

Свет и магнитные вещества: от эффекта Фарадея к сверхбыстрой оптомагнитной записи

Александра Калашникова

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

kalashnikova@mail.ioffe.ru

Вечерняя школа МГТУ им. Ваумана
15 апреля 2019

Магнитные среды

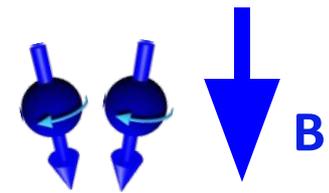
Спи  $S_z = \pm h/2$

Магнитные ионы в ^HТвердых

средах
Взаимодействие между

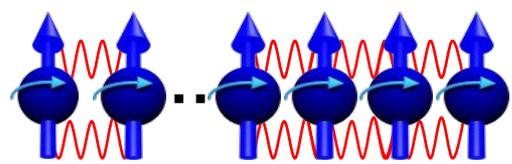
ионами
отсутствует: 

• **Парамагнетик**
(в диамагнетиках магнитных ионов нет)



Обменное взаимодействие между ионами:

• **Ферромагнетик**
и

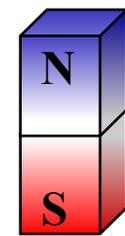


$M = \frac{1}{V} \sum m_i$

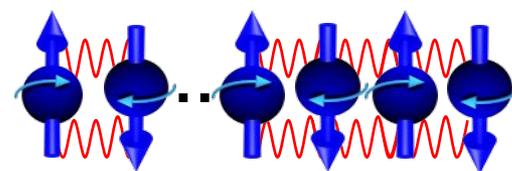
Есть

намагниченность

$M = 0$ Нет



• **Антиферромагнетики**

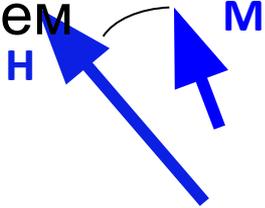


$L = M_1 - M_2$ намагниченности

Антиферромагнитный ²

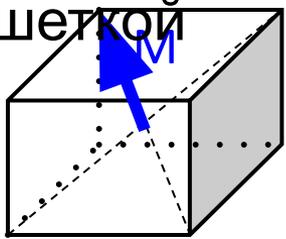
Что определяет свойства магнито-упорядоченных

Взаимодействие с внешним магнитным полем



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

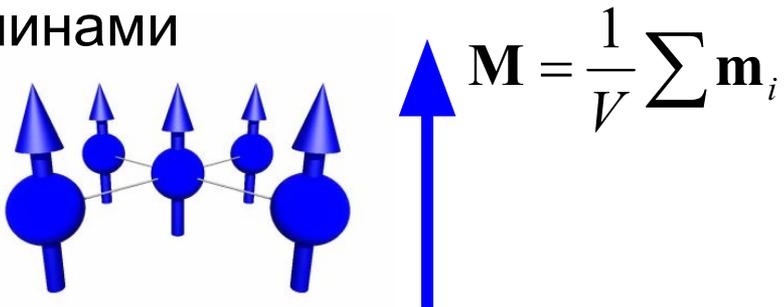
Взаимодействие с решеткой



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

Магнитокристаллическая
анизотропия

Обменное взаимодействие между спинами



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

Магнитный порядок:

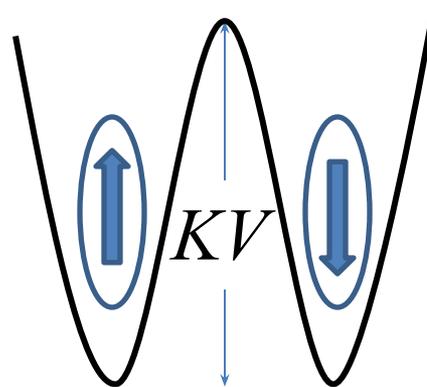
- ферромагнитный
- антиферромагнитный
- ферримагнитный³

Магнитная запись: плотность, скорость,



Hard-drive

- **Плотность записи:** уменьшение размера одного бита
Проблема стабильности намагниченности в малом объеме (суперпарамагнитный предел)

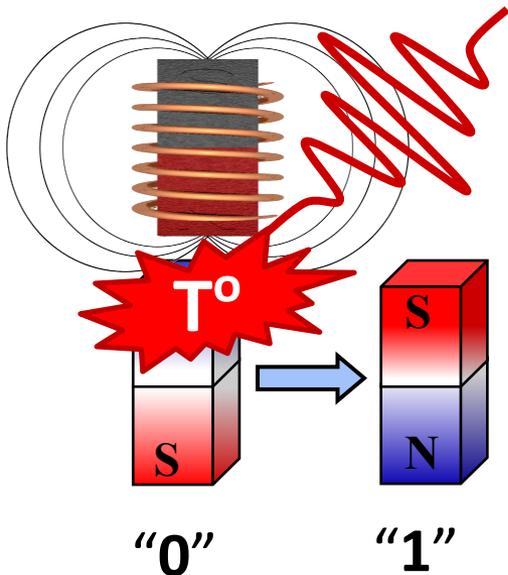


$$\tau = \tau_0 e^{\frac{KV}{kT}}$$

≈ 1
нс

Необходимо
:

$$\frac{KV}{kT} > 60$$



Нужен импульс магнитного поля, достаточный, чтобы преодолеть **сильную магнитную анизотропию**

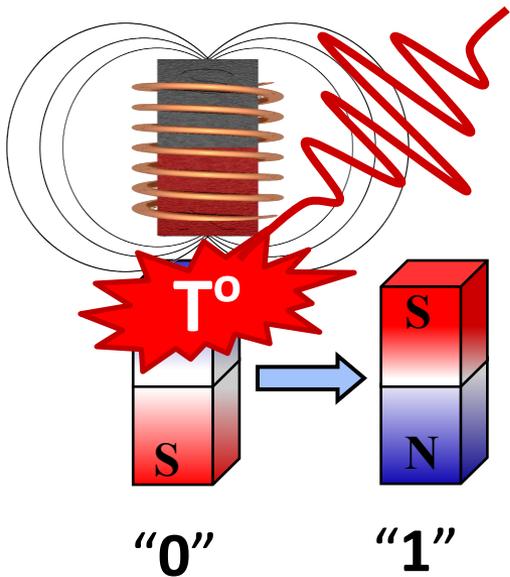
Heat (by laser) Assisted Magnetic Recording

увеличение плотности записи
за счет лазерного нагрева

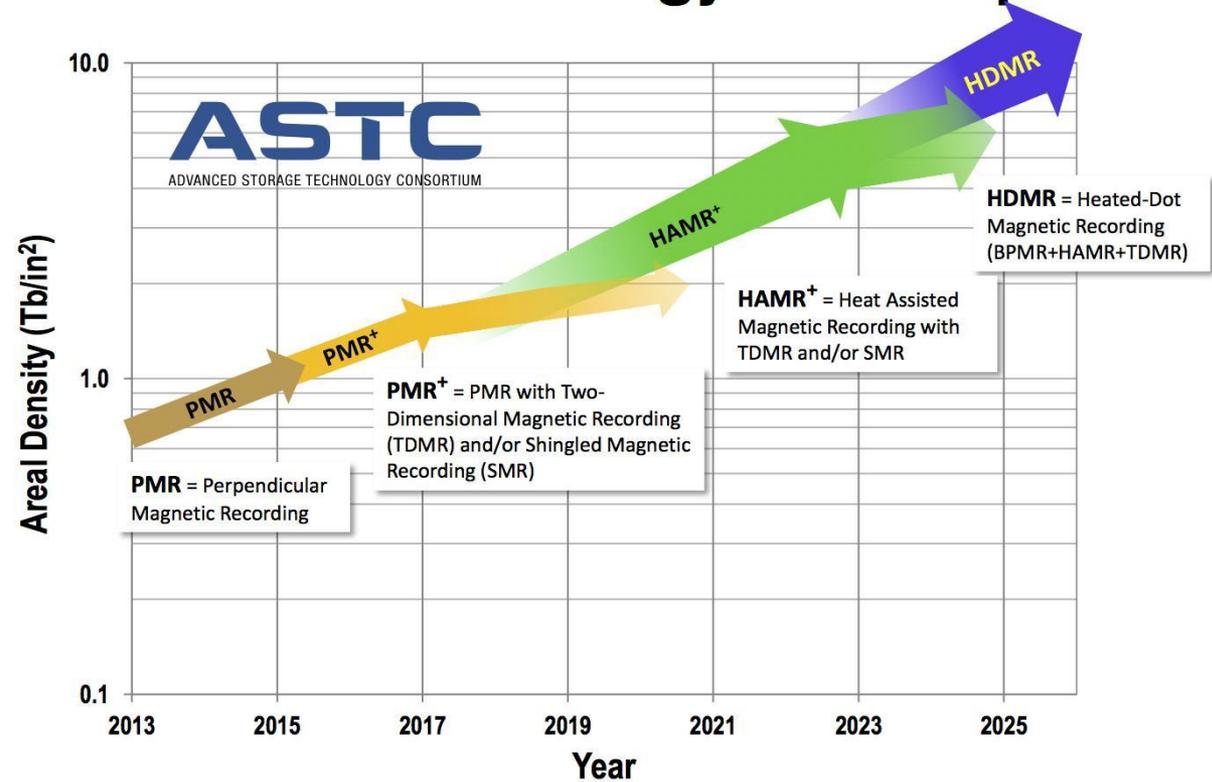
Магнитная запись: плотность, скорость,



Hard-drive



ASTC Technology Roadmap

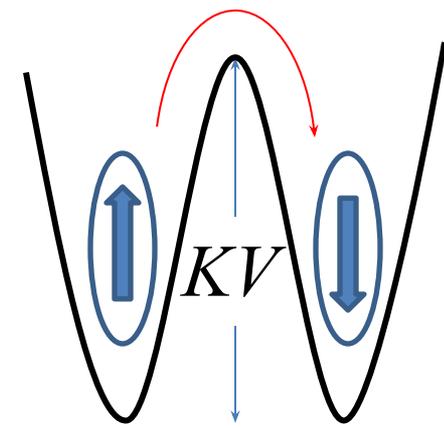
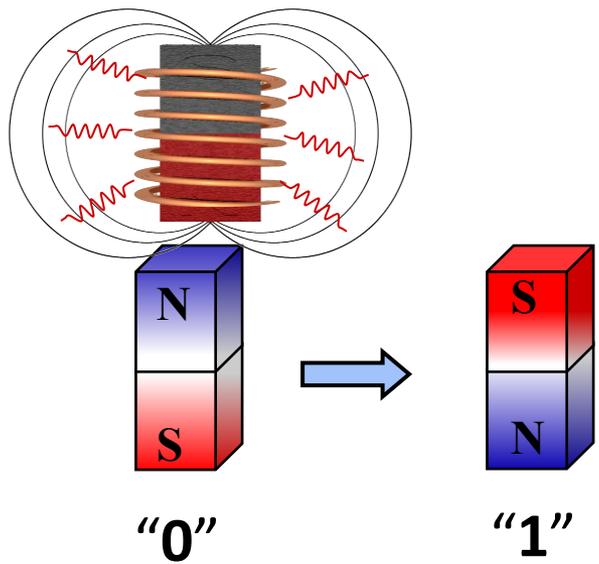


IDEMA

ASTC Confidential

Heat (by laser) Assisted Magnetic Recording
(Seagate, скоро на рынке?)

Магнитная запись: плотность, скорость,



Скорос
ть ← ИЛ → Низкие
тепловые
потери

1 бит { 1
0.1 нДж

5% потребляемого
электричества



Hard-drive



Google (The Netherlands)

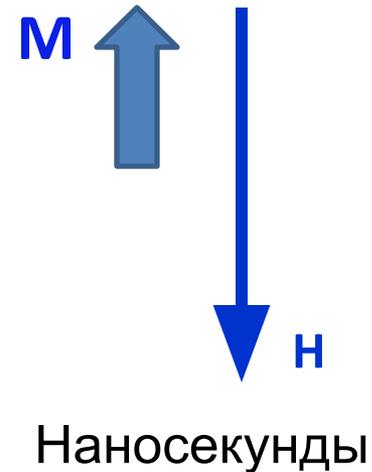
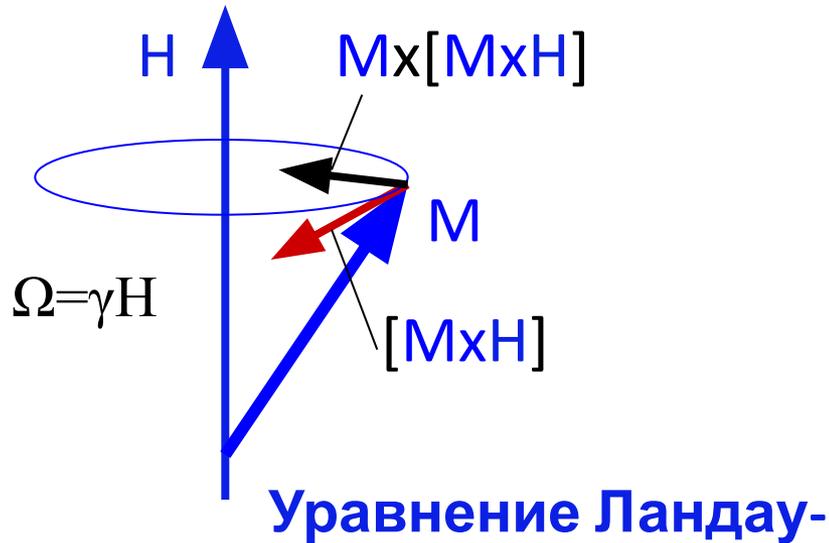
...



Facebook (Sweden)

Data centers

Как можно переключить намагниченность?



Возьмем лазер на свободных электронах...

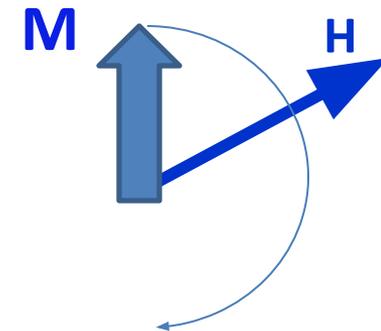


Несколько Тесла; 2.3 пс
@ Stanford

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

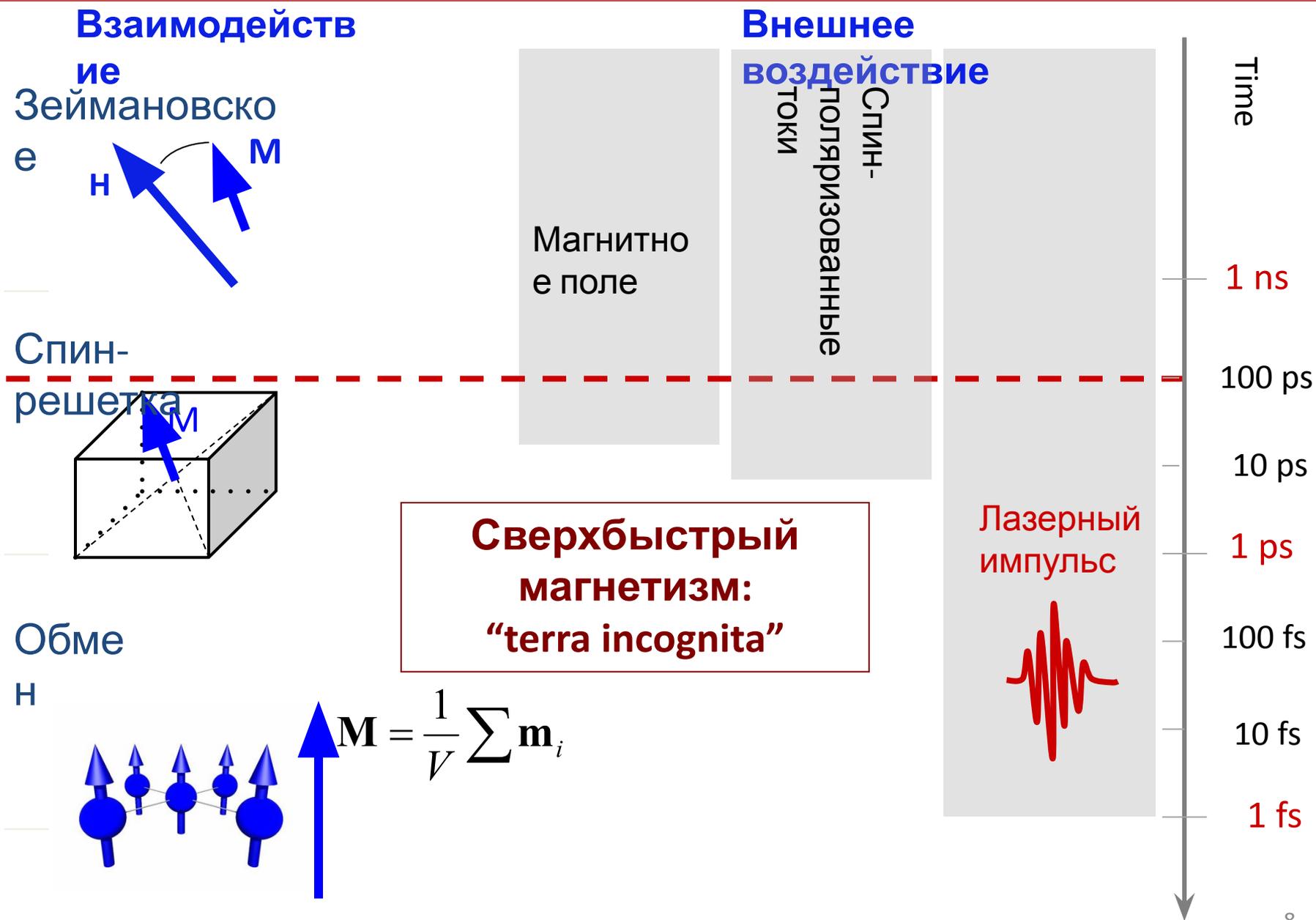
[I. Tudosa et al., Nature (2004);

C. H. Back et al., Science



100 пикосекунд!

Характерные времена магнитных взаимодействий



Взаимодействие света с магнитной средой

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

Изотропная среда
Намагниченная вдоль
z

Диэлектрическая
восприимчивость:

$$\hat{\varepsilon} = - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \mathbf{E} \partial \mathbf{E}^*} =$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_0 & -\alpha_{xyz} M_z \\ \alpha_{xyz} M_z & \varepsilon_0 \end{pmatrix} \varepsilon_0$$

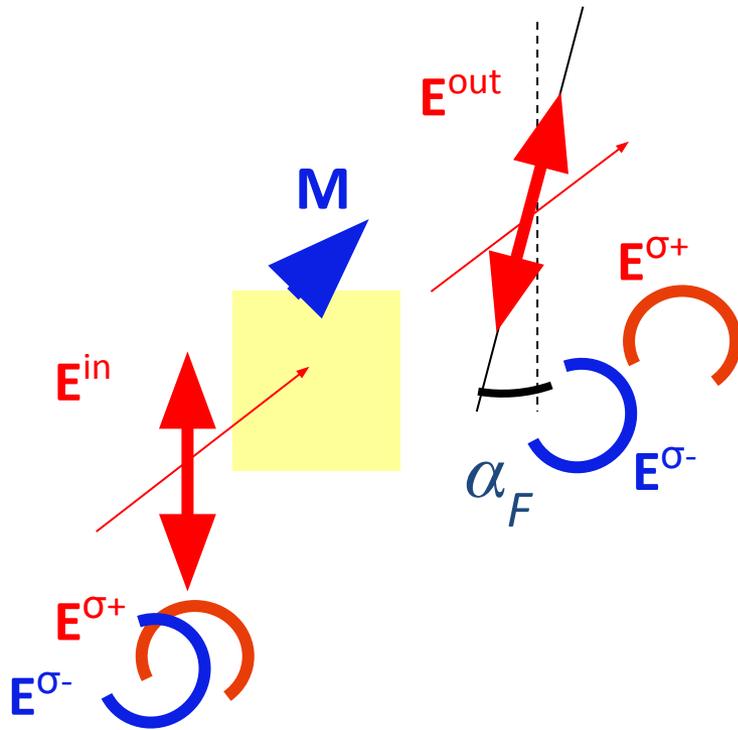
Собственные
поляризации:

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

Магнитное

двулучепреломление:

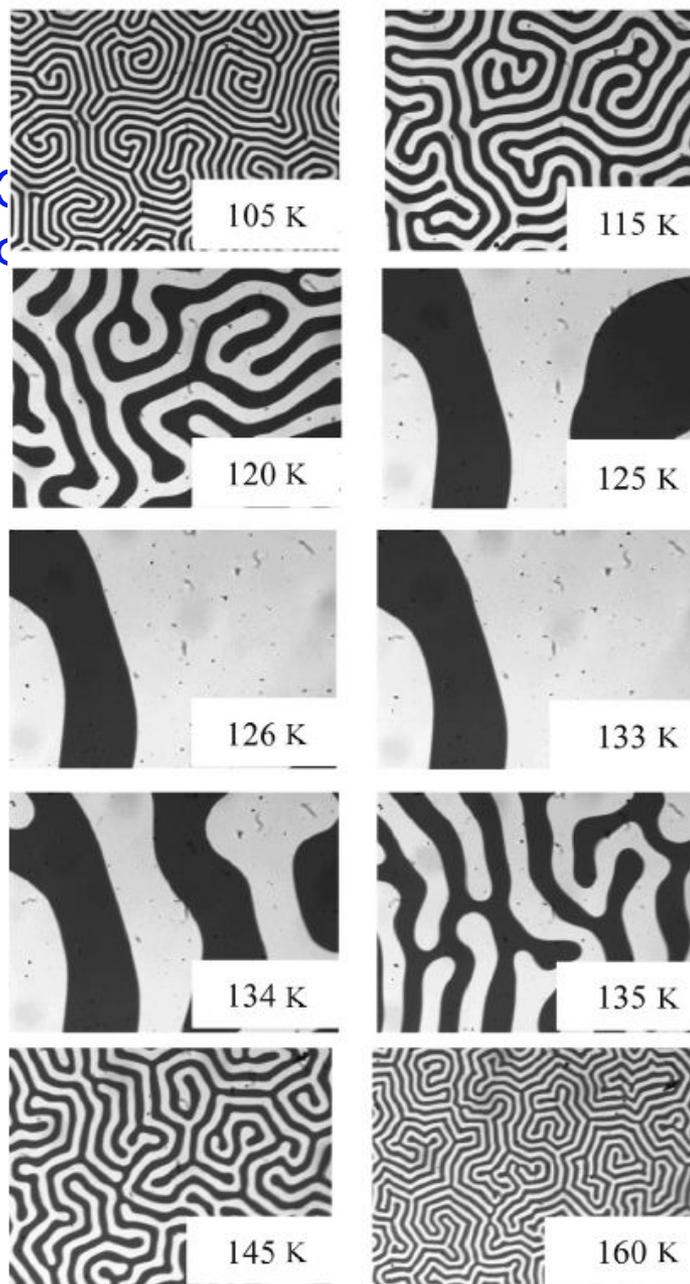
$$\Delta n_{\sigma^+ - \sigma^-} \sim \alpha_{xyz} M_z$$



Эффект
Фарадея

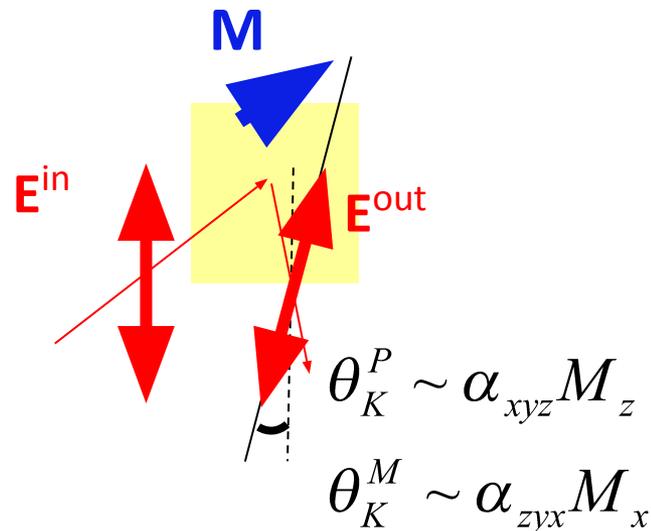
[M. Faraday,
1845]

Магнитооптические эффекты



$$\chi_{ijk} E_i E_j^* M_k + \beta_{ijkl} E_i E_j^* M_k M_l + \dots$$

Магнитооптические эффекты Керра

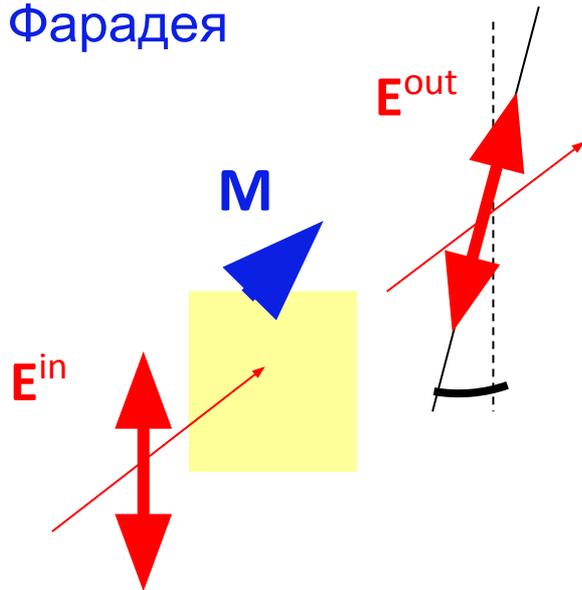


Мощное средство
для **зондирования** магнитной
структуры
управления свойствами
света

Взаимодействие света с магнитной средой

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

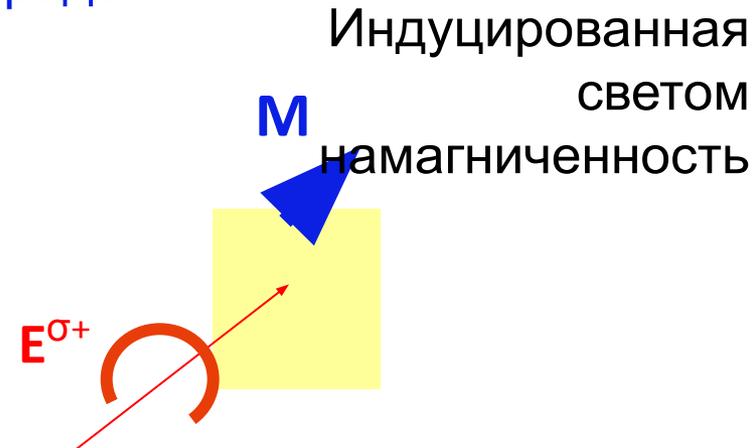
Эффект
Фарадея



[M. Faraday,
1845]

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

Обранный эффект
Фарадея



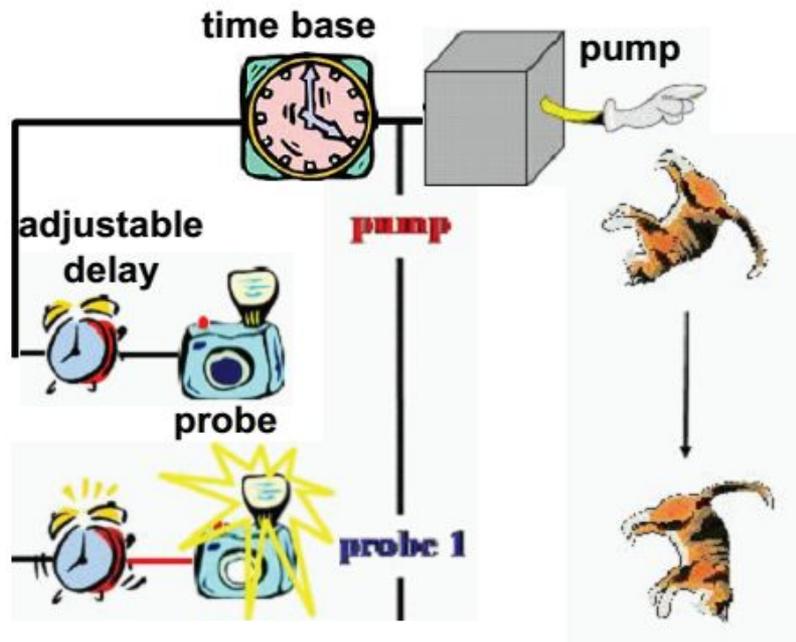
Индукцированная
светом
намагниченность

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

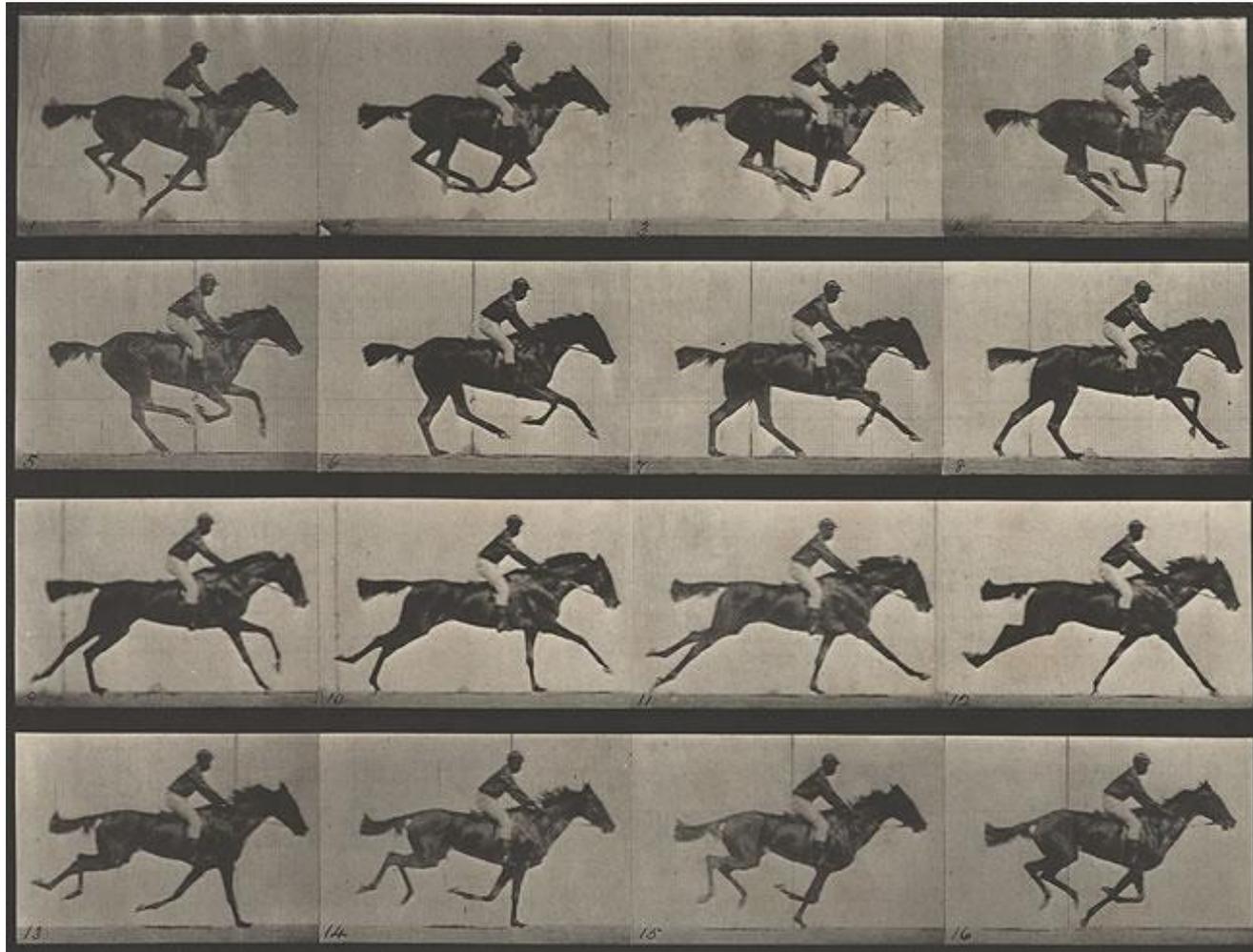
$$\mathbf{M}_z \sim \alpha_{xyz} \mathbf{E} \times \mathbf{E}^*$$

Давайте возьмем короткий импульс и магнитный материал

Как можно померить очень быстрые изменения чего-то?

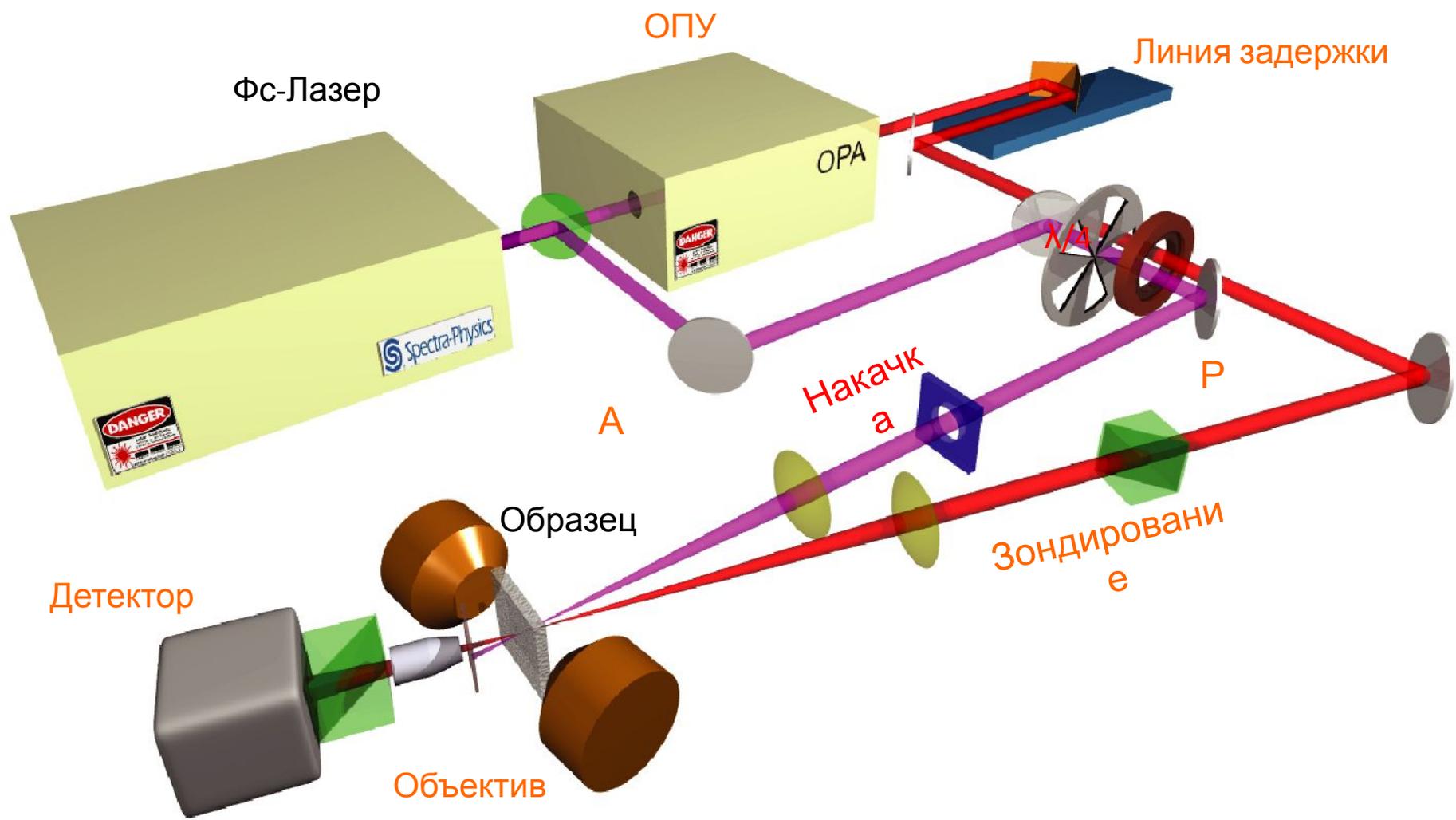


Исторический пример

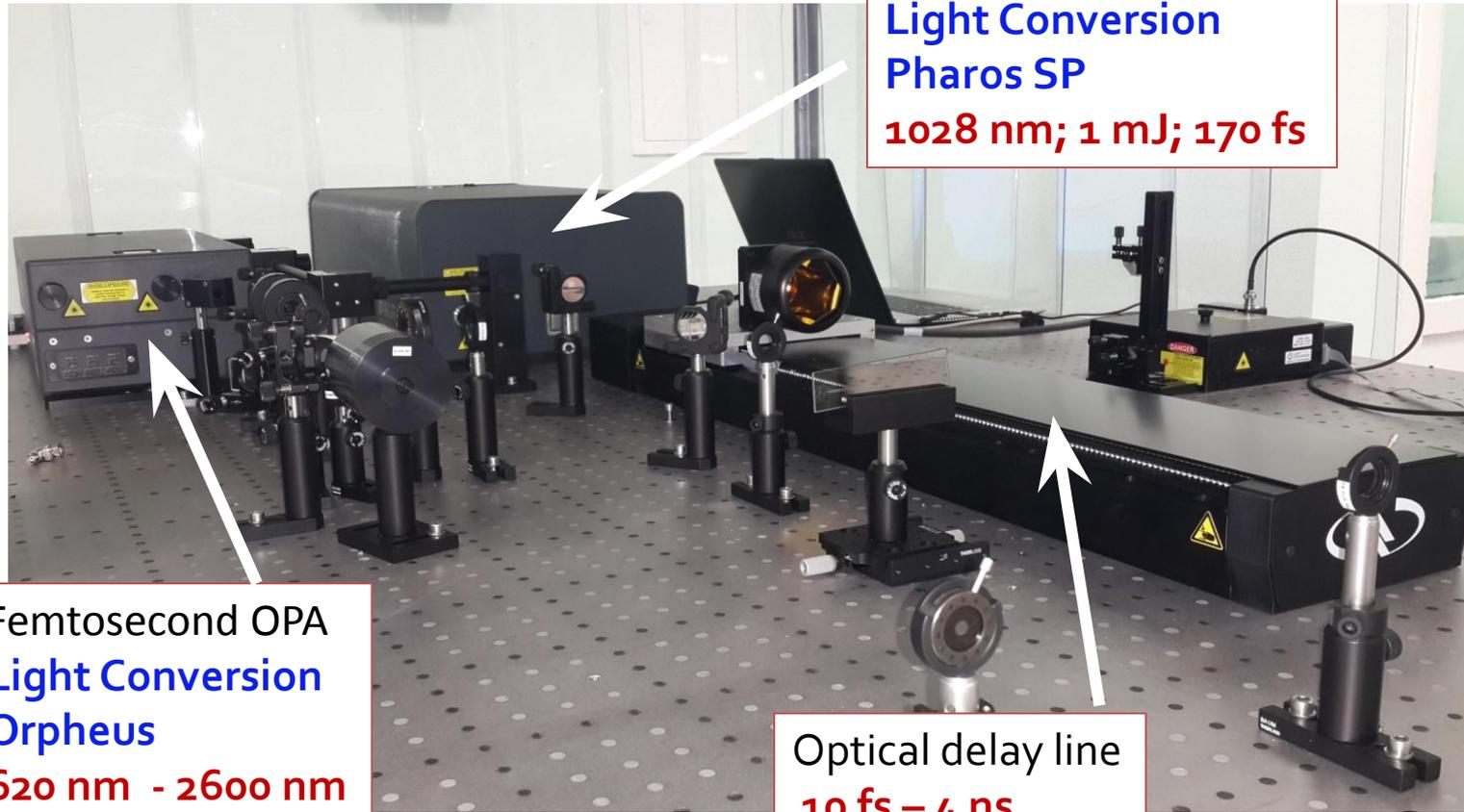


Эдвард Майбридж
1878 год
24 камеры

Как померить динамику намагниченности, индуцированную фемтосекундным лазерным импульсом?



Magneto-optical spectroscopy setup with femtosecond temporal resolution @ FerroLab



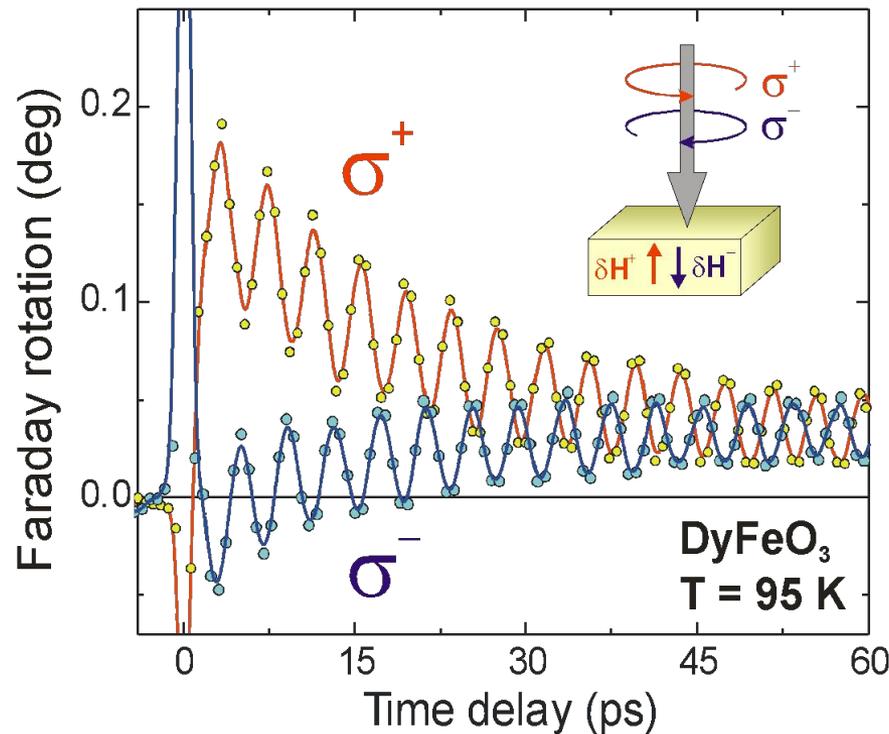
Femtosecond amplifier
**Light Conversion
Pharos SP**
1028 nm; 1 mJ; 170 fs

Femtosecond OPA
**Light Conversion
Orpheus**
620 nm - 2600 nm
130-200 fs

Optical delay line
10 fs – 4 ns

+ temperature **4 K – 400 K**
+ magnetic fields up to **2 T**

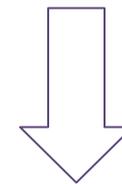
Сверхбыстрый обратный эффект Фарадея



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

Фемтосекундный импульс лазерно-индуцированного «магнитного» поля до нескольких Тесла

$$\mathbf{H}_{eff} \sim \alpha_{xyz} \mathbf{E} \times \mathbf{E}^*$$



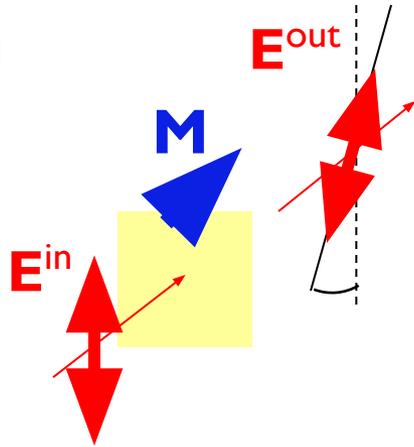
Сверхбыстрый обратный эффект Фарадея

Прецессия намагниченности, запускаемая лазерным импульсом!

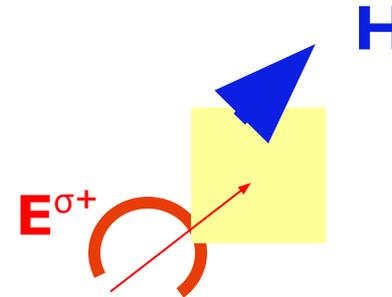
Сверхбыстрые оптомагнитные эффекты

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

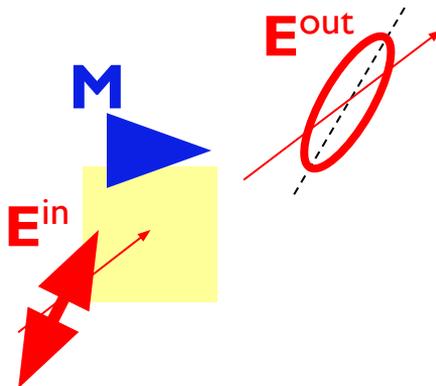
Эффект
Фарадея



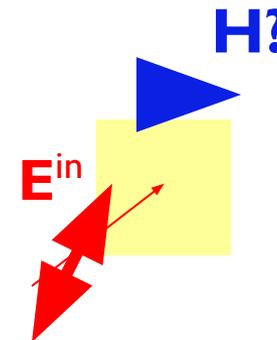
Обратный эффект
Фарадея



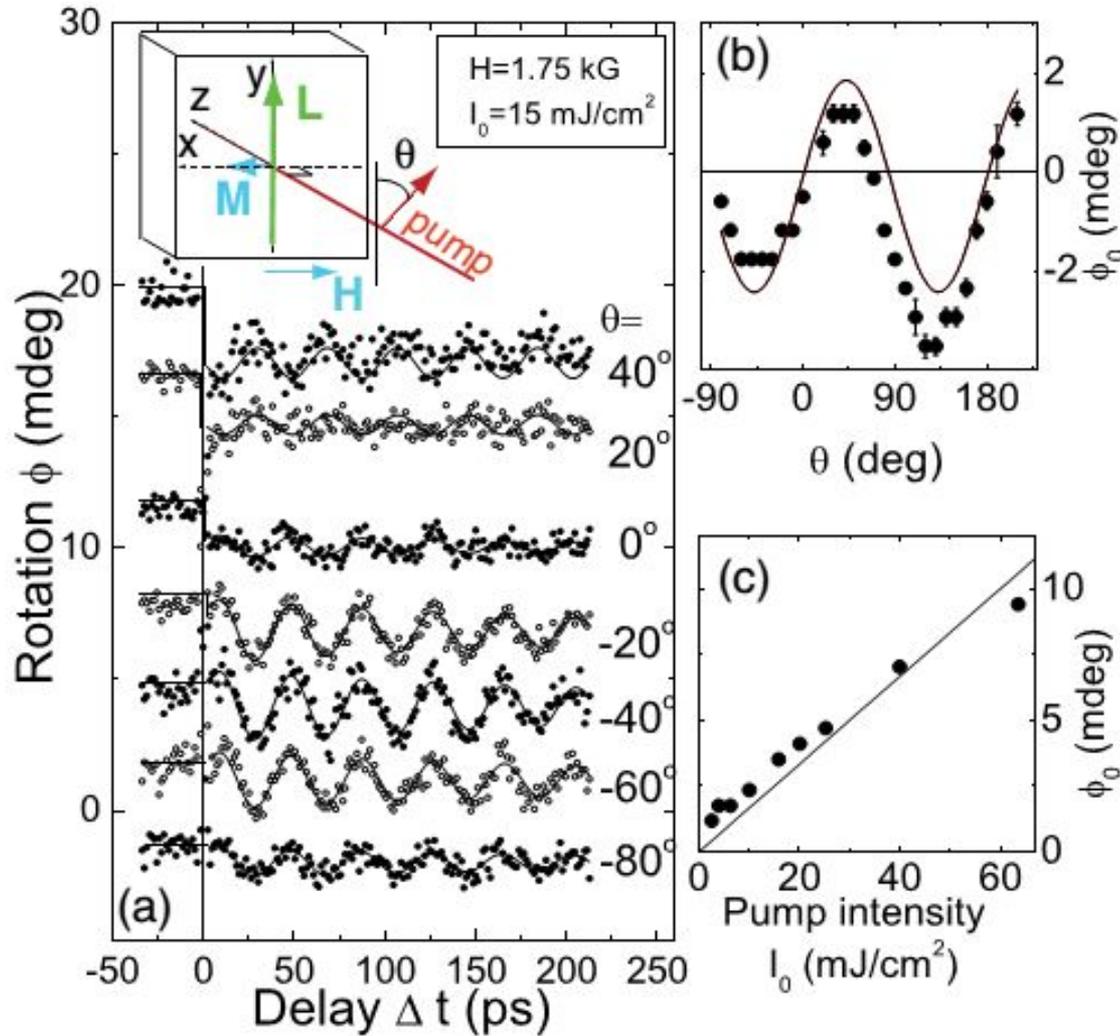
Эффект Котона-
Мутона



Обратный эффект Котона-
Мутона



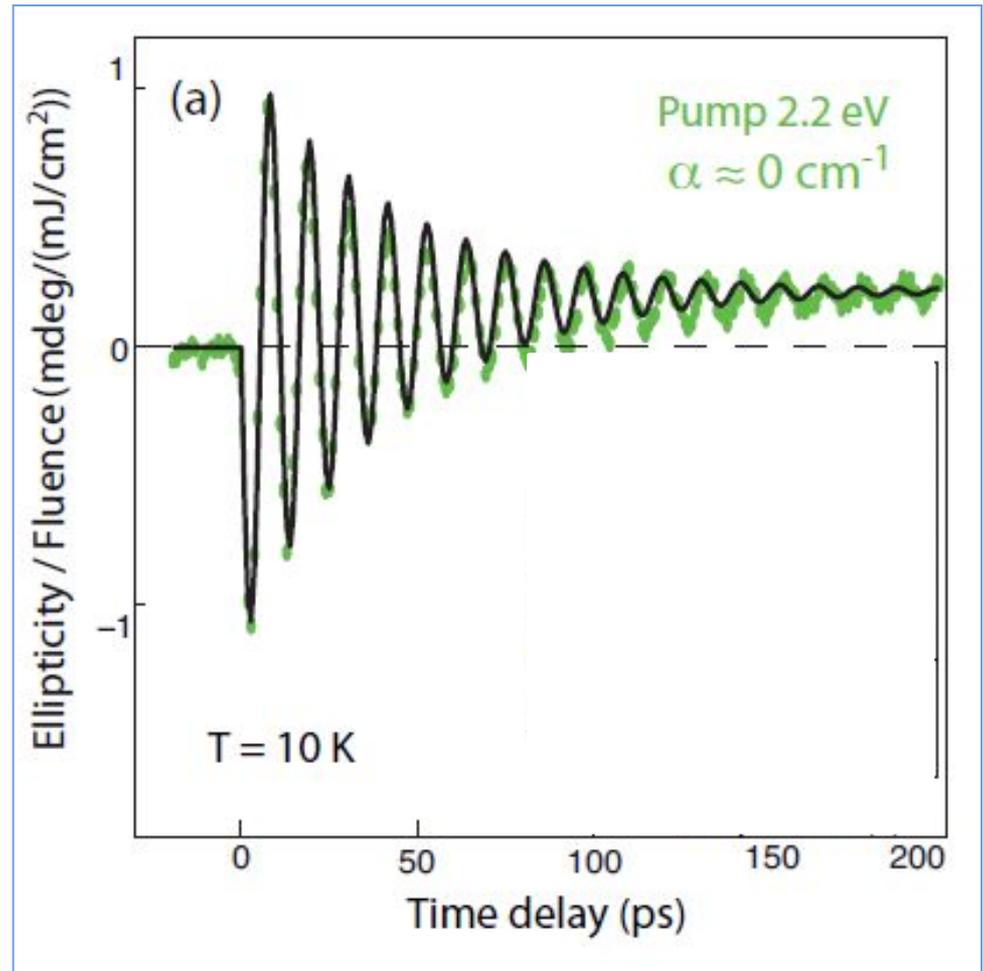
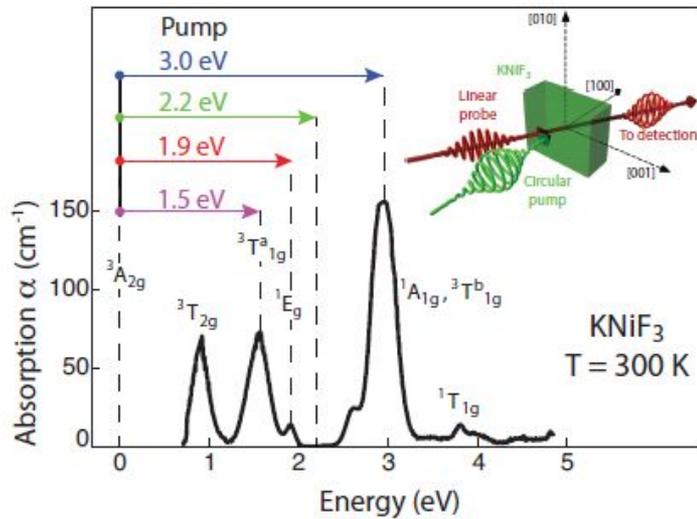
Сверхбыстрый обратный эффект Котона-Мутона



[A. M. Kalashnikova et al., PRL (2007), PRB (2008)]

Управление прецессией намагниченности
линейно-поляризованными лазерными импульсами!

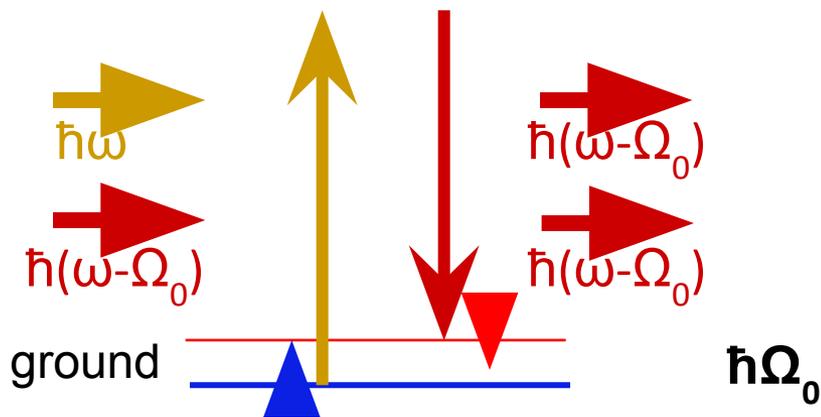
Возбуждение прецессии без поглощения?



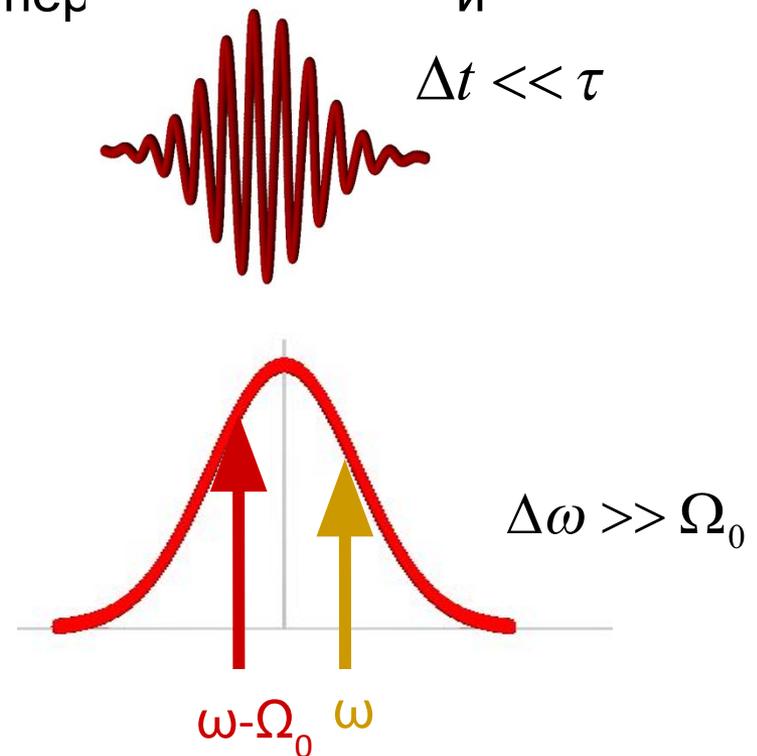
[D. Bossini et al., PRB (2014)]

Микроскопический механизм обратный магнитооптических эффектов

Стимулированное
рамановское
рассеяние на магнонах
excited Spin-Orbit splitting



Если лазерный импульс
короче
периода прецессии



Импульсное стимулированное рамановское рассеяние на магнонах

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

Сверхбыстрые обратные магнитооптические эффекты:

- ✓ Возбуждение прецессии намагниченности

- ✓ Управление начальной фазой прецессии

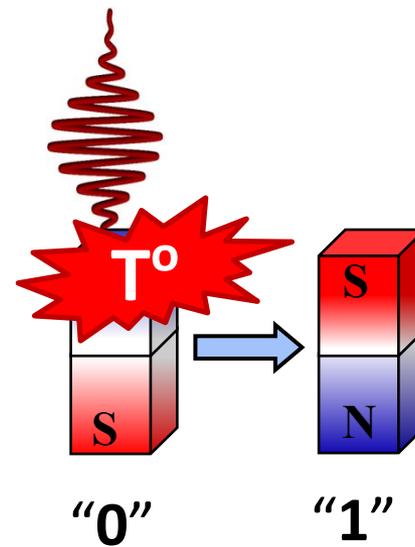
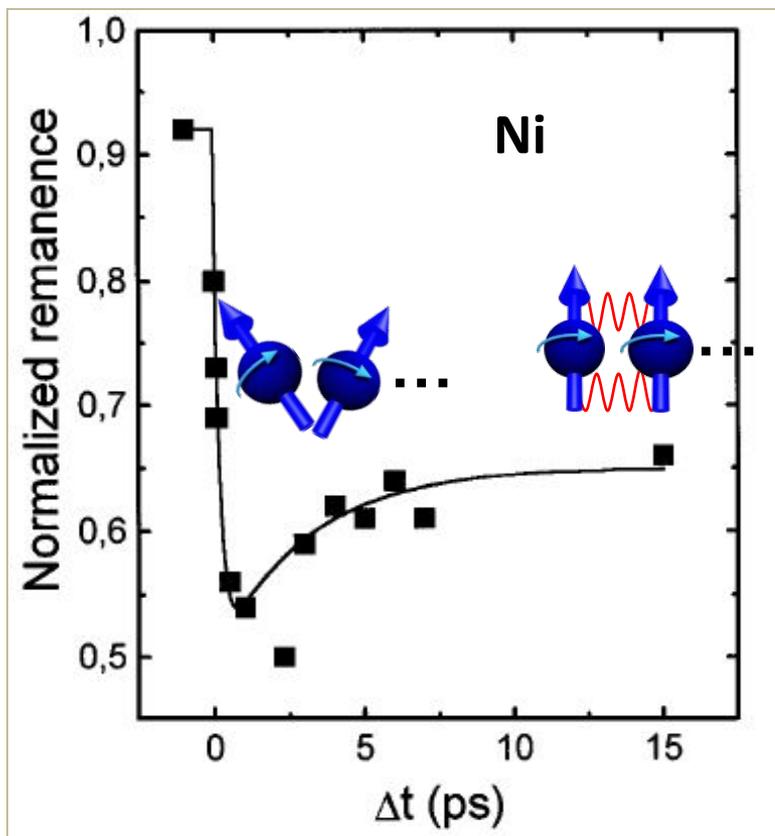
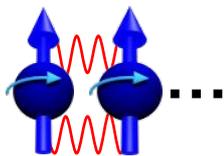
- ✓ Без поглощения

- Как их усилить?

- Как их локализовать?

ОК, но прецессии не достаточно.....

Сверхбыстрый магнетизм в металлах

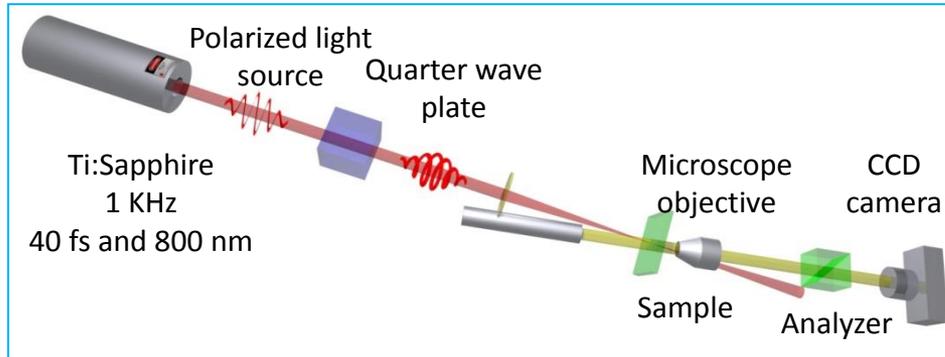


Основано на поглощении света
и **быстром нагреве электронов**

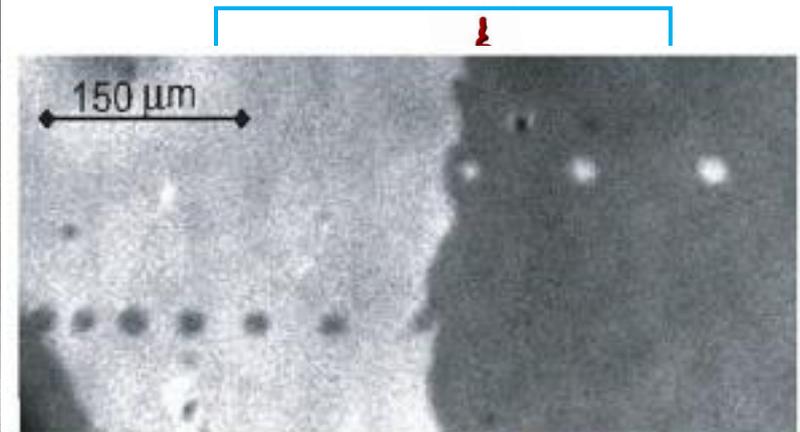
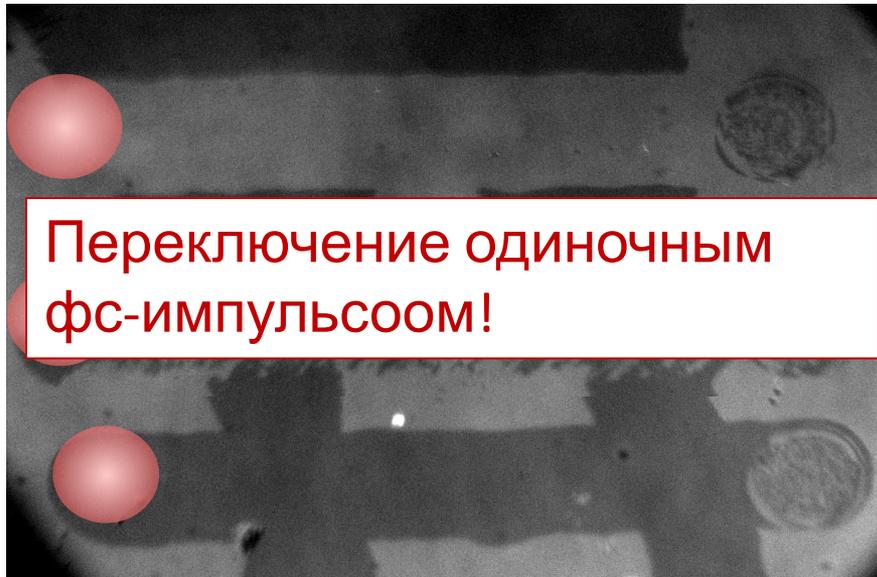
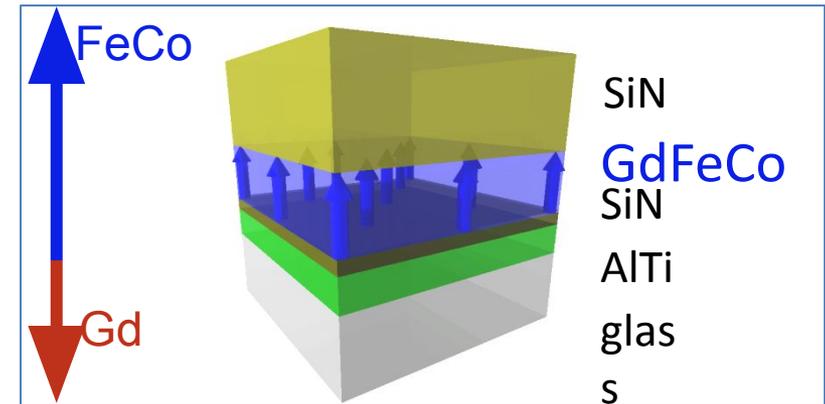
**Сверхбыстрое
размагничивание
в пленке металла**

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

Оптическое переключение намагниченности: первая демонстрация

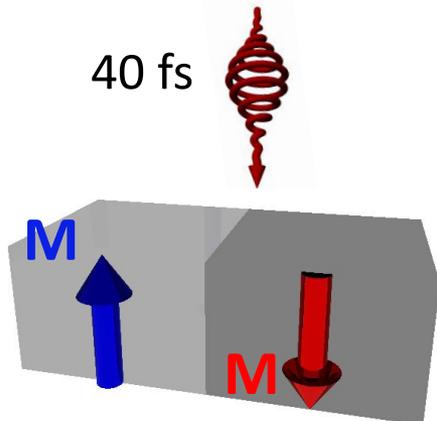
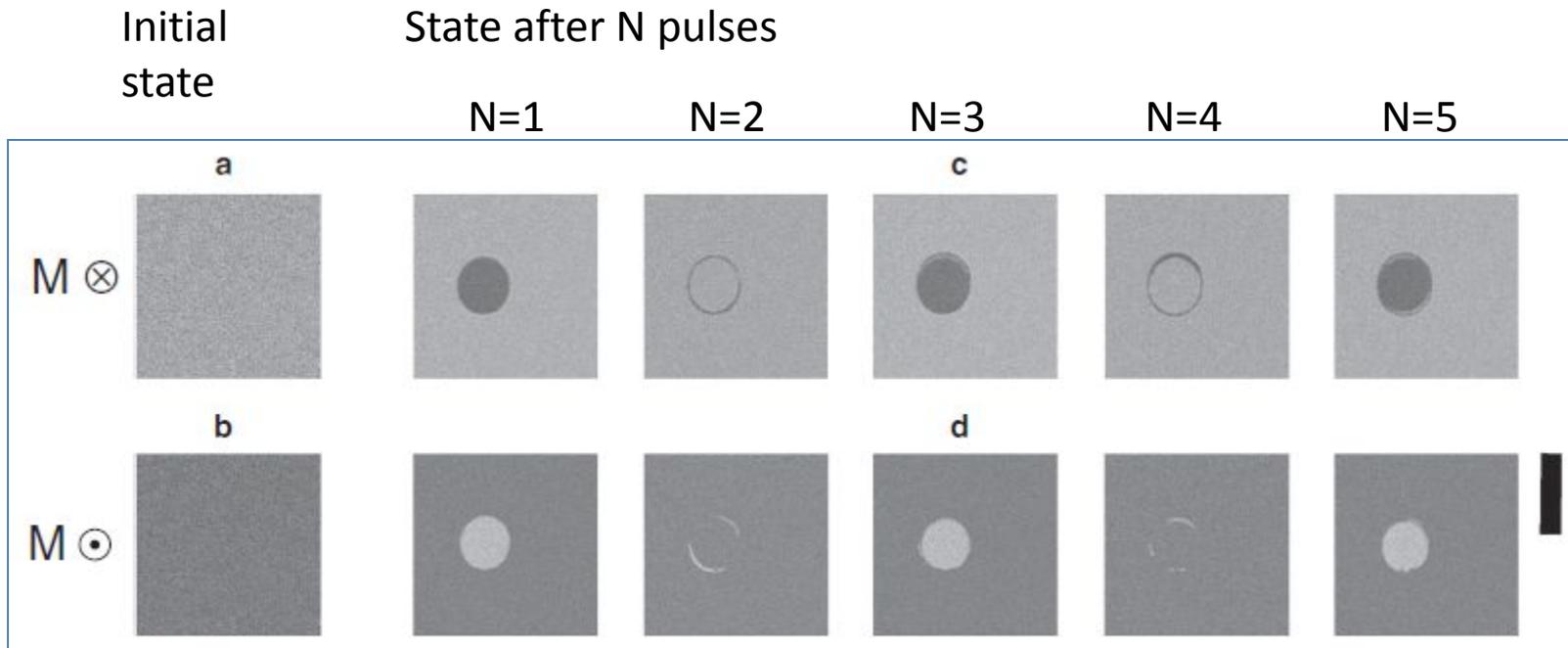


Ferrimagnetic metallic alloy GdFeCo



[D. Stanciu et al., PRL (2007)]

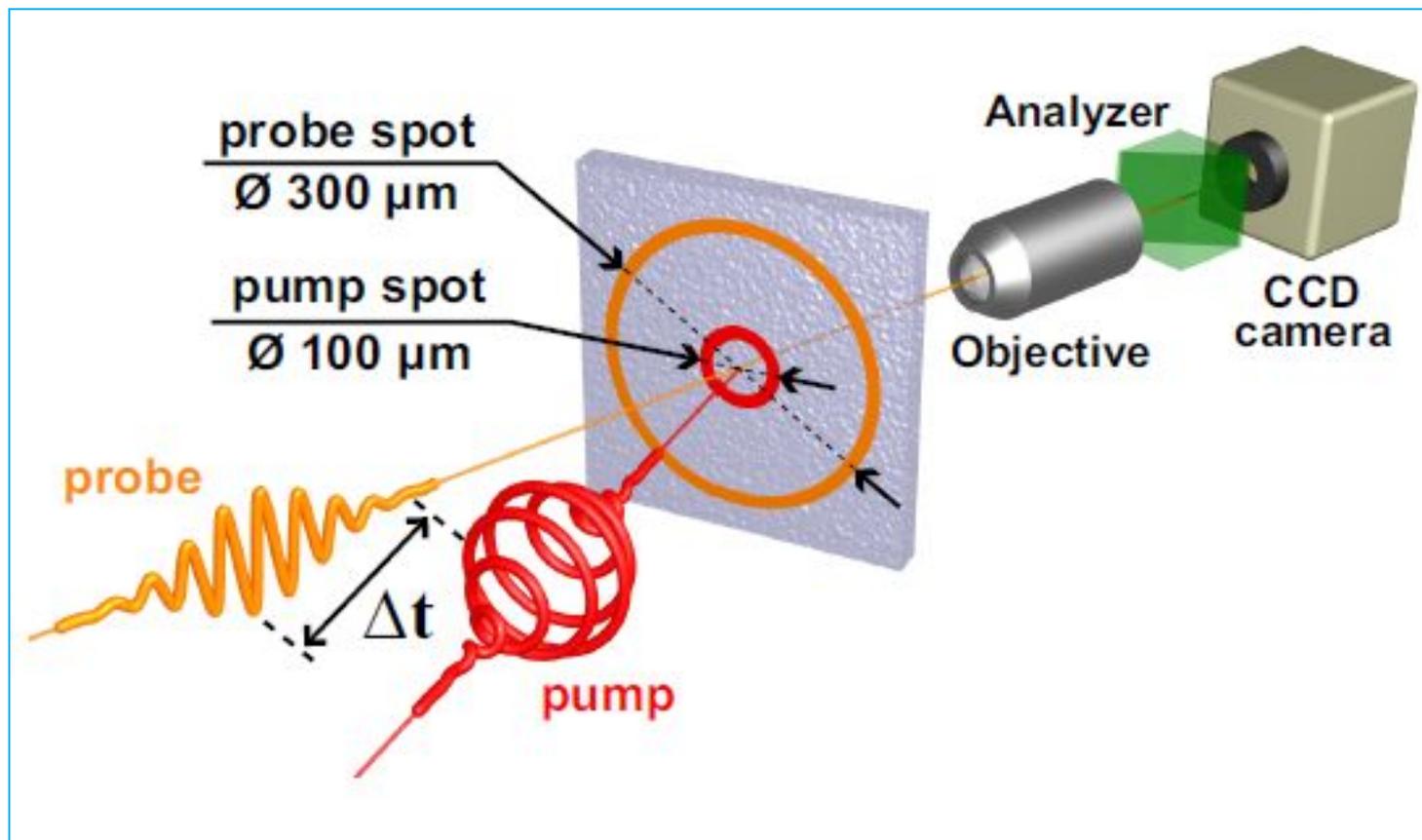
Оптическое переключение намагниченности одиночными импульсами



Как быстро это происходит?

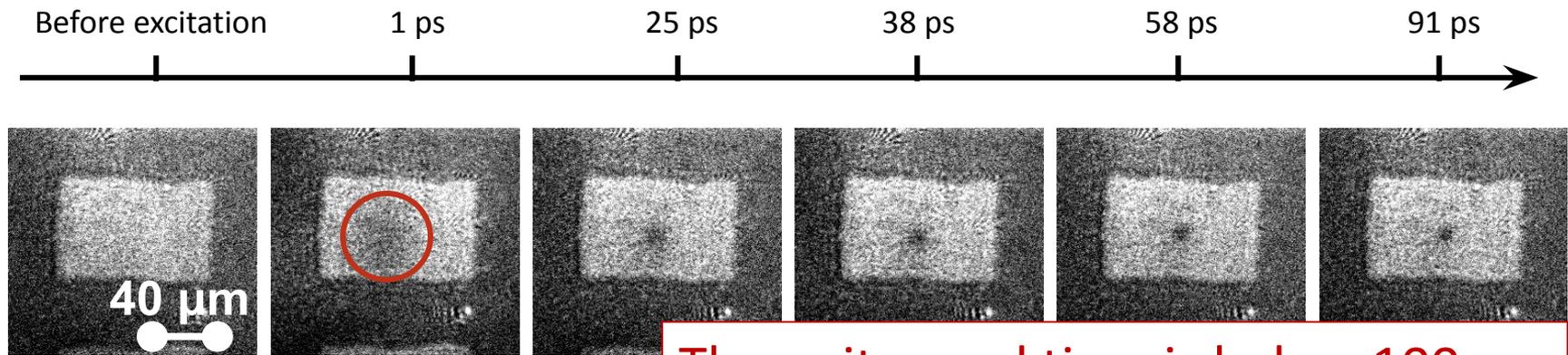
[T. Ostler et al., Nature Comm.
(2012)]

Одноимпульсная фемтосекундная фотография

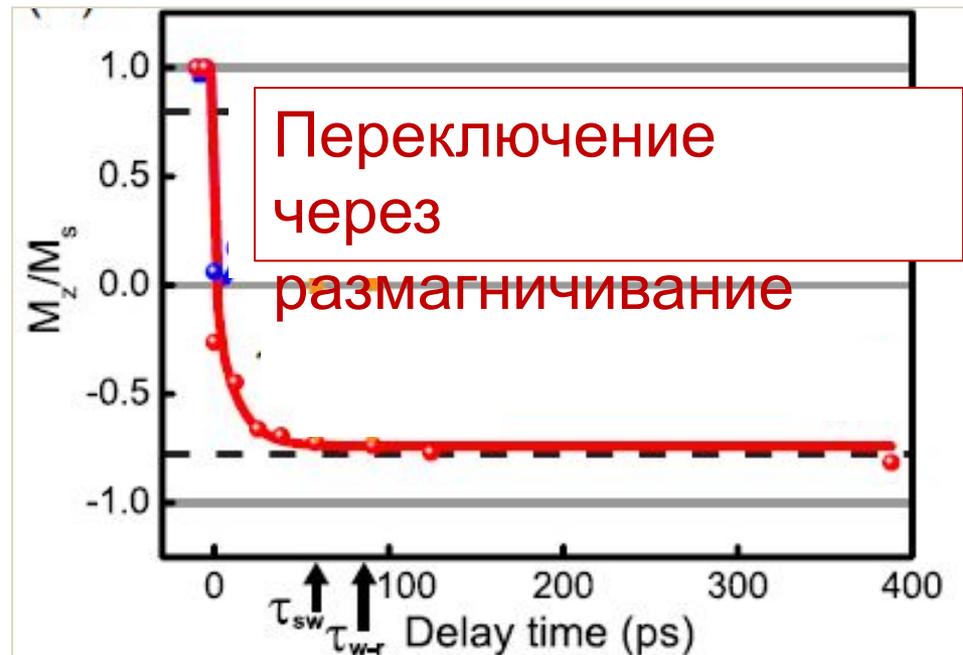


Magneto-optical images with subpicosecond resolution

Динамика оптического переключения намагниченности



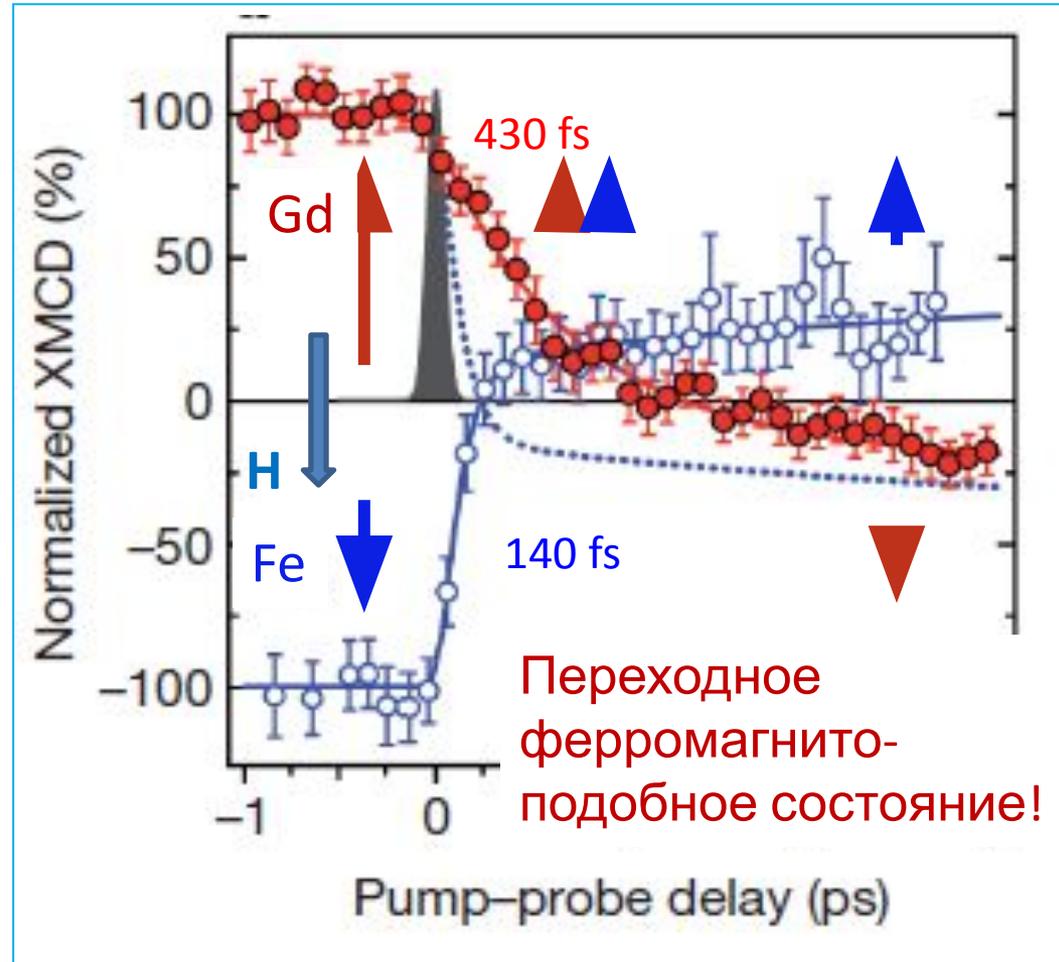
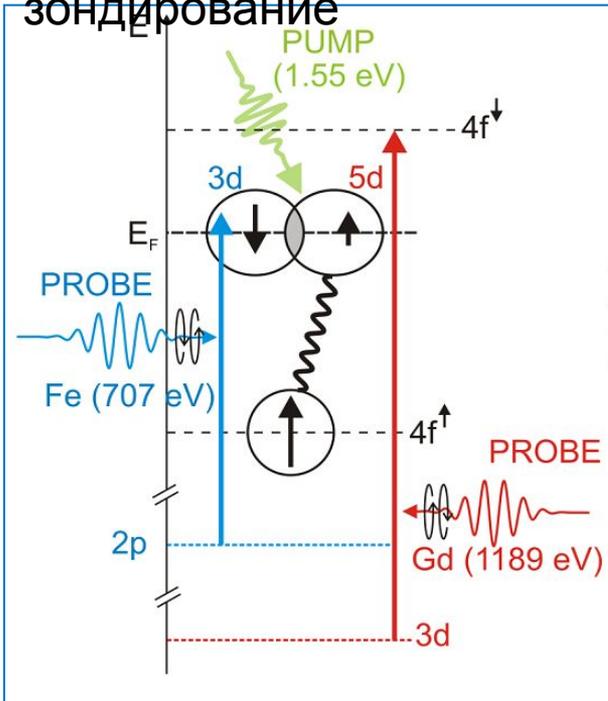
The write-read time is below 100 ps



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

Сверхбыстрая динамика спинов в ферримагнетике GdFeCo

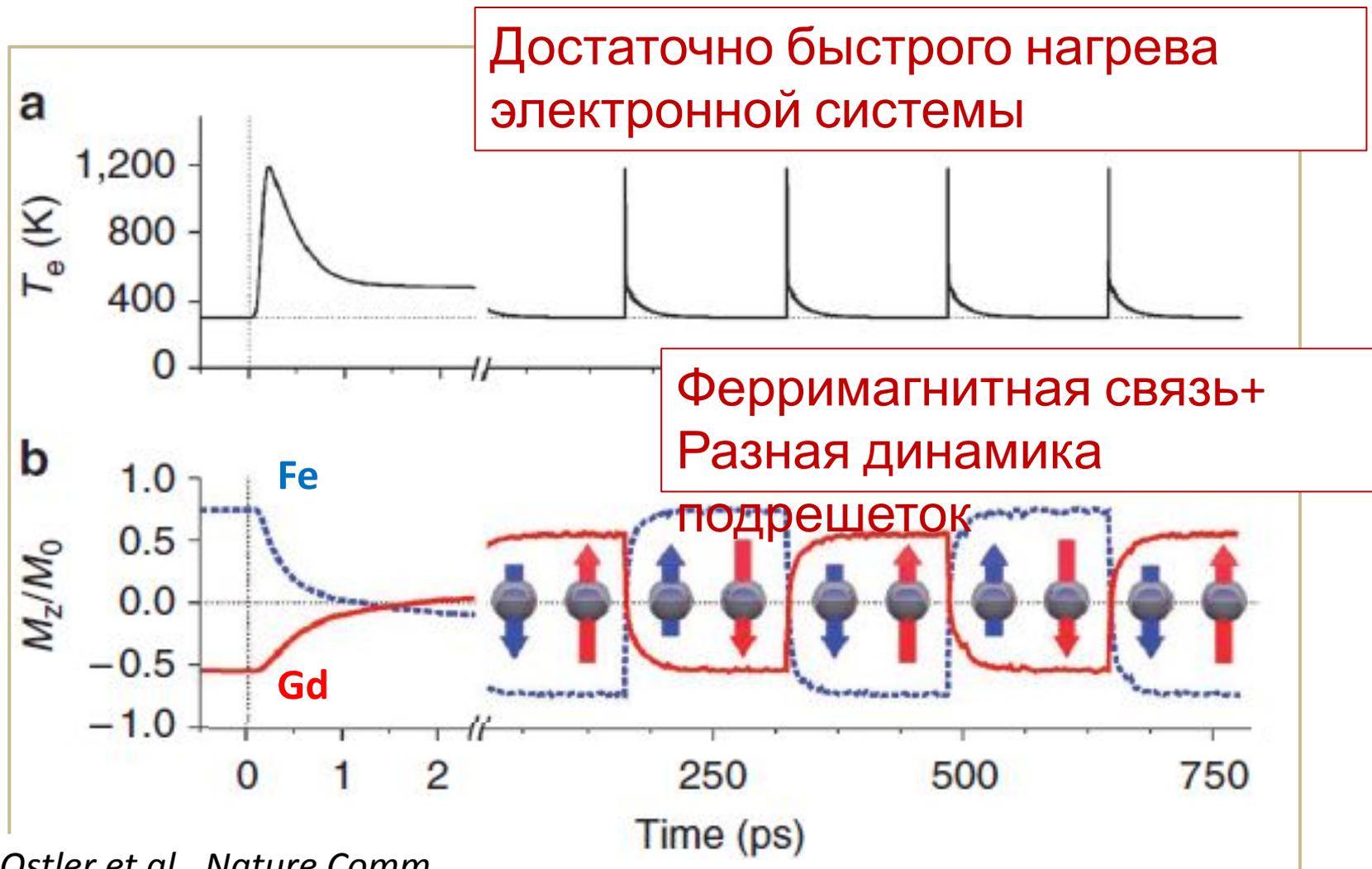
Оптическое возбуждение
Рентгеновское зондирование



Разная динамика сверхбыстрого размагничивания в ферримагнетике

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

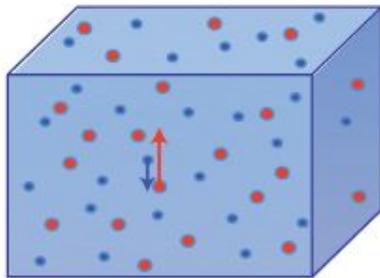
К пониманию сверхбыстрого оптического переключения намагниченности



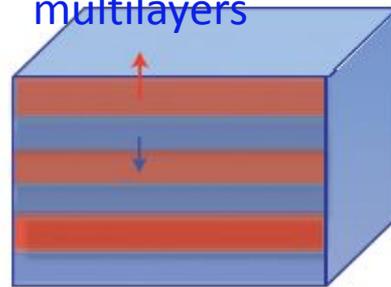
[T. Ostler et al., Nature Comm. (2012);
J. Mentink et al., PRL (2012)]

Что дальше? поиск различных структур для переключения

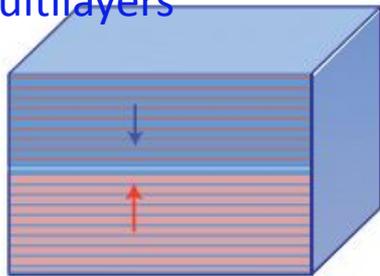
RE/TM alloy



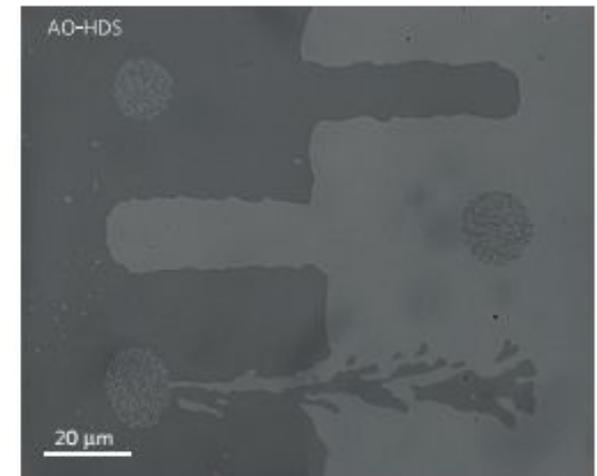
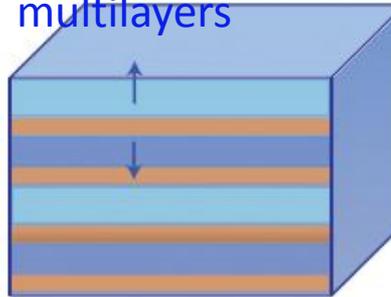
b RE/TM multilayers



RE/TM multilayers



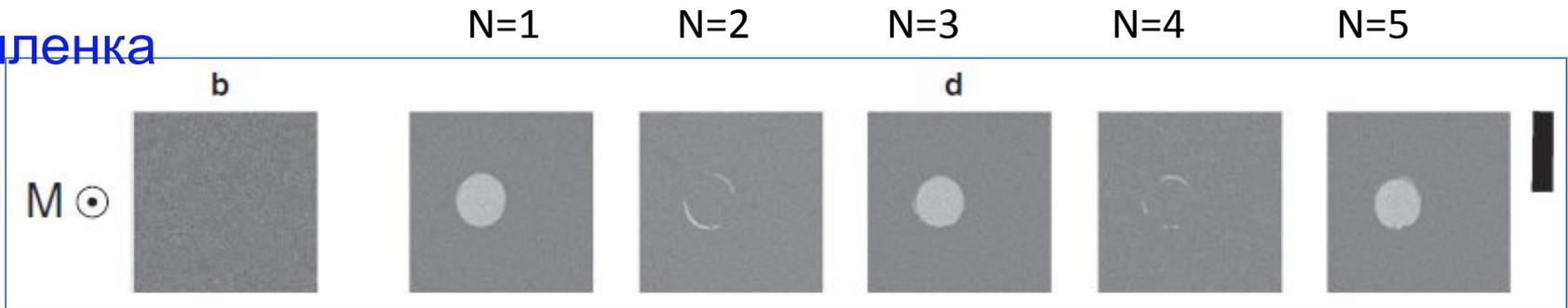
d TM1/TM2 multilayers



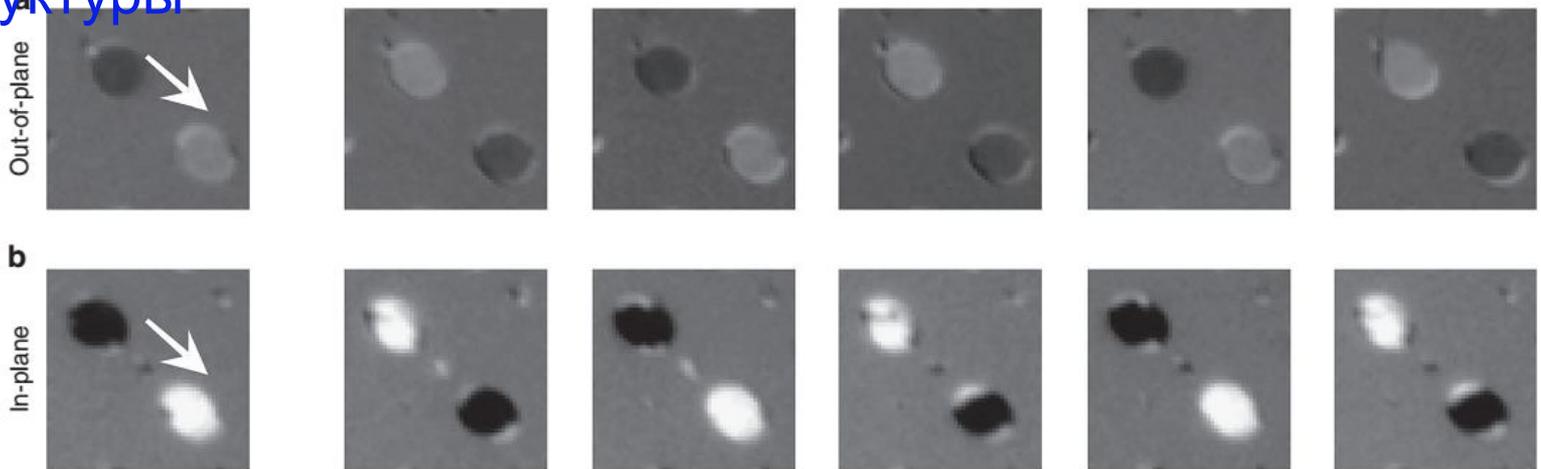
[S. Mangin et al., Nature Mater. (2014)]

Что дальше? микронные масштабы

Сплошная
пленка



2- μm
структуры



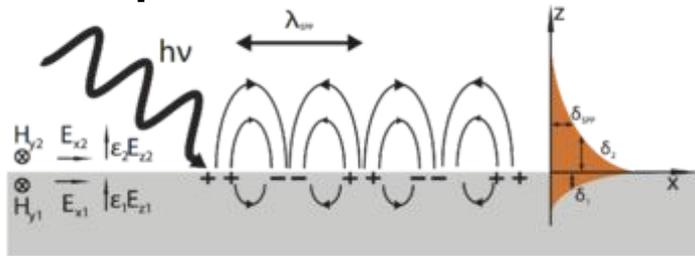
[T. Ostler et al., Nature Comm.
(2012)]

**ОК, но все еще очень большие
размеры!**

Что дальше?

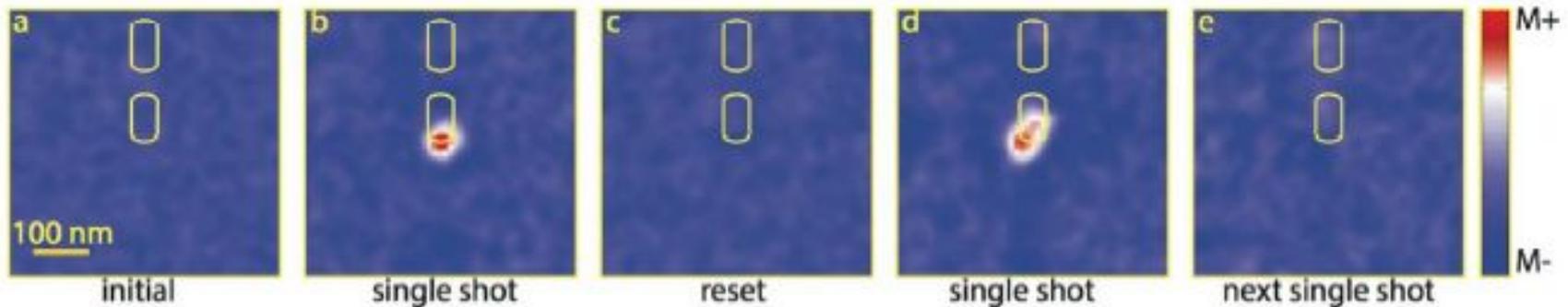
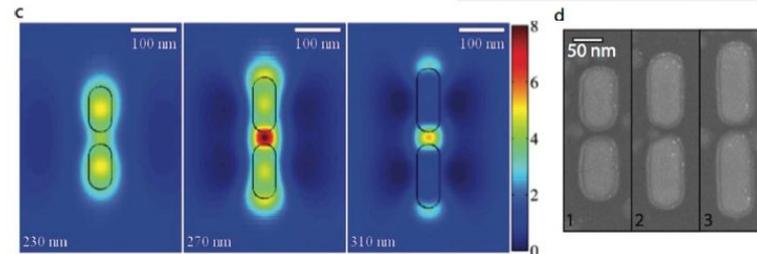
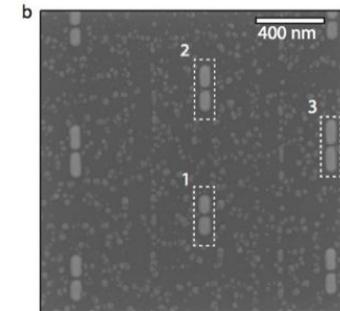
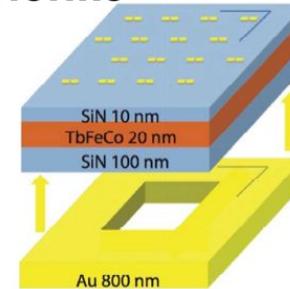
переключение наноразмерных областей

Поверхностный плазмон-поляритон



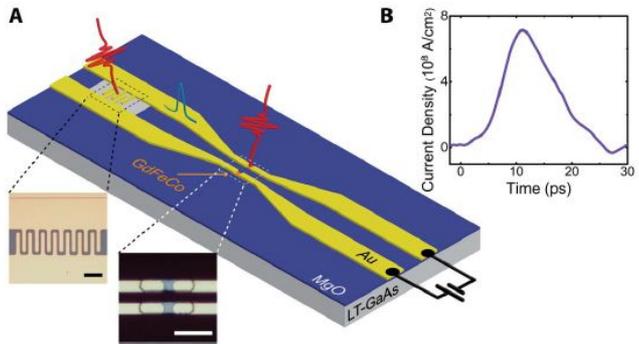
Фокусировка излучения
за пределами дифракционного
предела!

Наноантенна на TbFeCo пленке

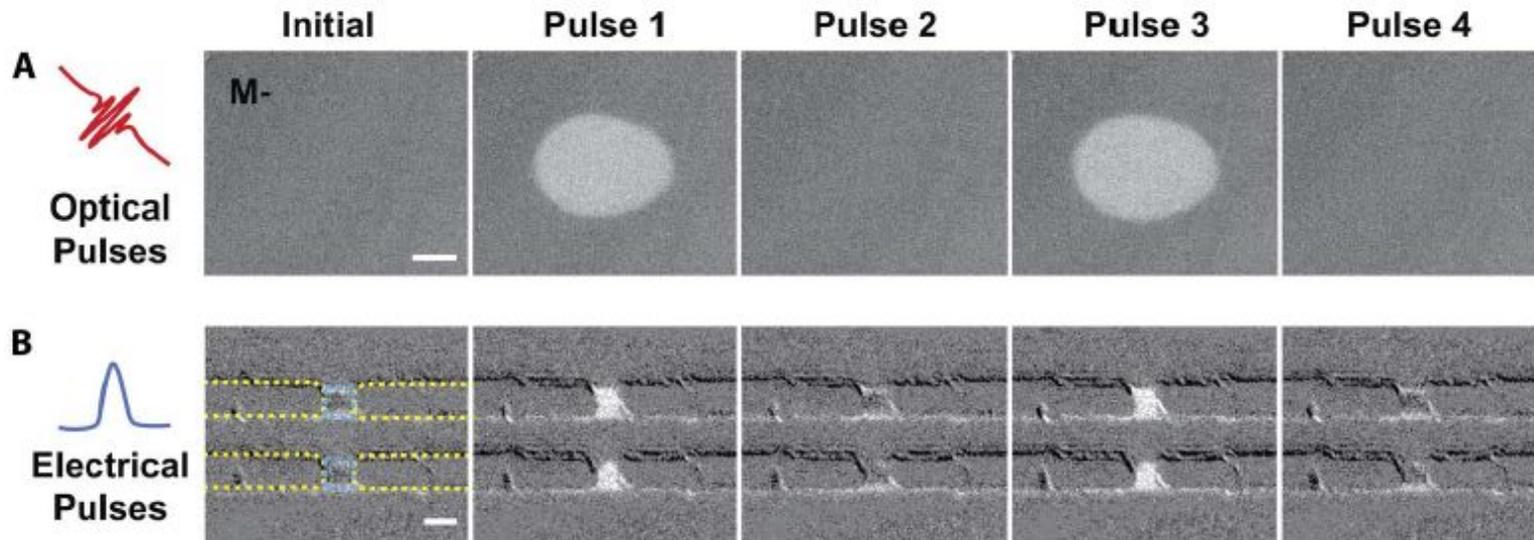


[Tian-Min Liu et al., NanoLetters (2016)]

Что дальше? обойдемся без лазерного импульса...



Если лазерный импульс служит только «сверхбыстрым нагревателем» для электронов, то давайте заменим его импульсом тока?



[Y. Yang et al., *Science Adv.* **3**: e1603117 (2017)]

[теория: А. М. Kalashnikova, V. I. Kozub, *PRB* (2016)]

Оптическое переключение намагниченности
в ферримагнитных металлах RE-TM и родственных
структурах

Происходит через сильно-неравновесное размагниченное
состояние

Основано на сверхбыстром нагреве и разной динамике
подрешеток

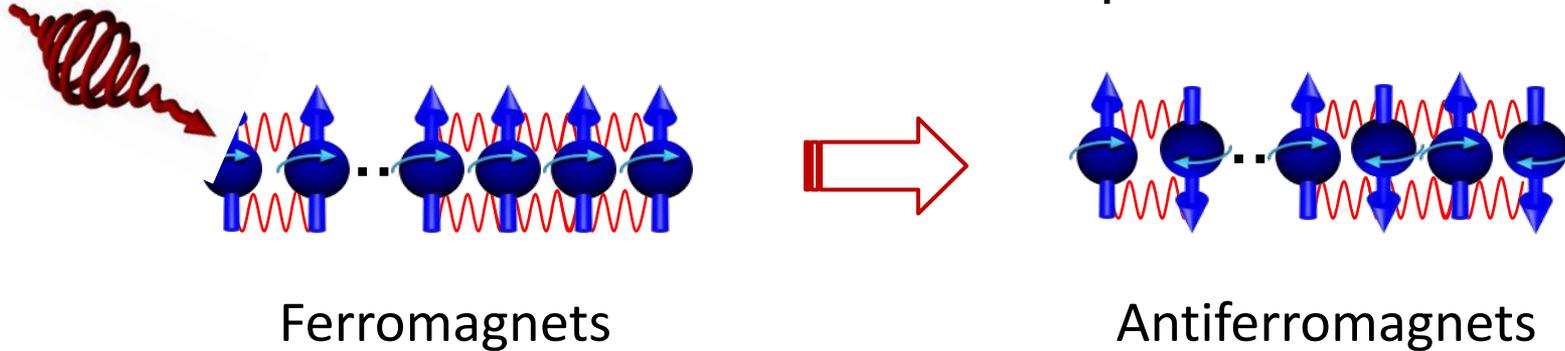
Позволяет достичь времен записи-считывания ~ 30 ps

Может быть реализовано в синтетических ферримагнетиках?

Может быть реализовано на микронном и нанометровом
масштабе?

Сверхбыстрый оптомагнетизм: что дальше?

Г — переключение знака обменного интеграла?



Развитие теорий и численных методов:
термодинамические подходы не
работают!

Поиск и конструирование
материалов

Сверхбыстрое переключение с минимальным
поглощением

Переключение не только лазерным импульсом (ТГц,
ИК)...

Radboud University Nijmegen

K. Vahaplar D. Bossini
J. Mentink J. A. de Jong
D. Afanasiev I. Razdolski

A. V. Kimel

A. Kirilyuk

Th. Rasing

Ioffe Institute

V. N. Gridnev
V. V. Pavlov
L. A. Shelukhin
V. V. Pavlov
R. V. Pisarev

Paul Scherrer Institut

S. El Moussaoui
L. Le Guyader
E. Mengotti
L.J. Heyderman
F. Nolting

Moscow Power Engineering Institute

A.M. Balbashov

Nihon University

A. Tsukamoto
A. Itoh

The University of York

T.A. Ostler
J. Barker
R.F.L. Evans
R.W. Chantrell

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid

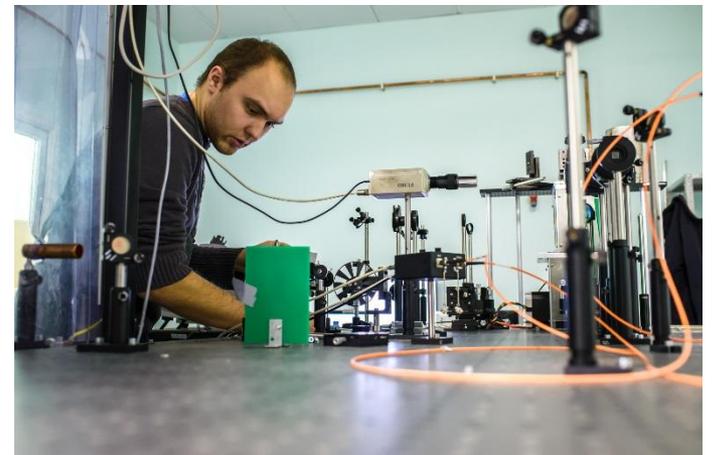
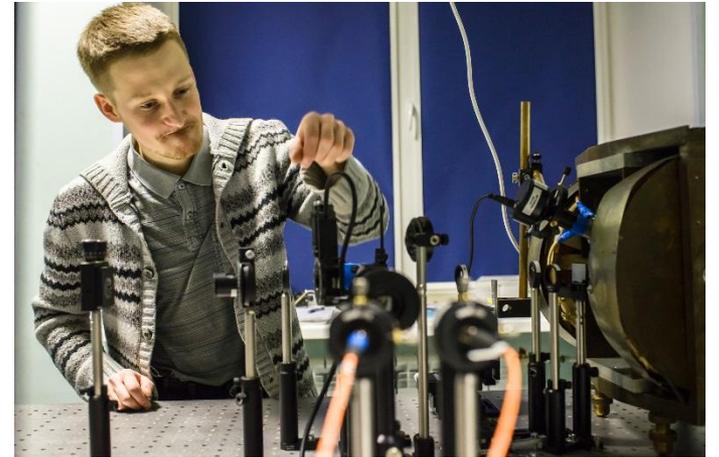
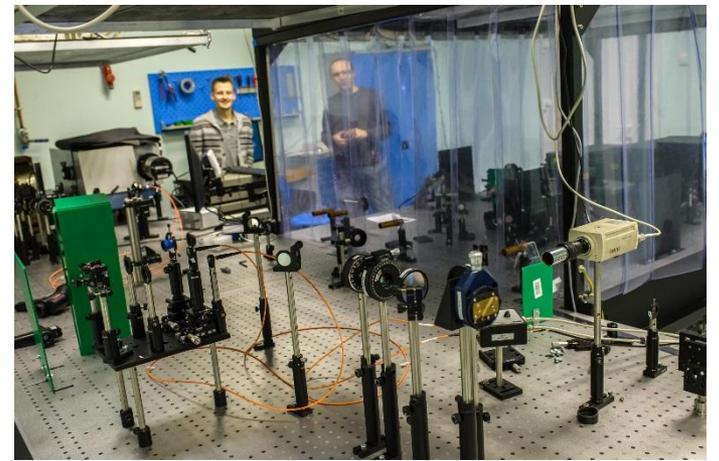
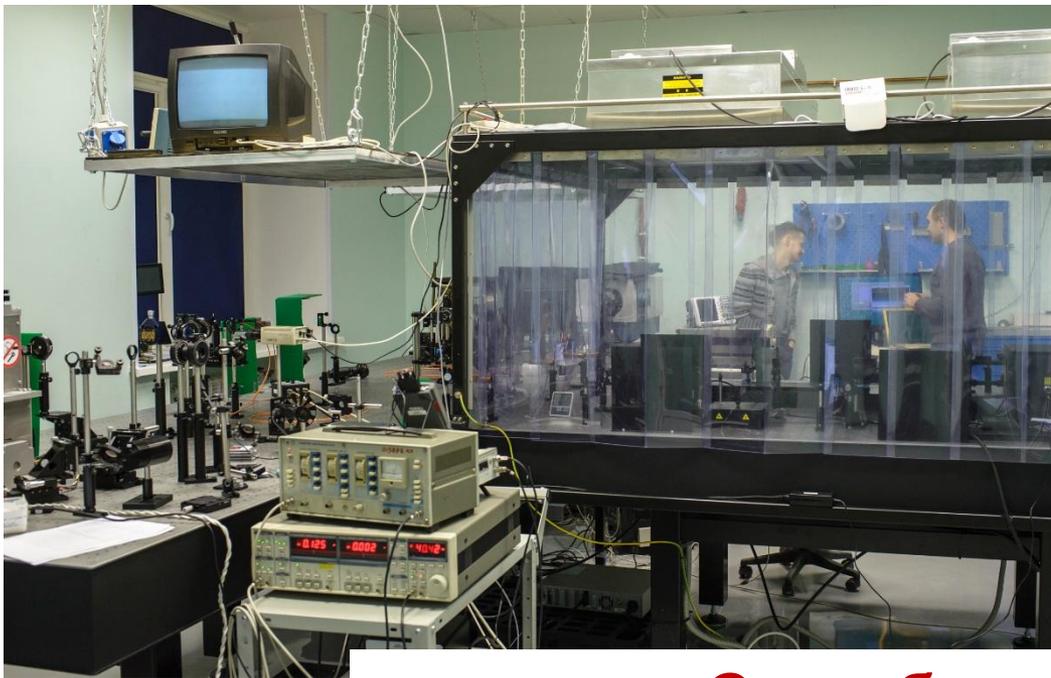
U. Atxitia
O. Chubykalo-Fesenko

Institute of Magnetism, NASU

B.A. Ivanov

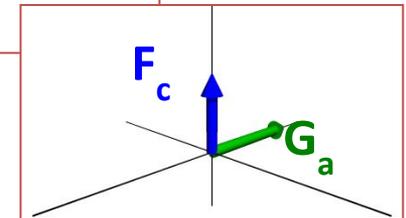
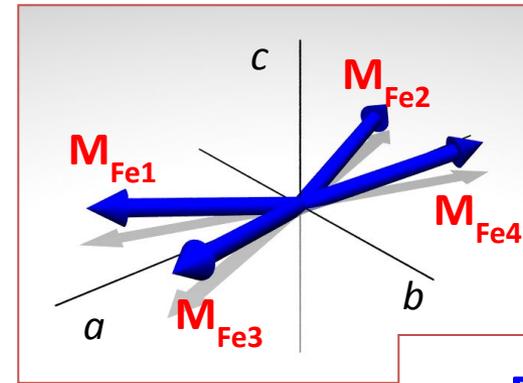
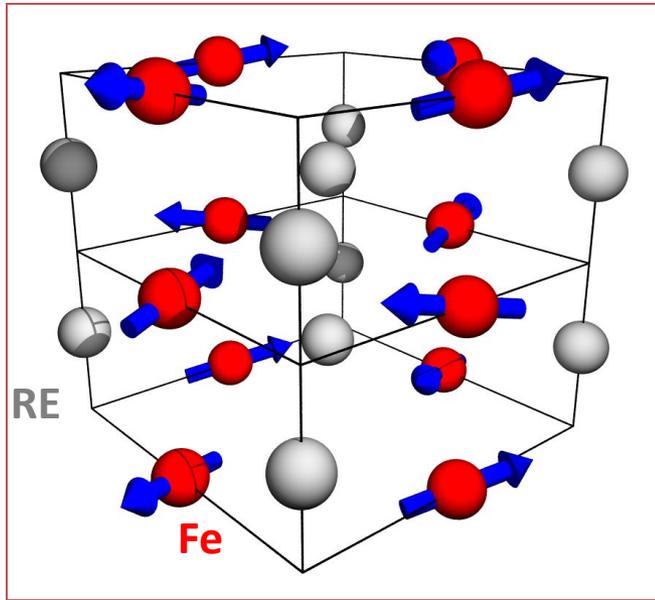
University of Konstanz

S. Gerlach
D. Hinzke
U. Nowak



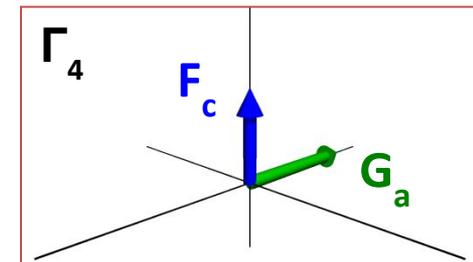
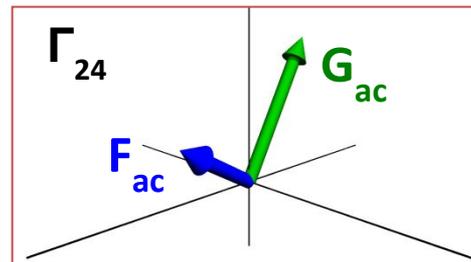
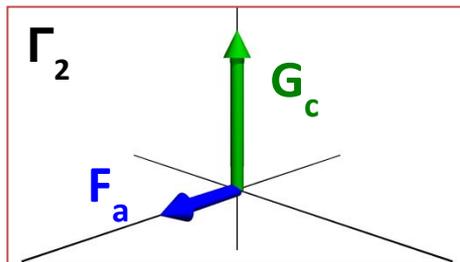
Спасибо за
внимание!

Spin reorientation phase transition in REFeO₃

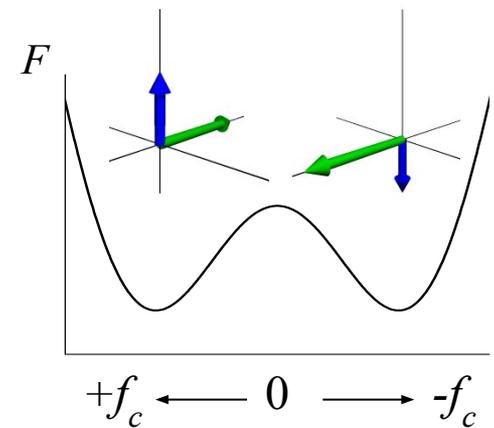
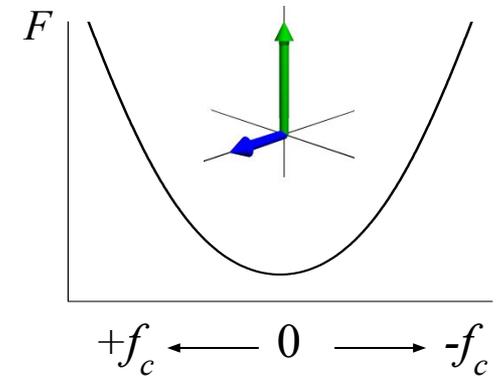
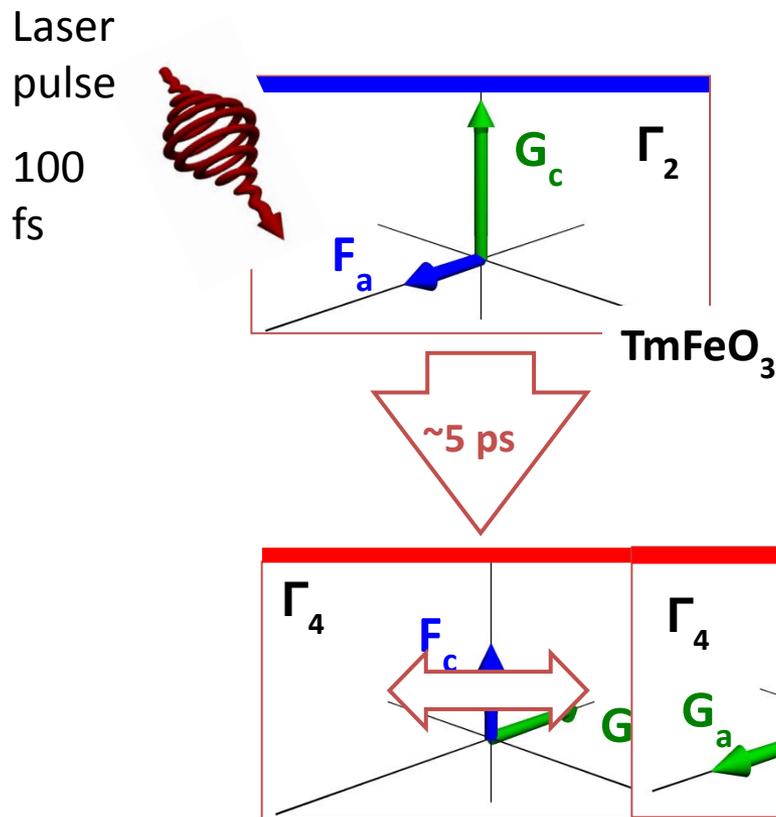


Spin reorientation (SR) phase transition

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



Laser-induced spin-reorientation phase transition



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

Controlling the phase transition
by a single laser pulse alone?

How to lift the degeneracy?

Laser-induced magnetization dynamics in (Sm,Pr)FeO₃

Γ_2

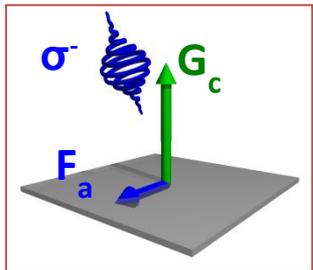
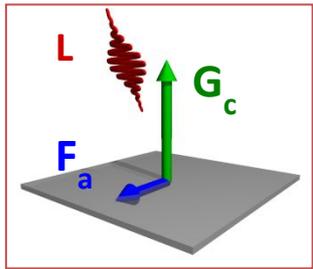
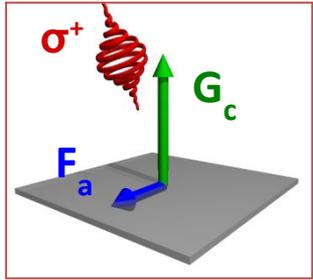
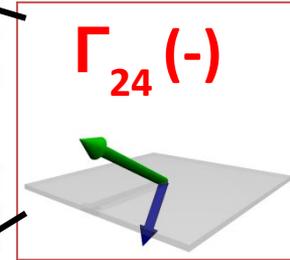
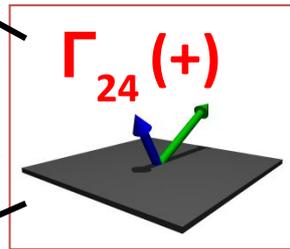
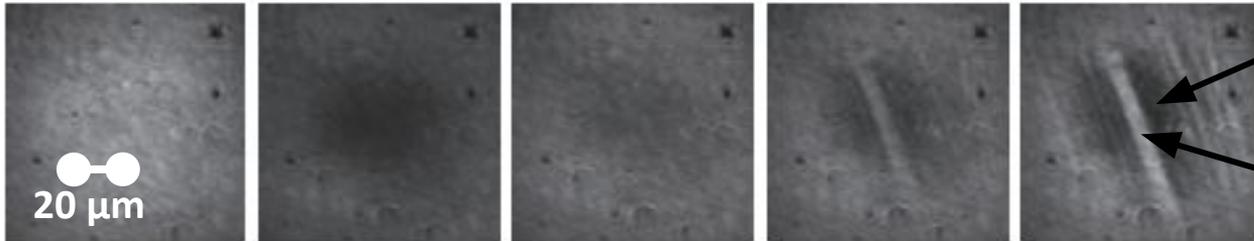
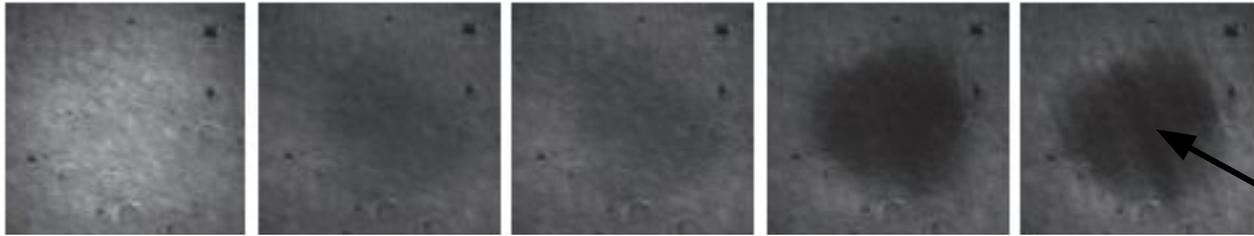
<0

0

2

5

15 Δt (ps)



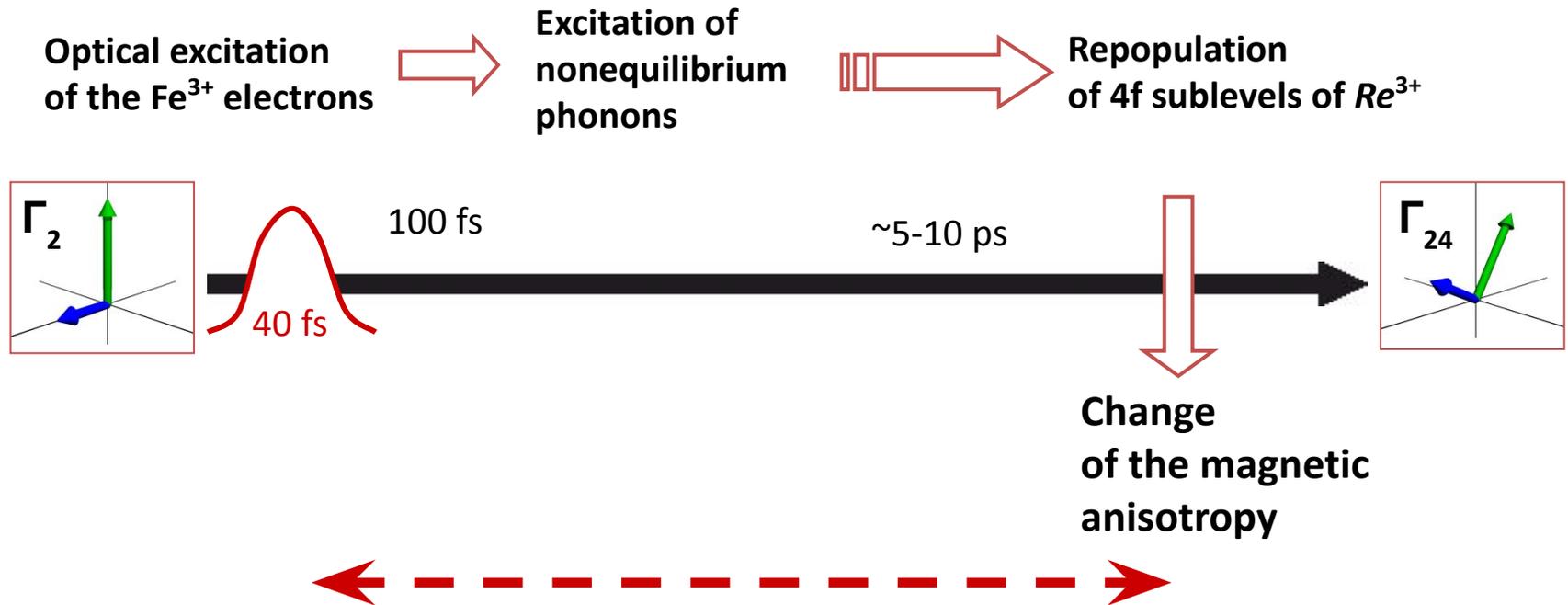
T=90 K

[J. A. de Jong et al., PRL

(2012)]

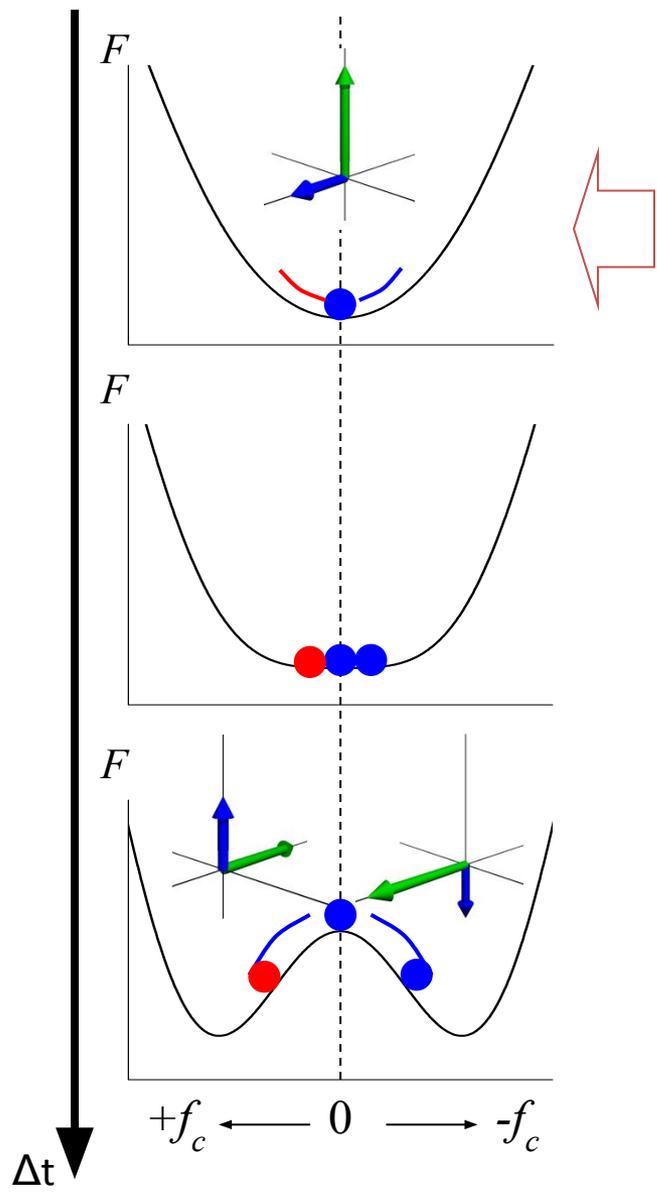
Ultrafast laser-induced SR transition
controlled by a laser pulse polarization alone!

Mechanism of the laser-induced SR transition



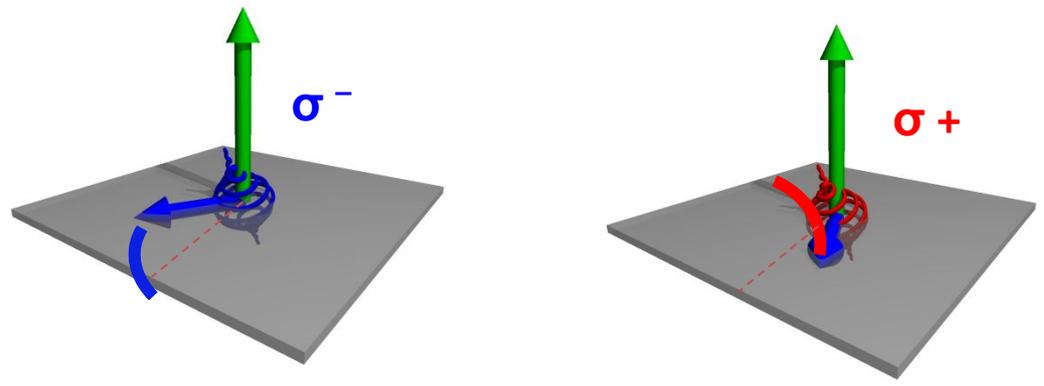
How and where the information about the laser pulse polarization is stored?

Control of the laser-induced SR transition



Ultrafast inverse Faraday effect

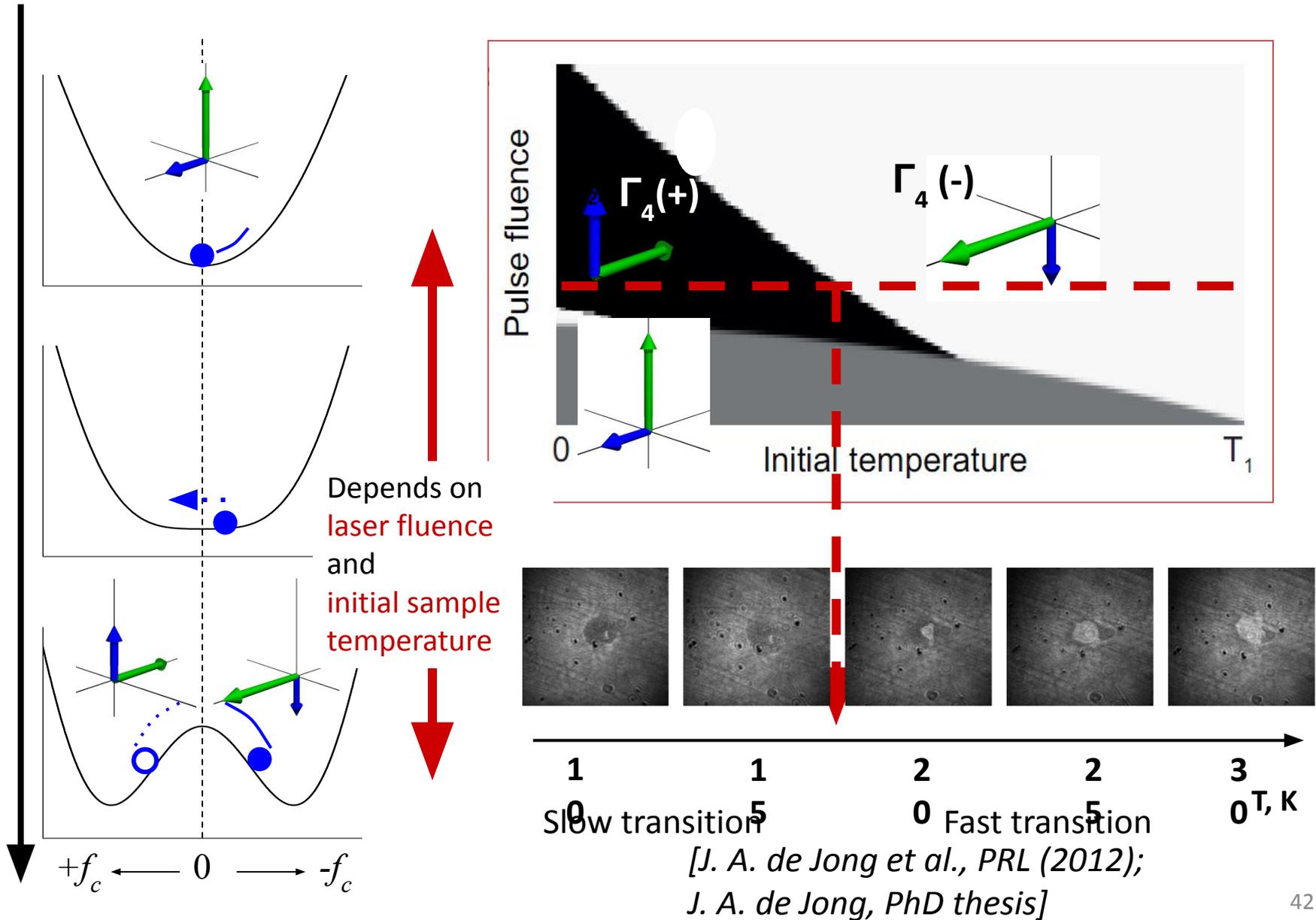
Impulsive excitation of the low amplitude magnetization precession ($<10^\circ$)



Phase of the precession is helicity-dependent

Degeneracy between two states is lifted dynamically

Control of the SR transition: temperature and fluence



Сверхбыстрый оптомагнетизм – 2

Управление сверхбыстрым лазерно-индуцированным переходом в диэлектрике REFeO_3

Возможно благодаря

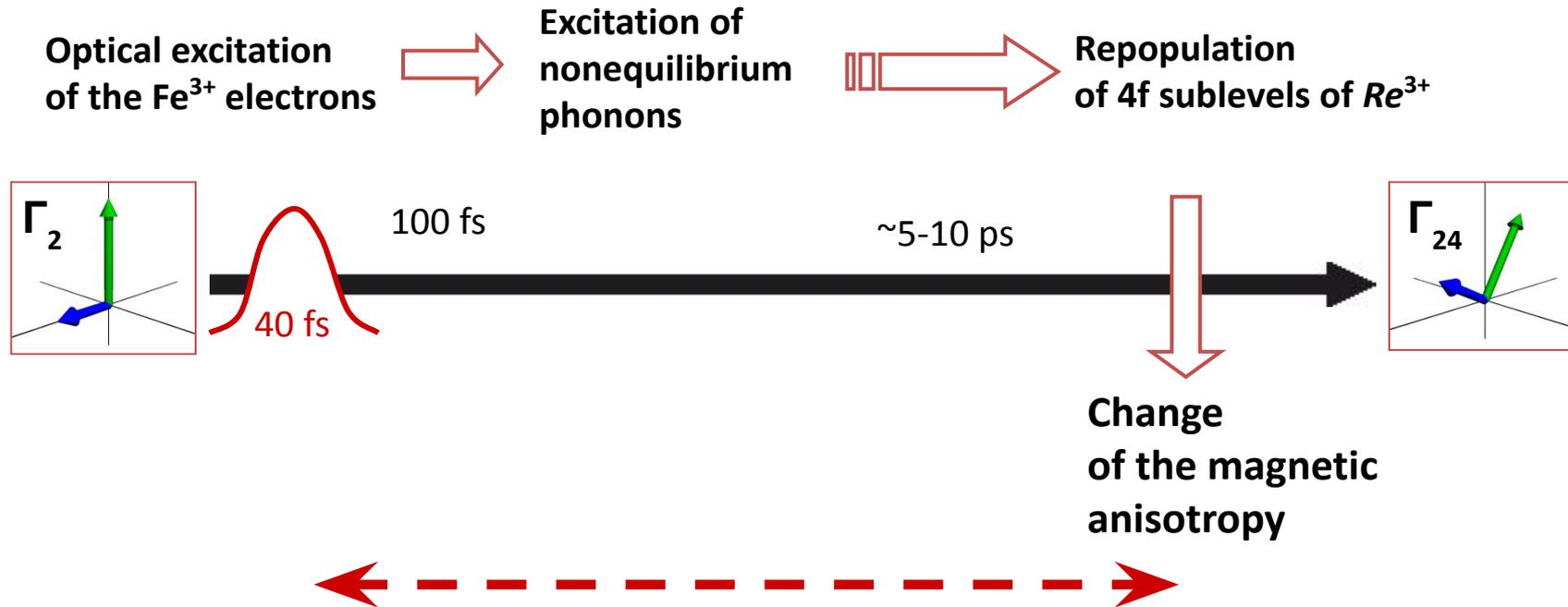
- Импульсному возбуждению прецессии намагниченности
- Пикосекундному нагреву решетки

Фазовая диаграмма такого перехода определяется

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

ОК, но где же сверхбыстрая оптомагнитная запись?

Mechanism of the laser-induced SR transition



How and where the information about the laser pulse polarization is stored?

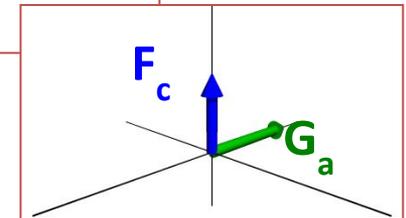
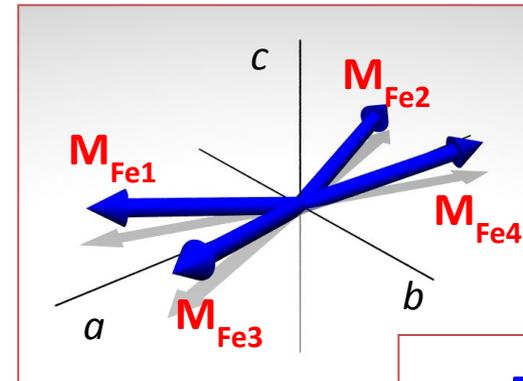
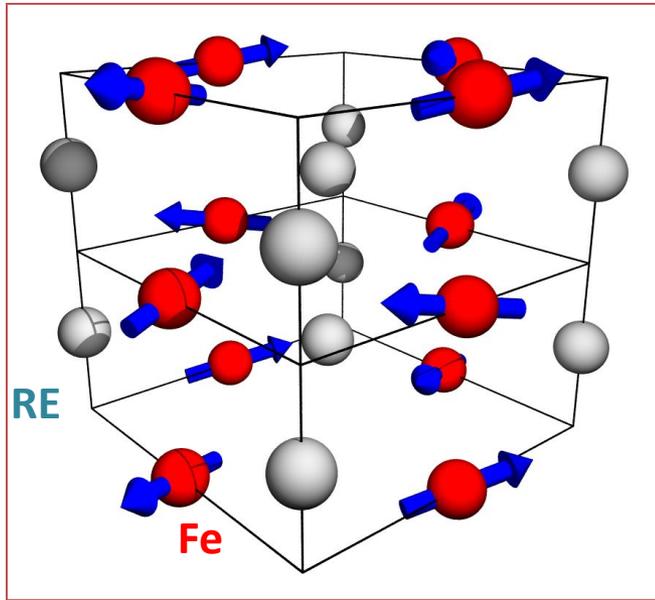
Controlling spin dynamics by laser pulses

All-optical reversal of magnetization
in ferrimagnetic RE-TM metallic alloys

Controlling spin-reorientation phase transition
in a dielectric REFeO₃

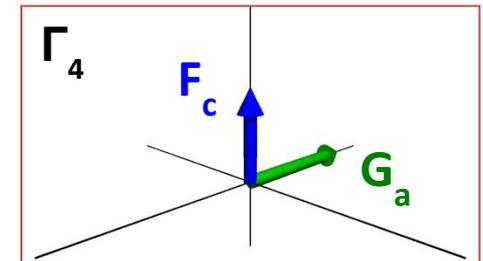
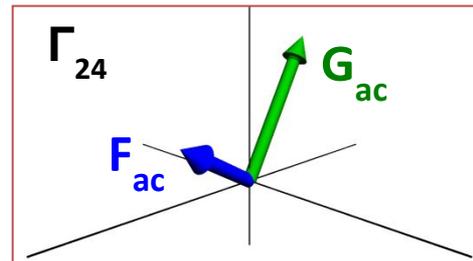
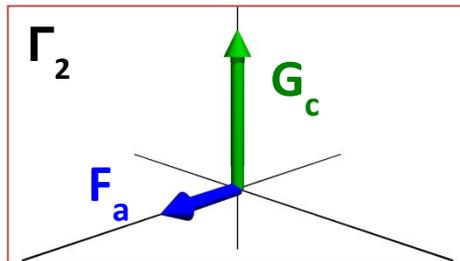
Controlling coherent and incoherent spin dynamics
by steering the photo-induced energy flow

Spin reorientation phase transition in REFeO₃

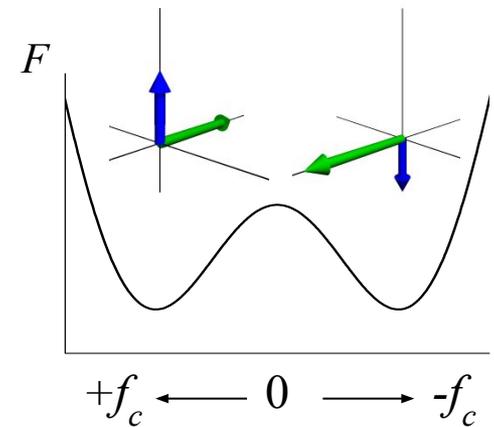
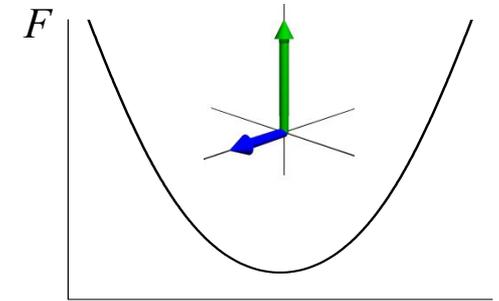
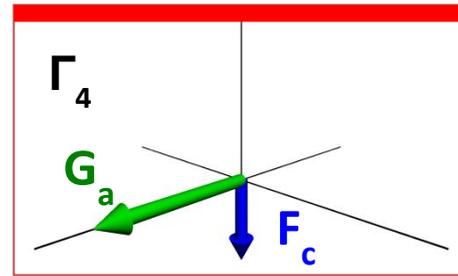
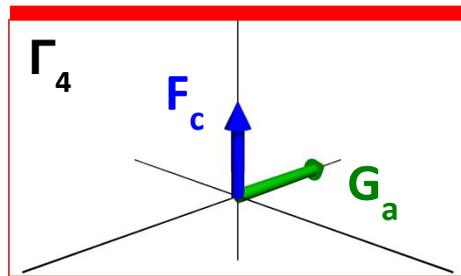
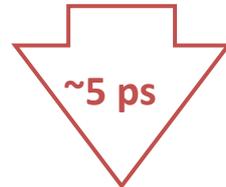
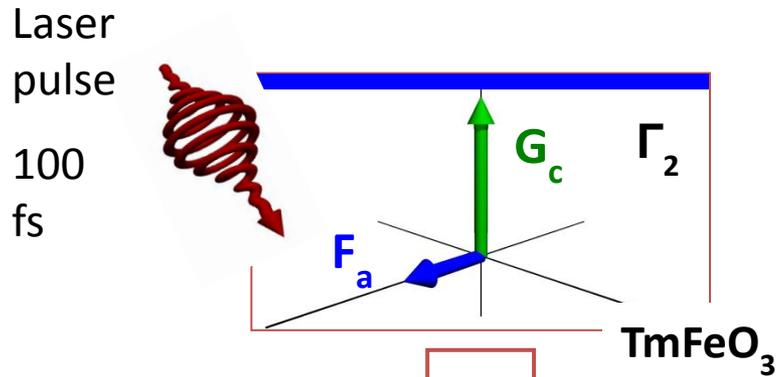


Spin reorientation (SR) phase transition

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



Laser-induced spin-reorientation phase transition

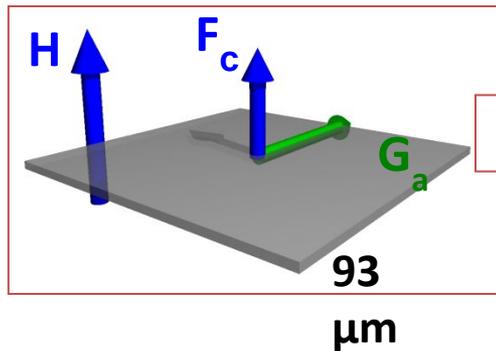


[A. V. Kimel et al., Nature (2004)]

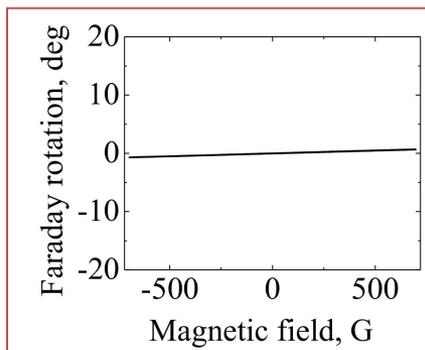
Controlling the phase transition
by a single laser pulse alone?

How to lift the degeneracy?

Sample: rare-earth orthoferrite ($\text{Sm}_{0.5}\text{Pr}_{0.5}\text{FeO}_3$)

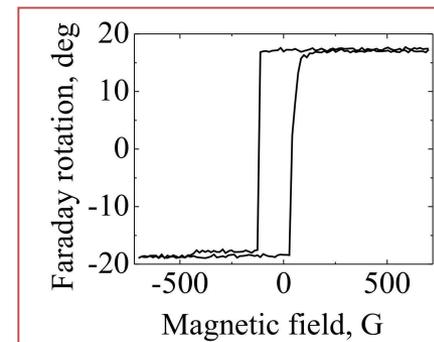


T=70 K



$\sim F_c$

T=180 K

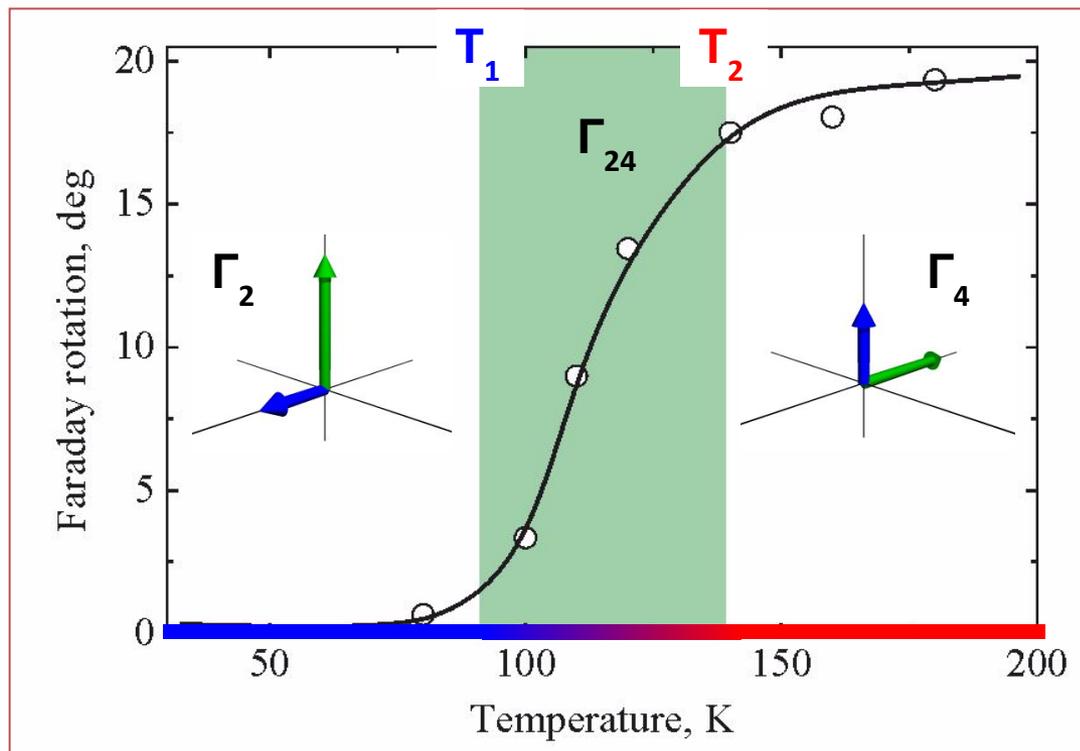


□ Phase transition at

98-130 K

□ Large Faraday rotation

$\sim 20^\circ / 90 \mu\text{M}$



Laser-induced magnetization dynamics in $(\text{Sm,Pr})\text{FeO}_3$

Γ_2

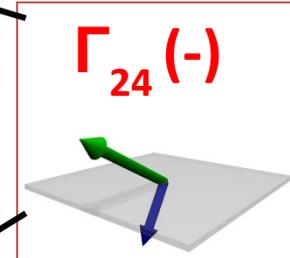
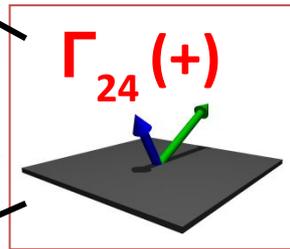
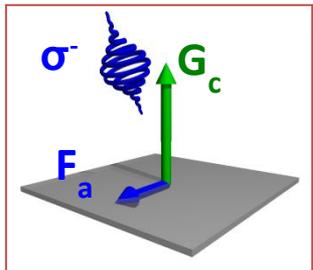
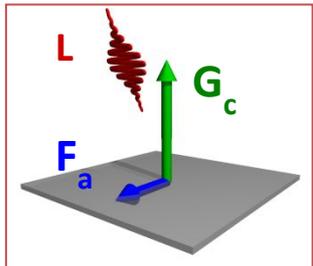
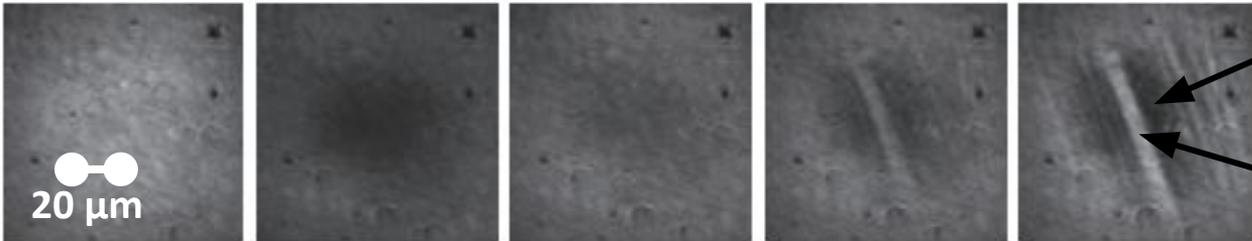
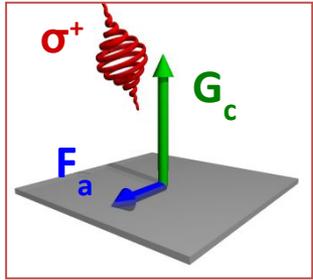
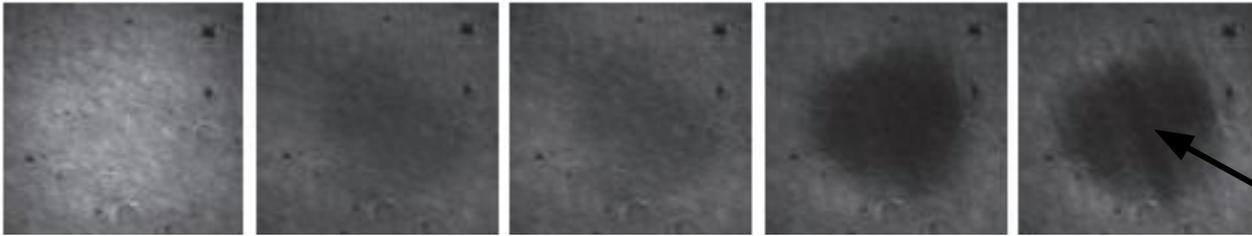
<0

0

2

5

15 Δt (ps)

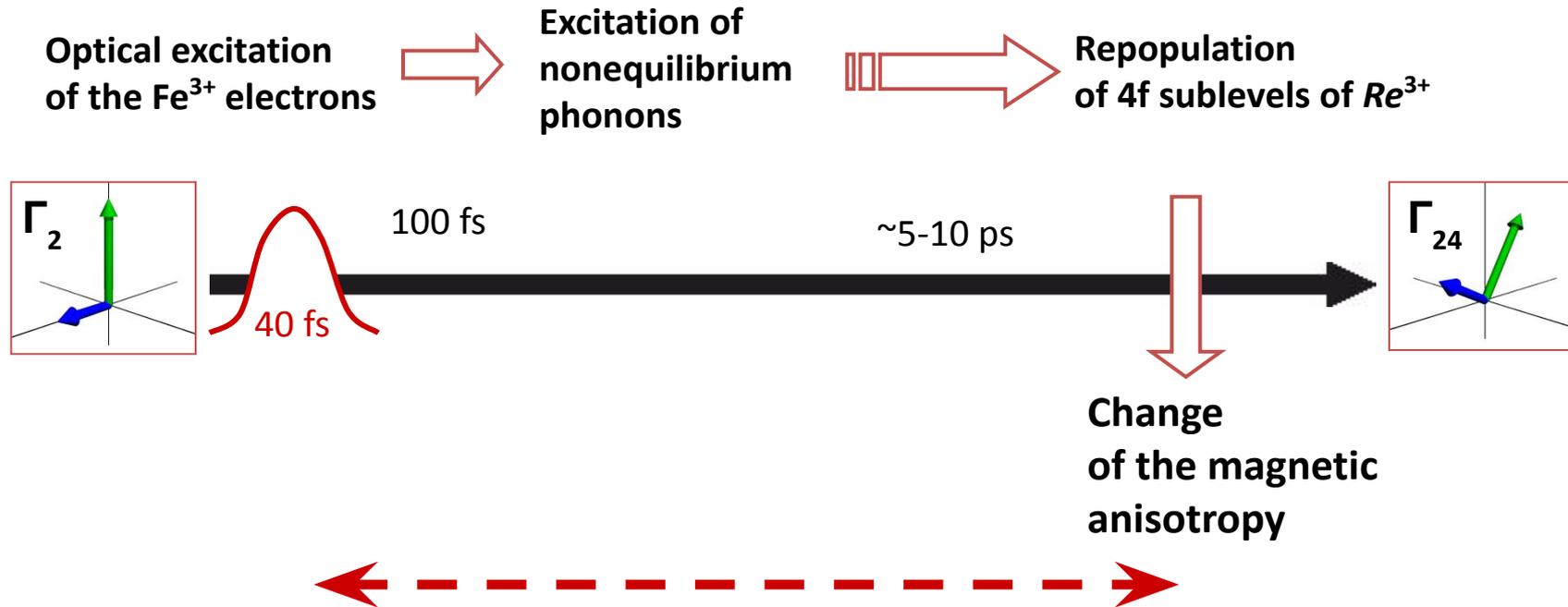


[de Jong et al., PRL (2012)]

T=90 K

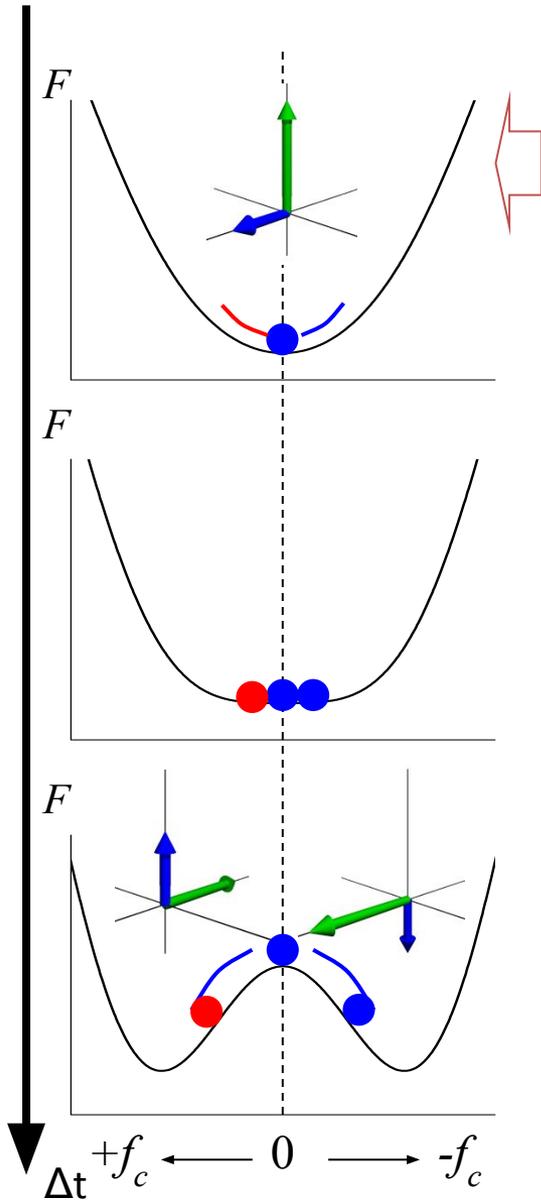
**Ultrafast laser-induced SR transition
controlled by a laser pulse polarization alone!**

Mechanism of the laser-induced SR transition



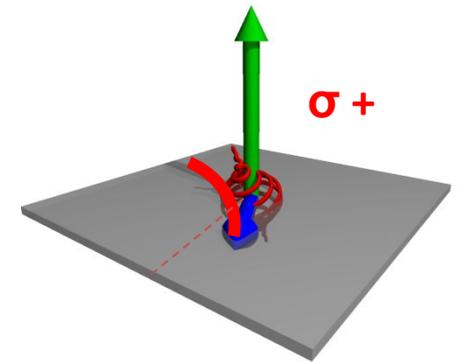
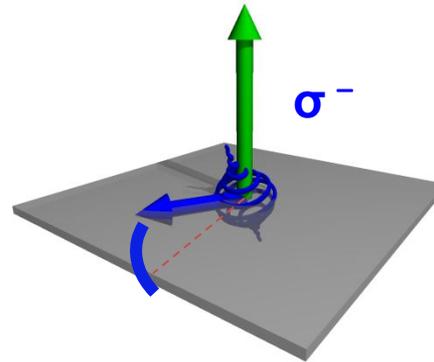
How and where the information about the laser pulse polarization is stored?

Control of the laser-induced SR transition



Ultrafast inverse Faraday effect

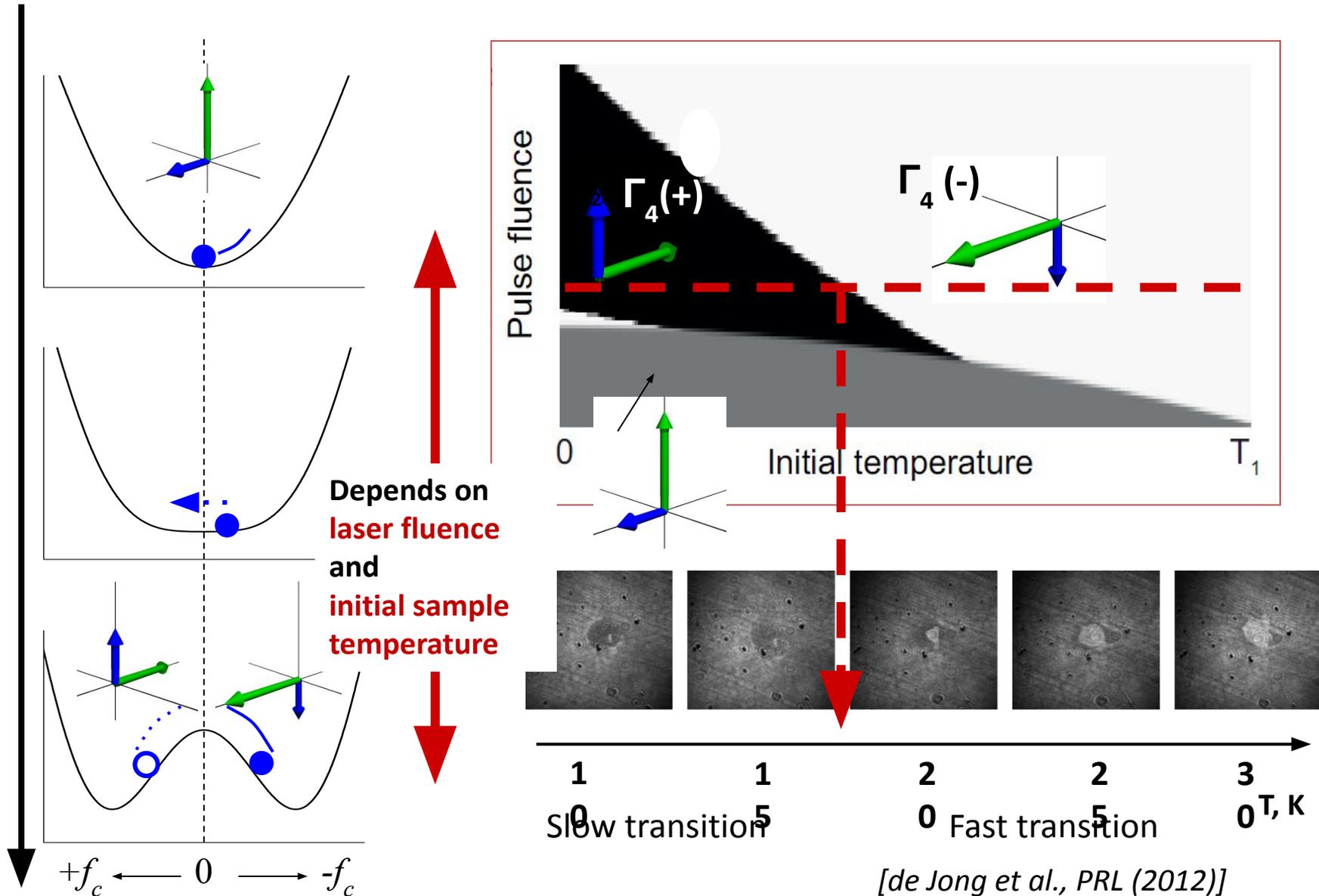
Impulsive excitation of the low amplitude magnetization precession ($<10^\circ$)



Phase of the precession is helicity-dependent

Degeneracy between two states is lifted dynamically

Control of the SR transition: temperature and fluence



Controlling spin dynamics by laser pulses

Controlling spin-reorientation phase transition
in a dielectric REFeO₃

Is realized by combining

- impulsive excitation of low-amplitude coherent spin precession
- picosecond lattice heating

The phase diagram is dependent on

- laser polarization
- laser fluence
- and initial sample temperature

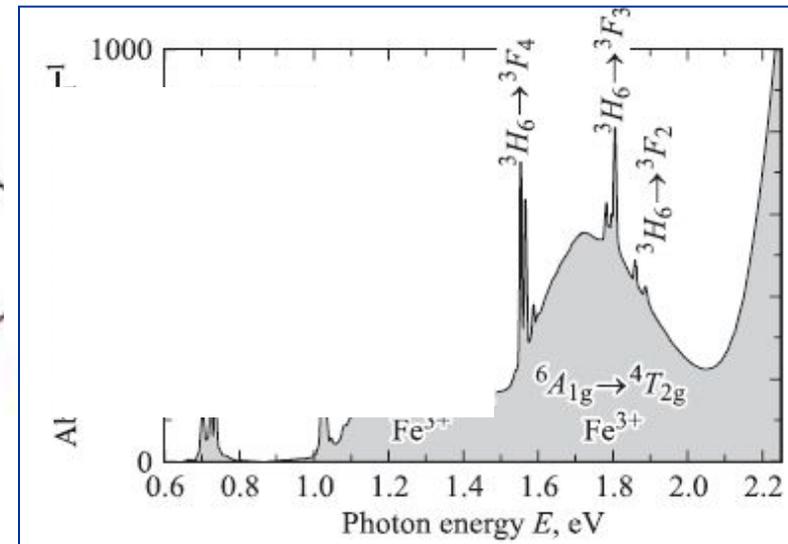
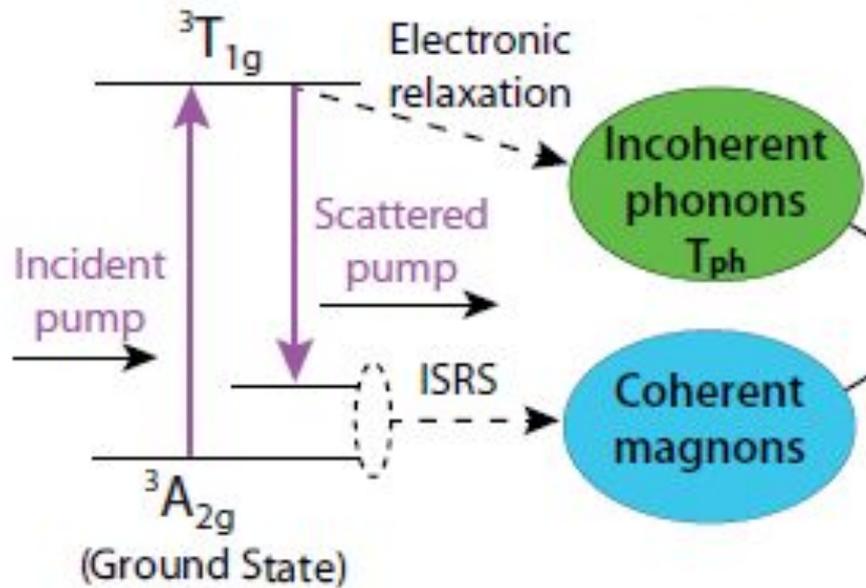
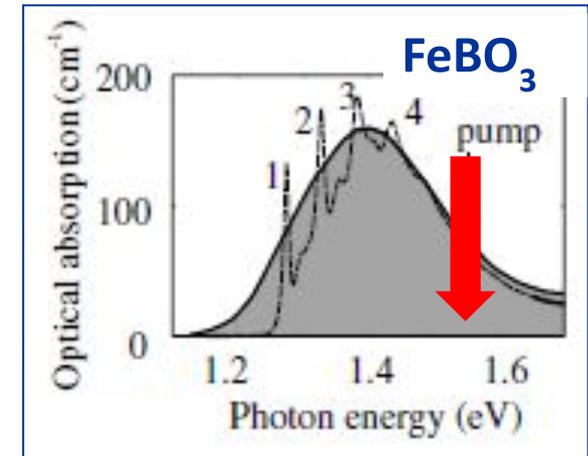
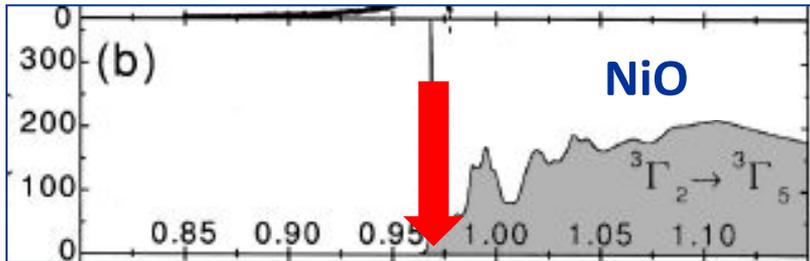
Controlling spin dynamics by laser pulses

All-optical reversal of magnetization
in ferrimagnetic RE-TM metallic alloys

Controlling spin-reorientation phase transition
in a dielectric REFeO₃

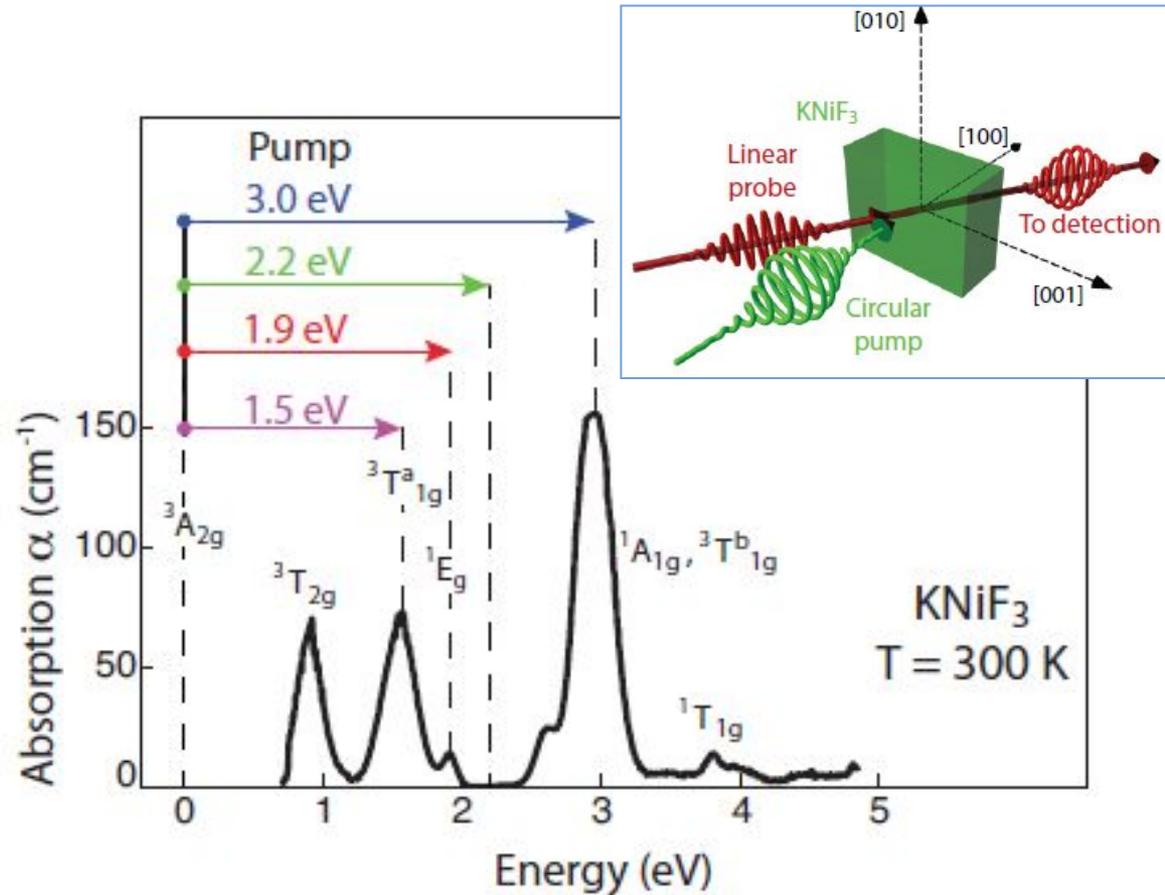
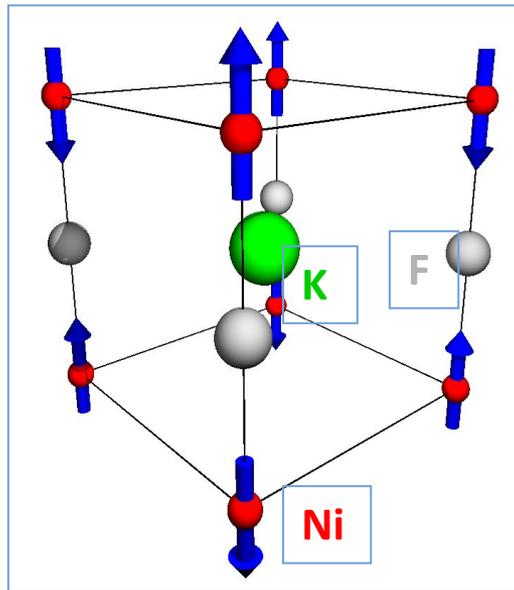
Controlling coherent and incoherent spin dynamics
by steering the photo-induced energy flow

On the validity of the Raman mechanism of the coherent magnon generation



Can the optical excitation of spin system be selective?

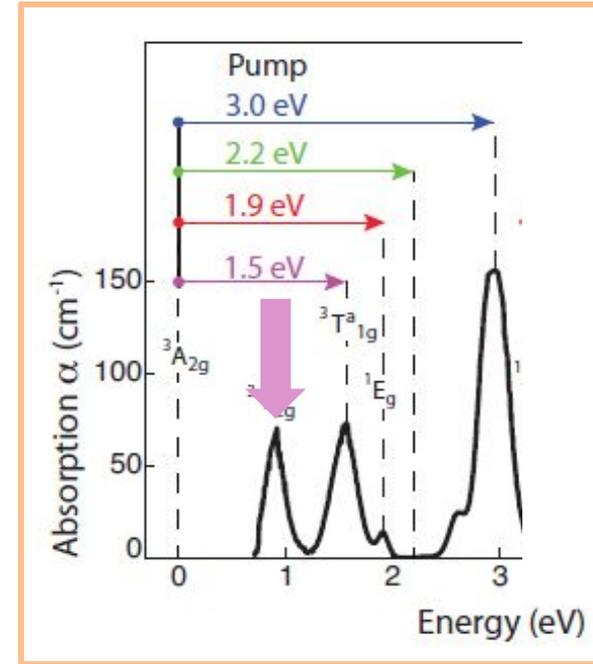
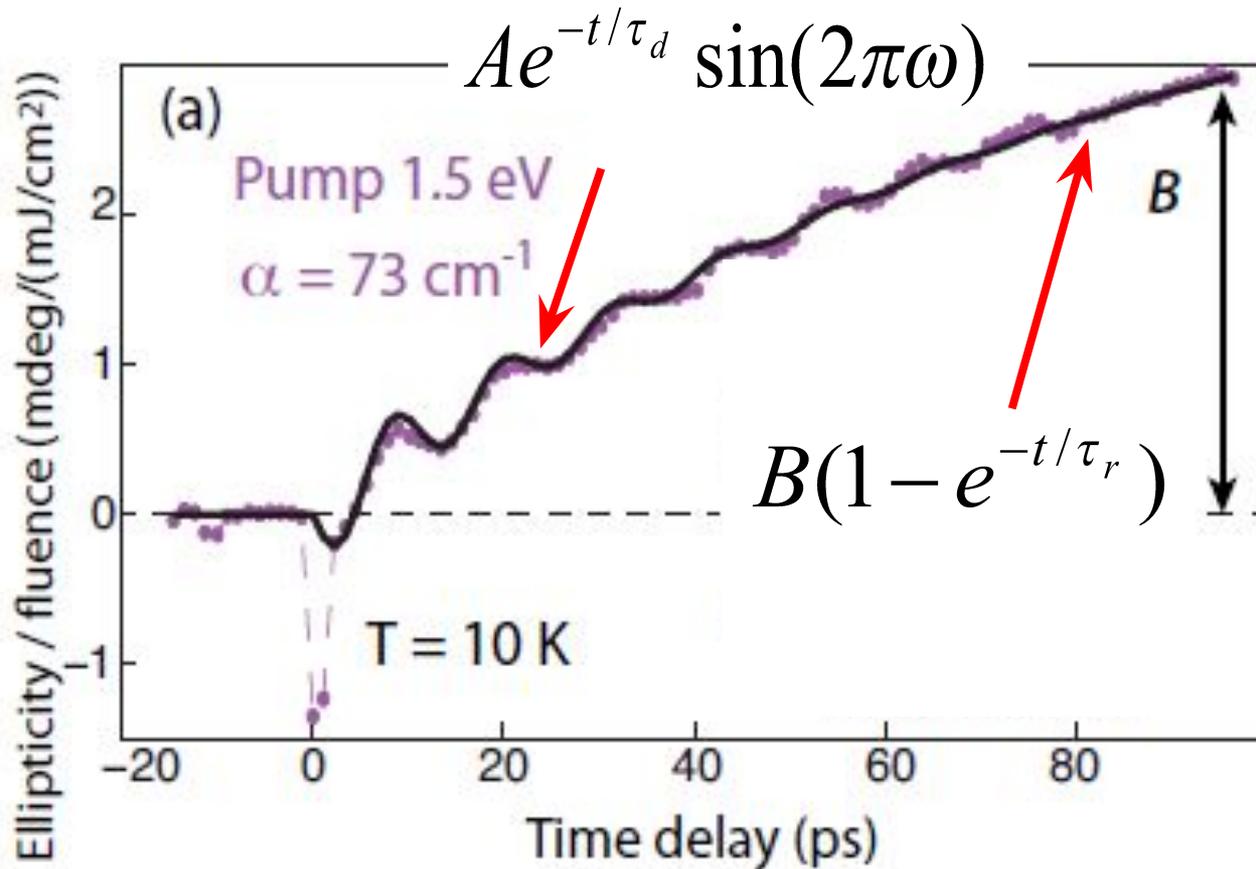
Transparent antiferromagnet KNiF_3



Approach: tuning the pump wavelength between transparency windows and absorption bands

[D. Bossini et al., submitted]

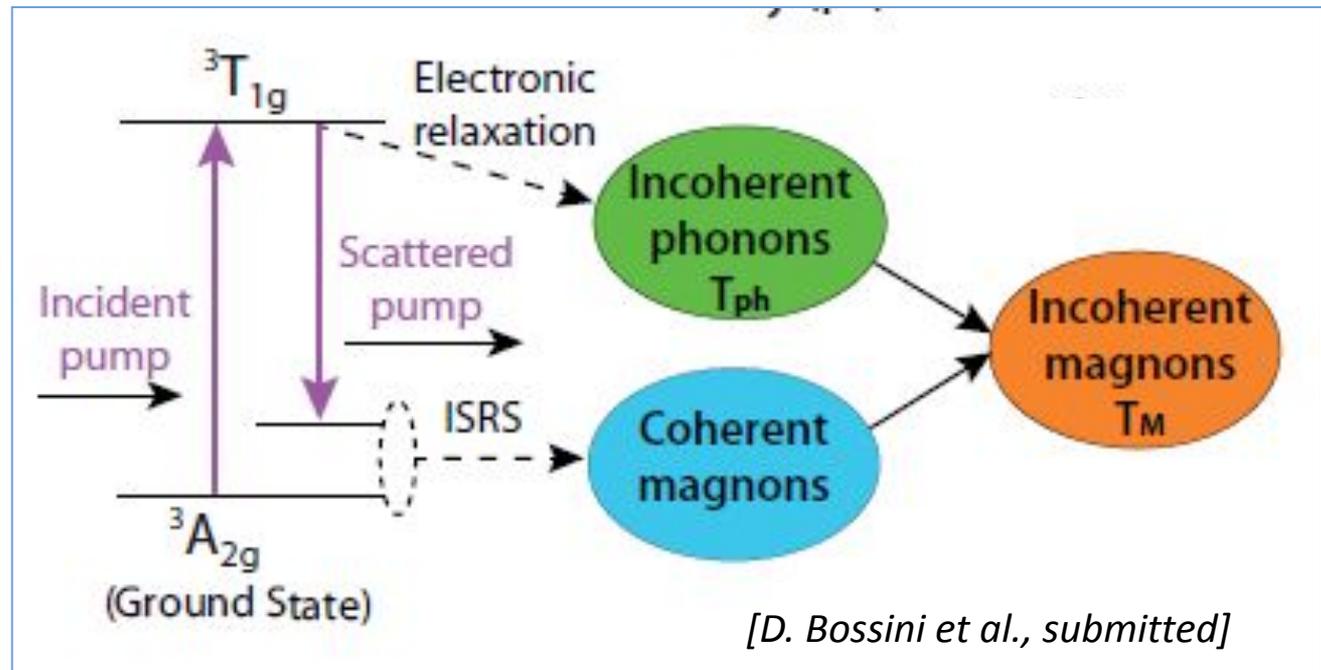
Excitation of spin system: regime of finite absorption



$$\tau_d \neq \tau_r$$

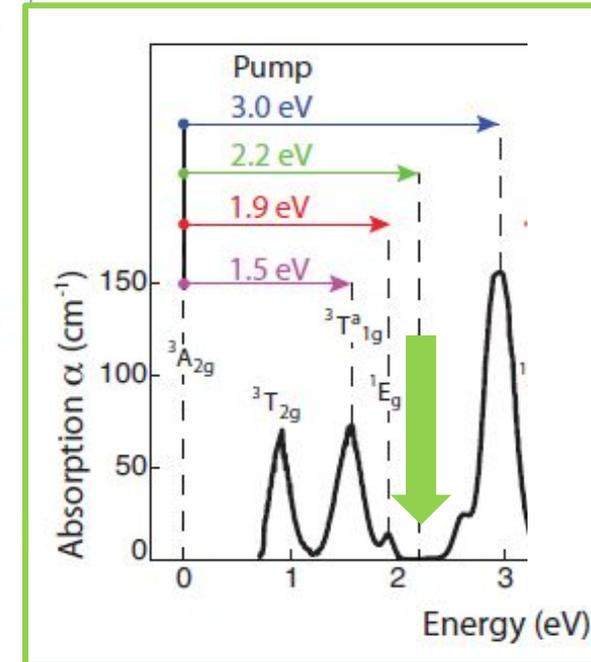
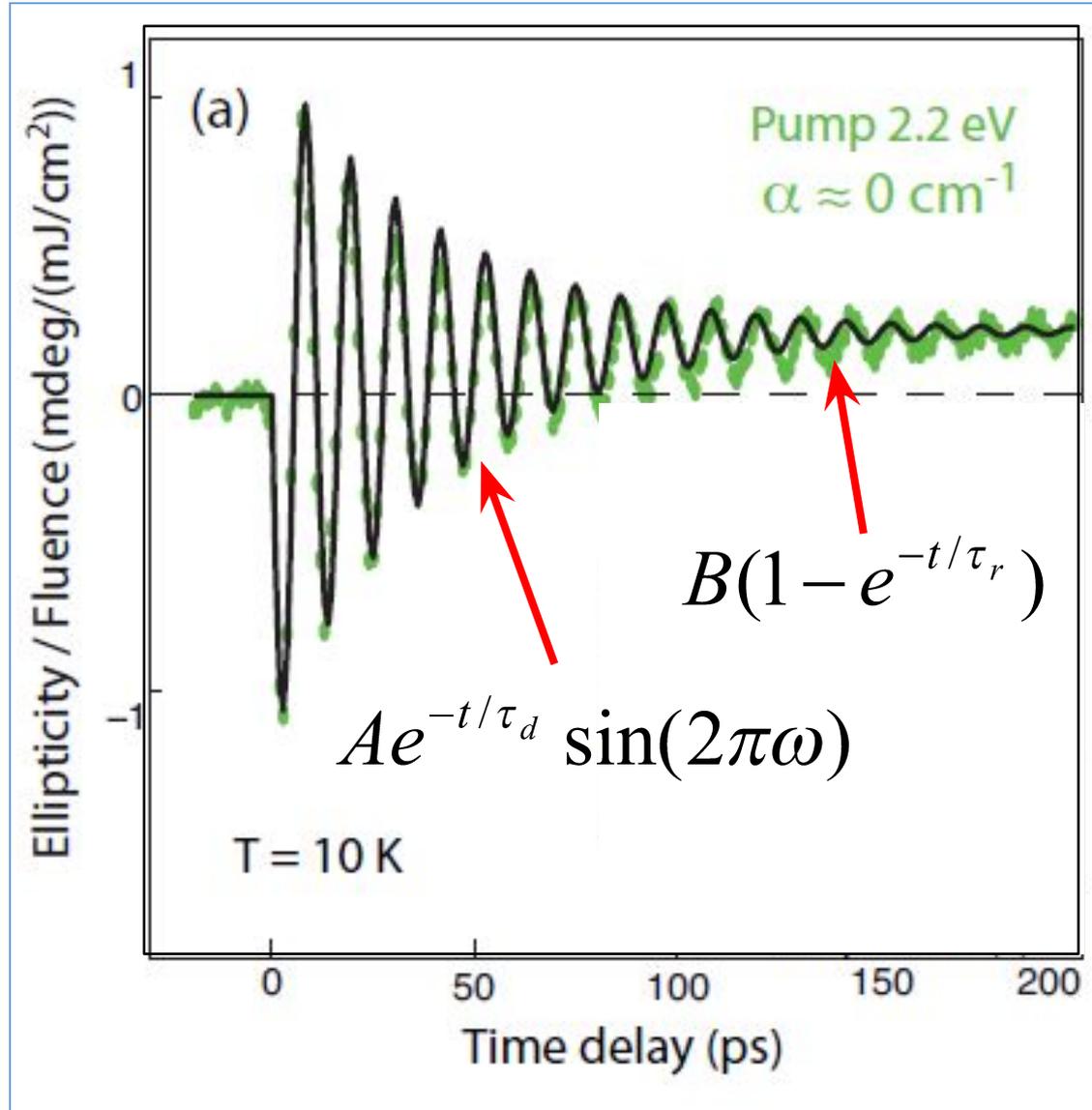
We observe two contributions:
 from coherent and incoherent magnons

Mechanism of excitation of coherent and incoherent spin dynamics



Absorption leads to the excitation of noncoherent magnons mediated by excitation of phonons: excitation is nonselective

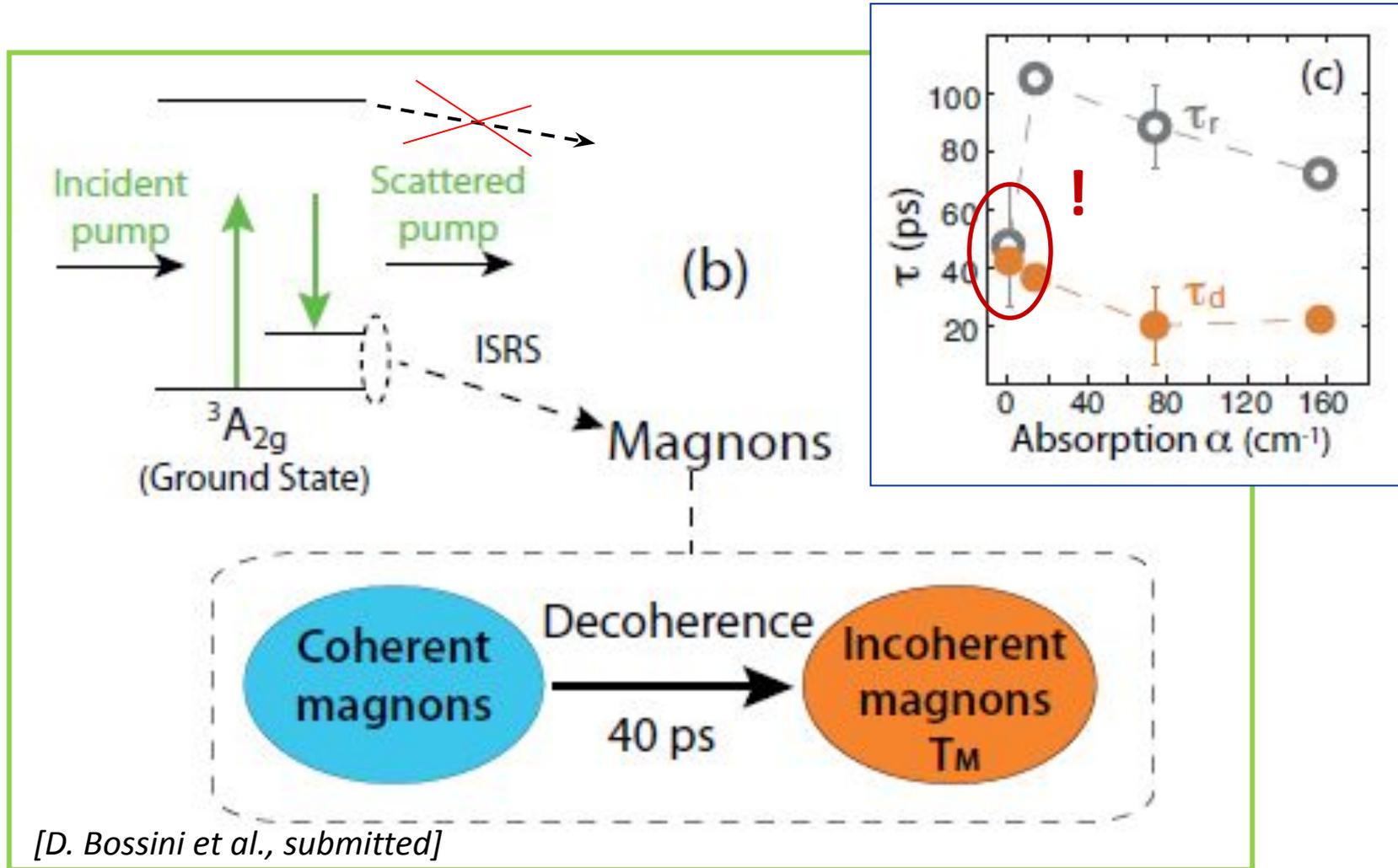
Excitation of spin system: regime of zero-absorption



$$\tau_d \approx \tau_r$$

[D. Bossini et al., submitted]

Mechanism of excitation of coherent and incoherent spin dynamics in a transparent dielectric



Selective optical excitation of spins

Controlling spin dynamics by laser pulses

Controlling coherent and incoherent spin dynamics
by steering the photo-induced energy flow

ISRS is confirmed to be the mechanism
of coherent magnon generation

We demonstrated two pathways
to excite noncoherent magnons

In a transparent dielectric the ISRS allows
selective excitation of spin system

We formulated the criterion
for the selective excitation regime

Развитие научных представлений о магнетизме

- 585 г. до н.э. Документальное упоминание о магнетите Fe_3O_4 .
- IV - I в. до н.э. Попытки объяснения магнетизма на основе атомистической модели. Демокрит, Эпикур, Лукреций.
- 1600 г. Гилберт “De Magnete”. Земля как гигантский магнит.
- 1820 г. Гаусс. Вебер. Система СГС. Единица магнитной индукции.
- 1820 г. Эрстед. Воздействие тока на магнитную стрелку.
- 1820 г. Ампер. Внутренние токи как причина ферромагнетизма.
- 1845 г. Фарадей. Впервые произнес слова «магнитное поле».
- 1873 г. Уравнения Максвелла (единица магнитного потока).

Нобелевские премии в области магнетизма

- **1902** H. A. Lorenz, P. Zeeman - Эффект Зеемана.
- **1920** C. E. Guillaume – Открытие инвара (Fe₆₄Ni₃₆) и элинвара.
- **1922** N. Bohr - В классической физике магнетизма нет
- **1932** W. Heisenberg - Обмен как спин-зависимое взаимодействие.
- **1943** O. Stern – Открытие магнитного момента протона.
- **1944** I. I. Rabi - Магнитные свойства атомных ядер.
- **1952** F. Bloch, E. M. Purcell - Открытие ядерного магнитного резонанса.
- **1955** P. Kusch - Магнитный момент электрона.
- **1966** A. Kastler - Намагничивание атомов светом.
- **1970** H. Alfven, L. Néel - Магнитная гидродинамика. Ферриты.
- **1985** K. von Klitzing - Квантовый эффект Холла.
- **1994** B. Brockhouse, C. E. Shull - Магнитная нейтронография.
- **1998** R. B. Laughlin, D. Tsui, H. Stormer. Дробный квантовый эффект Холла.
- **2003** P. Lauterbur, P. Mansfield - Магнито-резонансная томография.
- **2007** P. Grünberg, A. Fert – Гигантское магнитосопротивление.

Магнетизм в России

- Э. Х. Ленц – Ректор СПбГУ. Закон Ленца о направлении и силе наведенного тока (1833).
- А. Г. Столетов (1839-1896) - Кривая магнитной проницаемости и восприимчивости железа (кривая Столетова). Основал (1874) физическую лабораторию в МГУ.
- Е. К. Завойский (Казань, 1944) – Открытие электронного парамагнитного резонанса.
- Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский, А. Ф. Андреев, И. Е. Дзялошинский (ИФП) – Теория магнитных доменов. Уравнение магнитной динамики. Магнитоэлектричество, и др.
- П. Л. Капица, А. С. Боровик-Романов (ИФП) – Сильные магнитные поля. Пьезомагнетизм. Динамика антиферромагнетиков, и др.
- А. Д. Сахаров, А. И. Павловский (Саров) – Сверхсильные взрывные поля ~ 20 млн. Эрстед.
- С. В. Вонсовский, Ю. А. Изюмов, Е. А. Туров (Урал) – Теория s - d обмена и др.
- Г. А. Смоленский (ФТИ) – Новые магнитные материалы, прозрачные ферриты, и др.
- Н.С. Акулов, Е.И. Кондорский, К.П. Белов, и др. – Магнетизм в МГУ.