HATÉKONYABB MÁGNESES LÁZTERÁPIA

Iszály Zsófia

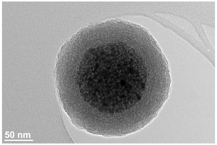
Debreceni Egyetem

Magyar Fizikus Vándorgyűlés 2019
Eötvös Loránd Fizikai Társulat

A mágneses nanorészecskék (MNP) olyan egykristályok, amelyek külső mágneses térrel manipulálhatók.

Az MNP-t számos kutatási területen alkalmazzák:

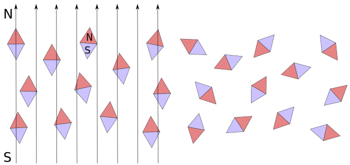
- mágneses képalkotás
- adattárolás
- orvosi diagnosztika és kezelések
- tumorterápia
  - direkt - mágneses hipertermia
  - indirekt - szinergikus hatás

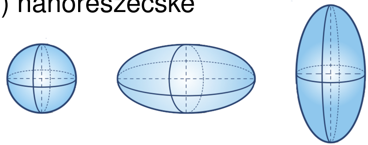


A leggyakrabban használt nanorészecskék a vasoxid nanoreszécskék (Fe_3O_4) $\leftarrow$ biokompatibilis.

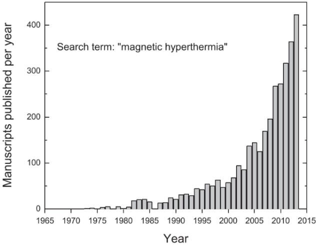
MNP fizikai tulajdonságai:

- átmerő $\sim 10\mathrm{nm} - 200\mathrm{nm}$
- egyetlen mágneses domén
- szuperparamágneses
- $T < T_{\mathrm{Curie}}$
- biokompatibilis külső burkolat
- alak anizotrópia: λ_{eff}
  - $\lambda_{\mathrm{eff}} = 0$ izotróp (spherical) nanorészecske
  - $\lambda_{\mathrm{eff}} < 0$ lencse alakú (oblate) nanorészecske
  - $\lambda_{\mathrm{eff}} > 0$ szivar alakú (prolate) nanorészecske





Mágneses lázterápia előnyei



- jól lokalizált
- nincs mellékhatás
- nem mérgező
- agydaganat, mellhártya daganat hatékony kezelése
- számos módszer létezik a mágneses nanorészecskék előállítására

$\rightarrow$ Charité - Universitätsmedizin Berlin

$$f \leq 100kHz, H = 18kA/m$$

[*Fig*.] Applied Physics Reviews 2, 041302 (2015); doi: 10.1063/1.4935688.

MNP + változó mágneses tér = hőtermelés
Hatékonyság növelése $\rightarrow$ egy új típusú külső térrel!

Előzmények:

- izotróp eset, $T = 0$: forgó tér $\leq$ rezgő tér [1]
- izotróp eset, $T \neq 0$: forgó tér $\simeq$ rezgő tér [2]
- $T = 0$: anizotróp forgó (amikor $H_a \perp H_{rot}$) $\leq$ izotróp forgó [3,4]

Mindig a rezgő a nyerő?

[1] P.F. de Chatel, I. Nándori, J. Hakl, S. Mészáros, K. Vad, J. Phys. Cond. Matter **21**, 124202 (2009).
[2] Yu. L. Raikher, V. I. Stepanov, Physical Review E **83**, 021401 (2011).
[3] I. Nándori, J. Rácz, Physical Review E **86**, 061404 (2012).
[4] J. Rácz, P. F. de Châtel, I. A. Szabó, L. Szunyogh, I. Nándori, Phys. Rev. E **93**, 012607 (2016).

Determinisztikus Landau-Lifschitz-Gilbert (LLG) egyenlet

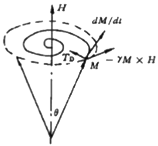
Mágnesezettség vektor mozgásegyenlete:

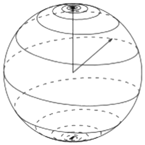
$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\mathbf{M} = -\gamma'[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\mathrm{eff}}] + \alpha'[[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\mathrm{eff}}] \times \mathbf{M}]$$

a nagyság nem változik $\Rightarrow$ egységvektor $\mathbf{M} = \mathbf{m}/m_S$

Paraméterek:

- $\gamma' = \mu_0\gamma_0/(1+\alpha^2)$
- $\alpha' = \alpha\mu_0\gamma_0/(1+\alpha^2)$
- dimenziótlan csillapítási tényező: α
- giromágneses együttható: $\gamma_0 = 1.76 \times 10^{11}$ Am^2/Js
- vákuum permeabilitás: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A (vagy N/A^2)





I. Forgó + statikus mágneses tér (és az anizotrópia tér):

$$\text{A)} \quad \mathbf{H}_{\mathrm{eff}} = \mathrm{H}_0 \; (\cos(\omega t), \sin(\omega t), \lambda_{\mathrm{eff}} \mathrm{M}_z + \mathrm{b}_0),$$

$$\text{B)} \quad \mathbf{H}_{\mathrm{eff}} = \mathrm{H}_0 \; (\cos(\omega t) + \mathrm{b}_0 + \lambda_{\mathrm{eff}} \mathrm{M}_z, \sin(\omega t), 0),$$

II. Rezgő + statikus mágneses tér:

$$\text{A)} \quad \mathbf{H}_{\mathrm{eff}} = \mathrm{H}_0 \; (\cos(\omega t), \mathrm{b}_0, 0),$$

$$\text{B)} \quad \mathbf{H}_{\mathrm{eff}} = \mathrm{H}_0 \; (\cos(\omega t) + \mathrm{b}_0, 0, 0),$$

(b_0 statikus tér, ω szögsebesség, M_z mágnesezettség z-komponense, λ_{eff} anizotrópia paraméter)

Tipikus paraméterek a lázterápiában:

($\alpha = 0.1$, $H_0 = 18$ kA/m, $\omega_L = H_0 \gamma'$, $\alpha_N = H_0 \alpha'$)

$$\omega = 5 \times 10^5 \text{ Hz}, \;\; \omega_L = 4 \times 10^9 \text{ Hz}, \; \alpha_N = 4 \times 10^8 \text{ Hz}$$

$t_0 = 0.5 \times 10^{-10}$ s $\rightarrow$ dimenziótlan paraméterek:

$\omega \rightarrow \omega t_0 = 2.5 \times 10^{-5}$, $\omega_L \rightarrow \omega_L t_0 = 0.2$, $\alpha_N \rightarrow \alpha_N t_0 = 0.02$

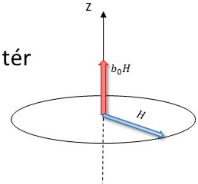
KOMBINÁLT MÁGNESES TÉR

STATIKUS TÉR

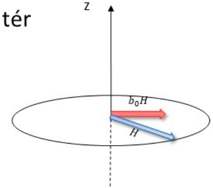
+

I. FORGÓ TÉR

A) b_o ⊥ forgó tér

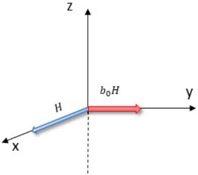


B) b_o ∥ forgó tér

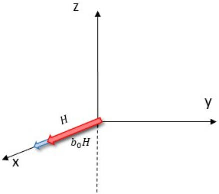


II. REZGŐ TÉR

A) b_o ⊥ rezgő tér



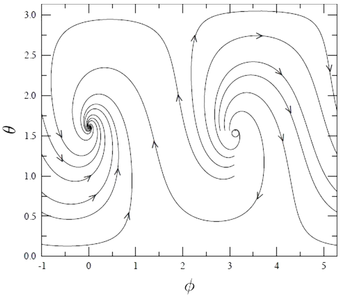
B) b_o ∥ rezgő tér



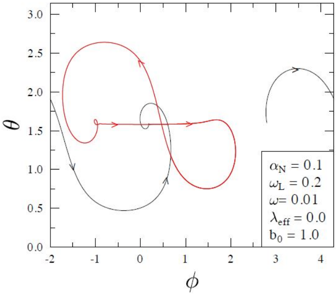
M vektor időbeli mozgása: https://youtu.be/xzpjLod7LpI

LLG egyenletnek vonzó stacionárius megoldásai vannak $\longrightarrow$ fixpont vagy határciklus (b_0, λ)

I. Forgó tér esetében célszerű áttérni forgó vonatkoztatási rendszerbe és polárkoodinátákat használni.
$(M, \theta, \varphi) \rightarrow$ de $M =$ konstans.



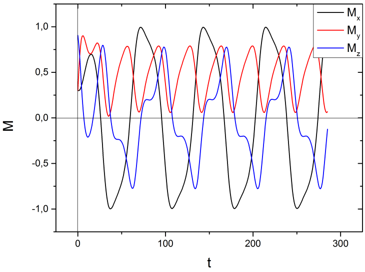
A) $b_o \perp$ forgó $\rightarrow$ fixpont



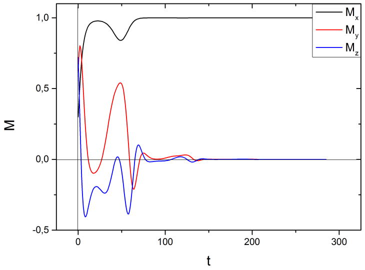
B) $b_o \parallel$ forgó $\rightarrow$ határciklus

(θ, ϕ) sík

II. Rezgő tér esetén a mágnesezettség vektor komponensei (M_x, M_y, M_z) a laborrendszerben:



A) $b_o \perp$ rezgő $\rightarrow$ határciklus



B) $b_o \parallel$ rezgő $\rightarrow$ fixpont

Energiaveszteség egy ciklusban:

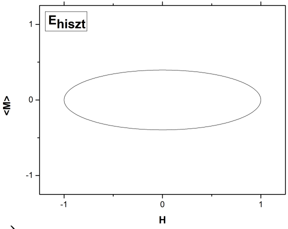
- LLG megoldás:

$$\mathbf{M_i}(t) \Rightarrow \langle \mathbf{M}(t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \mathbf{M_i}(t)$$

$$E = \mu_0 m_S \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \mathrm{d}t \left(\mathbf{H}_{\mathrm{eff}} \cdot \frac{d\langle \mathbf{M} \rangle}{dt} \right) \Rightarrow \frac{E}{\mu_0 m_S} (\lambda_{\mathrm{eff}}, b_0, \omega, \alpha_N, \omega_L)$$

- Dinamikus hiszterézis hurok

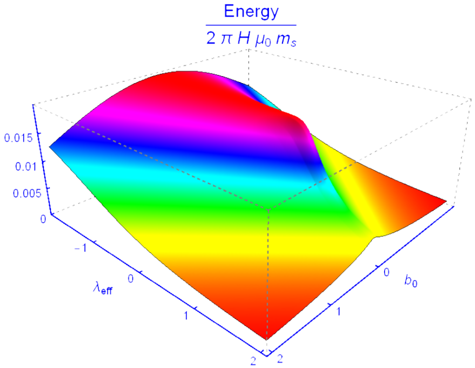
$$E = E_{hiszt}$$



Energiaveszteség egy szekundumra:

$$FEM = f \cdot \mu_0 m_S \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \mathrm{d}t \left(\mathbf{H}_{\mathrm{eff}} \cdot \frac{d\langle \mathbf{M} \rangle}{dt} \right)$$

A) A statikus tér merőleges a forgás síkjára



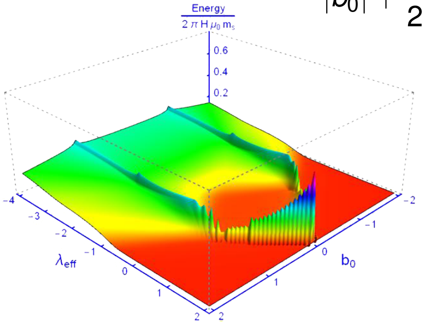
Bármilyen statikus tér (b_0) csökkenti az energiaveszteséget!

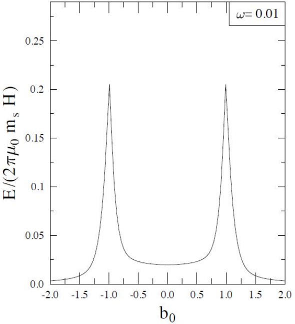
$\longrightarrow$ **NEGATÍV EREDMÉNY**

B) A statikus tér a forgás síkjában van

Pozitív anizotrópia esetén nő az egy ciklusra jutó energiaveszteség ha b_0 és λ_{eff} teljesíti a következő összefüggést:

$$|b_0| + \frac{1}{2}\lambda_{\text{eff}} - 1 = 0$$





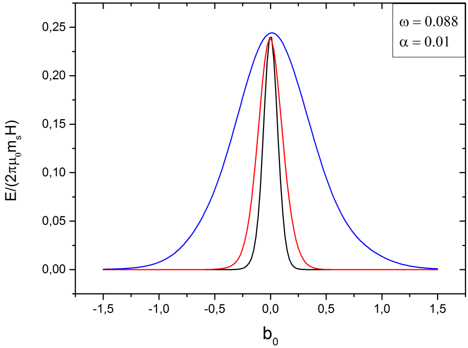
Az energiaveszteség megnő $\lambda_{\text{eff}} = 0$ esetén. [5]

$\longrightarrow$ **POZITÍV EREDMÉNY**

Ezzel **"szuper-lokalizálhatni"** lehet a hőátadást.

B) A statikus tér a rezgő térrel párhuzamos

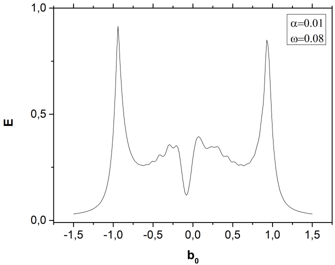
$$M_x(t) = \frac{(M_{x0} - 1) + (M_{xo} + 1)e^{\frac{2\alpha(b_0 t\omega + \sin(\omega t))}{\omega}}}{(1 - M_{x0}) + (M_{xo} + 1)e^{\frac{2\alpha(b_0 t\omega + \sin(\omega t))}{\omega}}}$$

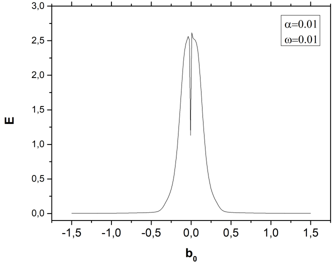


Bármilyen b_0 esetén 0-ra csökken az energiaveszteség!

$\longrightarrow$ **NEGATÍV EREDMÉNY**

A) A statikus tér merőleges a rezgő térre





Speciális paraméterekkel rezgő tér esetén is megjelenik a dupla csúcs, de ha ω csökken eltűnik.

$\longrightarrow$ **NEGATÍV EREDMÉNY?**

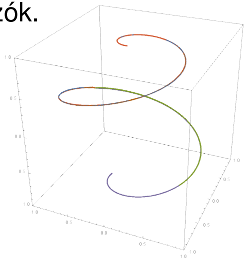
Sztochasztikus Landau-Lifschitz-Gilbert (LLG) egyenlet

A kísérleti megvalósítás céljából fontos a termikus fluktuációk figyelembevétele.

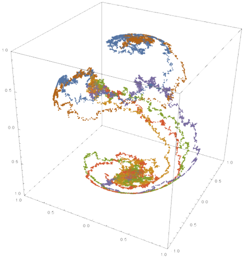
$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\mathbf{M} = -\gamma'[\mathbf{M} \times (\mathbf{H}_{\mathrm{eff}} + \mathbf{H})] + \alpha'[[\mathbf{M} \times (\mathbf{H}_{\mathrm{eff}} + \mathbf{H})] \times \mathbf{M}]$$

ahol a $\mathbf{H} = (\mathrm{H_x}; \mathrm{H_y}; \mathrm{H_z})$ sztochasztikus tér koordinátái független Gauss változók.

Példa:

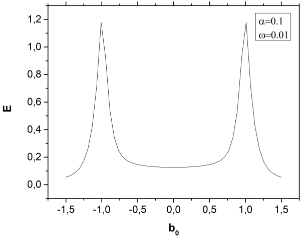


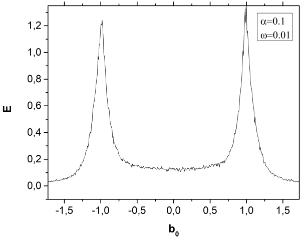
$T = 0$



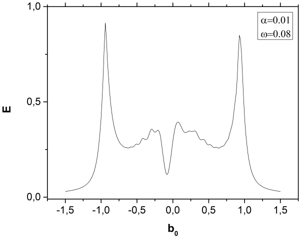
$T \neq 0$

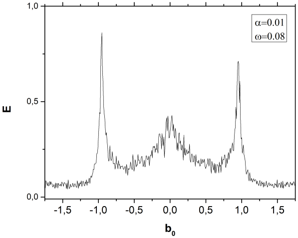
I./ B) $b_0 \parallel$ **forgó tér**





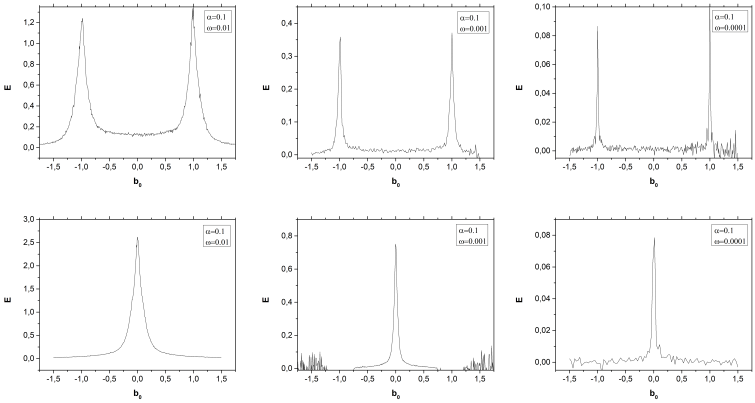
II./ A) $b_0 \perp$ **rezgő tér**





$\longrightarrow$ A termikus fluktuáció nem rontja el az effektust!

FORGÓ vagy REZGŐ mágneses tér?



ω-val közelítve a hipertermia tartományt a **forgó tér** legyőzi a rezgő teret!

Összefoglaló

I. B) **Forgó + statikus** $\parallel$ ($\lambda \equiv 0$)
$\Rightarrow$ amplitúdók aránya megfelelő
$\Rightarrow$ egy ciklusra eső energiaveszteség jelentősen megnő;
$\Rightarrow$ ezzel a kombinációval "szuper-lokálissá" tehető a hőátadás.

II. A) **Rezgő + statikus** $\perp$ ($\lambda \equiv 0$)
$\Rightarrow$ dupla csúcs, hipertermiás limeszben eltűnik
$\Rightarrow$ hipertermiás limeszben a FORGÓ nyer!

[5] Zs. Iszály, K. Lovász, I. Nagy, I. G. Márián, J. Rácz, I. A. Szabó, L. Tóth, N. F. Vas, V. Vékony, I. Nándori, JMMM **466**, 452-462 (2018).

Köszönöm a figyelmet!

https://youtu.be/v5z_HB1WzCc