

Орлова Наталья Борисовна

Фемтомагнетизм и сверхбыстрое оптическое перемагничивание

План доклада:

1. Предмет изучения фемтомагнетизма
2. Времена в магнетизме. Теоретический предел
3. Теоретическая невозможность фемтомагнетизма
4. Экспериментальное наблюдение сверхбыстрой магнитной динамики
5. Основные теоретические подходы
6. Наши работы



Фемтомагнетизм –

раздел магнетизма, изучающий влияние фемтосекундных (10^{-15} с) лазерных импульсов на магнитное состояние веществ со спиновым магнитным упорядочением.

G. Zhang, W. Hübner, E. Beaurepaire, J.-Y. Bigot, Topic Apply Physics, 83,

U. Bovensiepen, Nature, 5, 401 (2009).

**Laser-Induced Ultrafast Demagnetization:
Femtomagnetism, a New Frontier?**

Guoping Zhang^{1*}, Wolfgang Hübner¹,
Eric Beaurepaire², and Jean-Yves Bigot²

FEMTOMAGNETISM

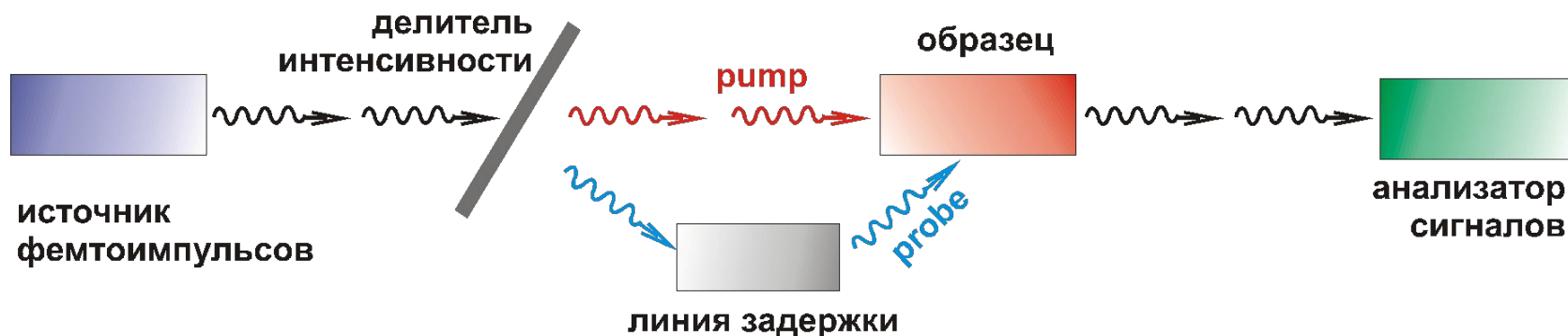
Magnetism in step with light

Femtosecond laser pulses can demagnetize ferromagnetic metallic thin films on an ultrafast timescale. Studying how magnetic films react during optical excitation provides a better understanding of this so-called femtomagnetism.

Uwe Bovensiepen



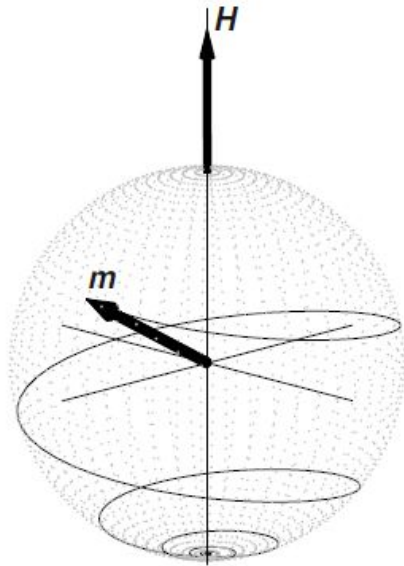
Метод накачка-проба (pump-probe)



Основной метод для изучения сверхбыстрых процессов .

Сверхбыстрые процессы (ultrafast processes) – процессы, характерные времена которых составляют пико- или фемтосекунды

Времена спиновой динамики



$$M_{\perp}^{(t)} = M_0 \exp(i\omega_s t - t / 2T_{SR})$$

$$M_{\parallel}^{(t)} = M_0 (1 - \exp(-t / T_{SR}))$$

Амплитуда магнитного поля в мощных лазерных импульсах порядка 10^5 Э

$$\omega_s = \gamma_s H = \frac{2\pi}{T_s} = (10^{10} - 10^{11}) \text{ c}^{-1} \text{ — частота прецессии,}$$

$$T_s = (10^{-10} - 10^{-11}) \text{ c} \text{ — период прецессии,}$$

$$T_{SR} = (10^{-7} - 10^{-9}) \text{ c} \text{ — время спин-решёточной релаксации.}$$

Предельное время перемагничивания

2004 год

letters to nature

The ultimate speed of magnetic switching in granular recording media

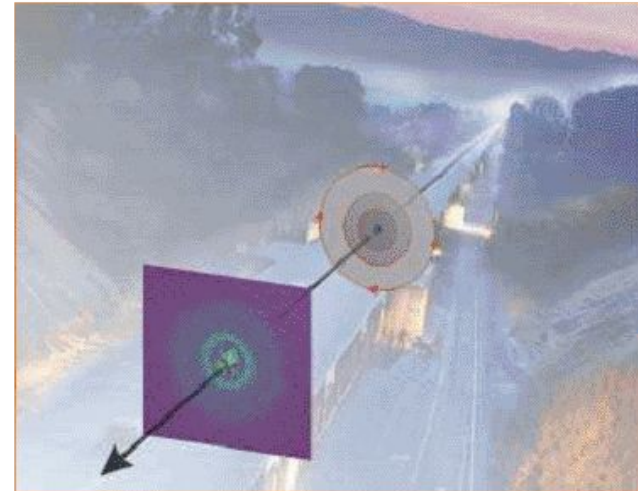
I. Tudosa¹, C. Stamm¹, A. B. Kashuba², F. King³, H. C. Siegmann¹, J. Stöhr¹, G. Ju⁴, B. Lu⁴ & D. Weller⁴

Applied physics

Speed limit ahead

C. H. Back and D. Pescia

Are there any limits to what science and technology can achieve? When it comes to recording data in magnetic media, the answer is yes: there is a natural limit to the speed at which data can be encoded.



Абсолютный рекорд по времени перемагничивания.

Не противоречит теории магнетизма!

2,3 пикосекунды



Time scale (seconds)

Femto → pico

Pico → nano

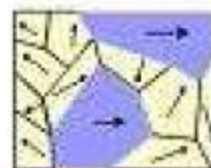
Nano → milli

Domain wall motion :
nucleation-propagation

1 kHz - 1 GHz

$H \rightarrow$

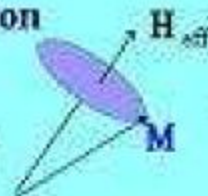
$(10^{-9} \rightarrow 10^{-3} \text{ s})$



Precession of magnetization

(10^{-11} s)

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \mathbf{M} \wedge \mathbf{H}_{\text{eff}}$$



$$T = \frac{2\pi}{\gamma H_{\text{eff}}}$$

and damping

10 GHz - 100 GHz

(10^{-9} s)

$$\left(\frac{d\mathbf{M}}{dt} \right)_{\text{relax}} = - \begin{cases} \frac{M}{\tau} & \text{(Bloch)} \\ \frac{\alpha}{M_e} \mathbf{M} \wedge \frac{d\mathbf{M}}{dt} & \text{(Gilbert)} \end{cases}$$

$(10^{-14} \rightarrow 10^{-12} \text{ s})$ Femtomagnetism

Spin-orbit coupling; Coulomb exchange : $U n_{\uparrow\downarrow} n_{\uparrow\downarrow}$

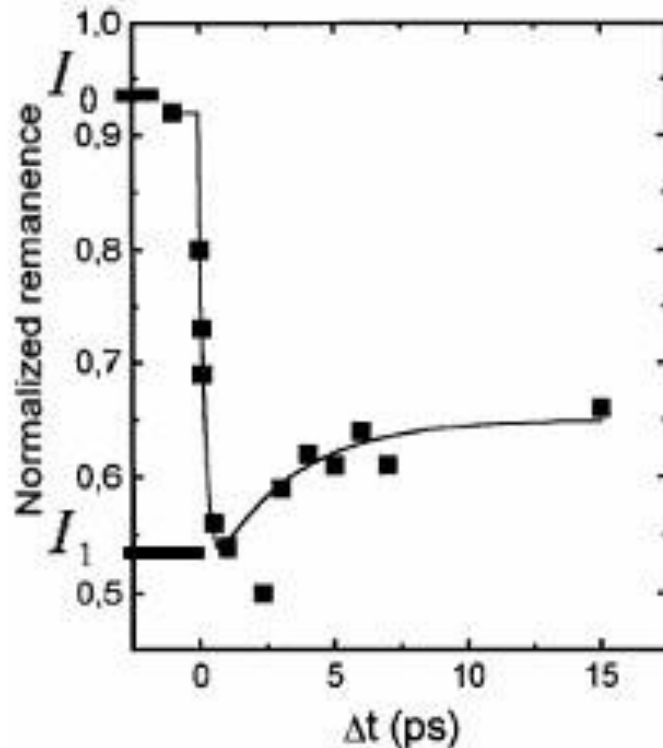
Magneto-crystalline anisotropy

$$\sum_k V_k c_{d\sigma}^+ c_{k\sigma}$$

Coupling with photons: TeraHertz emission

Из презентации
Р. В. Писарева,
ФКС-2010

Первый эксперимент



Зависимость интенсивности
магнитооптического сигнала
Керра от времени задержки после
импульса накачки Δt (ps)

I_0 – сигнал до
накачки

I_1 – сигнал после
накачки

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \frac{I_1 - I_0}{I_0} \approx 0.5; \quad \Delta I = \Delta I_0 e^{-t/\tau}$$

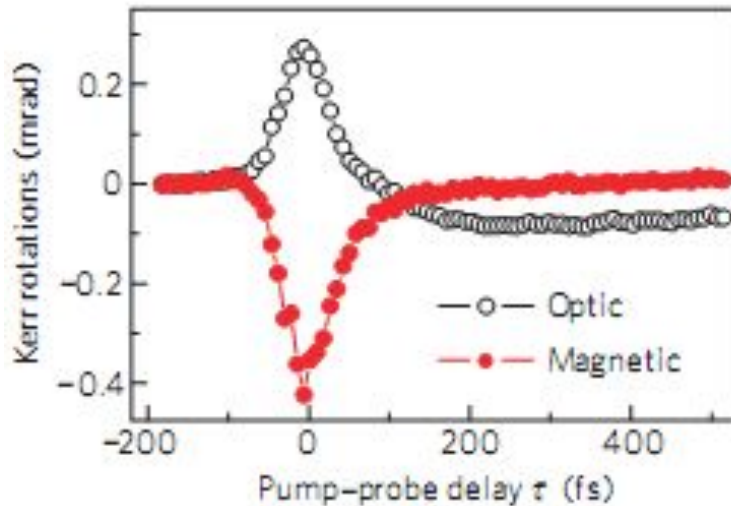
$\tau_0 = 60$ фс – длительность
накачки

$\tau = (100 - 300)$ фс – время
релаксации
сигнала

$$\tau \ll T_s, \tau_r$$

**E. Beaurepaire et al,
Phys. Rev. Lett. 76, (1996) 4250.**

Сверхбыстрое оптическое размагничивание никеля



Параметры pump:

длительность $\tau_{\text{pulse}} = 50$ фс,
флюенс $\Phi = (1 - 10^{-3})$ мДж/см²,
 $\lambda = 798$ нм.

Optic — электрооптический сигнал,
соответствующий возбуждению зарядов.

J.-Y. Bigot et al, Nature Physics, 5,
515 (2009).

Magnetic — магнитооптический сигнал,
соответствующий возбуждению спинов.

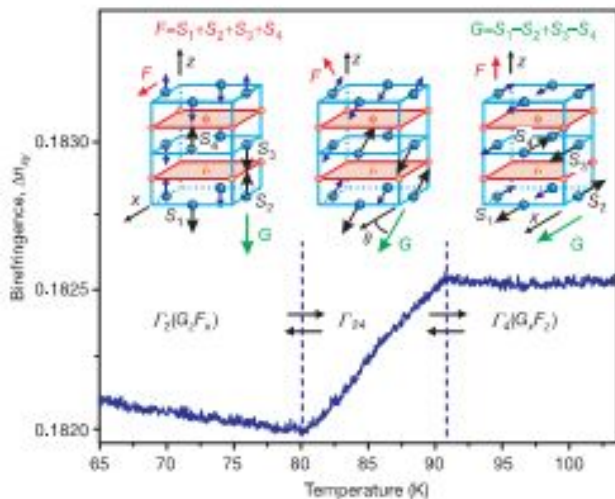
Результат: Возбуждение спинов
происходит во время действия pump (50
фс), как и возбуждение зарядов.

Фемтомагнетизм в антиферромагнетиках

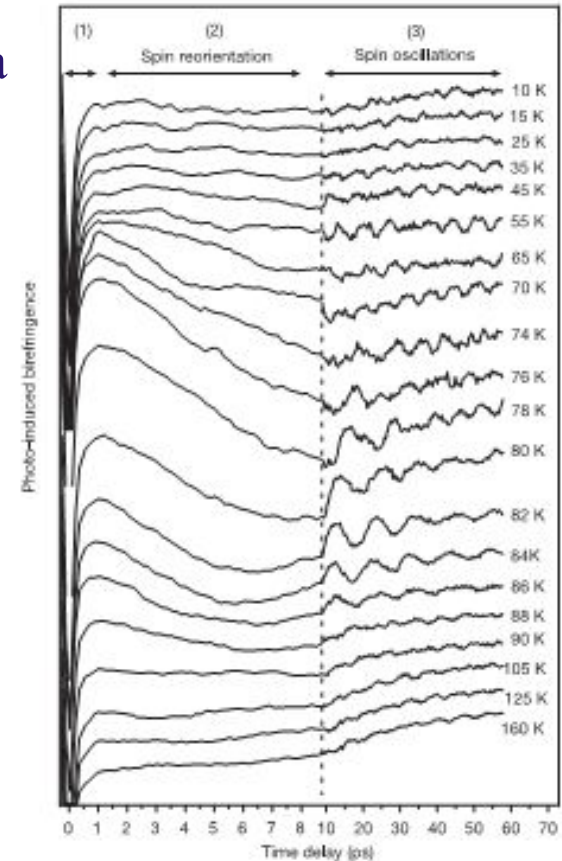
Вещество TmFeO_3 — двухподрешёточный антиферромагнетик с переориентацией вектора антиферромагнетизма.

Параметры pump:

$$\tau_{\text{pulse}} = 48 \text{ фс},$$
$$\lambda = 1200 \text{ нм}.$$



Результат: время установления спиновой температуры — 0,3 пс
время вращения L — 5 пс
период волновых колебаний — 10 пс

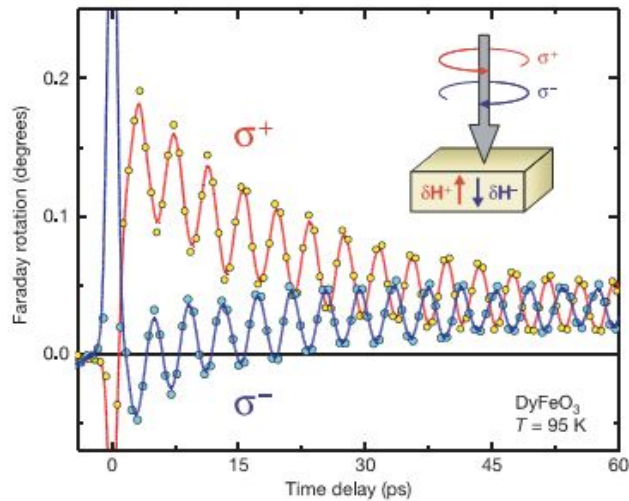


A. V. Kimel et al, Letters to Nature, 429, 850 (2004).

Фемтомагнетизм в антиферромагнетиках

(II)

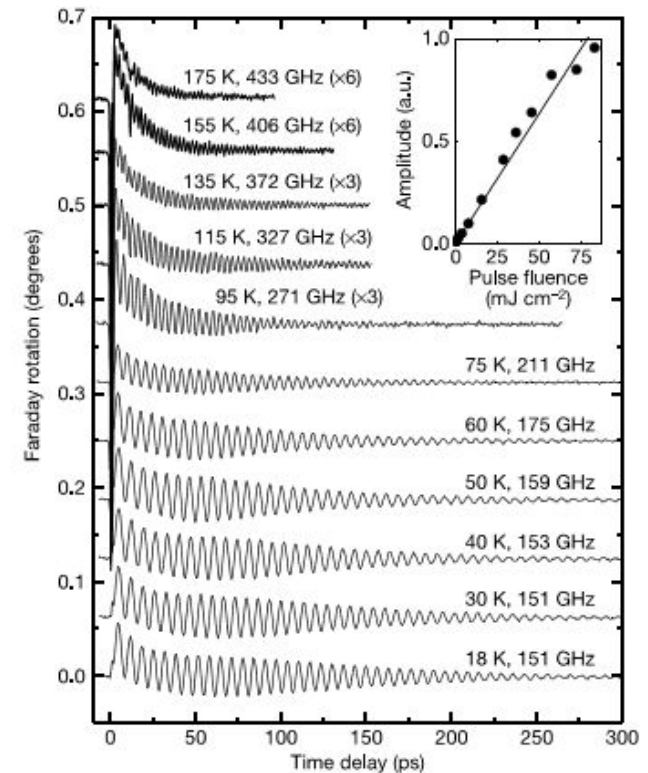
Вещество DyFeO_3 — двухподрешёточный антиферромагнетик с большим эффектом Фарадея $\theta = 3^\circ/\text{см}$.



Параметры pump:

$\tau_{\text{pulse}} = 200$ фс,
 $\Phi = 30$ мДж/см²,
 $\lambda = 1200$ нм,
две циркулярные
поляризации.

Результат: 1) нетепловое воздействие
(зависимость от поляризации)
2) частота осцилляций зависит от
температуры.

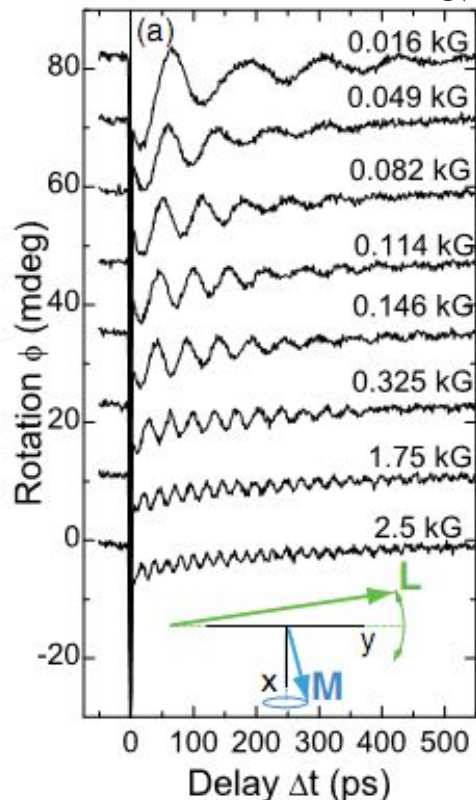


A. V. Kimel et al, Nature, 435,
655 (2005).

Фемтомагнетизм в антиферромагнетиках

(III)

Вещество FeVO_3 — двухподрешёточный антиферромагнетик с высокой температурой Нееля $T_N = 348$ К.



A. M. Kalashnikova et al, Phys. Rev. Lett., 99, 167505 (2007).

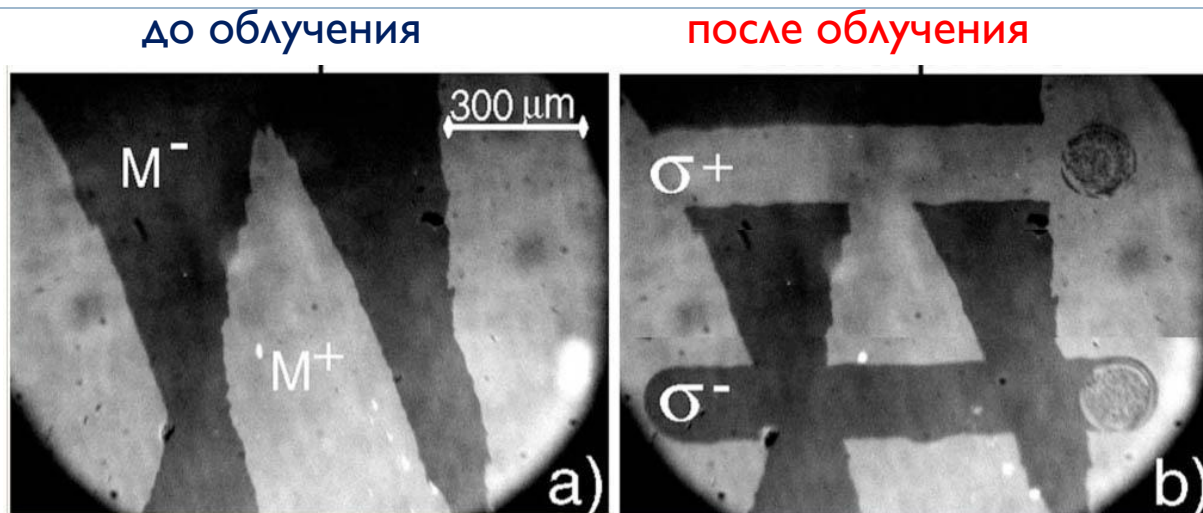
Параметры pump:

$$\tau_{\text{pulse}} = 150 \text{ фс}, \Phi = (1 - 60) \text{ мДж/см}^2, \\ \lambda = 1000 \text{ нм},$$

поляризация: циркулярная и линейная

Результат: Эффекты наблюдаются не только для циркулярно, но и для линейно поляризованной накачки.

Сверхбыстрое оптическое перемагничивание



Распределение намагниченности в плёнке Gd-Fe-Co с перпендикулярной анизотропией: до облучения (a), после облучения (b).

Из статьи C. D. Stanciu et al. *Phys. Rev. Lett.* **99**, 047601 (2007).

$T_{\text{pulse}} = 40$ фс — длительность одного импульса,

$\lambda = 800$ нм — длина волны

$f = 1$ кГц — частота следования импульсов,

$v = 30$ мкм/с — скорость сканирования,

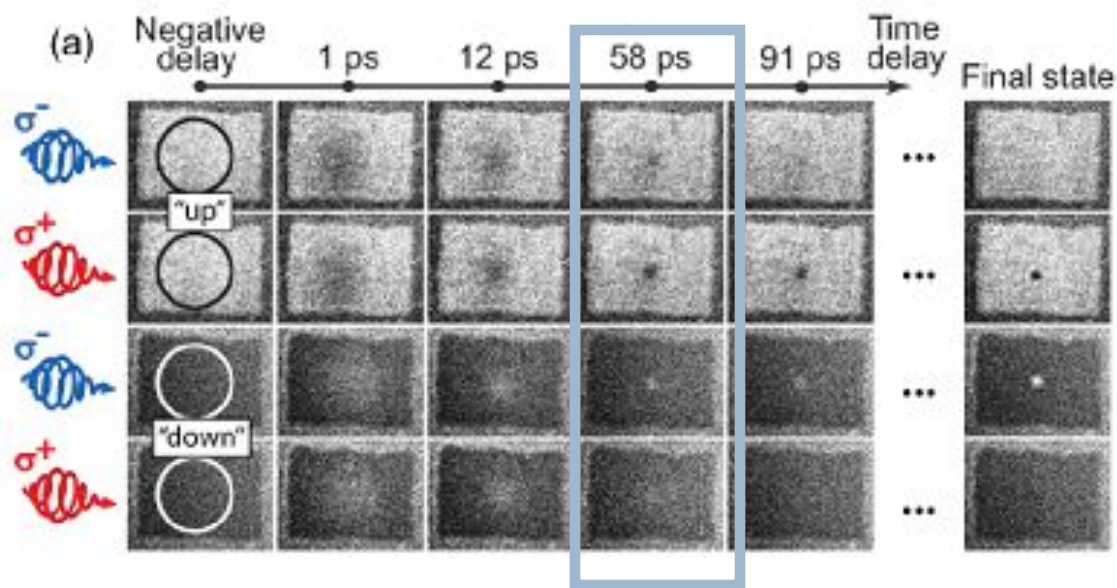
$\Phi = 11,4$ мДж/см² — флюэнс накачки.



Оптическое перемагничивание фемтосекундными импульсами

К. Vahaplar, A. M. Kalashnikova, A. V. Kimel, D. Hinzke, U. Nowak, R. Chantrell, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk, Th. Rasing Phys. Rev. Lett., 103, 117201 (2009).

Вещество $\text{Gd}_{22}\text{Fe}_{74,6}\text{Co}_{3,4}$ — аморфная ферромагнитная плёнка толщиной 20 нм, с наведённой анизотропией.



Результат: намагниченность исчезает, затем восстанавливается в направлении, определяемом киральностью накачки.

СВЕРХБЫСТРАЯ МАГНИТНАЯ ДИНАМИКА В МЕТАЛЛАХ И ДИЭЛЕКТРИКАХ

Размагничивание

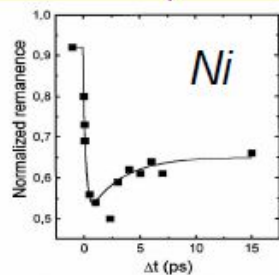
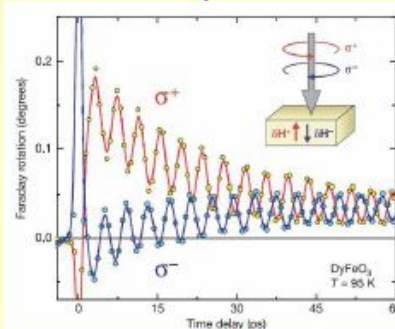


FIG. 2. Transient remanent longitudinal MOKE signal of a Ni(20 nm)/MgF₂(100 nm) film for 7 mJ cm⁻² pump fluence. The signal is normalized to the signal measured in the absence of pump beam. The line is a guide to the eye.

Никель, сплавы

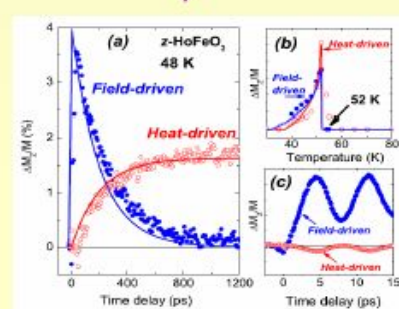
Нагрев ~1 пс и затем термализация между электронной, спиновой и фононной подсистемами.

Возбуждение прецессии



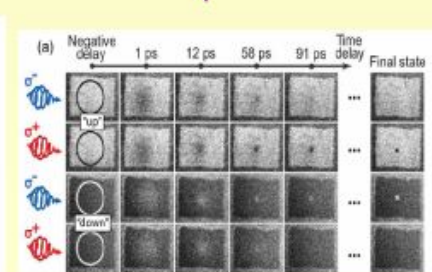
RFeO₃, FeVO₃
магнит. сплавы

Фазовые переходы



RFeO₃, FeVO₃,
FeRh (afm-fm)

Переключение намагниченности



GdFeCo

Нетепловые и тепловые процессы. Передача энергии и углового момента лазерного импульса в магнитную систему.

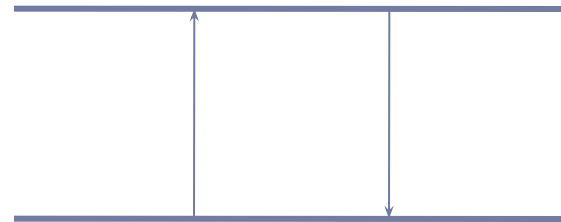
В чём состоит принципиальное
отличие фемтосекундной накачки от
наносекундной?



Различие первое – амплитуда

Пример: двухуровневая система
Заселённость верхнего
уровня:

$$n_{ex} = \sin^2(E_{pulse} \tau_{pulse} d)$$



Одинаковое влияние на эту систему 10
фемтосекундного и наносекундного импульса будет
при условии

$$E_{pulse}^{femto} = 10^5 \cdot E_{pulse}^{nano}$$

Coherent ultrafast magnetism induced by femtosecond laser pulses

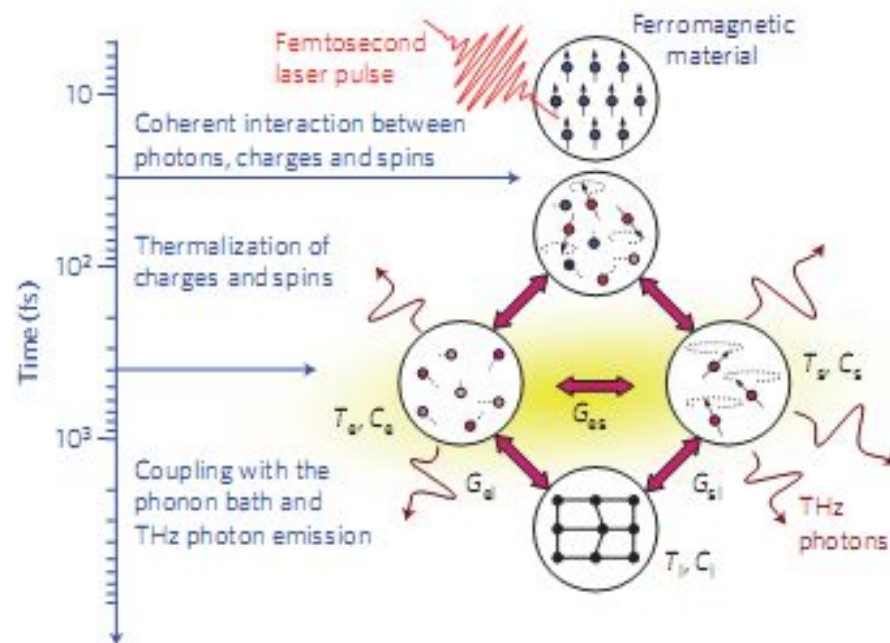
Jean-Yves Bigot[★], Mircea Vomir and Eric Beaurepaire

Времена возбуждения S и L порядка десятки fs

Времена релаксации S и L порядка 10^3 fs

Дополнительное взаимодействие с электрическим полем накачки

$$\text{Term (b): } -i \frac{e\hbar}{8m^2c^2} \sigma \nabla \times \mathbf{E}$$



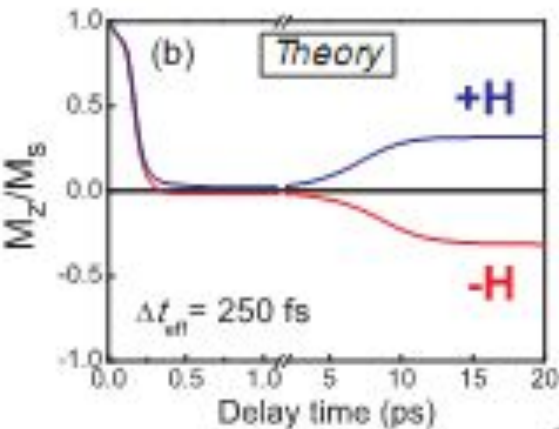


Ultrafast Path for Optical Magnetization Reversal via a Strongly Nonequilibrium State

K. Vahaplar,^{1,*} A. M. Kalashnikova,^{1,5} A. V. Kimel,¹ D. Hinzke,² U. Nowak,² R. Chantrell,³ A. Tsukamoto,^{4,6} A. Itoh,⁴
A. Kirilyuk,¹ and Th. Rasing¹

Динамика спинов под действием мощной
оптической накачки с эффективным магнитным
полем $H_{\text{eff}} = 20 \text{ T}$
и длительностью $t_{\text{eff}} = 250 \text{ фс}$

Численный анализ для объёма $30 \text{ nm} \times 30 \times \text{nm} \times 30 \text{ nm}$



Результат – 3 стадии релаксации:

1-ая стадия – нагрев до температуры $T \approx 1000 \text{ K}$ ($t = 0,5 \text{ пс}$)

2-ая стадия – остывание до $T < T_c$ ($t = 10 \text{ пс}$)

3-ая стадия – формирование домена ($t = 30 \text{ пс}$).

Направление намагниченности домена зависит от
ориентации H_{eff}

«Нагрев» до 1000 K это не тепловой, а динамический хаос.

Различие второе – неопределённость в ширине спектра накачки

$$\Delta E \tau_{\text{pulse}} \geq \hbar$$

1. Неопределённость в частоте накачки

$$\Delta \omega_{\text{pulse}} = \frac{2\pi}{\tau_{\text{pulse}}} = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ Гц.}$$

2. Нерезонансность возбуждения

$$\Delta \omega_{\text{pulse}} \gg \Gamma \text{ (ширина линии).}$$

3. Время жизни возбуждённого состояния

$$\Delta t \geq \tau_{\text{pulse}} \quad \Delta t \approx 100 \text{ фс.}$$

4. Релаксация возбуждённого состояния — спонтанное излучение.



Спонтанное излучение

а. Простой пример

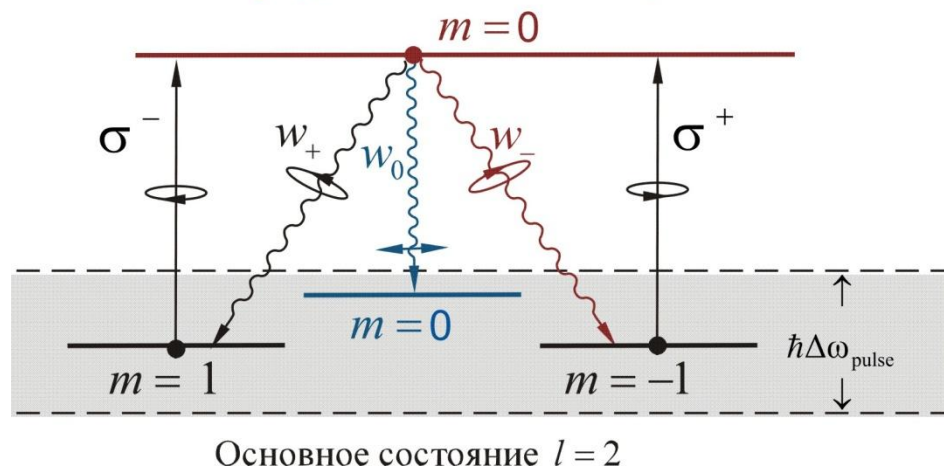
$$\Delta m = 1 \quad w_+ = w_- = w$$

$$\psi = w_+^{1/2} e^{i\varphi_1} \psi_1 + w_-^{1/2} e^{i\varphi_{-1}} \psi_{-1} + (1 - 2w)^{1/2} e^{i\varphi_1} \psi_0$$

$$l = \langle \psi | l_z | \psi \rangle = \square w_+^2 - \square w_-^2 = 0$$

$$L = \square \frac{N}{2} - \square \left(\frac{N}{2} - \Delta N \right) = \square \Delta N$$

Возбуждённое состояние $l = 1 \quad \Delta m = \pm 1$



ΔN — число возбуждённых атомов,
 N — число атомов

L — хранилище исходной оптической когерентности?

Проблема стабилизации l

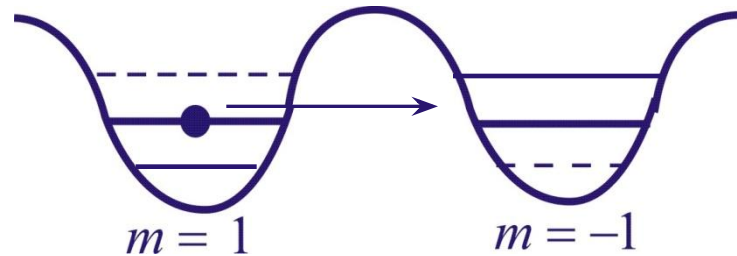
а. Осцилляции l

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi$$

$$\hat{H} \psi_n = \varepsilon_n \psi_n \quad \hat{H} = \hat{V}_{cf}$$

$$\psi_n = \psi_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{+1} \pm \psi_{-1})$$

$$\psi(t) = \psi_{+1} \cos \Omega t + \psi_{-1} \sin \Omega t; \quad \Omega = \Omega(V_{cf})$$



б. Подавление осцилляций l

$$\hat{H} = \hat{V}_{cf} + \hat{V}_{ll}; \quad \hat{V}_{ll} = - \sum_j G \langle l \rangle l_j$$

Проблема стабилизации l

в. Модели для V_{ll}

- орбитальный ферромагнетизм

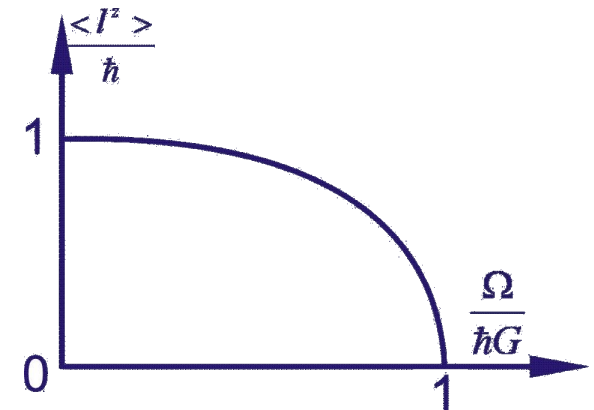
- аналог взаимодействия квадрупольных атомных моментов (переходы $m \leftrightarrow -m$ связаны с передачей углового момента к решётке)

г. Решение стационарного уравнения

$$\hat{H}\psi_n = (\hat{V}_{cf} + \hat{V}_{ll})\psi_n = E_n\psi_n$$

При $\Omega = \hbar G$ решалось уравнение $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi$

С начальным условием $\langle \psi | \hat{l}_z | \psi \rangle = \hbar/4$



$$l(t) = \langle \psi(t) | \hat{l}_z | \psi(t) \rangle = \hbar(1 - 0.1 \cos 2.12\Omega t)$$

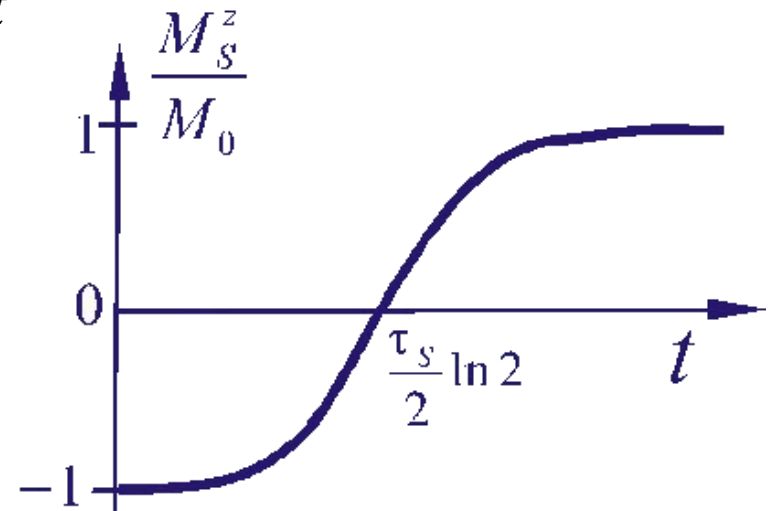
Спиновая переориентация

$$V_{S.O.} = -\lambda \mathbf{M}_L \mathbf{M}_S; \quad M_L = \gamma_L L; \quad M_S = \gamma_S S$$

$$\frac{d\mathbf{M}_S}{dt} = \gamma_S [\mathbf{M}_S, \mathbf{H}_S] + \mathbf{R}_S; \quad \frac{d\mathbf{M}_L}{dt} = \gamma_L [\mathbf{M}_L, \mathbf{H}_L] + \mathbf{R}_L$$

$$H_S = \lambda M_L; \quad H_L = H_{cf} + \lambda M_S$$

$$\tau_S^{-1} = \left(\frac{H_{SO}}{H_{cf}} \right)^2 \left(\frac{\gamma_S}{\gamma_L} \right)^2 \frac{S}{L} \tau_L^{-1}$$



$$M_S^z(t) = -M_0 \left[1 + \frac{2\tau_S}{T_S} \left(e^{-\frac{2t}{\tau_S}} - 1 \right) \cdot \left(2e^{-\frac{2t}{\tau_S}} + \frac{\tau_S}{T_S} \right)^{-1} \right]$$

Различие третье –
различная крутизна фронтов импульсов
нано- и фемтосекундной накачек

Планируется изучить влияние этого
факта на магнитооптические
сигналы от пробных импульсов.



Область исследований «фемтомагнетизм»
сформировалась в последнее десятилетие.

До сих пор нет единого представления о
природе этих явлений.



Спасибо за внимание!

