

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<sup>1\*</sup>, Wolfgang Hübner<sup>1</sup>, Eric Beaurepaire<sup>2</sup>, and Jean-Yves Bigot<sup>2</sup>

FEMTOMAGNETISM

## Magnetism in step with light

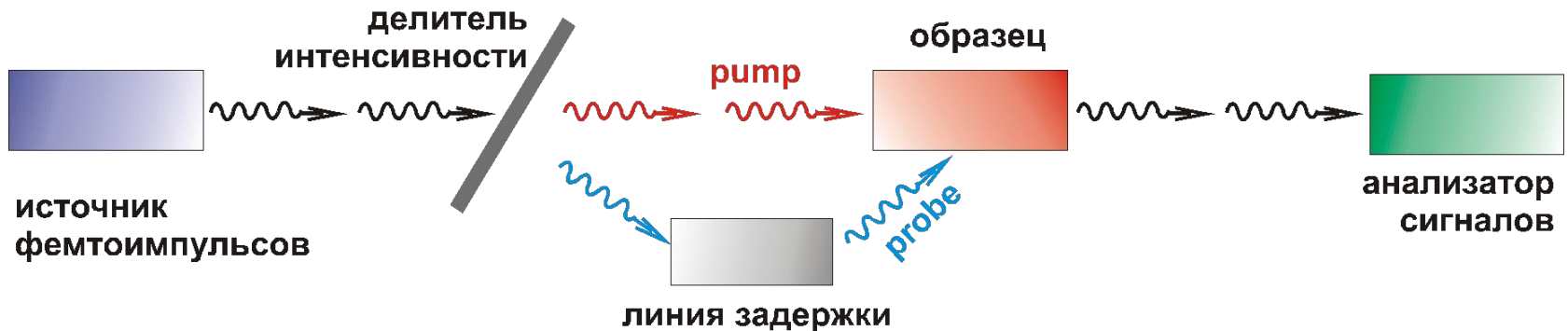
Femtosecond laser pulses can demagnetize ferromagnetic metallic thin films on an ultrafast timescale. Studying how magnetic films react during optical excitation provides a better understanding of this so-called femtomagnetism.

Uwe Bovensiepen

---



# Метод накачка-проба (pump-probe)

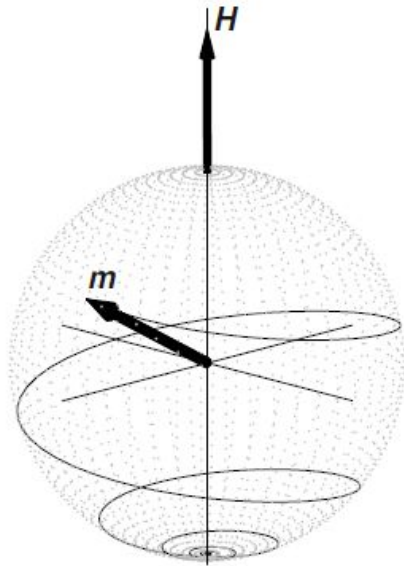


Основной метод для изучения сверхбыстрых процессов .

**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

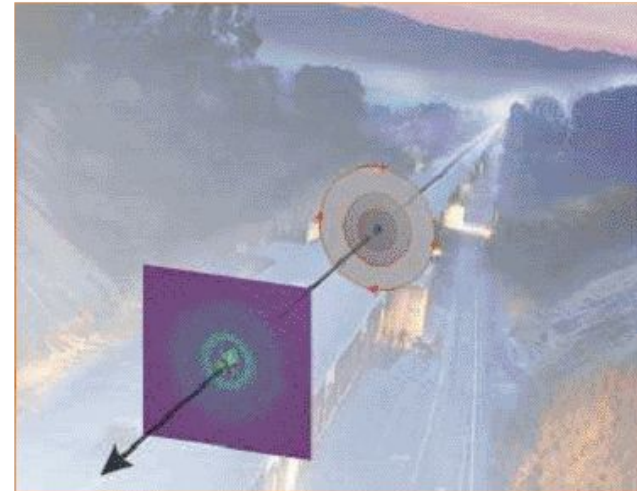
I. Tudosa<sup>1</sup>, C. Stamm<sup>1</sup>, A. B. Kashuba<sup>2</sup>, F. King<sup>3</sup>, H. C. Siegmann<sup>1</sup>, J. Stöhr<sup>1</sup>, G. Ju<sup>4</sup>, B. Lu<sup>5</sup> & D. Weller<sup>2</sup>

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

**(10<sup>-14</sup> → 10<sup>-12</sup> s) Femtomagnetism**

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

Magneto-crystalline anisotropy  $\sum V_k c_{d\sigma}^+ c_{k\sigma}$

Coupling with photons: TeraHertz emission

**Precession of magnetization**

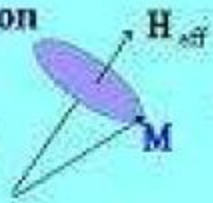
**(10<sup>-11</sup> s)**  $\frac{dM}{dt} = \gamma M \wedge H_{eff}$

and damping

**(10<sup>-9</sup> s)**  $\left(\frac{dM}{dt}\right)_{relax} = - \begin{cases} \frac{M}{\tau} & \text{(Bloch)} \\ \frac{\alpha}{M} M \wedge \frac{dM}{dt} & \text{(Gilbert)} \end{cases}$

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

**10 GHz - 100 GHz**

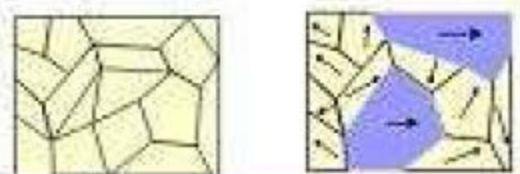


**Domain wall motion : nucleation-propagation**

**1 kHz - 1 GHz**

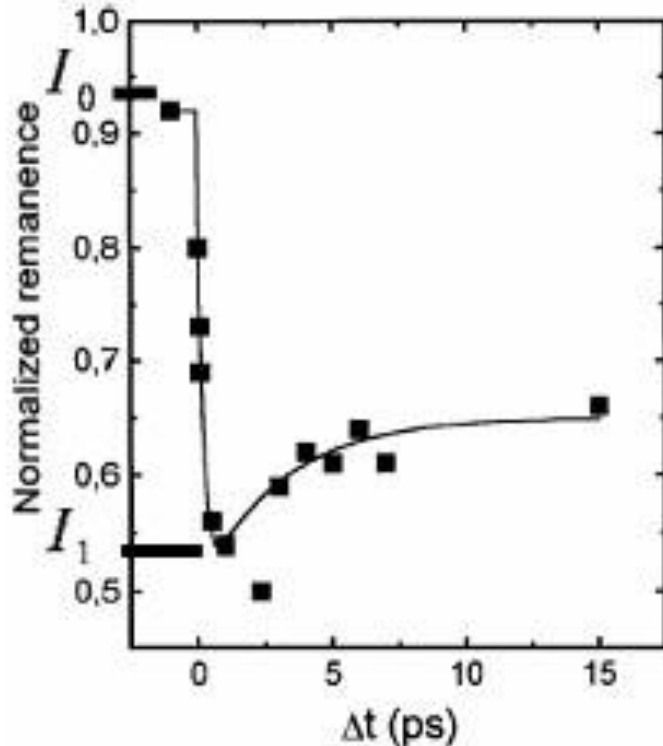
$H \rightarrow$

**(10<sup>-9</sup> → 10<sup>-3</sup> s)**



Из презентации  
Р. В. Писарева,  
ФКС-2010

# Первый эксперимент



Зависимость интенсивности магнитооптического сигнала Керра от времени задержки после импульса накачки  $\Delta t$  (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

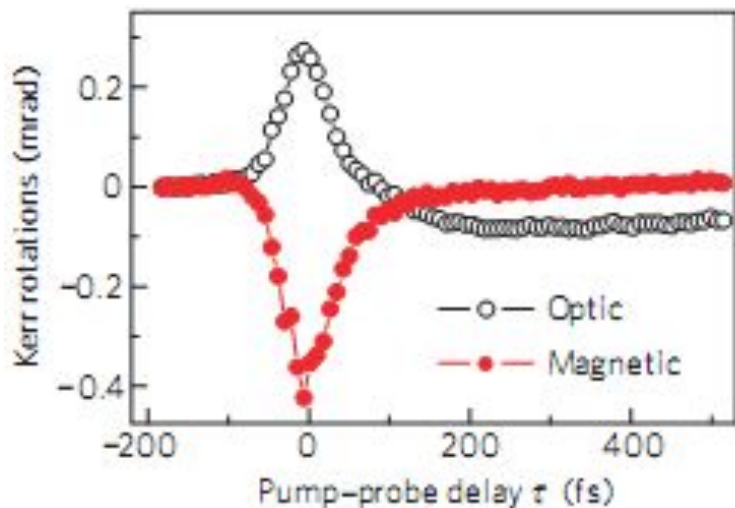
$\tau = (100 - 300)$  фс – время релаксации сигнала

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

**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/см<sup>2</sup>,  
 $\lambda = 798$  нм.

Optic — электрооптический сигнал,  
соответствующий возбуждению зарядов.

Magnetic — магнитооптический сигнал,  
соответствующий возбуждению спинов.

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

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

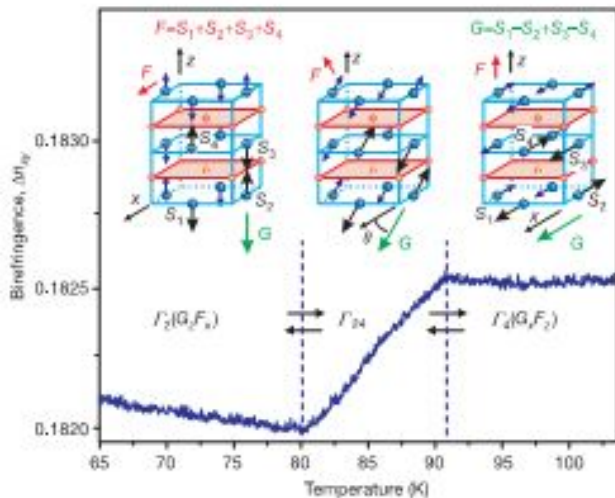
# Фемтомагнетизм в антиферромагнетиках

Вещество  $\text{TmFeO}_3$  — двухподрешёточный антиферромагнетик с переориентацией вектора антиферромагнетизма.

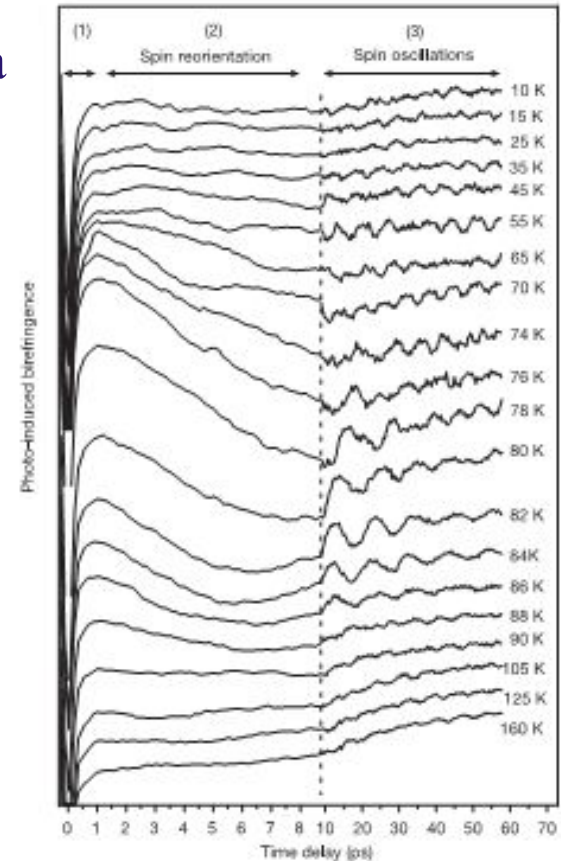
Параметры pump:

$$\tau_{\text{pulse}} = 48 \text{ фс},$$

$$\lambda = 1200 \text{ нм}.$$



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

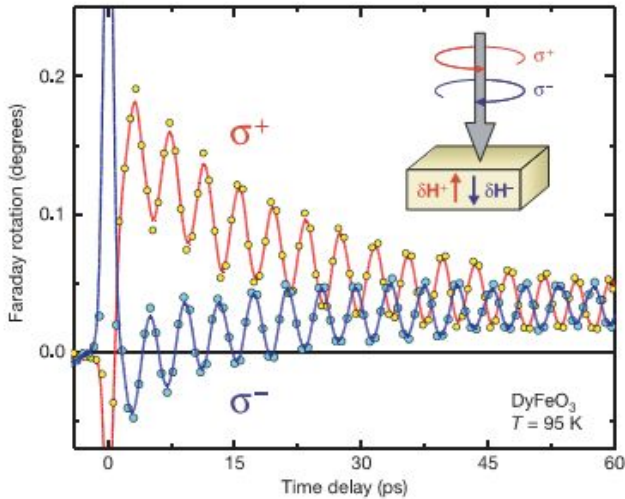


A. V. Kimel et al, Letters to Nature, 429, 850 (2004).

# Фемтомагнетизм в антиферромагнетиках

(II)

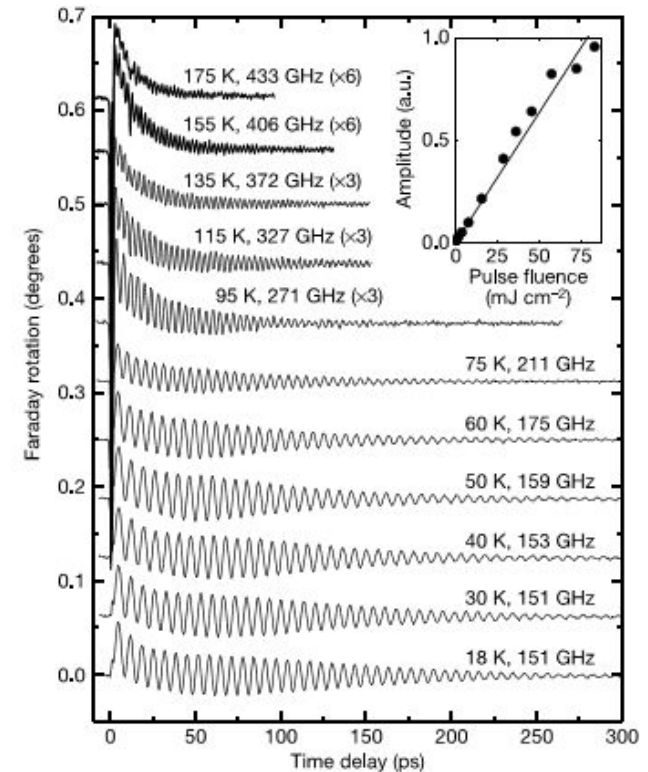
Вещество  $\text{DyFeO}_3$  — двухподрешёточный антиферромагнетик с большим эффектом Фарадея  $\theta = 3$  °/см.



## Параметры pump:

$\tau_{\text{pulse}} = 200 \text{ фс},$   
 $\Phi = 30 \text{ мДж/см}^2,$   
 $\lambda = 1200 \text{ нм},$   
две циркулярные  
поляризации.

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

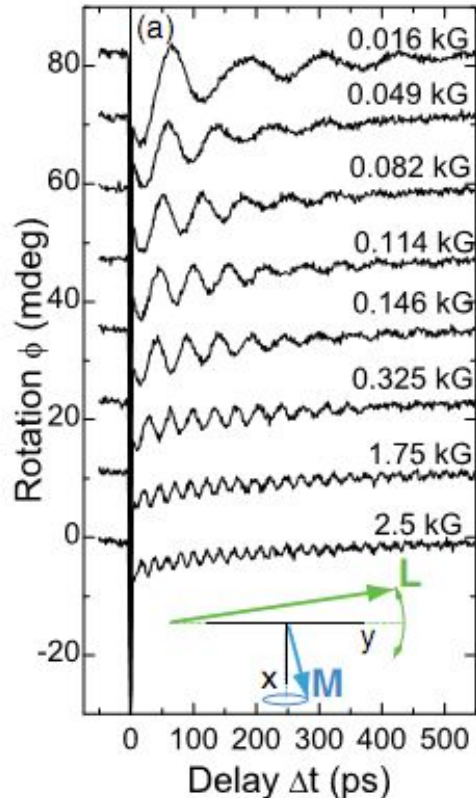


A. V. Kimel et al, Nature, 435,  
655 (2005).

# Фемтомагнетизм в антиферромагнетиках

(III)

Вещество  $\text{FeVO}_3$  — двухподрешёточный антиферромагнетик с высокой температурой Нееля  $T_N = 348$  К.



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

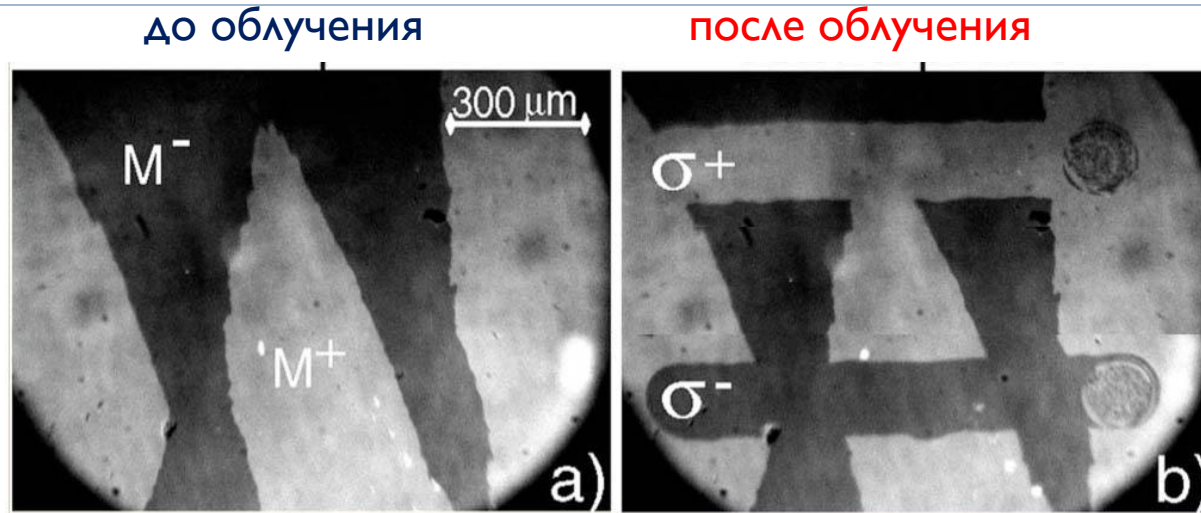
## Параметры pump:

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

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,

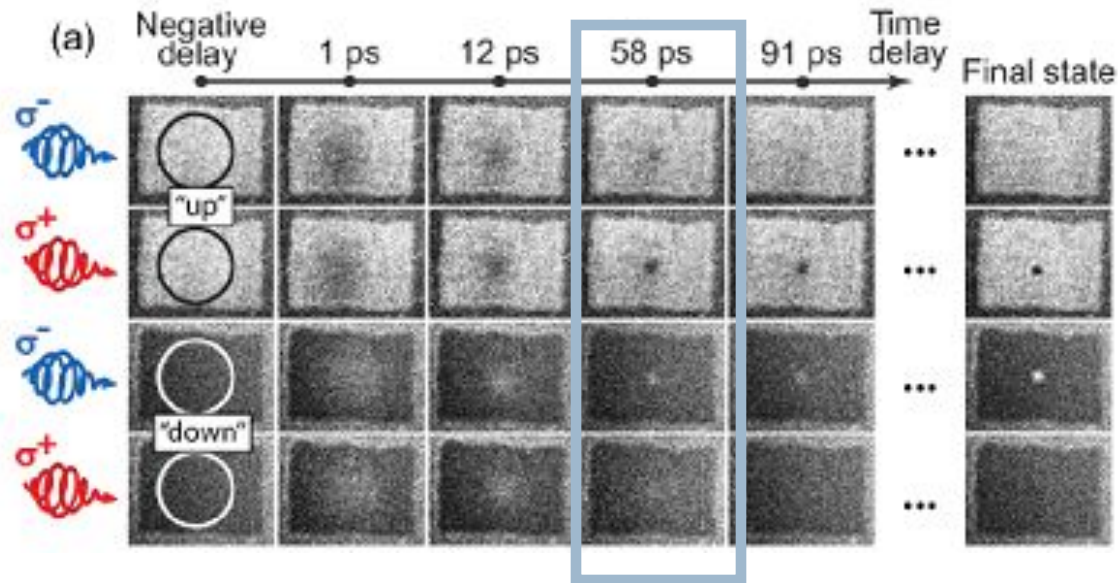
$\Phi = 11,4$  мДж/см<sup>2</sup> — флюэнс накачки.



# 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  $Gd_{22}Fe_{74.6}Co_{3.4}$  — 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

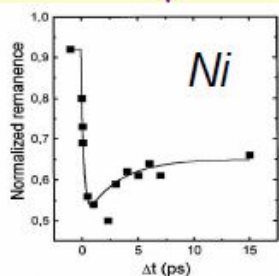
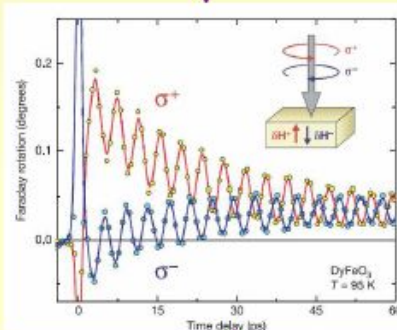


FIG. 2. Transient remanent longitudinal MOKE signal of a Ni(20 nm)/MgF<sub>2</sub>(100 nm) film for 7 mJ cm<sup>-2</sup> pump fluence. The signal is normalized to the signal measured in the absence of pump beam. The line is a guide to the eye.

Никель, сплавы

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

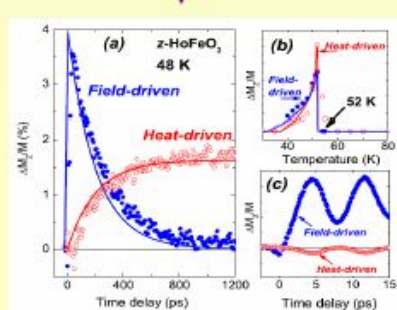
Возбуждение прецессии



RFeO<sub>3</sub>, FeVO<sub>3</sub>  
магнит. сплавы

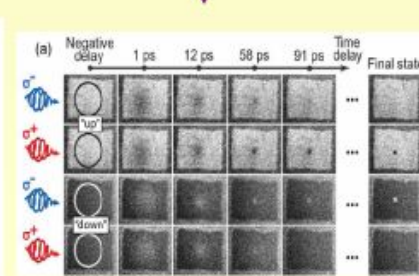
Нетепловые и тепловые процессы. Передача энергии и углового момента лазерного импульса в магнитную систему.

Фазовые переходы



RFeO<sub>3</sub>, FeVO<sub>3</sub>,  
FeRh (afm-fm)

Переключение намагниченности



GdFeCo

В чём состоит принципиальное отличие фемтосекундной накачки от наносекундной?



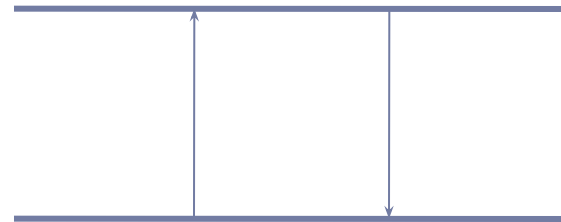


# Различие первое – амплитуда

---

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

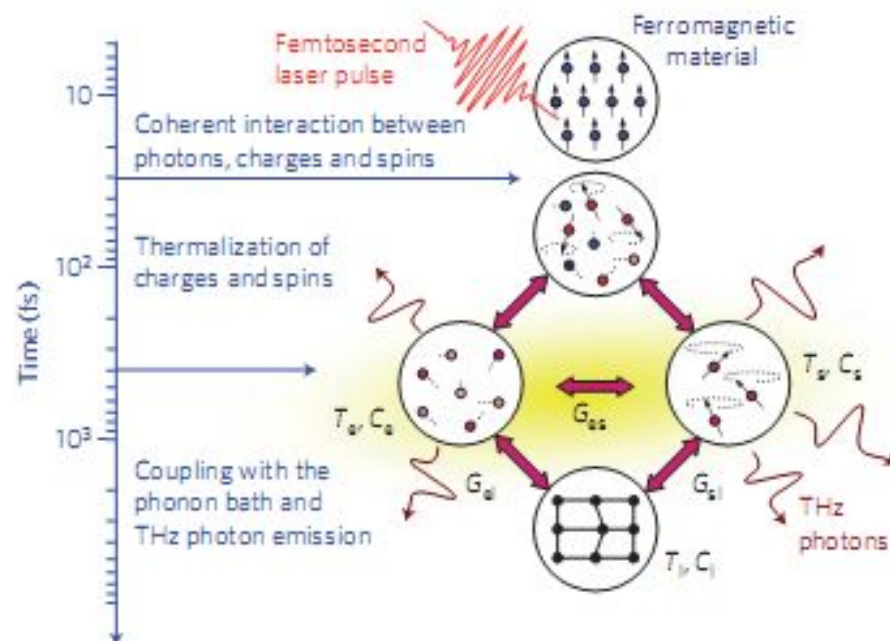
Jean-Yves Bigot\*, Mircea Vomir and Eric Beaurepaire

Времена возбуждения S и L порядка десятки fs

Времена релаксации S и L порядка  $10^3$  fs

Дополнительное взаимодействие с электрическим полем накачки

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



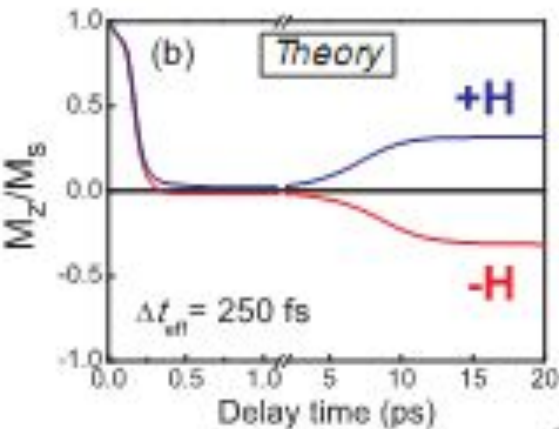


## Ultrafast Path for Optical Magnetization Reversal via a Strongly Nonequilibrium State

K. Vahaplar,<sup>1,\*</sup> A. M. Kalashnikova,<sup>1,5</sup> A. V. Kimel,<sup>1</sup> D. Hinzke,<sup>2</sup> U. Nowak,<sup>2</sup> R. Chantrell,<sup>3</sup> A. Tsukamoto,<sup>4,6</sup> A. Itoh,<sup>4</sup> A. Kirilyuk,<sup>1</sup> and Th. Rasing<sup>1</sup>

Динамика спинов под действием мощной оптической накачки с эффективным магнитным полем  $H_{\text{eff}} = 20$  Т и длительностью  $t_{\text{eff}} = 250$  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  $T \approx 1000$  К ( $t = 0,5$  пс)

2-ая стадия – остывание до  $T < T_C$  ( $t = 10$  пс)

3-ая стадия – формирование домена ( $t = 30$  пс).

Направление намагниченности домена зависит от ориентации  $H_{\text{eff}}$

«Нагрев» до 1000 К 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

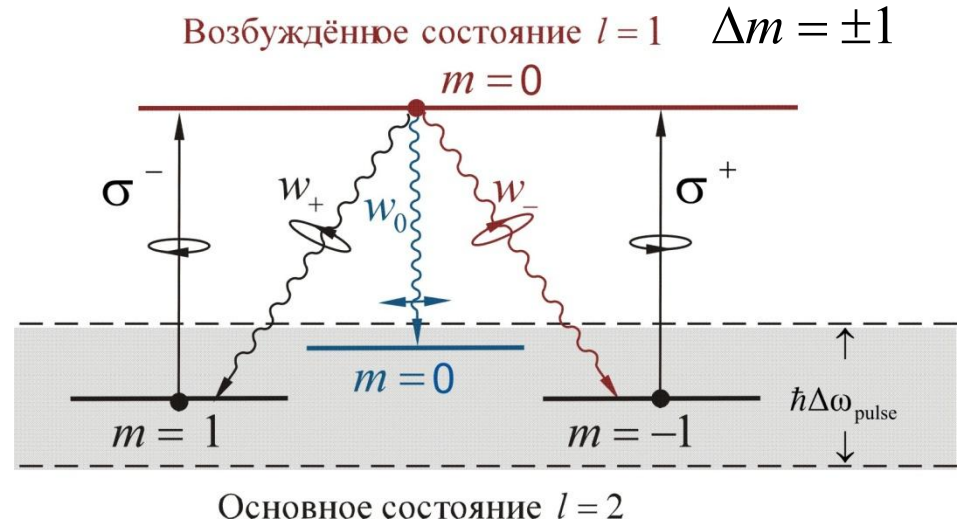
## а. Простой пример

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

$$\psi = w_+^{1/2} e^{i\varphi_1} \psi_1 + w_-^{1/2} e^{i\varphi_{-1}} \psi_{-1} + (1 - 2w)^{1/2} e^{i\varphi_0} \psi_0$$

$$l = \langle \psi | \hat{l}_z | \psi \rangle = \sum w_+^2 - \sum w_-^2 = 0$$

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



$\Delta N$  — число возбуждённых атомов,  
 $N$  — число атомов

**L — хранилище исходной оптической когерентности?**

# Проблема стабилизации $l$

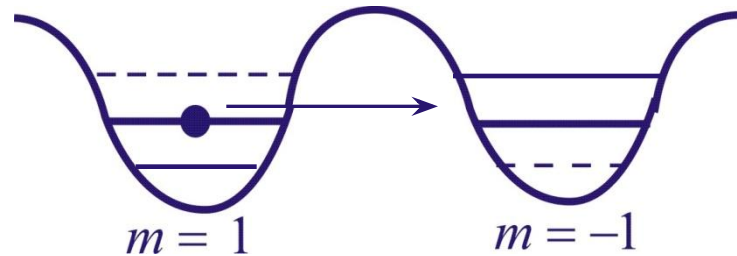
а. Осцилляции  $l$

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

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

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

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



б. Подавление осцилляций  $l$

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

# Проблема стабилизации $l$

в. Модели для  $V_{ll}$

- орбитальный ферромагнетизм

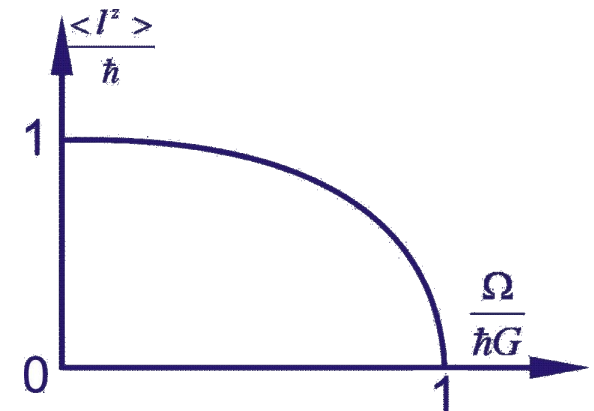
- аналог взаимодействия квадрупольных атомных моментов (переходы  $m \leftrightarrow -m$  связаны с передачей углового момента к решётке)

г. Решение стационарного уравнения

$$\mathbf{H} \psi_n = (V_{cf} + V_{ll}) \psi_n = E_n \psi_n$$

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

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



$$l(t) = \langle \psi(t) | \hat{l}_z | \psi(t) \rangle = \hbar (1 - 0,1 \cos 2,12 \Omega t)$$

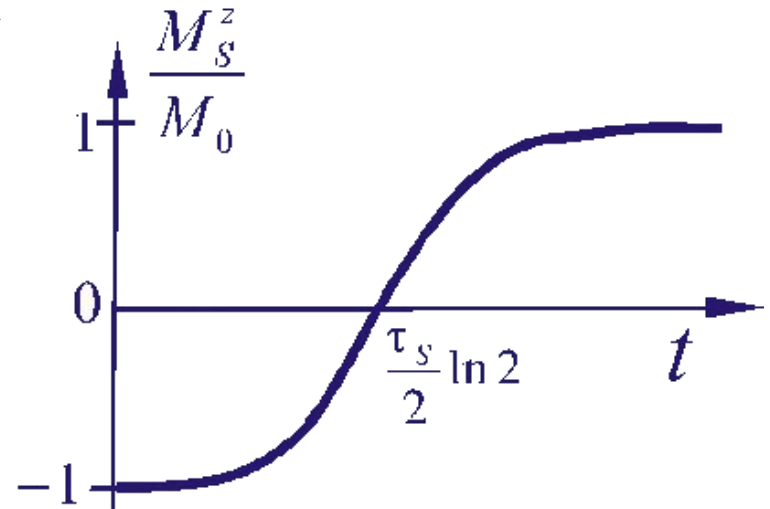
# Спиновая переориентация

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

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

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

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



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



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!

