

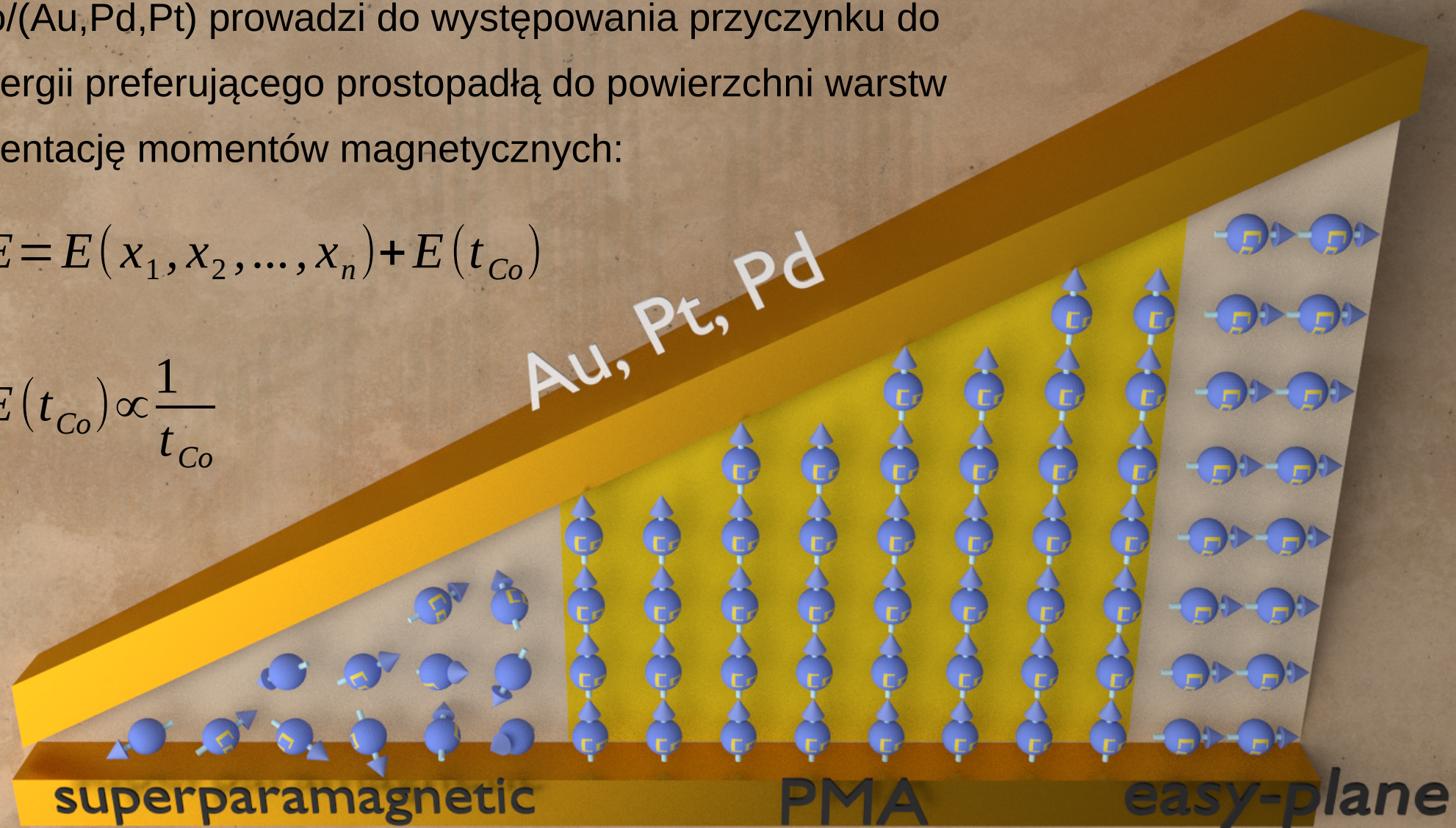
**Procesy przemagnesowania w układach Pt/Au/Pt z  
dwuwymiarowym gradientem anizotropii**

**Magnetoforeza wykorzystująca strukturyzowane  
układy warstwowe Au/Co/Au**

W warstwach wielokrotnych na bazie Co obecność interfejsów Co/(Au,Pd,Pt) prowadzi do występowania przyczynku do energii preferującego prostopadłą do powierzchni warstw orientację momentów magnetycznych:

$$E = E(x_1, x_2, \dots, x_n) + E(t_{Co})$$

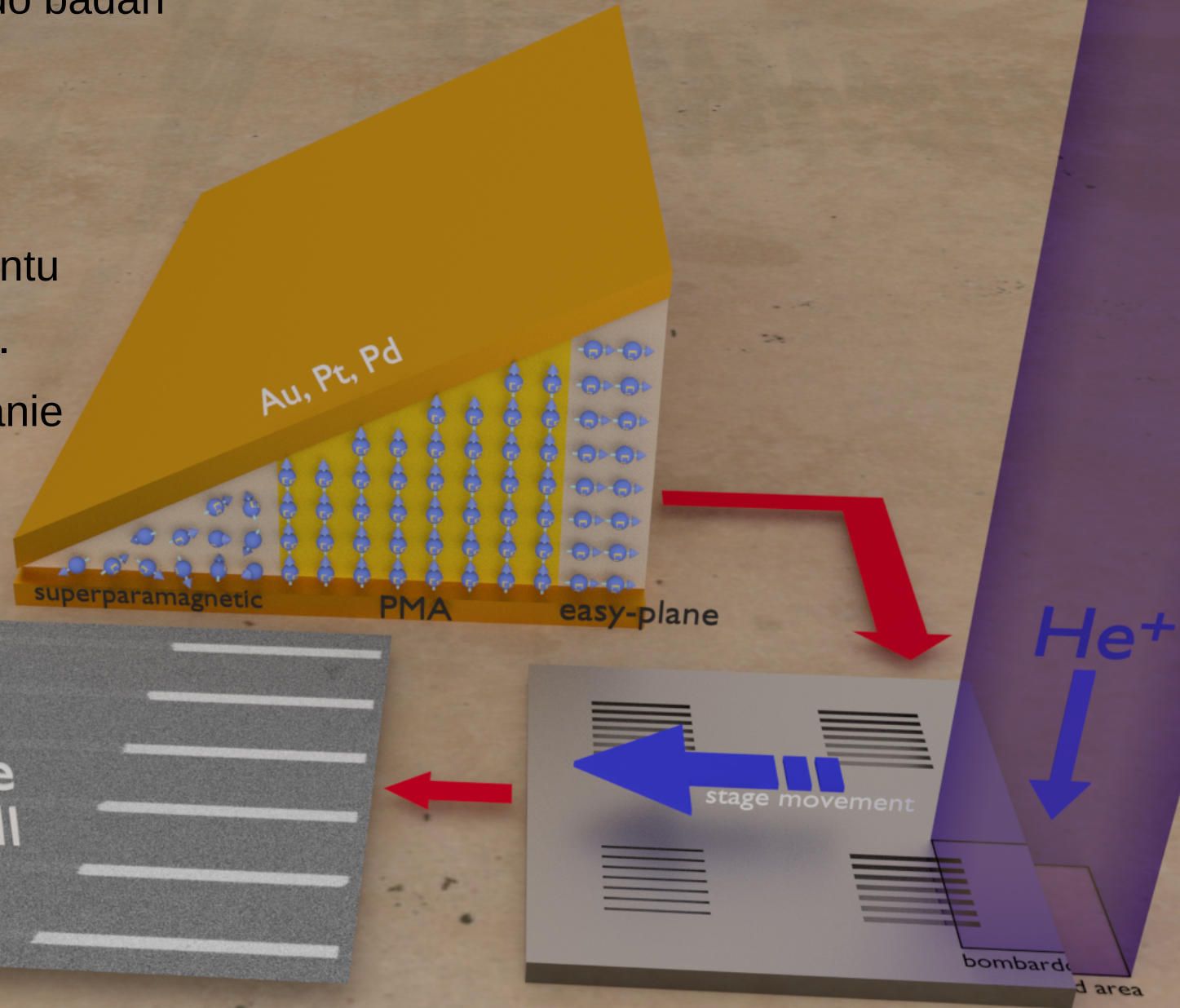
$$E(t_{Co}) \propto \frac{1}{t_{Co}}$$



zakres istotny z punktu widzenia zastosowań  
 $t_{Co} = 0.3 - 1.4 \text{ nm}$

Wytwarzanie układów do badań propagacji domen:

1. rozpylanie jonowe
2. litografia elektronowa
3. wprowadzenie gradientu pól przełączania – np. poprzez bombardowanie jonowe



seminarium Spray



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Magnetism and Magnetic Materials

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jmmm](http://www.elsevier.com/locate/jmmm)



## Magnetic domain propagation in Pt/Co/Pt micro wires with engineered coercivity gradients along and across the wire

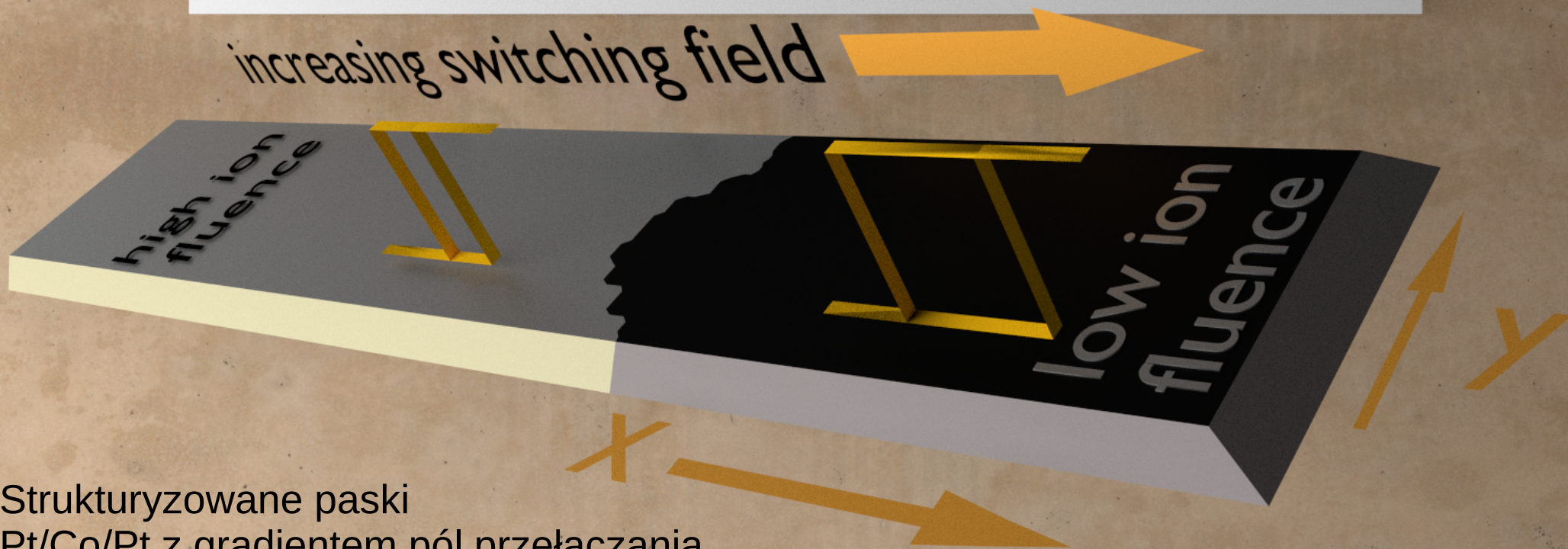


A. Jarosz<sup>a,\*</sup>, A. Gaul<sup>b</sup>, M. Urbaniak<sup>a</sup>, A. Ehresmann<sup>b</sup>, F. Stobiecki<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institute of Molecular Physics, Polish Academy of Sciences, ul. M. Smoluchowskiego 17, 60-179 Poznań, Poland

<sup>b</sup>Department of Physics and Center for Interdisciplinary Nanostructure Science and Technology (CINSaT), University of Kassel, Heinrich-Plett-Str. 40, D-34132 Kassel, Germany

increasing switching field



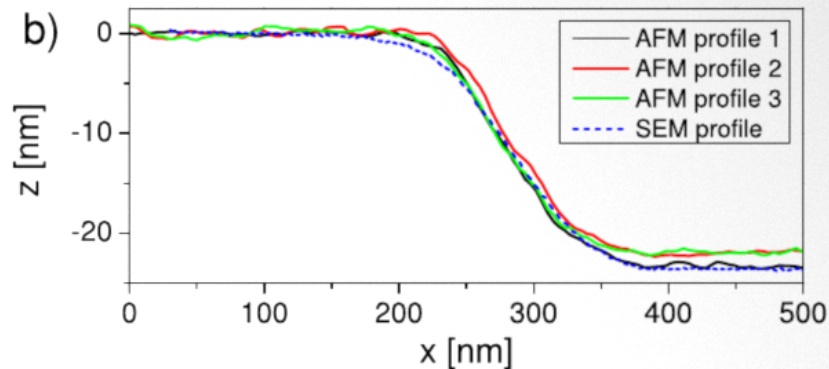
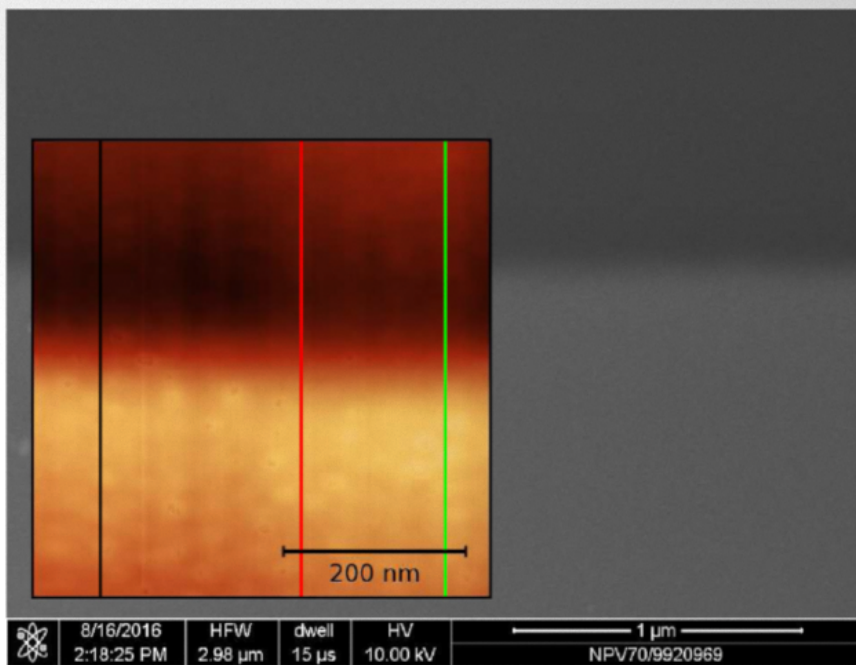
Strukturyzowane paski  
Pt/Co/Pt z gradientem pól przełączania  
wywołanym **bombardowaniem jonowym**

oraz ...

Seminarium Sprawozdawcze 2017

Strukturyzowane paski  
Pt/Co/Pt z gradientem pól przełączania  
wywołanym bombardowaniem jonowym  
oraz **gradientem grubości** na  
krawędziach pasków

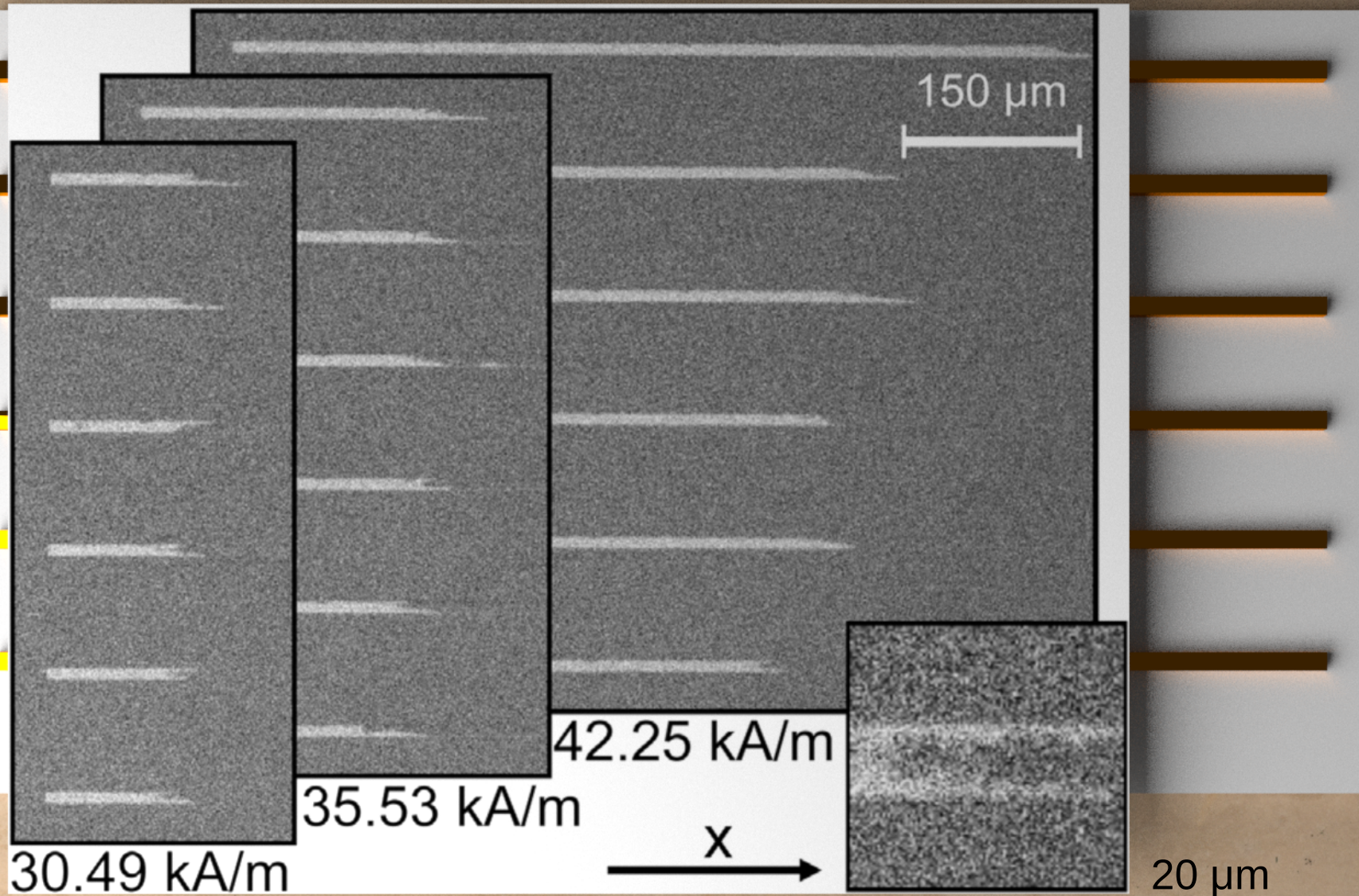
Szerokość krawędzi (obszar  
poprzecznego gradient pól przełączania)  
– ok. 150 nm



**Fig. 2.** a) Scanning electron microscopy image of the edge of a single wire of the Pt (15 nm)/[Co(0.6 nm)/Pt(1.5 nm)]<sub>4</sub> ML. Bright area is the wire's surface and dark area is the Si substrate. Inset shows the AFM image of the analogous wire's edge for comparison. Non-coated, silicon AFM probe in soft tapping mode was used having dimensions of 150 × 30 × 2.7 μm with a tip height of 17 μm and a tip radius below 10 nm. Color lines represent profiles shown below. b) Profiles extracted from the AFM and SEM images, confirming the edge taper visible on the images above. The z-coordinate for the SEM profile corresponds to the change of image brightness. It was scaled and superimposed on the AFM profiles. Lines' colors correspond to the profile markings on the AFM and SEM images. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

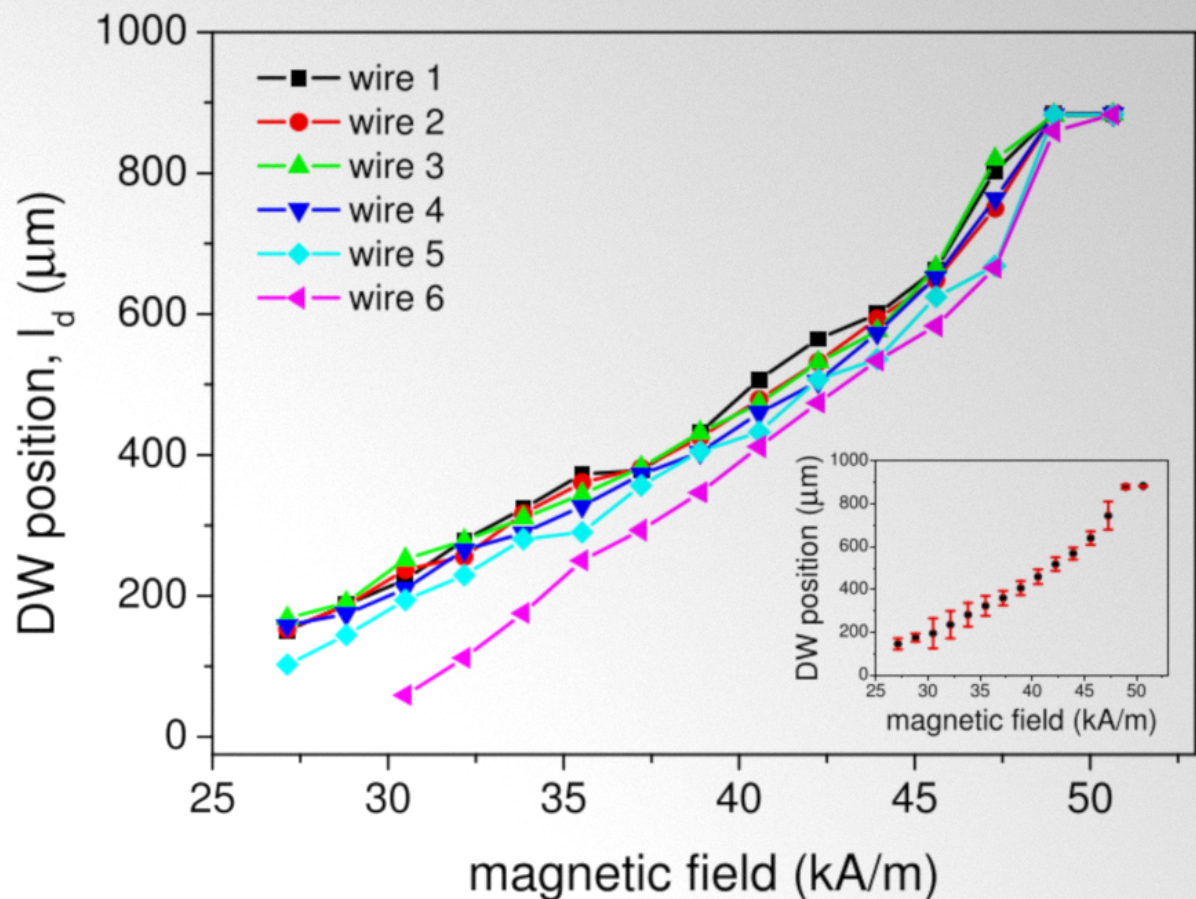
● Gradient grubości – gradient przyczynku do anizotropii magnetycznej preferującego prostopadłe ustawienie momentów względem powierzchni warstwy





Różnicowy obraz z mikroskopu efektu Kerra dla pasków  $\text{Pt}(15 \text{ nm})/[\text{Co}(0.6 \text{ nm})/\text{Pt}(1.5 \text{ nm})]_4$  o szerokości  $10 \mu\text{m}$

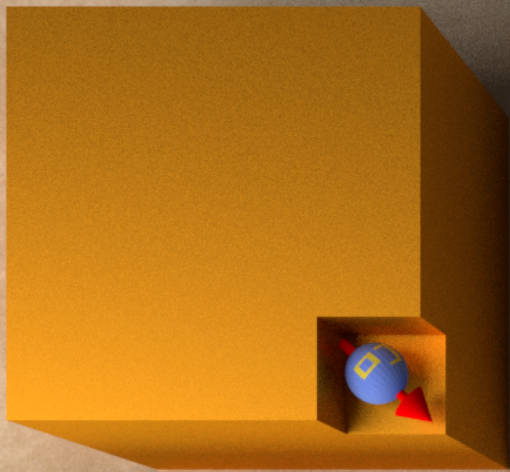
**„wyprzedzająca” nukleacja na krawędziach**



**Fig. 5.** Experimentally determined DW positions as functions of magnetic field (see Section 2) for wires of  $10 \mu\text{m}$  widths. The wires are numbered according to their order in Fig. 4 from top to bottom. The inset presents an average DW position determined from the behavior of all six wires (black line) with one standard deviation (red error bars) as a function of magnetic field. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

w przybliżeniu liniowa  
zależność położenia ściany  
od natężenia impulsu  
zewnętrznego pola  
magnetycznego

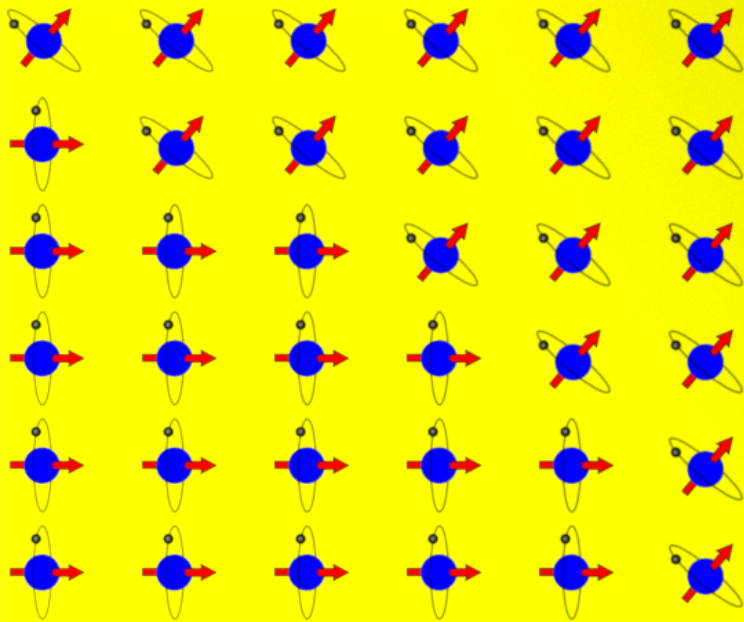
położenie ściany domenowej  
określone przez gradient pól  
przełączania



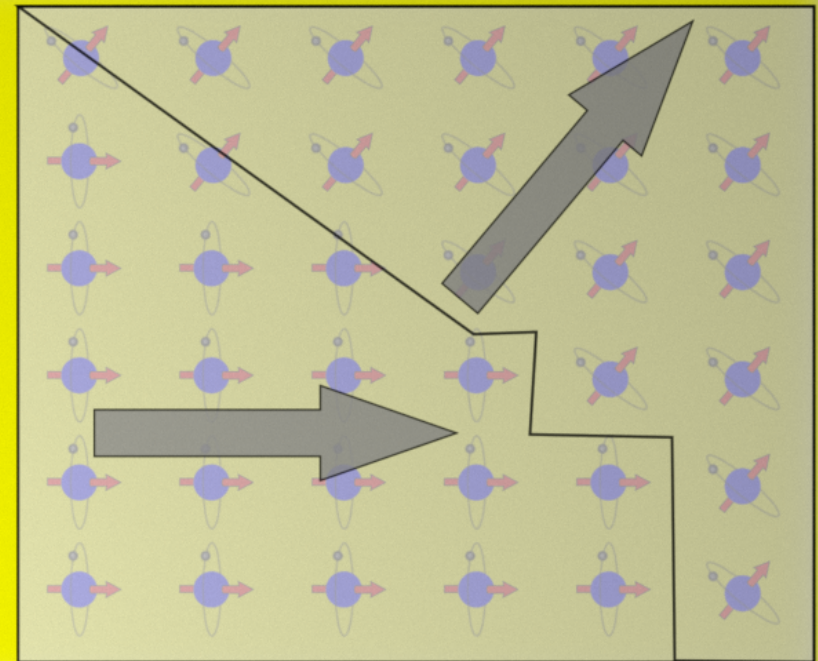
Mikromagnetyzm – szczegóły struktury atomowej nie są uwzględniane:

- materiał traktowany jest jako namagnesowany jednorodnie
- do przewidywania zachowania układu stosuje się równanie Landaua-Lifszyca-Gilberta

### atomistic description



### micromagnetic description





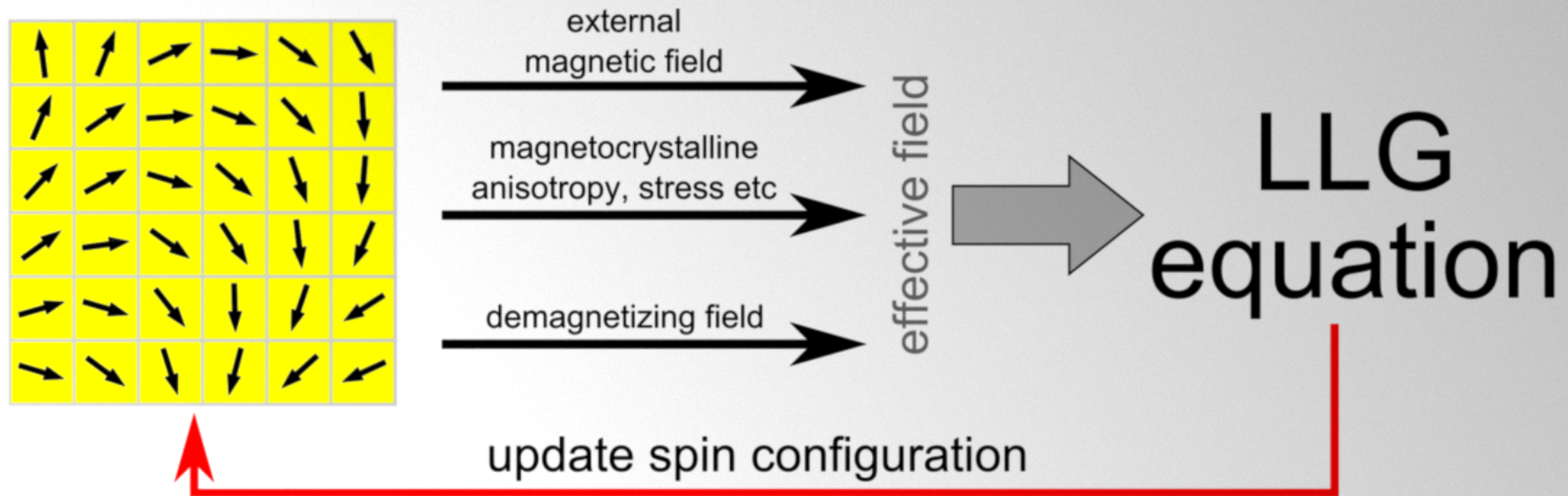
## Parametry symulacji:

-rozmiar układu:  $1 \times 8 \mu\text{m}^2 \times 1 \text{ nm}$

-rozmiar komórki:  $4 \times 4 \times 1 \text{ nm}^3$

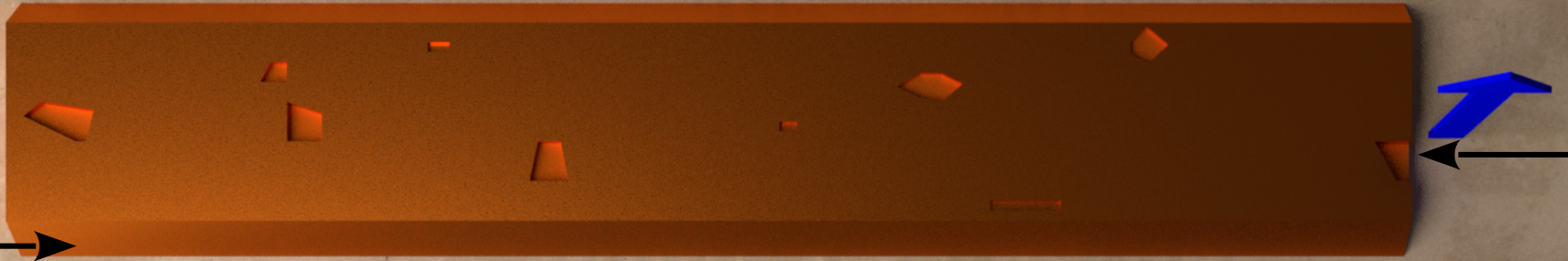
## Finite difference micromagnetism – calculation scheme

- The time step is adjusted so that the “the total energy of the system decreases, and the maximum error between the predicted and final  $M$  is smaller than a nominal value” [14]



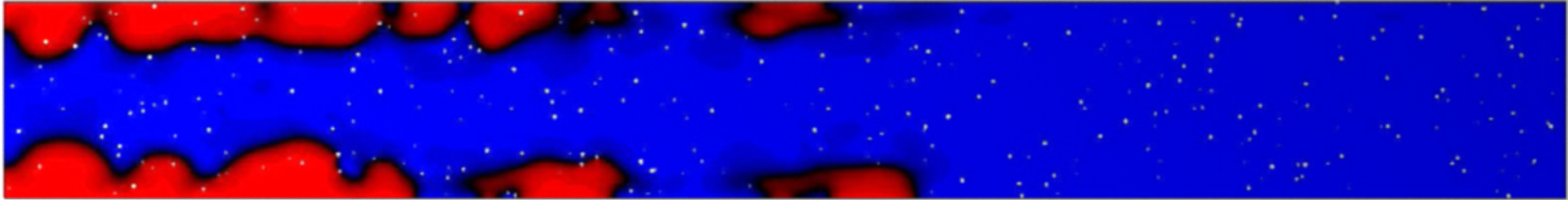
$$\frac{d\vec{m}}{dt} = \frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} \vec{m} \times \vec{B} - \frac{\alpha}{(1 + \alpha^2)} \frac{\gamma}{|\vec{m}|} \vec{m} \times \vec{m} \times \vec{B}$$

uwzględnione defekty: obniżenie efektywnej anizotropii, obszary z  $M=0$

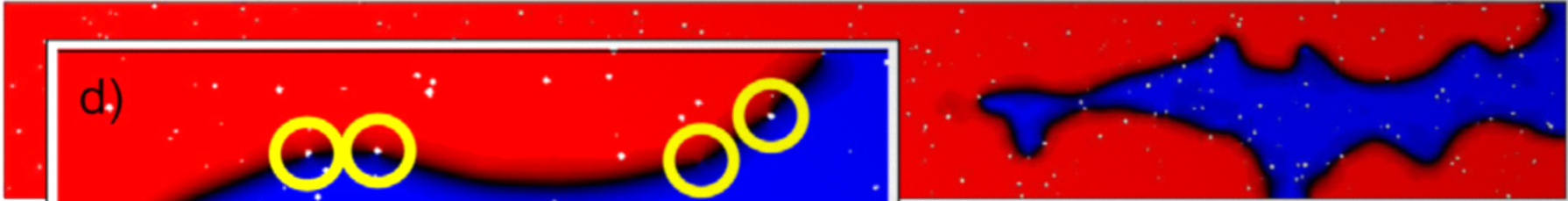


obniżenie efektywnej anizotropii w obszarach krawędziowych – zmiana grubości subwarstw Co

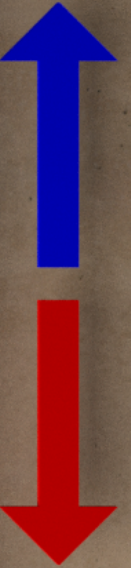
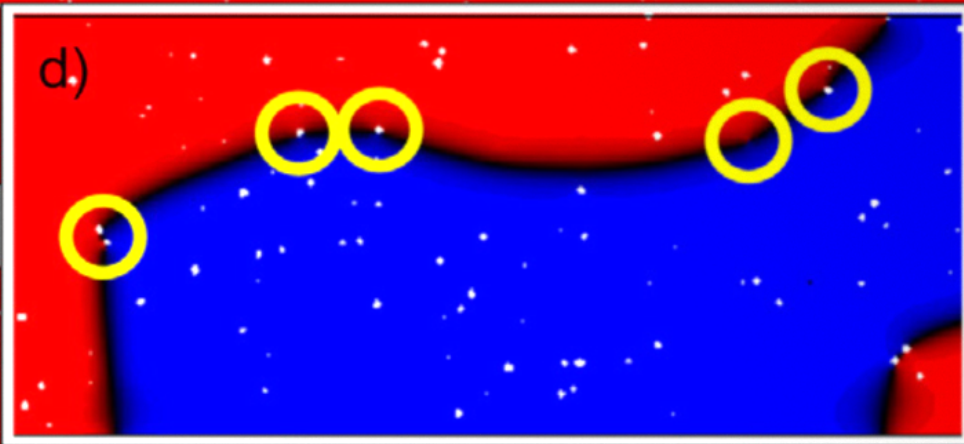
a) 8.9 ns @  $H_z = -27$  kA/m

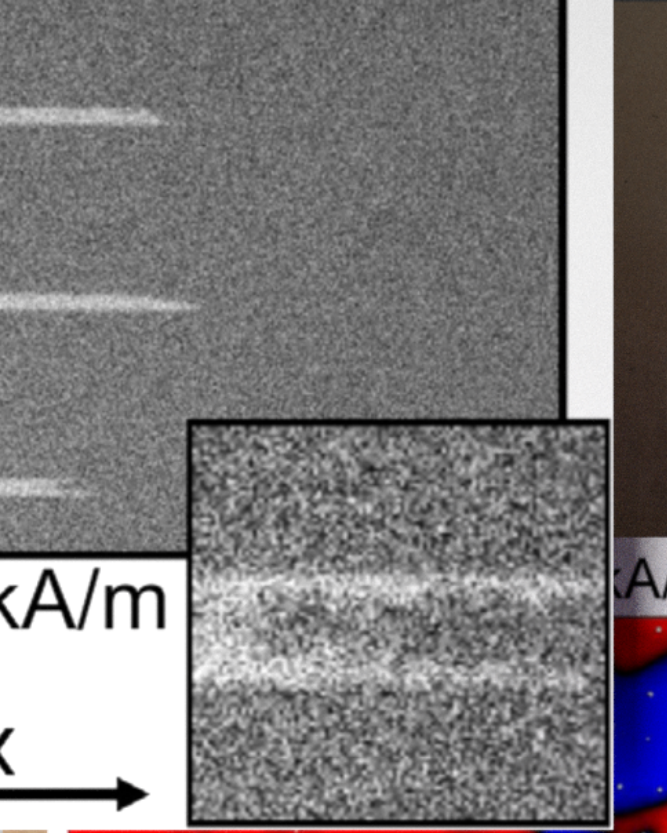


b) 16.9 ns @  $H_z = -27$  kA/m



c) 105.5 ns @  $H_z = 0$  kA/m



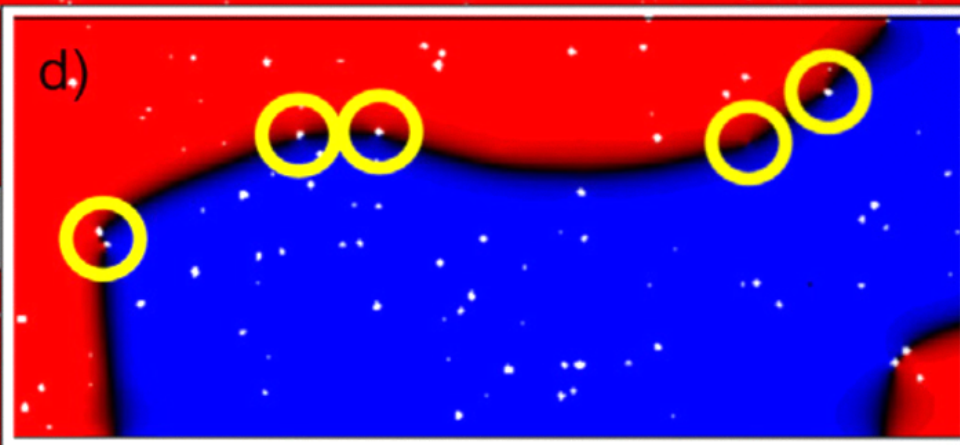


### Wnioski

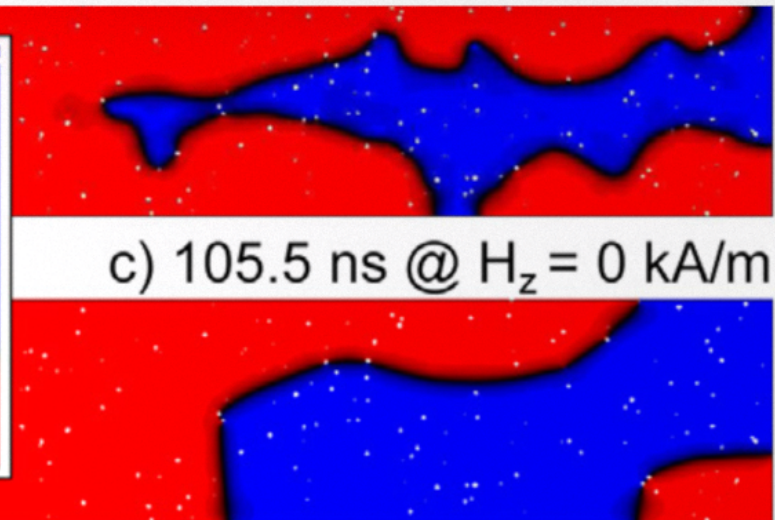
do części I

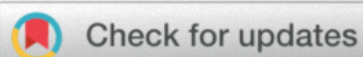
- profil krawędzi warstw Pt/Co/Pt ma istotny wpływ na procesy przemagnesowania
- defekty strukturalne determinują remanencyjną strukturę magnetyczną – przyszpilenie ścian domenowych
- symulacje mikromagnetyczne pozwalają uzyskać jakościową zgodność z eksperymentem

b) 16.9 ns @  $H_z = -27$  kA/m



c) 105.5 ns @  $H_z = 0$  kA/m





## Lattice symmetries and the topologically protected transport of colloidal particles†

Cite this: *Soft Matter*, 2017,  
13, 5044

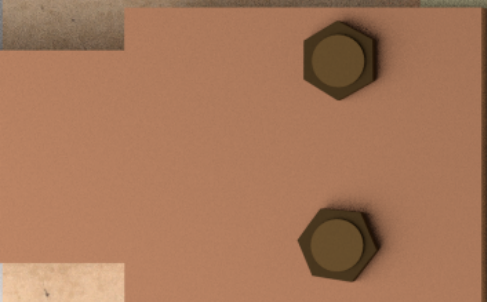
Johannes Loehr,<sup>a</sup> Daniel de las Heras,<sup>id</sup><sup>b</sup> Michael Loenne,<sup>c</sup> Jonas Bugase,<sup>a</sup>  
Adam Jarosz,<sup>d</sup> Maciej Urbaniak,<sup>d</sup> Feliks Stobiecki,<sup>d</sup> Andreea Tomita,<sup>e</sup>  
Rico Huhnstock,<sup>e</sup> Iris Koch,<sup>e</sup> Arno Ehresmann,<sup>e</sup> Dennis Holzinger<sup>e</sup> and  
Thomas M. Fischer <sup>id</sup><sup>\*a</sup>

Wyjściowym układem jest jednorodna w płaszczyźnie warstwa Au/Co/Au z anizotropią prostopadłą

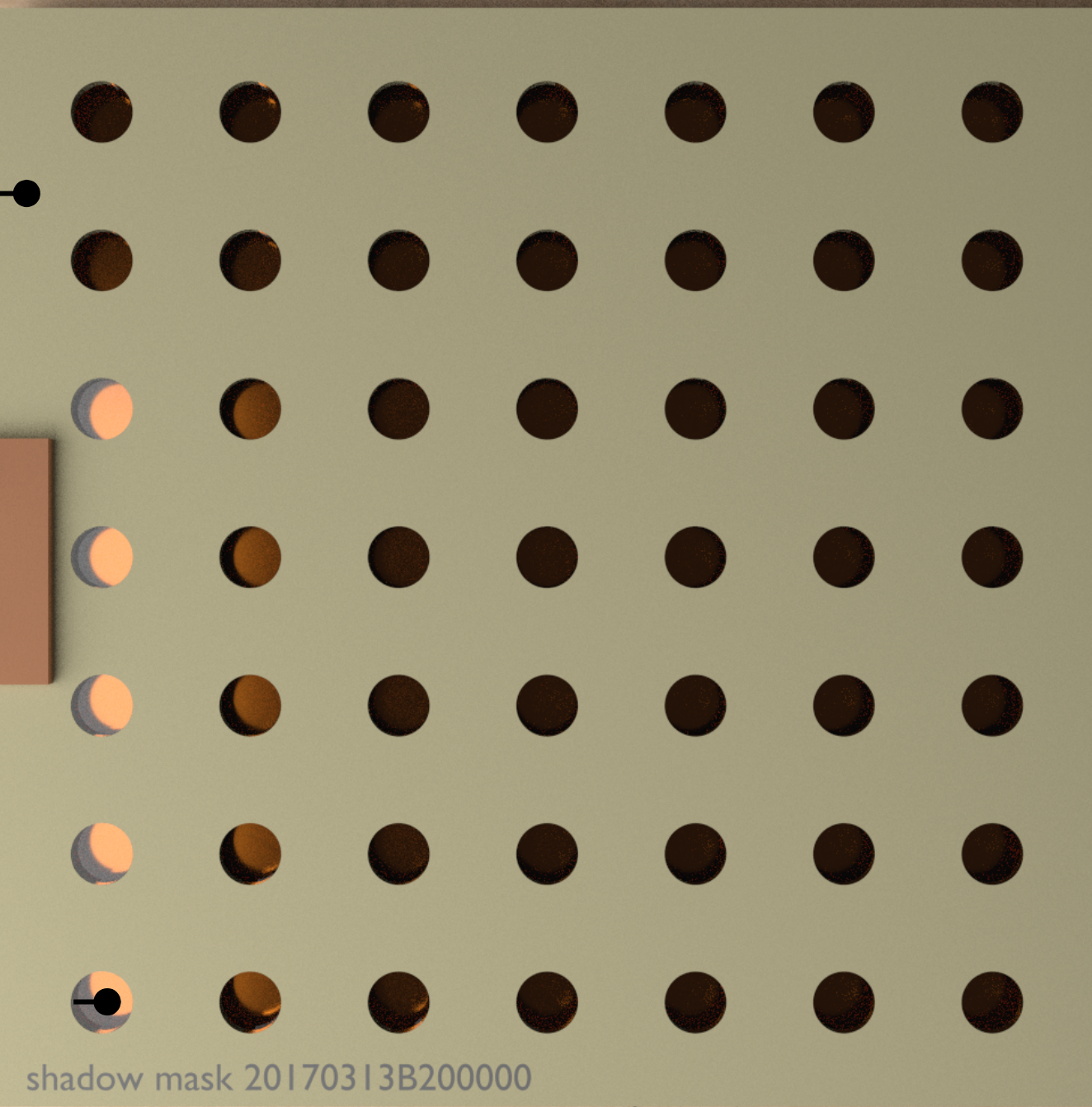
Strukturyzacja, wyłącznie nietopograficzna, prowadzi do lokalnych zmian pól przełączania

Część pomiarów przeprowadzono na granatach

Maska optyczna (chrom na szkłe) wykorzystywana jest do wytworzenia maski z polimeru



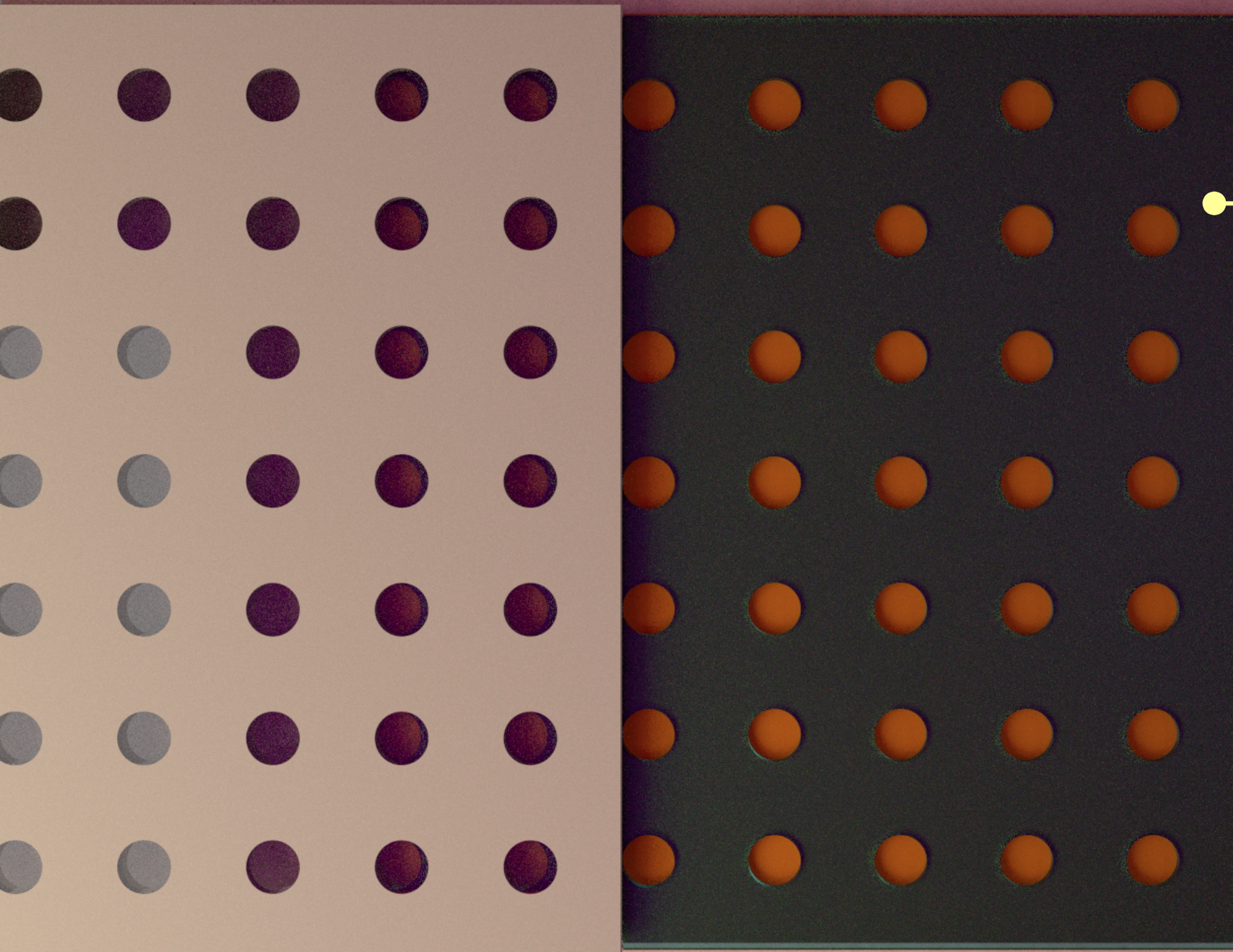
układ Au/Co/Au



shadow mask 20170313B200000

litografia UV

maska polimerowa



W wyniku bombardowanie jonowego ( $\text{He}^+$  o energii 5-30 keV) przez maskę polimerową uzyskuje się strukturę z obszarami o zmniejszonej efektywnej anizotropii prostopadłej.

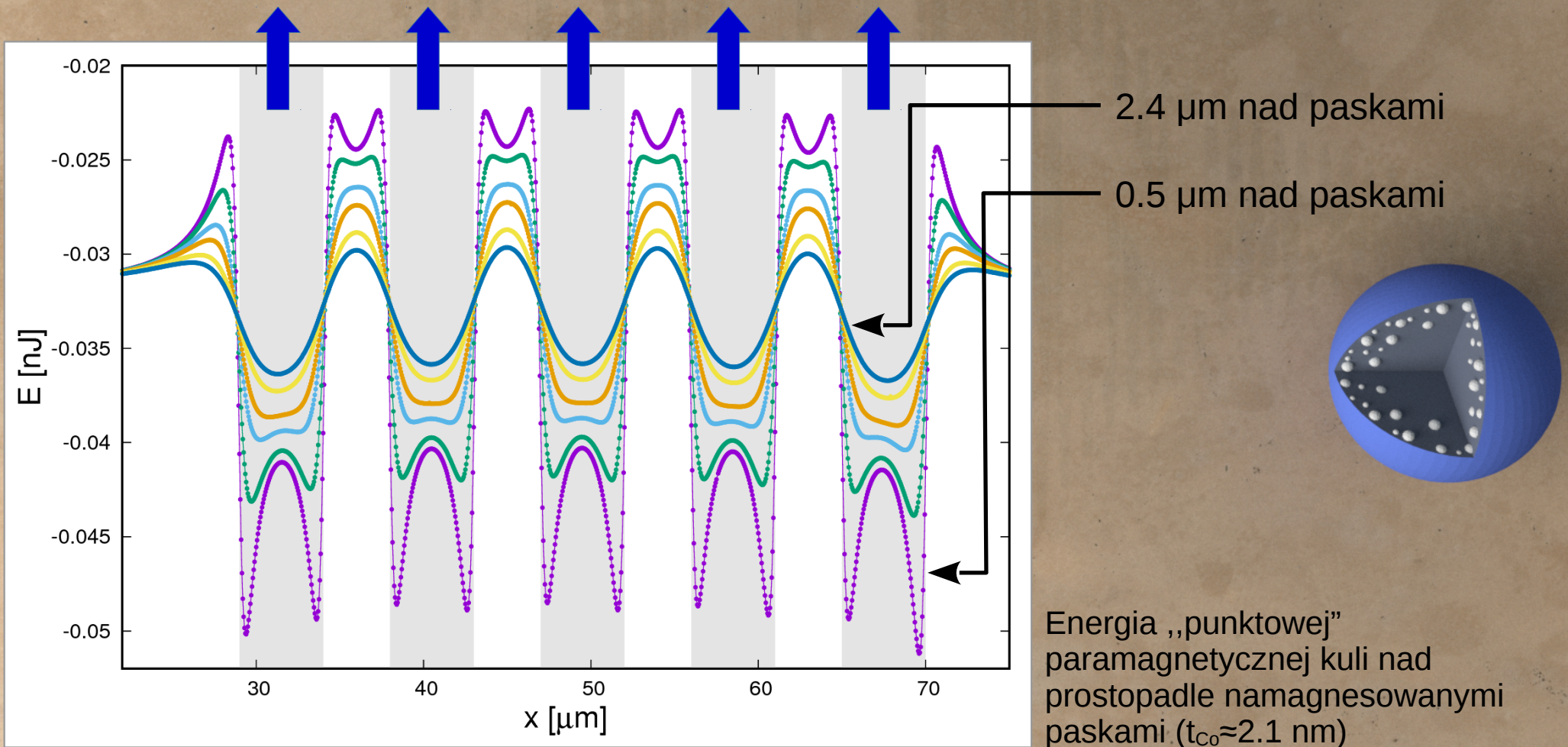
Czerwone obszary, z powodu oddziaływań magnetostaticznych lub w wyniku zastosowania odpowiedniej sekwencji pól, mogą posiadać momenty magnetyczne skierowane przeciwnie do momentów obszarów nie poddanych bombardowaniu



W cienkich warstwach magnetycznych istotne pola magnetyczne występują tylko w obszarach, w których zmienia się kierunek/wartość namagnesowania – ściany domenowe

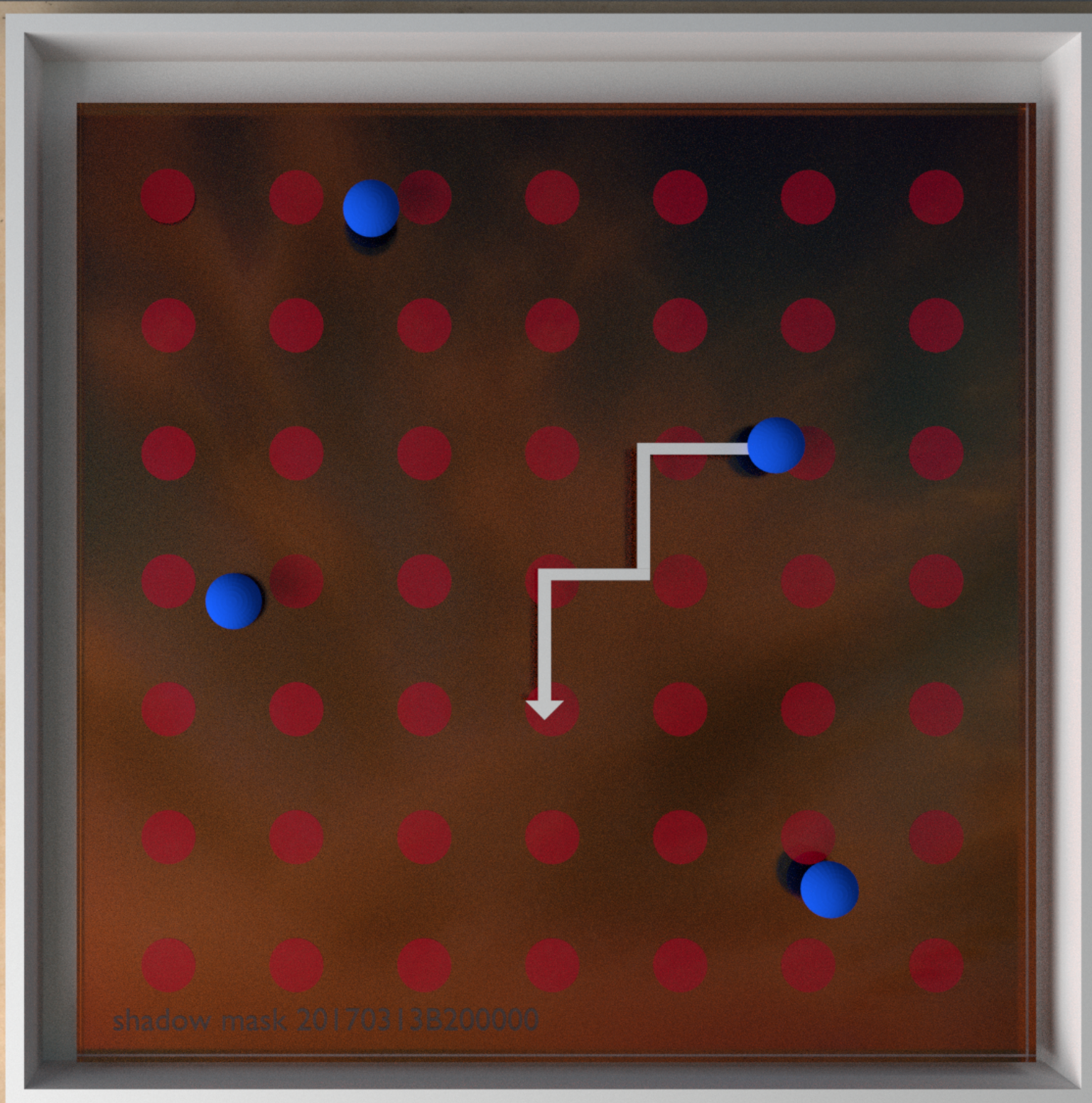
$$m = V \chi_p \frac{B}{\mu_0} \rightarrow dm = V \chi_p \frac{dB}{\mu_0} \rightarrow dE = -dm B = -V \chi_p \frac{dB}{\mu_0} B$$

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



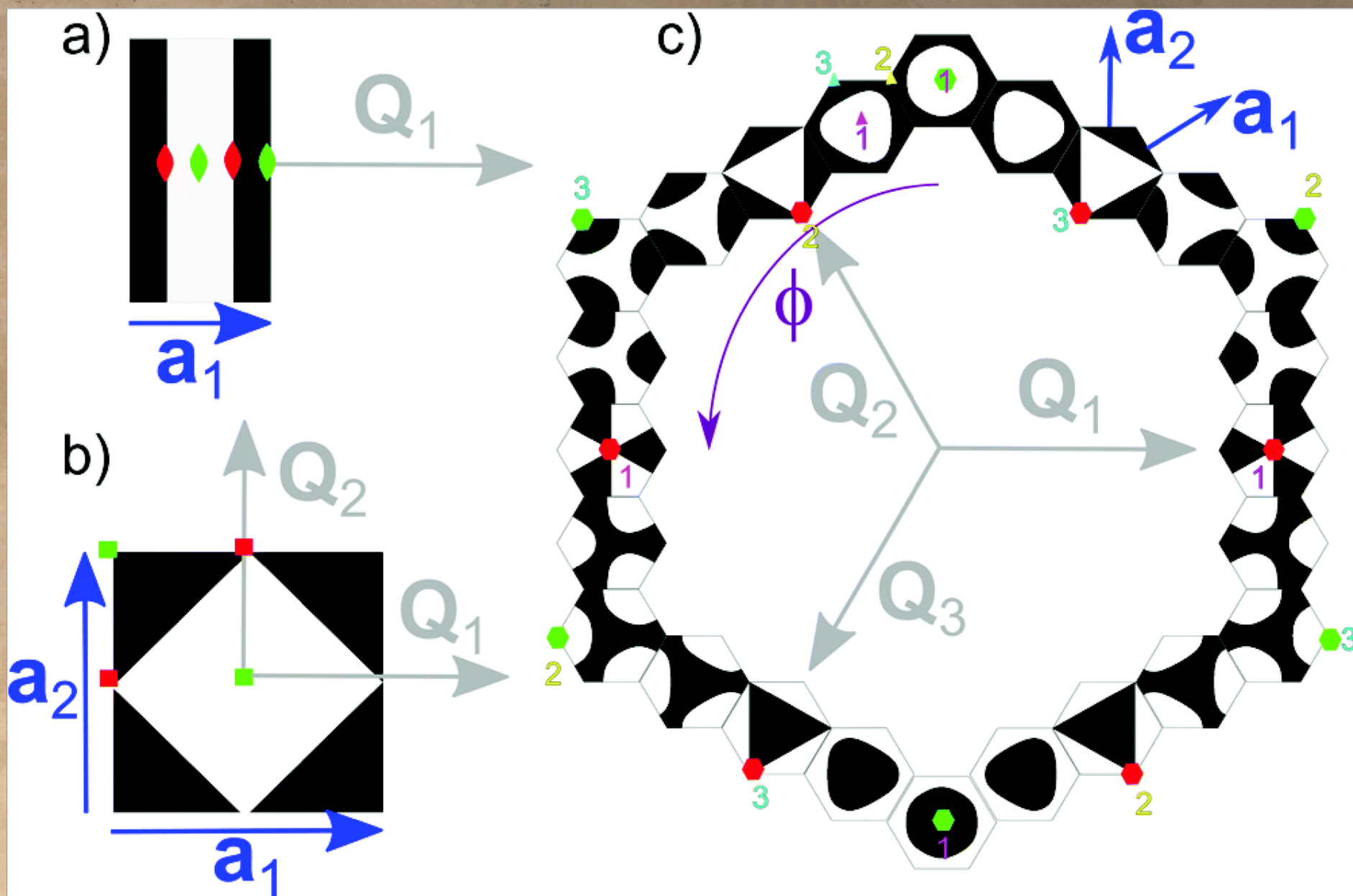


- strukturyzowana warstwa pokryta **1.7  $\mu\text{m}$**  warstwą przezroczystego plastiku (rezyst) – słabsze pola magnetyczne ale zachowanie uniwersalności: dominacja niższych składowych Fouriera
- średnica kulek – **2.7  $\mu\text{m}$**
- zewnętrzne pola magnetyczne modyfikują krajobraz energetyczny **prowadząc do ruchu kulek**
- zewnętrzne pola magnetyczne są zbyt słabe by istotnie zmienić strukturę magnetyczną podłoża
- ruch odbywa się w środowisku wodnym

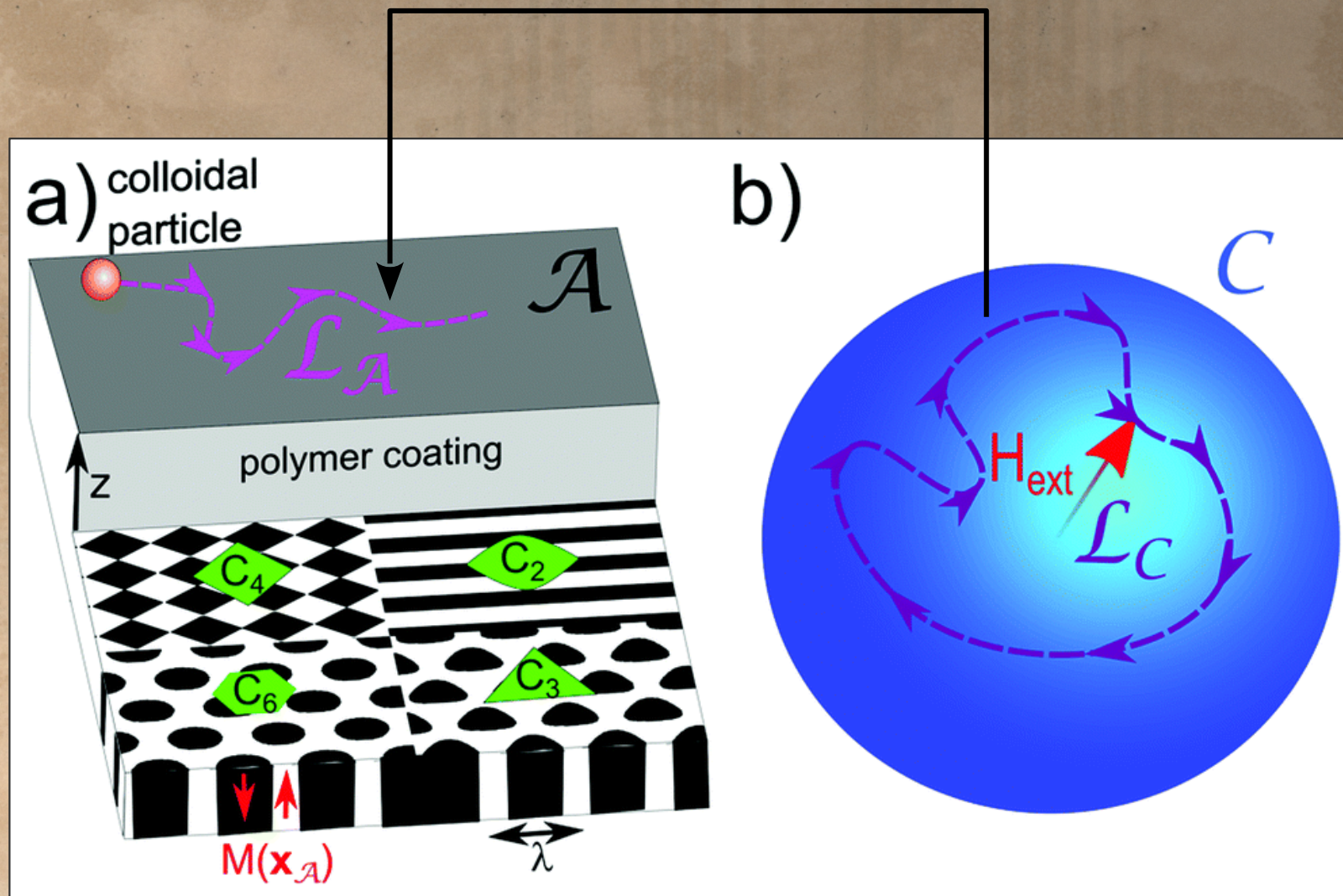


Wszystkie możliwe dwuwymiarowe sieci magnetyczne z jednakowej długości wektorami sieciowymi

Struktury (b) i (c) badane z użyciem warstw **Au/Co/Au** z prostopadłą anizotropią



Eksperyment polegał na obserwacji trajektorii kulek dia/paramagnetycznych w **przestrzeni akcji** (A) pod wpływem zmian kierunku pola magnetycznego opisywanego wektorem w **przestrzeni kontrolnej** (C)



Eksperyment polegał na obserwacji trajektorii kulek dia/paramagnetycznych w **przestrzeni akcji** (A) pod wpływem zmian kierunku pola magnetycznego opisywanego wektorem w **przestrzeni kontrolnej** (C)

Filmy pokazujące wyniki eksperymentów dostępne są pod adresem:

<http://www.rsc.org/suppdata/c7/sm/c7sm00983f/c7sm00983f1.zip>

- paramagnetyczne i diamagnetyczne cząsteczki mogą być transportowane nad dwuwymiarowymi strukturami z anizotropią prostopadłą poprzez modulację potencjału z wykorzystaniem zaleźnego od czasu jednorodnego pola magnetycznego
- pętle modulacji należące do topologicznie równoważnych klas indukują ruch w tym samym kierunku co czyni układ względnie odpornym na defekty struktury