Теоретическое и экспериментальное описание динамического фазового перехода в тонких магнитных пленках

Ейхлер Алексей Викторович

ОмГУ им. Ф.М.Достоевского

Лаборатория теоретической физики, прикладного моделирования и параллельных вычислений

20 марта 2022 г.

Актуальность.

Исследование неравновесных явлений и их динамическое поведение представляет собой растущий интерес. Явление динамического фазового перехода может описывать статистические процессы, применяемые к социальной деятельности человека, [1] волны зарядовой плотности [2].

[1] B. Slavko, K. Glavatskiy, and M. Prokopenko, Phys. Rev. E 99, 042143 (2019)

[2] Ogawa, N., Murakami, Y., Miyano, K. Charge-density-wave phase reconstruction in the photoinduced dynamic phase transition in $K_{0.3}MoO_3$. *PhysicalReviewB*, 65(15)

Динамический фазовый переход

Процесс неравновесной релаксации намагниченности в переодическом внешнем магнитном поле [3] характерезует динамический параметр порядка $Q(\Theta)$

$$Q = \frac{1}{2t_{1/2}} \int_0^{2t_{1/2}} m(t)dt; \tag{1}$$

где $m(t, z)$ — намагниченность в слое z,

$t_{1/2}$ — полупериод внешнего магнитного поля,

Θ — безразмерный полупериод внешнего поля $\Theta = t_{1/2}/\langle\tau\rangle$,

$\langle\tau\rangle$ — время жизни метастабильного состояния системы.

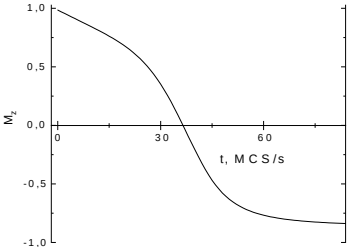


Рис. 1: Поведение намагниченности, позволяющее оценить время жизни метастабильного состояния $\langle\tau\rangle$

Зарождение новой фазы при увеличении полупериода внешнего поля [4].

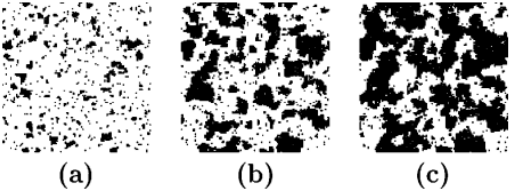


Рис. 2: Моментальные снимки спиновых конфигураций даны при (a) t = 30 шагов Монте-Карло на спин (MCS/S), (b) t = 60 MCS/S, и (c) t = 74 MCS/S. Метастабильное время жизни при этой температуре и поле $\langle\tau\rangle$ = 74,5 MCS/S.

[4] Korniss, G., White, C. J., Rikvold, P. A., Novotny, M. A. Physical Review E, 63, 016120 (2000).

Динамический фазовый переход в кинетической модели Изинга

Динамический фазовый переход происходит при смене динамически неупорядоченной фазы на динамически упорядоченную [5].

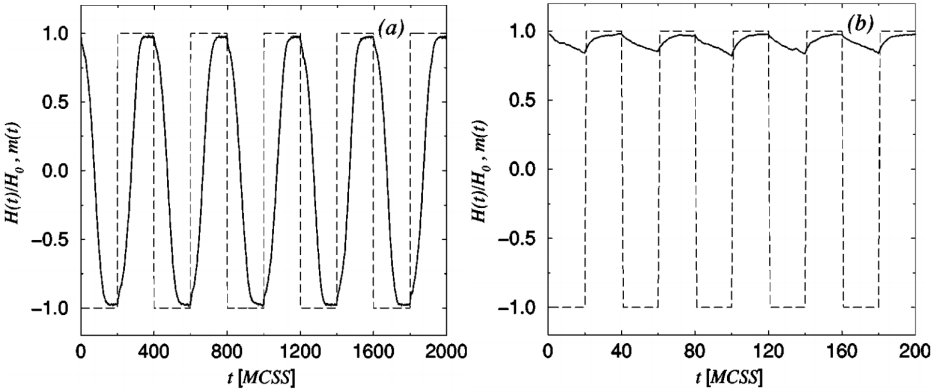
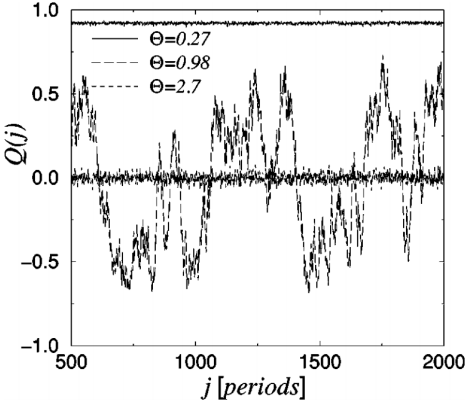


Рис. 3: (а) динамически неупорядоченная фаза на безразмерном полупериоде Q = 2.7. (б) Динамически упорядоченная фаза при Q = 0.27.

[5] Korniss, G., White, C. J., Rikvold, P. A., Novotny, M. A. Physical Review E, 63, 016120 (2000).

Значения параметра порядка Q для разных Θ [6].



[6] Korniss, G., White, C. J., Rikvold, P. A., Novotny, M. A. Physical Review E, 63, 016120 (2000).

Динамический фазовый переход

Изменение намагниченности при включении поля смещения для структуры Co/Pt, приложенного к внешнему осциллирующему полю. [7]

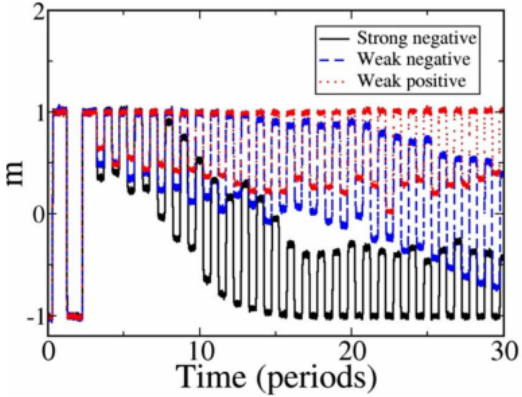


Рис. 4: Период t = 16.2 s. Сильное негативное поле H_b = -3.3, слабое негативное поле H_b = -0.9, слабое положительное поле H_b = +1.1

[7] Robb, D. T., Xu, Y. H., Hellwig, O., McCord, J., Berger, A., Novotny, M. A., Rikvold, P. A. Phys. Rev. B, 78(13) (2008).

Динамический отклик

При воздействии малых внешних сил, нестационарные магнитные системы качественно изменяют свою динамическую фазу. [8] [9] Для динамического фазового перехода поле смещения, приложенное к амплитуде поля, сопоставимо с влиянием внешнего поля в термодинамическом фазовом переходе [10]:

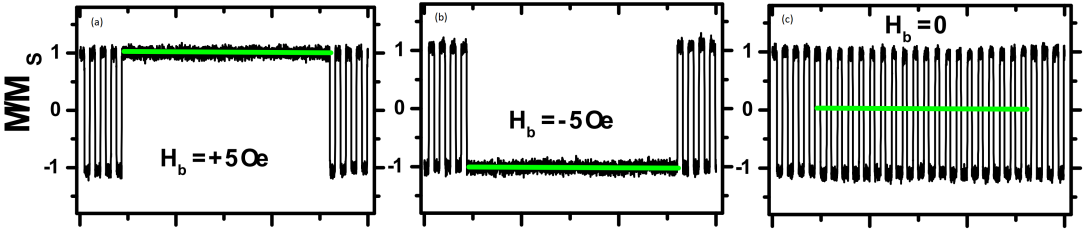


Рис. 5: Поведение $M/M_s(2t_{1/2} = 3{,}3$ mc, $H_0 = 430$ Э и $H_{ref} = 580$ Э) в зависимости от $H_b(a)H_b = +5$ Э, $(b)H_b = -5$ Э и $(c)H_b = 0$

[8] A. Berger, O. Idigoras, and P. Vavassori Phys. Rev. Lett. 111, 190602
[9] Robb, D. T., Xu, Y. H., Hellwig, O., McCord, J., Berger, A., Novotny, M. A., Rikvold, P. A. Phys. Rev. B, 78(13) (2008).
[10] J. M. Marín Ramírez, E. Oblak, P. Riego, G. Campillo, J. Osorio, O. Arnache, and A. Berger Phys. Rev. E 102, 022804 (2020).

Динамический фазовый переход

Граница раздела фаз при включении поля смещения. [11]

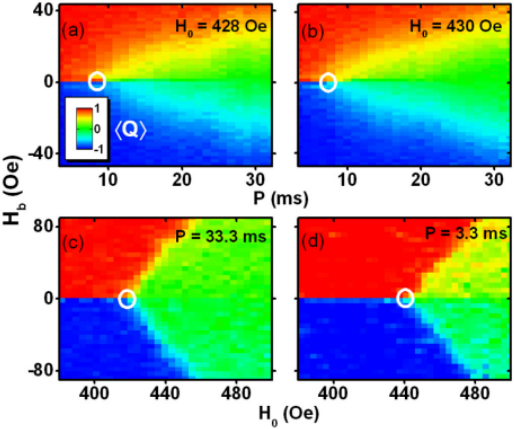


Рис. 6: Период t = 16.2 s. Сильное негативное поле H_b = -3.3, слабое негативное поле H_b = -0.9, слабое положительное поле H_b = +1.1

[11] J. M. Marín Ramírez, E. Oblak, P. Riego, G. Campillo, J. Osorio, O. Arnache, and A. Berger Phys. Rev. E 102, 022804 (2020).

Описание моделируемой системы

Вид гамильтониана анизотропной модели Гейзенберга:

$$H = -J\sum_{i,j}[(1-\Delta(N))(S_i^{\mathrm{x}}S_j^{\mathrm{x}} + S_i^{\mathrm{y}}S_j^{\mathrm{y}}) + S_i^{\mathrm{z}}S_j^{\mathrm{z}}] - h\sum_i S_i^{\mathrm{z}} \tag{2}$$

где $\overrightarrow{S_i} = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$ - трехмерный единичный вектор в узле. Расчеты ведутся в единицах обменного интеграла J.

В нашем случае $\Delta \neq 0.0$, что соответствует анизотропной модели.

$H(t)$– амплитуда поля, которая меняет знак со временем, зависящего от полупериода внешнего поля, что соответствует периодическому изменению поля. Внешнее осциллирующее поле было направлено вдоль оси O_z.

Изучаемая структура имеет вид:

Динамический фазовый переход

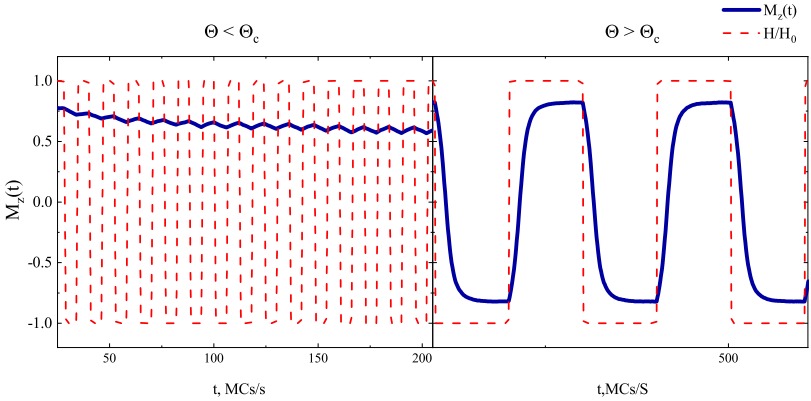


Рис. 7: Временные зависимости намагниченности (сплошная линия) в периодическом внешнем магнитном поле (штриховая линия),

(a) динамически упорядоченная фаза $\Theta > \Theta_c$
(b) динамически неупорядоченная фаза $\Theta < \Theta_c$

Динамический параметр порядка

Значения температуры $T(N)$ были взяты из работы [12], $\Delta(N)$ были подобраны основываясь на работе [13]. Расчет динамического параметра порядка Q:

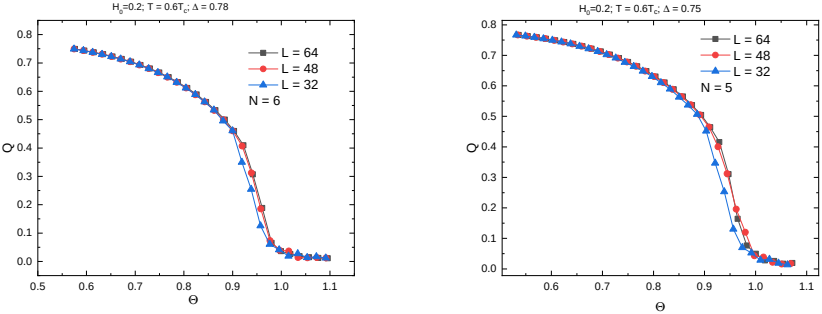


Рис. 8: Зависимость $Q(\Theta)$. Значение $T_c(N=5) = 1.31$, для $T_c(N=6) = 1.35$.

[12] Medvedeva.M.A , Prudnikov.P.V 2014 J. Phys.: Conf. Ser. 510 012024.

[13] Prudnikov, P. V., Prudnikov, V. V., Mamonova, M. V., Piskunova, N. I.Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 482, 201–205 (2019)

Метастабильная фаза

Показана осцилляция намагниченности M_z и релаксация при добавлении внешнего поля смещения H_b.

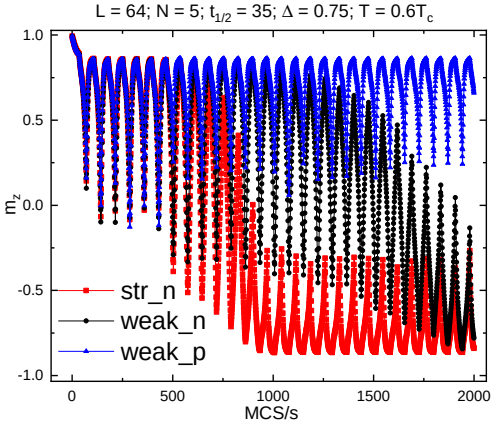


Рис. 9: Приложенное поле $H_0 = 0.2$. Поле смещения $H_b =$ - 0.1 (красные точки), $H_b =$ - 0.0062 (черные точки) и $H_b = +$ 0.0062 (синие точки).

Динамический отклик

Положительное изменение намагниченности $M(t)$ при добавлении поля смещения H_b.

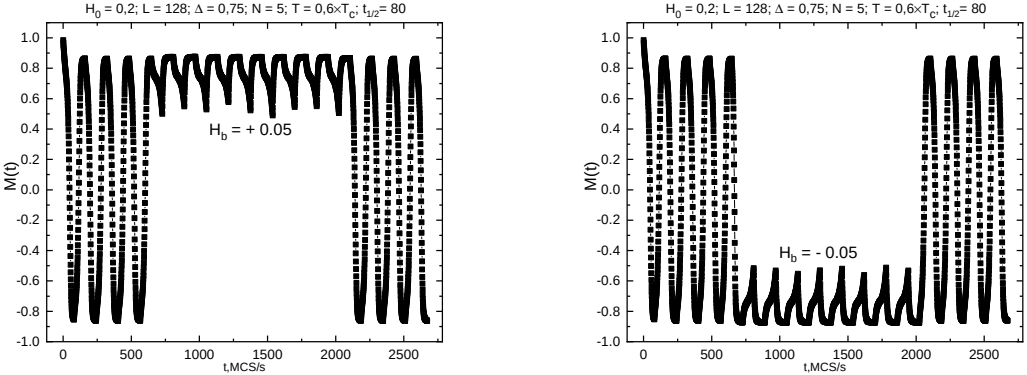


Рис. 10: Динамический отклик в поведении намагниченности $M(t)$ на изменение поля смещения H_b.

Заключение

Было проведено моделирование тонкой Гейзенберговской пленки с анизотропией типа "легкая ось"для различных значений числа слоев N с соответствующей начальной температурой $T(N)$ и анизотропией $\Delta(N)$.
Показана возможность наблюдения динамического фазового перехода. Была определена зависимость параметра порядка $Q(\Theta)$ для различных толщин N пленки и поля смещения.
Показано наличие эффекта гистерезиса в зависимости от значений поля смещения для выбранных толщин пленки. Динамический отклик находится в согласии с экспериментом.

Спасибо за внимание!