

SEMINARIUM SPRAWOZDAWCZE IFM PAN z działalności naukowej prowadzonej w roku 2023

Zakład Cienkich Warstw i Nanostruktur (ZN 3)

Sztuczne domeny magnetyczne bez ścian domenowych w strukturyzowanych magnetycznie ferrimagnetycznych warstwach ziemia rzadka-metal przejściowy (TWIST)

Projekt badawczy OPUS (PB 3.31): 2020/39/B/ST5/01915 (2021-2025), dr hab. Piotr Kuświk, prof. IFM PAN

Funkcjonalne układy warstwowe i nanostruktury

Osiągnięcie naukowe w ramach zadania statutowego (2023-2025)

priony

grzyby

antibiotyki

mikroplastik

denga

wiroidy

PM10

ocieplenie klimatu

lęgniowce

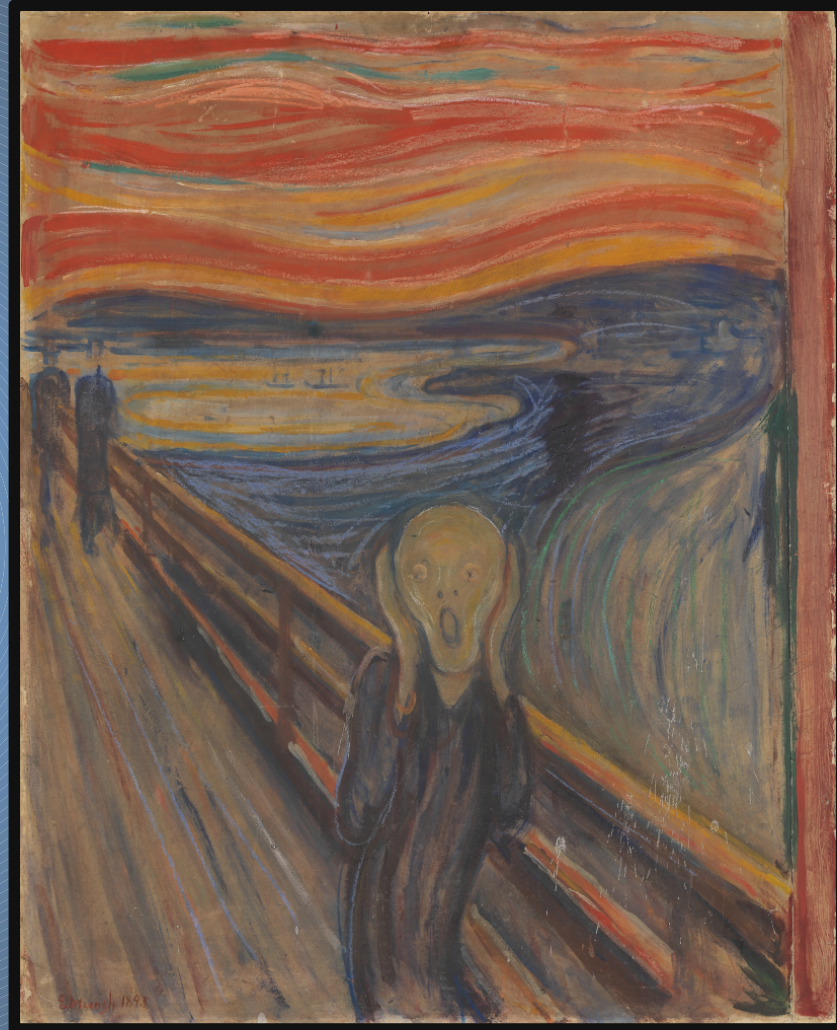
PFAS

teflon

bakterie

wirusy

sepsa



Edvard Munch, Krzyk, 1893, 73 cm × 91 cm

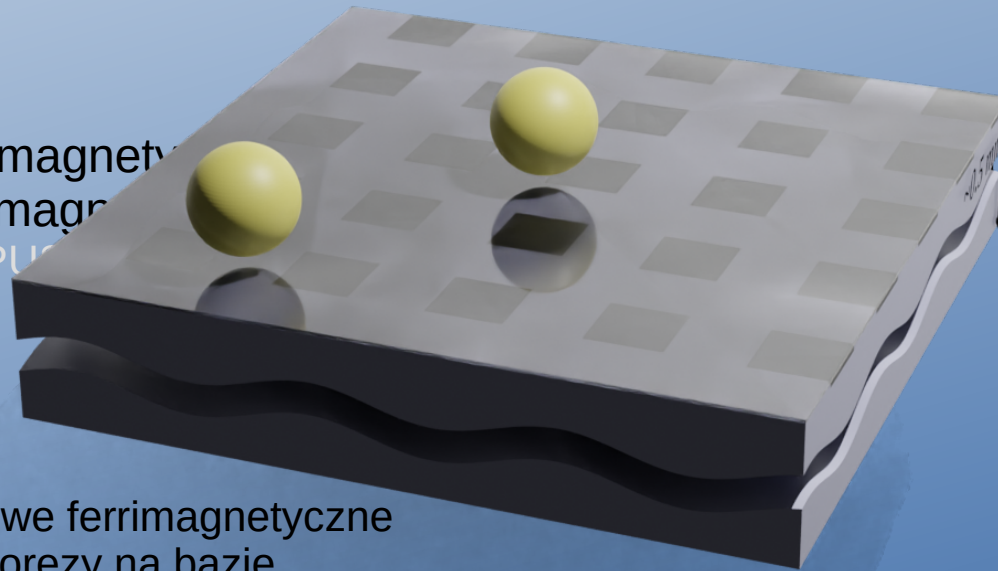
Nasjonalgalleriet, Oslo

maciej urbaniak

SEMINARIUM SPRAWOZDAWCZE IFM PAN

z działalności naukowej prowadzonej w roku 2023

Zakład Cienkich Warstw i Nanostruktur (ZN 3)



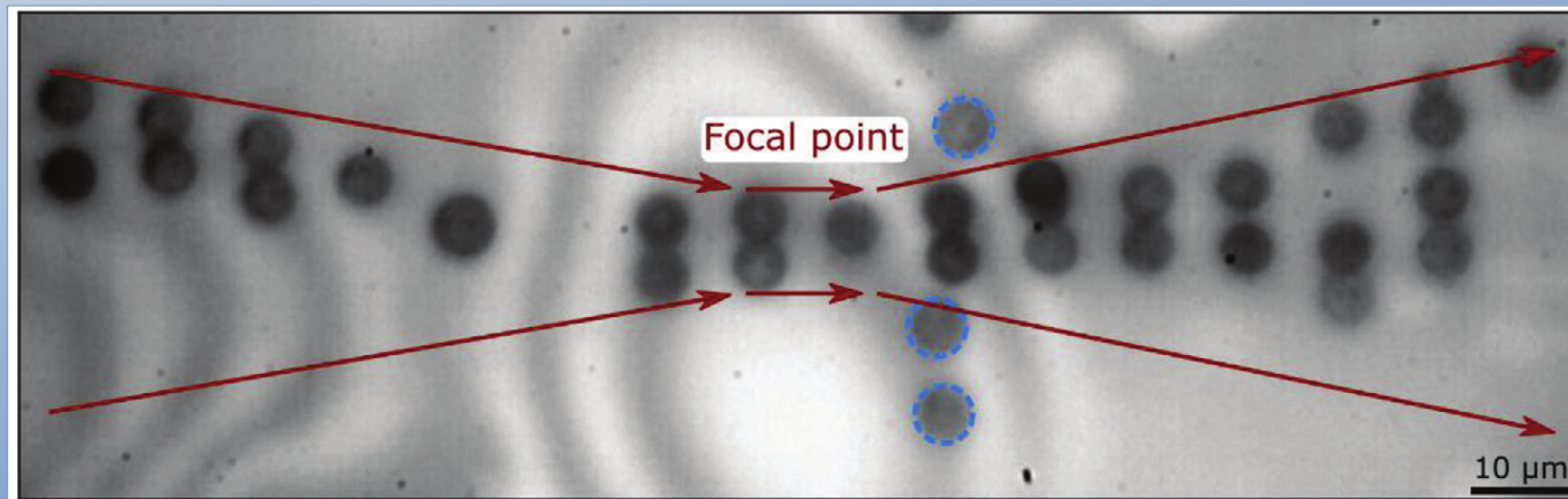
Sztuczne domeny magnetyczne
magnetycznie ferrimagnetyczne
Projekt badawczy OPUS

ryzowanych
przejściowy (TWIST)

Nowe cienkowarstwowe ferrimagnetyczne
podłoża do magnetoforezy na bazie
stopów **TbCo**

SEMINARIUM SPRAWOZDAWCZE IFM PAN

z działalności naukowej prowadzonej w roku 2023



Funkcjonalne układy warstwowe i nanostruktury

Osiągnięcie naukowe w ramach zadania statutowego (2023-2025)

Mikroforetyczny lejek, koncentrator i zawór na bazie warstw
 $\text{Si}(100)/\text{Cu}(5\text{ nm})/\text{Ir}_{17}\text{Mn}_{83}(\mathbf{30\text{ nm}})/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}(\mathbf{10\text{ nm}})/\text{Si}(20\text{ nm})$
z anizotropią wymiany

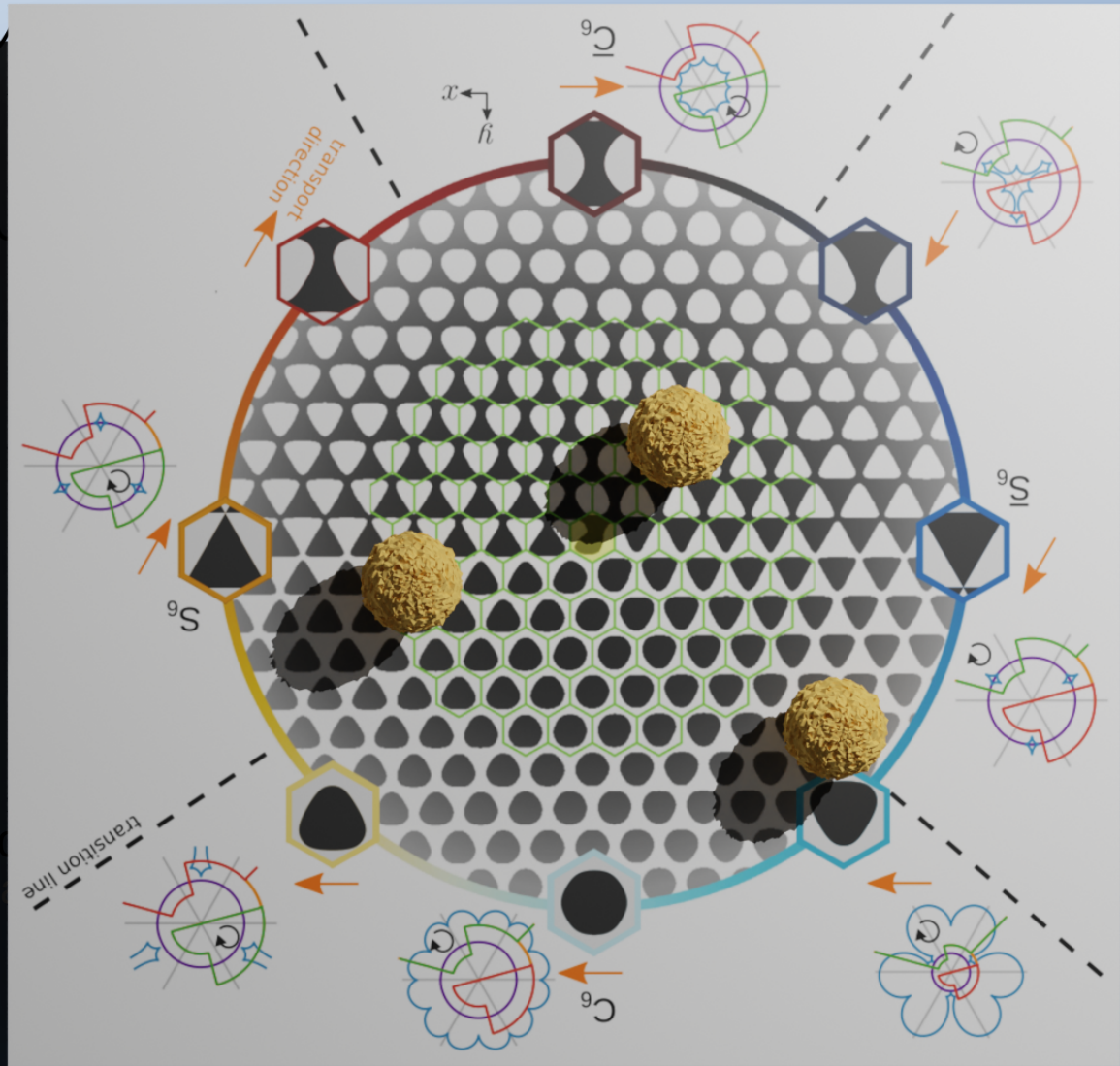
Small 2305675 (2023)

R. Huhnstock, L. Paetzold,
M. Merkel, P. Kuświk,
A. Ehresmann

Nat. Comm. 14, 7517 (2023)
Nico C. X. Stuhlmüller *et al.*

Równoczesna i niezależna
topologiczna kontrola
identycznych mikrocząstek w
nieperiodycznych potencjałach

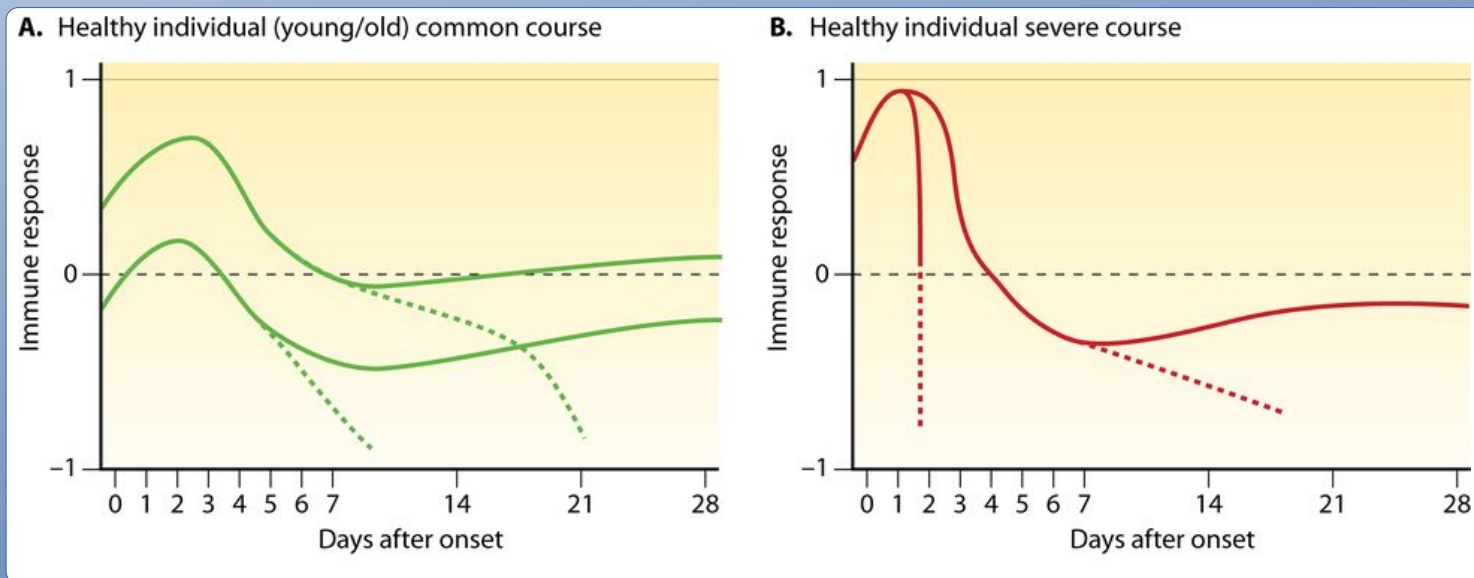
Funkcjonalne układy warstwowe i nanostruktury
Osiągnięcie naukowe w ramach zadania strukturalnego



Motywacja – np. sepsa

- na świecie około **25 mln** zachorowań rocznie; 8 mln przypadków śmiertelnych
- szczególnie dotyka osób starszych (między 50 a 80 rokiem życia) i przypadki będą prawdopodobnie częstsze w miarę **starzenia się populacji**
- „One important requirement for sepsis biomarkers **is the time benefit** that they should offer for the detection of a systemic inflammatory response to an infection before clinical signs and organ damage become apparent.”

Różne przebiegi odpowiedzi immunologicznej w reakcji na sepsę



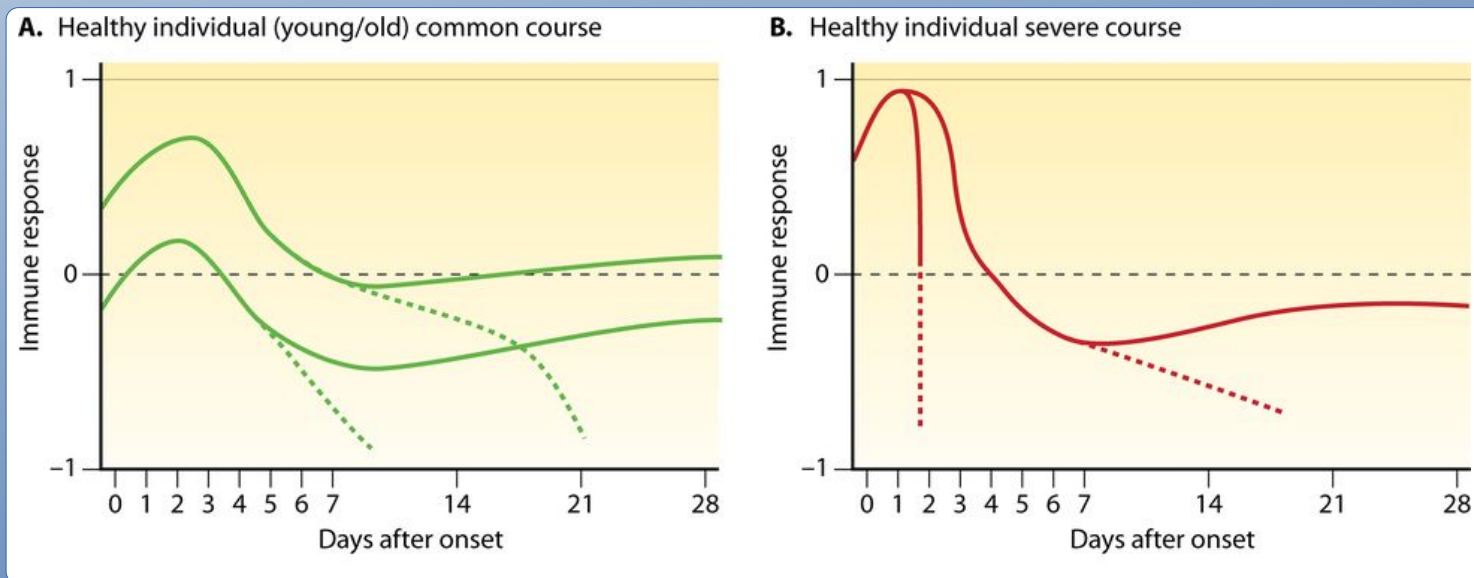
K. Reinhart et al.,
Clin. Microbiol. Rev. 2012;25:609-634

... (A to D) Immune responses are displayed, with 1 being maximally proinflammatory and -1 being maximally anti-inflammatory. **Dotted lines indicate a course leading to death.** ...

Motywacja – np. sepsa

- bardzo szybka dynamika sepsy – po **36 h** mogą przestać funkcjonować wszystkie organy organizmu; od wystąpienia niestabilności w systemie krążenia **każda godzina** opóźnienia terapii (na początku, przed badaniami, z użyciem szerokiego zestawu antybiotyków) zwiększa prawdopodobieństwo śmierci o ok. **7%**.
- często niejasna przyczyna (tylko ok. 6% wynika z zakażeń około-zranieniowych)

Różne przebiegi odpowiedzi immunologicznej w reakcji na sepsę



K. Reinhart et al.,
Clin. Microbiol. Rev. 2012;25:609-634

... (A to D) Immune responses are displayed, with 1 being maximally proinflammatory and -1 being maximally anti-inflammatory. **Dotted lines indicate a course leading to death.** ...

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 !!

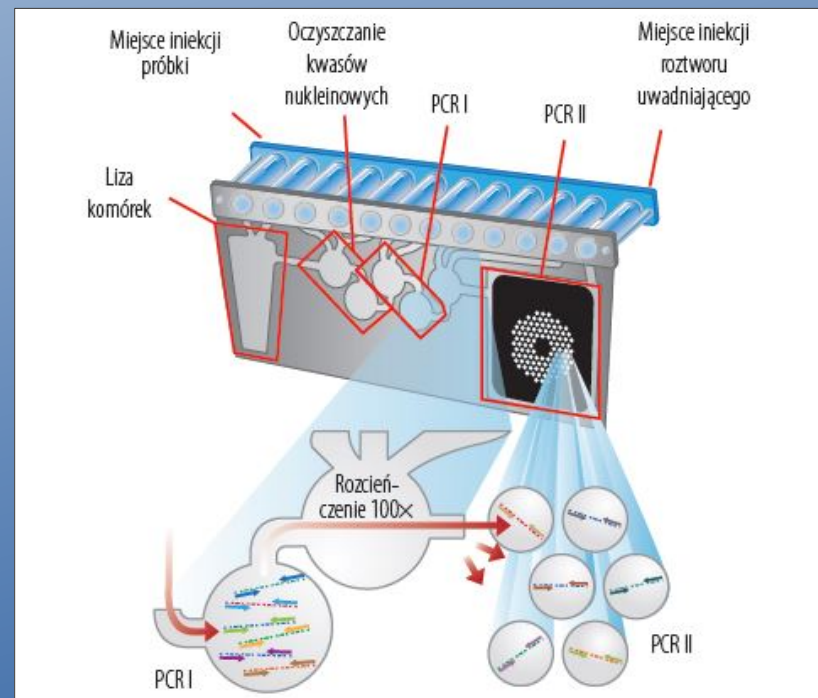
Przykład współczesnej diagnostyki szpitalnej

- Aparat FilmArray® - kompleksowy panel do diagnostyki wybranych zakażeń

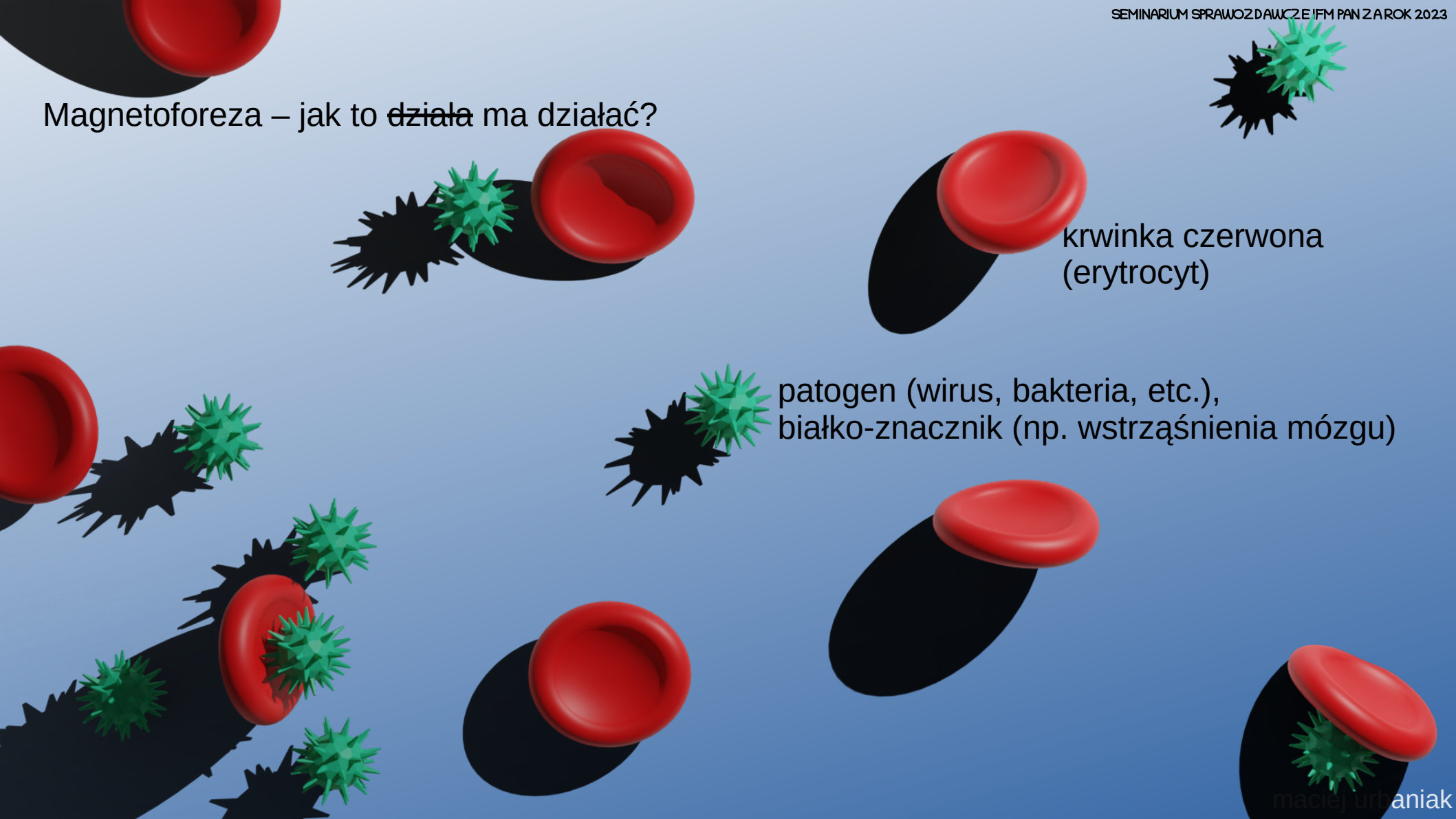
Zakupiony ze środków **Wielkiej Orkiestry Świątecznej Pomocy** ze zbiórki w 2023 r. dla Uniwersyteckiego Dziecięcego Szpitala Klinicznego w Białymstoku

- Testy dostosowane do wykrywania ok. 20 wybranych patogenów (wersja SOR - **do 120**)
- Metoda: technologia mikrofluidyczna (mikroprzepływowa) + reakcja łańcuchowa polimerazy; **wynik po około 1 h**

- FilmArray® Respiratory Panel: do diagnostyki zakażeń górnych dróg oddechowych, pozwala na wykrywanie 20 wirusów i bakterii.
- FilmArray® Blood Culture Identification Panel: do diagnostyki zakażeń krwi (sepsa), pozwala na wykrycie i identyfikację 24 patogenów i 3 genów oporności na antybiotyki. Za pomocą tylko jednego testu można zidentyfikować patogeny w 9 na 10 dodatnich posiewów.
- FilmArray® Gastrointestinal Panel: do diagnostyki zakażeń układu pokarmowego, pozwala na wykrycie 22 najczęściej występujących patogenów, w tym wirusów, bakterii i pierwotniaków, które powodują zakaźną biegunkę.
- FilmArray® Meningitis/Encephalitis Panel: do diagnostyki zakażeń ośrodkowego układu nerwowego, pozwala na wykrycie 14 najczęściej występujących patogenów, w tym wirusów, bakterii i grzybów w płynie mózgowo-rdzeniowym.



Magnetoforeza – jak to działa ma działać?



krwinka czerwona
(erytrocyt)

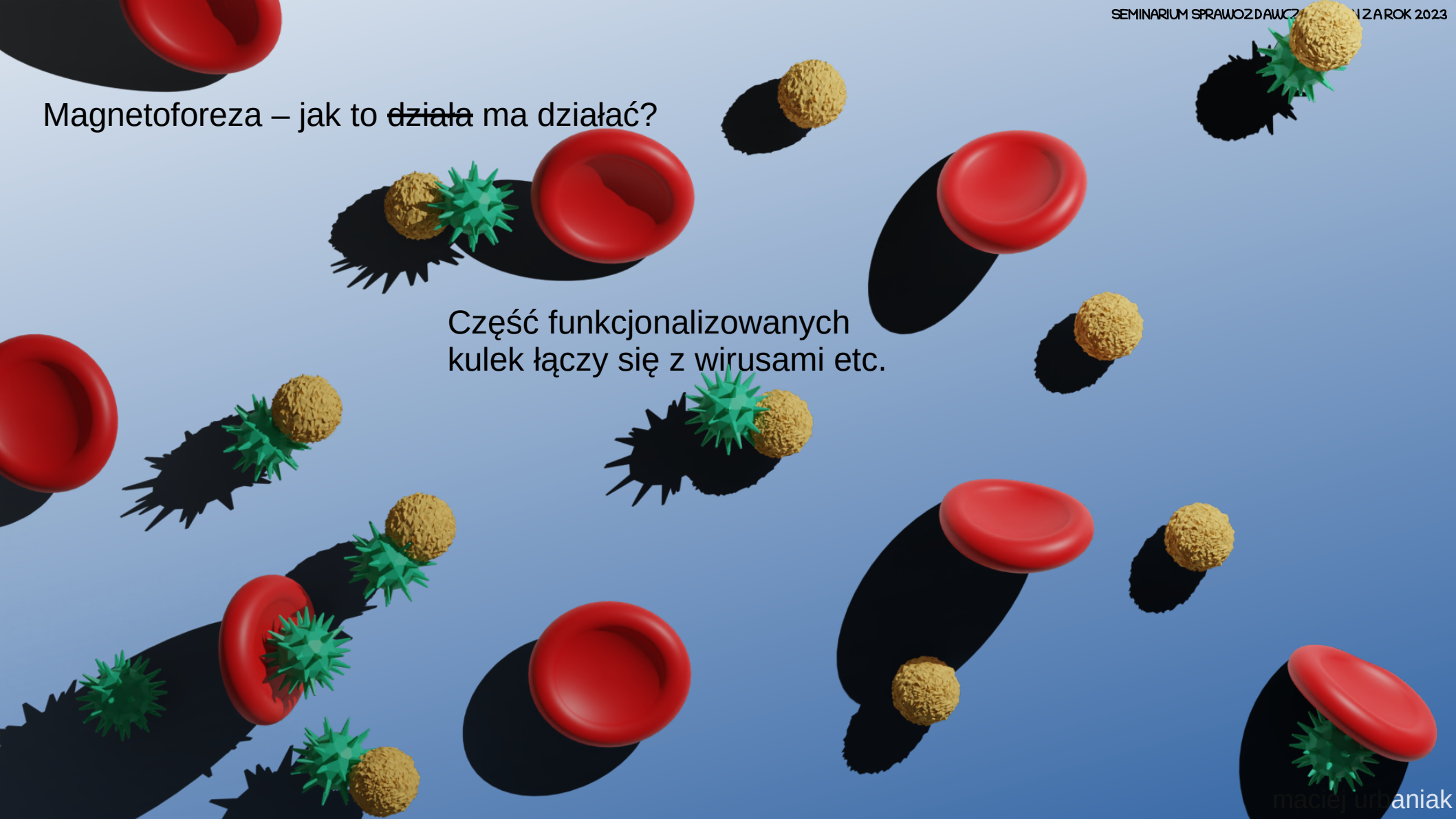
patogen (wirus, bakteria, etc.),
białko-znacznik (np. wstrząśnienia mózgu)

Magnetoforeza – jak to działa ma działać?

do układu wprowadza się
superparamagnetyczne
kulki, których
powierzchnia
funkcjonalizowana jest
tak by łączyły się z
szukanymi patogenami
etc.

Magnetoforeza – jak to działa ma działać?

Część funkcjonalizowanych
kulek łączy się z wirusami etc.



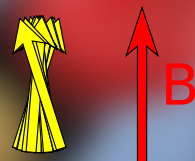
Magnes – jak to działa ma działać?

Standardowo magnes lub elektromagnes używany jest do skoncentrowania/ transportu kulek do obszaru analizy (detektora)

magnes



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



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

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

Badane przez nas cienkie warstwy magnetyczne pozwalają, poprzez bombardowanie jonami lub litografię, na znaczną lokalną modyfikację własności magnetycznych (namagnesowanie, pole koercji/przełączania, etc.)



Uzyskane struktury pozwalają na **kontrolowany transport** cząstek superparamagnetycznych (SPB) poprzez odpowiednie kombinacje **gradientowego pola magnetycznego podłoża** i jednorodnego pola zewnętrznego.

Moment magnetyczny bombardowanych obszarów **m** można przełączać ~niezależnie od orientacji **m** matrycy

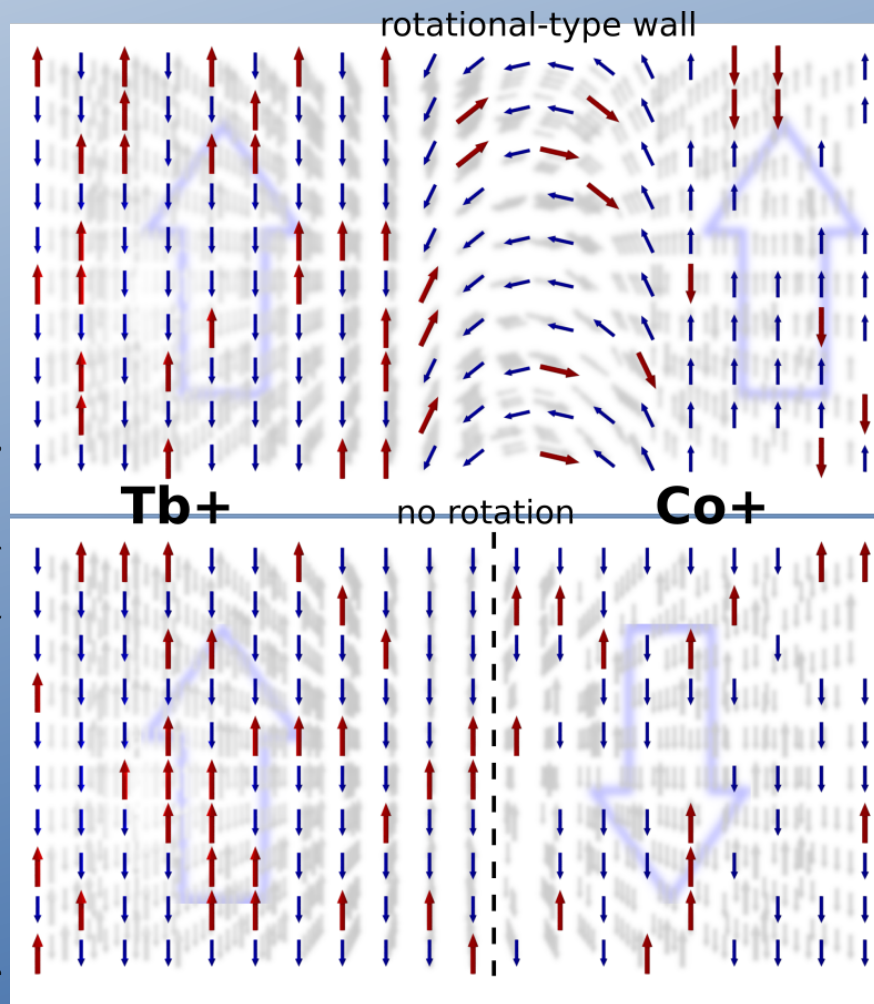
Ti 4 nm/Au 30 nm/(Tb 1.05 nm/Co 0.66 nm)₆/Au 5 nm

- **ferrimagnetyk**; w stanie po naniesieniu namagnesowanie zdominowane przez podsieć Tb
- bombardowanie warstw zogniskowaną wiązką jonów Ga⁺ (30 keV) prowadzi do **preferencyjnego utleniania Tb** i obniżenia efektywnego momentu podsieci Tb
- powyżej krytycznej dawki Ga⁺ dominuje namagnesowanie Co – wypadkowy moment magnetyczny równoległy do **m** podsieci Co

M. Urbaniak, D. Kiphart, M. Matczak, G. D. Chaves O'Flynn,
F. Stobiecki, P. Kuświk

próbki: D. Kiphart, P. Kuświk, ...

Phys. Rev. Lett. 124, 047203 (2020), Ł. Frąckowiak et al.

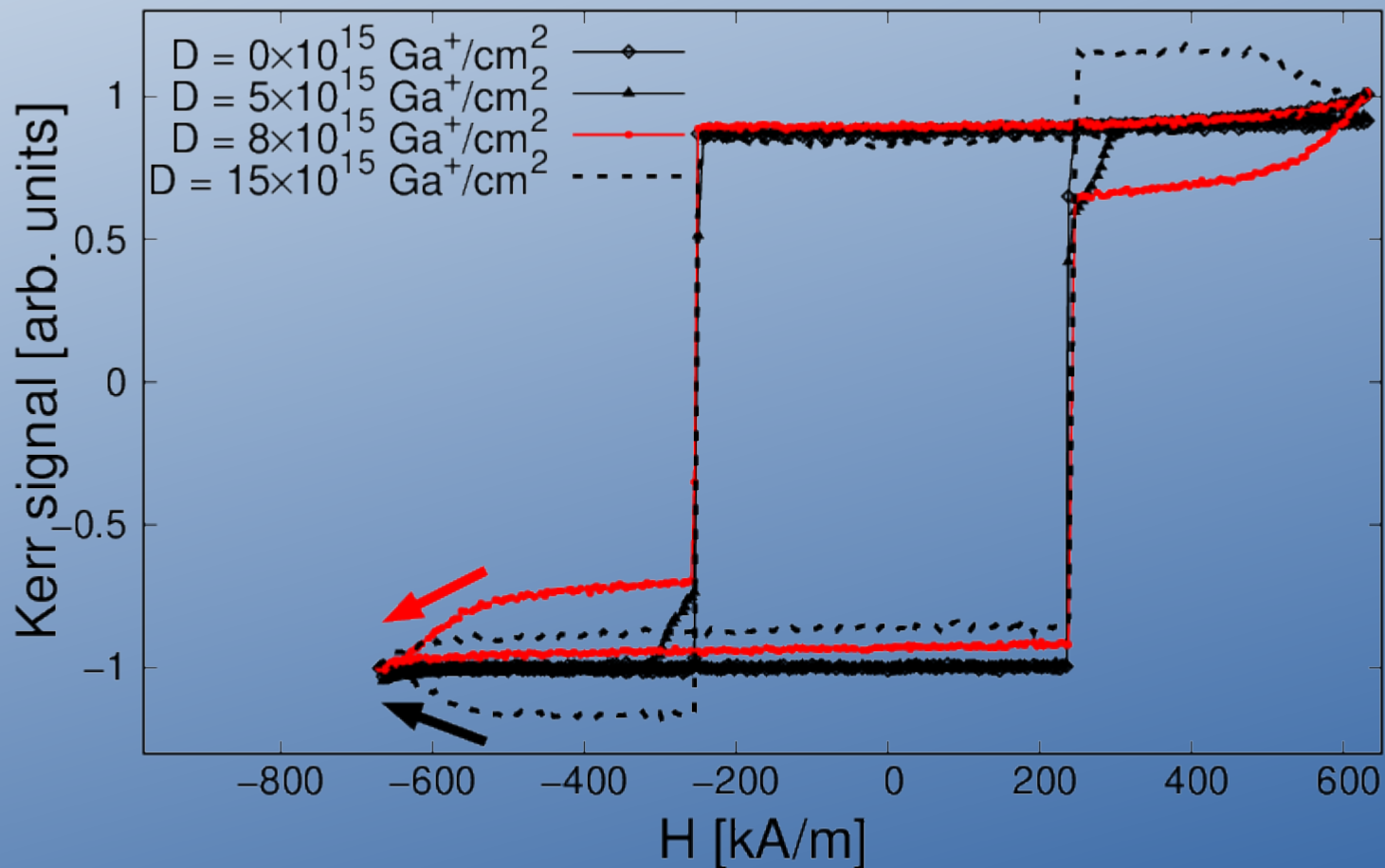


Ti 4 nm/Au 30 nm/(Tb 1.05 nm/Co 0.66 nm)₆/Au5 nm

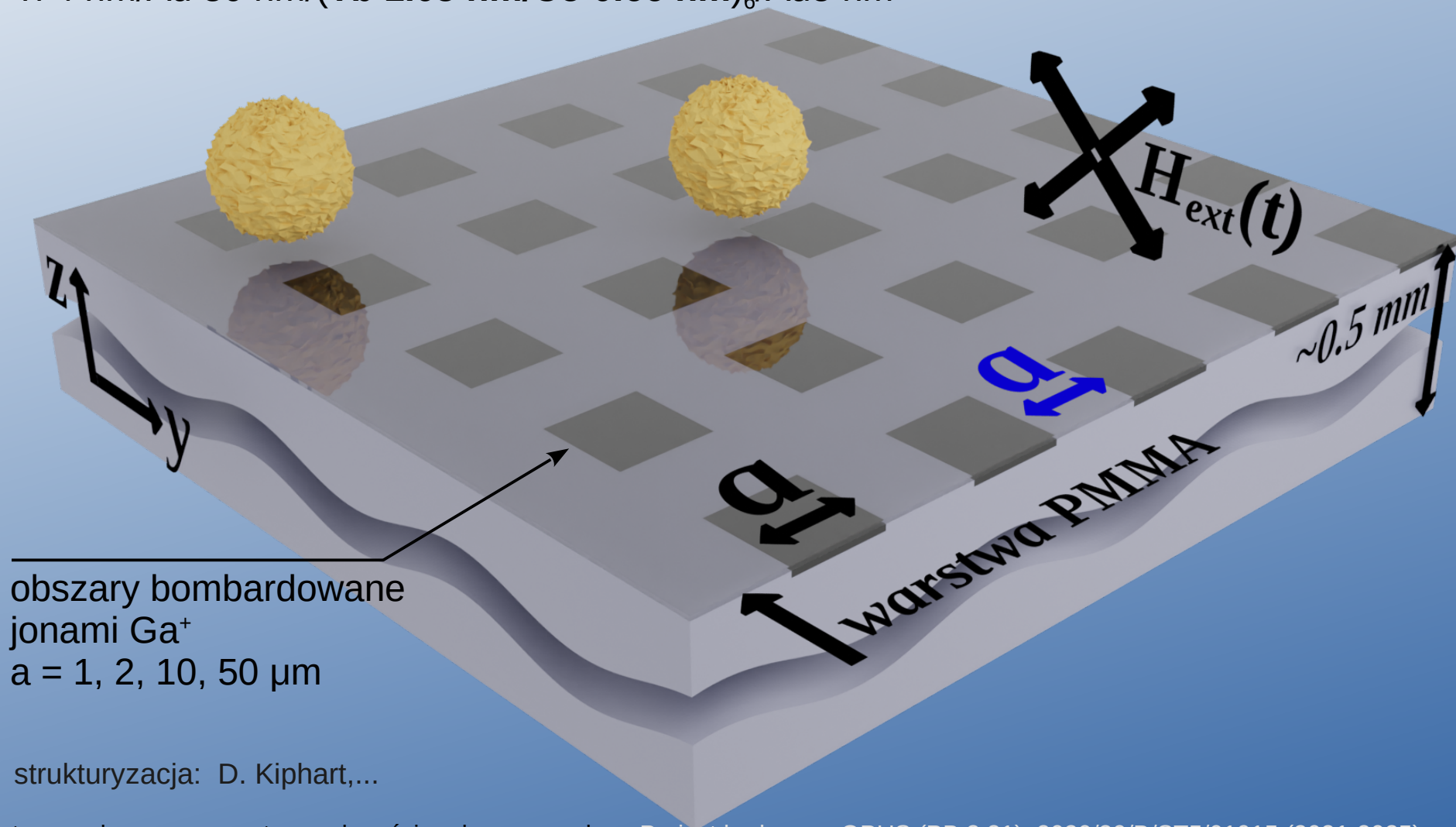
- bombardowane obszary charakteryzują się zwiększonym polem przełączania
- możliwość niezależnej zmiany orientacji obszarów bombardowanych i matrycy

uwaga: obserwowany dla najwyższej dawki sygnał pośredni wyższy niż w nasyceniu wynika z faktu, że sygnał Kerrowski pochodzi głównie od atomów Co

próbki: D. Kiphart, P. Kuświk, ...



Ti 4 nm/Au 30 nm/(Tb 1.05 nm/Co 0.66 nm)₆/Au 5 nm



obszary bombardowane
jonami Ga⁺
 $a = 1, 2, 10, 50 \mu\text{m}$

strukturyzacja: D. Kiphart,...

Ti 4 nm/Au 30 nm/(Tb 1.05 nm/Co 0.66 nm)₆/Au 5 nm

Wizualizacja całki z $-B^2$ po objętości kulki o średnicy $2.8\ \mu\text{m}$; środek kulki położony $2\ \mu\text{m}$ nad podstawą warstw magnetycznych. Grubość warstwy magnetycznej – $10\ \text{nm}$.

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

bez zewnętrznego pola magnetycznego

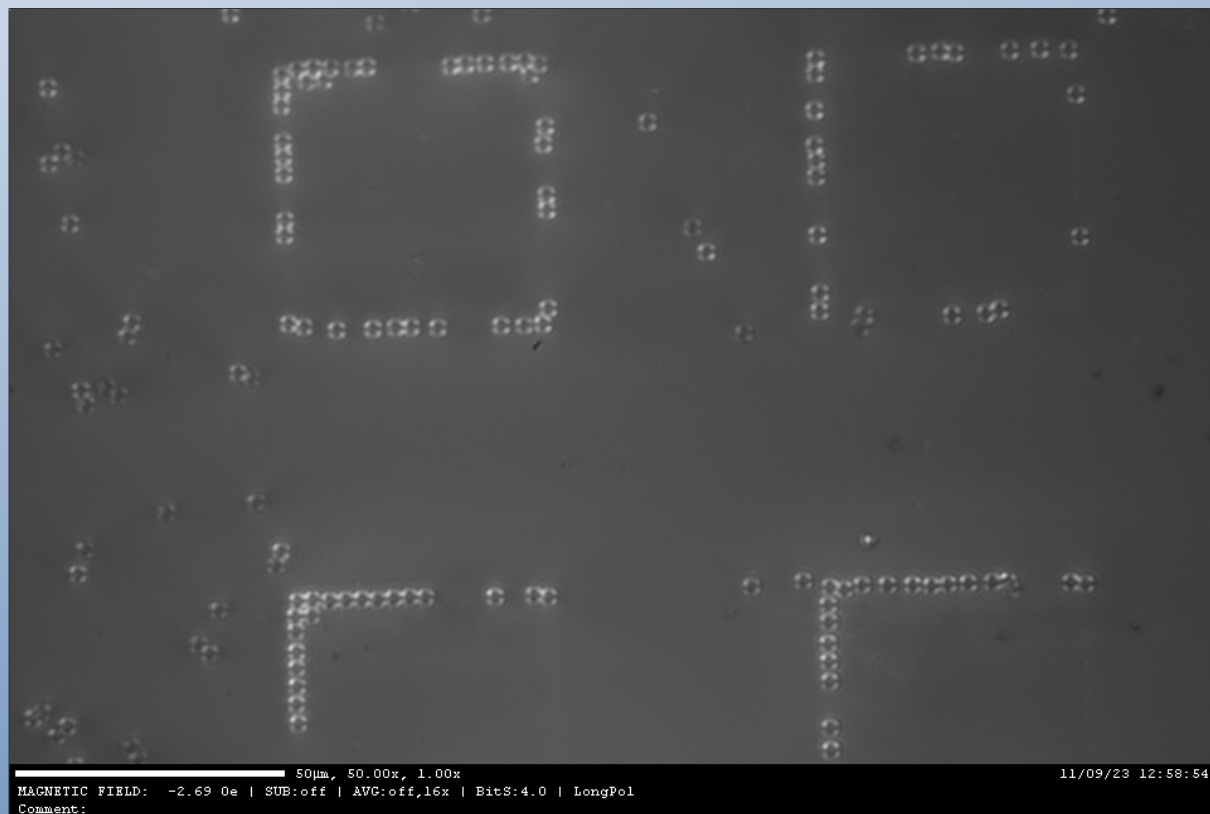
potencjał kwaziperiodyczny

Ti 4 nm/Au 30 nm/(Tb 1.05 nm/Co 0.66 nm)₆/Au 5 nm

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

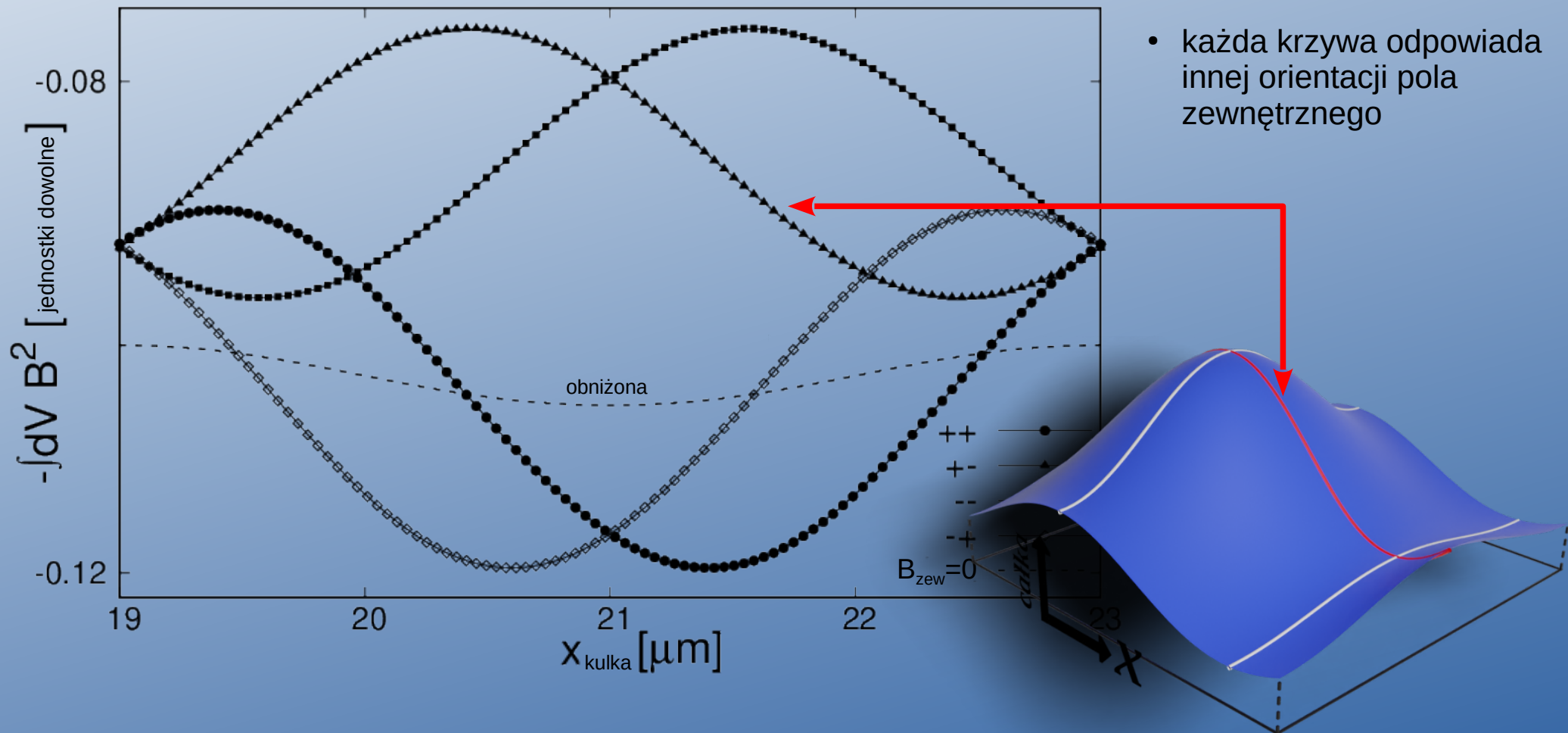
z zewnętrznym polem
magnetycznym: (2,0,-2 mT)

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

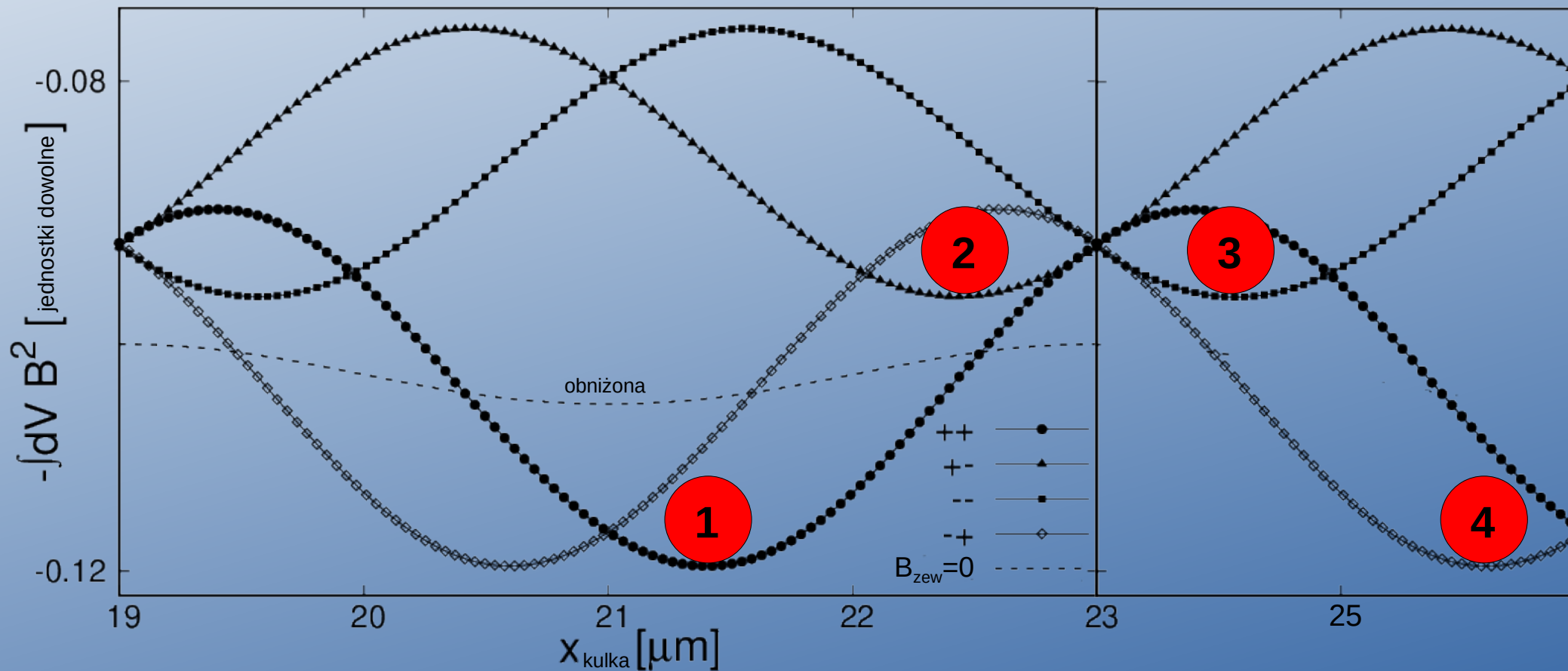


- kwadraty $50 \times 50 \mu\text{m}^2$
bombardowane dawką $D = 8 \times 10^{15} \text{ Ga}^+/\text{cm}^2$
- momenty efektywne **m**
kwadratów antyrównoległe do **m**
matrycy
- superparamagnetyczne kulki
dekorują obszary ścian
domenowych — potwierdzenie
obecności **stosunkowo silnych**
pól magnetycznych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

Mechanizm ruchu kulek w zmiennym polu magnetycznym



Mechanizm ruchu kulek w zmiennym polu magnetycznym

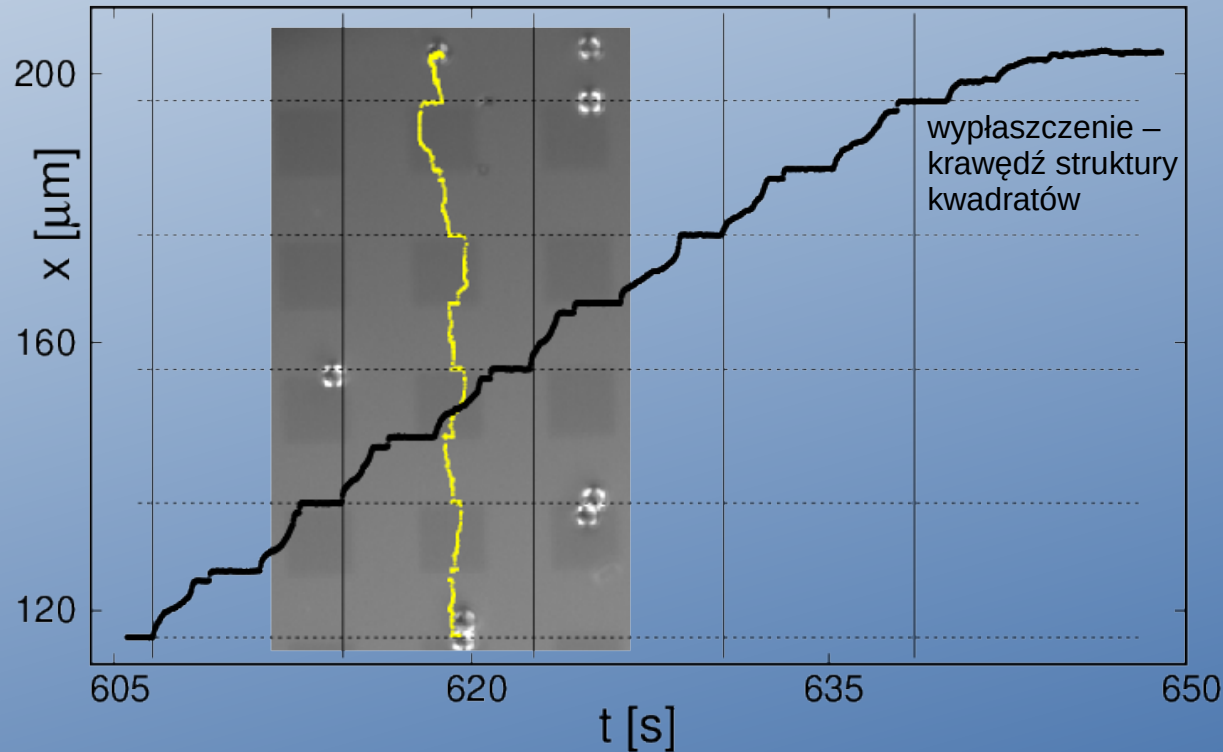


rucho postępowy: 0-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-(1-2-3-4)-... lub 0-4-3-2-1-(4-3-2-1)-...

Ti 4 nm/Au 30 nm/(Tb 1.05 nm/Co 0.66 nm)₆/Au 5 nm

- kwadraty $10 \times 10 \mu\text{m}^2$
bombardowane dawką
 $D = 8 \times 10^{15} \text{ Ga}^+/\text{cm}^2$
- pole magnetyczne przełączane z
częstotliwością $f = 0.125 \text{ Hz}$
- reżym synchronizacji fazy (ruchu
kulek względem zmian pola)

patrz film



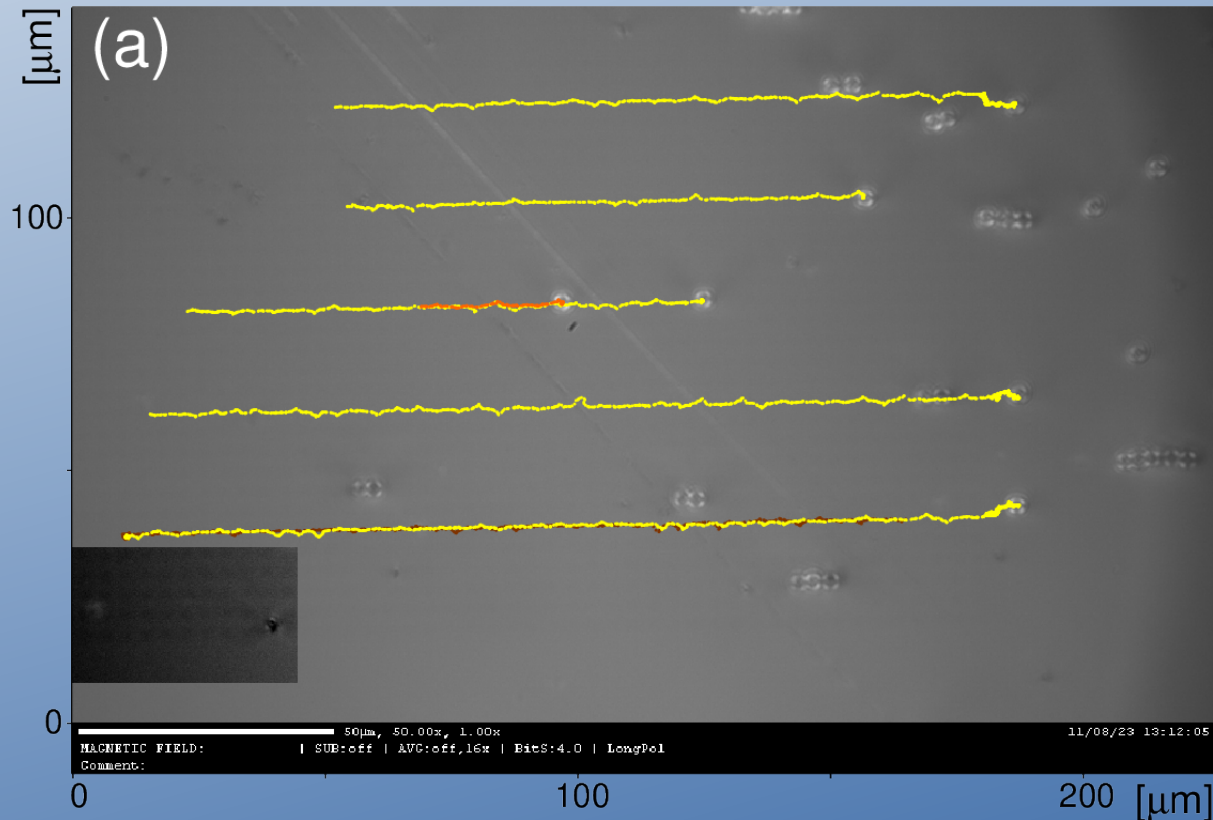
Analiz trajektorii kulek wykonana z użyciem programu **Video Spot Tracker**

[Center for Computer Integrated Systems for Microscopy and Manipulation (CISMM) at UNC Chapel Hill, USA]

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

- kwadraty $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ bombardowane dawką $D = 15 \times 10^{15} \text{ Ga}^+/\text{cm}^2$
- pole magnetyczne przełączane z częstotliwością $f = 2 \text{ Hz}$
- reżym synchronizacji fazy (ruchu kulek względem zmian pola)

patrz film



SEMINARIUM SPRAWOZDAWCZE IFM PAN z działalności naukowej prowadzonej w roku 2023

Zakład Cienkich Warstw i Nanostruktur (ZN 3)

Sztuczne domeny magnetyczne bez ścian domenowych w strukturyzowanych magnetycznie ferrimagnetycznych warstwach ziemia rzadka-metal przejściowy (TWIST)
Projekt badawczy OPUS (PB 3.31): 2020/39/B/ST5/01915 (2021-2025), dr hab. Piotr Kuświk,
prof. IFM PAN

Funkcjonalne układy warstwowe i nanostruktury

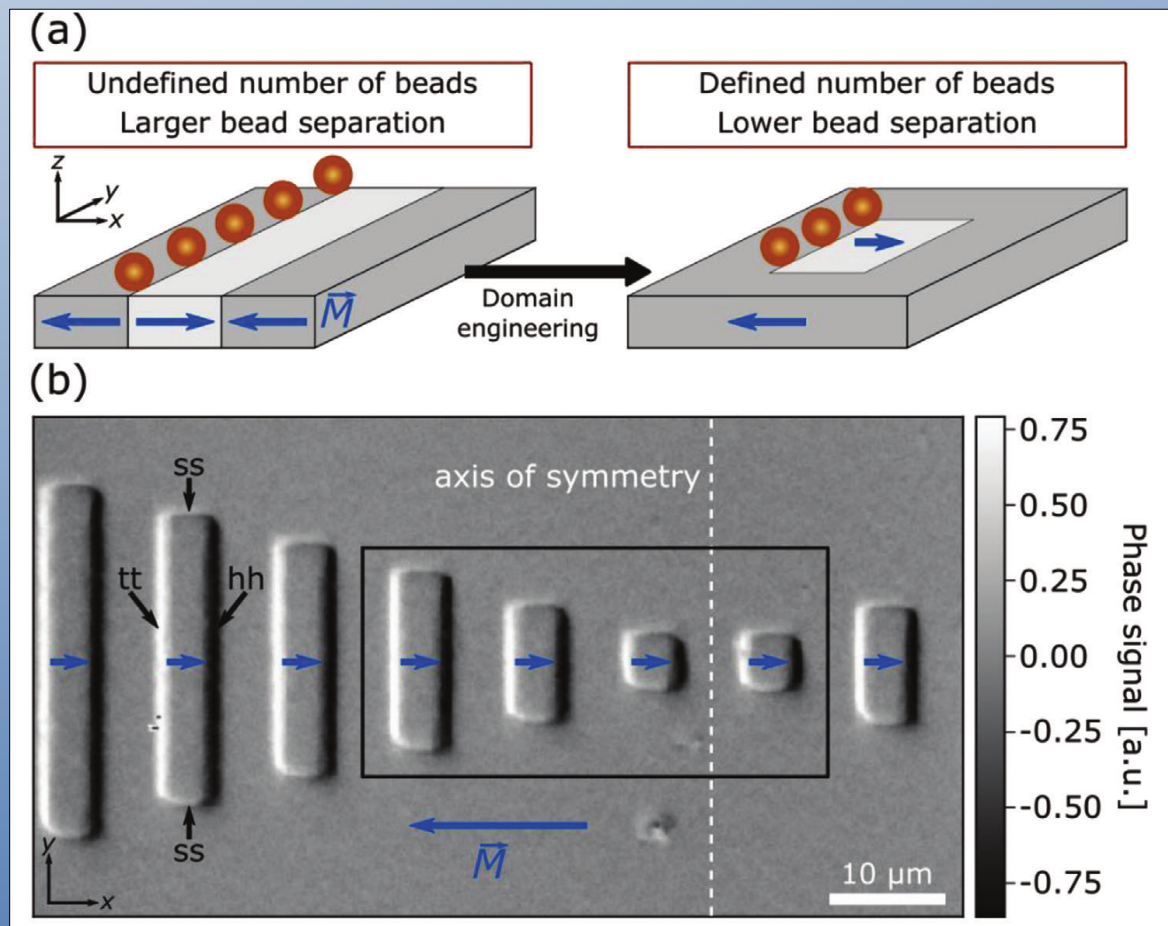
Osiągnięcie naukowe w ramach zadania statutowego (2023-2025)

Si(100)/Cu(5 nm)/Ir₁₇Mn₈₃(30 nm)/Co₇₀Fe₃₀(10 nm)/Si(20 nm)

- pole 145 mT przyłożone podczas nanoszenia warstwy definiuje zwrot **anizotropii wymiany** (EB) (na interfejsie IrMn/CoFe)
- przeciwnie skierowane pole 100 mT, przyłożone podczas bombardowania 10 keV jonami He⁺, zmienia EB w niechronionych rezydentach obszarach
- różne wartości EB pozwalają lokalnie przełączyć kierunek momentu magnetycznego

Small 2305675 (2023)

R. Huhnstock, L. Paetzold,
M. Merkel, P. Kuświk, A. Ehresmann



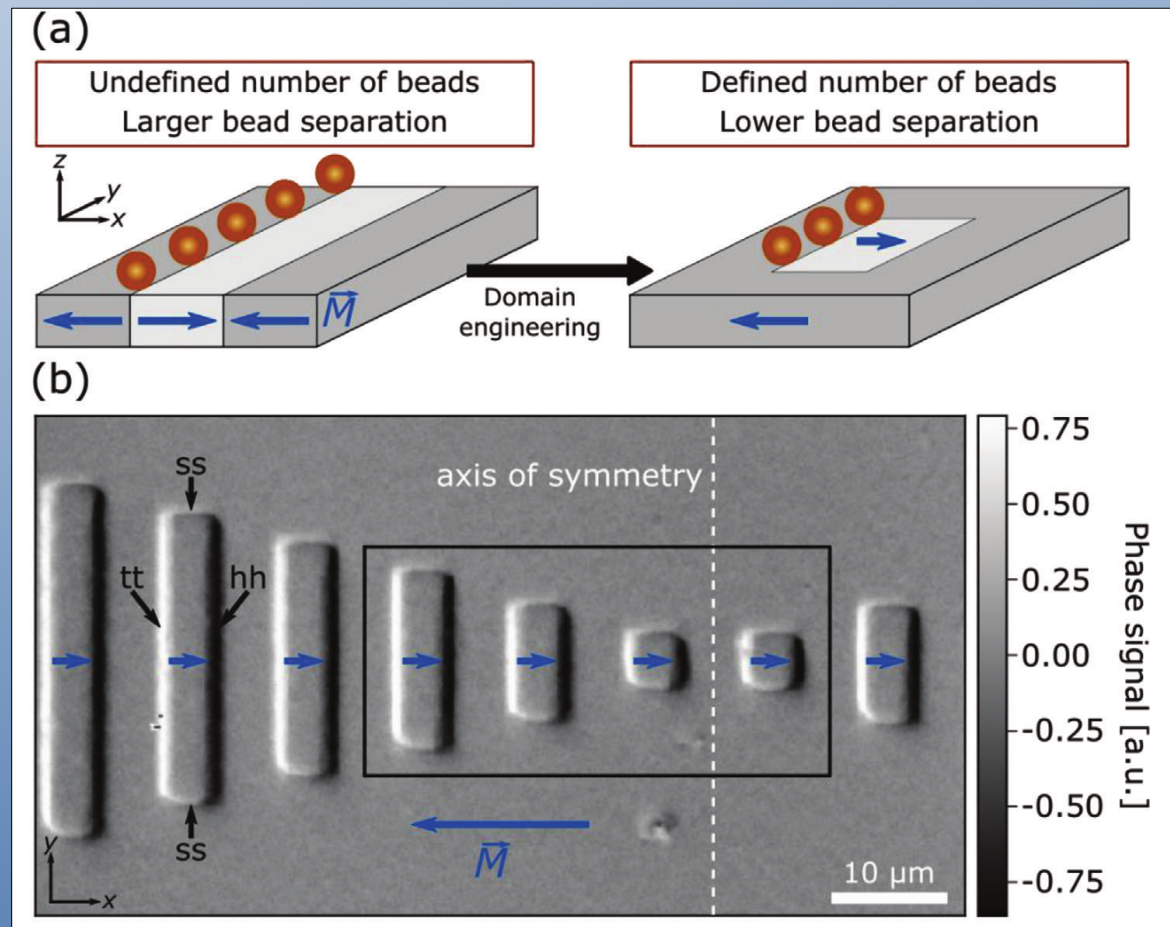
Si(100)/Cu(5 nm)/Ir₁₇Mn₈₃(30 nm)/Co₇₀Fe₃₀(10 nm)/Si(20 nm)

Problem:

- nieokreślona, zależna od szczegółów przypadkowego rozmieszczenia SPB w układzie, ilość transportowanych kulek
- brak kontroli nad rozmiarem agregatów utrudnia ilościowe wnioskowanie o stężeniu badanych/szukanых substancji (wirusy, białka etc.)

Small 2305675 (2023)

R. Huhnstock, L. Paetzold,
M. Merkel, P. Kuświk, A. Ehresmann



Si(100)/Cu(5 nm)/Ir₁₇Mn₈₃(30 nm)/Co₇₀Fe₃₀(10 nm)/Si(20 nm)

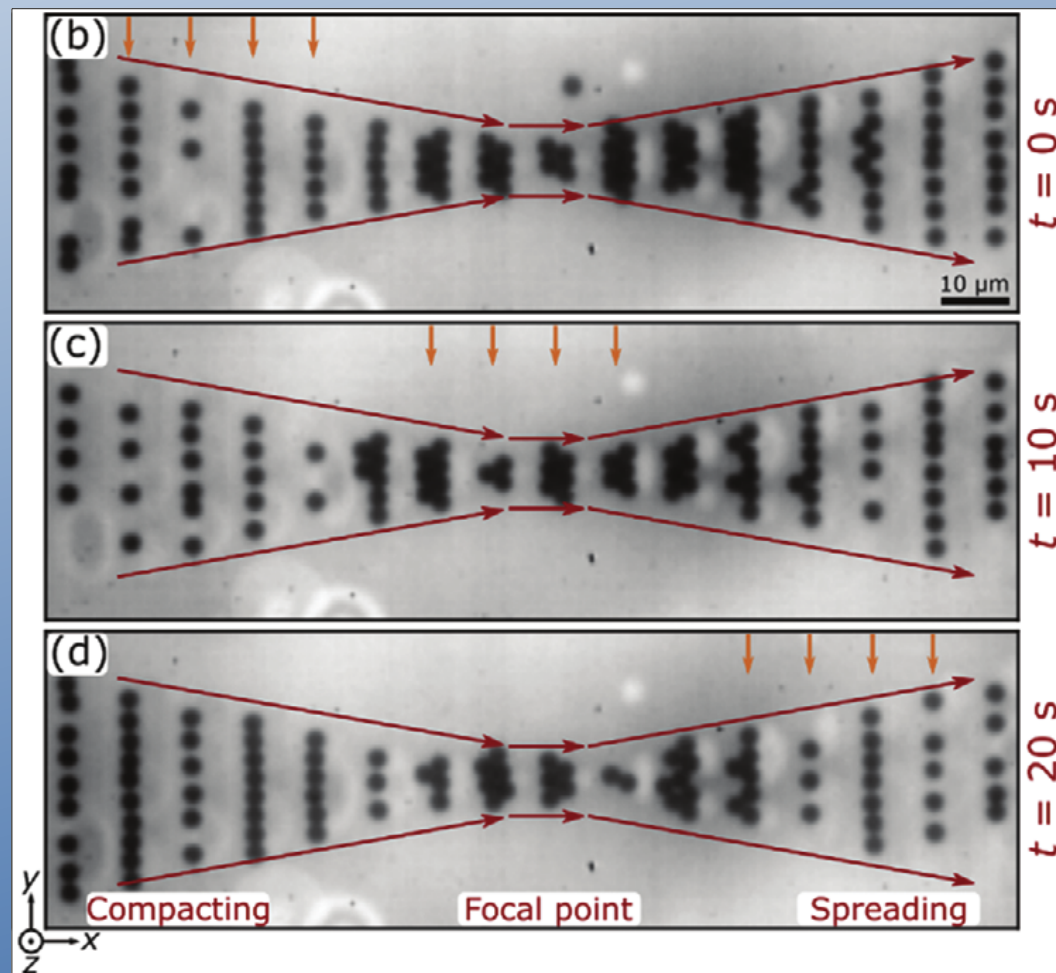
ruch kulek w prawo

- struktura z paskami o szerokości 2 μm i zmiennej długości, l , od 50 do 5 μm
- symulacje mikromagnetyczne (wraz przybliżeniem dipolowym) szacują pola maksymalne (składowa z) na 2.05 kA/m dla $l = 10 \mu\text{m}$ i 1.74 kA/m dla $l = 5 \mu\text{m}$
- słabsze pola skutkują słabszym oddziaływaniem kulek KSP pozwalając im na wzajemne zbliżenie się w miarę zbliżania się do „ogniska” układu domen

Small 2305675 (2023)

R. Huhnstock, L. Paetzold,

M. Merkel, P. Kuświk, A. Ehresmann



Si(100)/Cu(5 nm)/Ir₁₇Mn₈₃(30 nm)/Co₇₀Fe₃₀(10 nm)/Si(20 nm)

ruch kulek w prawo

- „nadmiarowe” KSP przepychane są do kolejnego zbliżającego się szeregu/dwuszeru kulek, są odrzucane na bok (nie są wtedy już transportowane), lub umiejscawiają się nad sąsiednimi kulkami

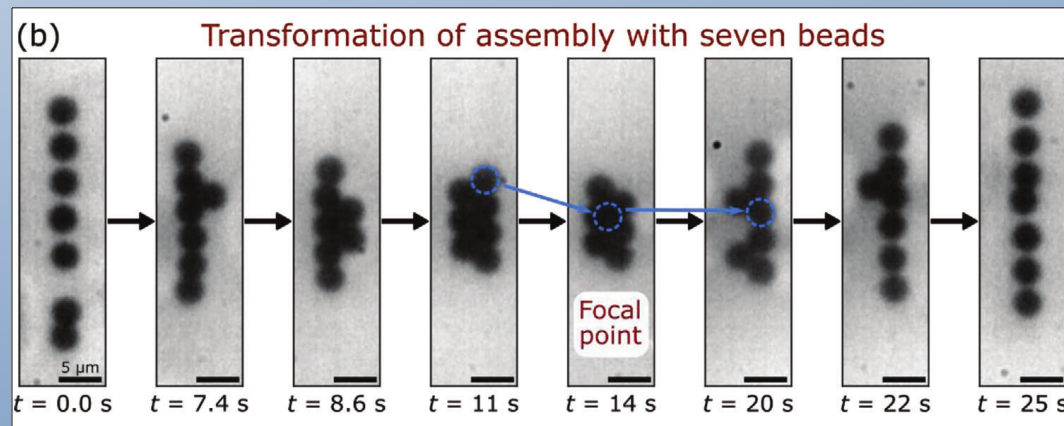
Struktura domen może być stosowany jako układ ograniczający maksymalną liczbę kulek superparamagnetycznych przechodzących poza „ognisko” układu.

Jest to nowa funkcjonalność uzyskana w układach magnetoforetycznych opartych na wykorzystaniu podłoży magnetycznych.

Small 2305675 (2023)

R. Huhnstock, L. Paetzold,

M. Merkel, P. Kuświk, A. Ehresmann



Si(100)/Ti(4 nm)/Au(60 nm)/[Co(0.7 nm)/Au(1 nm)]₃

- prostopadła anizotropia magnetyczna
- bombardowanie jonami He⁺ (10 keV)
- bombardowane obszary (nie chronione rezystem) charakteryzują się niższą koercją/polem przełączania

Nature Comm. 14, 7517 (2023)

N. C. X. Stuhlmüller, F. Farrokhzad, P. Kuświk, F. Stobiecki, M. Urbaniak, S. Akhundzada, A. Ehresmann T. M. Fischer, **D. de las Heras**

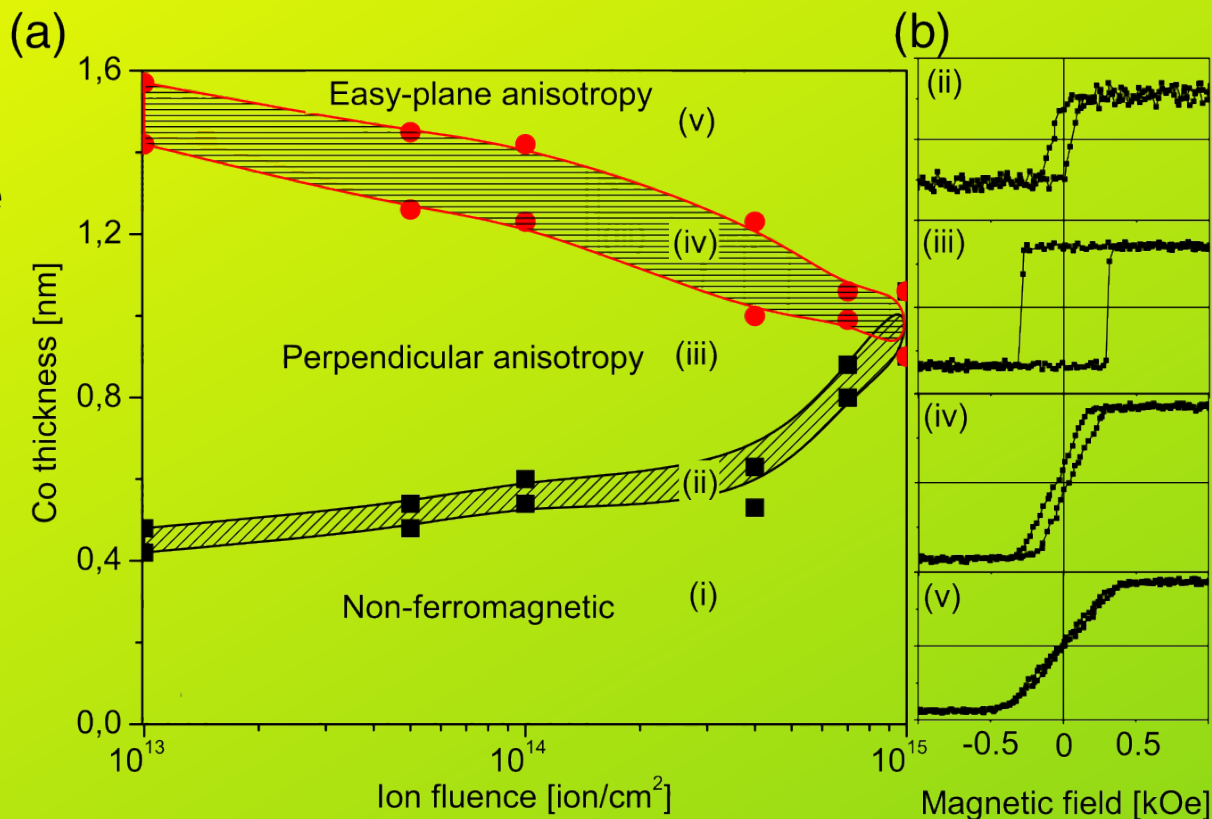
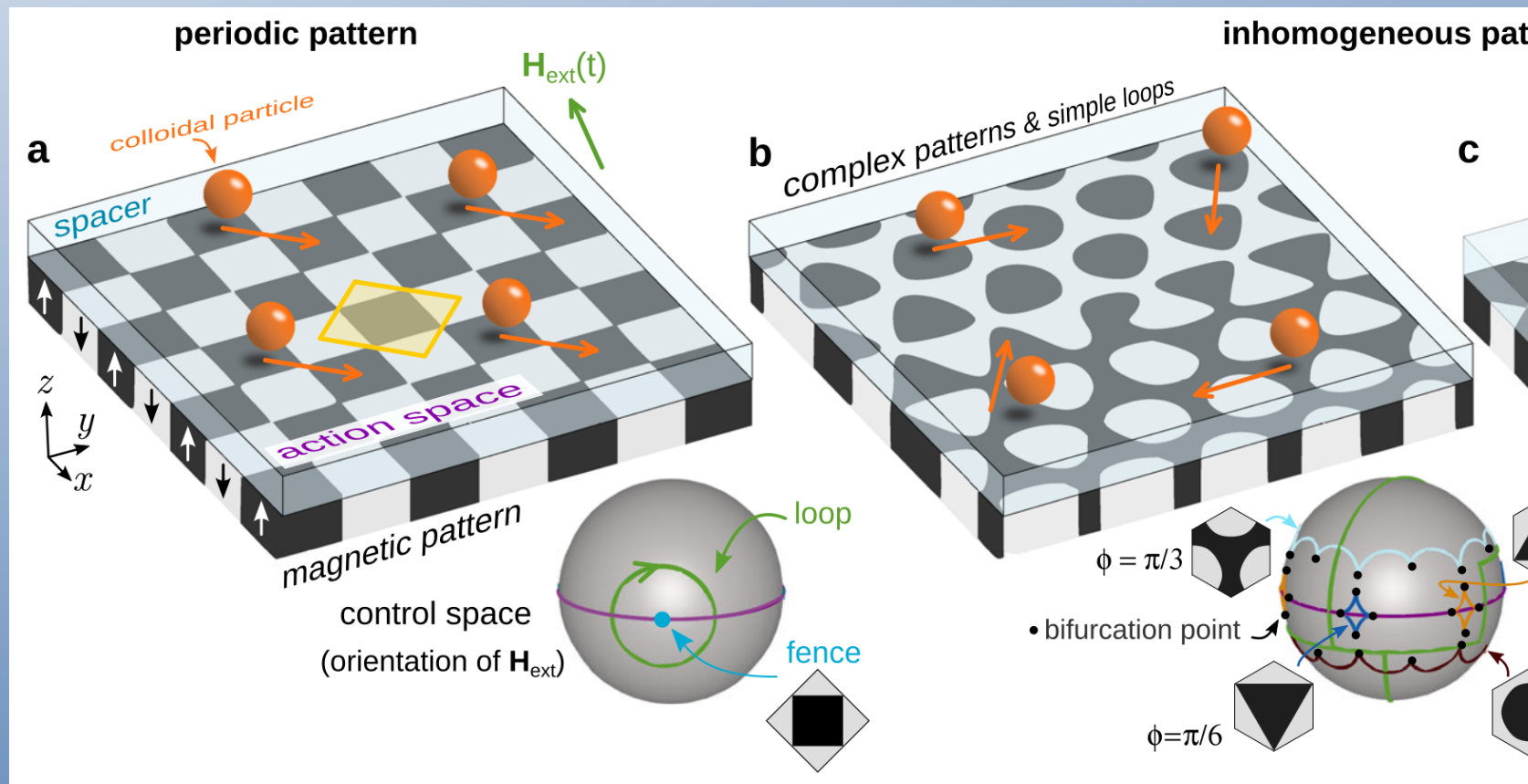
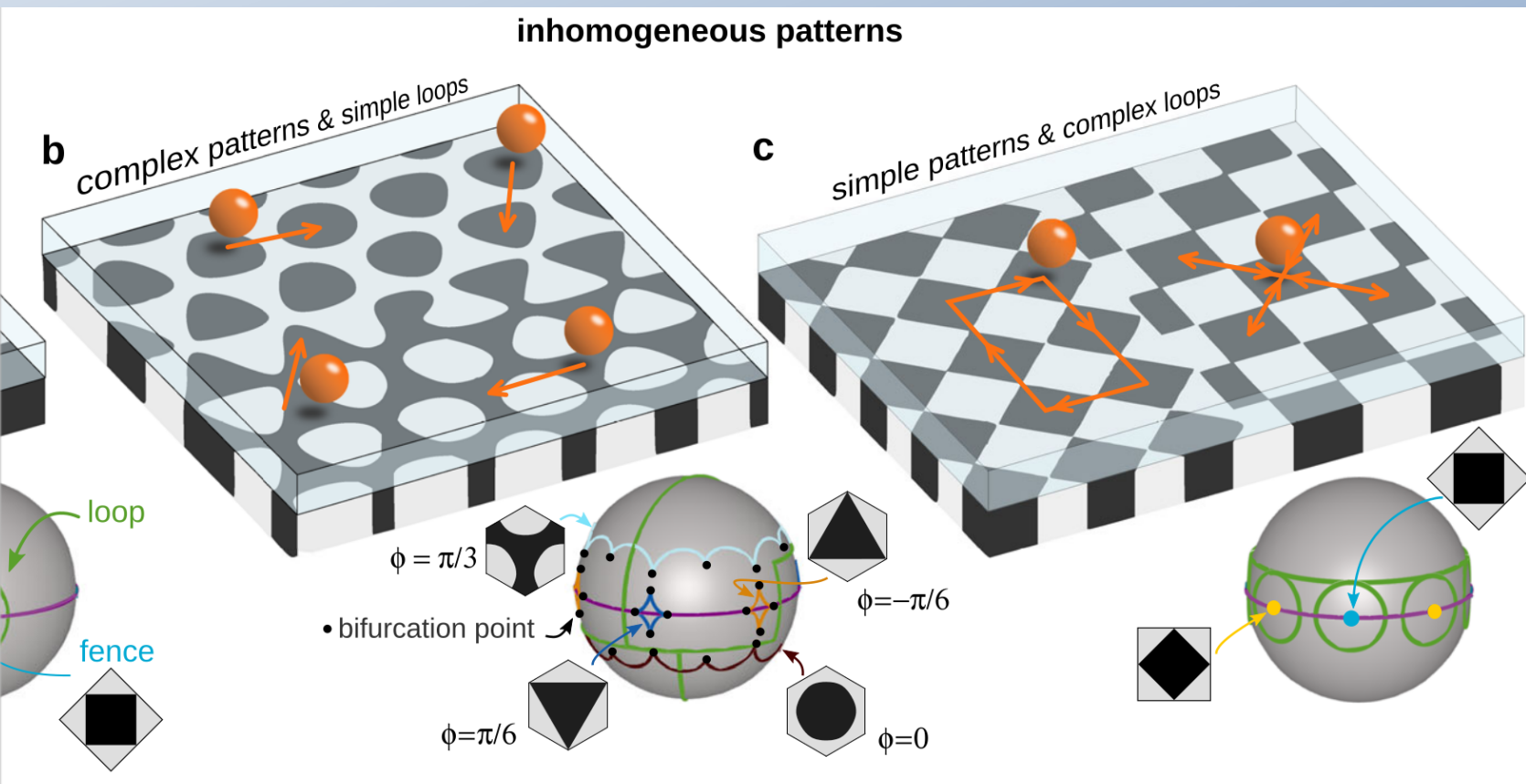


Figure 3. Magnetic phase changes of the Co layer as a function of Co layer thickness caused by bombardment with 10 keV He⁺ ions. (a) Variation of the Co thickness intervals (i)–(v) as a function of He⁺ ion fluence. (b) Hysteresis loops corresponding to thickness intervals (ii)–(v). Dashed areas (ii) and (iv) are guides to the eye for the transition regimes.

Si(100)/Ti(4 nm)/Au(60 nm)/[Co(0.7 nm)/Au(1 nm)]₃



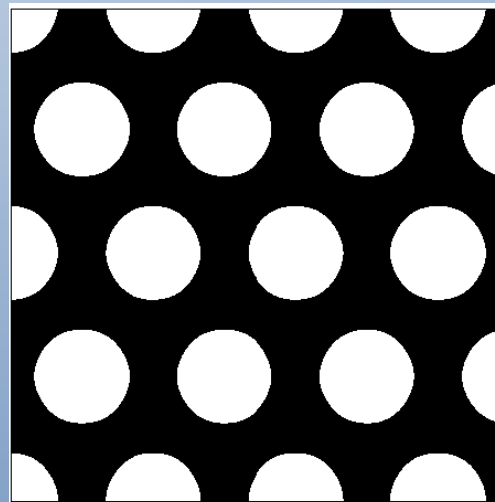
Si(100)/Ti(4 nm)/Au(60 nm)/[Co(0.7 nm)/Au(1 nm)]₃



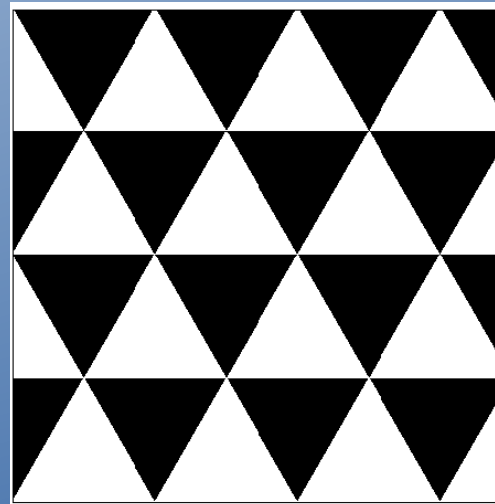
Si(100)/Ti(4 nm)/Au(60 nm)/[Co(0.7 nm)/Au(1 nm)]₃

- z wcześniejszych badań znamy zachowanie (trajektorie w funkcji pętli sterujących) KSP nad podłożami o różnej periodycznej strukturze/symetrii
- pętle obejmujące specjalne punkty prowadzą do transportu (przesunięcia KSP) o jeden period struktury
- transport jest topologicznie chroniony – ruch zależy od zbioru winding numbers wokół wybranych kierunków
- w takich układach **jednakowe cząstki [kulki, pręty (np. złożone z kilku kulek)] transportowane są w ten sam sposób na całej strukturze**

$\phi=0$

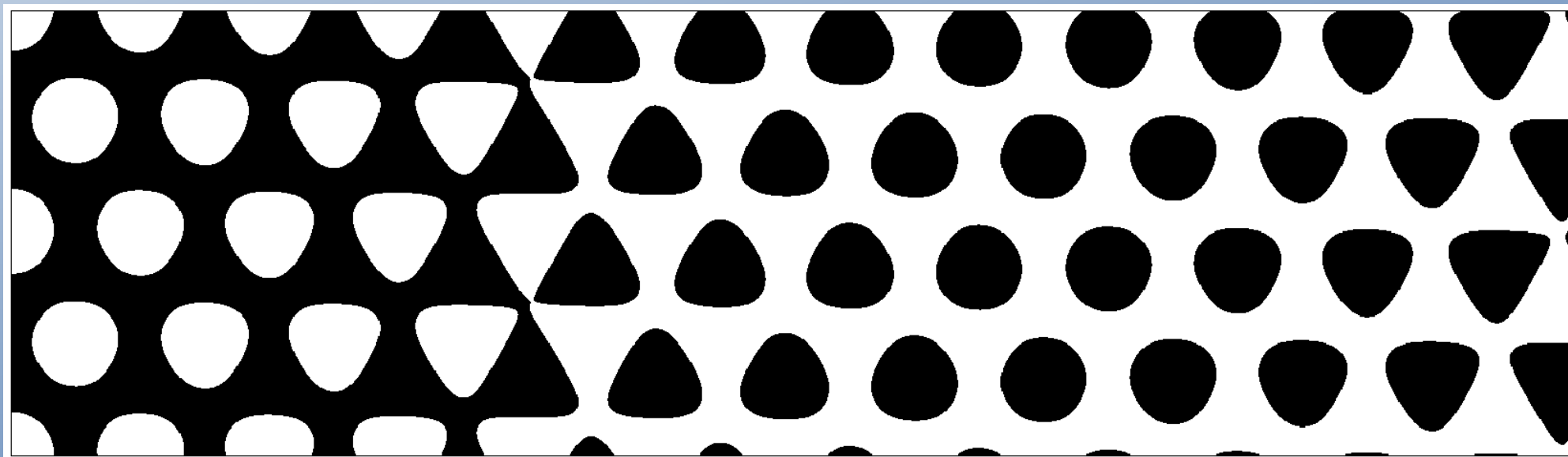


$\phi=0.5\pi$



Si(100)/Ti(4 nm)/Au(60 nm)/[Co(0.7 nm)/Au(1 nm)]₃

- nieperiodyczne struktury (np. zmienny w przestrzeni kąt fazowy) pozwalają na lokalne zaprogramowanie ruchu w symetrii podłoża
- zadane defekty topologicznych pozwalają na uzyskanie kontroli nad początkowym położeniem KSP



$\phi=0$

$\phi=0.5\pi$

Nature Comm. 14, 7517 (2023) N. C. X. Stuhlmüller, F. Farrokhzad, P. Kuświk, F. Stobiecki, M. Urbaniak, S. Akhundzada, A. Ehresmann, T. M. Fischer, **D. de las Heras**

Funkcjonalne układy warstwowe i nanostruktury Osiągnięcie naukowe w ramach zadania statutowego (2023-2025)

maciej urbaniak

Si(100)/Ti(4 nm)/Au(60 nm)/[Co(0.7 nm)/Au(1 nm)]₃

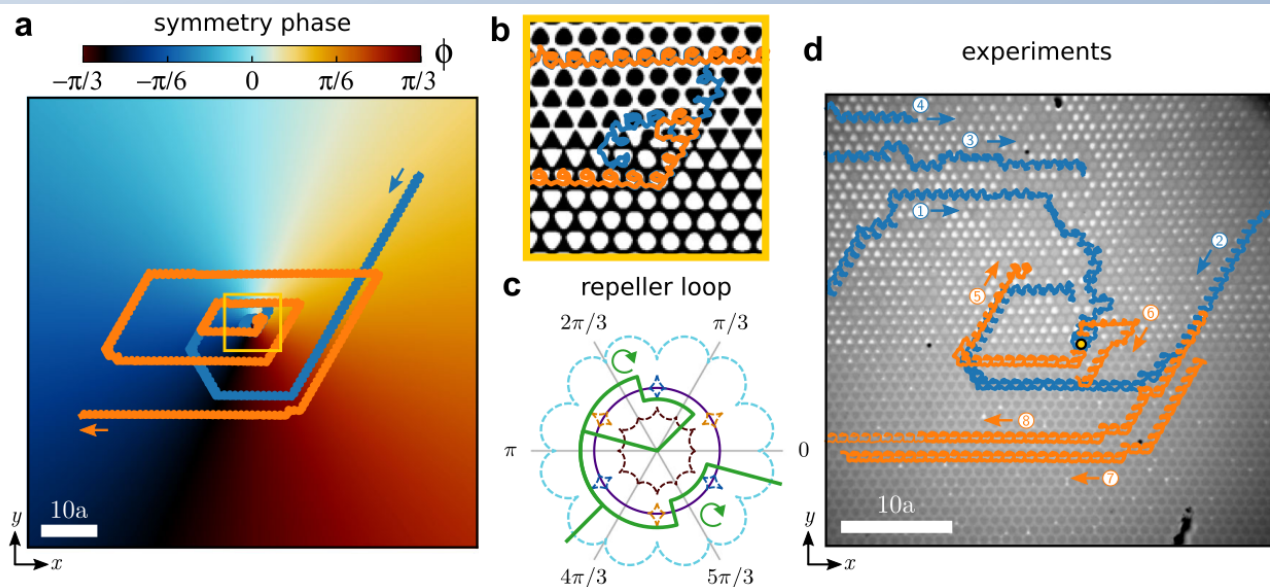


Fig. 3 | Attractor and repeller of particles. **a** Trajectory of a colloidal particle (randomly initialized) obtained with Brownian dynamics simulations above a pattern with a central topological defect in the symmetry phase. The blue (orange) trajectory is generated by the repetition of the attractor (repeller) modulation loop that moves particles towards (away from) the defect. The pattern is colored according to the value of the symmetry phase (color bar). The scale bar is $10a$. **b** Close-up of the region indicated by a yellow square in (a) and the trajectories around the central defect. The background shows the local magnetization of the pattern. **c** Stereographic projection of the repeller loop (green) in C . The equator (violet circle) and the fences of the C_6 and S_6 patterns as well as their inverse patterns, $\overline{C_6}$ and $\overline{S_6}$, (dashed curves) are also depicted as a reference. The fences are colored according to the value of the symmetry phase. The two apparently open

segments of the loop are actually joined at the south pole of the control space (not visible due to the projection). The loop is made of two subloops winding clockwise, as indicated by the circular arrows. **d** Experimental trajectories of several colloidal particles (labeled with a numbered circle) above the same pattern with a topological defect (yellow circle). The trajectories induced by the attractor (repeller) loop are colored in blue (orange). Blue and orange trajectories correspond to different experiments and have been superimposed in the figure. Note that under the microscope regions with negative magnetization appear darker than regions with positive magnetization, i.e. the opposite of our color choice in e.g. (b). The scale bar is $10a$ and the lattice constant of one cell is approx. $14 \mu\text{m}$. Movies of the simulated and the experimental motion are provided in Supplementary Movie 1.

- defekt topologiczny, w zależności od pętli sterującej, może być **atraktorem** lub „**repellentem**”
- w praktyce konfiguracja taka pozwala na umieszczenie KSP w zadanym miejscu (defekcie) bez konieczności wcześniejszego poznania jej początkowego położenia (np. za pomocą mikroskopu)

patrz film

Si(100)/Ti(4 nm)/Au(60 nm)/[Co(0.7 nm)/Au(1 nm)]₃

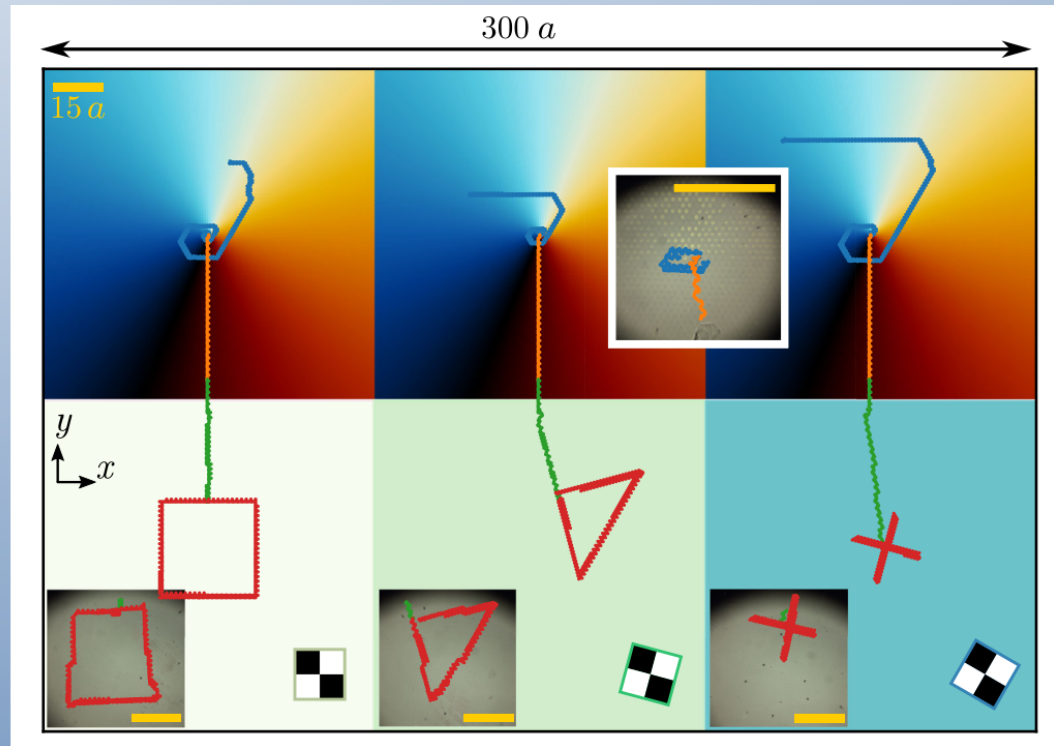


Fig. 6 | Complex patterns and complex loops. Brownian dynamics simulations of the transport of colloidal particles above a complex pattern made of three patches, each one with a topological defect in the symmetry phase (top) connected to three patches with square symmetry (down) rotated with respect to each other. The color of the patches with topological defects indicates the value of the symmetry phase ϕ . The color of the square patches indicates the global rotation ψ , illustrated with a sketch of the magnetization. A unique complex modulation loop made of four parts drives the transport in the whole system. In the first part, the repetition of the

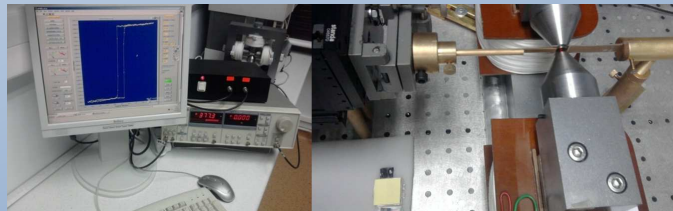
attractor loop moves the particles toward the defects (blue trajectories) and lets them wait there. The second part of the loop moves the particles downwards through the patterns with defects (orange trajectories). The third part of the loop moves the particles downwards in the square patterns (green trajectories). The last part of the loop writes a custom trajectory (square, triangle, and cross) depending on the global orientation ψ of the pattern (red trajectories). Insets show the corresponding experimental trajectories. The length of the scale bars (yellow) is $15a$.

- kulki z położenia **atraktora** transportowane są poprzez obszar ze zmienną fazą struktury do obszaru z podłożem z kwadratami
- tam, stosując złożone pętle sterujące, kulki transportowane są wzdłuż dowolnie zaprojektowanych trajektorii

patrz film

charakteryzacja magnetyczna

izolacja podłogi



eksperyment

przygotowanie zawiesiny

