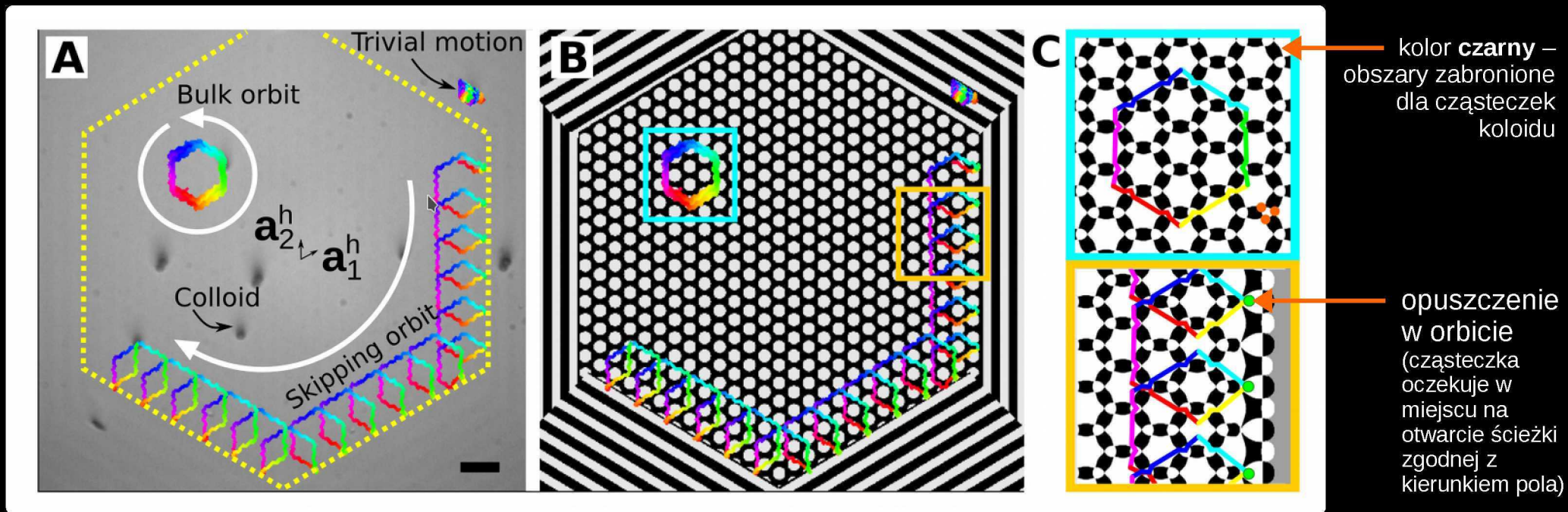
- dla struktur dwuwymiarowych rozma-  
itość stacjonarna jest dwuwymiarową  
przestrzenią zanurzoną w przestrzeni  
czterowymiarowej (rysunek z lewa jest  
jedną z możliwych jej wizualizacji)
- pętle modulacji otaczające punkty spe-  
cjalne [płaty (punkty lub odcinki)] powo-  
dują transport SPB/diamagnetyka o je-  
den wektor domenowej struktury ma-  
gnetycznej – pętle fundamentalne

# Koloidalne izolatory topologiczne - przykład magnetoforezy na strukturze mozaikowej



- dla heksagonalnej struktury domen pętla modulacji (linie kreskowane) obejmująca dwa segmenty łączące białe punkty w **C** wywołuje transport o jeden z sześciu najkrótszych wektorów prymitywnych sieci heksagonalnych w przestrzeni **A**

# Koloidalne izolatory topologiczne - przykład magnetoforezy na strukturze mozaikowej



- w obszarach przykrawędziowych, ze względu na brak „bramek”, cząsteczki superparamagnetyczne poruszają się po „skipping orbits”: w trajektorii w **A** nie występuje jedna z krawędzi sześciokąta – wypadkowa translacja po wykonaniu pętli w **C**
- w obszarze objętościowym, dla danej pętli modulacji w **C**, trajektorie w **A** są **zamknięte**
- w pobliżu krawędzi trajektorie są **otwarte** – występuje efektywny transport

## WNIOSKI

- pole magnetyczne struktury domenowej, naturalnej jak i sztucznej, w warstwach na bazie Co z prostopadłą anizotropią magnetyczną umożliwia magnetoforezę mikrometrowych cząstek superparamagnetycznych w środowisku wodnym
- topologiczna ochrona dotyczy wpływu małych zaburzeń kształtu pętli modulacji, zmian kształtu cząstek koloidalnych i odstępstw strukturyzowanego układu domen od periodyczności na wypadkowy wektor przesunięcia dla pełnej pętli modulacji — jest to istotne dla praktycznych zastosowań magnetoforezy.