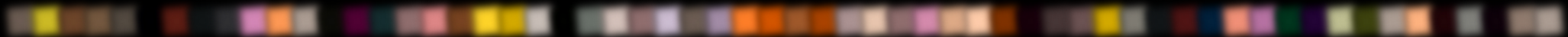


Topologicznie chroniona magnetoforeza liniowych kompleksów superparamagnetycznych na periodycznych potencjałach magnetycznych na bazie cienkich warstw Co



Simultaneous polydirectional transport of colloidal bipeds

NATURE COMMUNICATIONS, 11:4670 (2020)

¹Mahla Mirzaee-Kakhki, ¹Adrian Ernst

²Daniel de las Heras

³Maciej Urbaniak, ³Feliks Stobiecki

⁴Jendrik Gördes, ⁴Meike Reginka, ⁴Arno Ehresmann

¹Thomas M. Fischer – *spiritus movens*

¹Experimentalphysik X, Physikalisches Institut, Universität Bayreuth, Niemcy.

²Theoretische Physik II, Physikalisches Institut, Universität Bayreuth, Niemcy.

³Institute of Molecular Physics, Polish Academy of Sciences, Poznań.

⁴Institute of Physics and Center for Interdisciplinary Nanostructure Science and Technology (CINSaT),
Universität Kassel, Niemcy.



Simultaneous polydirectional transport of colloidal bipeds

NATURE COMMUNICATIONS, 11:4670 (2020)

wytworzenie układów
cienkowarstwowych
Co/Au

pomysł
eksperyment
teoria
pierwsza redakcja

Universität Bayreuth
Universität Bayreuth

Strukturyzacja –
bombardowanie
jonowe

Institute of Molecular Physics

Universität Kassel

Topologicznie chroniona magnetoforeza liniowych kompleksów superparamagnetycznych na periodycznych potencjałach magnetycznych na bazie cienkich warstw Co

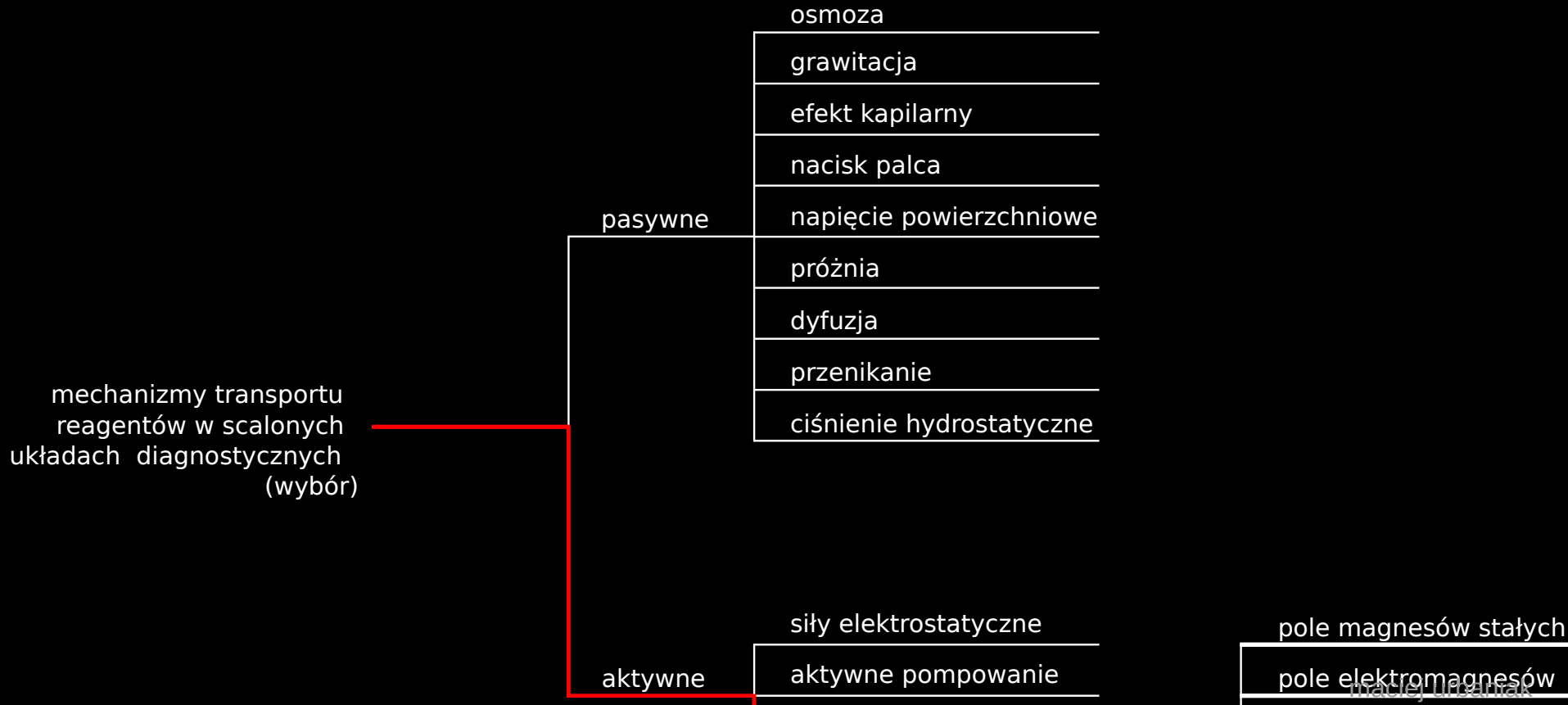
PLAN

- Diagnostyka typu lab-on-a-chip
- Podłoża na bazie Co
- Topologicznie chroniona magnetoforeza na periodycznych strukturach magnetycznych

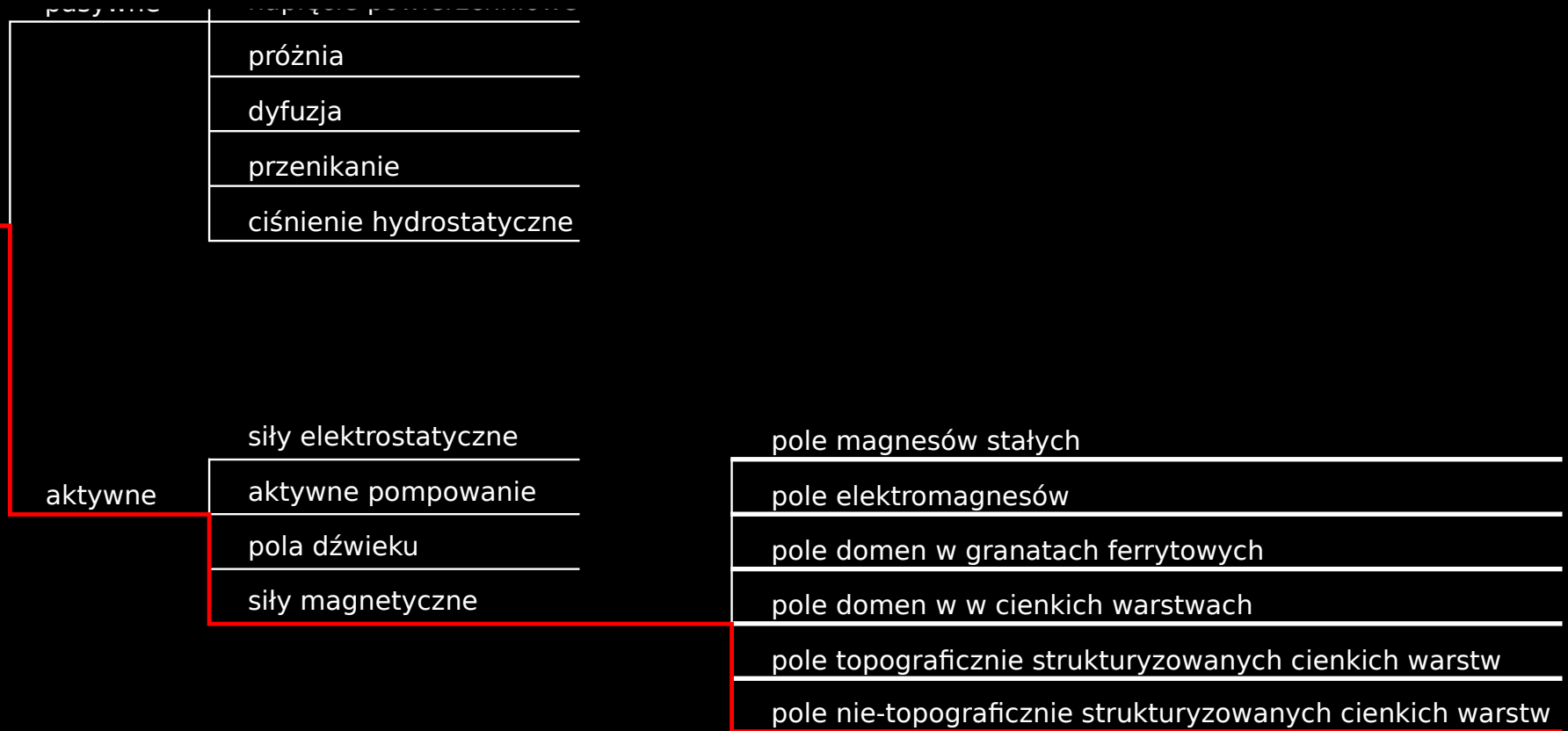
Przykładowe zastosowania scalonych układów diagnostycznych (lab-on-a-chip)

- 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)

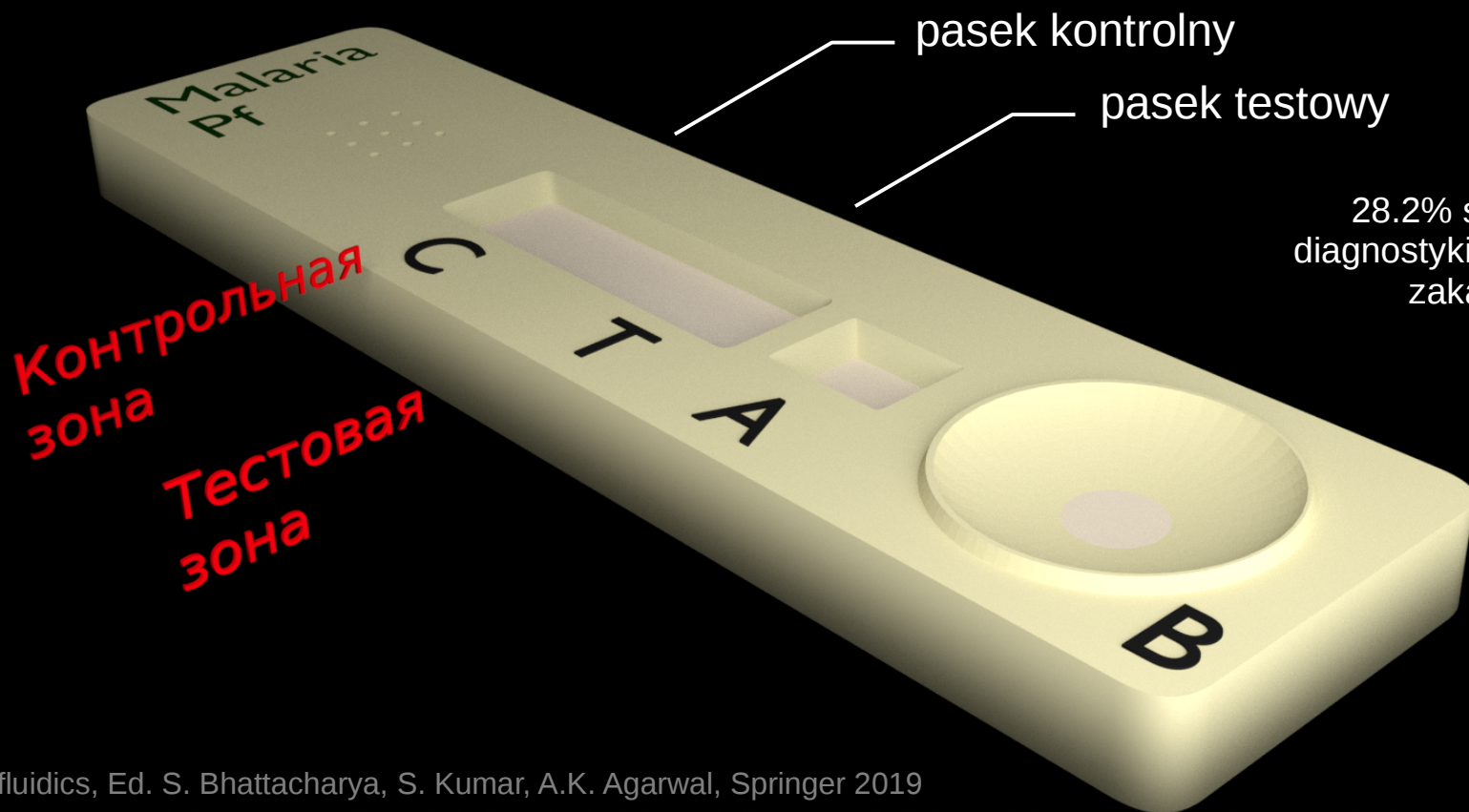
Wybór metod transportu reagentów w scalonych układach diagnostycznych



Wybór metod transportu reagentów w scalonych układach diagnostycznych



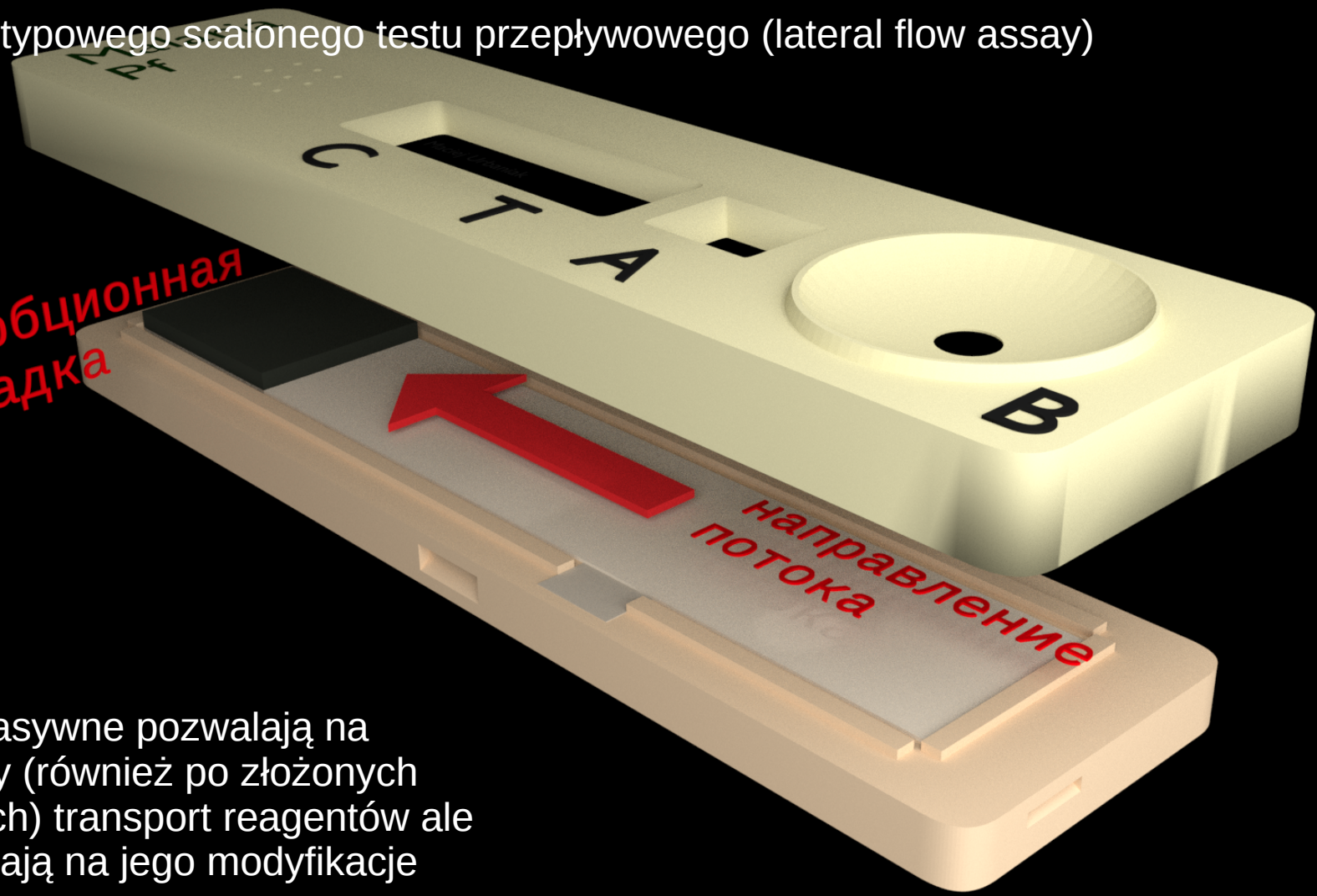
Schemat typowego scalonego testu przepływowego (lateral flow assay)



28.2% światowego rynku
diagnostyki klinicznej chorób
zakaźnych w 2016 r.*

Schemat typowego scalonego testu przepływowego (lateral flow assay)

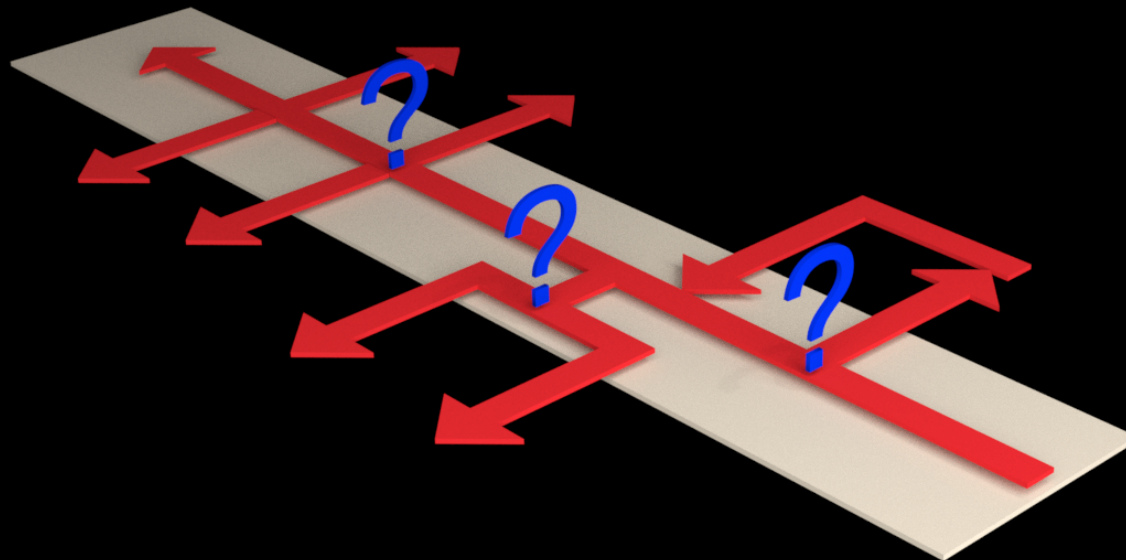
абсорбционная
накладка



Techniki pasywne pozwalają na kierunkowy (również po złożonych trajektoriach) transport reagentów ale nie pozwalają na jego modyfikacje

Techniki aktywne

Techniki aktywne pozwalają łatwiej dostosować przebieg testu do rezultatów poprzedzających reakcji chemicznych – np. dostosować szybkości podawania reagentu do zawartości badanych substancji w próbce.



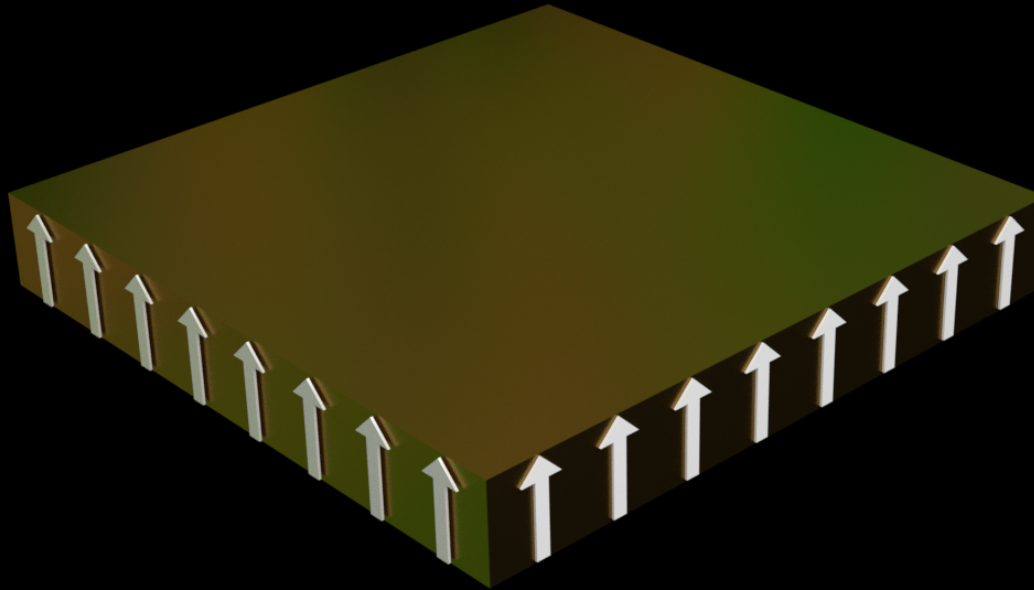
- elektroforeza
- magnetoforeza
- aktywne pompowanie
- pole dźwięku
- ...

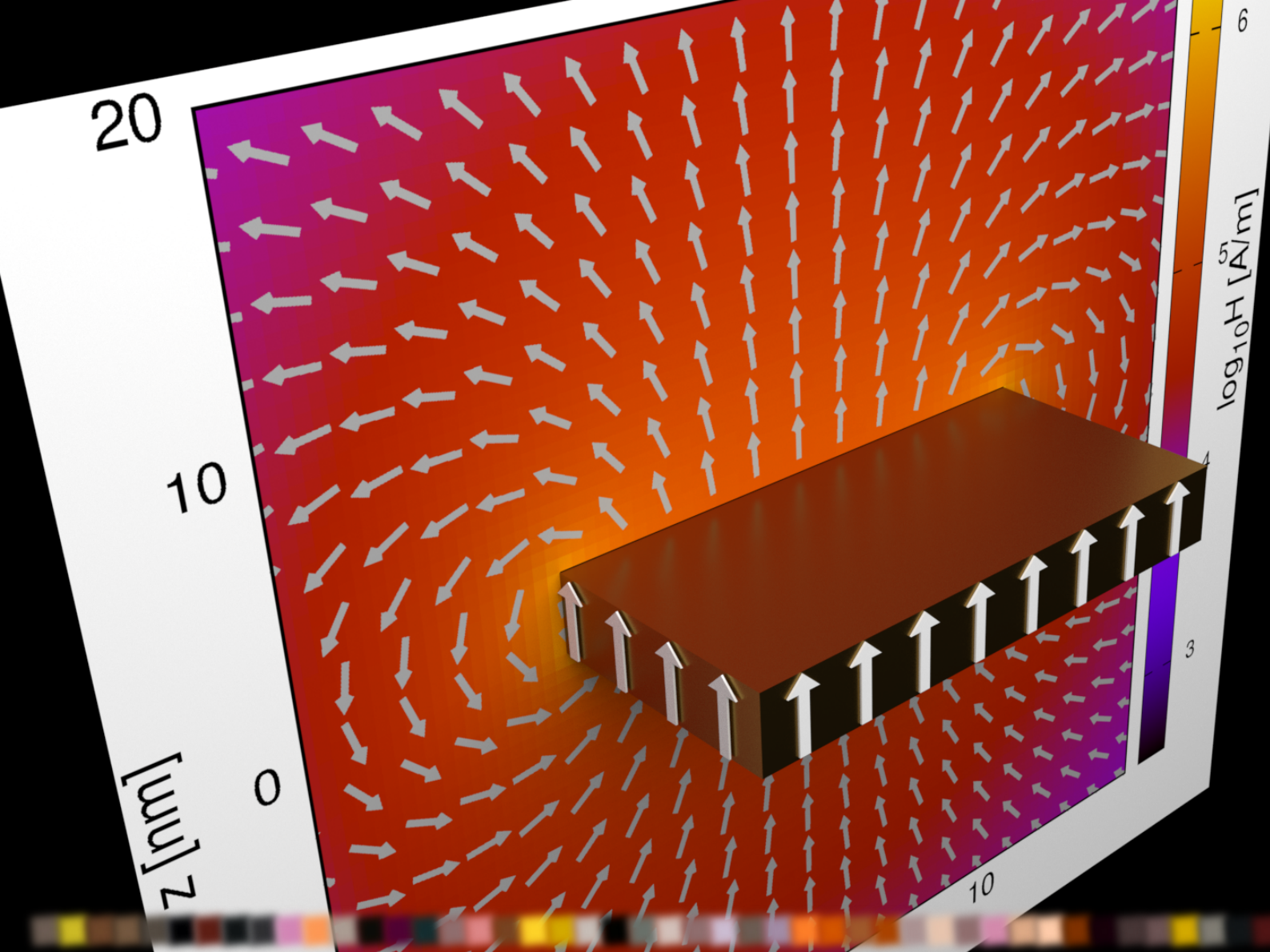
Pole magnetyczne pochodzące od idealnych (z jednorodnym przestrzennie namagnesowaniem) cienkich warstw różni się rozkładem przestrzennym od typowych magnesów makroskopowych ze względu na skrajnie wysoki stosunek wysokości/grubości do rozmiarów poprzecznych.

Magnes Co

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

Rozmiar: $21 \times 21 \times 3 \text{ nm}^3$





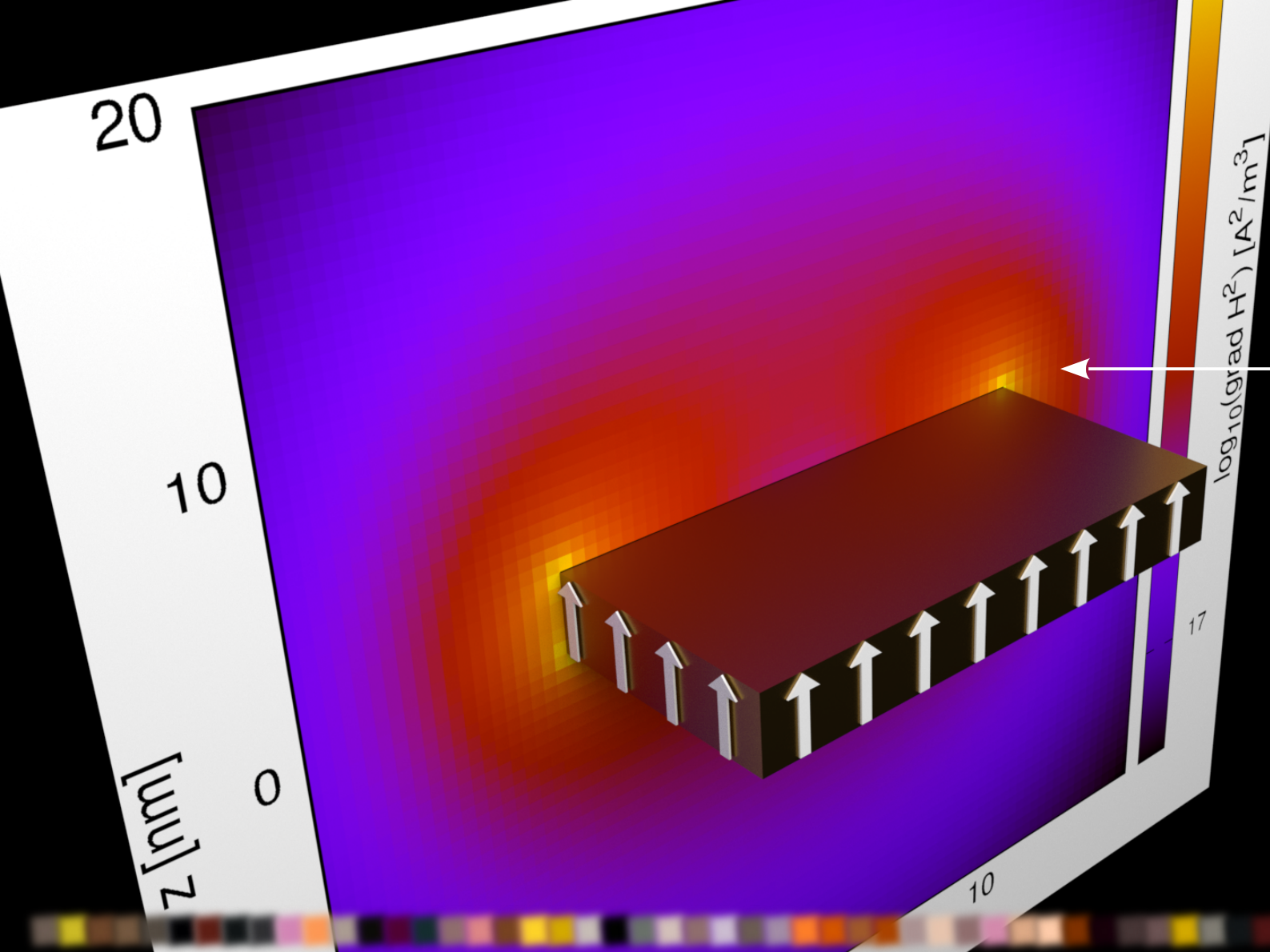
Magnes Co

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

Rozmiar: $21 \times 21 \times 3 \text{ nm}^3$

Pole magnetyczne „grubego” magnesu

- już dla rozmiarów w płaszczyźnie tylko kilkakrotnie większych od grubości pole magnetyczne silniejsze jest w pobliżu krawędzi magnesu niż w jego środku



Magnes Co

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

Rozmiar: $21 \times 21 \times 3 \text{ nm}^3$

Gradient* ∇H^2 już dla takich proporcji rozmiarów jest znacznie większy w pobliżu krawędzi magnesu

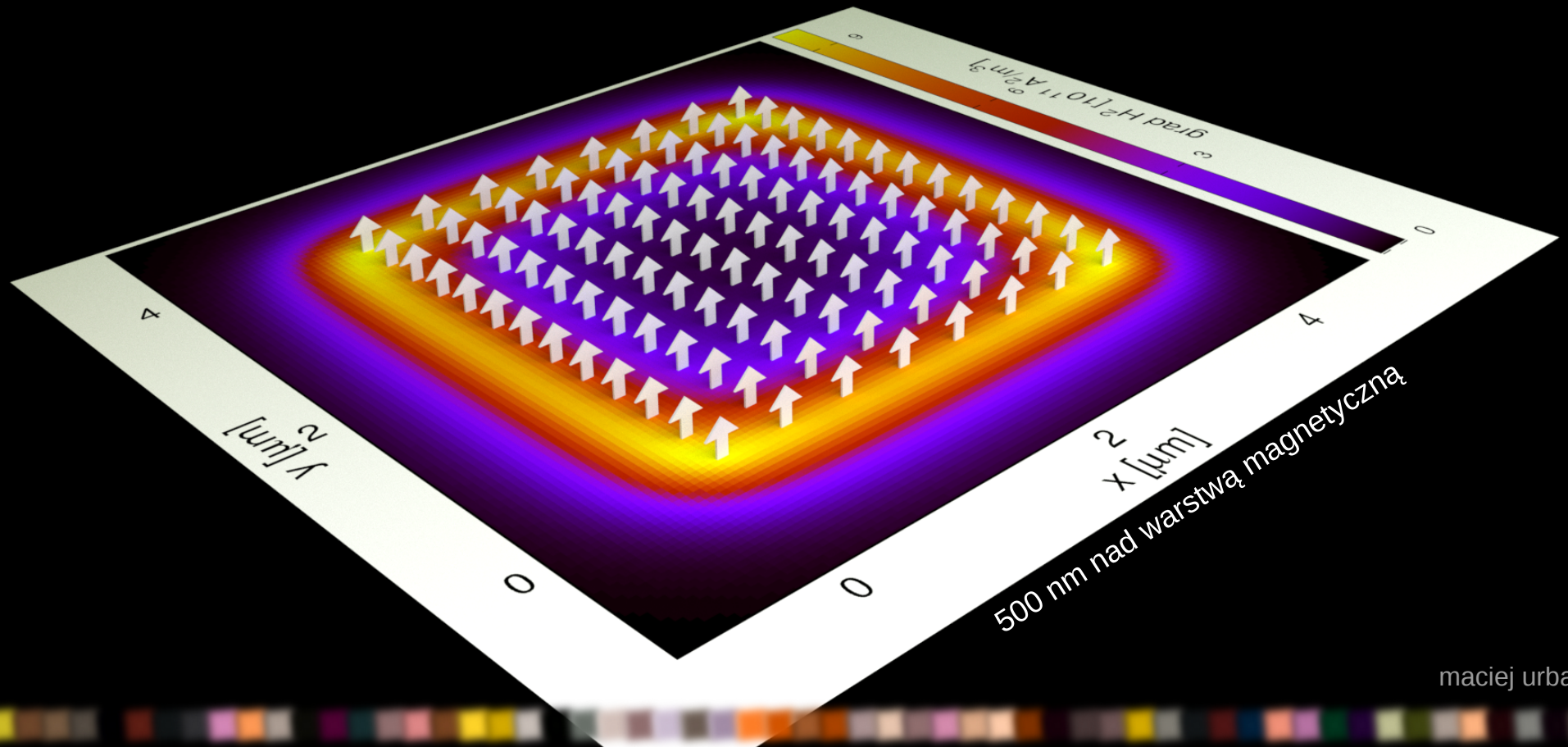
*na wykresie moduł

Moduł gradientu H^2 nad jednorodnie
namagnesowaną cienką warstwą

Magnes Co

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

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



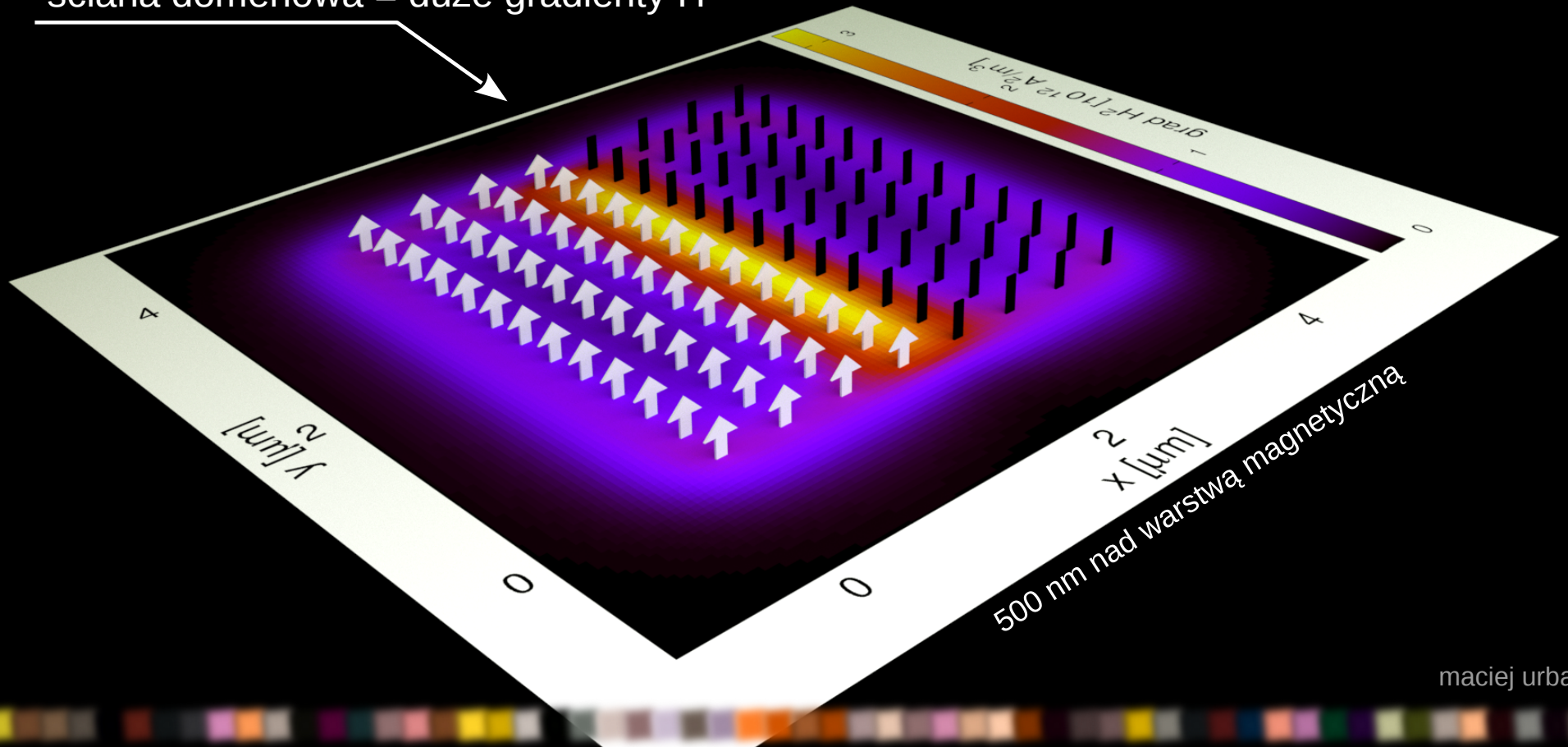
Moduł gradientu H^2 nad **NIEJEDNORODNIE**
namagnesowaną cienką warstwą

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

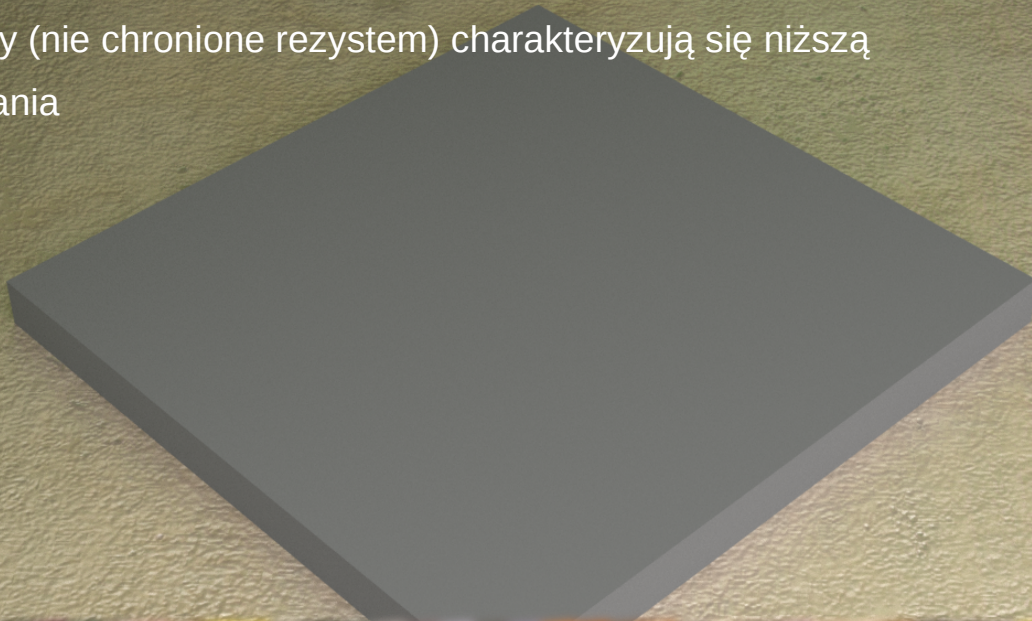


Materiał:

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

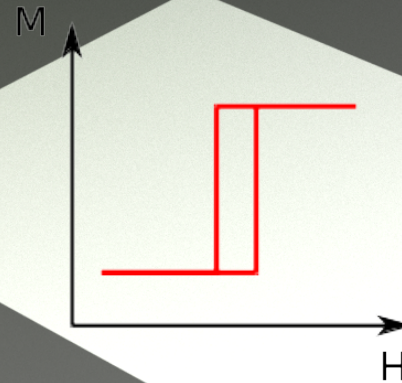
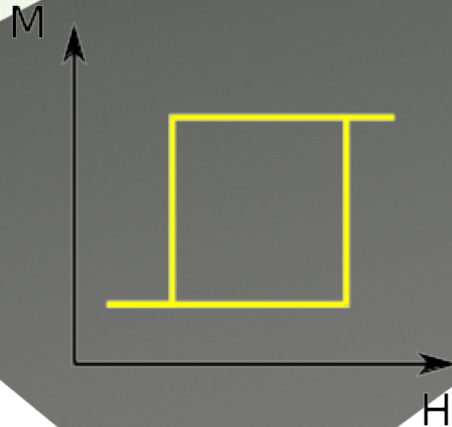
Technologia:

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



Eksperyment:

-odpowiednia sekwencja zewnętrznych pól magnetycznych pozwala uzyskać sieć obszarów o przeciwnych kierunkach namagnesowania w sąsiednich komórkach np. sieci kwadratowej lub heksagonalnej



Eksperyment:

-podłoże z warstwą magnetyczną pokrywane jest warstwą polimeru o grubości $1.6 \mu\text{m}$ – ustala to odległość kulek superparamagnetycznych od struktury domenowej

-kulki superparamagnetyczne: Dynabeads M-270 (podatność efektywna – 0.6); funkcjonalizowane -COOH

$r = 1.4 \mu\text{m}$

Potencjał magnetyczny* małej** kulki
superparamagnetycznej 500 nm na kwadratową
sieć 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!

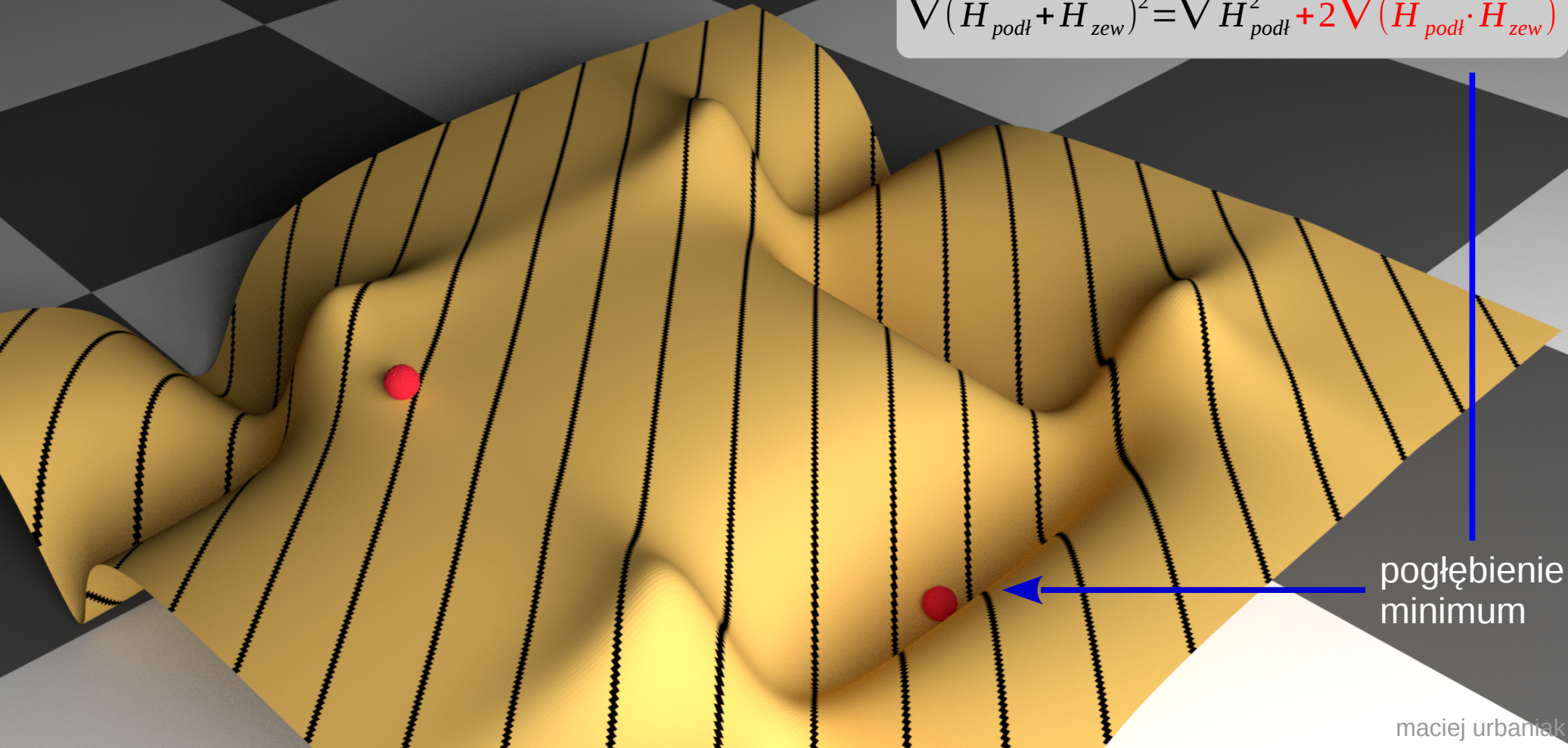
* potencjał w polu magnetycznym
** $r \ll a$

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: $(0.5, 0.5, 0.5) \text{ mT}$

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



pogłębienie minimum

Energia magnetostaticzna superparamagnetycznej kulki w polu ściany domenowej Néela w warstwie z oddziaływaniem DMI

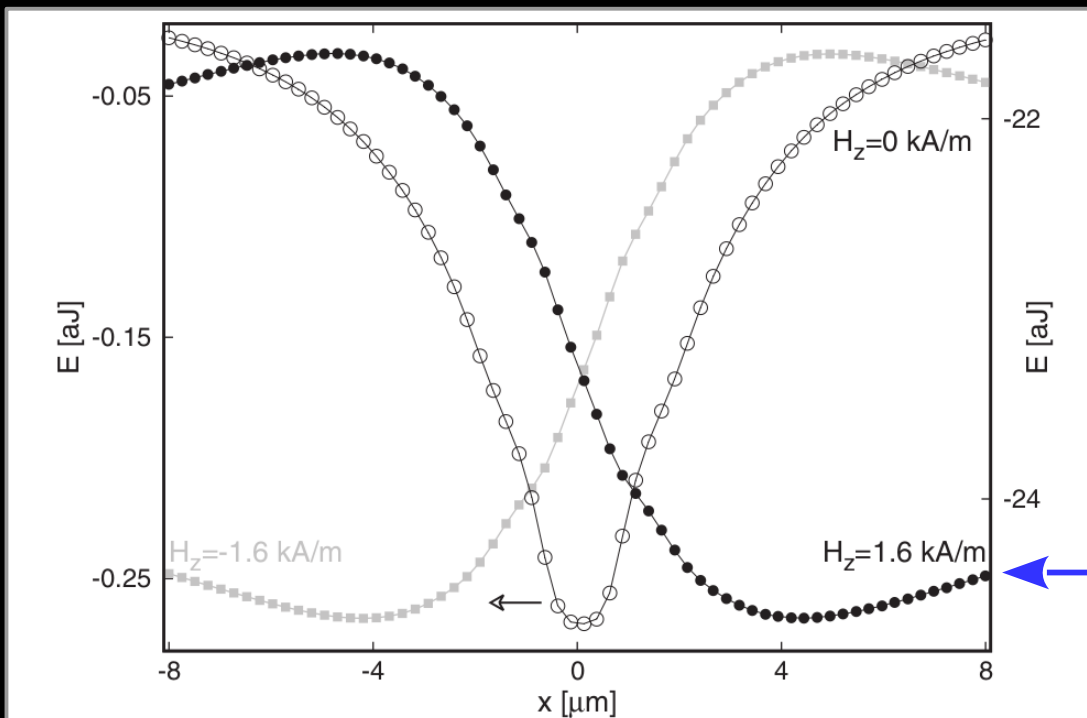


Fig. 9. The x -dependencies of the magnetostatic energy (compare Eq. 5) of the $8 \mu\text{m}$ diameter bead, with a 75 nm superparamagnetic shell, for z -positions of the bead equal to $4.52 \mu\text{m}$, and for three values of the external magnetic field. The full black symbols correspond to the upper 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.

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

Zewnętrzne jednorodne pole magnetyczne pozwala znacznie zwiększyć siły działające na superparamagnetyczne kulki

ok. 10-cio krotny wzrost siły

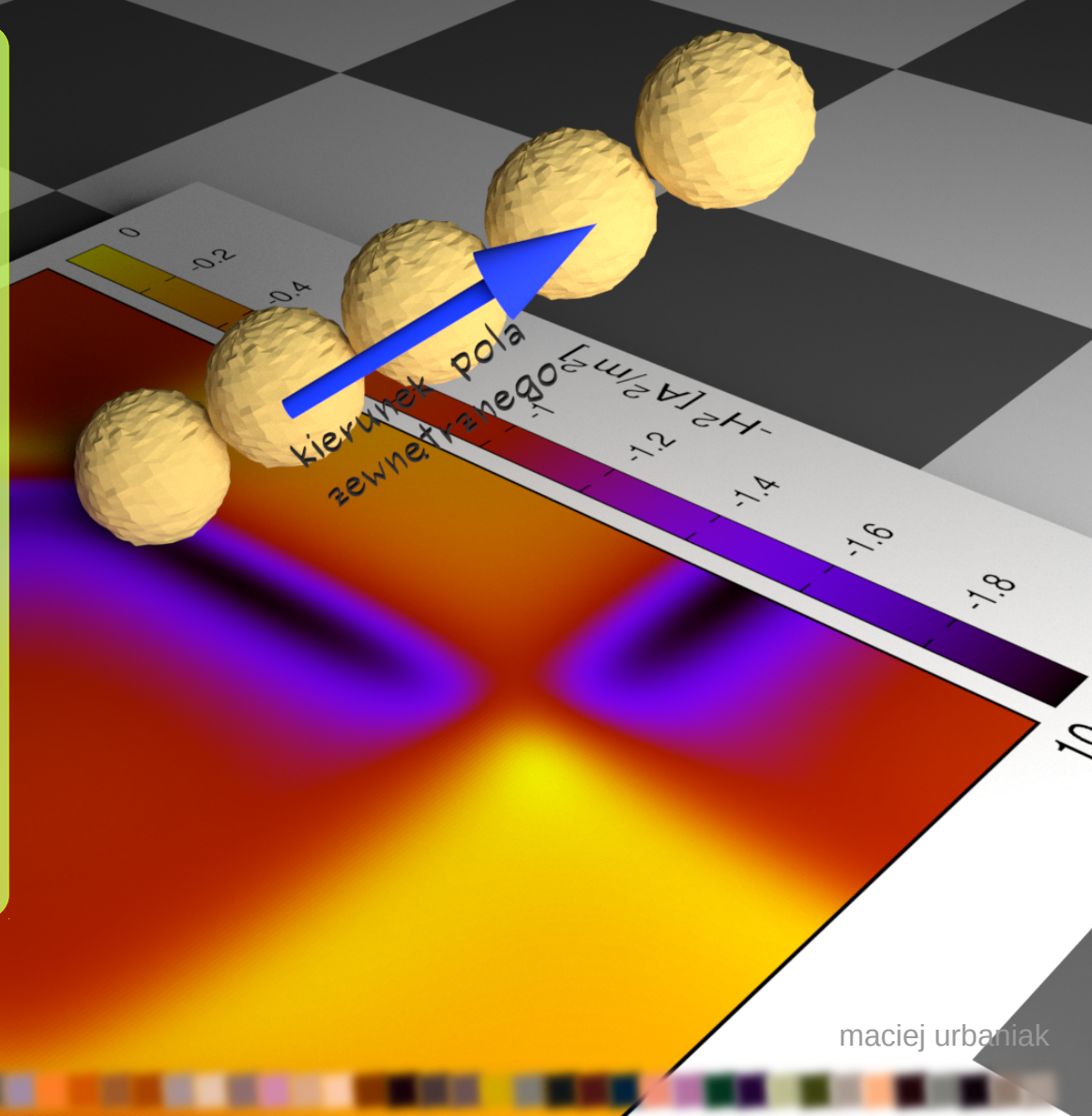
$r = 4 \mu\text{m}$

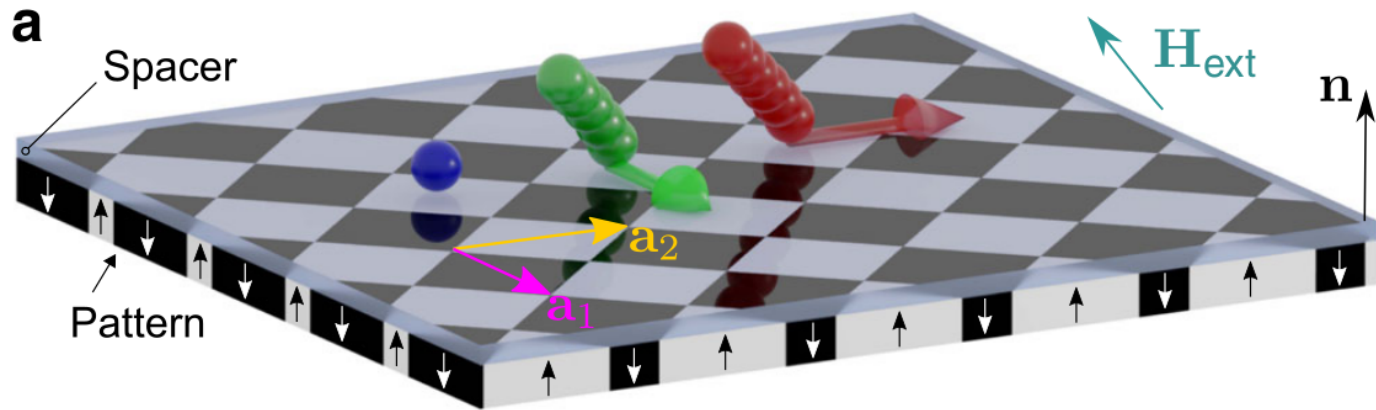
Przyspieszenia początkowe
rzędu 40 g

$R \approx 1\text{E-}5$

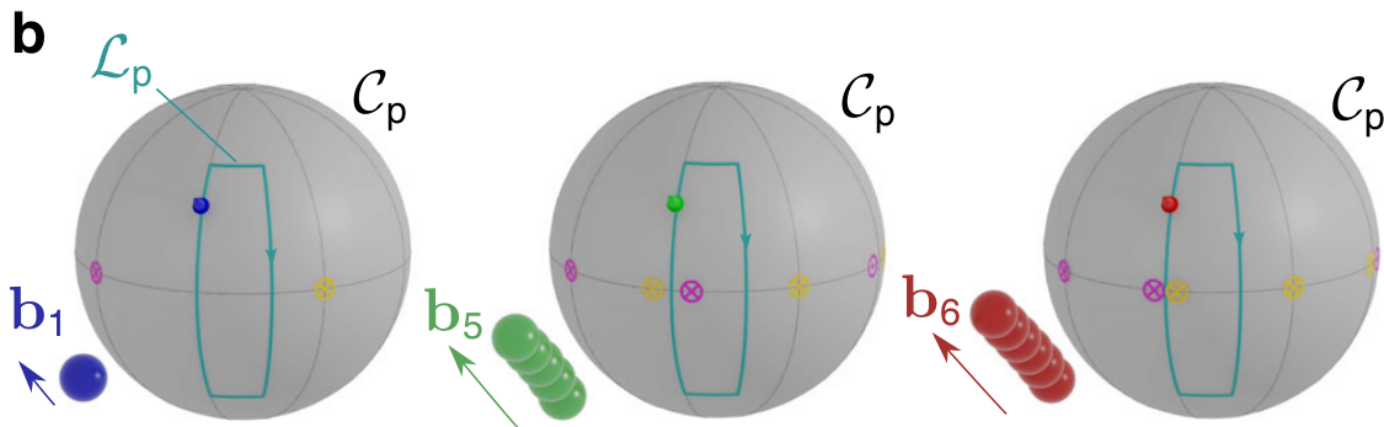
Eksperyment:

- prowadzony w środowisku wodnym - lepkość
- pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego (4 kA/m), o wartości mniejszej niż pole koercji podłoża, kulki superparamagnetyczne tworzą przypadkowej długości liniowe kompleksy (pręty/łańcuchy)
- szklany pręt z końcówką o średnicy kilku mikrometrów, przymocowany do mikromanipulatora, wykorzystywany jest do dostosowania długości łańcucha i położenia kulek do konfiguracji startowej podczas gdy pole zewnętrzne leży w płaszczyźnie równikowej





przestrzeń kontrolna, C_p
 – reprezentuje możliwe
 kierunki zewnętrznego
 pola magnetycznego



pole zewnętrzne zmienia
 się adiabaticznie w
 funkcji czasu tworząc w
 C_p zamknięte pętle

Fig. 1 Schematic of the colloidal transport.

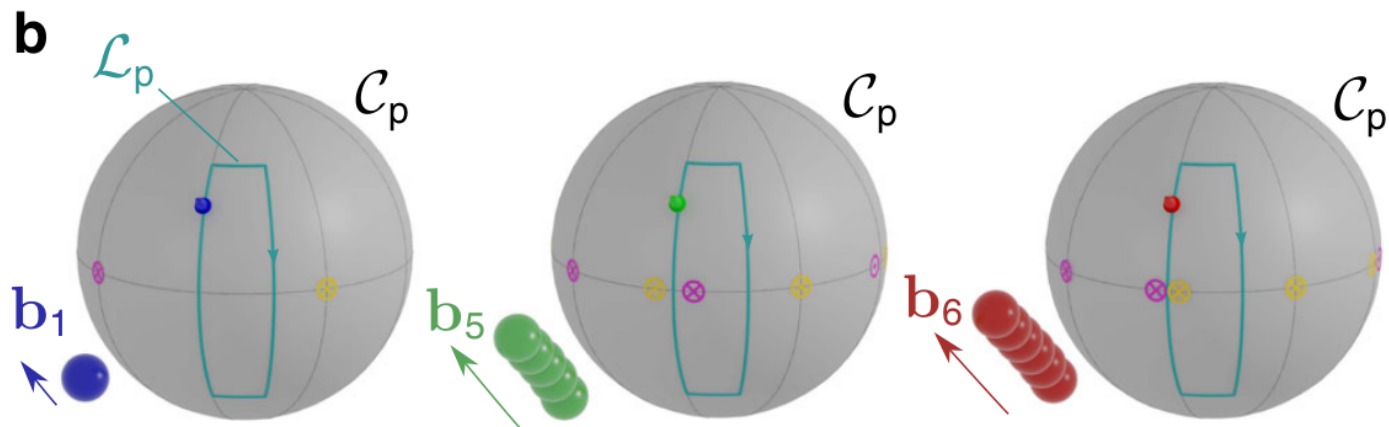
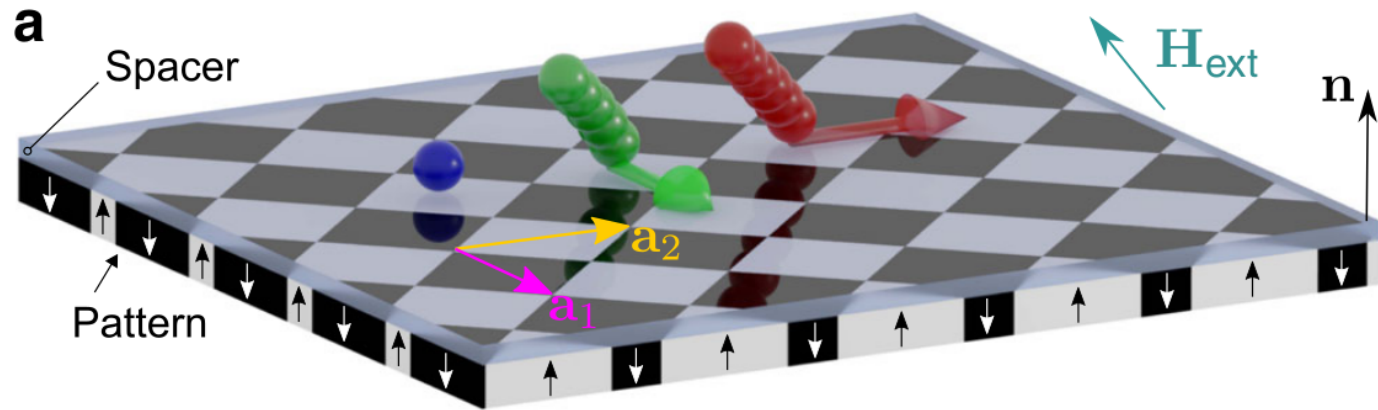
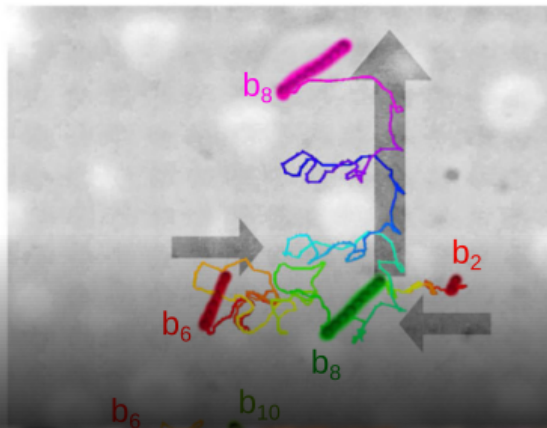
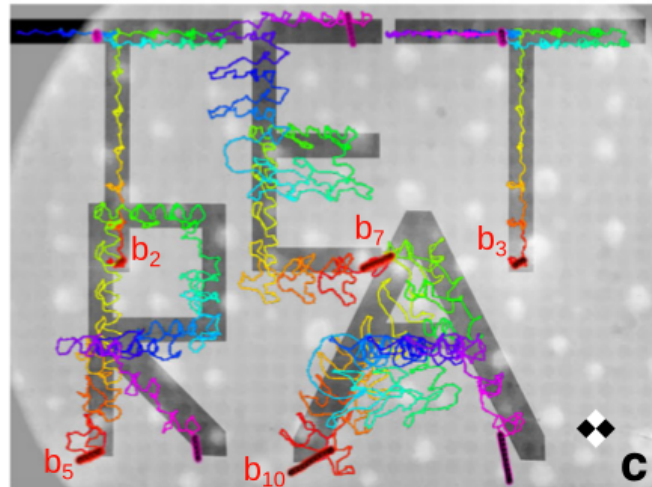
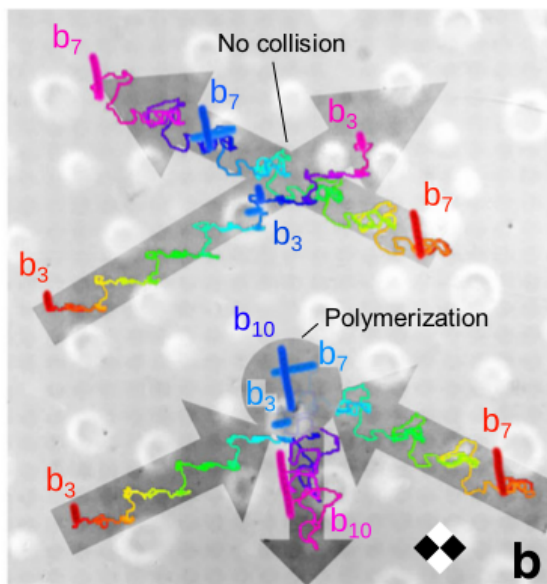
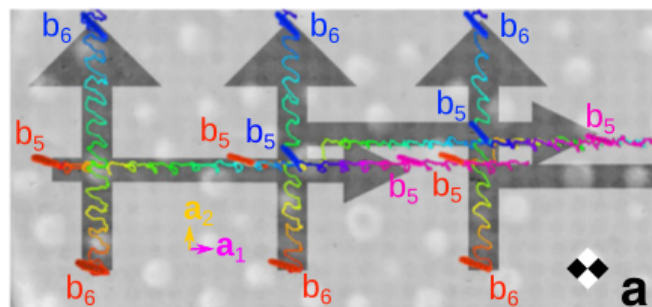


Fig. 1 Schematic of the colloidal transport.

przestrzeń kontrolna, C_p
 – reprezentuje możliwe
 kierunki zewnętrznego
 pola magnetycznego

pole zewnętrzne zmienia
 się adiabatycznie w
 funkcji czasu tworząc w
 C_p zamkniętą pętlę

Jeśli pętla obejmuje
 specjalne kierunki (żółte i
 różowe punkty
 równikowe) to łańcuchy
 przesuwać się o jeden
 wektor sieciowy po
 wykonaniu pełnej pętli



Eksperymentalne trajektorie łańcuchów sterowanych wielokierunkowymi (polydirectional) pętłami w przestrzeni C_p

Teoretycznie i pod warunkiem, że nie więcej niż jeden z łańcuchów jest krótszy od wektora sieciowego, zawsze można znaleźć wielokierunkową pętlę w przestrzeni C_p , która transportuje niezależnie łańcuchy o różnej długości.

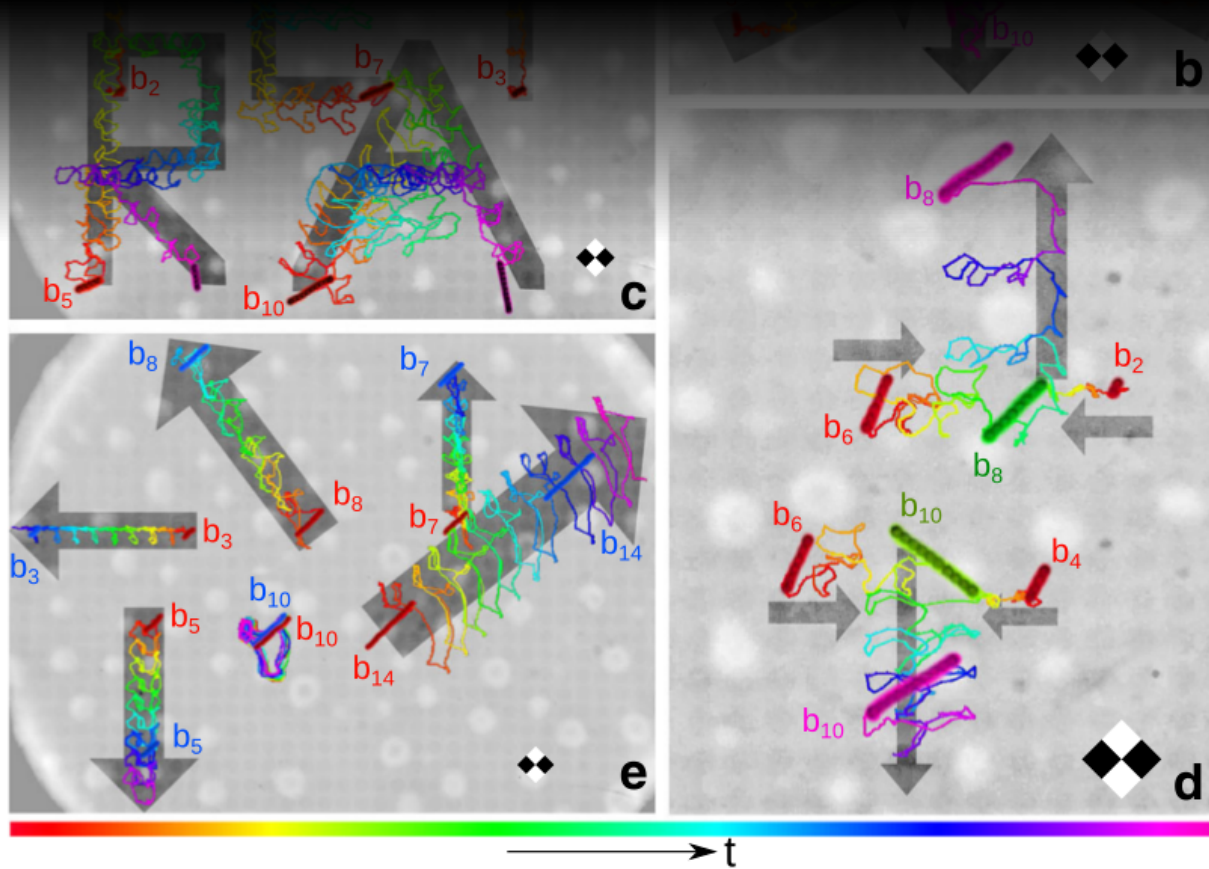
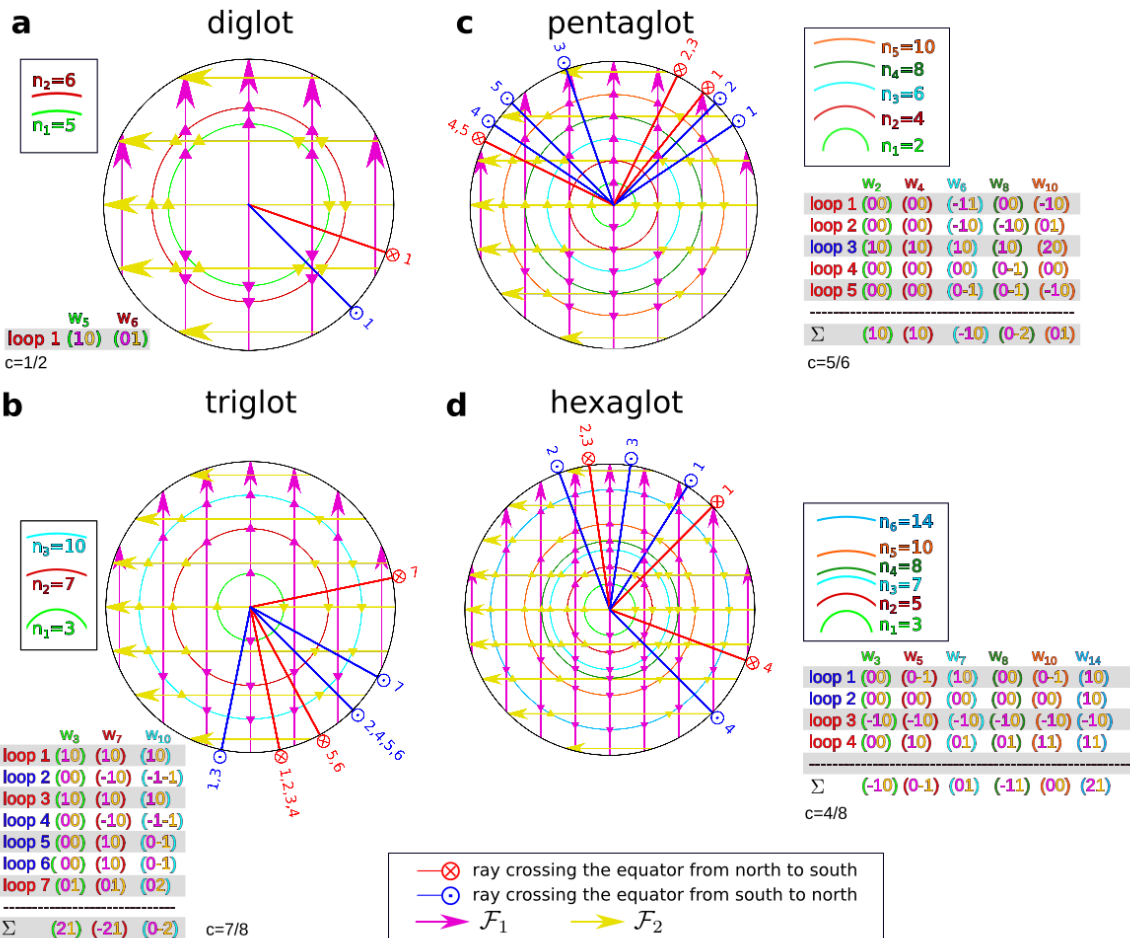


Fig. 2 Experimental trajectories of bipeds driven by parallel polydirectional loops.

Eksperymentalne trajektorie łańcuchów sterowanych wielokierunkowymi (polydirectional) pętłami w przestrzeni C_p

Teoretycznie i pod warunkiem, że nie więcej niż jeden z łańcuchów jest krótszy od wektora sieciowego, zawsze można znaleźć wielokierunkową pętlę w przestrzeni C_p , która transportuje niezależnie łańcuchy o różnej długości.

Programowanie ruchu łańcuchów



M. Mirzaee-Kakhki et al., NATURE COMMUNICATIONS, 11:4670 (2020)

Opracowano program optymalizujący pętle sterujące, dla zadanej stabilności, pod względem liczby poleceń dla danego zbioru długości łańcuchów i przesunięć.

Zwykle zwiększenie stabilności (robustness) prowadzi do zmniejszenia zwięzłości (compactness) sekwencji poleceń.

WNIOSKI

- użycie równoległych wielokierunkowych pętli pola magnetycznego do sterowania ruchem kompleksów koloidalnych może znaleźć zastosowania w scalonych układach analitycznych, w automatycznej kontroli przebiegu procesów chemicznych etc.
- topologiczna ochrona dotyczy wpływu małych zaburzeń kształtu pętli modulacji, zmian kształtu cząstek koloidalnych i odstępstw strukturyzowanego układu domen od okresowości na wypadkowy wektor przesunięcia dla pełnej pętli modulacji — jest to istotne dla praktycznych zastosowań magnetoforezy.
- topologicznie chroniony transport możliwy jest również dla nieadiabatywnych zmian pola ($f \approx 1$ Hz)