

# Wykorzystanie pola magnetycznego do manipulacji mikrocząstkami

Maciej Urbaniak

Instytut Fizyki Molekularnej PAN  
Poznań 2009.01.09

# Wykorzystanie pola magnetycznego do manipulacji mikrocząstkami

- Wprowadzenie
- Siła w polu magnetycznym
- Szczypce magnetyczne
- Wykorzystanie struktury domenowej
- Podsumowanie

## Literatura

- [1] E. H. Brandt, Levitation in Physics, Science **243**, 349 (1989)
- [2] F. H. C. Crick A. F. W. Hughes, The Physical Properties of Cytoplasm. A Study by Means of the Magnetic Particle Method. ..., Exp. Cell Res. **1**, 505 (1950) [część 1 (str. 37) i 2]
- [3] Rob Harrand, Alastair Smith, Neil Thomson, Peter Grant, Ramzi Ajjan and Robert Ariens, The design and construction of magnetic tweezers and the investigation of fibrin clots
- [4] I. Šafařík, M. Šafaříková, Journal of Chromatography B, **722** (1999) 33–53
- [5] L. E. Helseth, T. M. Fischer, T. H. Johansen, Phys. Rev. E **67**, 042401 (2003)
- [6] A. Hubert, R. Schäfer, Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures, Springer, Berlin, 1998
- [7] O. Kitakami, T. Sakurai, Y. Shimada, J. Appl. Phys. **79**, 6074 (1996)
- [8] J. E. Knowles, Proc. Phys. Soc. **78**, 233 (1961)
- [9] L. E. Helseth, T. M. Fischer, T. H. Johansen, Phys. Rev. Lett. **91**, 208302 (2003)
- [10] I. Ennen, V. Höink, A. Weddemann, A. Hütten, J. Schmalhorst, G. Reiss, C. Waltenberg, P. Jutzi, T. Weis, D. Engel, A. Ehresmann, J. Appl. Phys. **102**, 013910 (2007)
- [11] G. Reiss, seminarium, Będlewo 2004
- [12] Hisao Morimoto et al., Phys. Rev. E **78**, 021403 (2008)

## Manipulacje magnetyczne – szeroki zakres zastosowań

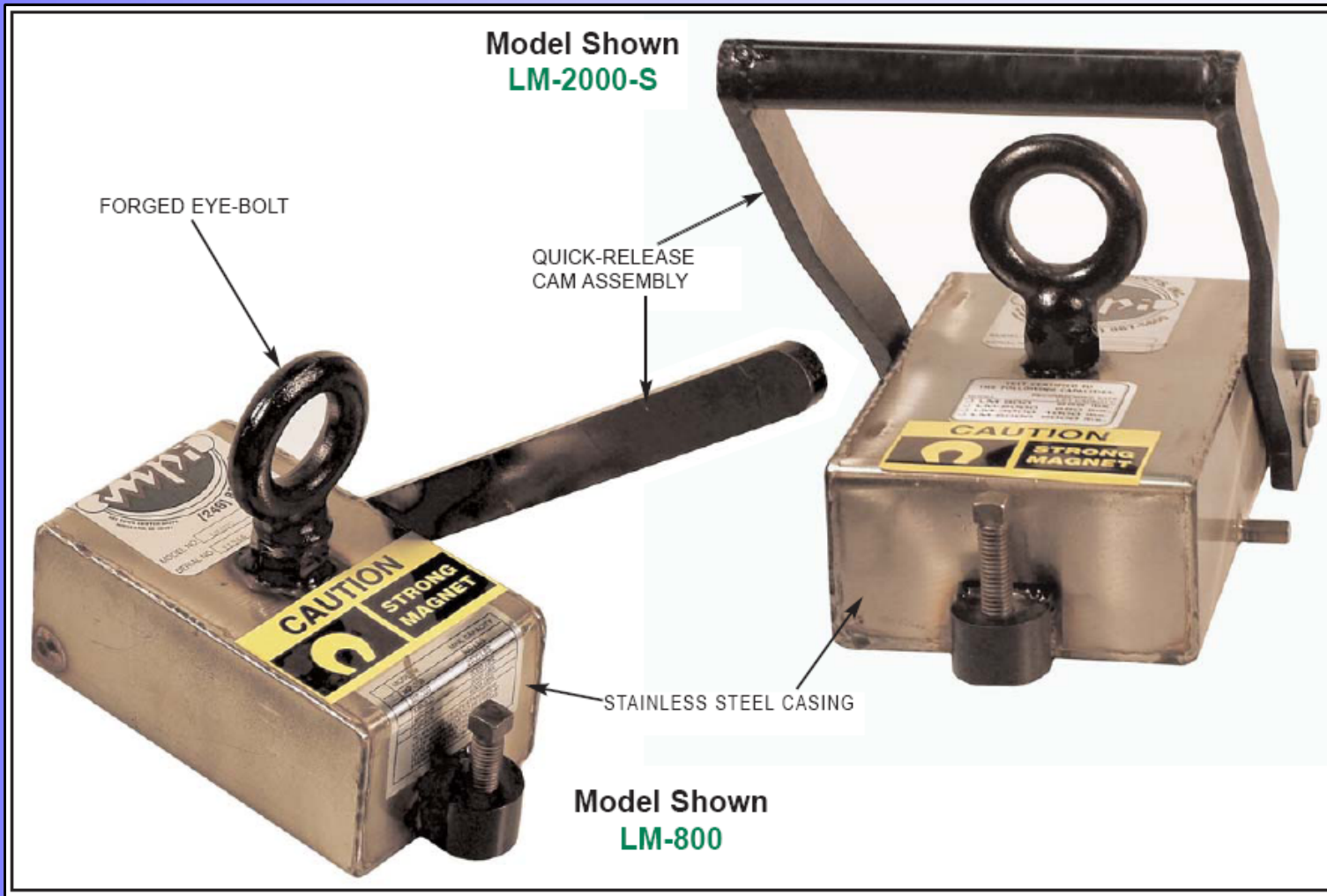
Do przenoszenia ciężkich ładunków ferromagnetycznych używa się **elektromagnesów**.



35 t



## Manipulacje magnetyczne – szeroki zakres zastosowań



LM-2000-S  
Max. Safe Load  
Capacity (3:1  
Safety Factor):  
**303 kg**

Do przenoszenia lżejszych ładunków ferromagnetycznych używa się również **magnesów trwałych**.

## Siły działające w polu magnetycznym

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

Wartość  $\mathbf{m}$  zależy może od wartości  $\mathbf{B}$   
(diamagnetyzm, paramagnetyzm)

$$\vec{F} = \nabla (\vec{m} \cdot \vec{B}) = -\vec{i} \left( m_x \frac{\partial B_x}{\partial x} + m_y \frac{\partial B_y}{\partial x} + m_z \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) - \vec{j} (\dots) - \dots$$

Uzyskiwanie gradientu pola

$$\nabla \cdot \vec{B} = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{Maxwell})$$

Dużemu gradientowi pola magnetycznego w jednym kierunku towarzyszą duże gradienty w kierunkach prostopadłych

# Stabilność punktowego momentu magnetycznego w statycznym polu magnetycznym

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

energia dipola,  $\mathbf{m} = \text{const}$

$$\nabla^2 E = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{-\partial^2 (m_x B_x + m_y B_y + m_z B_z)}{\partial x^2} - \dots$$

$$\nabla^2 E = -m_x \left( \frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial z^2} \right) - m_y \left( \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} \right) - \dots$$

$$\nabla^2 E = -(m_x \nabla^2 B_x + m_y \nabla^2 B_y + m_z \nabla^2 B_z)$$

1

$$\nabla^2 B_x = \frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial z^2}$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \rightarrow \frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial x}, \quad \frac{\partial B_x}{\partial z} = \frac{\partial B_z}{\partial x}$$

$\mathbf{j} = 0, \mathbf{E} = \text{const}$

$$\nabla^2 B_x = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} B_x + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} B_y + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial}{\partial x} B_z = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \right)$$

2

# Stabilność punktowego momentu magnetycznego w statycznym polu magnetycznym

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

energia dipola,  $\mathbf{m}=\text{const}$

$$\nabla^2 E = -(m_x \nabla^2 B_x + m_y \nabla^2 B_y + m_z \nabla^2 B_z)$$

1

$$\nabla^2 B_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \cdot \vec{B})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ (Maxwell)}$$

2

$$\nabla^2 B_x = 0$$

$$\nabla^2 E = 0$$

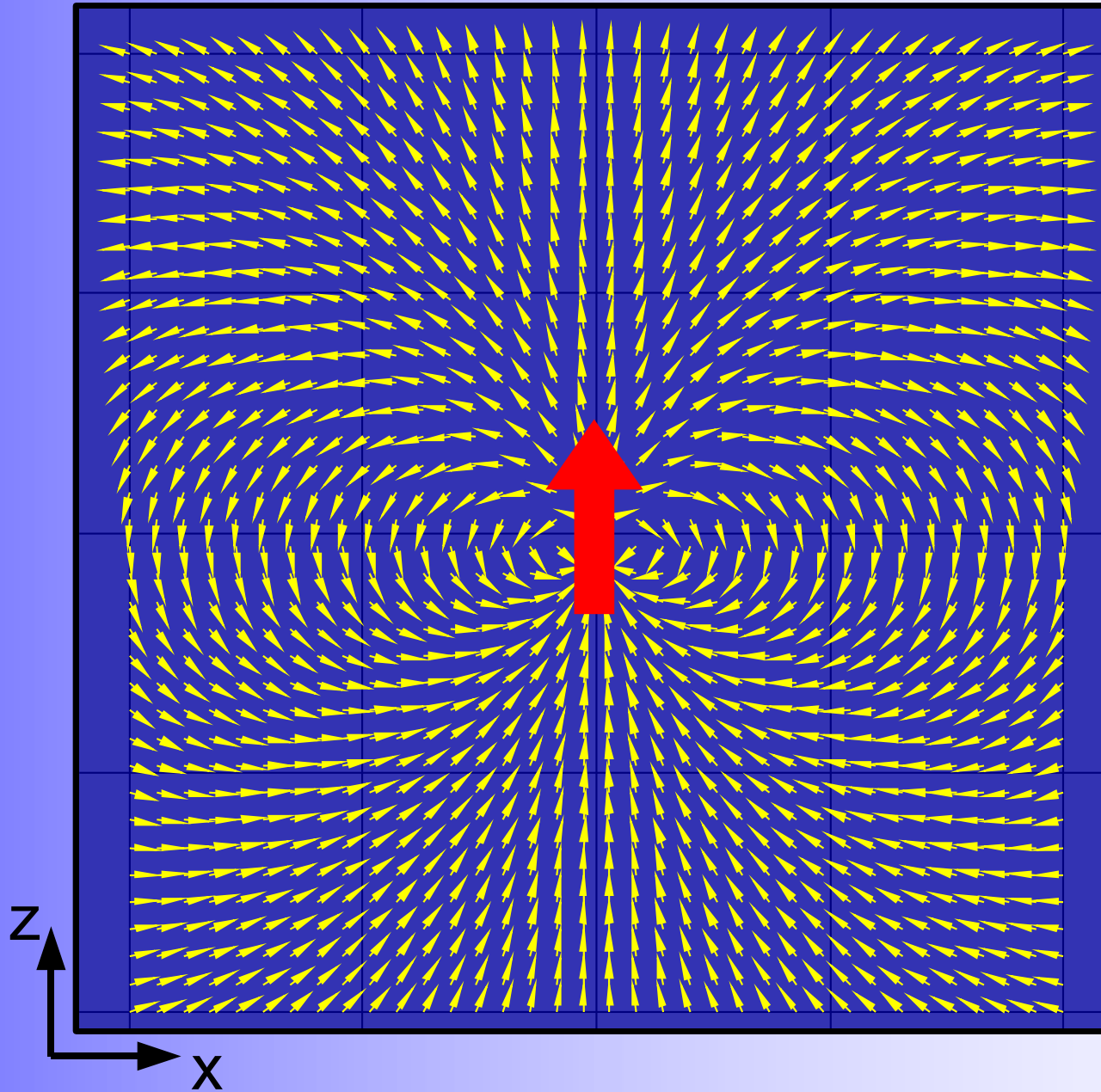
Energia stałego co do wartości momentu magnetycznego w stałym polu magnetycznym jest funkcją harmoniczną

**⇒ nie występują minima energii**

tylko punkty siodłowe



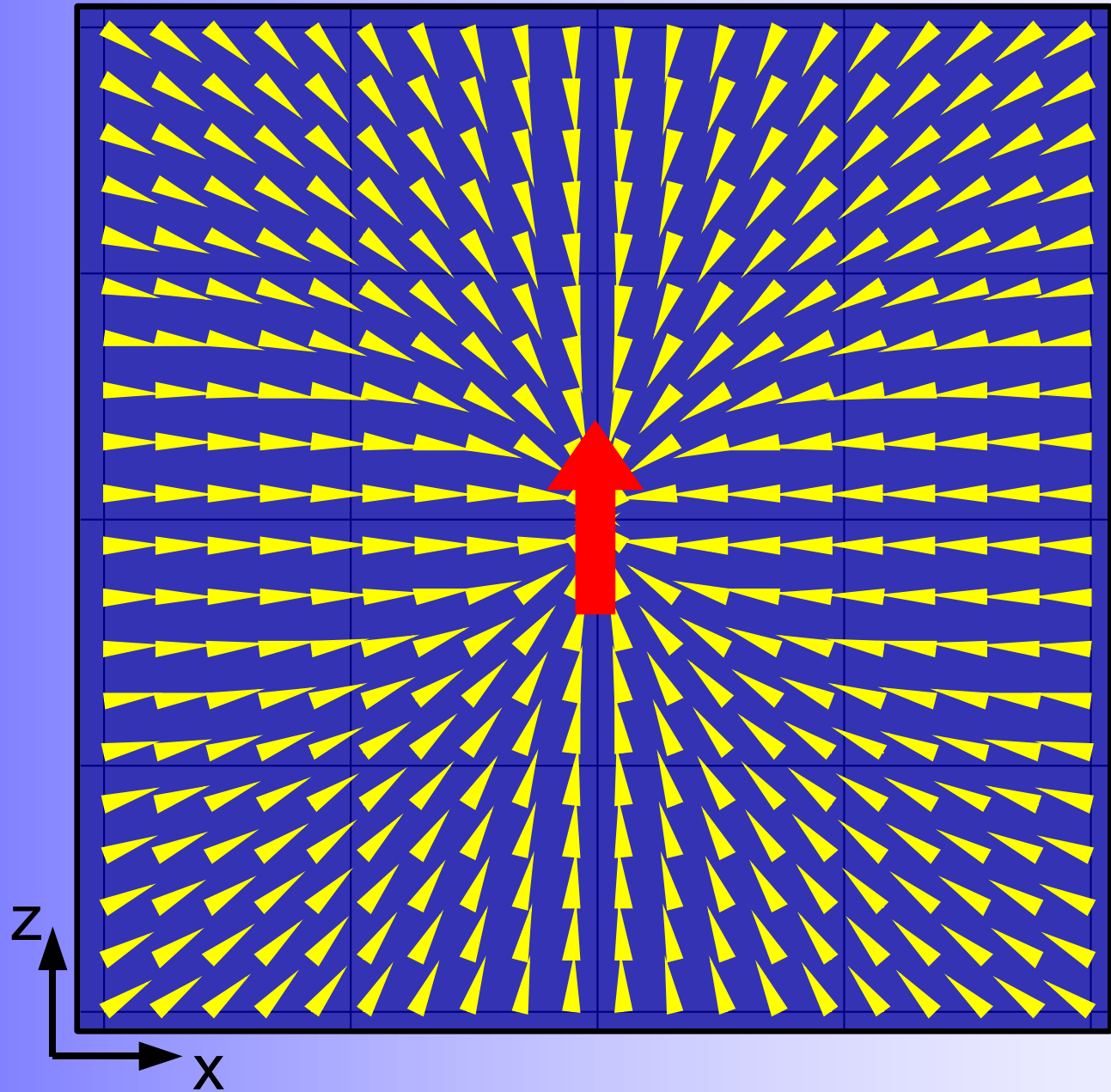
Siły działające w polu magnetycznym – kierunek pola B dipola magnetycznego



$$B_x = \frac{3m_z x z}{r^5}$$
$$B_y = \frac{3m_z y z}{r^5}$$
$$B_z = \frac{m_z (3z^2 - r^2)}{r^5}$$

$y=0$

Siły działające w polu magnetycznym – kierunek siły działającej na mały paramagnetyk

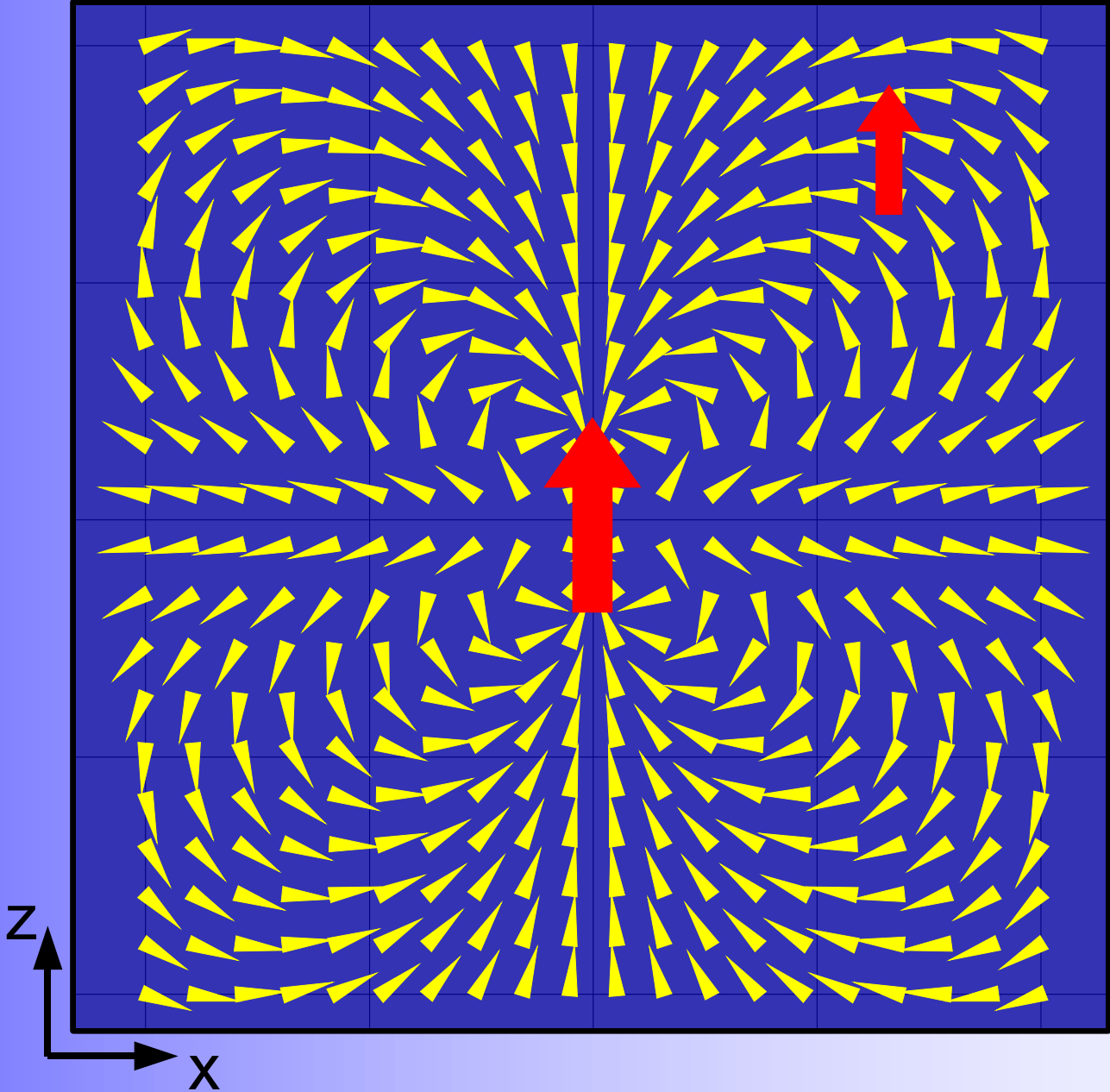


$$E = -\vec{m} \cdot \vec{B}$$

$$\vec{F} = \nabla (\vec{m} \cdot \vec{B})$$

y=0

Siły działające w polu magnetycznym – kierunek siły działającej na mały ferromagnetyk



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

$$\vec{F} = \nabla (\vec{m} \cdot \vec{B})$$

Moment ferromagnetyka skierowany w kierunku **+z**

y=0

## Szczypce magnetyczne

Pierwsze wykorzystanie pola magnetycznego do mikromanipulacji – **Heilbronn 1922** -  
F. H. C. Crick et al [1]:

These are discussed by Heilbrunn (1928, p. 62). It appears to us, if we have understood the description of the experimental technique correctly, that whatever else was being measured, it was certainly not the viscosity. To measure viscosity it is necessary to measure a *rate* of movement, whereas Heilbrunn found the field that would just move the particle. Moreover,

**Freundlich and Seifriz (1922)** – manipulacja kulkami Ni w żelach

**F. H. C. Crick et al [1] 1950:**

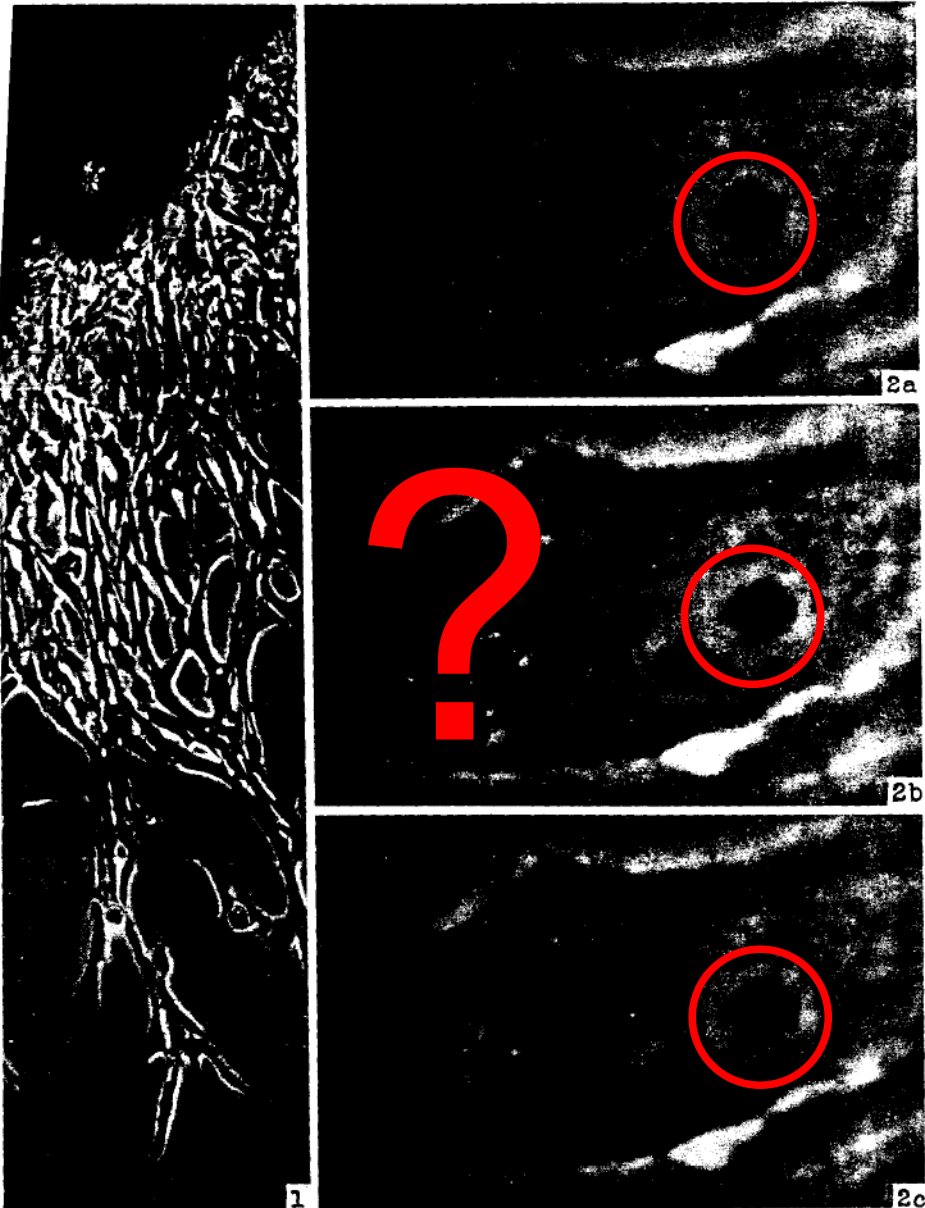
- pole magnetyczne ruchomego magnesu trwałego (U-kształtnego) (20-800 Oe) lub elektromagnesu
- komórki kości kurzych embrionów hodowane w kurzej plaźmie zawierającej magnetyczne cząsteczki ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , Ni-toksyczny dla kultur)



# Szczypce magnetyczne

The physical properties of cytoplasm

39



F. H. C. Crick et al [1] 1950:

-wyznaczanie lepkości cytoplazmy na podstawie obrotu cząsteczek magnetycznych

F. H. C. Crick and A. F. W. Hughes

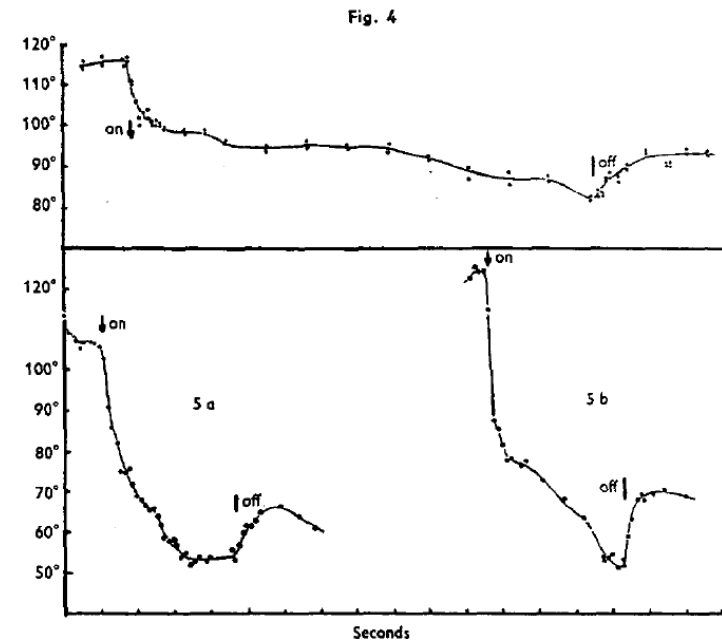


Fig. 4. Response curve of particle in cell. 37° C. 24 oersteds.

Fig. 5. Response curves of particle in cell. 37° C. (a) 8 oersteds; (b) 16 oersteds.

## PLATE I

Fig. 1. Part of a culture of embryonic chick bone containing magnetic material to show normal outgrowth. Phase contrast  $\times 200$ . The magnification refers to the *unreduced* plate.

Fig. 2. One cell in the outgrowth shown in Fig. 1 containing a magnetic particle. Phase contrast  $\times 4,900$ . (a) before actuation by magnet; (b) after magnet was moved across culture; (c) magnet again moved but in reverse direction. In this cell, the particle is unusually close to the nucleus). The magnifications refers to the *unreduced* plate.

## Szczypce magnetyczne



Wyznaczenie siły działającej na cząsteczki magnetyczne na podstawie geometrii układu magnesów trwałych jest obarczone, dla małych rozmiarów obszarów roboczych, dużym błędem [min. właściwości cząstek magnetycznych (**magnetic beads**)]

W praktyce kalibruje się siły działające na cząstki magnetyczne na podstawie mikroskopowej obserwacji prędkości cząstek w płynie o znanej lepkości oraz prawa Stokes'a.

$$F_{na\ kulę} = 6\pi\eta r v_0$$

- dla przepływu laminarnego;  $v_0$  - free-stream speed

## Szczypce magnetyczne

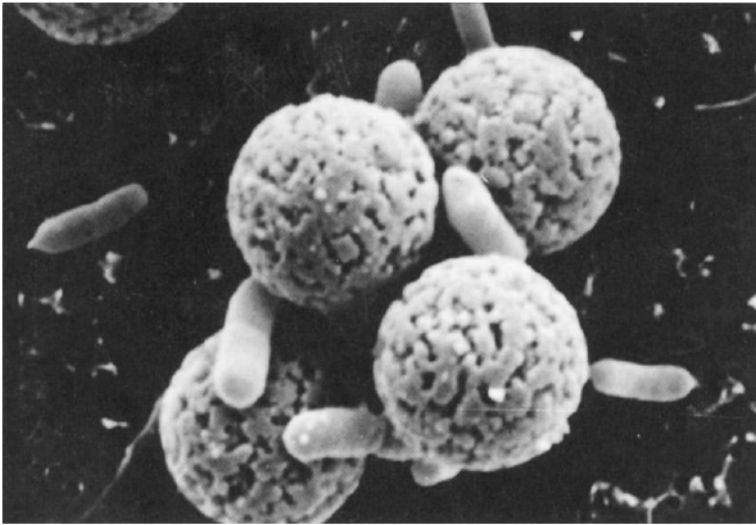


Fig. 2. An electron micrograph showing *E. coli* O157 bound to Dynabeads. Reproduced, with permission, from materials provided by Dynal, Oslo, Norway.

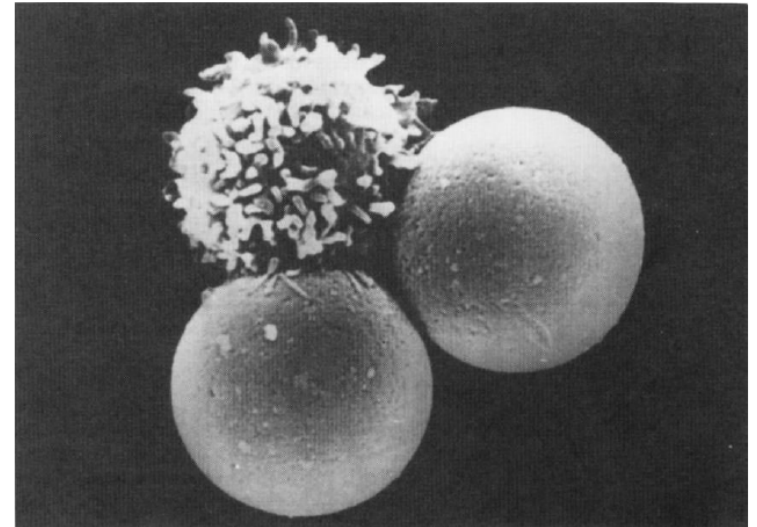


Fig. 3. An electron micrograph showing a T-lymphocyte bound to two Dynabeads M-450. Reproduced, with permission, from Ref. [8].

Magnetyczne szczypce używane są zwykle razem z magnetycznymi cząsteczkami [**magnetic beads (polystyrenowe jądro)**], które wiążą się z określonymi poprzez właściwości ich powierzchni cząsteczkami roztworu [komórki, kwasy nukleinowe (RNA, DNA)].

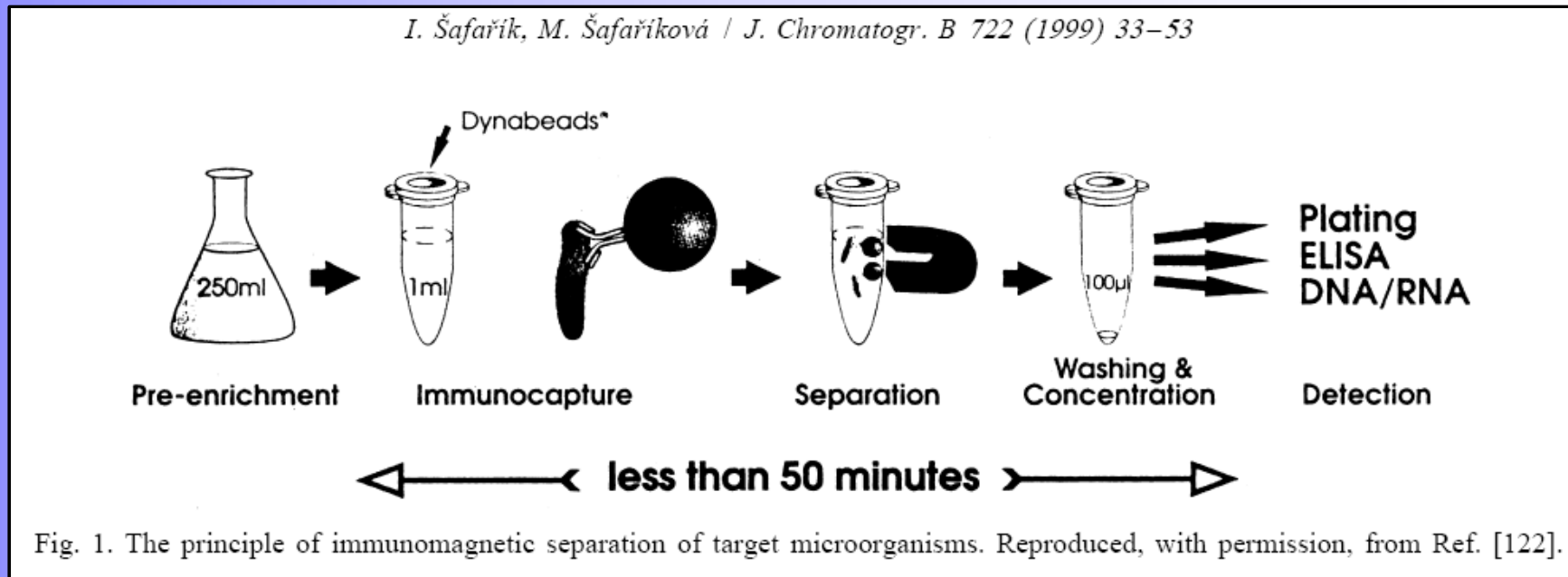
Zastosowania:

-biologia (siły w tkankach, manipulacja DNA etc.)

-transport ferrofluidów

Dynabeads®

## Szczypce magnetyczne

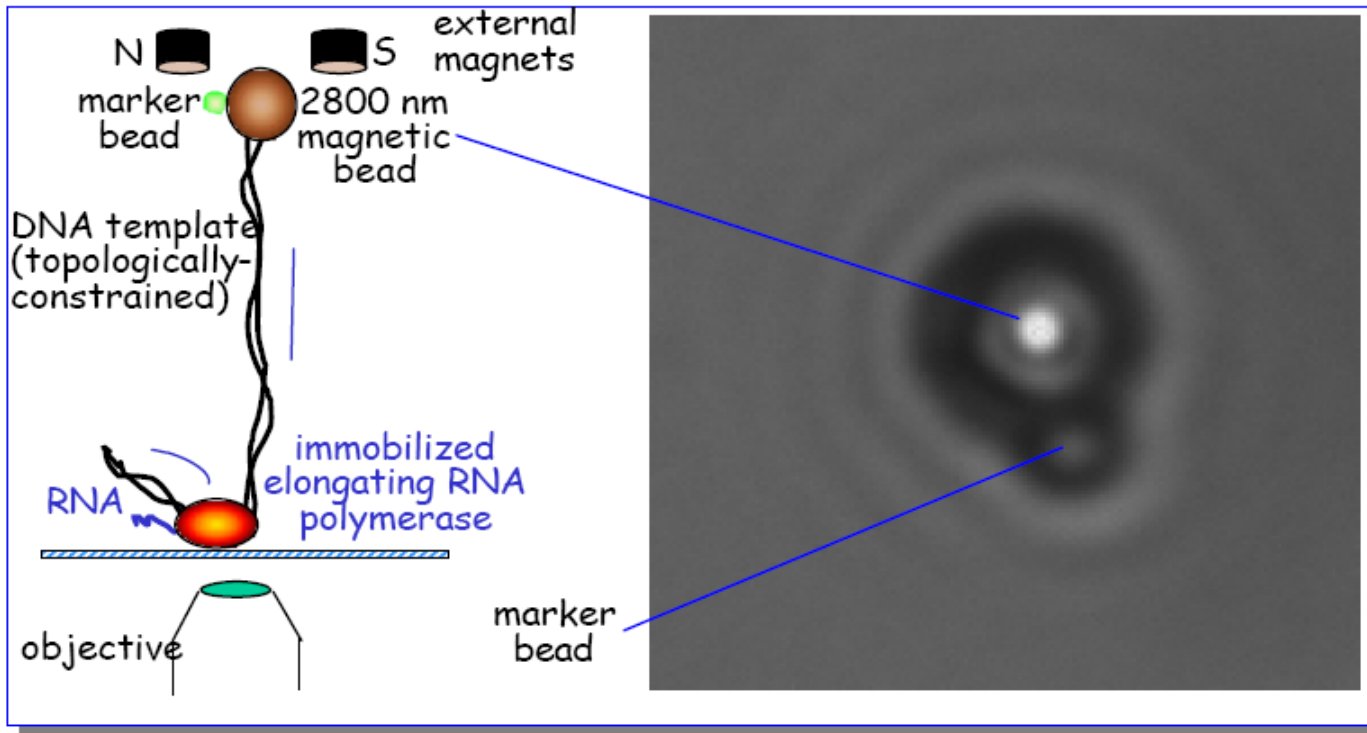


Magnetyczne szczypce używane są zwykle razem z magnetycznymi cząsteczkami [**magnetic beads (polystyrenowe jądro)**], które wiążą się z określonymi poprzez właściwości ich powierzchni cząsteczkami roztworu [komórki, kwasy nukleinowe (RNA, DNA)].

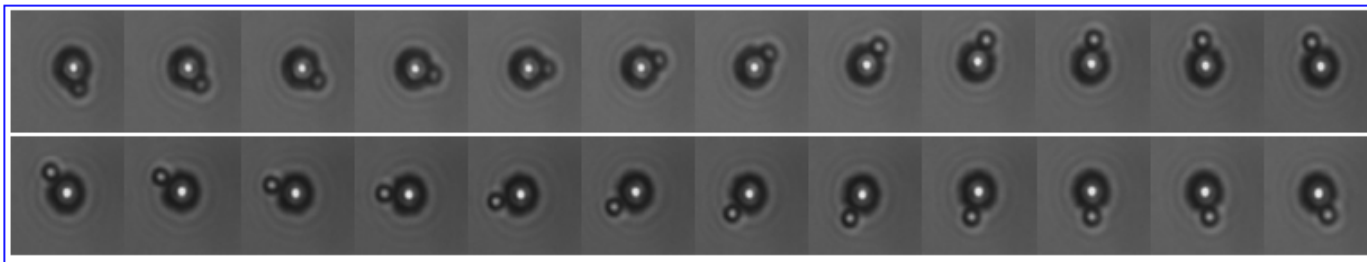


# Szczypce magnetyczne- obserwacja transkrypcji RNA z DNA

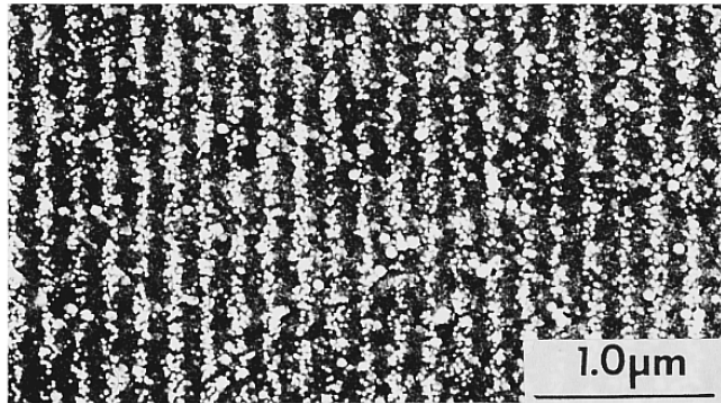
## Single-molecule transcription viewed by magnetic tweezers: experiment



One full rotation of the bead as the RNA polymerase transcribes one helical turn of the DNA

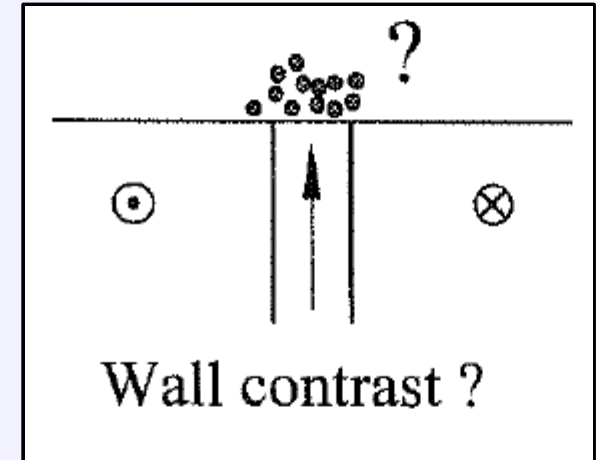


## Wykorzystanie struktury domenowej – metoda Bittera (1932)



[7]

FIG. 5. HRBS pattern of an obliquely evaporated Co-O thin-film tape. Recording density is 300 kFCI (bit length  $\sim 80$  nm).



Magnetyczne koloidy wykorzystywane do obrazowania pól magnetycznych na powierzchniach próbek:

- rozdzielczość rzędu kilkudziesięciu nm [7]
- kontrast magnetyczny
- koloidy stabilizowane surfaktantami (aglomeracja może zwiększyć czułość)
- obrazowanie stosunkowo szybkich ruchów ścian domenowych [6,8] (rzędu 40m/s):

**Metoda Bittera – manipulacja cząsteczkami koloidu z wykorzystaniem struktury domenowej**

## Wykorzystanie struktury domenowej

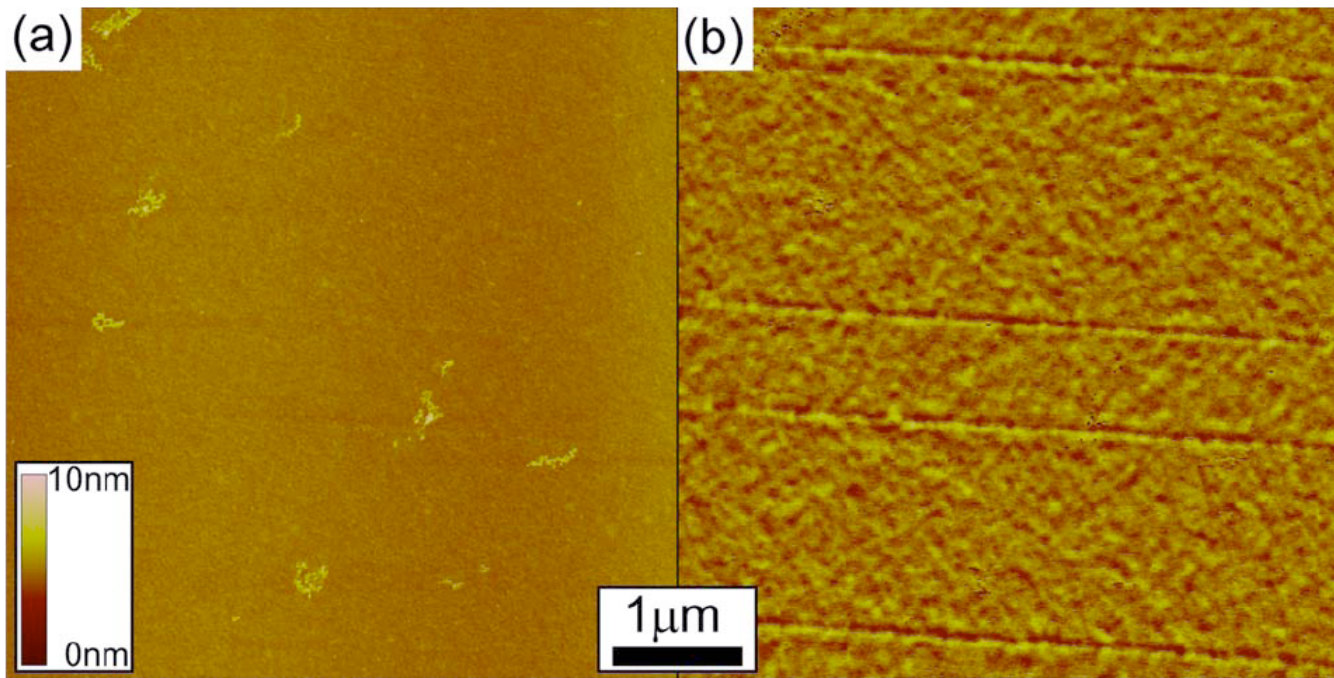


FIG. 1. (Color online) (a) AFM measurement on partly bombarded area with bombarded lines running from the left to the right side and (b) corresponding MFM measurement.

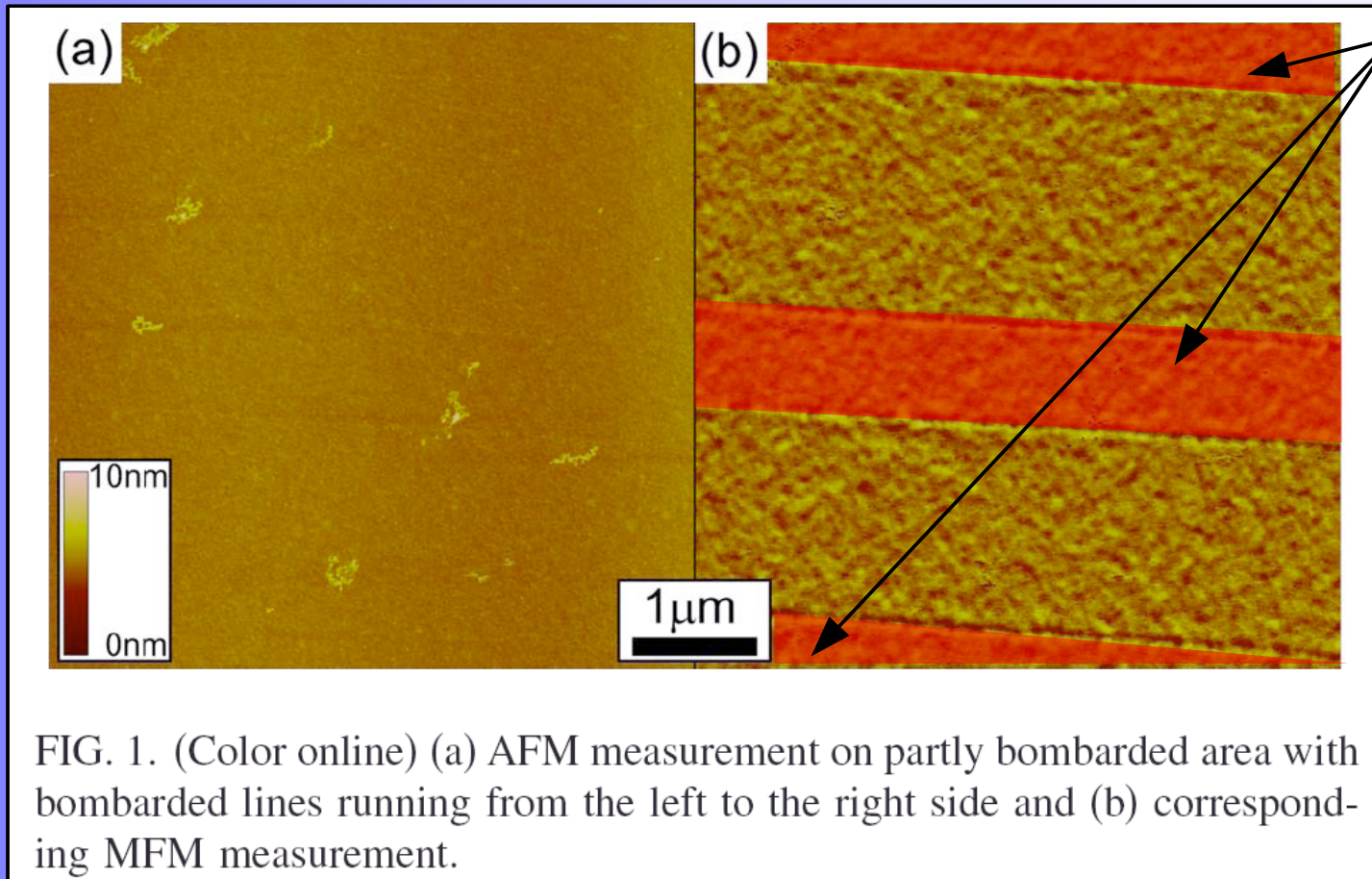
• Rozpylanie katodowe (DC i RF):

Si(+0<sub>2</sub>)/Cu(30nm)/Mn<sub>83</sub>Ir<sub>17</sub>(15nm)/Co<sub>70</sub>Fe<sub>30</sub>(15nm)/Al(1.4nm)+100s utleniania plazmowego

• Anizotropia wymiany (chłodzenie w 1000 Oe)



## Wykorzystanie struktury domenowej



Obszary bombardowane jonami He (10 keV) w polu  $H_{IB}$  (80 kA/m):

**Zmiana kierunku anizotropii wymiany o około 180°**

FIG. 1. (Color online) (a) AFM measurement on partly bombarded area with bombarded lines running from the left to the right side and (b) corresponding MFM measurement.

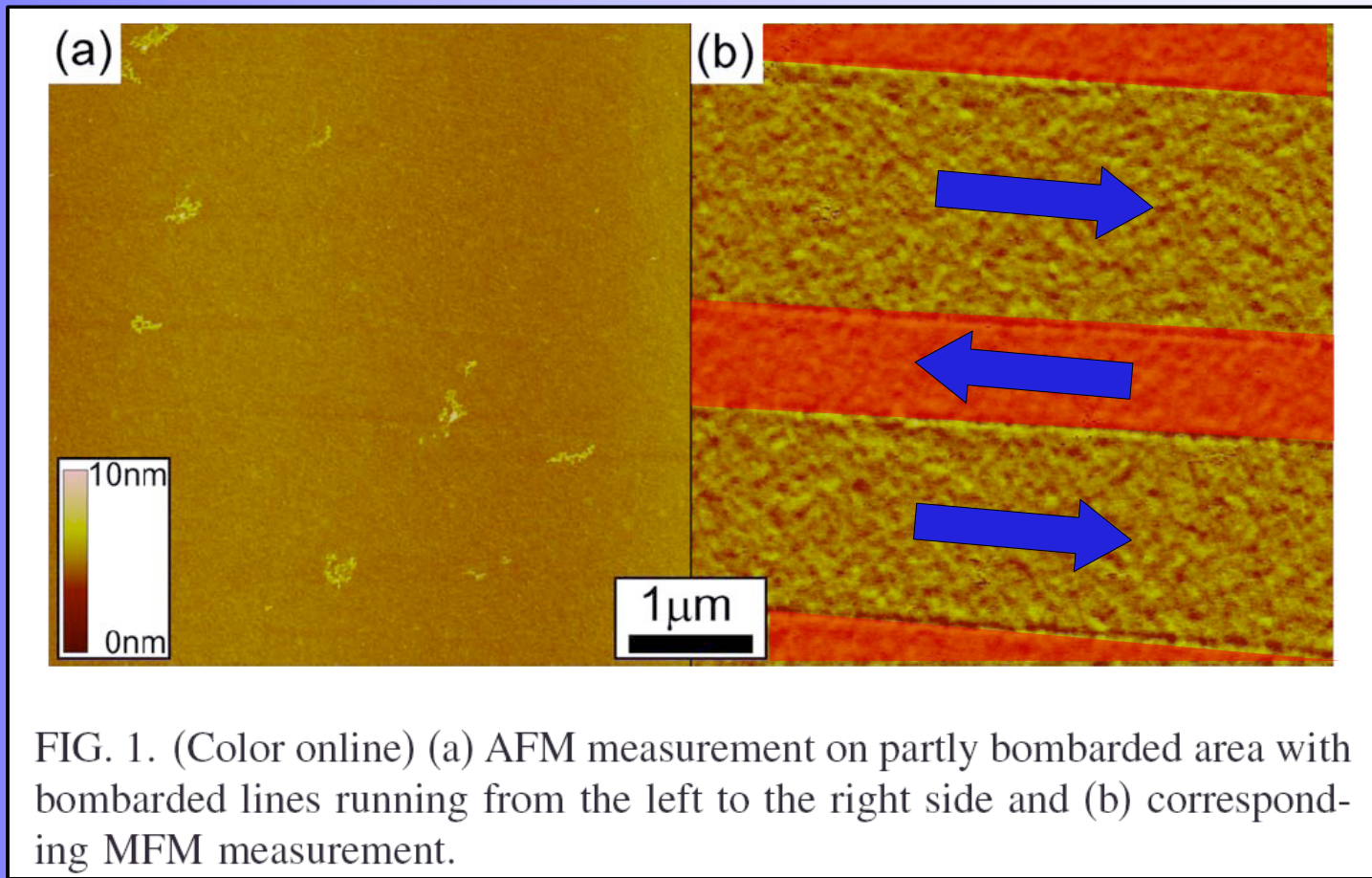
• Rozpylenie katodowe (DC i RF):

Si(+0<sub>2</sub>)/Cu(30nm)/**Mn<sub>83</sub>Ir<sub>17</sub>(15nm)/Co<sub>70</sub>Fe<sub>30</sub>(15nm)**/Al(1.4nm)+100s utleniania plazmowego

• Anizotropia wymiany (chłodzenie w 80 kA/m)



# Wykorzystanie struktury domenowej



Obszary bombardowane jonami He (10 keV) w polu  $H_{IB}$  (80 kA/m):  
**Zmiana kierunku anizotropii wymiany o około 180°**

Naprzemianległe obszary o wzajemnie antyrównoległym namagnesowaniu subwarstw  $Co_{70}Fe_{30}$

[10] I. Ennen et al., J. Appl. Phys. **102**, 013910 (2007)

## Wykorzystanie struktury domenowej

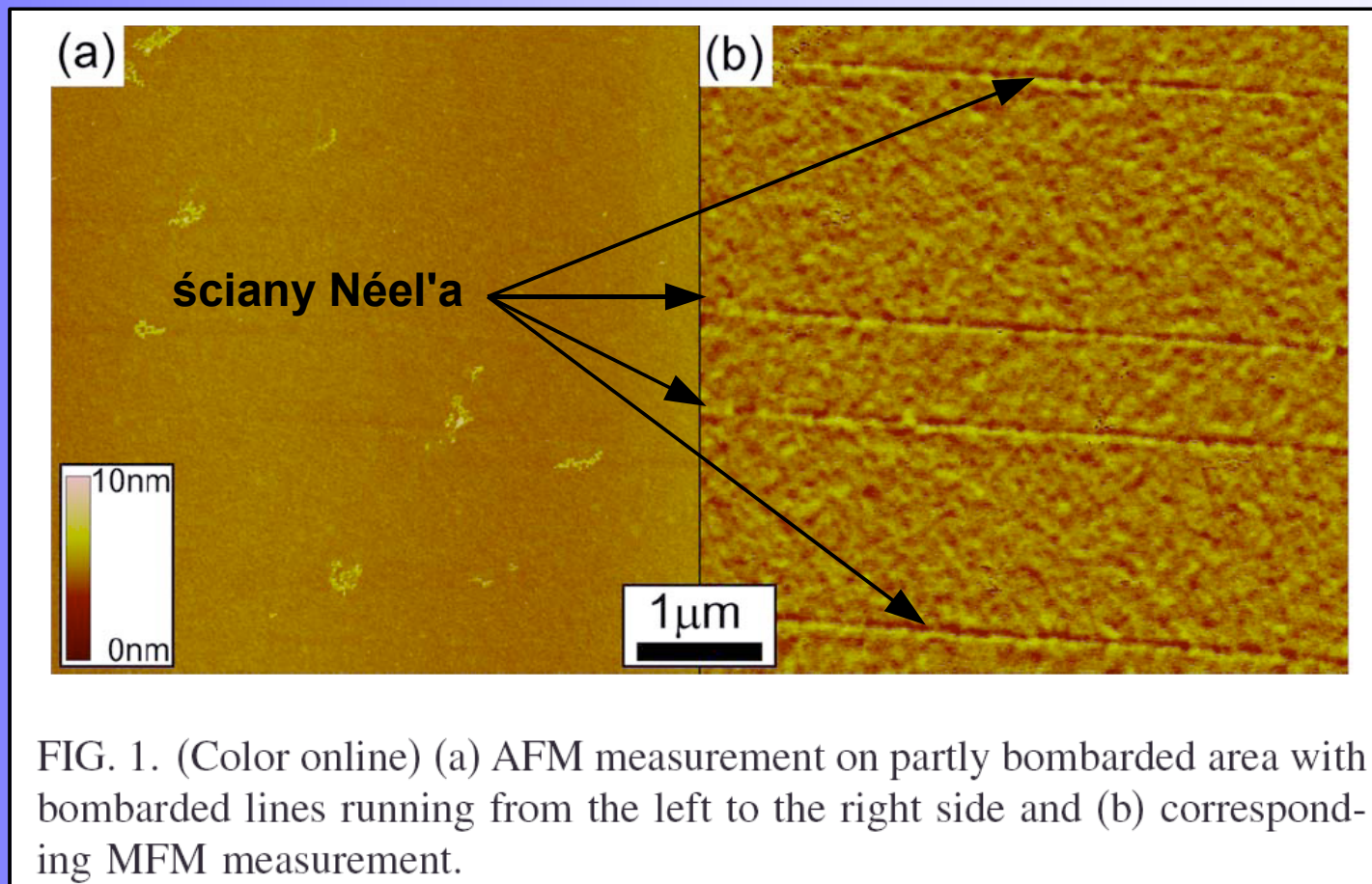


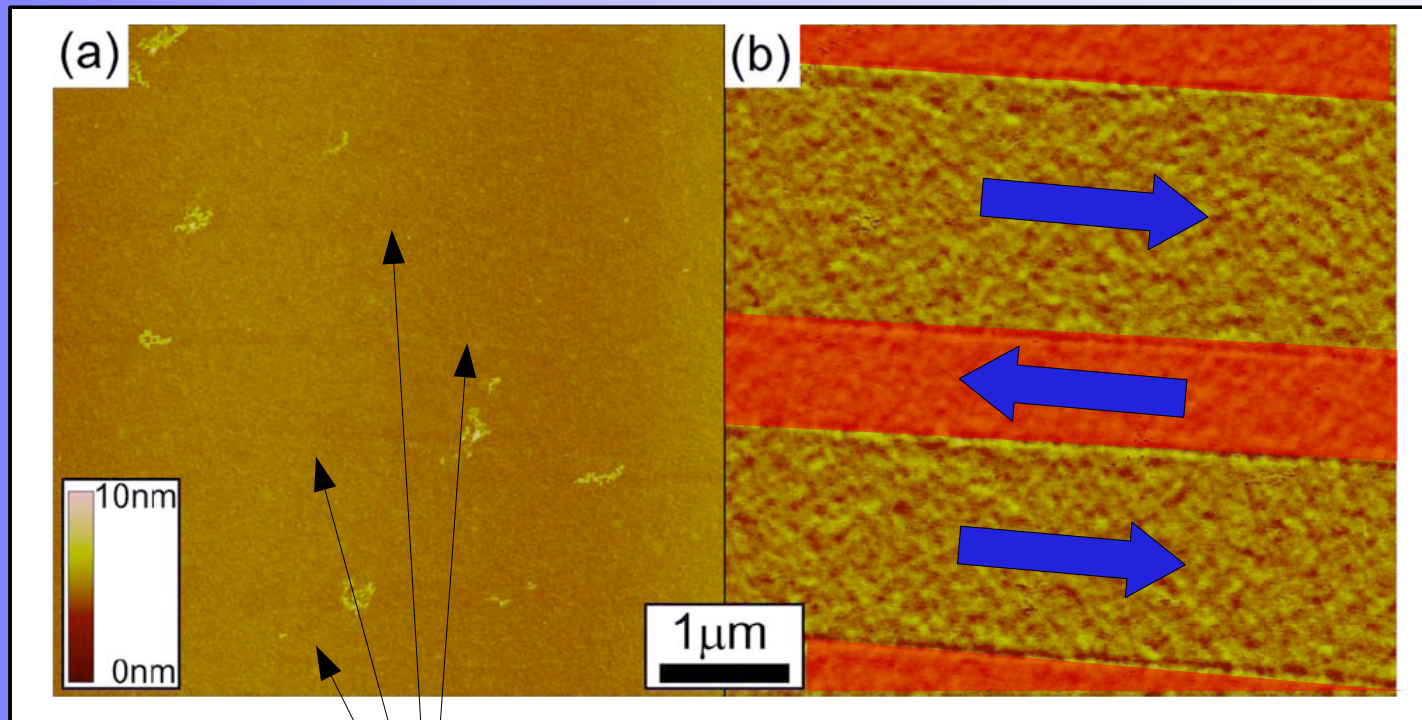
FIG. 1. (Color online) (a) AFM measurement on partly bombarded area with bombarded lines running from the left to the right side and (b) corresponding MFM measurement.

Obszary bombardowane jonami He (10 keV) w polu  $H_{IB}$  (80 kA/m):

**Zmiana kierunku anizotropii wymiany o około 180°**

- Naprzemianległe obszary o wzajemnie antyrównoległym namagnesowaniu subwarstw  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$
- Na granicy między obszarami występują ściany Néel'a

## Wykorzystanie struktury domenowej



Obszary bombardowane jonami He (10 keV) w polu  $H_{IB}$  (80 kA/m):

**Zmiana kierunku anizotropii wymiany o około 180°**

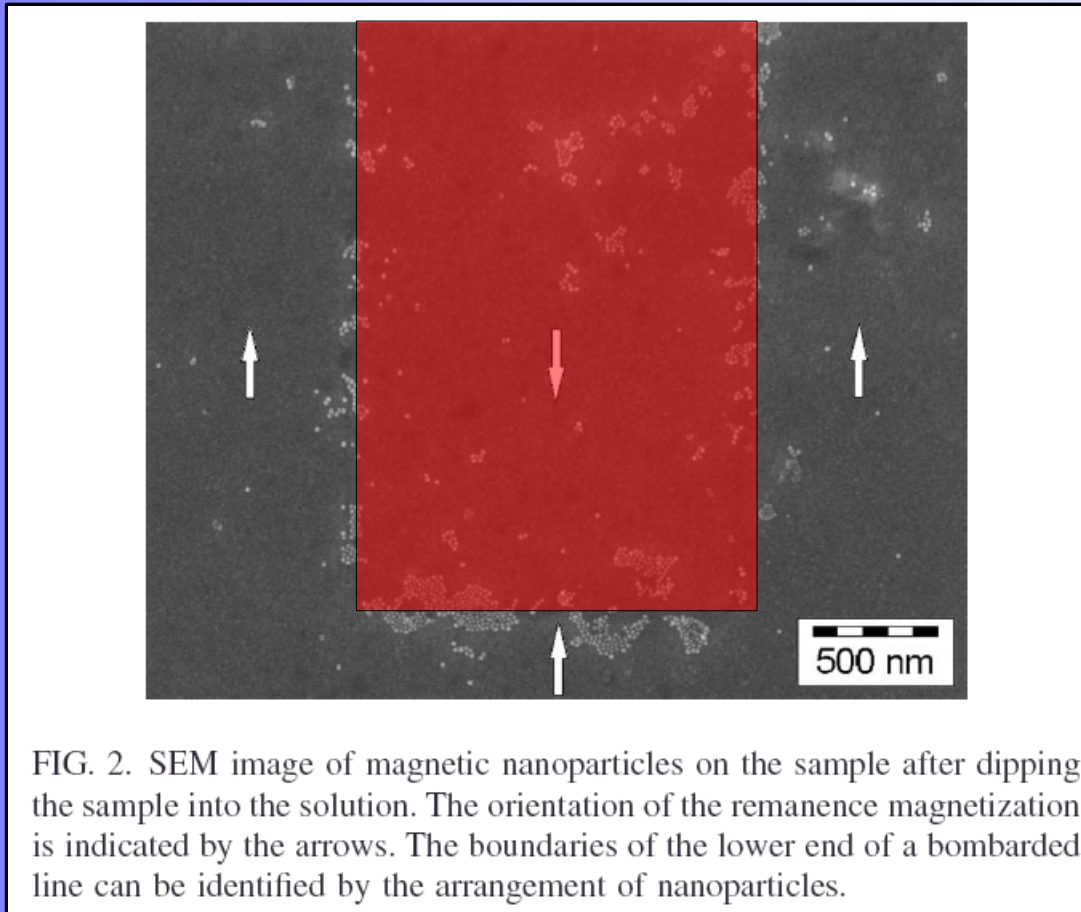
**Niewidoczne ślady zmian topografii?**

Obraz MFM **nie wykazuje śladów zmian topografii** próbki w wyniku bombardowania.

Magnetyczna strukturyzacja (zmiana kierunku anizotropii wymiany) potwierdzona za pomocą SXRMS (rezonansowe rozpraszanie promieni X) - BESSY.



## Wykorzystanie struktury domenowej



- Czasteczki magnetyczne: superparamagnetyczne kryształy **Co (średnica 3÷15 nm)** rozproszone w heptanie
- Osadzanie cząsteczek: zanurzenie próbki w mieszaninie i powolne jej wyciąganie lub odparowanie rozpuszczalnika

**Centralny fragment** – odwrócony kierunek sprzężenia wymiennego

Obraz SEM po wyciągnięciu próbki z mieszaniny

## Wykorzystanie struktury domenowej

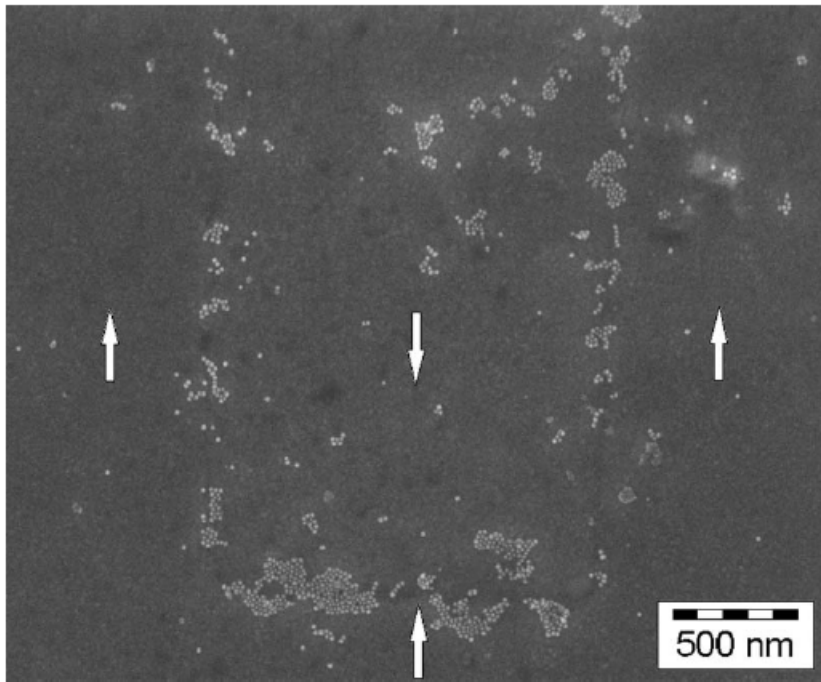
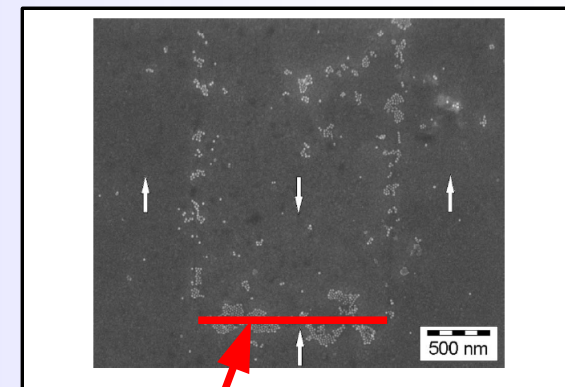


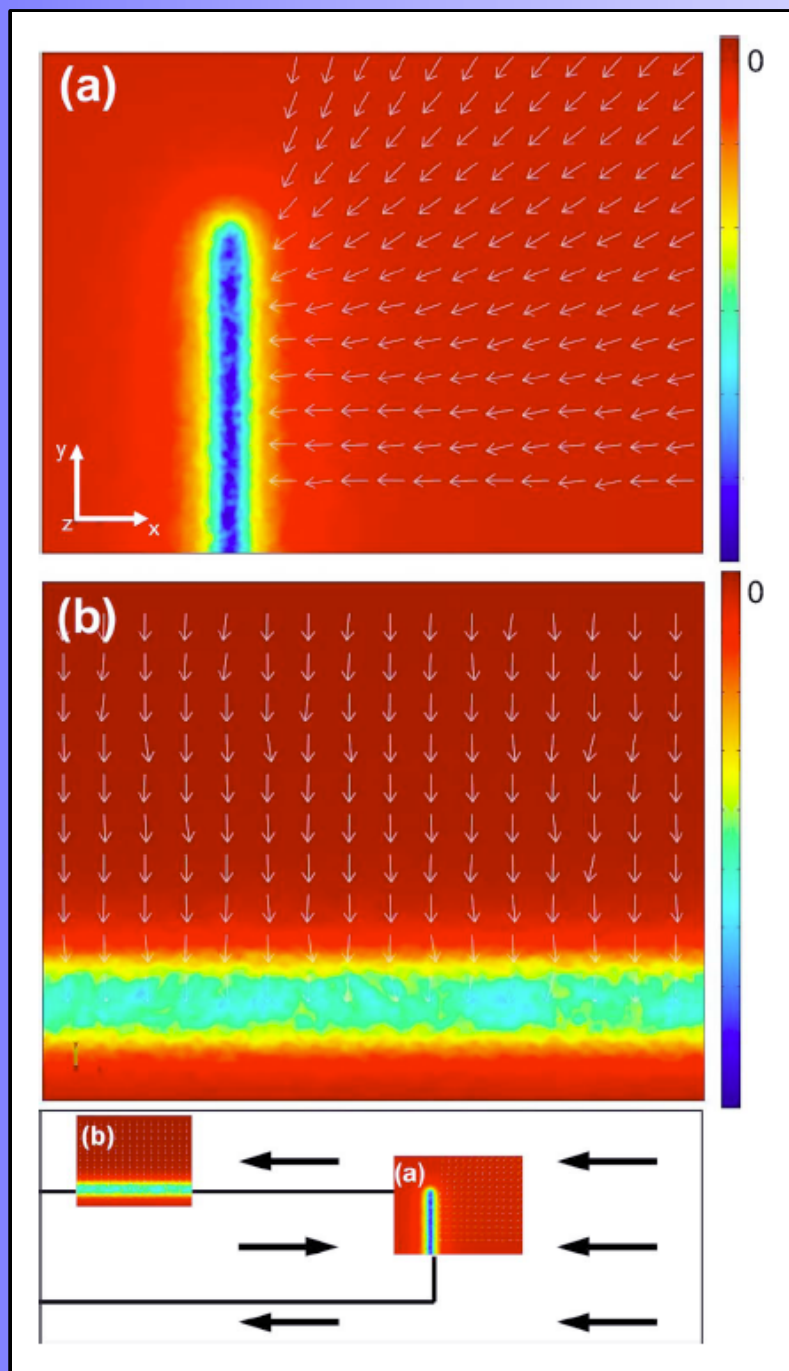
FIG. 2. SEM image of magnetic nanoparticles on the sample after dipping the sample into the solution. The orientation of the remanence magnetization is indicated by the arrows. The boundaries of the lower end of a bombarded line can be identified by the arrangement of nanoparticles.

- Czasteczki magnetyczne: superparamagnetyczne kryształy **Co** (średnica 3÷15 nm) rozproszone w heptanie
- Osadzanie cząsteczek: zanurzenie próbki w mieszaninie i powolne jej wyciąganie lub odparowanie rozpuszczalnika



- łańcuchy klasterów Co gromadzą się na granicach obszaru z odwróconym kierunkiem anizotropii wymiany
- więcej cząstek magnetycznych gromadzi się na ścianie **head-to-head**

## Wykorzystanie struktury domenowej

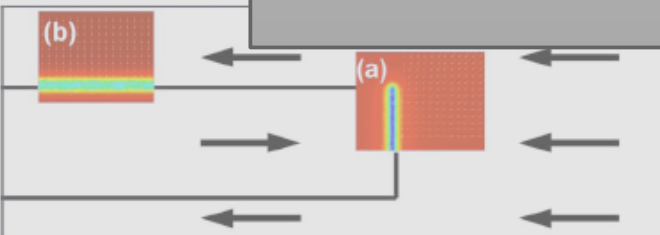
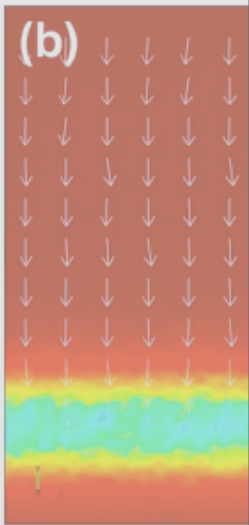
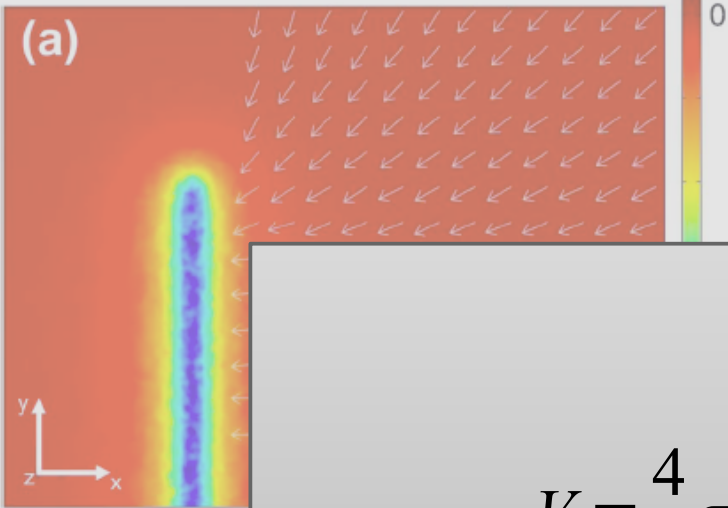


Symulacje (nie mikromagnetyczne?, finite element) wskazują, że siły działająca na cząsteczkę (scałkowana po objętości) są rzędu  $10^{-11}$  N w pobliżu ściany head-to-head i około  $10^{-12}$  N w pobliżu ściany Néel'a

FIG. 3. (Color online) Simulation of the force acting on a point-like magnetic nanoparticle in the strayfield of (a) the head to head magnetization configuration at the end of a bombarded line and (b) the Néel walls at the sides of the bombarded lines. The arrows in subfigures (a) and (b) indicate the direction of the force parallel to the surface and the strength of the force in the  $z$  direction perpendicular to the surface is illustrated by the color gradient. The scale is given in arbitrary units and is not comparable for both cases. Slight fluctuations can be attributed to numerical artifacts. The location of the simulated areas on the sample is shown in the sketch at the bottom. The black arrows in the sketch indicate the direction of the local remanence magnetization.



## Wykorzystanie struktury domenowej



Symulacje (nie mikromagnetyczne?, finite element) wskazują, że siły działająca na cząsteczkę (scałkowana po objętości) są rzędu  $10^{-11}$  N w około  $10^{-12}$  N w

$$r = 6 \text{ nm}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \approx 9 \times 10^{-25} \text{ m}^3$$

$$\rho_{Co} \approx 9000 \text{ kgm}^{-3}$$

$$m = V \rho \approx 8 \times 10^{-21} \text{ kg}$$

$$a = \frac{F}{m} \approx \frac{10^{-11} \text{ N}}{8 \times 10^{-21} \text{ kg}} \approx 10^9 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 10^8 \text{ g}$$

force acting on a point-like mag-  
the head to head magnetization  
line and (b) the Néel walls at the  
in subfigures (a) and (b) indicate  
surface and the strength of the force  
surface is illustrated by the color  
bits and is not comparable for both  
cases. Slight fluctuations can be attributed to numerical artifacts. The location of the simulated areas on the sample is shown in the sketch at the bottom. The black arrows in the sketch indicate the direction of the local remanence magnetization.

## Wykorzystanie struktury domenowej

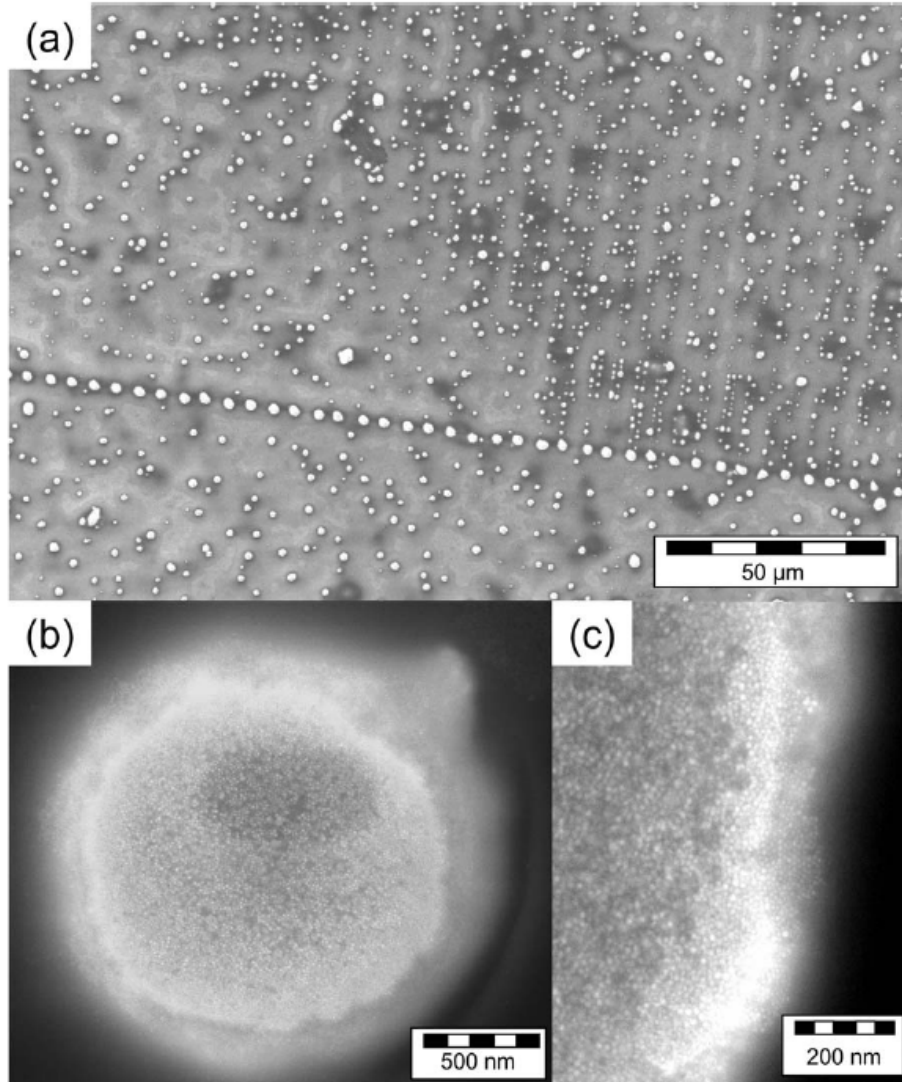


FIG. 4. SEM images of Co nanocrystals after the slow evaporation of the solvent: (a) overview over a part of the sample. The lower left part of the magnetic grating shown here is covered with a carbon layer while the upper right part has no such capping; (b) particle cluster build on the end of a bombarded line; and (c) magnification of a particle cluster.

- **Po odparowaniu rozpuszczalnika** cząsteczki Co osadzają się w pobliżu ścian domenowych
- Odparowanie prowadzi do akumulacji większej liczby cząstek niż zanurzenie - dłuższy czas akumulacji
- Preferencyjna akumulacja cząsteczek magnetycznych na ścianach head-to-head

## Wykorzystanie struktury domenowej

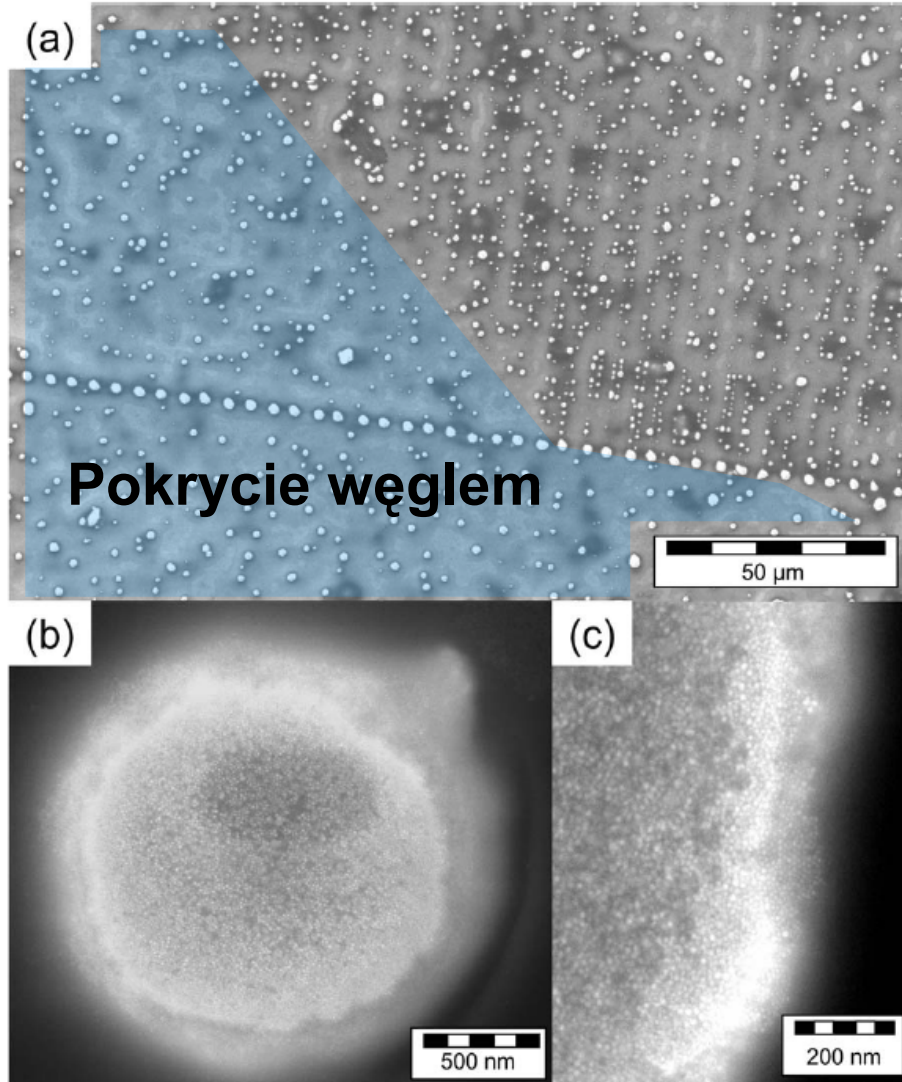
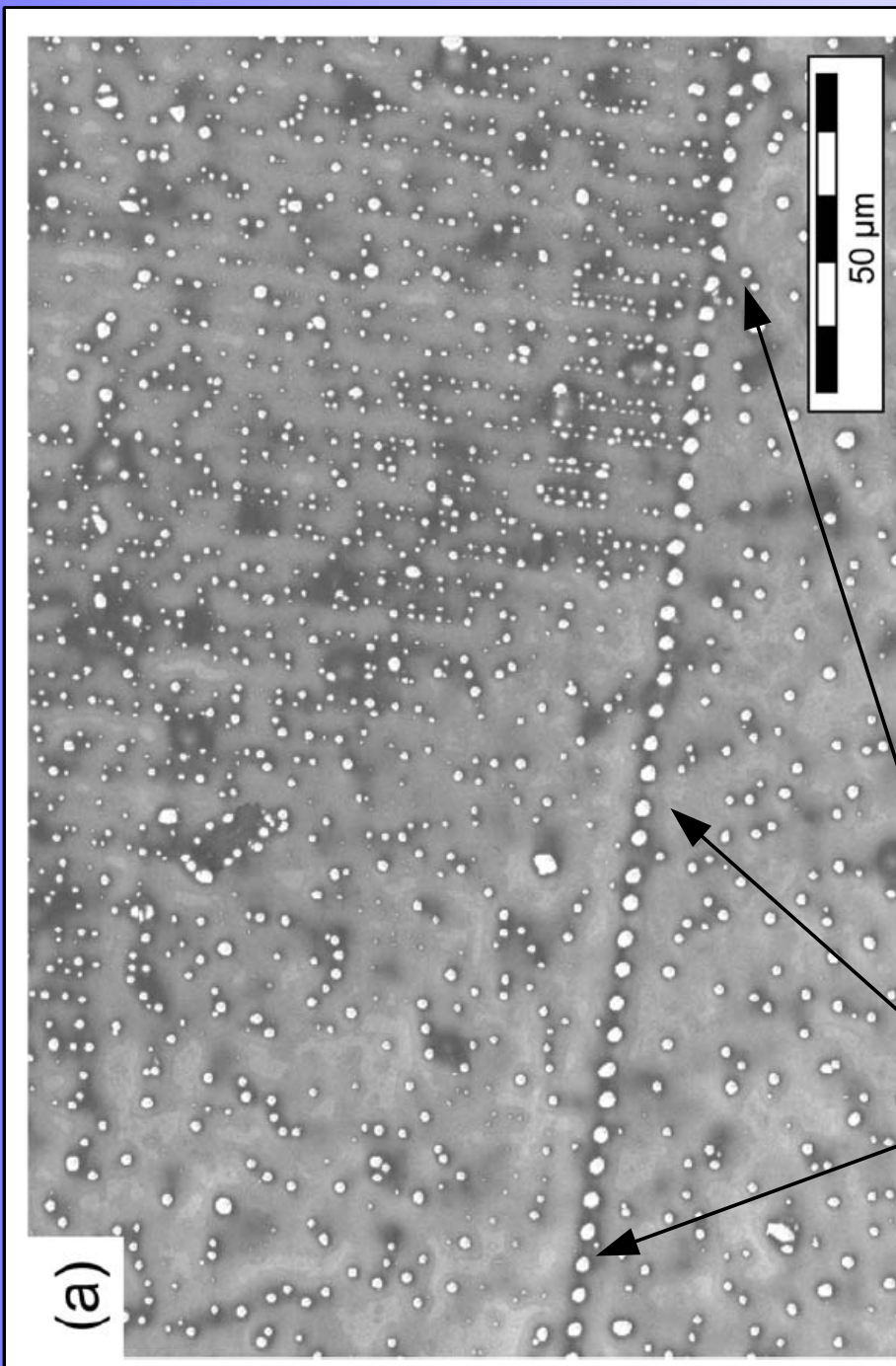


FIG. 4. SEM images of Co nanocrystals after the slow evaporation of the solvent: (a) overview over a part of the sample. The lower left part of the magnetic grating shown here is covered with a carbon layer while the upper right part has no such capping; (b) particle cluster build on the end of a bombarded line; and (c) magnification of a particle cluster.

- w obszarze pokrytym węglem (pomiarzy z użyciem promieni X) zwiększona jest odległość cząstek Co od warstwy  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$  - zmniejszone wartości sił magnetycznych działających na Co
- w obszarze tym pola magnetyczne pochodzące od ścian Néel'a są zbyt słabe by prowadzić do akumulacji



## Wykorzystanie struktury domenowej



- Preferencyjna akumulacja cząsteczek magnetycznych na ścianach head-to-head w obu obszarach warstwy
- Biochip: w obszarze akumulacji możliwe jest umieszczenie chemicznych **sensorów pozwalających na identyfikację biomolekuł** związanych z cząsteczkami magnetycznymi (selektywne wiązanie biomolekuł przez magnetic beads)
- Przyspieszony transport skraca czas analizy chemicznej

Na linii ścian head-to-head gromadzi się duża liczba cząstek Co

## Wykorzystanie struktury domenowej

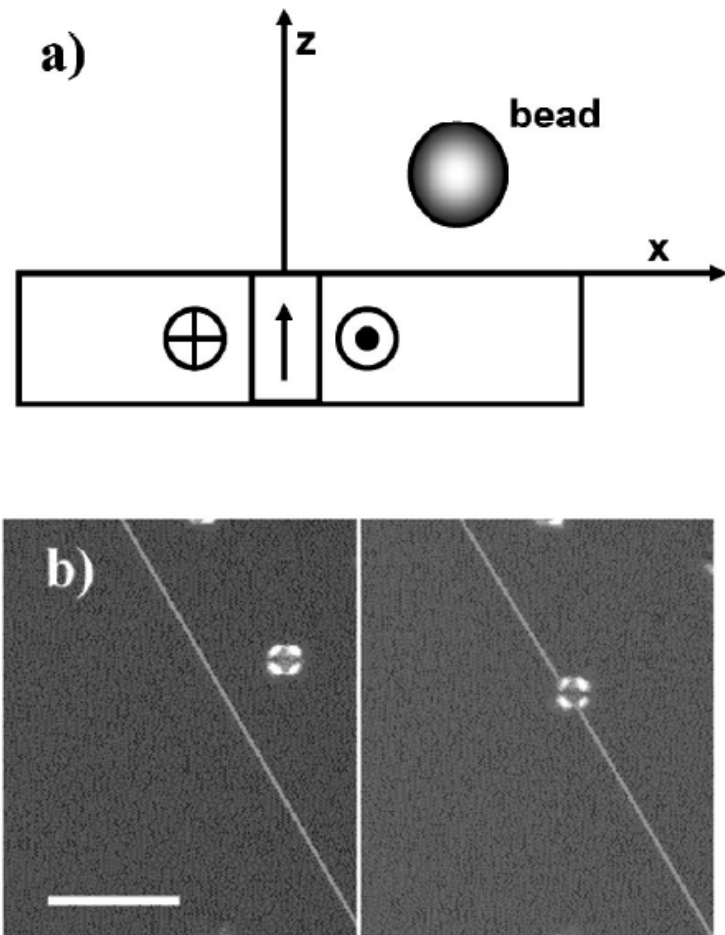


FIG. 1. (a) The basic geometry for a Bloch wall on which a paramagnetic bead can be trapped or surf. The bead is immersed in water, and its center is located at the coordinate  $(x,z)$ . (b) Two images showing the capture process. The brightness of the DW has been enhanced for clarity. The white bar is  $20 \mu\text{m}$ .

- granat ferrytowy z podstawieniem Bi
- grubość  $4 \mu\text{m}$
- rozmiar domen  $0.1-10 \text{ mm}$
- ściany tworzone poprzez zadrapania lub wtrącenia
- typowa koercja ścian-  $100 \text{ A/m}$
- ruch ścian  $0.1-1 \mu\text{m}/(\text{A/m})$ ; liniowy dla  $H < 500 \text{ A/m}$
- **anizotropia w płaszczyźnie**

## Wykorzystanie struktury domenowej

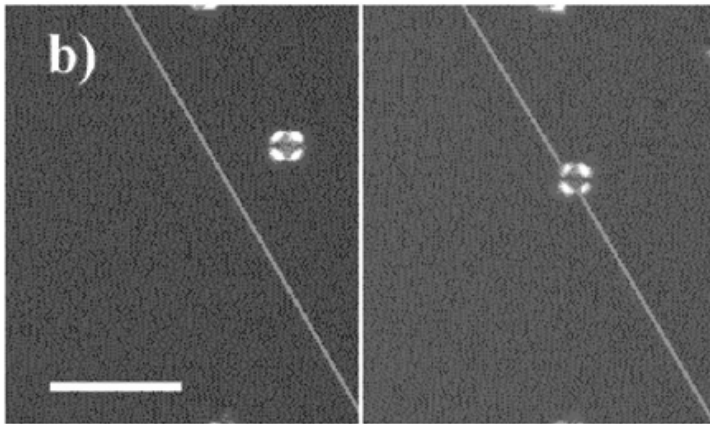
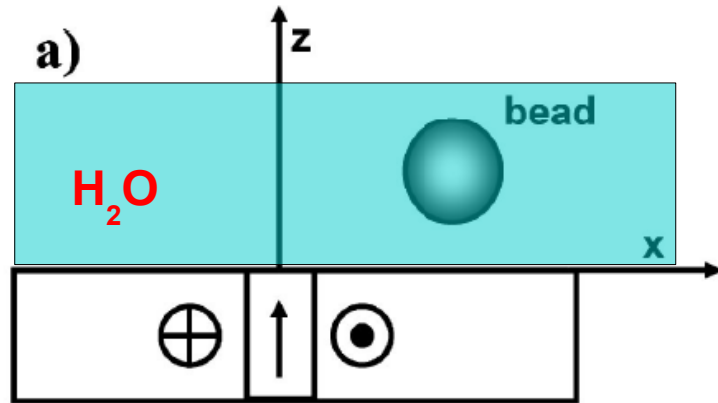
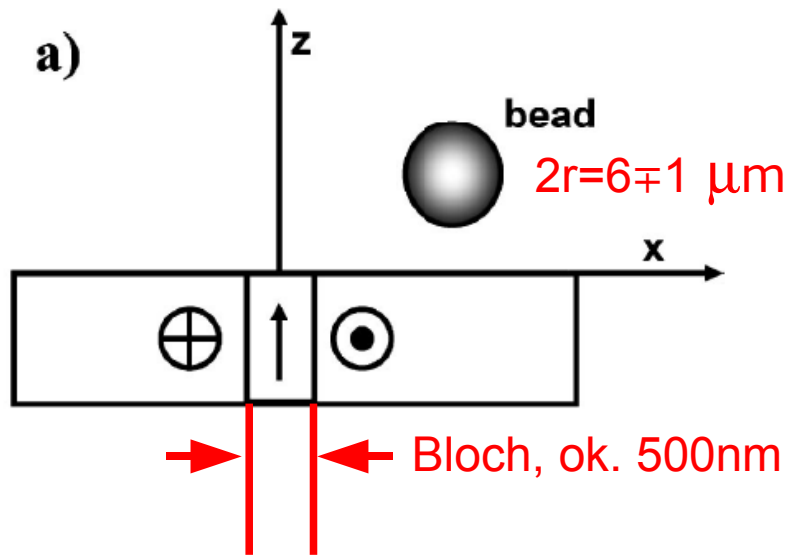


FIG. 1. (a) The basic geometry for a Bloch wall on which a paramagnetic bead can be trapped or surf. The bead is immersed in water, and its center is located at the coordinate  $(x,z)$ . (b) Two images showing the capture process. The brightness of the DW has been enhanced for clarity. The white bar is  $20 \mu\text{m}$ .

- granat ferrytowy z podstawieniem Bi
- grubość  $4 \mu\text{m}$
- rozmiar domen  $0.1-10 \text{ mm}$
- ściany tworzone poprzez zadrapania lub wtrącenia
- typowa koercja ścian-  $100 \text{ A/m}$
- ruch ścian  $0.1-1 \mu\text{m}/(\text{A/m})$ ; liniowy dla  $H < 500 \text{ A/m}$
- **środownisko wodne**



## Wykorzystanie struktury domenowej

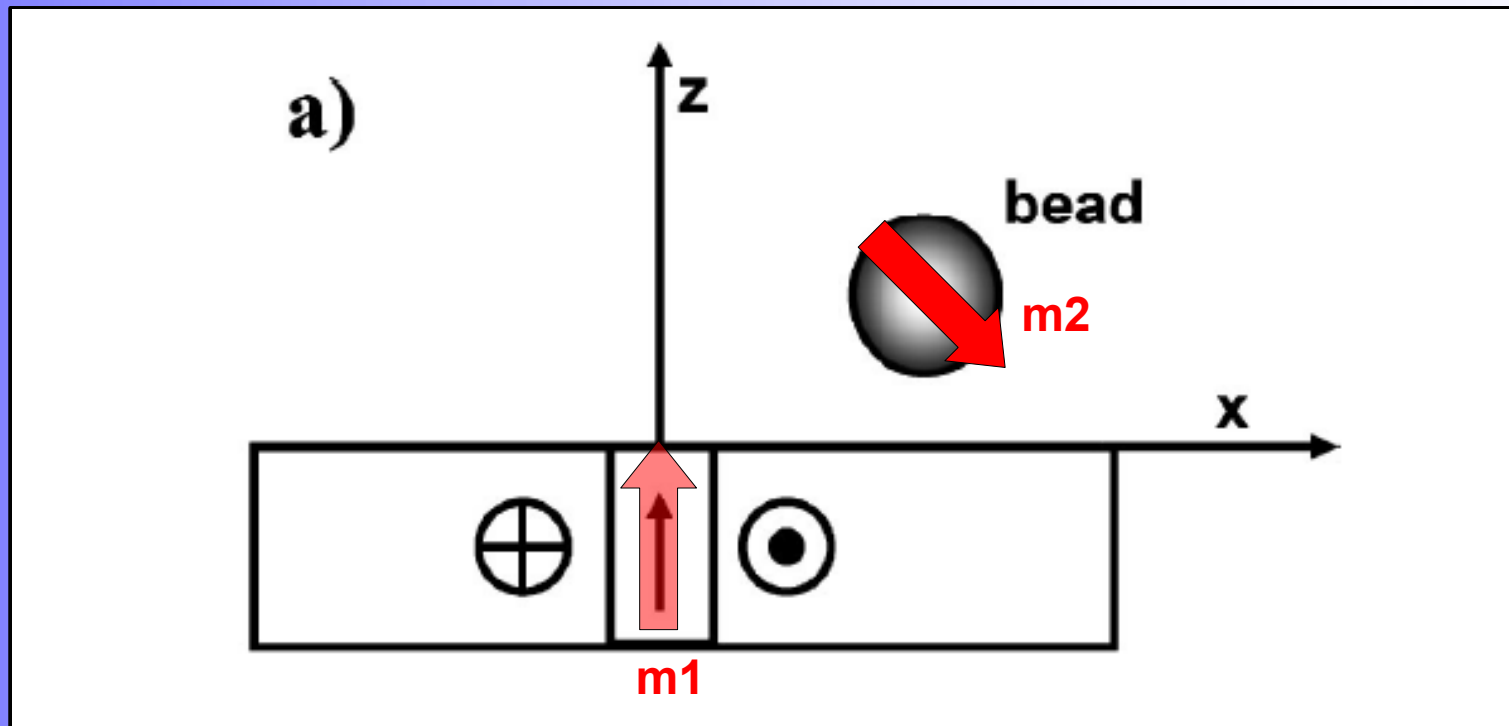


ponad 90% beads jest mobilna  
(odpowiednie pokrycie podłoża i beads)

FIG. 1. (a) The basic geometry for a Bloch wall on which a paramagnetic bead can be trapped or surf. The bead is immersed in water, and its center is located at the coordinate  $(x,z)$ . (b) Two images showing the capture process. The brightness of the DW has been enhanced for clarity. The white bar is  $20 \mu\text{m}$ .

- granat ferrytowy z podstawieniem Bi
- grubość  $4 \mu\text{m}$
- rozmiar domen  $0.1-10 \text{ mm}$
- ściany tworzone poprzez zadrapania lub wtrącenia
- typowa koercja ścian-  $100 \text{ A/m}$
- ruch ścian  $0.1-1 \mu\text{m}/(\text{A/m})$ ; liniowy dla  $H < 500 \text{ A/m}$
- środowisko wodne

## Wykorzystanie struktury domenowej

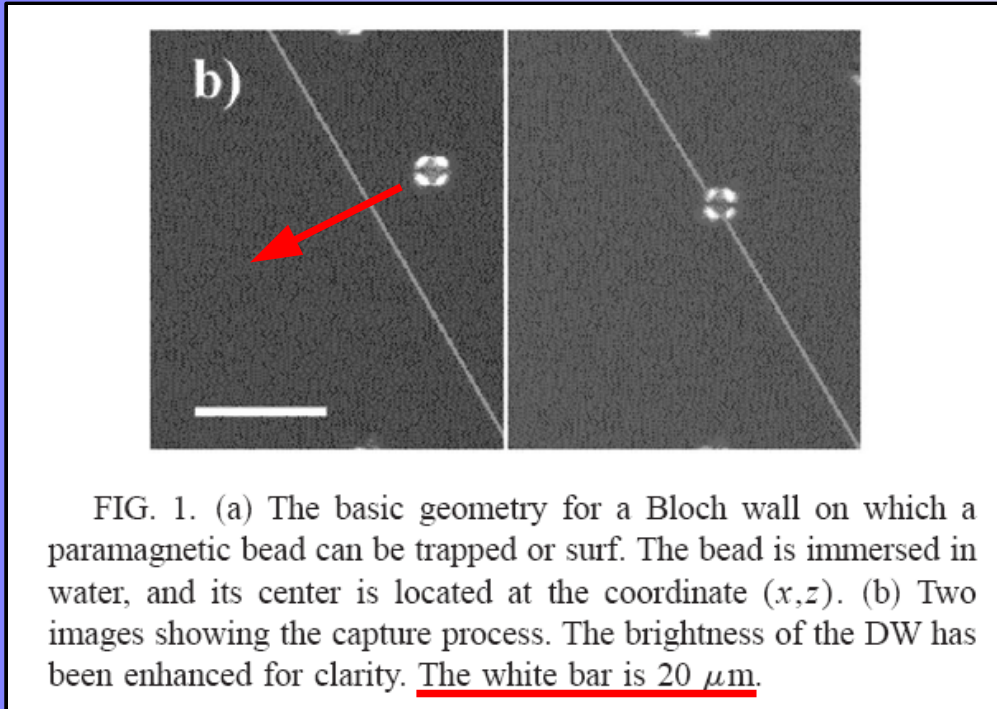


Mała szerokość ściany domenowej (DW) pozwala przybliżyć ją dipolem magnetycznym  $m_1$ , który oddziałuje z momentem  $m_2$  zaindukowanym w bead.

$$F_x = \dots \approx 0.6 \text{ nN}$$

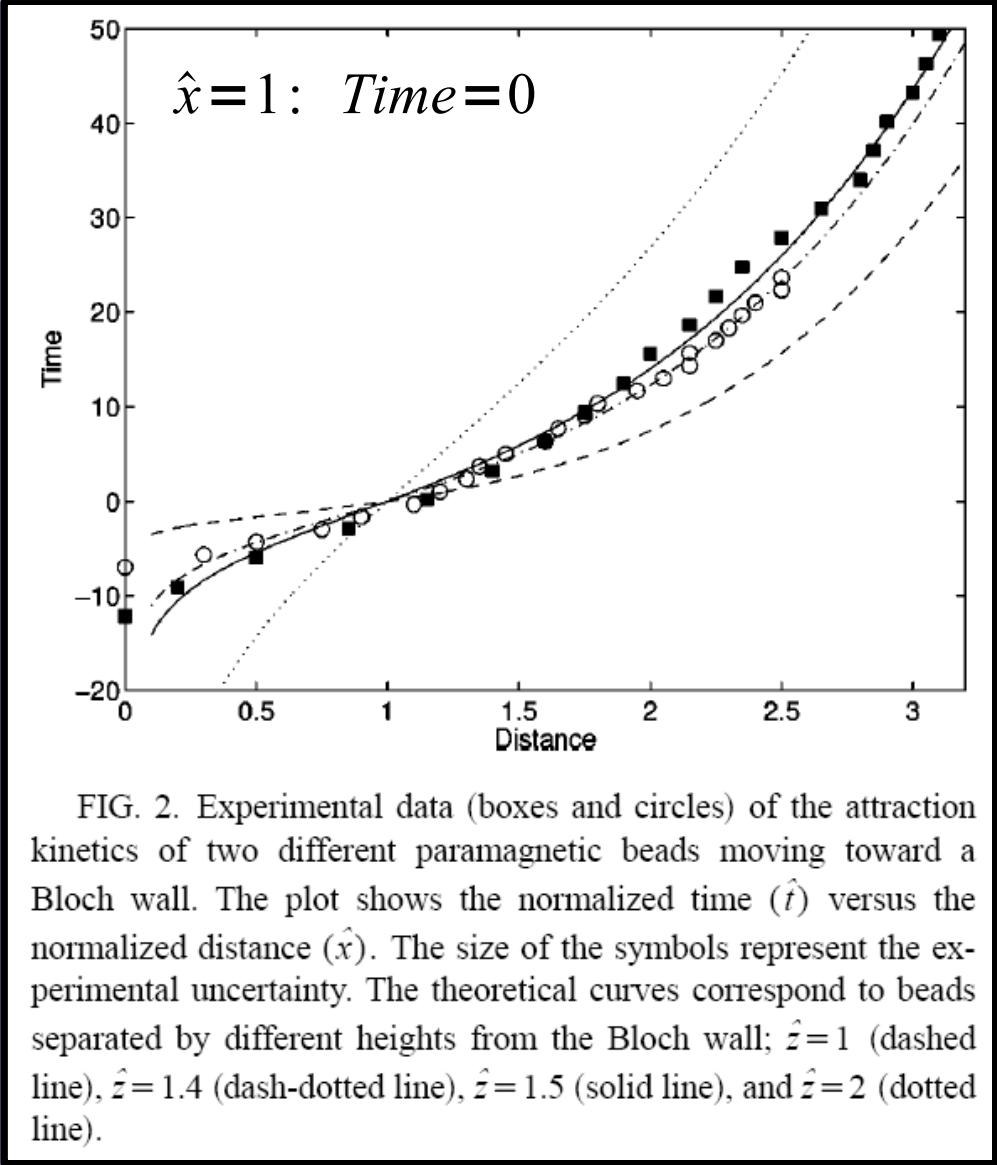
Znając lepkość wody ( $\eta \approx 0.001 \text{ Nsm}^{-2}$ ) można z prawa Stokes'a wyznaczyć dla bead zależność  $x(t)$ .

# Wykorzystanie struktury domenowej



Prosty model uwzględniający siłę oddziaływania dipoli oraz lepkość ośrodka daje **dobry opis ruchu** magnetic beads.

3 parametry fitowania:  
 charakterystyczny czas procesu,  
 wysokość kulki nad domeną i czas początkowy



[5] L. E. Helseth, T. M. Fischer, T. H. Johansen, Phys. Rev. E **67**, 042401 (2003)

## Wykorzystanie struktury domenowej

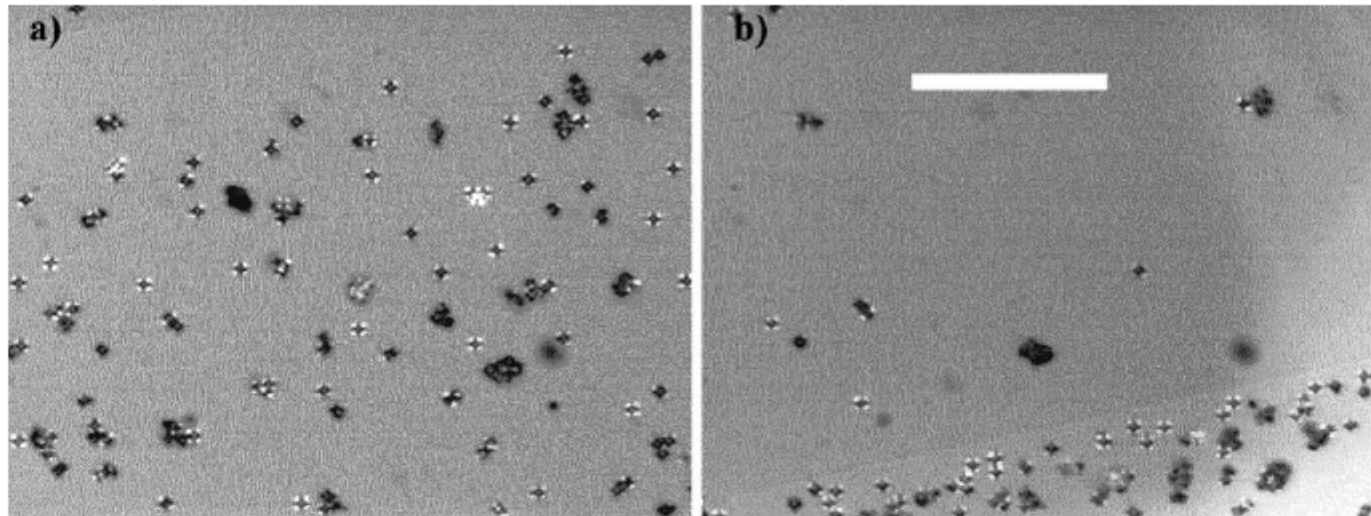


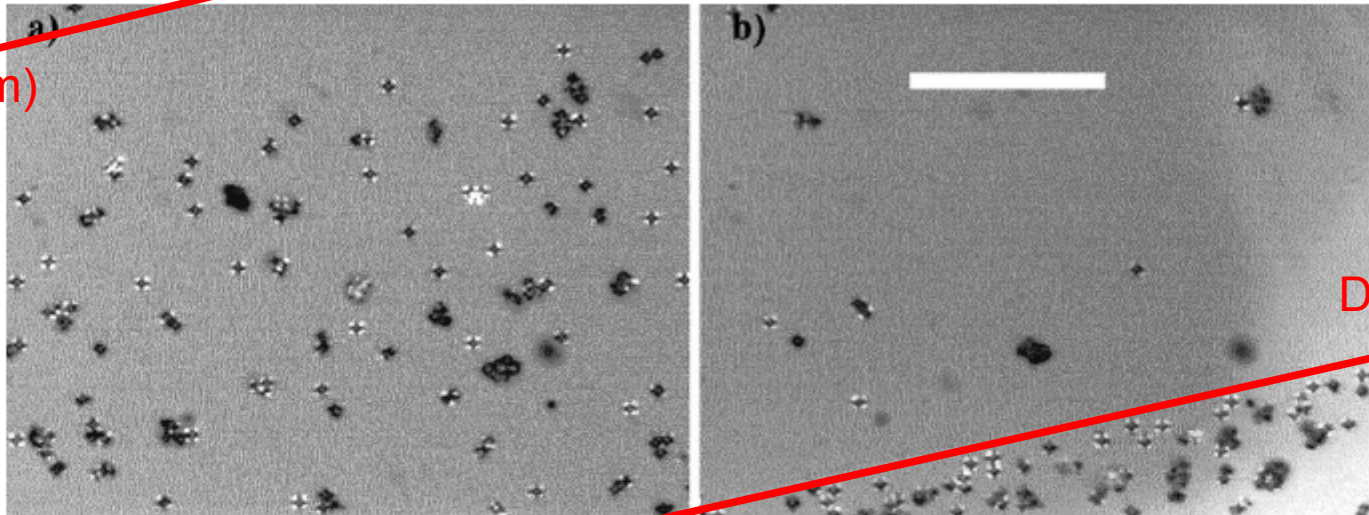
FIG. 3. Paramagnetic beads surfing on a DW. In (a) the DW is in the upper left corner, and the field strength is 640 A/m. In (b) the beads have surfed on the DW to the lower part of the image. Now the field strength is 1040 A/m. Note that some particles (<10%) adhere to the substrate, and do not move with the DW. The white bar is 100  $\mu\text{m}$ .

Ściany domenowe mogą pułapkować i poruszać cząsteczki magnetyczne.

W obecności zewnętrznego, **przyłożonego prostopadle**, pola magnetycznego ściany Blocha mogą odpychać cząsteczki magnetyczne.

## Wykorzystanie struktury domenowej

DW (640 A/m)



DW (1040 A/m)

FIG. 3. Paramagnetic beads surfing on a DW. In (a) the DW is in the upper left corner, and the field strength is 640 A/m. In (b) the beads have surfed on the DW to the lower part of the image. Now the field strength is 1040 A/m. Note that some particles (<10%) adhere to the substrate, and do not move with the DW. The white bar is 100  $\mu\text{m}$ .

W obecności zewnętrznego, **przyłożonego prostopadle**, pola magnetycznego ściany Blocha mogą odpychać cząsteczki magnetyczne.

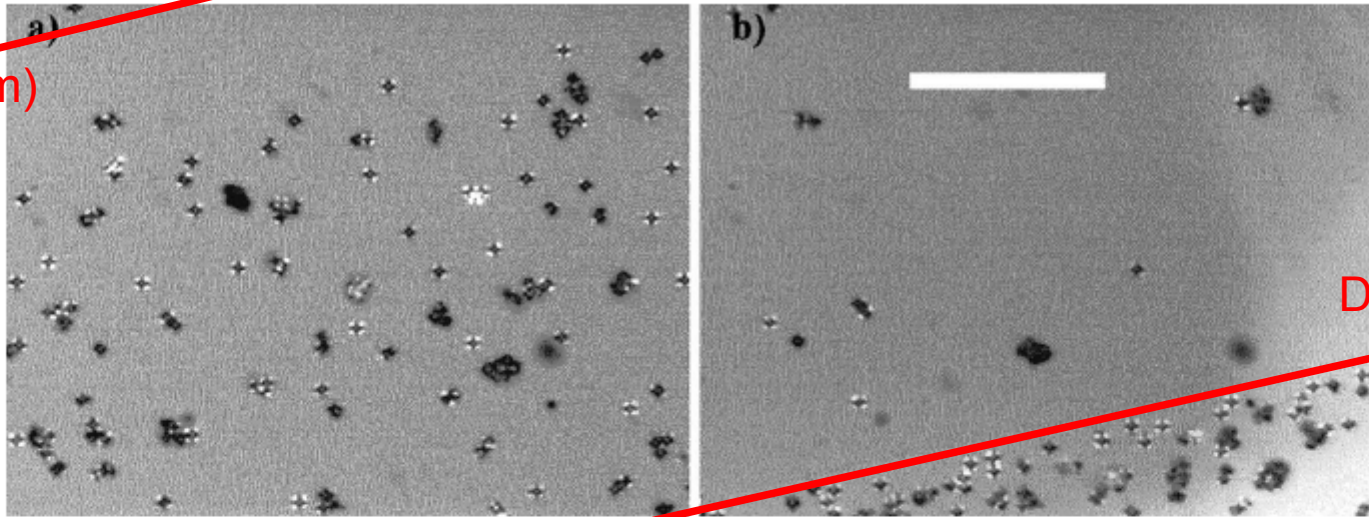
Dla odpowiedniej prędkości przemieszczania pola zewnętrznego prędkości ściany Blocha i cząstek magnetycznych (beads) są jednakowe – **surfowanie**:

- przeniesienie cząstek magnetycznych wymagało kilkakrotnego przemieszczania



## Wykorzystanie struktury domenowej

DW (640 A/m)



DW (1040 A/m)

FIG. 3. Paramagnetic beads surfing on a DW. In (a) the DW is in the upper left corner, and the field strength is 640 A/m. In (b) the beads have surfed on the DW to the lower part of the image. Now the field strength is 1040 A/m. Note that some particles (<10%) adhere to the substrate, and do not move with the DW. The white bar is 100  $\mu\text{m}$ .

**„Surfowanie” na ścianie domenowej nie pozwala na manipulację pojedynczymi cząsteczkami magnetycznymi**

## Wykorzystanie struktury domenowej

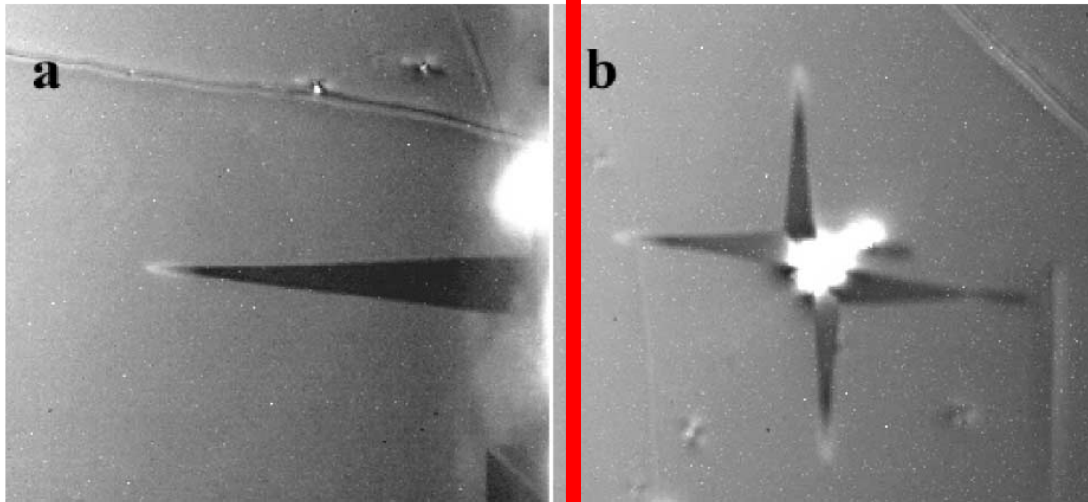
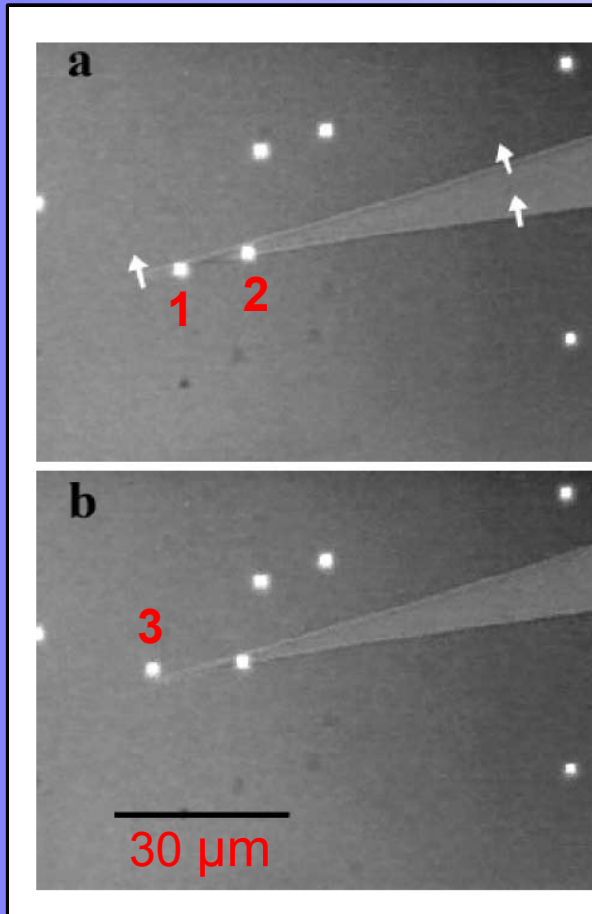


FIG. 1. Two different ways to obtain a domain wall tip. In (a) roughnesses at the edge generate the characteristic domain. We found that it is most efficient to simply make a small scratch (typically 0.1 mm or less) at the edge. In (b) a small inclusion in the film generates typical Néel spikes, which result in four characteristic domains.

- granat ferrytowy z podstawieniem Bi
- grubość 4  $\mu\text{m}$
- ściany tworzone poprzez zadrapania lub wtrącenia
- typowa koercja ścian - 100 A/m
- ruch ścian 0.1-1  $\mu\text{m}/(\text{A/m})$ ; liniowy dla  $H < 500 \text{ A/m}$
- kontrola położenia DW z dokładnością do 1  $\mu\text{m}$

Zastosowano „domain wall tip” oraz paramagnetyczne kulki Dynabeads ( $r=1.4 \mu\text{m}$ )

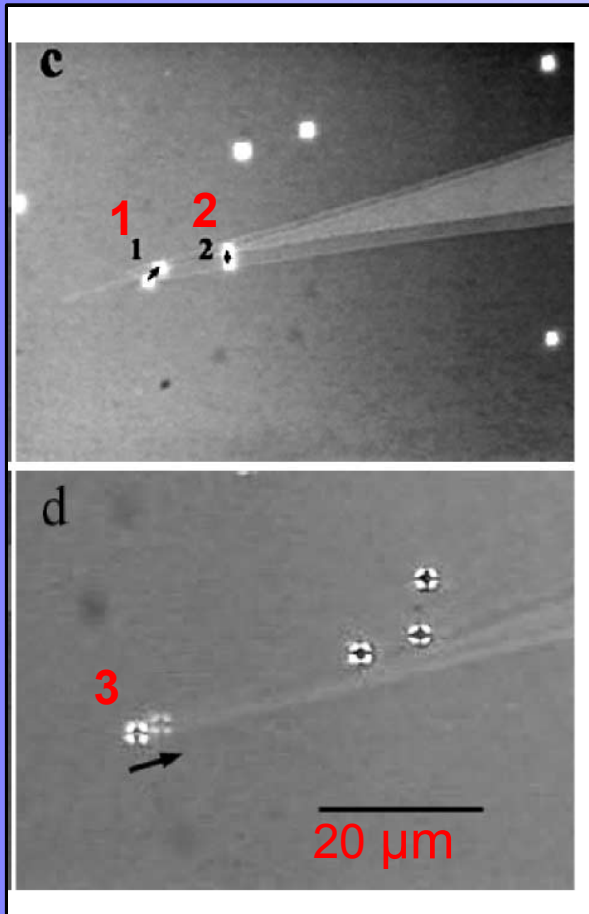
## Wykorzystanie struktury domenowej



- Prostopadłe do powierzchni pole magnetyczne (12 kA/m) orientuje momenty beads
- (a) obie cząsteczki (1 i 2) podążają za ruchem DW
- (b) cząsteczka 3 wyskoczyła z ostrza domeny z powodu lepkości wody – możliwość separacji cząsteczek

FIG. 2. Two of the possible modes of operation are shown in (a) and (b). Here the tip can be used to drag or push colloidal particles in the presence of a strong magnetic field. The black scale bar is 30  $\mu\text{m}$ .

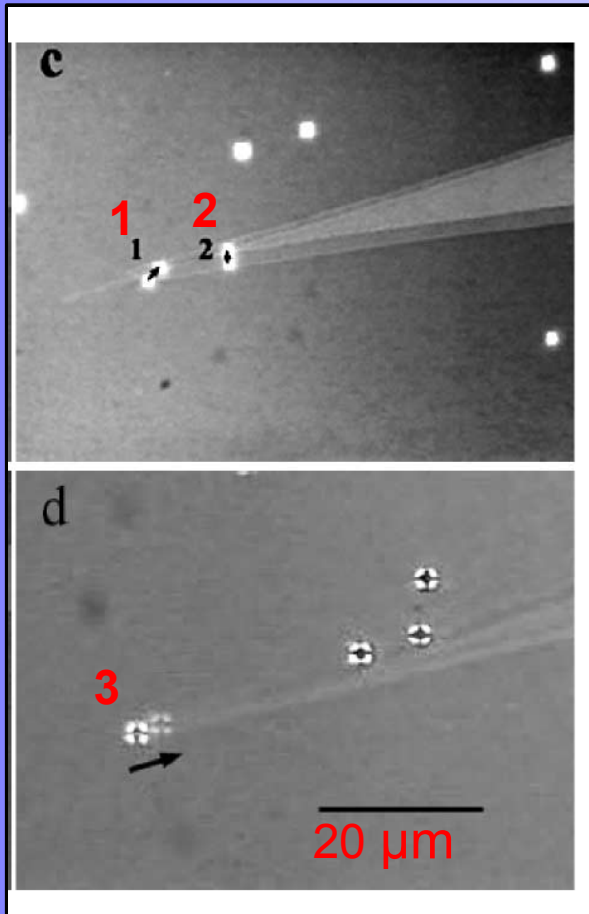
## Wykorzystanie struktury domenowej



- Cząsteczka 1 umiejscowiona jest na ostrzu domeny i podąża za jej ruchem
- Cząsteczka 2 podąża za ruchem ściany domenowej (ruch jednowymiarowy)
- Kontrola przemieszczenia cząsteczek z dokładnością do  $1\mu\text{m}$  na dystansie  $100\mu\text{m}$
- (d) Ruch pojedynczej cząsteczki

In (c) two pictures are superimposed on each other to show how the tip can be used to drag the particles. The black arrows indicate the particle displacement. (d) shows another experiment with another domain wall tip. Here we drag a single particle along the domain wall tip without moving the surrounding particles. To show that only one particle has been dragged, we have made the second layer more transparent so that the particle appears weaker after being dragged. Note that

## Wykorzystanie struktury domenowej



- W zewnętrznych polach przewyższających 300 A/m cząsteczki magnetyczne odpychane mogą być od ostrza domeny gdy znajdują się w jego pobliżu
- W polu ok. 10 kA/m odległość ostrze - cząsteczka magnetyczna wynosi ok.  $r$  („pchanie”)

Maksymalna zaobserwowana w eksperymencie prędkość ruchu cząsteczek magnetycznych (zgodnego z ruchem ścian domenowych) wynosi około **30** μm/s.



## Szczypce magnetyczne - „koziółkowanie”

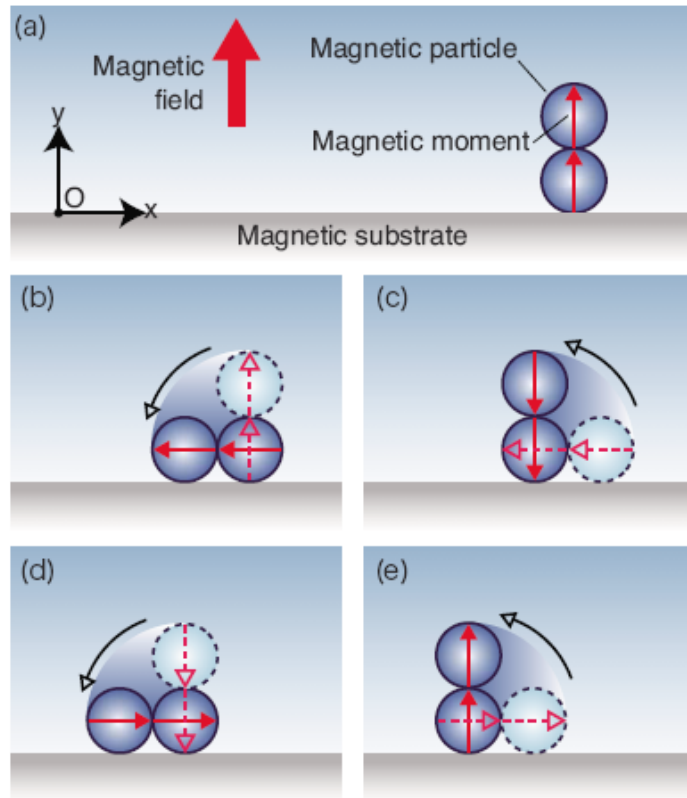
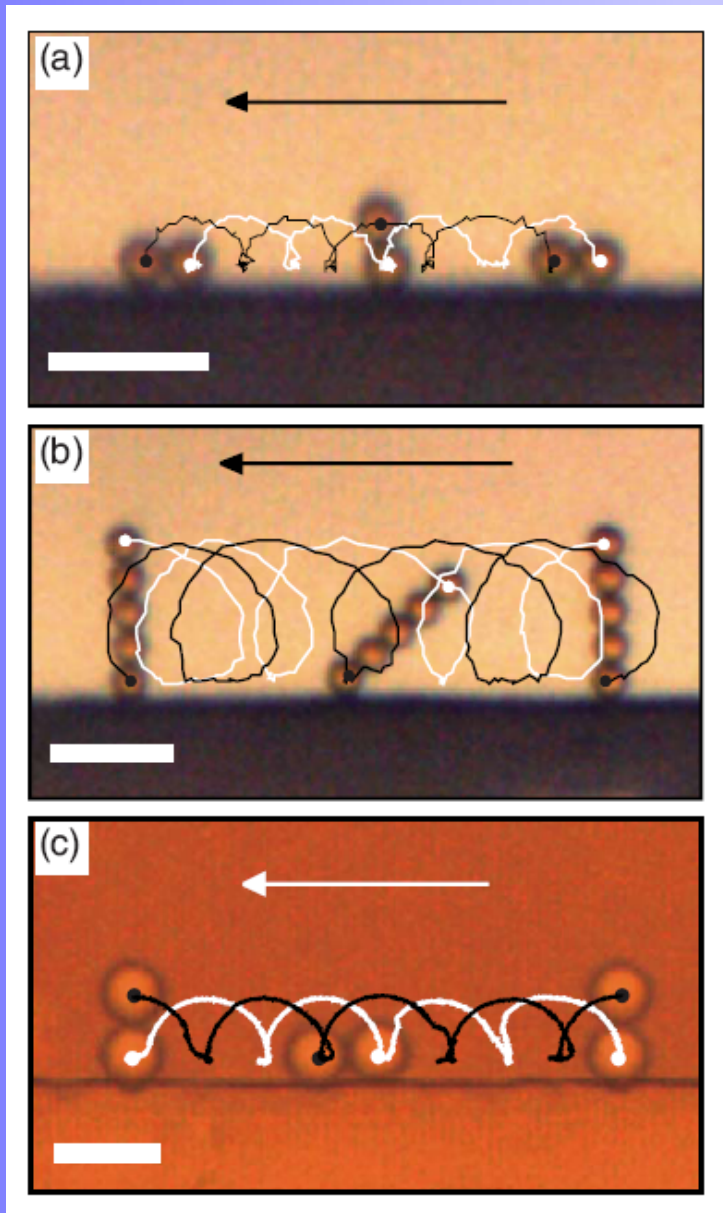


FIG. 1. (Color online) Tumbling motion of magnetic particles along a magnetic substrate induced by a rotational magnetic field. A cluster composed of magnetic particles on a magnetic substrate rotates following the rotation of the magnetic field. When the frictional force acting between the particle and the substrate is sufficiently large, the cluster moves along the substrate surface.

- paramagnetyczne Dynabeads rozproszone w wodzie
- $r=1.4, 3 \mu\text{m}$
- podłoże – kobalt rozproszony w poliestrze( $t=7 \mu\text{m}$ )

**Ruch cząstek w kierunku zgodnym z kierunkiem rotacji pola magnetycznego**

## Szczypce magnetyczne - „koziółkowanie”



- pole 12.7 kA/m (16mT) rotujące przeciwnie do ruchu wskazówek zegara z częstotliwością 1 Hz

- dwie paramagnetyczne Dynabeads,  $r=1.4 \mu\text{m}$

- pięć paramagnetycznych Dynabeads,  $r=1.4 \mu\text{m}$

- niemagnetyczne kulki poliestrowe w ferrofluidzie na niemagnetycznym podłożu poliestrowym, 0.1 Hz,  $r=3 \mu\text{m}$

# Wnioski

- Pole magnetyczne pochodzące od struktury domenowej może być użyte do kontrolowanej akumulacji cząstek magnetycznych
- Zmiany struktury domenowej wywołane polem zewnętrznym mogą być wykorzystane do manipulacji cząstkami magnetycznymi z dokładnością rzędu mikrometrów
- Manipulacja cząstkami magnetycznymi nie pozwala obecnie na kontrolę wektora przesunięcia - przypadkowość wzajemnego położenia cząsteczki magnetycznej i ściany domenowej