

СВЕРХБЫСТРАЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ДИНАМИКА НАМАГНИЧЕННОСТИ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Александра Калашникова

*Лаборатория физики ферроиков
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН*

ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН

В. Н. Гриднев

П. А. Усачев

Р. В. Писарев

МЭИ

А. М. Балбашов

Radboud University Nijmegen

D. Bossini

J. A. de Jong

I. Razdolski

A. V. Kimel

A. Kirilyuk

Th. Rasing

XIV Школа-конференция «Проблемы физики твердого тела и высоких давлений»

Сочи, Россия

11 сентября 2015

План лекции

Проблема скорости управления намагниченностью

Взаимодействие магнитоупорядоченных сред
с лазерным излучением:

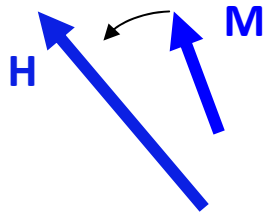
- Магнитооптика
- Оптомагнетизм

Лазерно-индуцированная динамика намагниченности
в диэлектриках

- Возбуждение и управление спиновыми волнами
- Переориентация намагниченности и управление ею

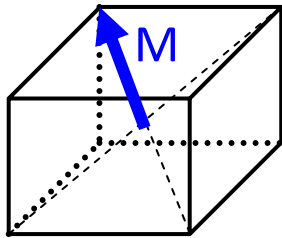
Магнитоупорядоченные среды

Взаимодействие
с внешним магнитным полем



$$U_H = -\mathbf{M}\mathbf{H}$$

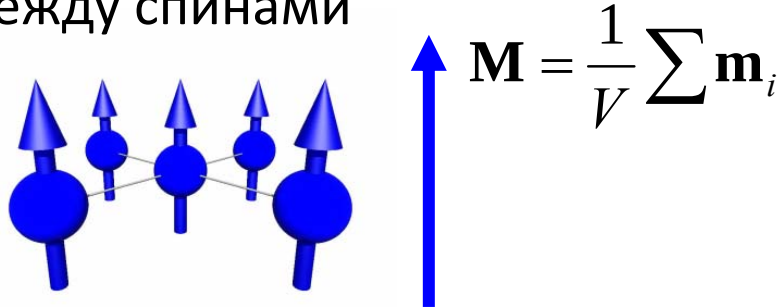
Взаимодействие с решеткой



$$U_A = K \cos^2 \alpha + \dots$$

Магнитокристаллическая
анизотропия

Обменное взаимодействие
между спинами



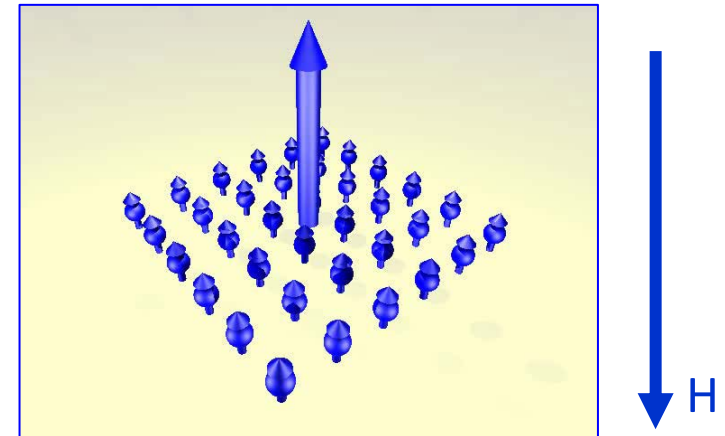
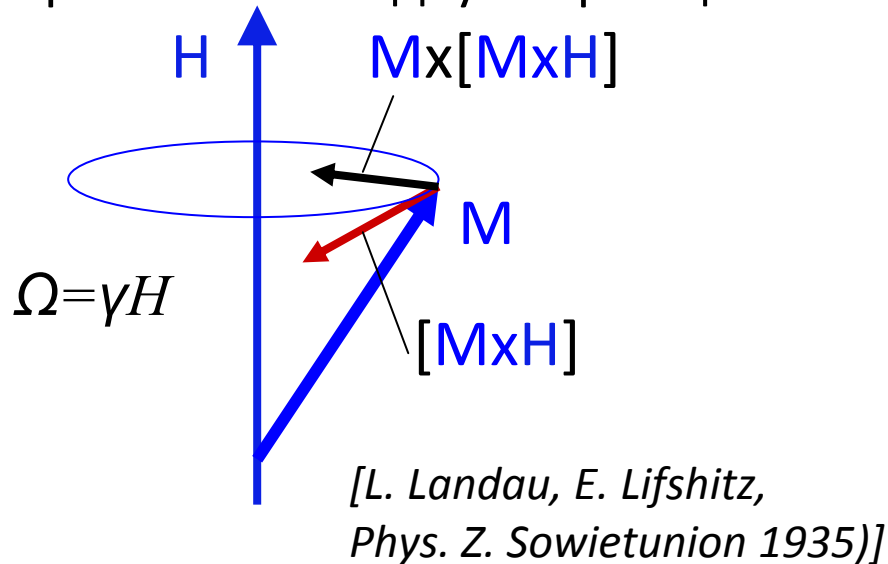
$$U_E = -J_{ij} \mathbf{m}_i \mathbf{m}_j$$

Магнитный порядок:

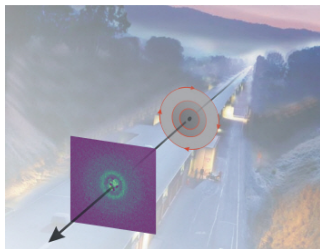
- Ферромагнитный ($J > 0$)
- Антиферромагнитный ($J < 0$)
- Ферримагнитный.....

Как быстро можно переключить намагниченность?

Уравнение Ландау-Лифшица



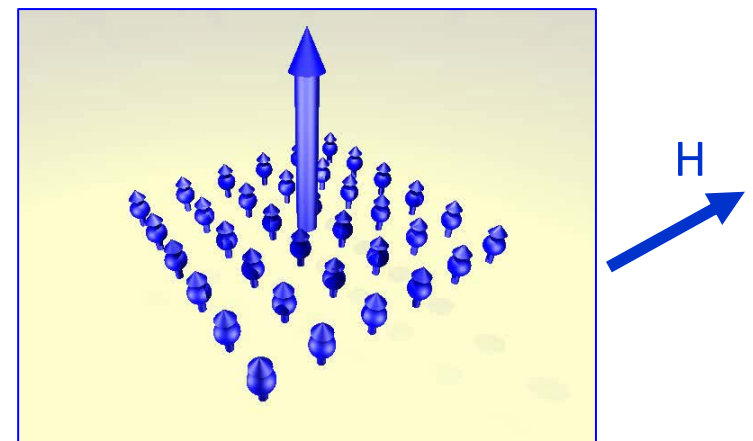
Характерное время - наносекунды



few T; 2.3 ps

“No matter how short and strong the magnetic-field pulse, magnetic recording cannot be made ever faster”

[I. Tudosa et al., *Nature* (2004);
C. H. Back et al., *Science* (1999)]

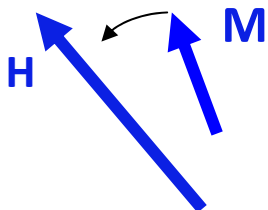


[Th. Gerrits et al., *Nature* (2002)]

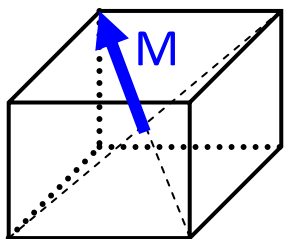
Характерные времена в магнетизме

Взаимодействие

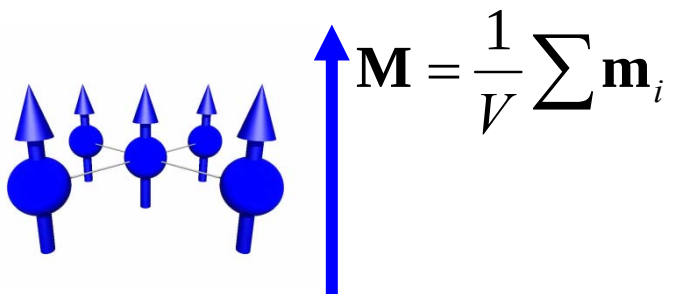
Зеймановское



Спин-решеточное



Обменное



Внешнее воздействие

Магнитное
поле

Спин-
поляризованный
ток

Лазерный
импульс

Время

1 ns

100 ps

10 ps

1 ps

100 fs

10 fs

1 fs

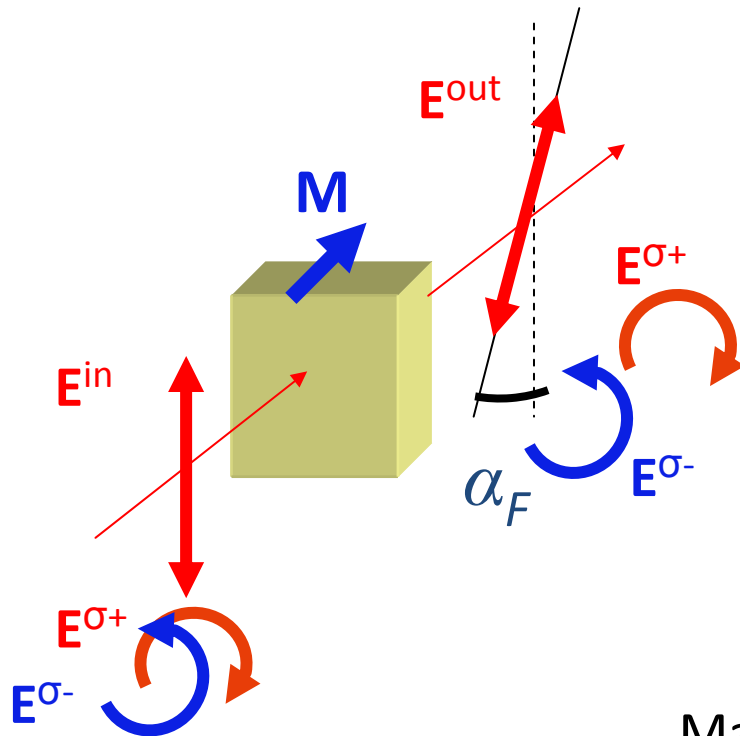
Сверхбыстрый магнетизм:
"terra incognita"



Взаимодействие света с магнитоупорядоченной средой

$$\Phi_{\text{int}} = \varepsilon_{ij} E_i E_j^* + \alpha_{ijk} E_i E_j^* M_k + \beta_{ijkl} E_i E_j^* M_k M_l + \dots$$

Изотропный материал
намагниченный вдоль z



Эффект Фарадея

[M. Faraday, 1845]

Тензор диэлектрической
проницаемости:

$$\hat{\varepsilon} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{E} \partial \mathbf{E}^*} = \begin{pmatrix} \varepsilon_0 & -\alpha_{xyz} M_z \\ \alpha_{xyz} M_z & \varepsilon_0 \end{pmatrix}$$

Собственные поляризации:

$$\mathbf{E} = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix}$$

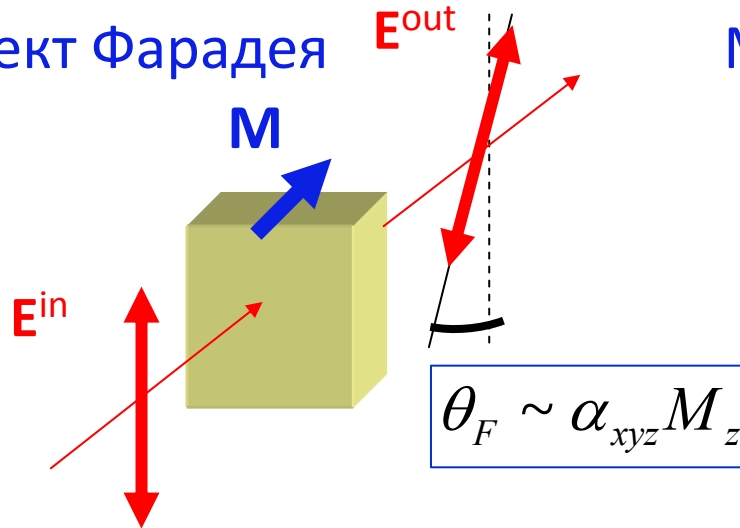
Магнитное круговое двупреломление:

$$\Delta n_{\sigma^+ - \sigma^-} \sim \alpha_{xyz} M_z$$

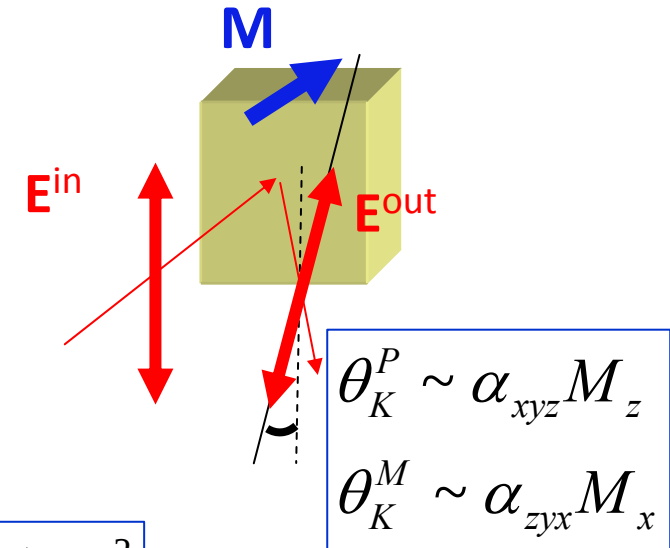
Взаимодействие света с магнитоупорядоченной средой

$$\Phi_{\text{int}} = \varepsilon_{ij} E_i E_j^* + \alpha_{ijk} E_i E_j^* M_k + \beta_{ijkl} E_i E_j^* M_k M_l + \dots$$

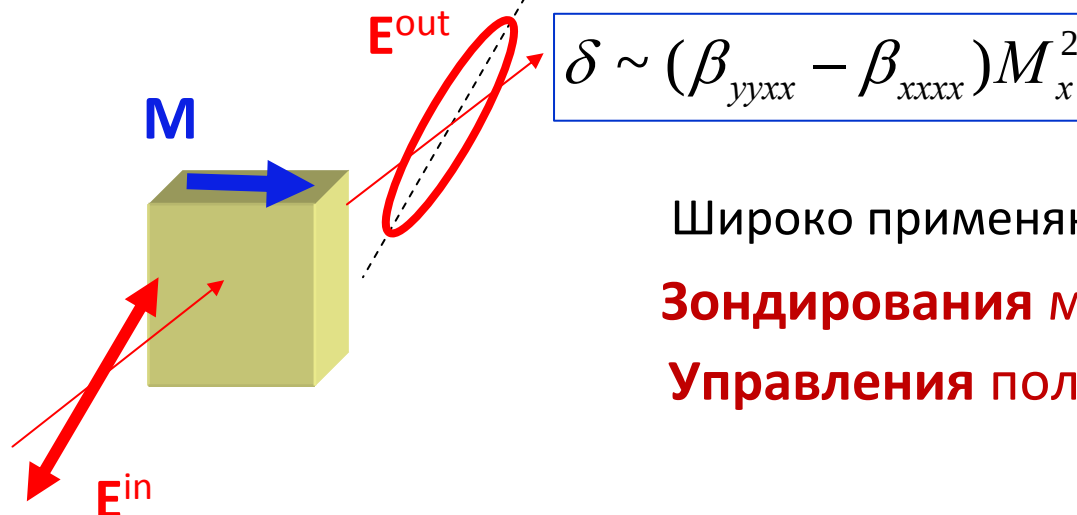
Эффект Фарадея



Магнитооптические эффекты Керра



Эффект Фохта (Котона-Мутона)



Широко применяются для

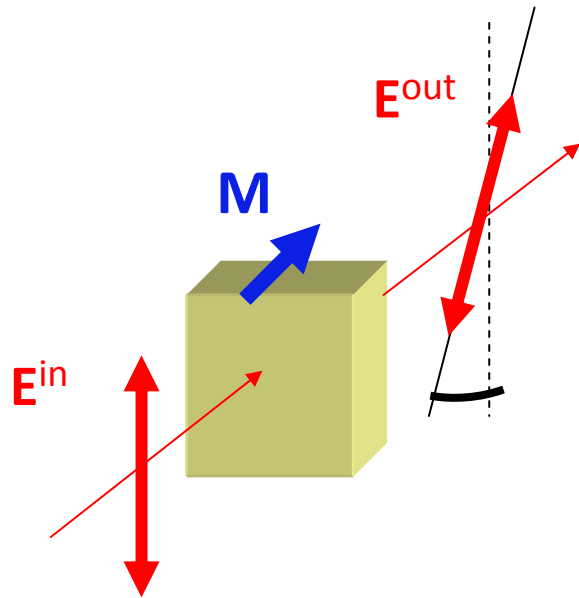
Зондирования магнитного состояния

Управления поляризацией света

Взаимодействие света с магнитоупорядоченной средой

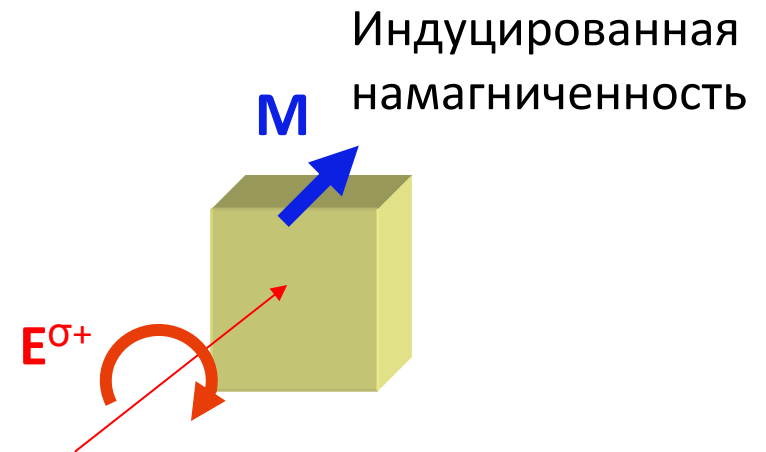
$$\Phi_{\text{int}} = \varepsilon_{ij} E_i E_j^* + \alpha_{ijk} E_i E_j^* M_k + \beta_{ijkl} E_i E_j^* M_k M_l + \dots$$

Эффект Фарадея



[M. Faraday, 1845]

Обратный эффект Фарадея



[Pitaevskii, Sov. Phys. JETP **12**, 1008 (1961)
van der Ziel PRL. **15**, 190 (1965)]

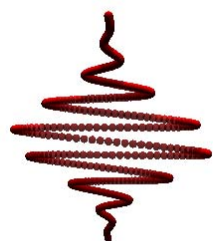
$$\Delta n_{\sigma^+ - \sigma^-} \sim \alpha_{xyz} M_z$$

$$\mathbf{M}_z \sim \alpha_{xyz} \mathbf{E} \times \mathbf{E}^*$$

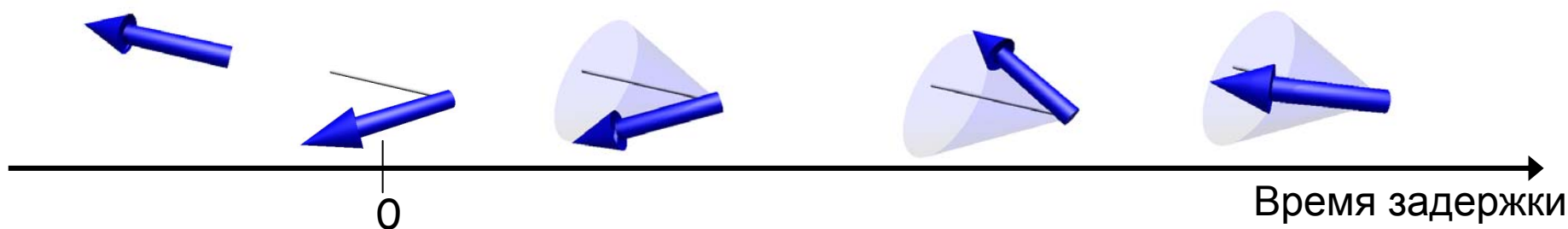
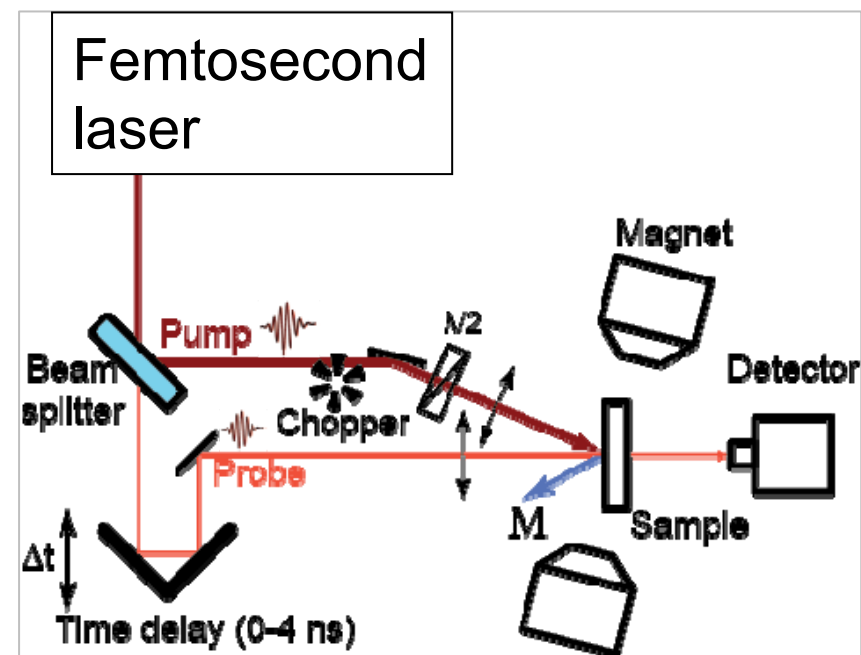
**Отклик магнитоупорядоченной среды
на фемтосекундный лазерный импульс?**

Как детектировать лазерно-индуцированную динамику намагниченности?

Pump pulse



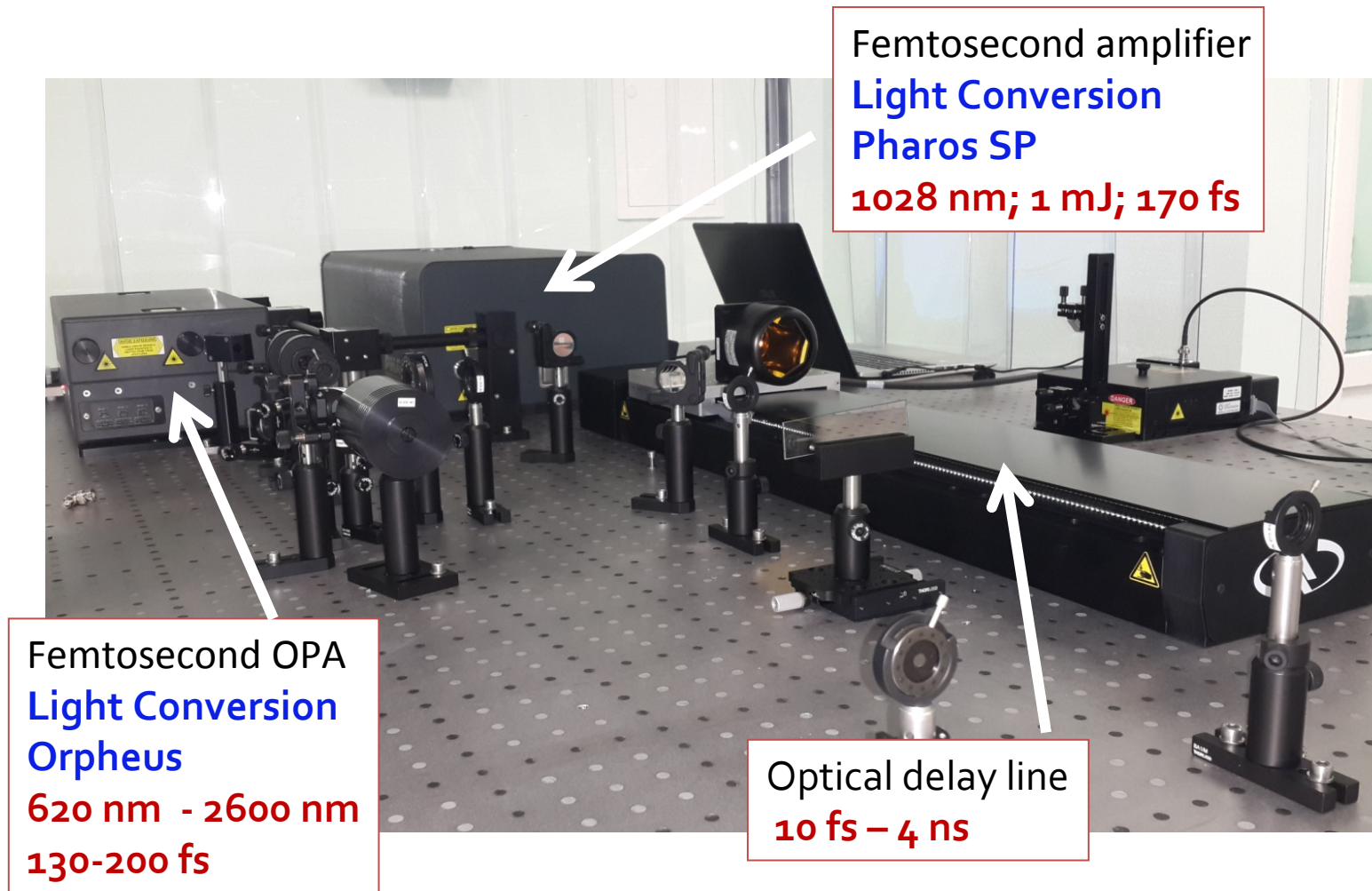
Probe pulse



Лазерно-индуцированная динамика поляризации импульса зондирования

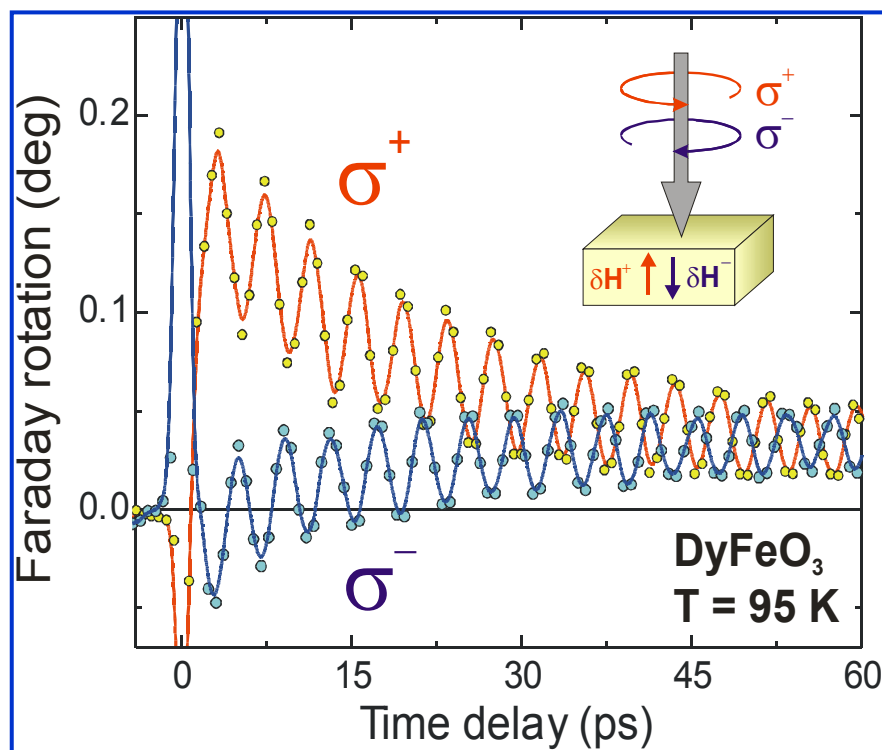
$$\theta_F(t) \sim \alpha_{xyz} M_z(t)$$

Магнитооптическая спектроскопия с фемтосекундным временным разрешением @ FerroLab



Динамика намагниченности, индуцированная циркулярно-поляризованными импульсами

Слабый ферромагнетик DyFeO_3



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

Импульс лазерно-
индуцированного
эффективного
магнитного поля

$$H_z \sim i\alpha_{xyz} (E_x E_y^* - E_y E_x^*)$$

Сверхбыстрый
обратный эффект Фарадея



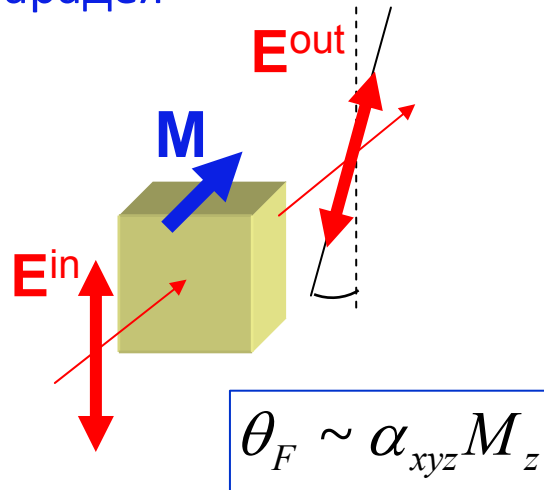
Возбуждение прецессии
намагниченности
и управление начальной фазой

Только циркулярная поляризация?
Роль поглощения?

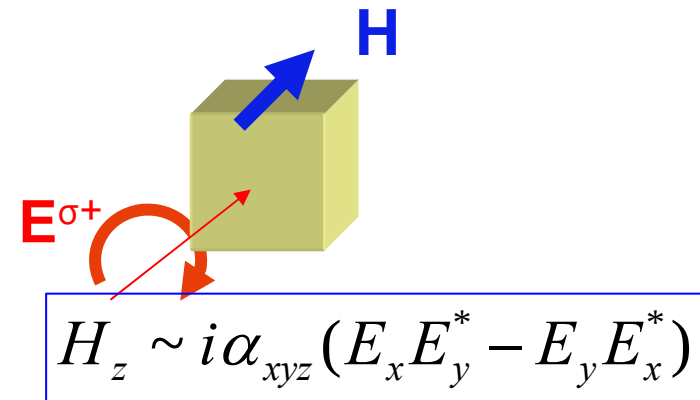
Магнитооптика и оптомагнетизм

$$\Phi_{\text{int}} = \varepsilon_{ij} E_i E_j^* + \alpha_{ijk} E_i E_j^* M_k + \beta_{ijkl} E_i E_j^* M_k M_l + \dots$$

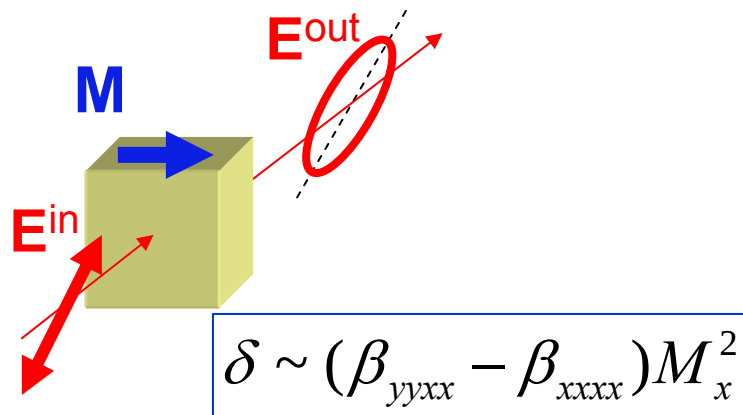
Эффект Фарадея



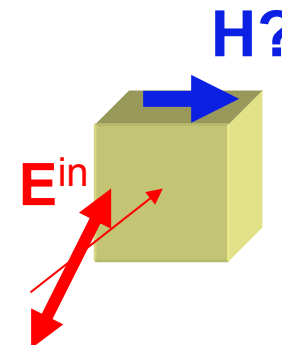
Обратный эффект Фарадея



Эффект Фохта (Котона-Мутона)

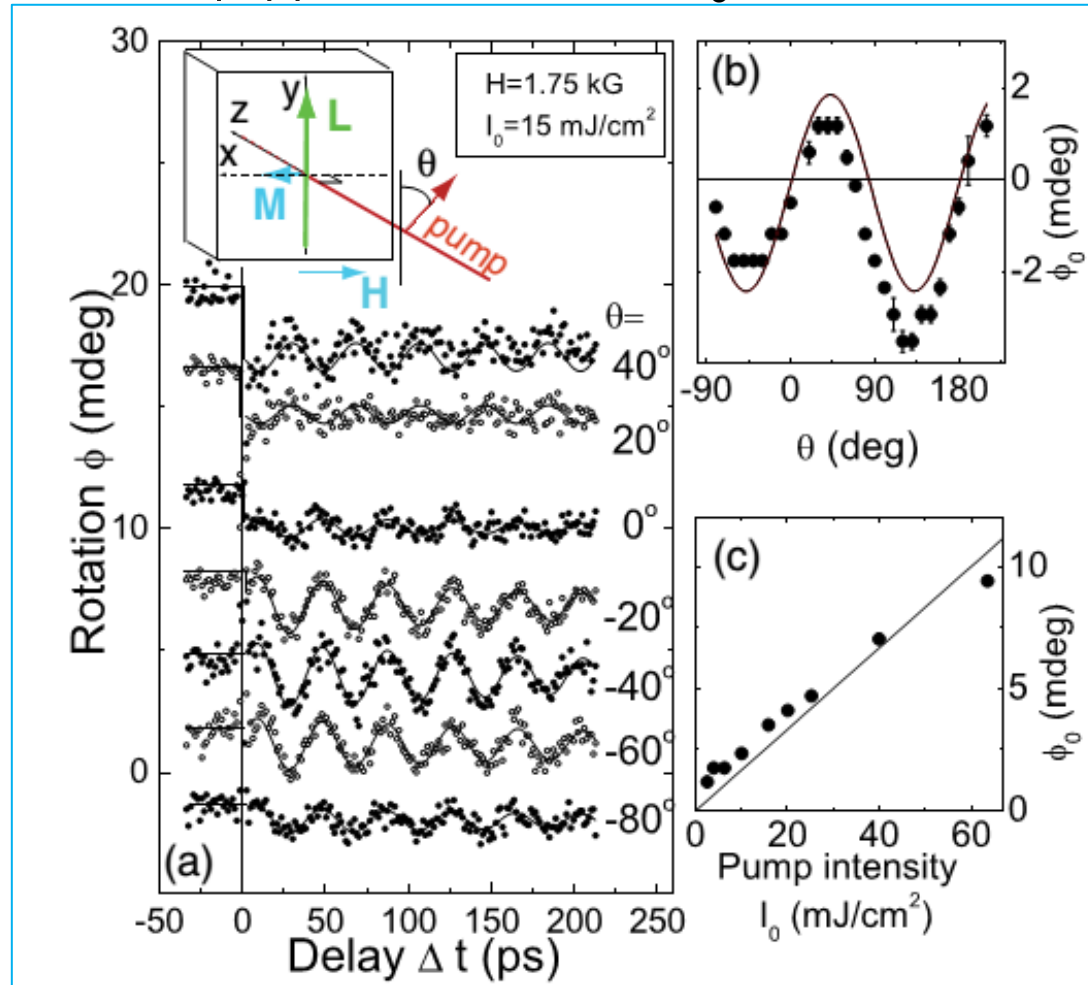


Обратный эффект Котона-Мутона



Динамика намагниченности, индуцированная линейно-поляризованными импульсами

Слабый ферромагнетик FeVO_3



Импульс лазерно-
индуцированного
эффективного
магнитного поля

$$H_x \sim \beta_{xyxy} E_x E_y^* L_y$$

Сверхбыстрый
обратный эффект
Котона-Мутона



[A. M. Kalashnikova et al.,

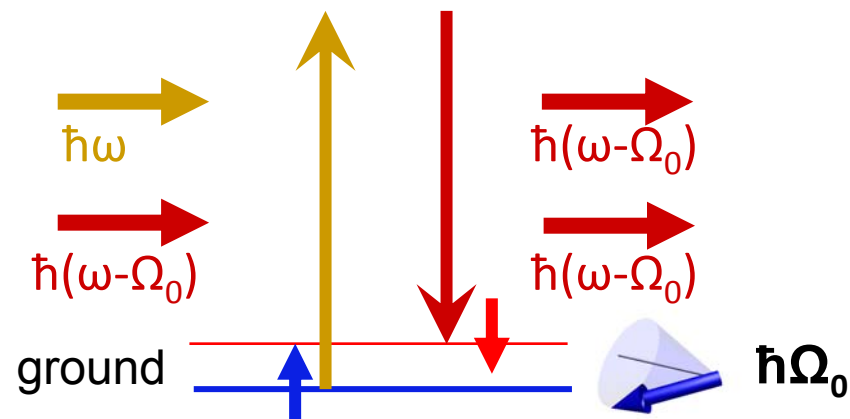
PRL **99**, 167205(2007), PRB **78**, 104301 (2008)]

Управление начальной фазой прецессии
линейно-поляризованным импульсом

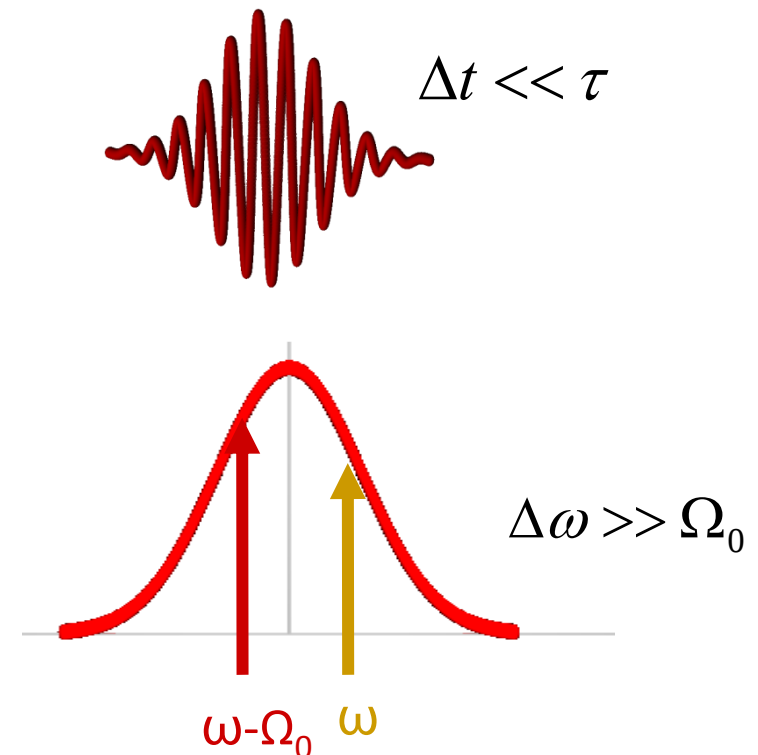
Механизм сверхбыстрых оптомагнитных явлений

Стимулированное рамановское
рассеяние на магнонах

excited **Spin-Orbit splitting**



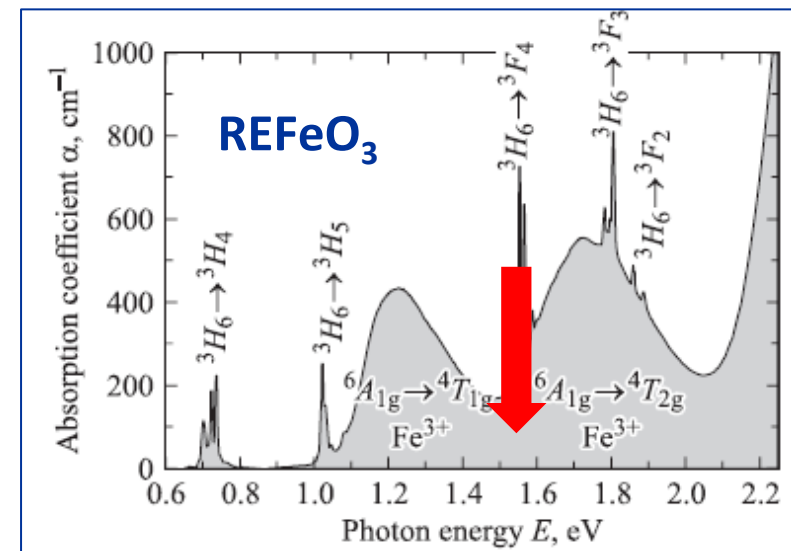
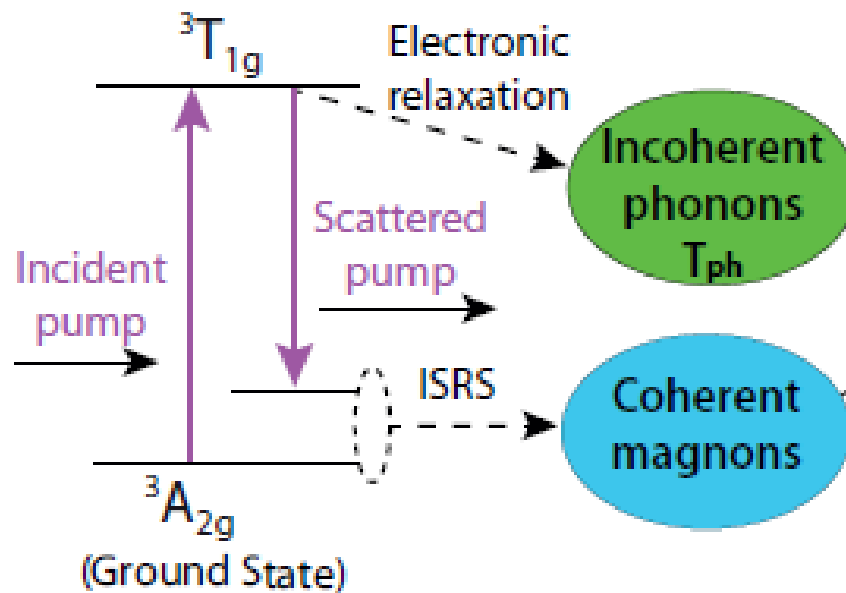
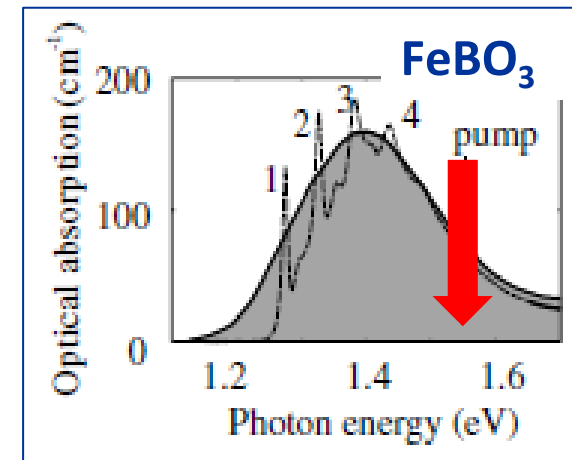
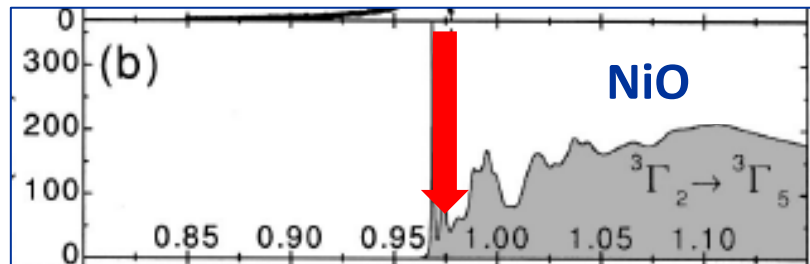
Лазерный импульс
короче периода прецессии



Импульсное стимулированное рассеяние (ISRS) на магнонах

[A. M. Kalashnikova et al., PRL (2007), PRB (2008);
V. N. Gridnev, PRB (2008)]

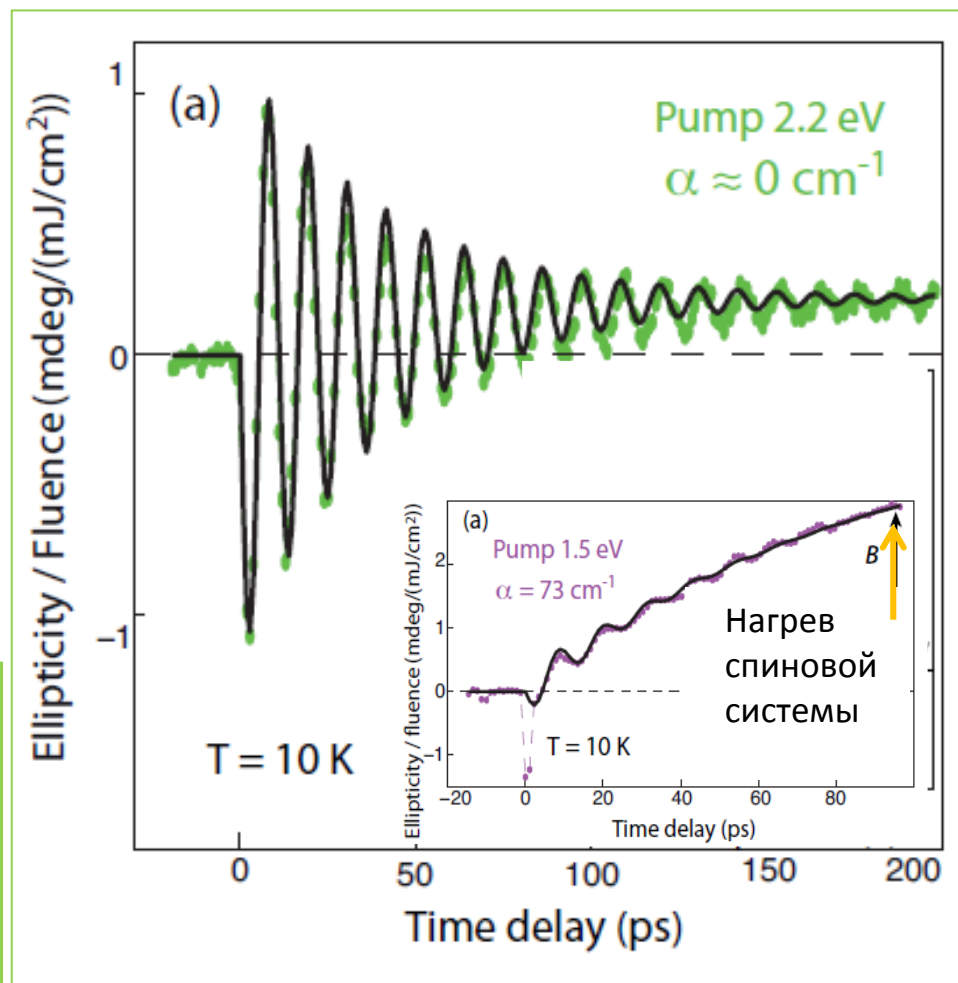
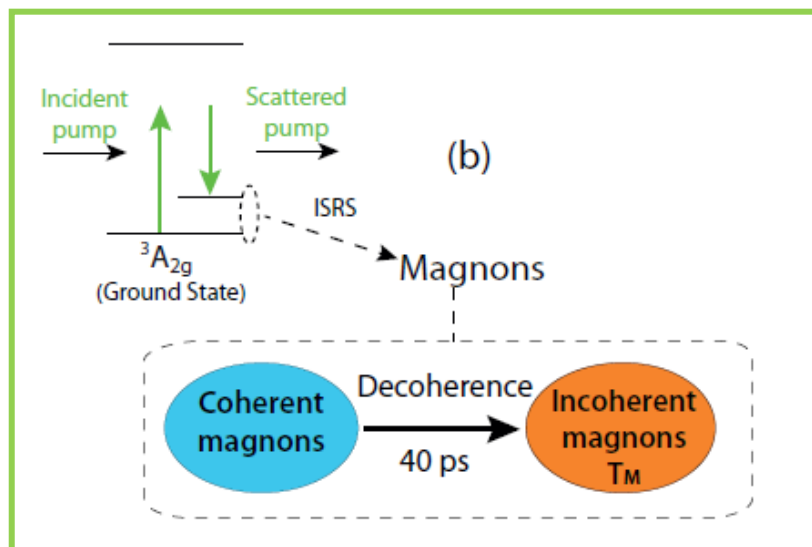
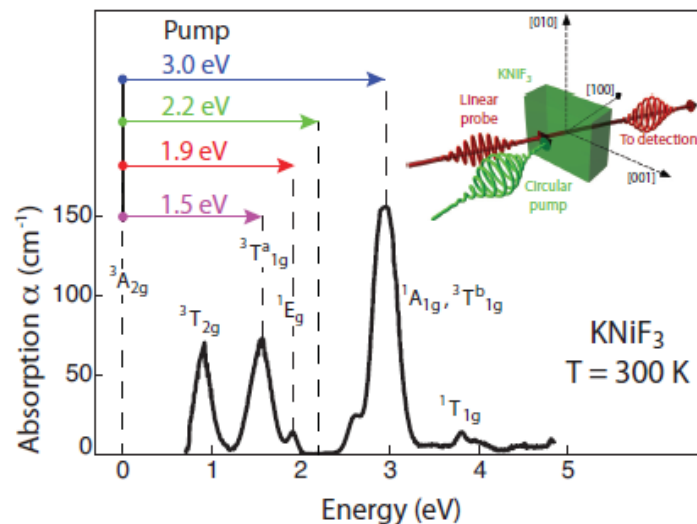
Роль поглощения?



Может ли оптическое возбуждение магнитного материала
быть избирательным?

Сверхбыстрое оптомагнитное возбуждение в прозрачном материале

Антиферромагнетик KNiF_3



Избирательное возбуждение
магнитной системы

[D. Bossini et al., PRB **89**, 060405(R) (2014)]

Сверхбыстрый оптомагнетизм:

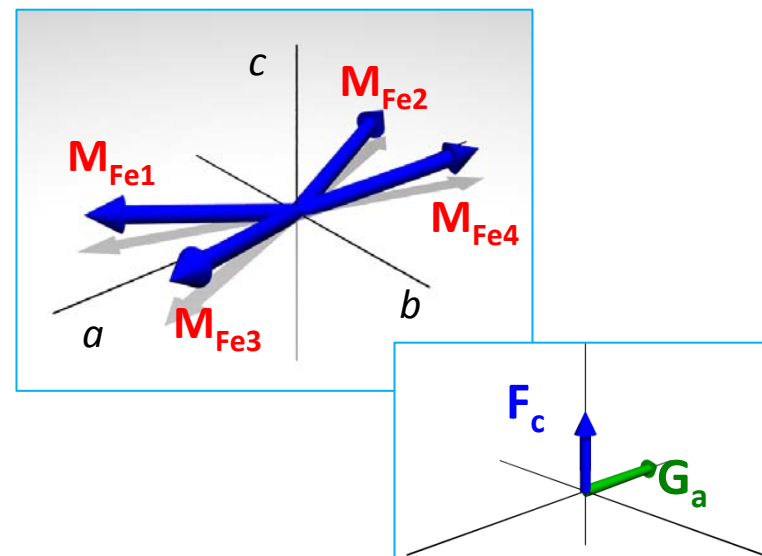
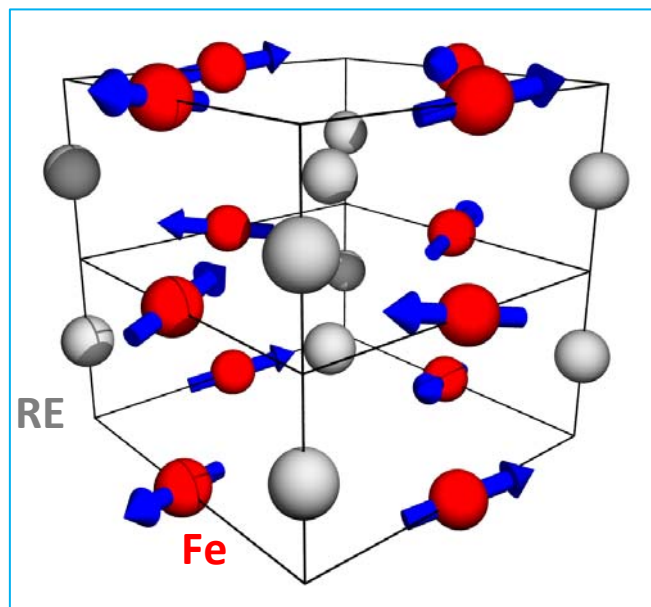
Возбуждение когерентной спиновой прецессии
линейными (обратный эффект Котона-Мутона)
и циркулярными (обратный эффект Фарадея)
фемтосекундными лазерными импульсами

Управление начальной фазой прецессии
за счет изменения поляризации лазерного импульса

Микроскопический механизм:
импульсное стимулированное рамановское рассеяние
на магнонах

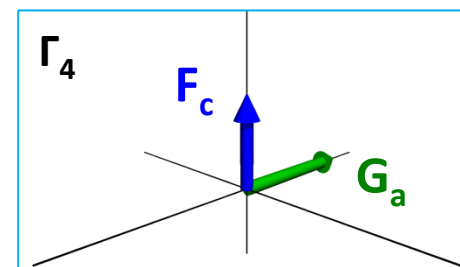
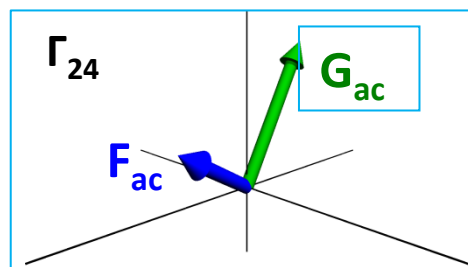
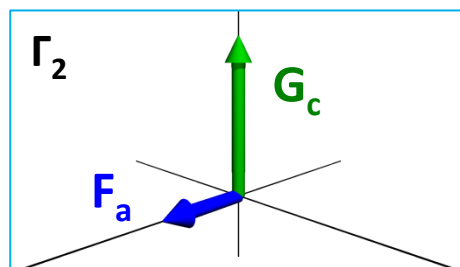
Не требует оптического поглощения:
избирательное возбуждение спиновой системы

Спин-ориентационный фазовый переход в REFeO_3



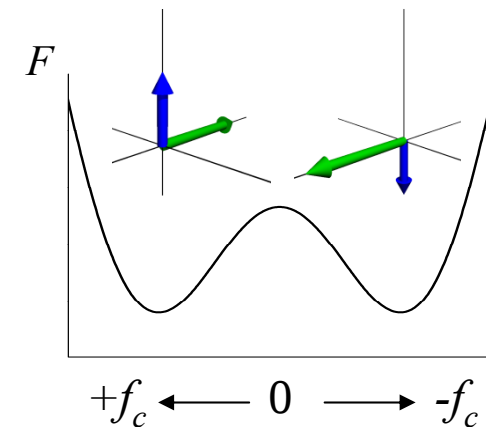
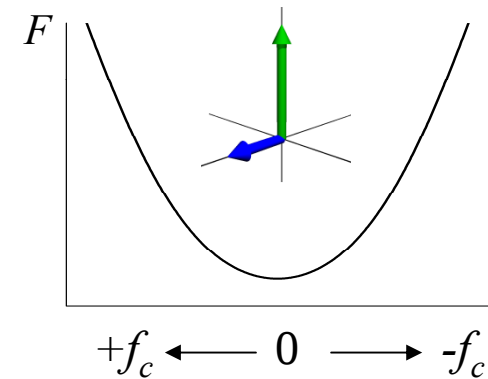
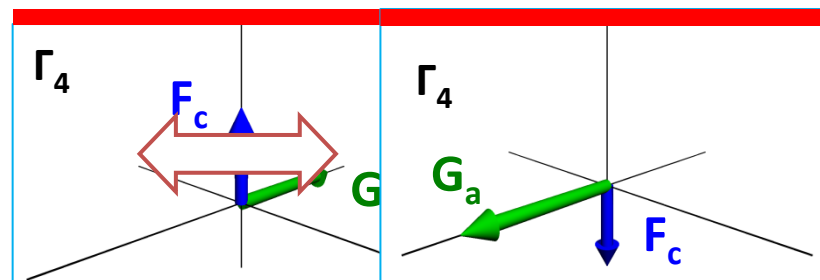
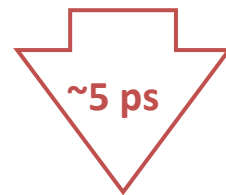
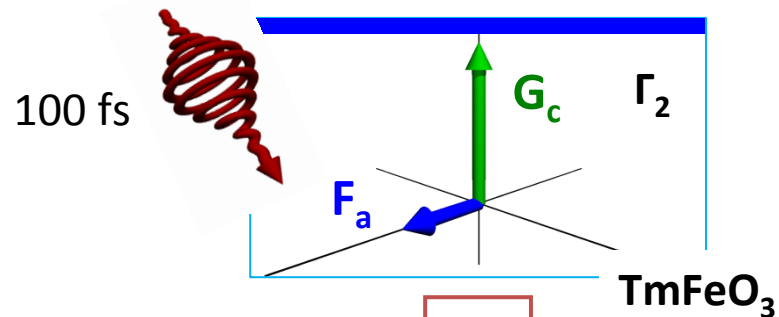
Спин-ориентационный фазовый переход (SR)

$$F(T) = K_0 + K_2(T)f_c^2 + K_4(T)f_c^4$$



Лазерно-индуцированная переориентация намагниченности

Лазерный импульс

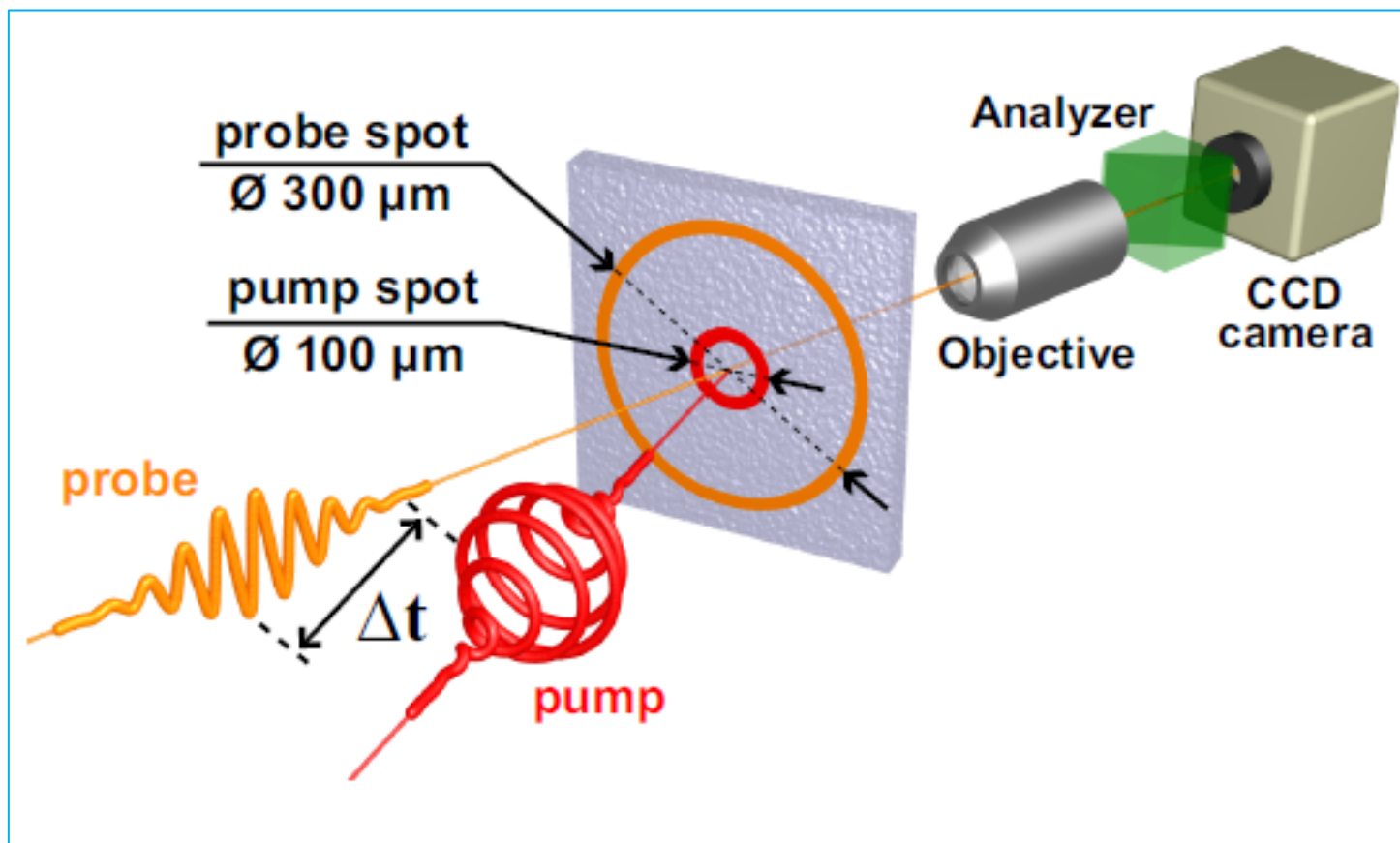


[A. V. Kimel et al., Nature **429**, 850 (2004)]

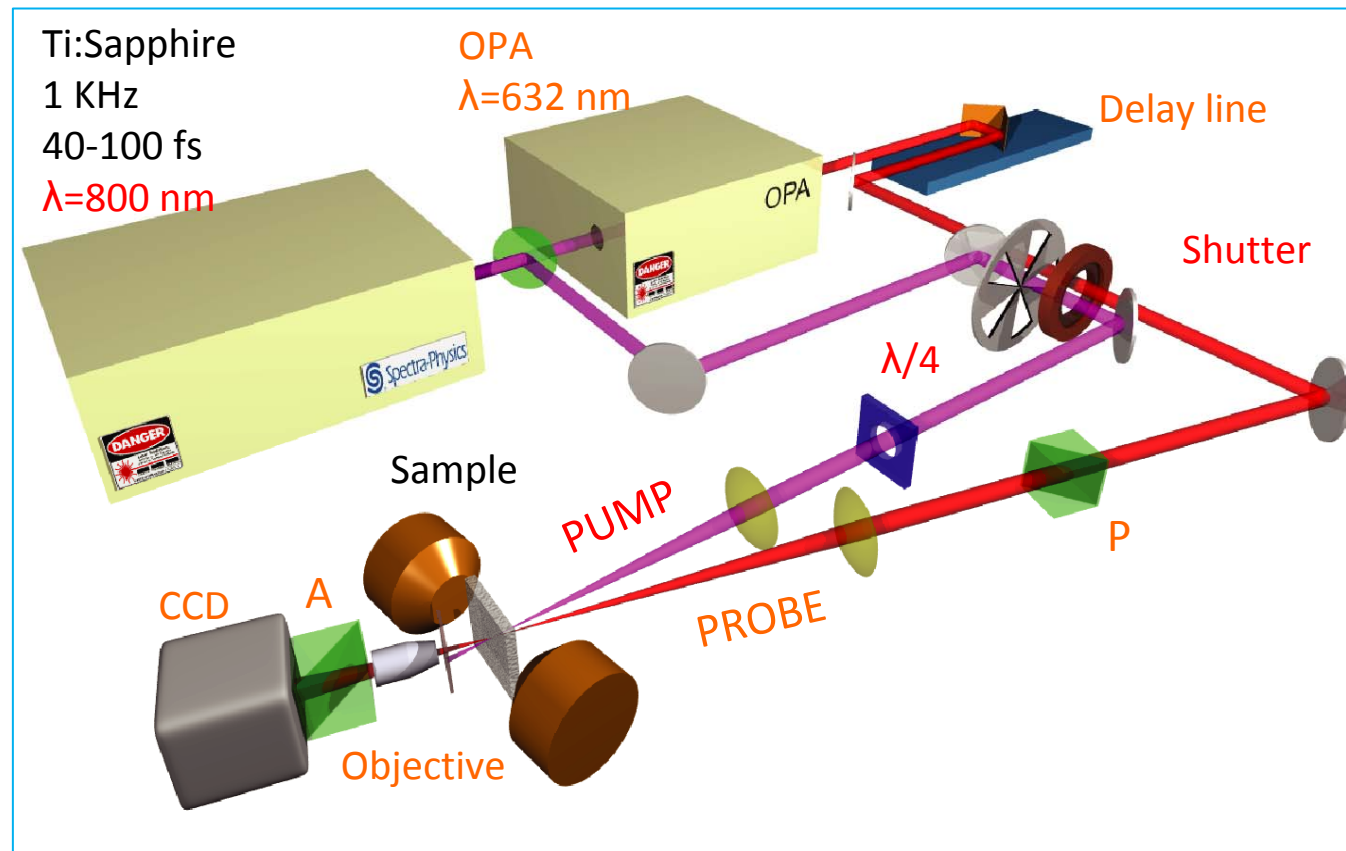
Как снять вырождение?

Управляемый лазерно-индуцированный фазовый переход?

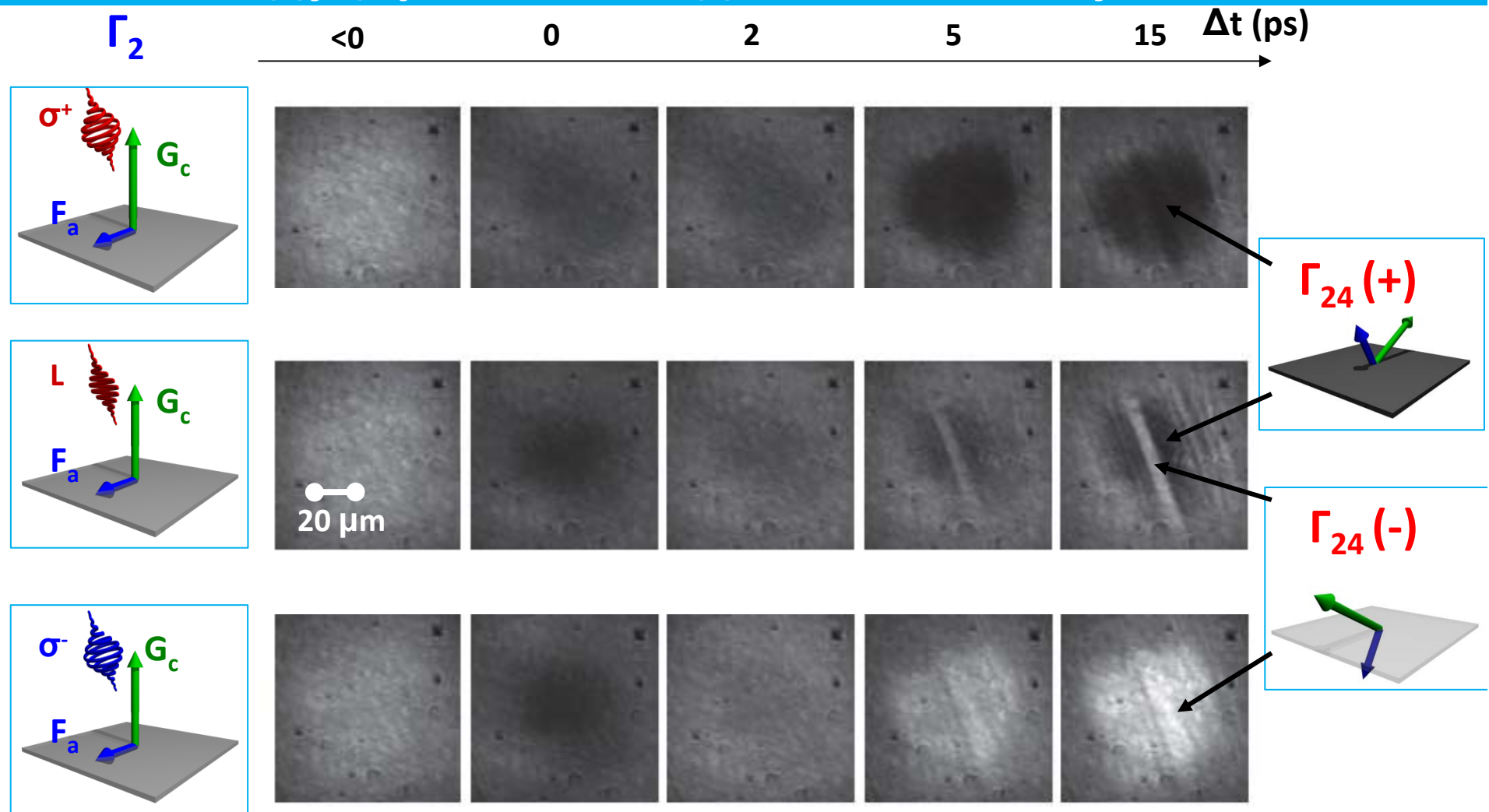
Одноимпульсная магнитооптическая микроскопия с фемтосекундным разрешением



Одноимпульсная магнитооптическая микроскопия с фемтосекундным разрешением



Ориентационный фазовый переход в $(\text{Sm,Pr})\text{FeO}_3$, индуцированный одиночным импульсом

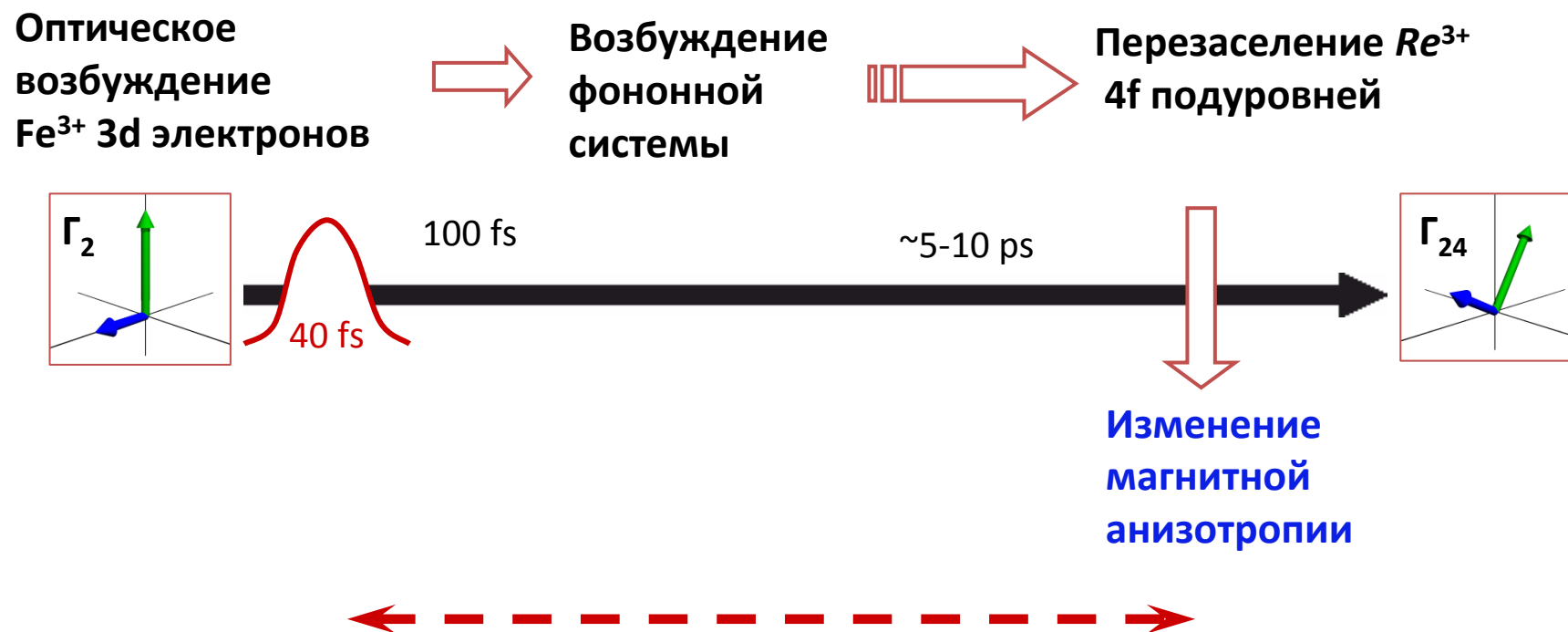


[J. A. de Jong et al., PRL (2012)]

T=90 K

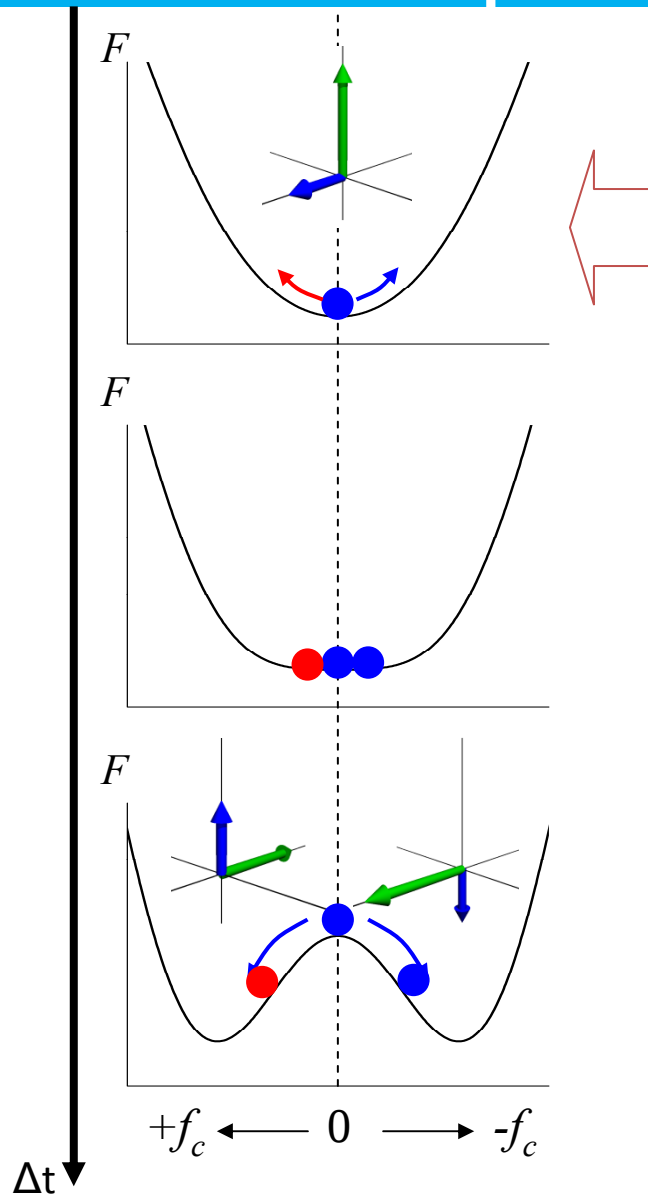
Сверхбыстрый ориентационный фазовый переход
управляемый поляризацией одиночного импульса!

Механизм лазерно-индуцированного ориентационного перехода в REFeO_3



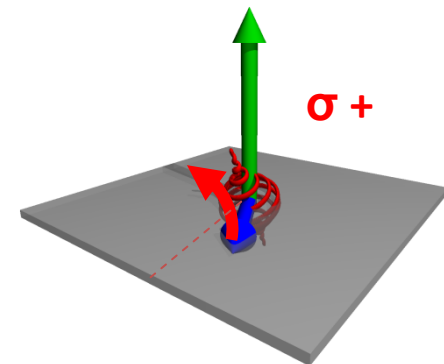
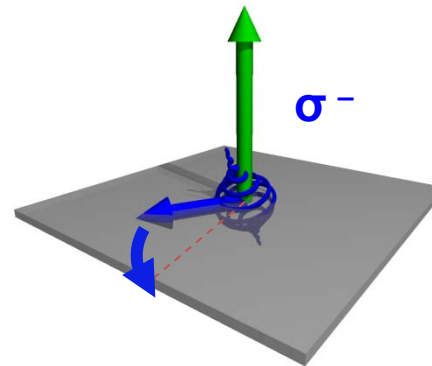
Как сохраняется информация о поляризации лазерного импульса?

Управление лазерно-индуцированным ориентационным переходом



Сверхбыстрый обратный эффект Фарадея

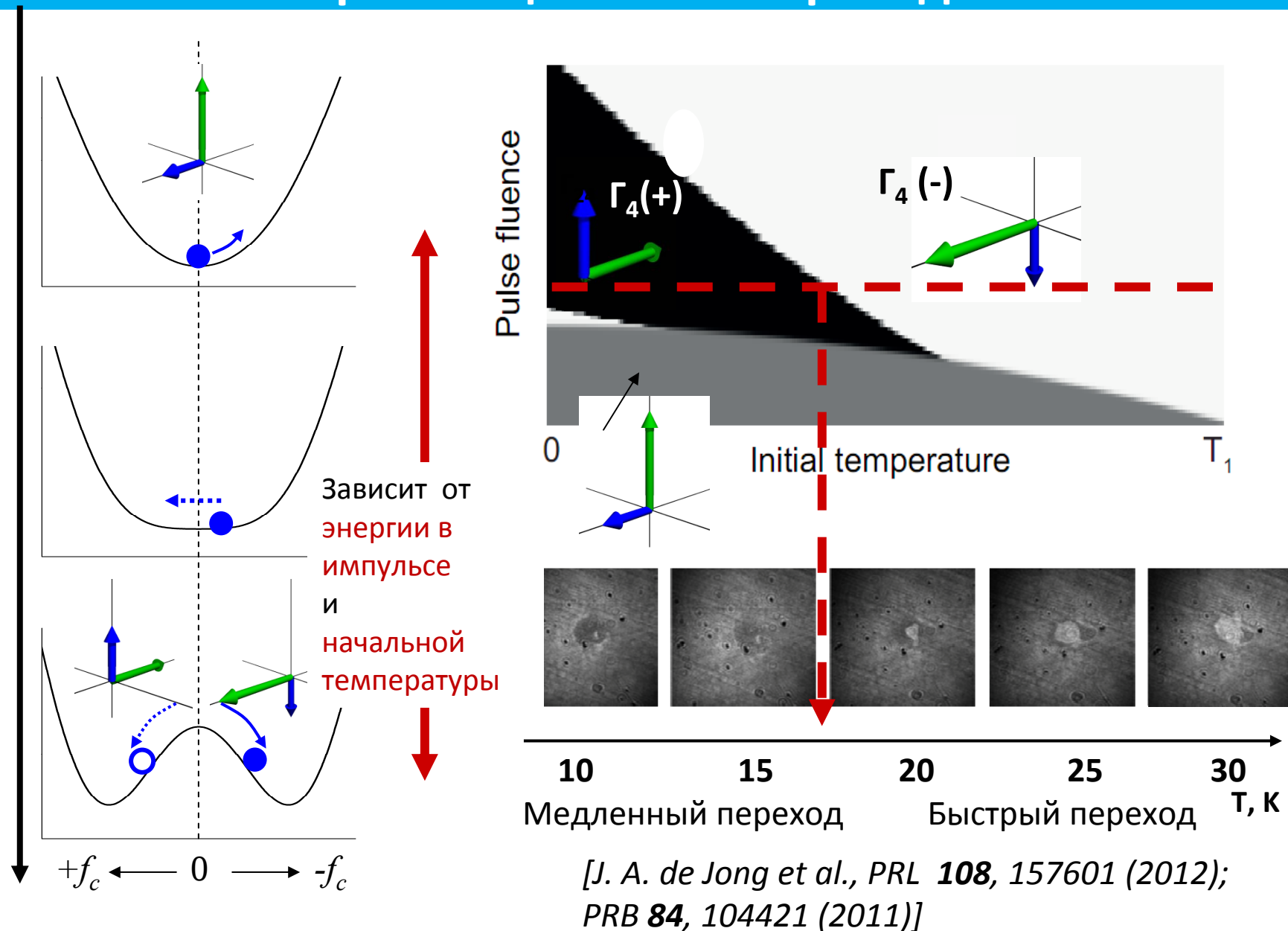
Импульсное возбуждение прецессии намагниченности с малой амплитудой ($<10^\circ$)



Начальная фаза прецессии определяется поляризацией импульса

Вырождение между двумя состояниями снимается динамически

Управление лазерно-индуцированным ориентационным переходом



Лазерно-индуцированный сверхбыстрый ориентационный фазовый переход

Управление сверхбыстрым лазерно-индуцированным переходом
в диэлектрике REFeO_3

Возможно благодаря

- Импульсному возбуждению прецессии намагниченности
- Пикосекундному нагреву решетки

Фазовая диаграмма такого перехода определяется

- Поляризацией лазерного импульса
- Интенсивностью лазерного импульса
- Начальной температурой образца

Сверхбыстрая лазерно-индуцированная динамика намагниченности в диэлектриках

Сверхбыстрые оптомагнитные явления:

- возбуждение и управление намагниченностью
- избирательное возбуждение спиновой системы
- основаны на процессах типа рамановского рассеяния

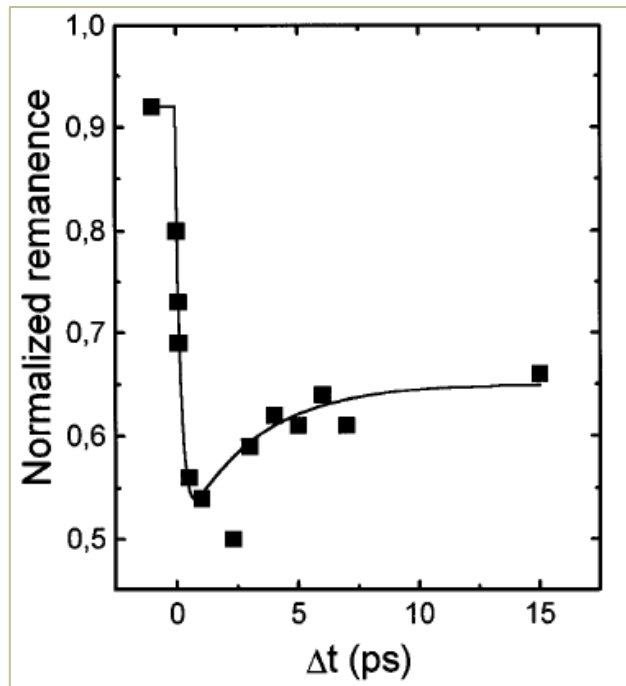
Поглощение энергии фемтосекундного импульса:

- намагниченности за счет нагрева
- изменение магнитной анизотропии
- лазерно-индуцированные фазовые переходы

Управление сверхбыстрыми фазовыми переходами

[A. Kirilyuk et al., *Rev. Mod. Phys.* **82**, 2731 (2010);
А. М. Калашникова и др., *УФН* **185** (октябрь 2015)]

Changing the magnetization value at the femtoscale



[E. Beaurepaire et al., PRL (1996)...
Review:
A. Kirilyuk et al., RMP (2010)]

Ultrafast demagnetization in a Ni film

Dominant role in metals is played
by the absorption of light
and **rapid heating of electrons**

Proposed mechanisms:

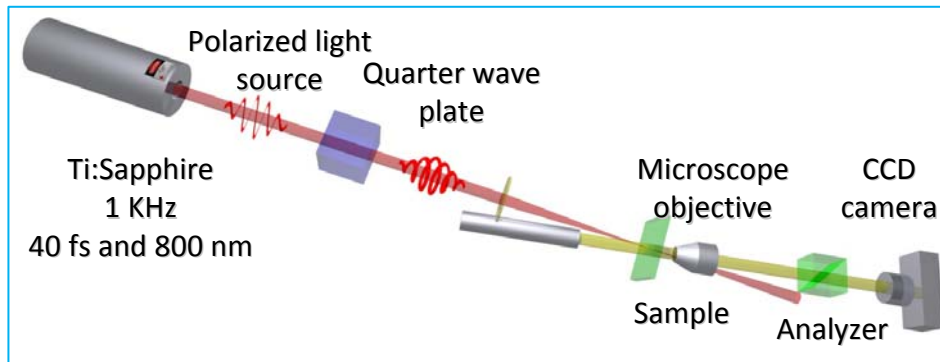
- Phonon-mediated spin-flip scattering
[B. Koopmans et al., Nature Mater. (2009);
K. Carva et al., PRB (2012)]

- Superrdiffusion

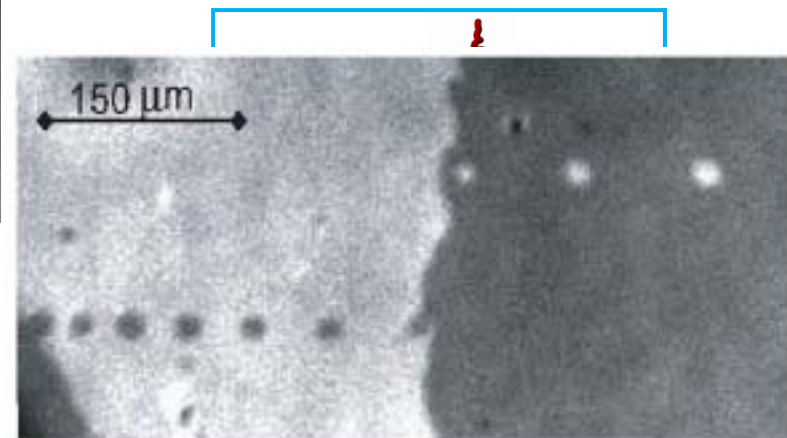
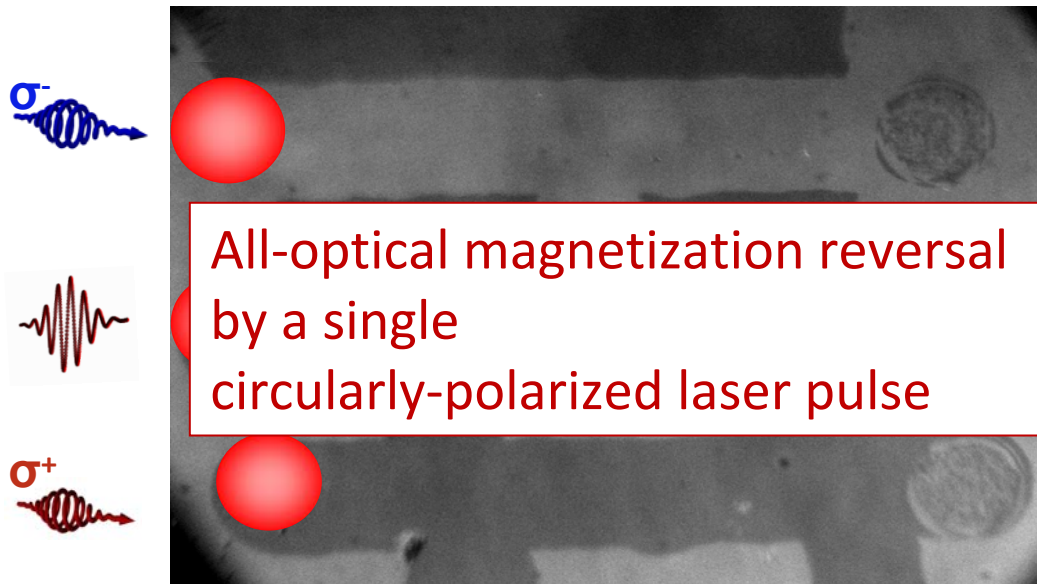
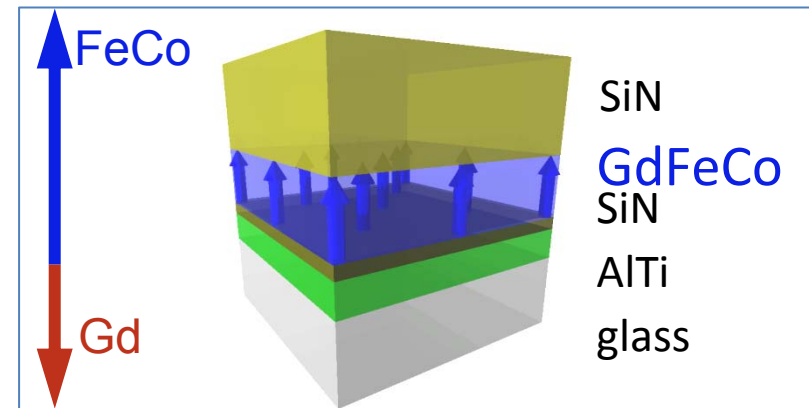
[M. Battiato et al., PRL (2009);
M. Savoini et al., PRB (2014);
N. Moisan et al., Sci. Rep. (2013)]

- Excitation of spin waves [B. Koopmans et al., PRL (2002).....]
- **Magnetization reversal**

All-optical magnetization reversal: first demonstration

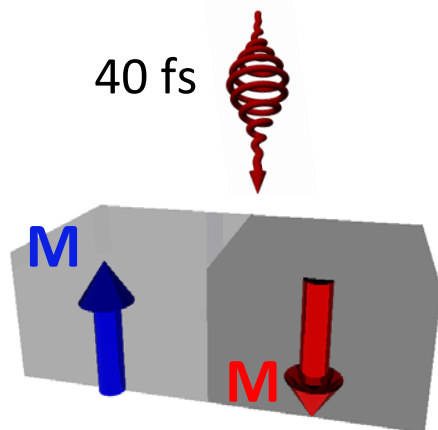
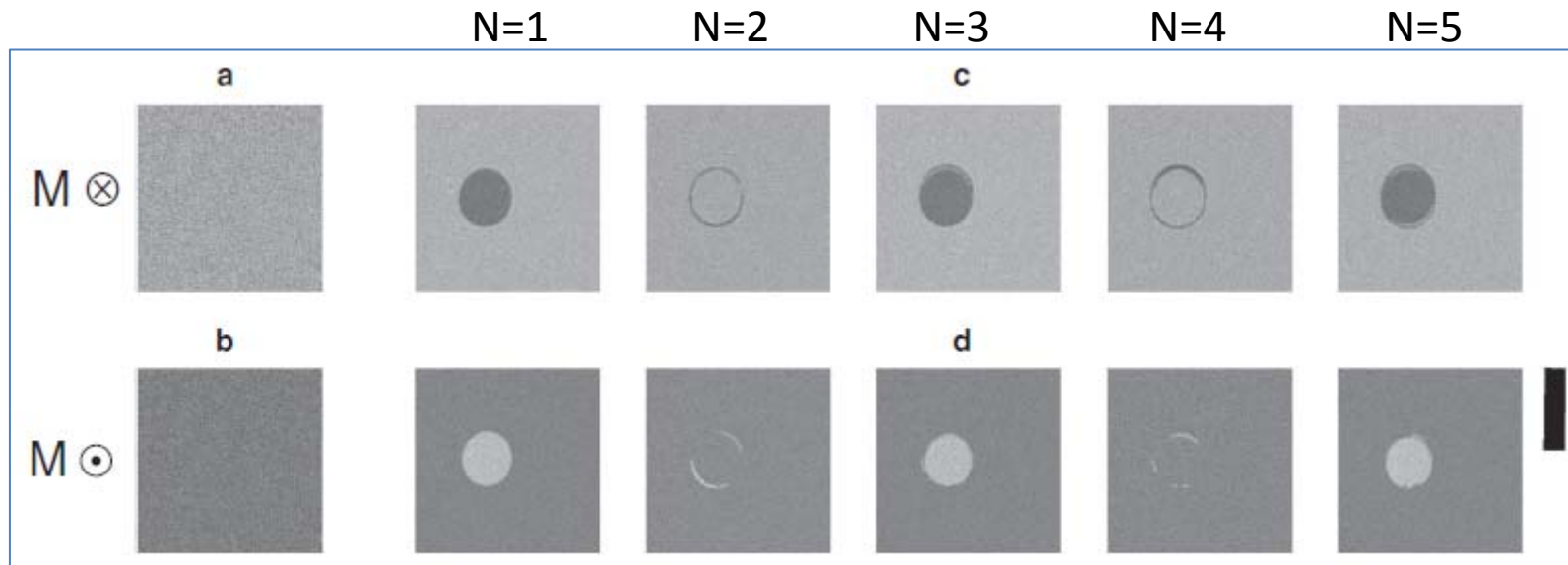


Ferrimagnetic metallic alloy GdFeCo



All-optical magnetization reversal by a single pulse

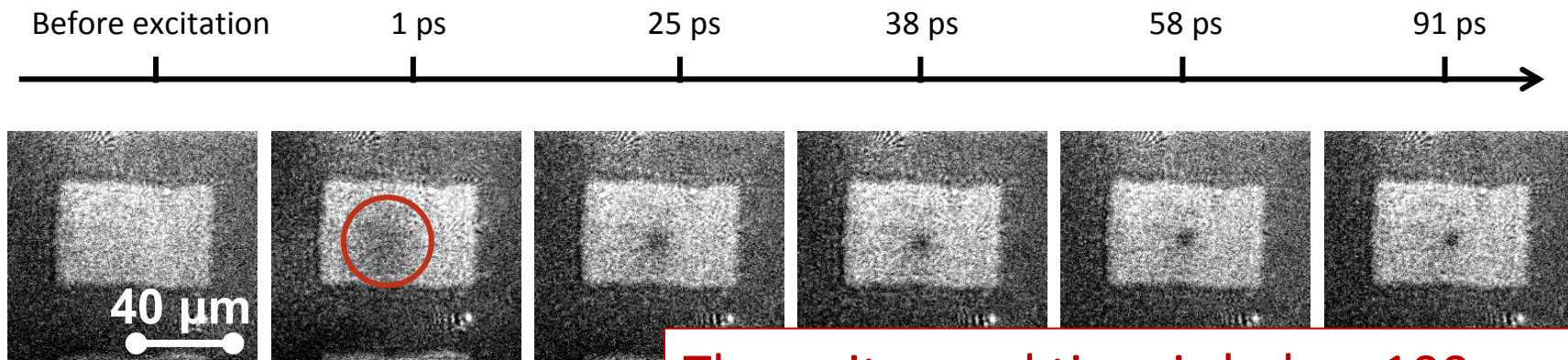
Initial state State after N pulses



What is the time scale?

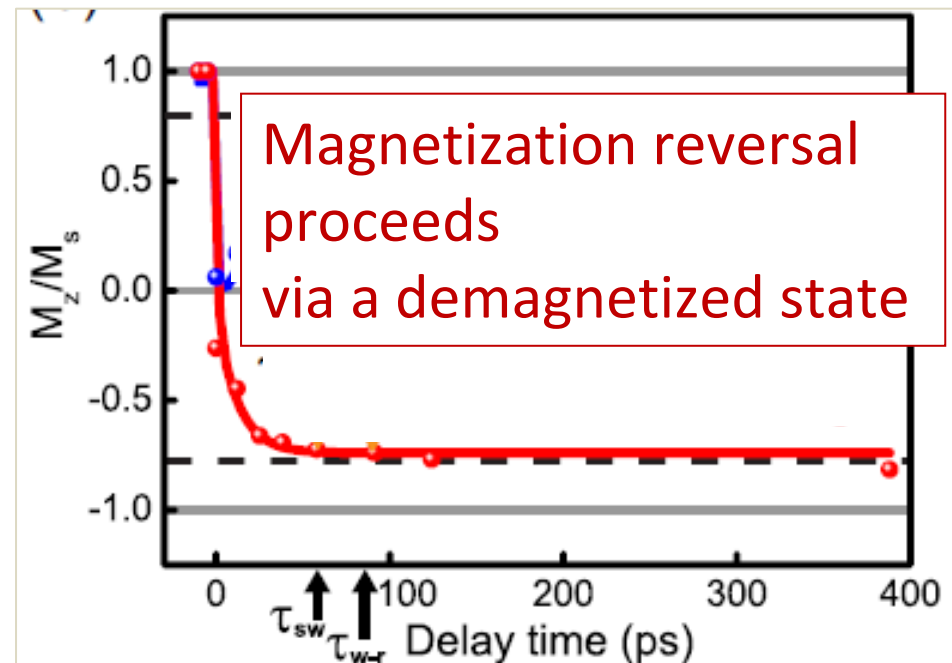
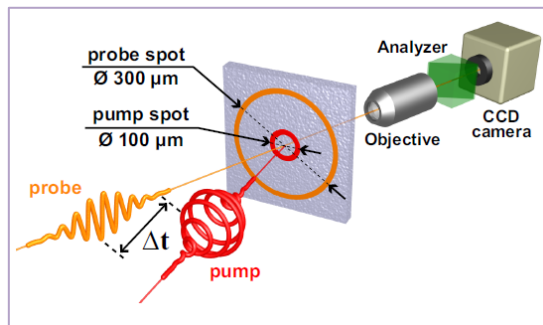
[T. Ostler et al., Nature Comm. (2012)]

Dynamics of all-optical magnetization reversal



The write-read time is below 100 ps

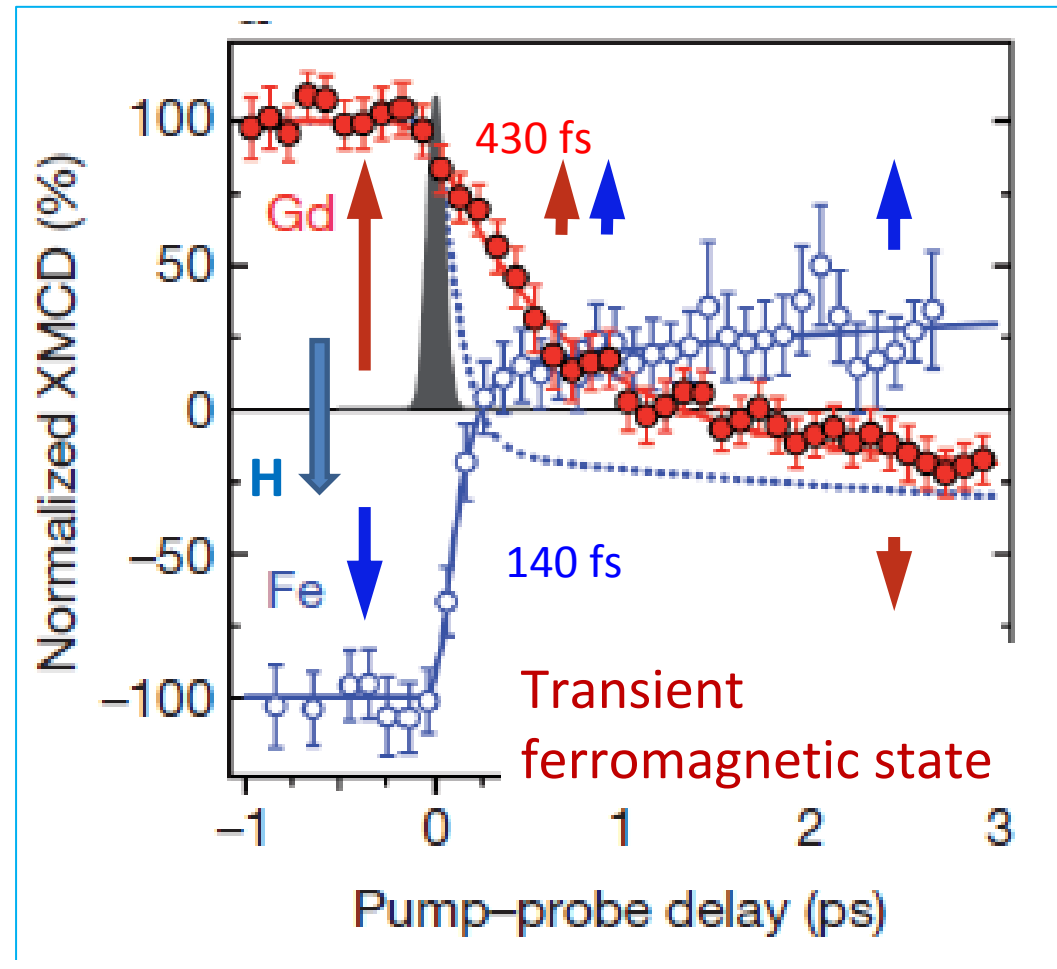
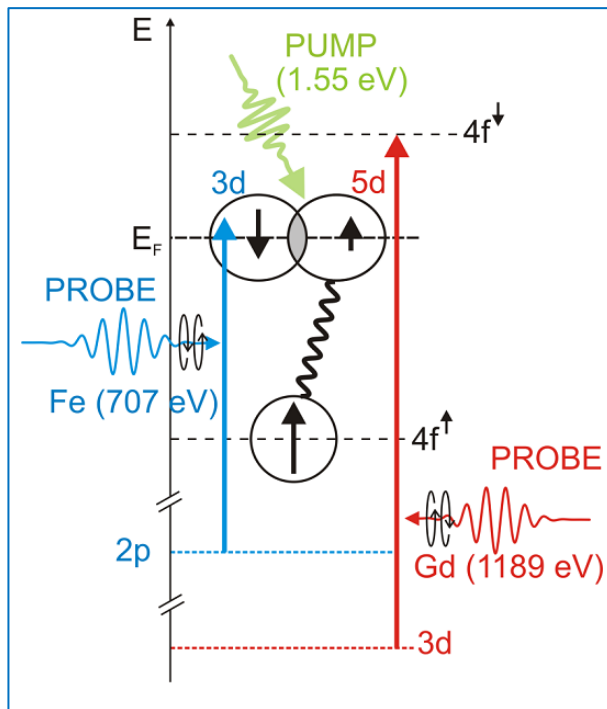
Single shot time-resolved
magneto-optical imaging



[K. Vahaplar et al., PRL (2009); PRB (2012)]

Ultrafast dynamics in ferrimagnetic GdFeCo alloy during first picoseconds

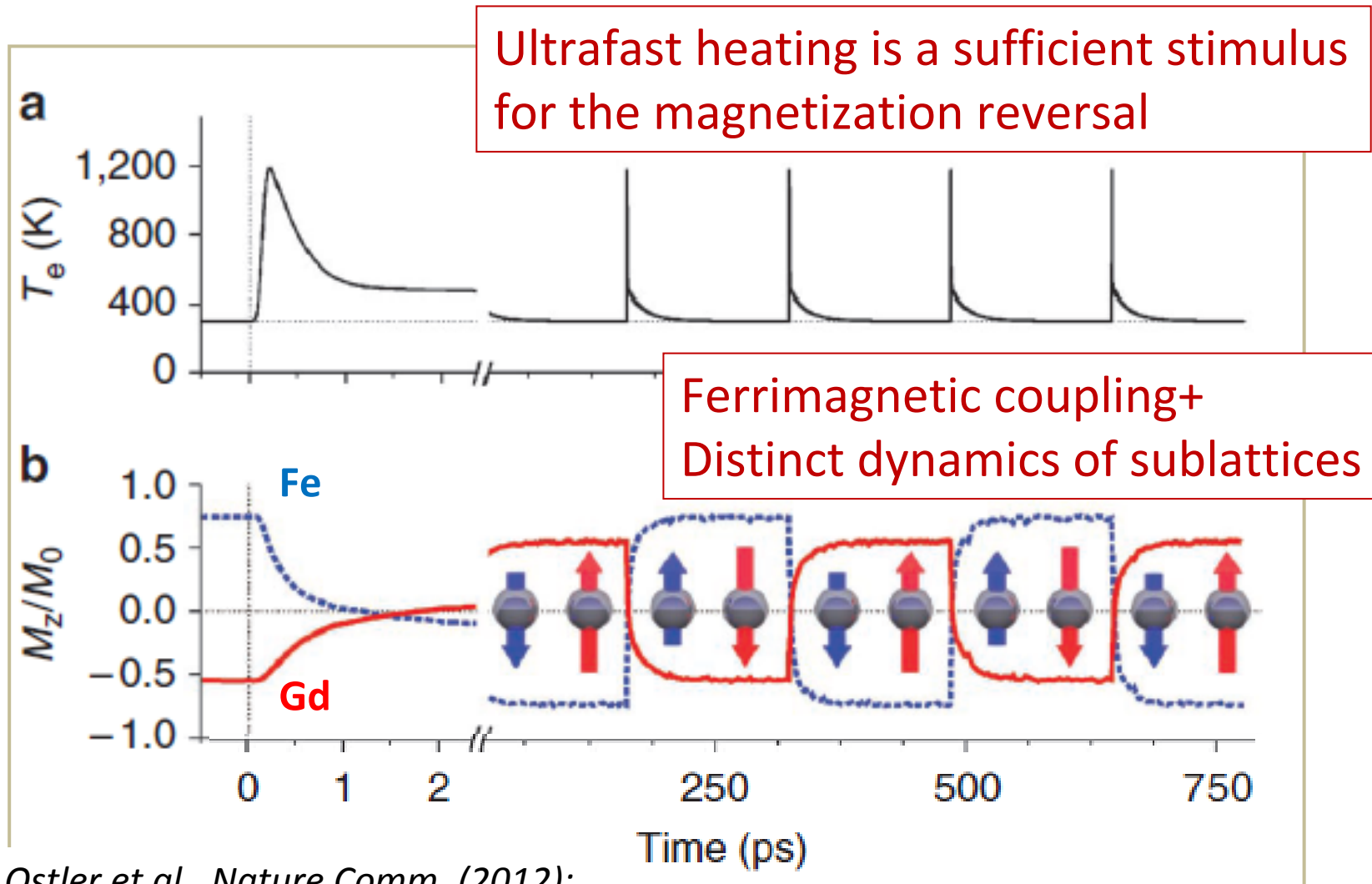
Optical pump
X-ray probe



Distinct ultrafast sublattice dynamics
in a metallic ferrimagnet

[I. Radu et al., Nature (2011)]

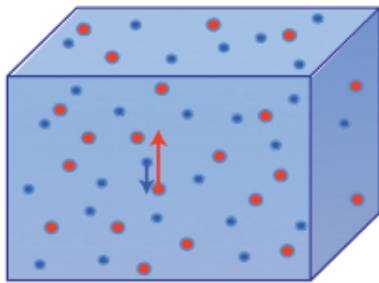
Mechanism of the all-optical magnetization reversal in ferrimagnetic alloy



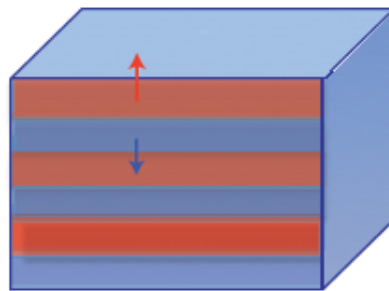
[T. Ostler et al., Nature Comm. (2012);
J. Mentink et al., PRL (2012)]

All-optical magnetization reversal in various ferrimagnetic structures

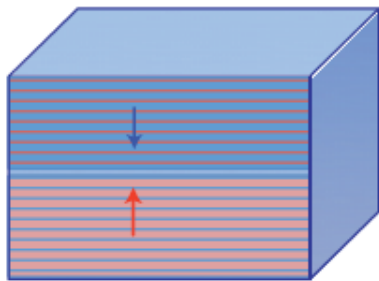
RE/TM alloy



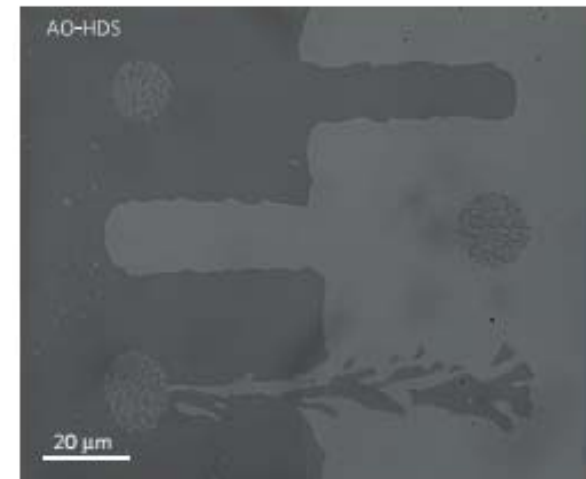
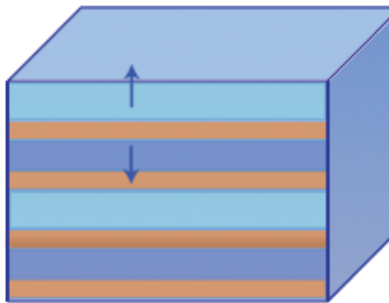
b RE/TM multilayers



RE/TM multilayers



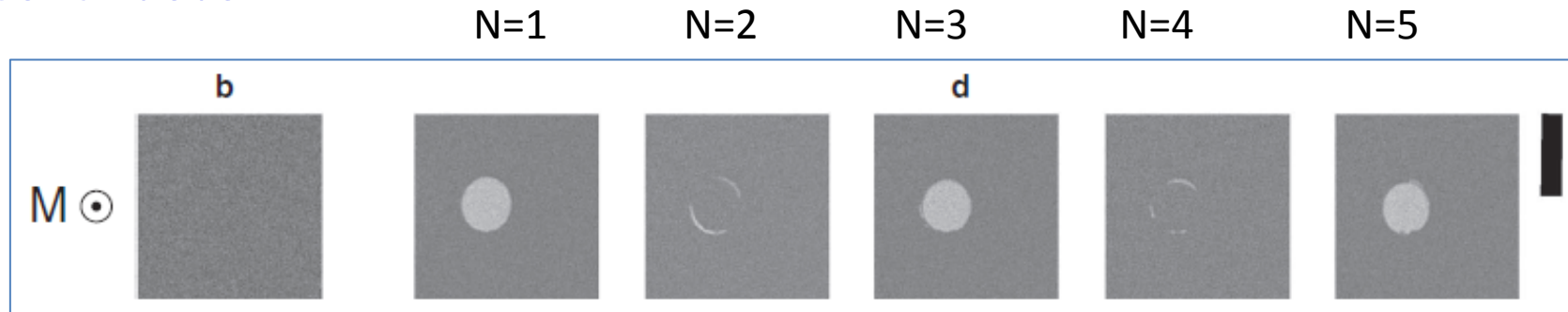
d TM1/TM2 multilayers



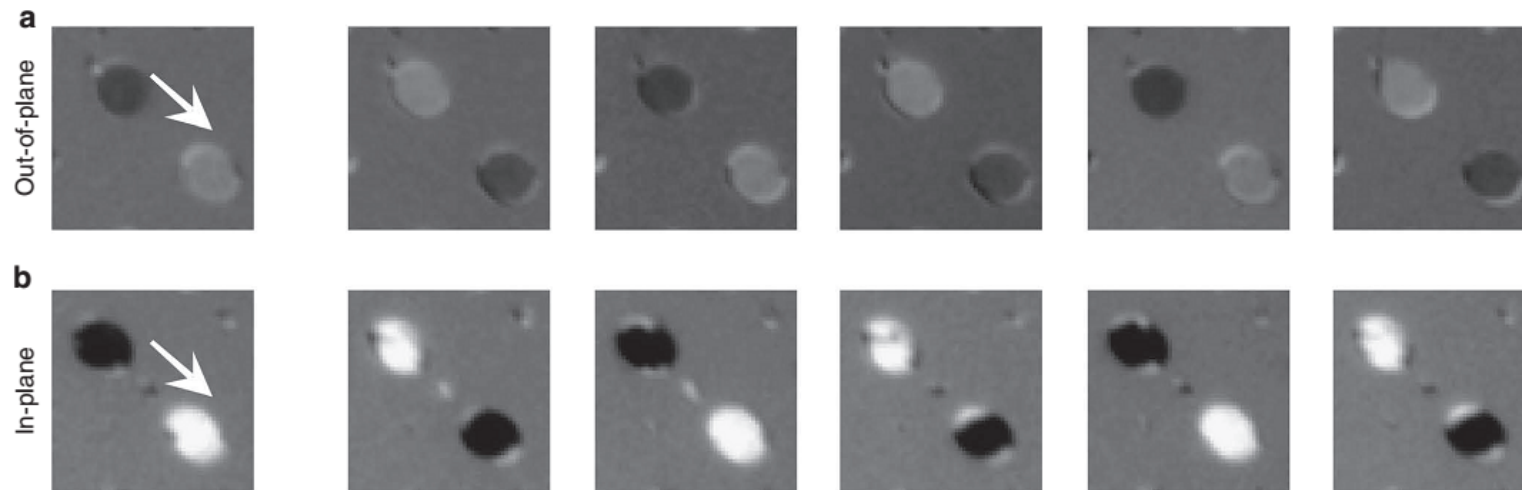
[S. Mangin et al., Nature Mater. (2014)]

Ultrafast magnetization reversal: at microscale and beyond

Continuous film



2- μm structures



[T. Ostler et al., Nature Comm. (2012)]

Сверхбыстрый оптомагнетизм – 3

Оптическое переключение намагниченности of magnetization
В ферримагнитных металлах RE-TM и родственных структурах

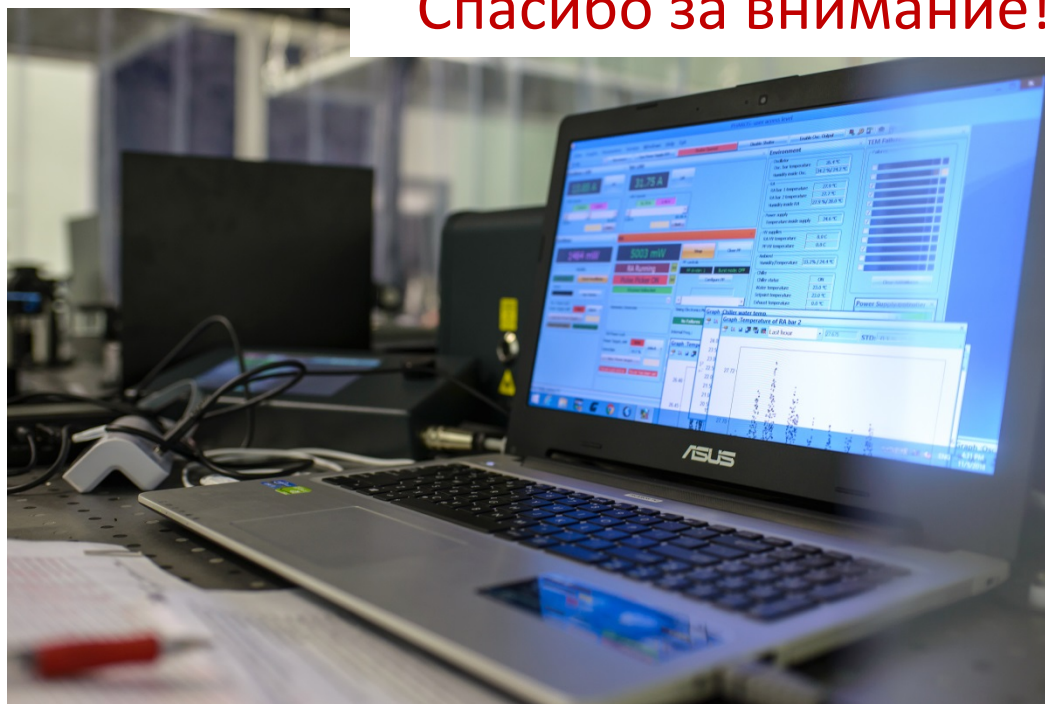
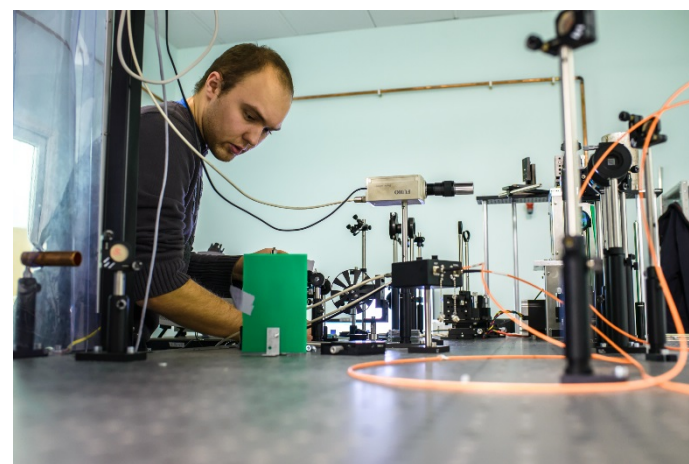
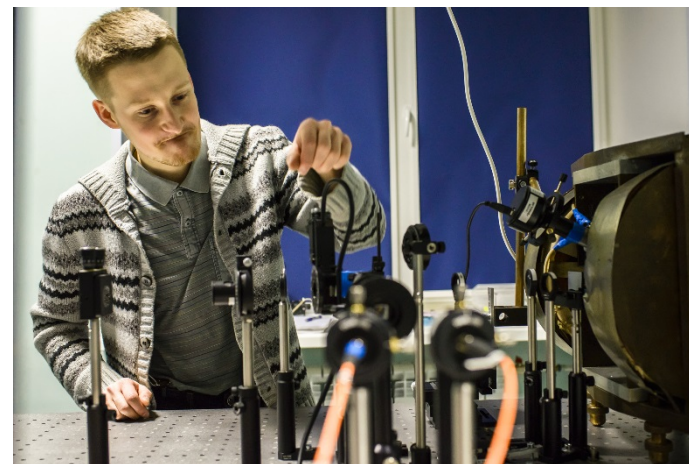
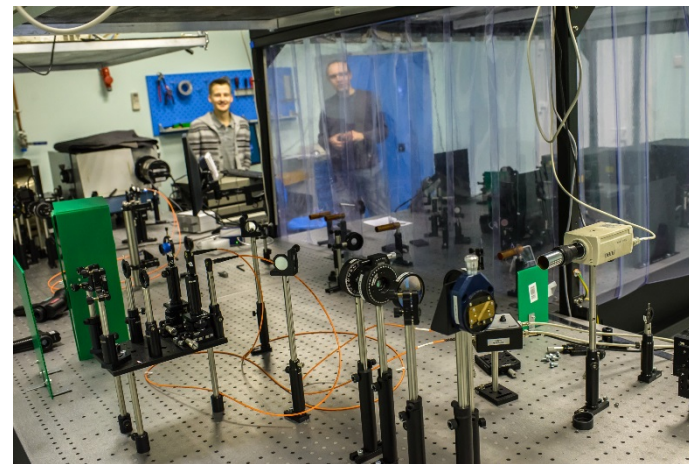
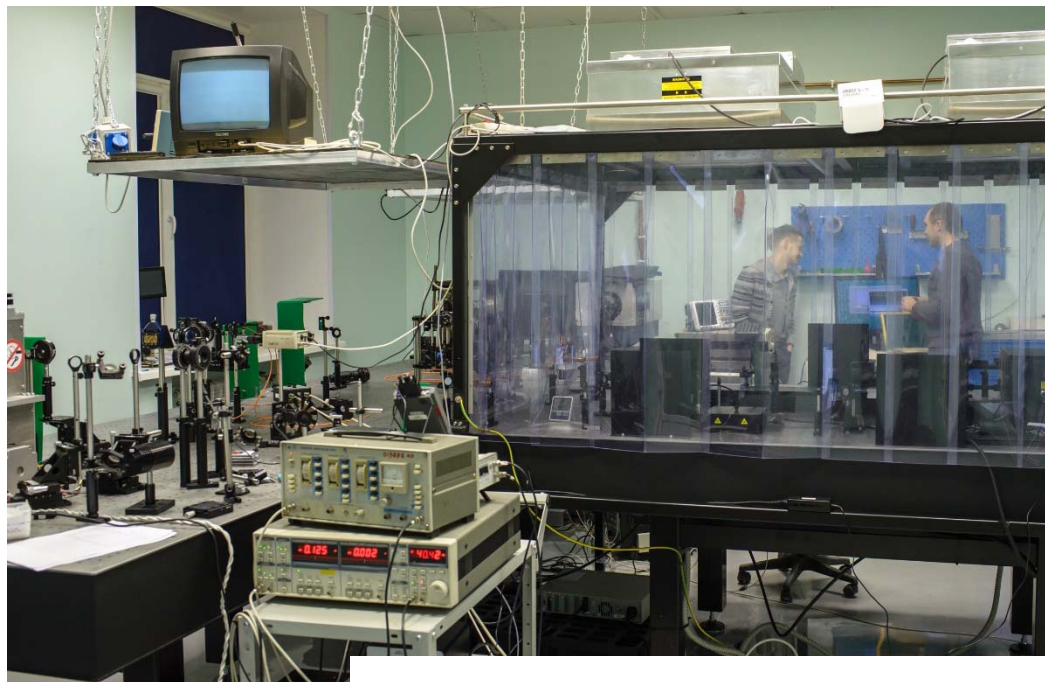
Происходит через сильно-неравновесное размагниченное состояние

Основано на сверхбыстром нагреве и разной динамике подрешеток

Позволяет достичь времен записи-считывания ~ 30 ps

Может быть реализовано в синтетических ферримагнетиках

Может быть реализовано в микронных и нанометровых структурах



Спасибо за внимание!