

# 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*

# Магнитные среды

Спи   $S_z = \pm h/2$

Магнитные ионы в <sup>H</sup>Твердых

средах  
Взаимодействие между

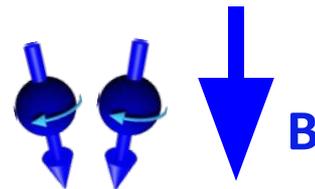
ионами

отсутствует:



• **Парамагнетик**

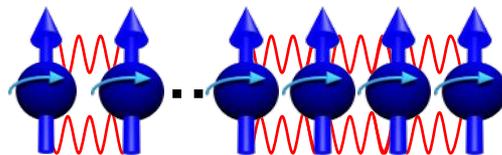
(в диамагнетиках магнитных ионов нет)



Обменное взаимодействие между ионами:

• **Ферромагнетик**

и

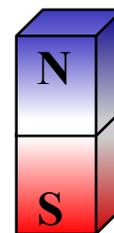


$$\mathbf{M} = \frac{1}{V} \sum \mathbf{m}_i$$

Есть

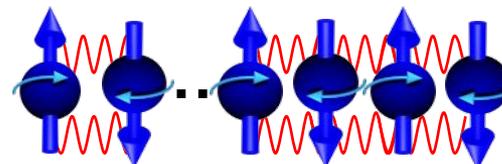
**намагниченность**

$\mathbf{M} = 0$  Нет



• **Антиферромагнетики**

ки

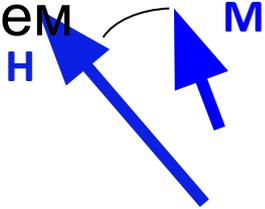


$\mathbf{L} = \mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2$  намагниченности

**Антиферромагнитный** <sup>2</sup>

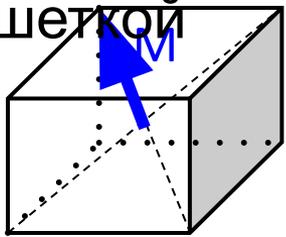
# Что определяет свойства магнито-упорядоченных

Взаимодействие с внешним магнитным полем



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

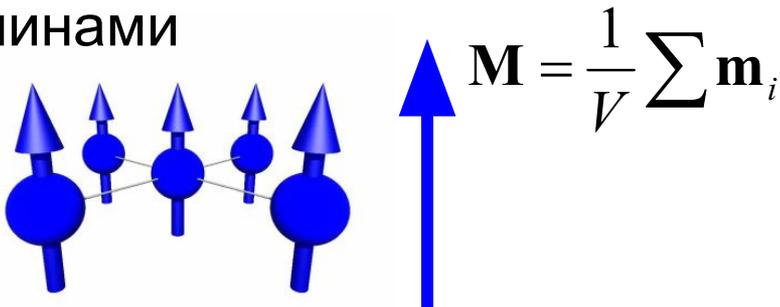
Взаимодействие с решеткой



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

Магнитокристаллическая  
анизотропия

Обменное взаимодействие между спинами



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

Магнитный порядок:

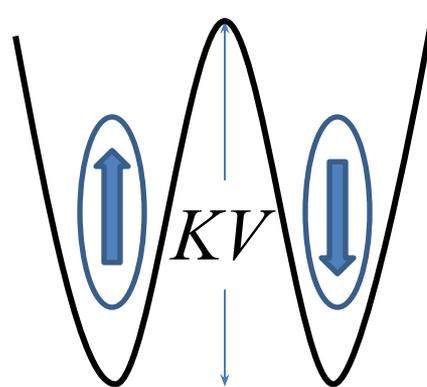
- ферромагнитный
- антиферромагнитный
- ферримагнитный<sup>3</sup>

# Магнитная запись: плотность, скорость,



Hard-drive

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

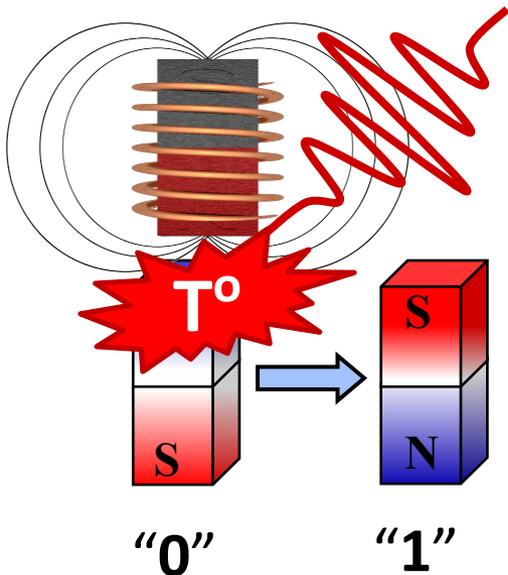


$$\tau = \tau_0 e^{\frac{KV}{kT}}$$

$\approx 1$   
нс

Необходимо  
:

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



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

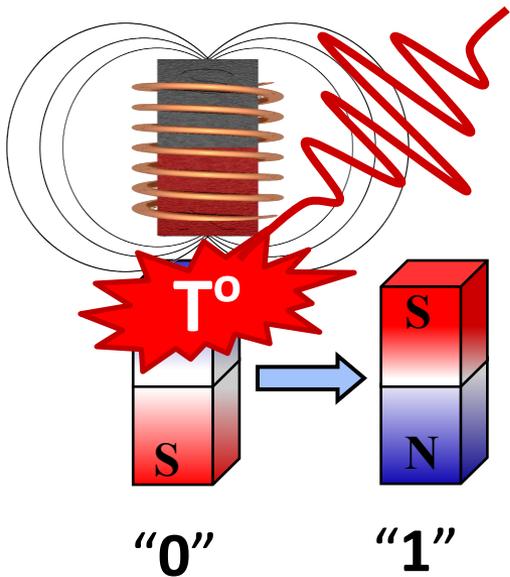
**Heat (by laser) Assisted Magnetic Recording**

увеличение плотности записи  
за счет лазерного нагрева

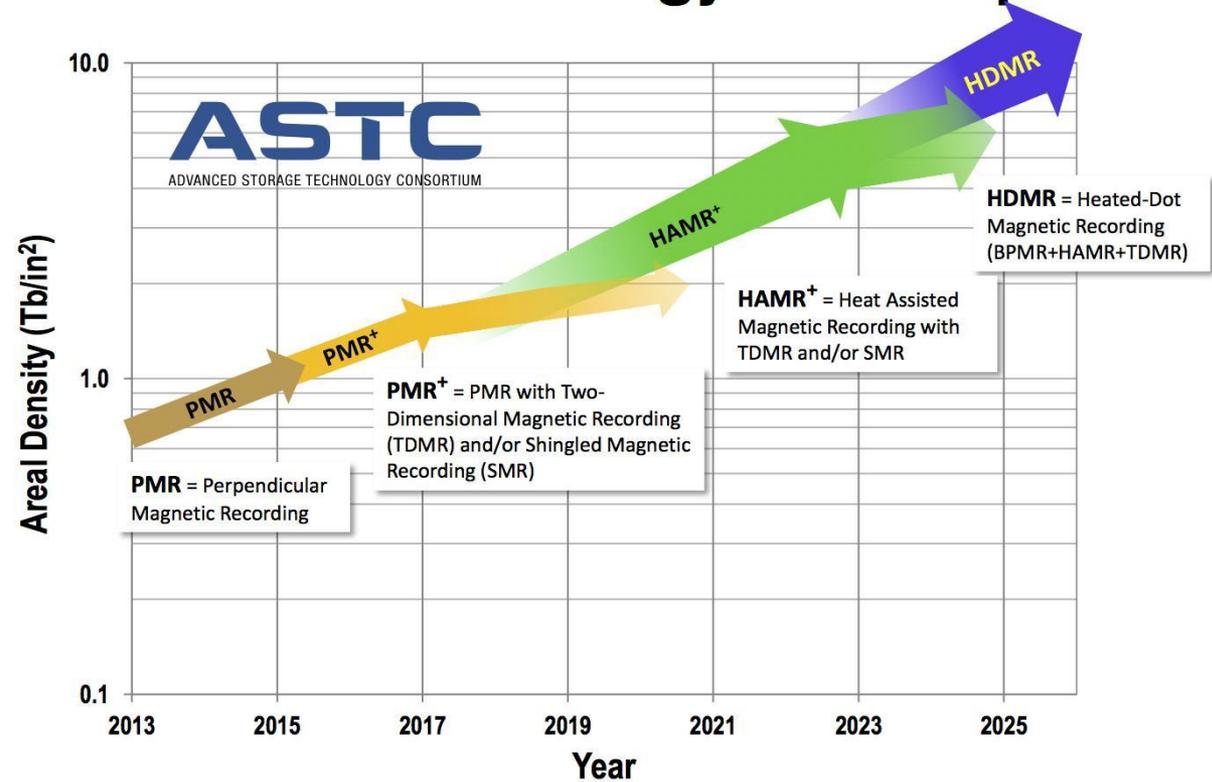
# Магнитная запись: плотность, скорость,



Hard-drive



## ASTC Technology Roadmap

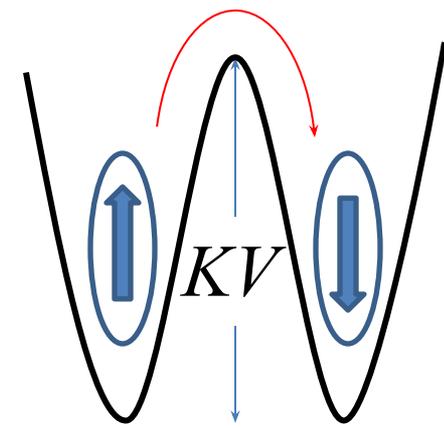
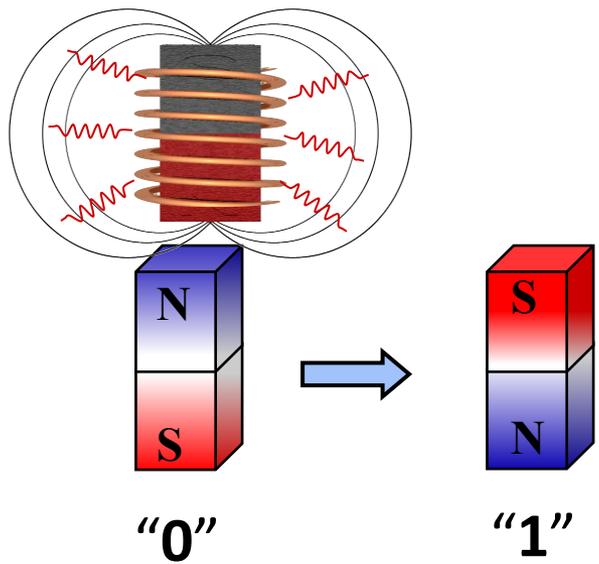


IDEMA

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)

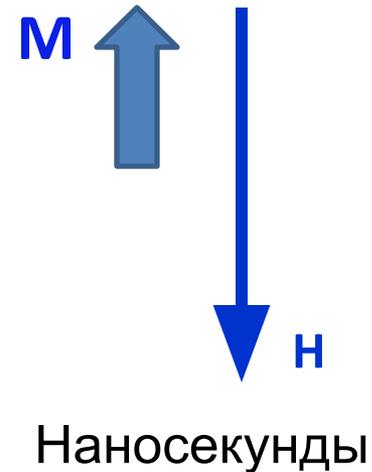
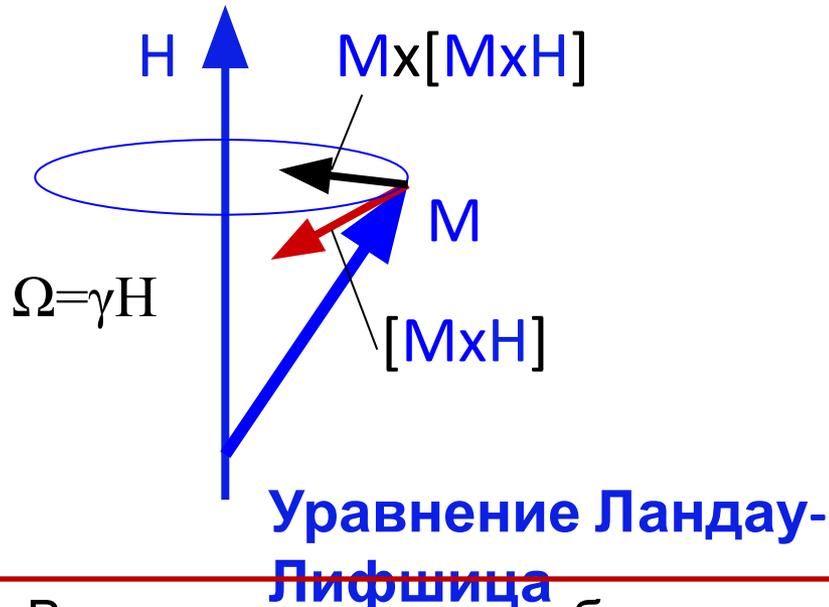
...



Facebook (Sweden)

Data centers

# Как можно переключить намагниченность?



Возьмем лазер на свободных электронах...

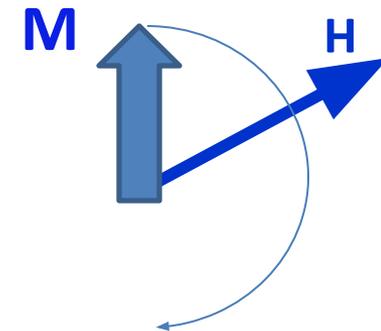


Несколько Тесла; 2.3 пс  
@ Stanford

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

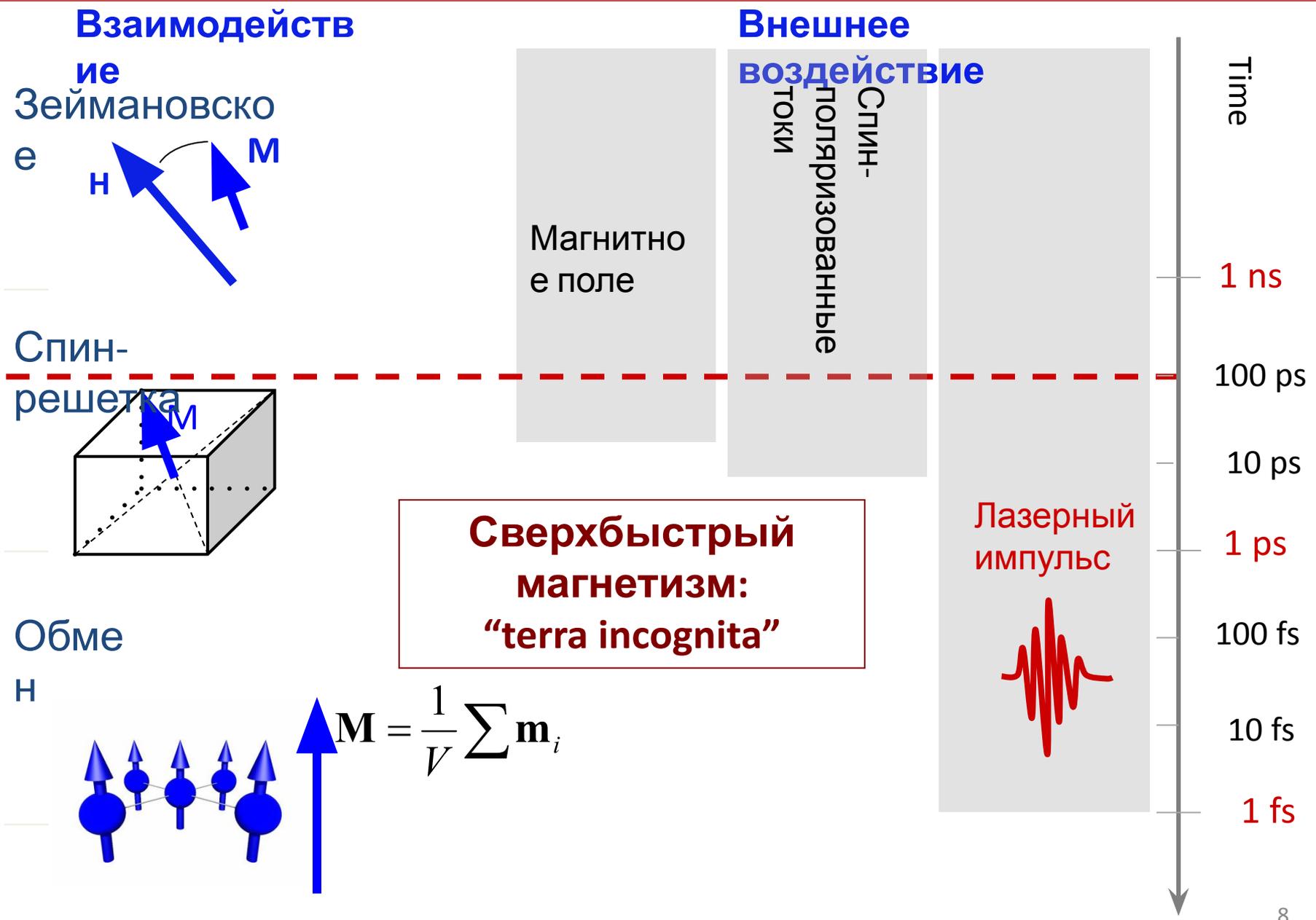
[I. Tudosa et al., Nature (2004);

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:

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

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

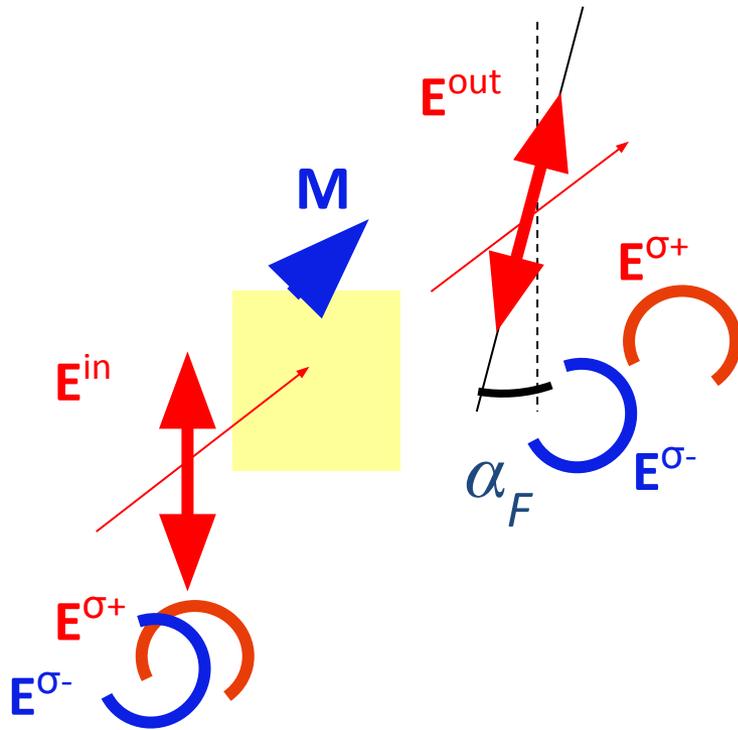
Собственные  
поляризации:

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

Магнитное

двулучепреломление:

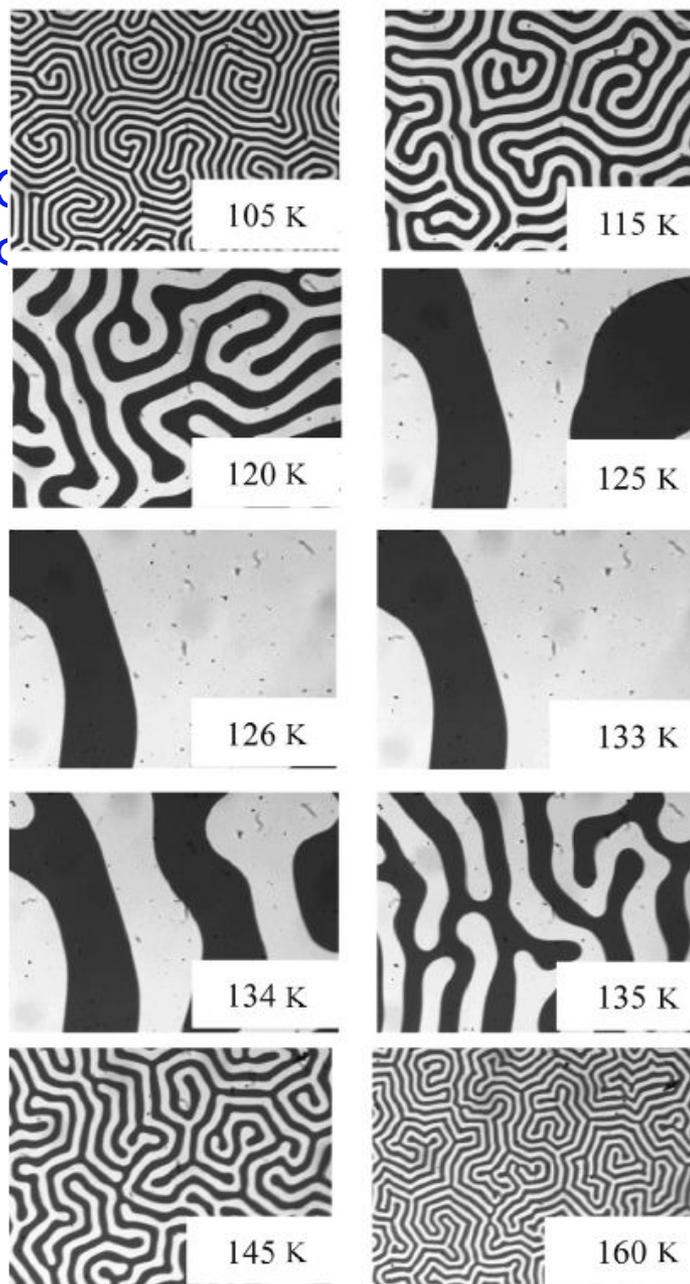
$$\Delta n_{\sigma^+ - \sigma^-} \sim \alpha_{xyz} M_z$$



Эффект  
Фарадея

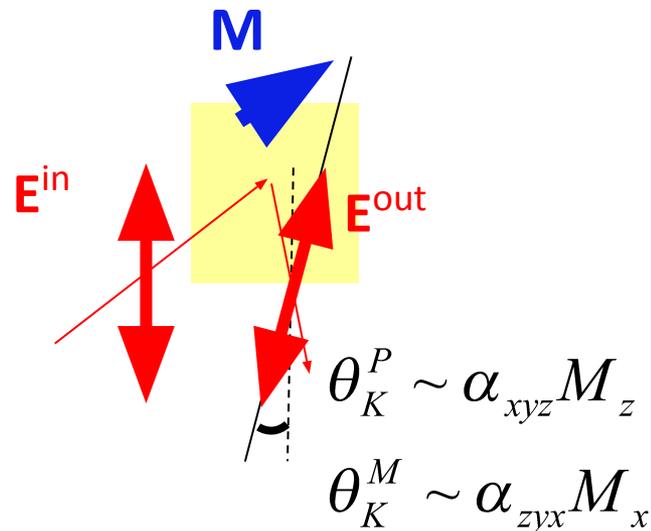
[M. Faraday,  
1845]

# Магнитооптические эффекты



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

Магнитооптические эффекты Керра

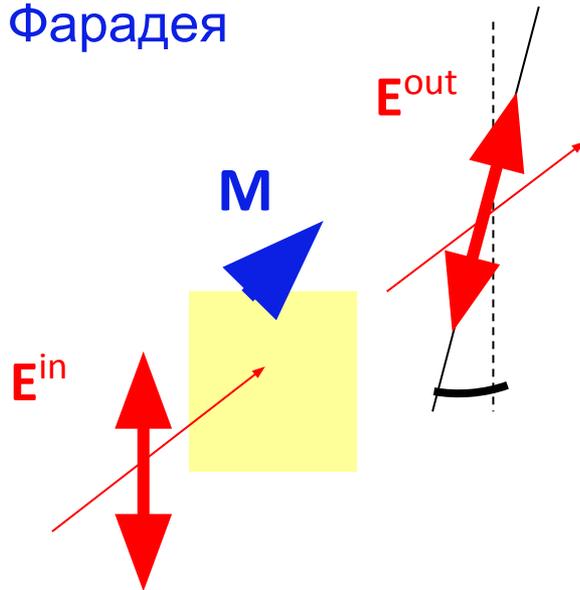


Мощное средство  
для  
**зондирования** магнитной  
структуры  
**управления** свойствами  
света

# Взаимодействие света с магнитной средой

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

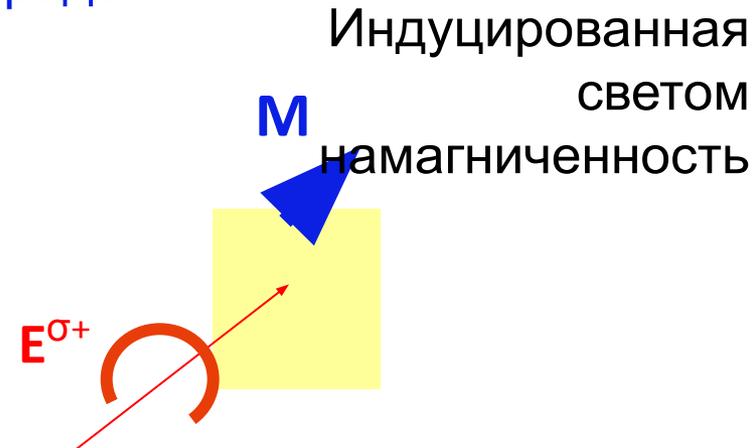
Эффект  
Фарадея



[M. Faraday,  
1845]

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

Обратный эффект  
Фарадея



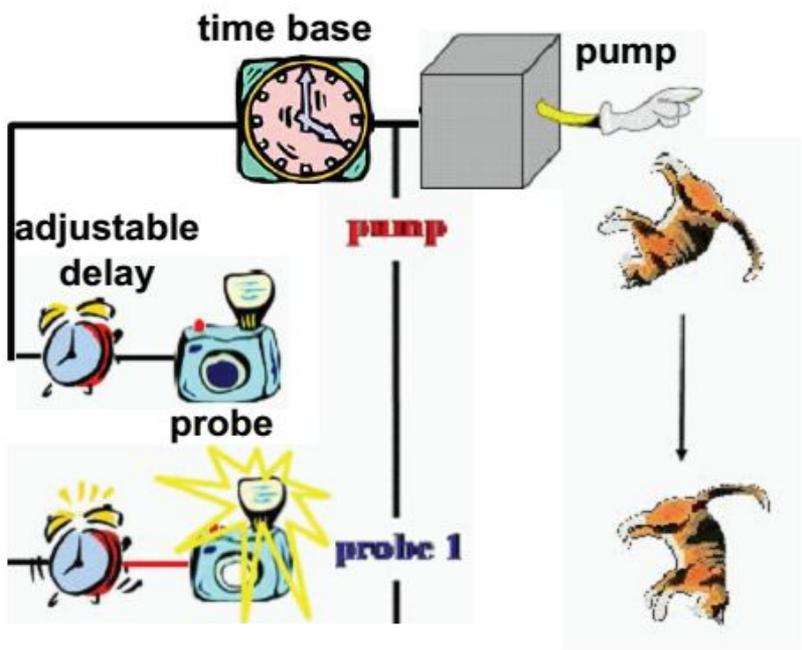
Индукцированная  
светом  
намагниченность

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

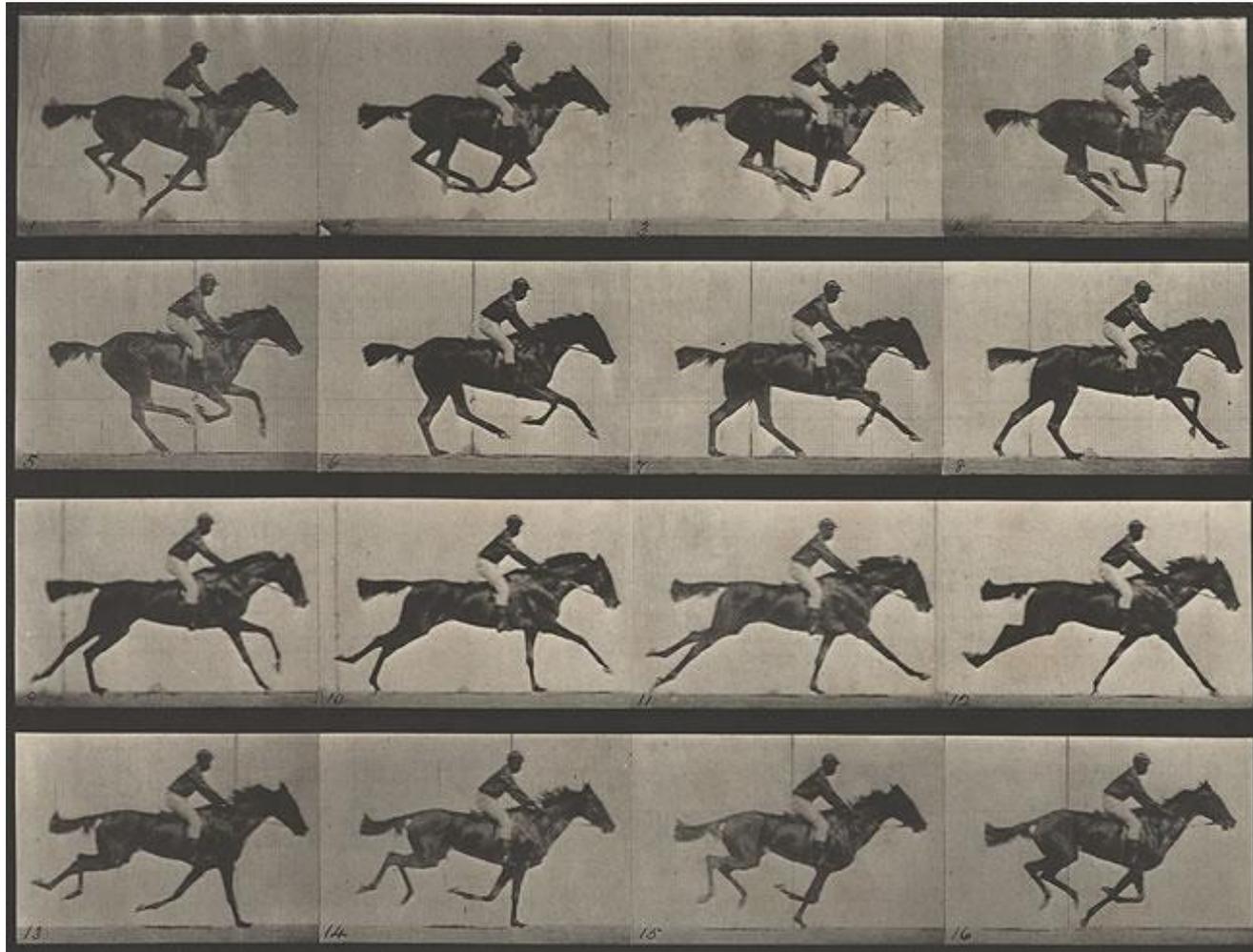
$$\mathbf{M}_z \sim \alpha_{xyz} \mathbf{E} \times \mathbf{E}^*$$

Давайте возьмем короткий импульс и магнитный материал

# Как можно померить очень быстрые изменения чего-то?

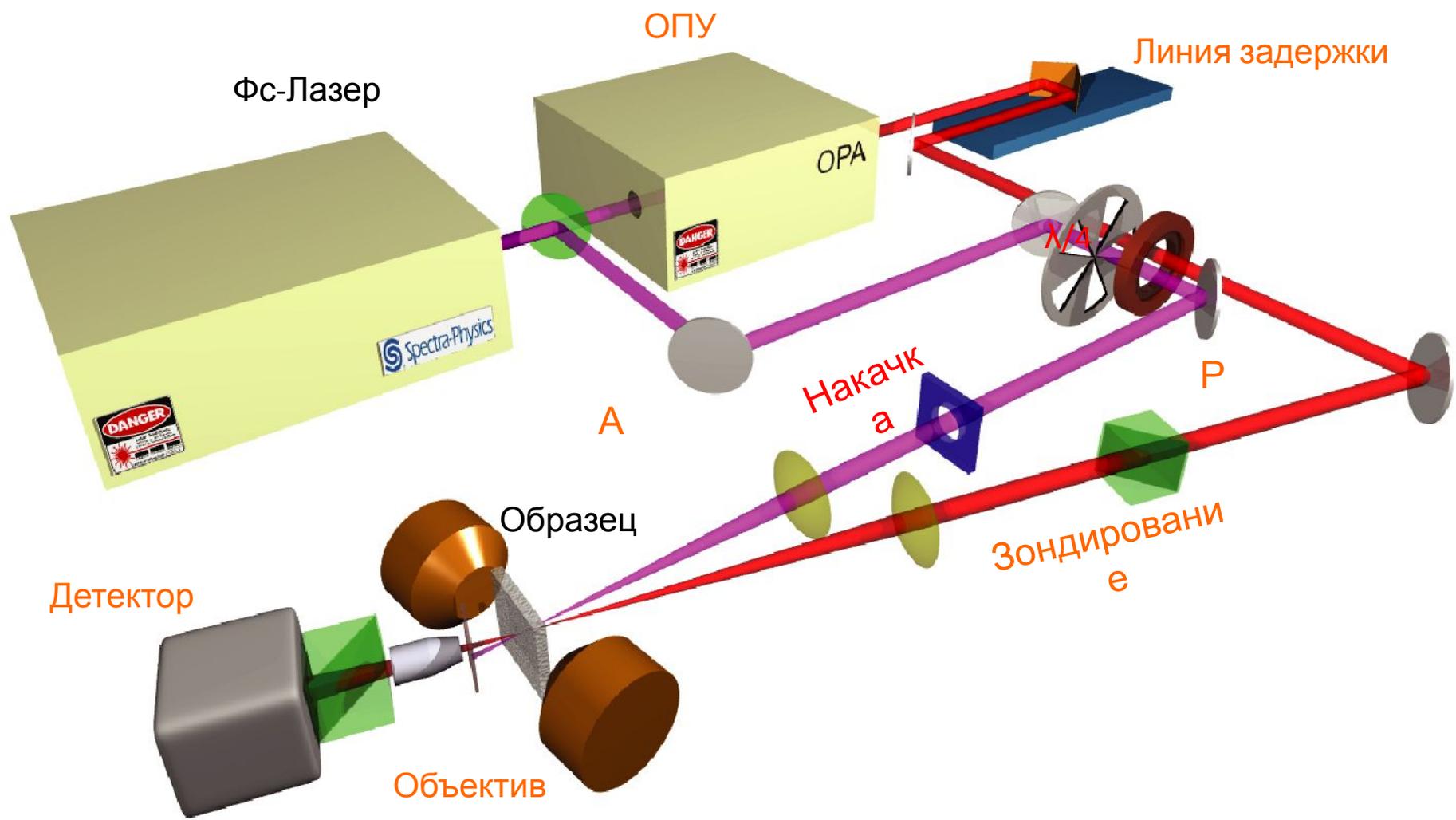


# Исторический пример

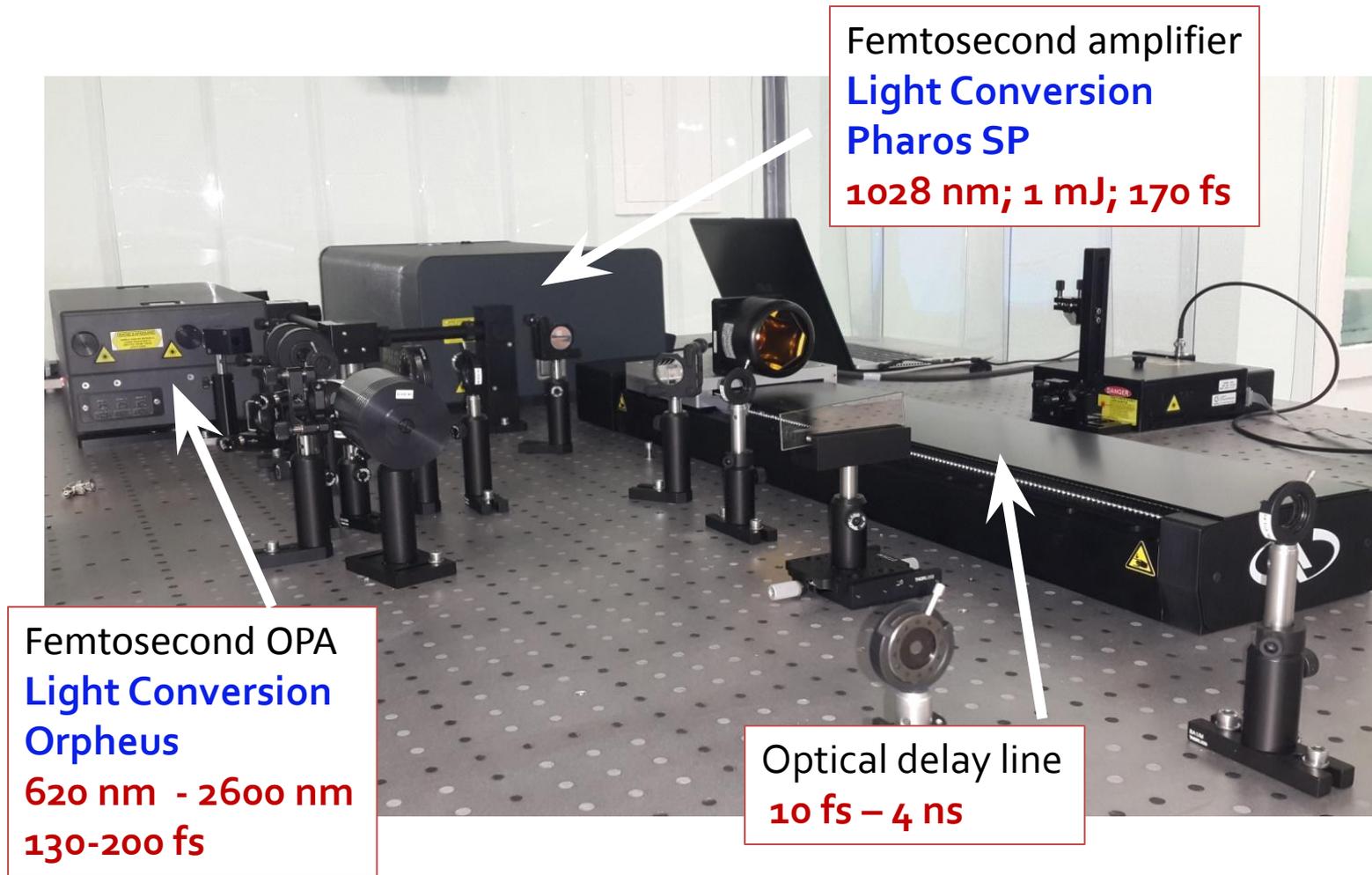


Эдвард Майбридж  
1878 год  
24 камеры

# Как померить динамику намагниченности, индуцированную фемтосекундным лазерным импульсом?

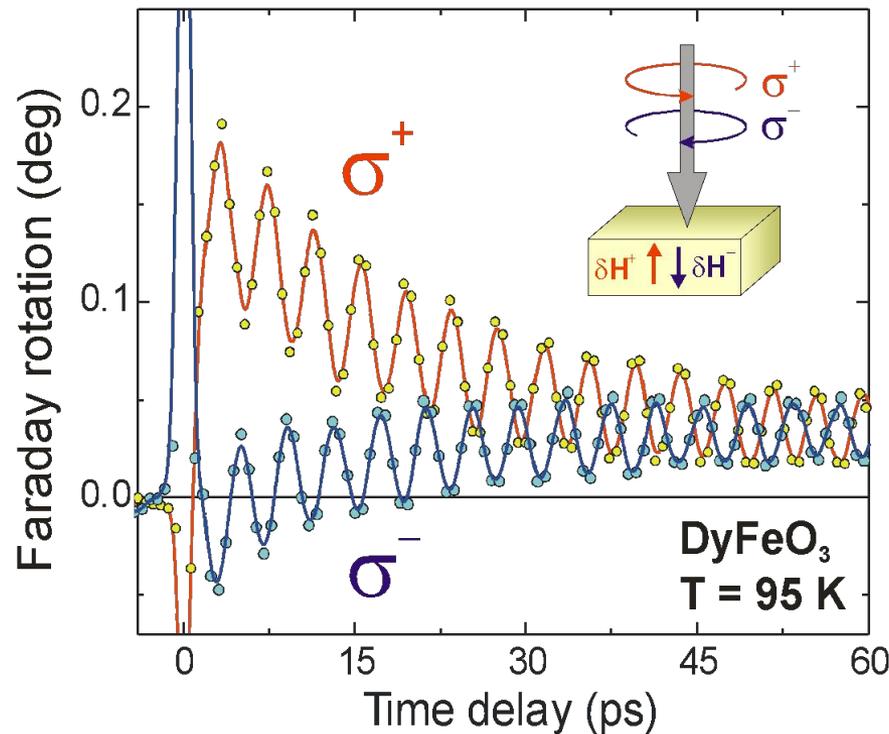


# Magneto-optical spectroscopy setup with femtosecond temporal resolution @ FerroLab



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

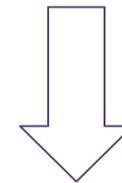
# Сверхбыстрый обратный эффект Фарадея



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

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

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



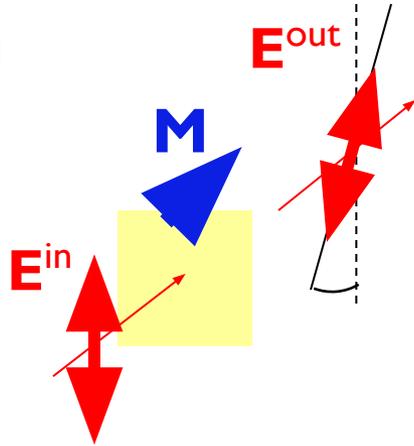
Сверхбыстрый  
обратный  
эффект Фарадея

Прецессия намагниченности, запускаемая лазерным импульсом!

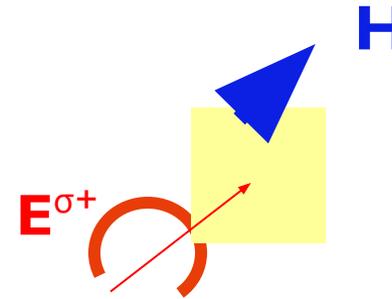
# Сверхбыстрые оптомагнитные эффекты

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

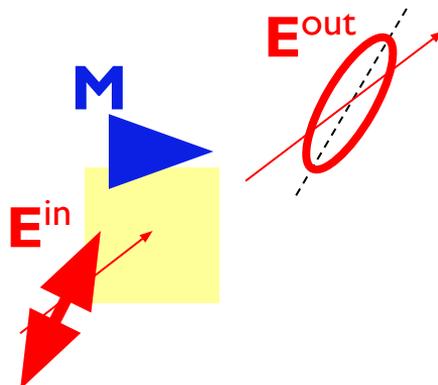
Эффект  
Фарадея



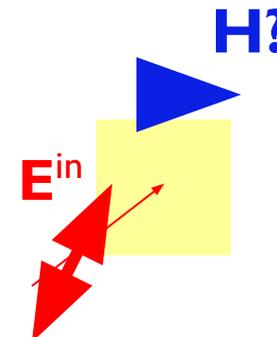
Обратный эффект  
Фарадея



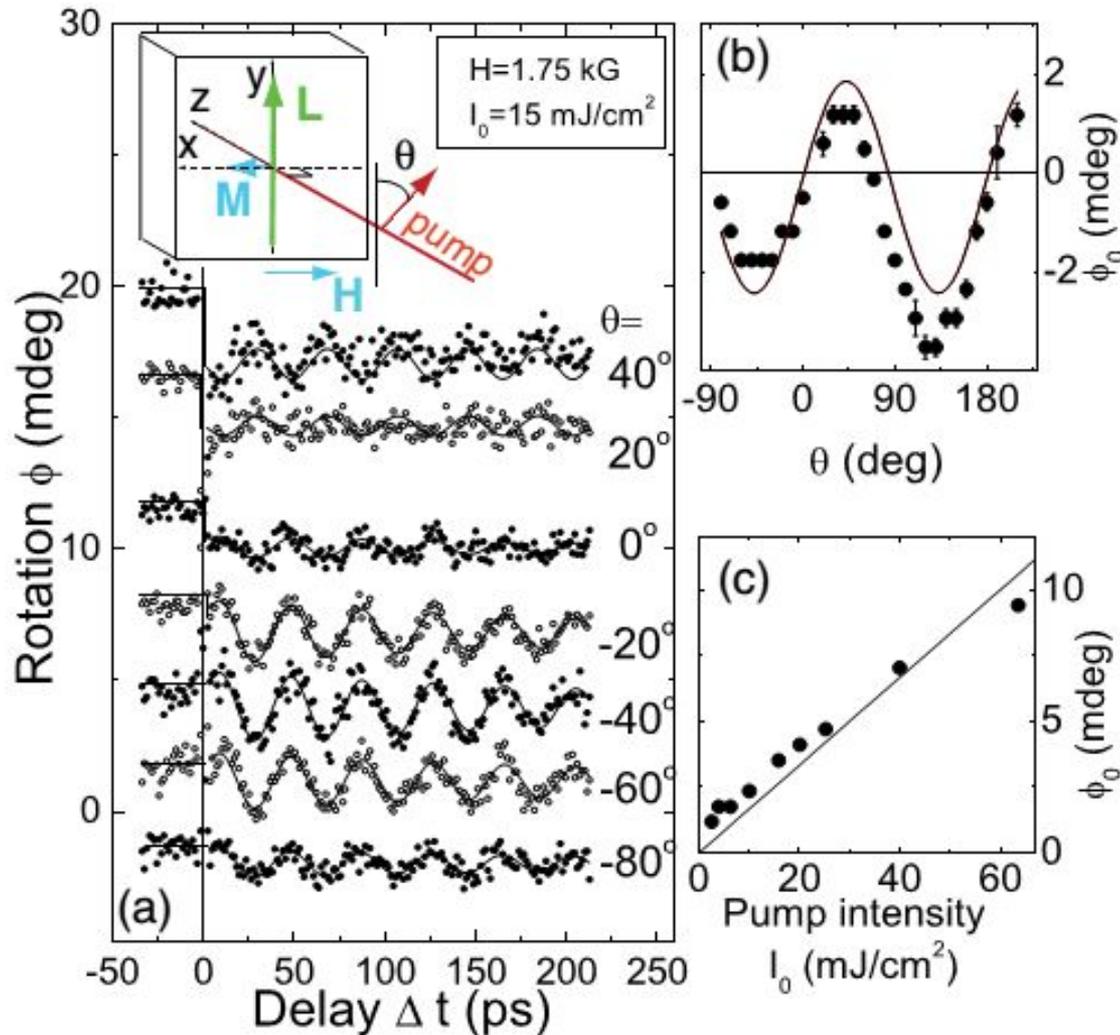
Эффект Котона-  
Мутона



Обратный эффект Котона-  
Мутона



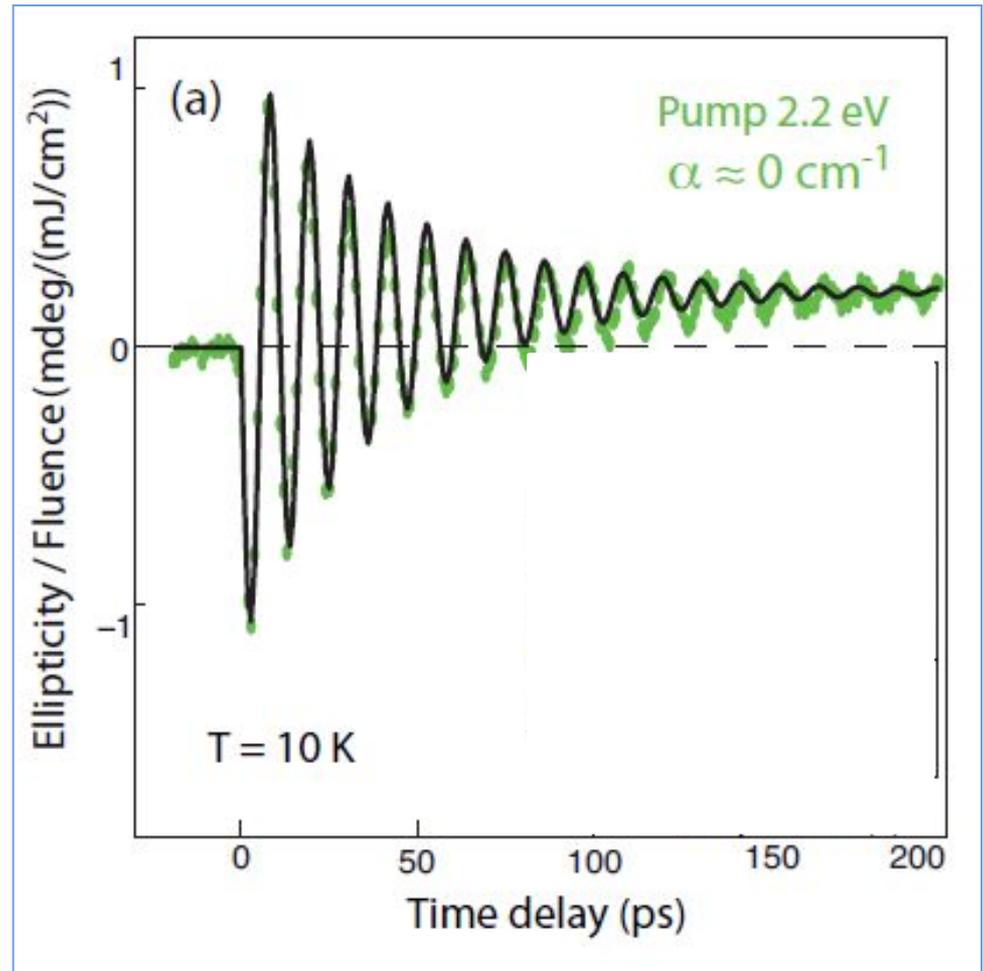
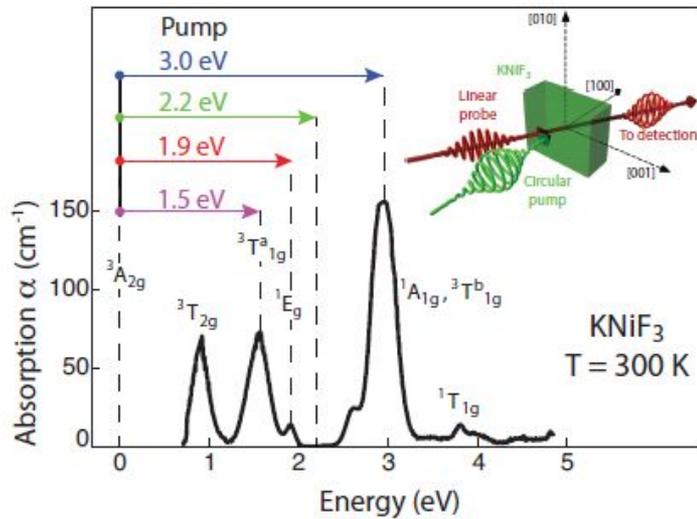
# Сверхбыстрый обратный эффект Котона-Мутона



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

Управление прецессией намагниченности  
линейно-поляризованными лазерными импульсами!

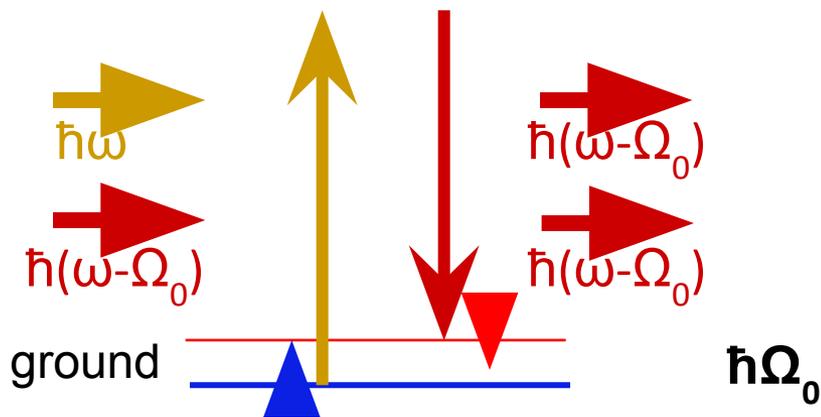
# Возбуждение прецессии без поглощения?



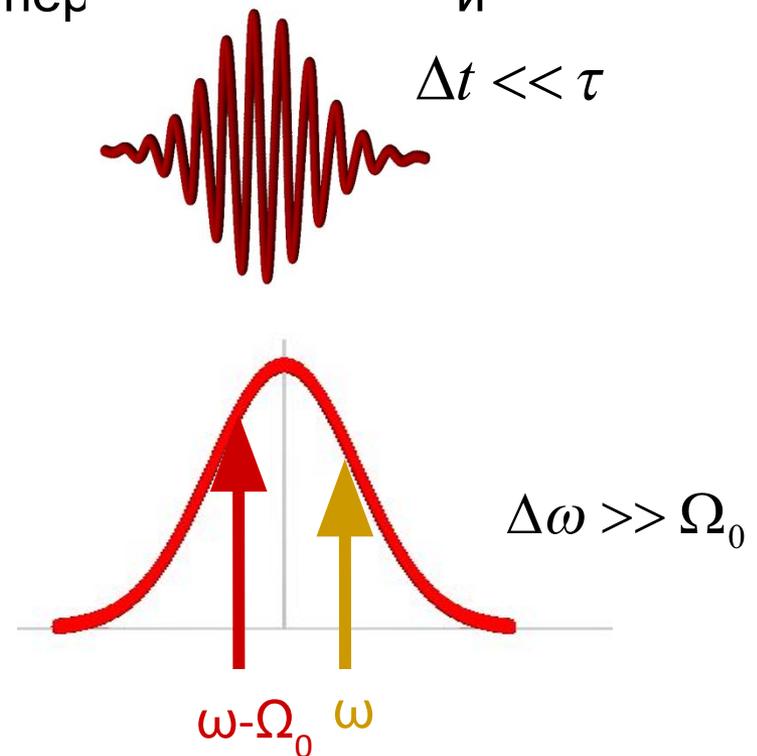
[D. Bossini et al., PRB (2014)]

# 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

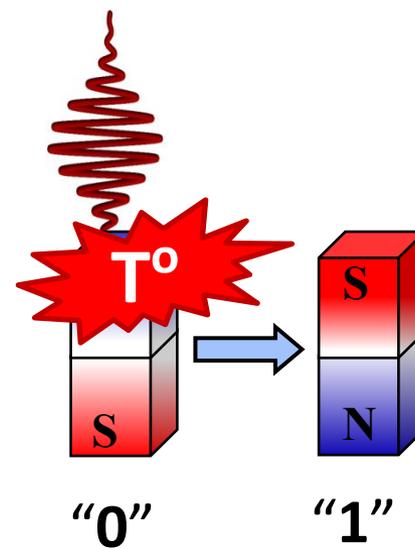
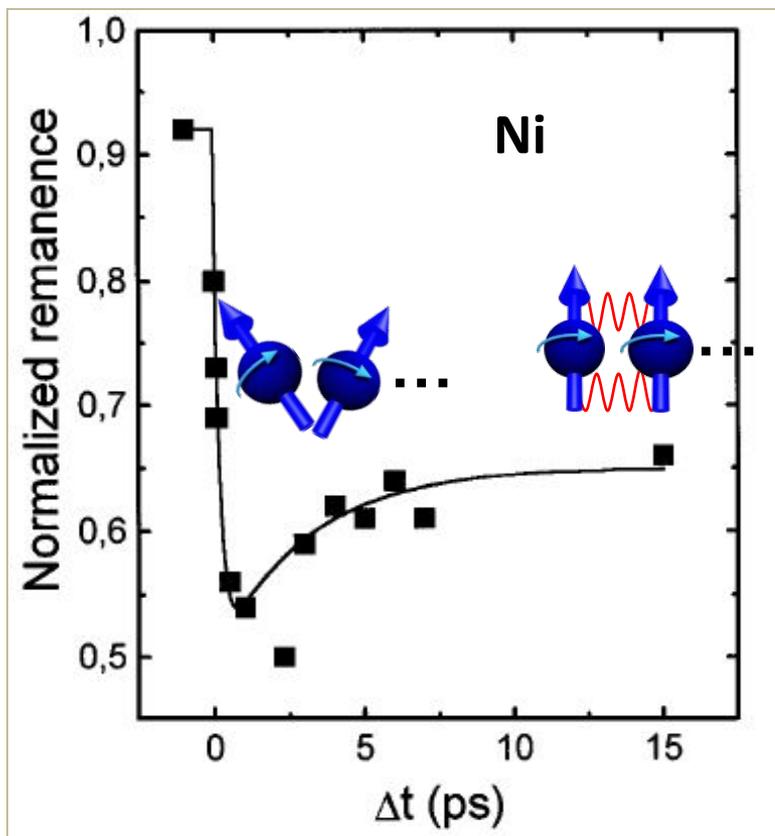
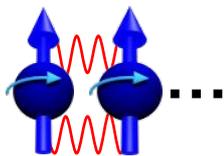
✓ Без поглощения

□ Как их усилить?

□ Как их локализовать?

**ОК, но прецессии не  
достаточно.....**

# Сверхбыстрый магнетизм в металлах

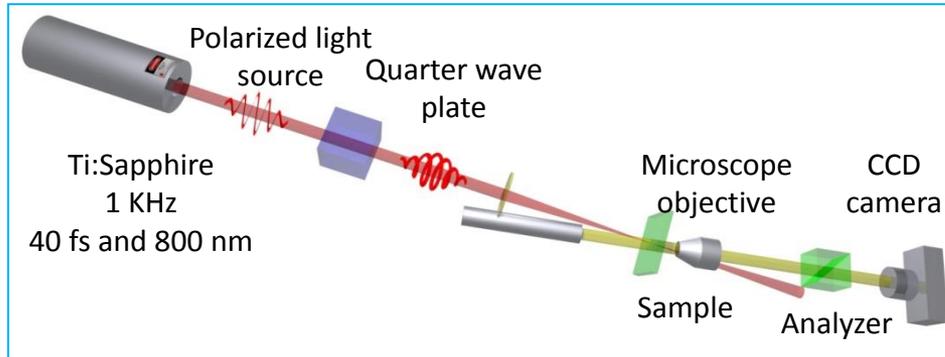


Основано на поглощении света  
и **быстром нагреве электронов**

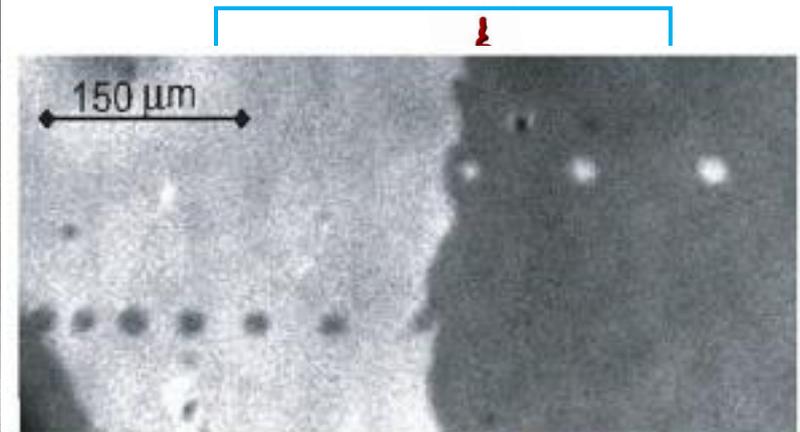
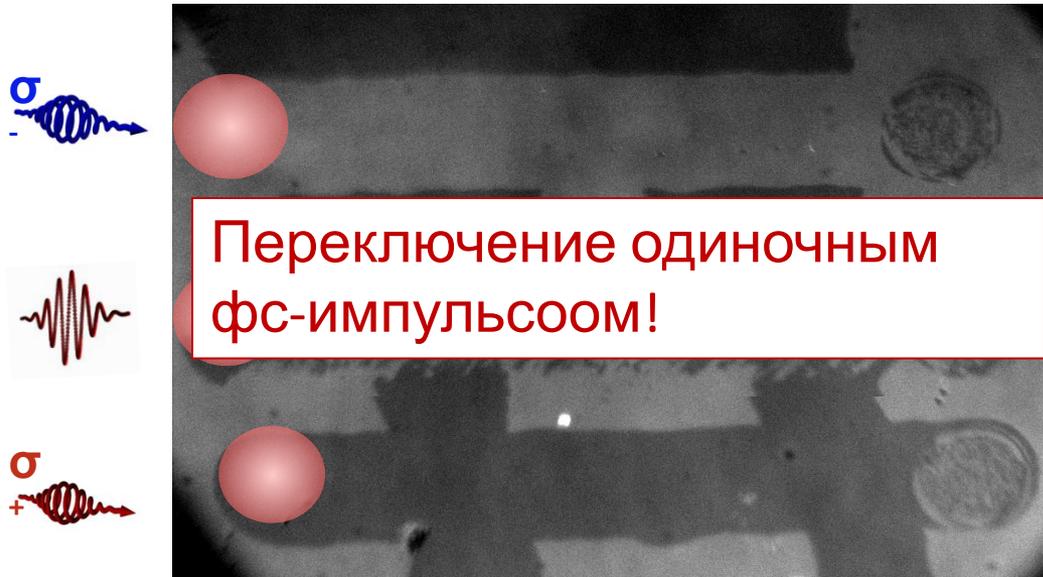
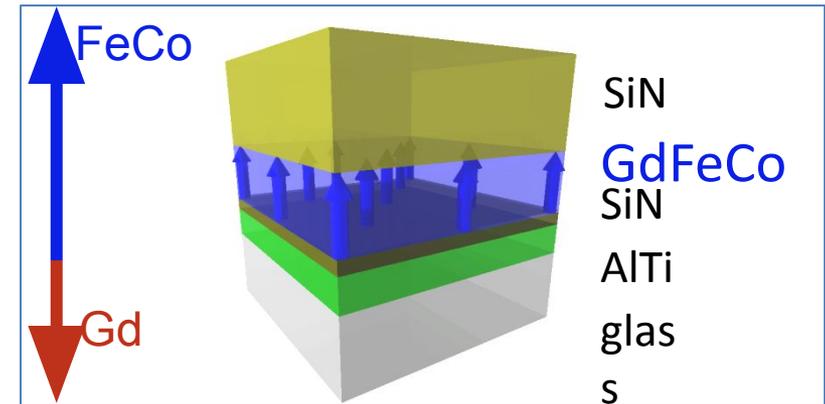
**Сверхбыстрое  
размагничивание  
в пленке металла**

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

# Оптическое переключение намагниченности: первая демонстрация

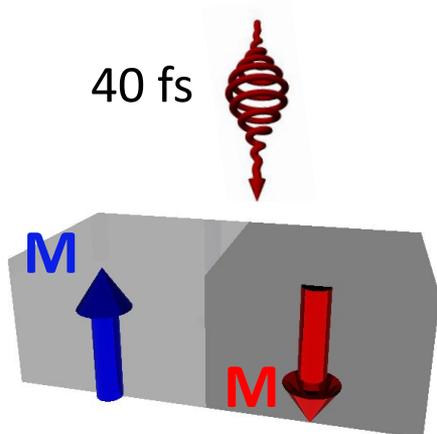
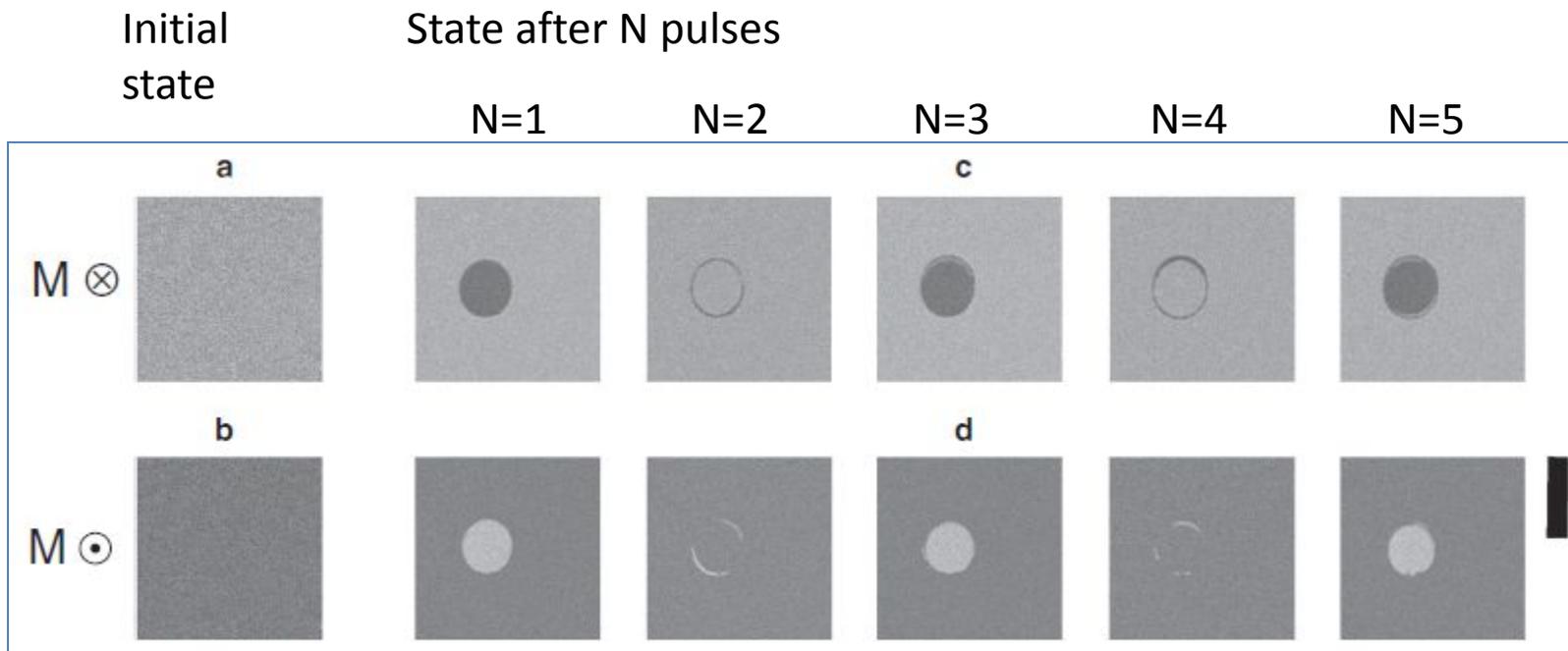


Ferrimagnetic metallic alloy GdFeCo



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

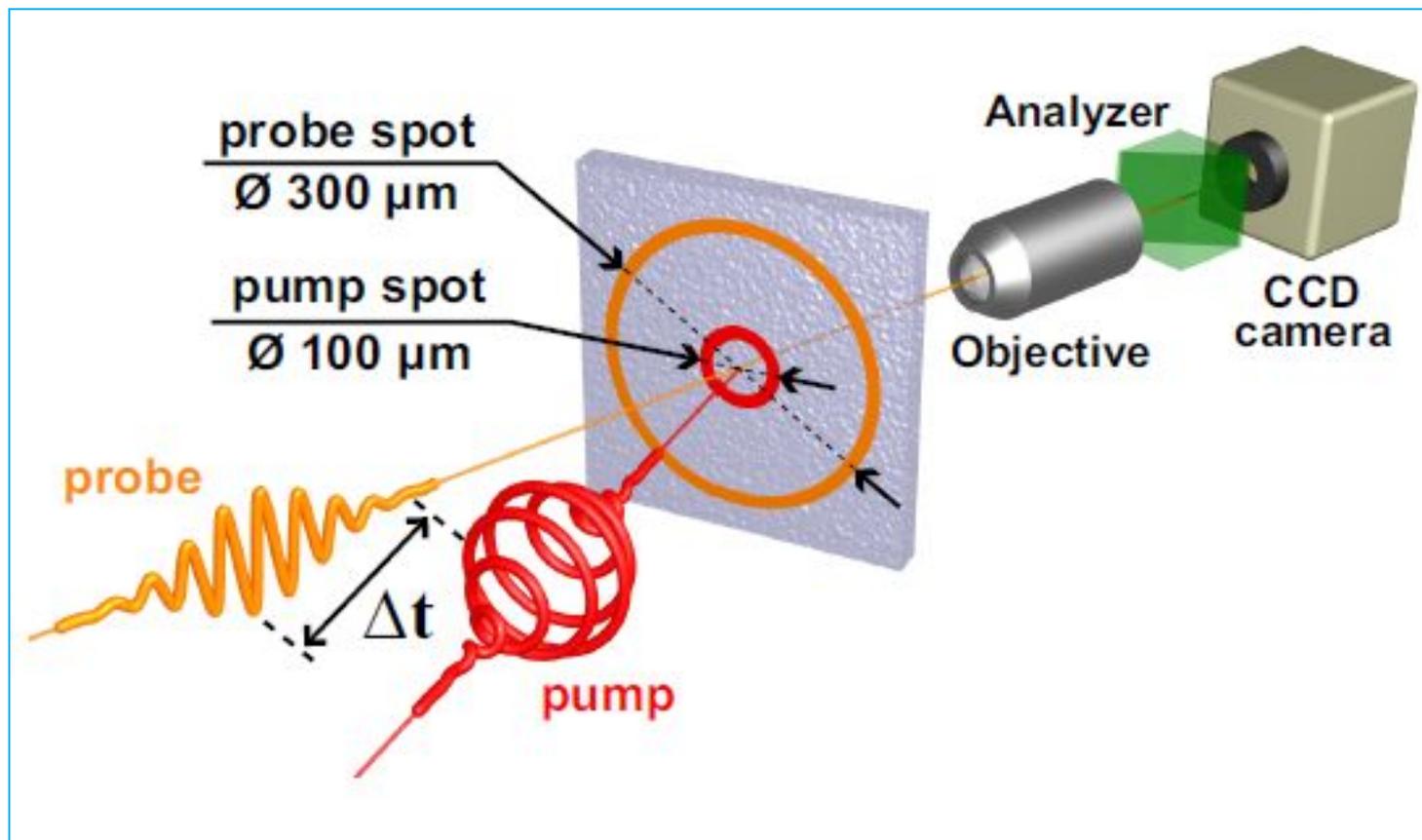
# Оптическое переключение намагниченности одинокими импульсами



Как быстро это происходит?

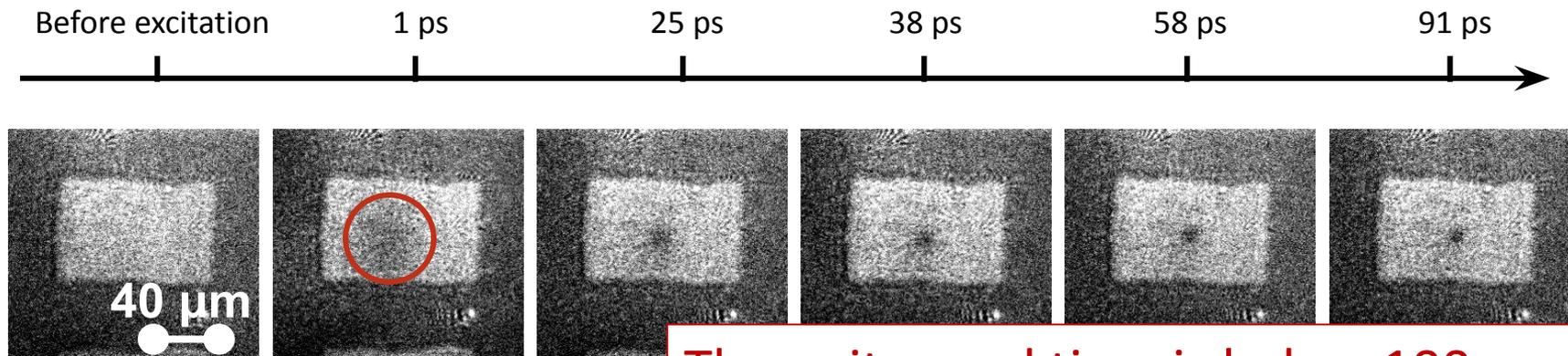
[T. Ostler et al., Nature Comm.  
(2012)]

# Одноимпульсная фемтосекундная фотография

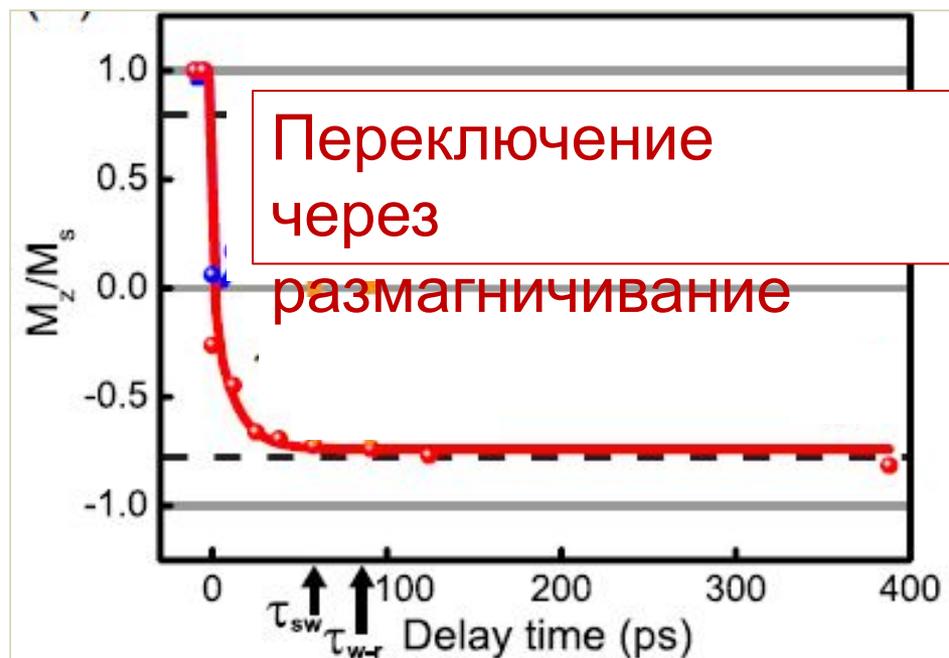


Magneto-optical images with subpicosecond resolution

# Динамика оптического переключения намагниченности



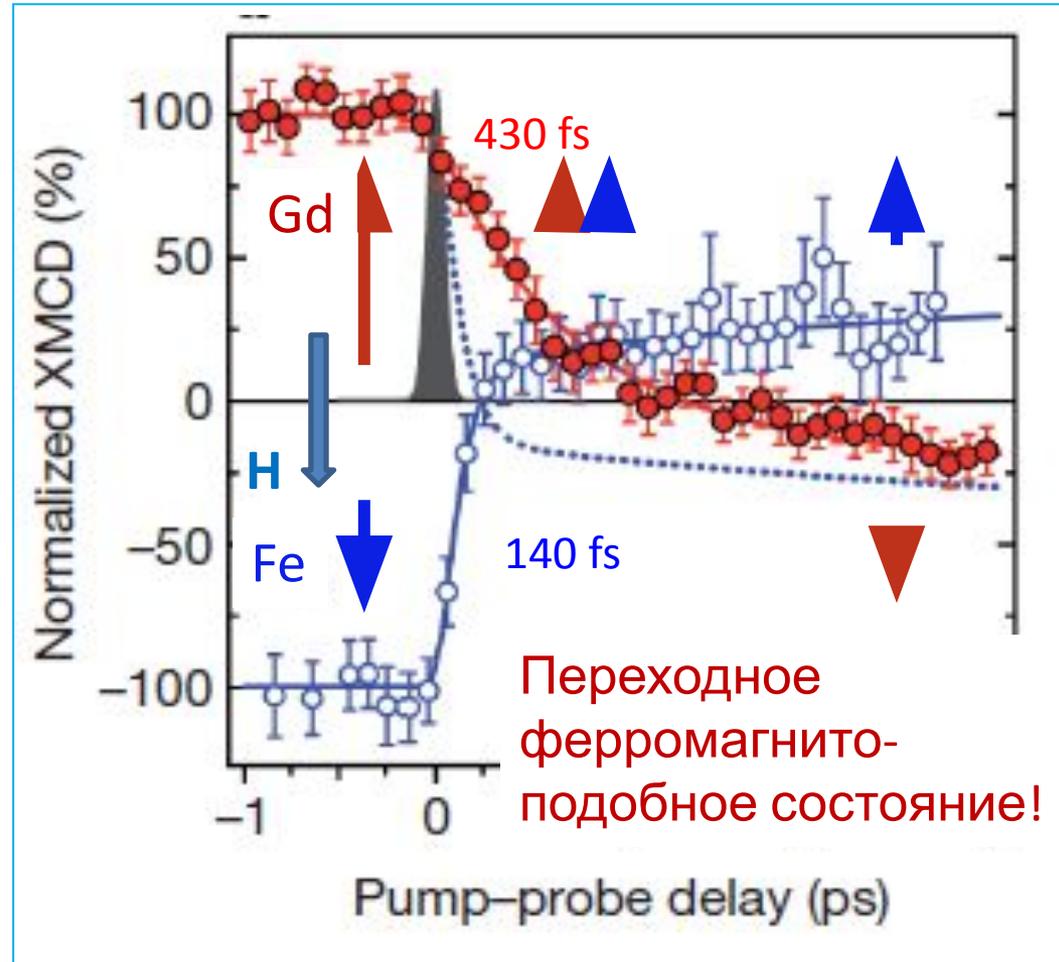
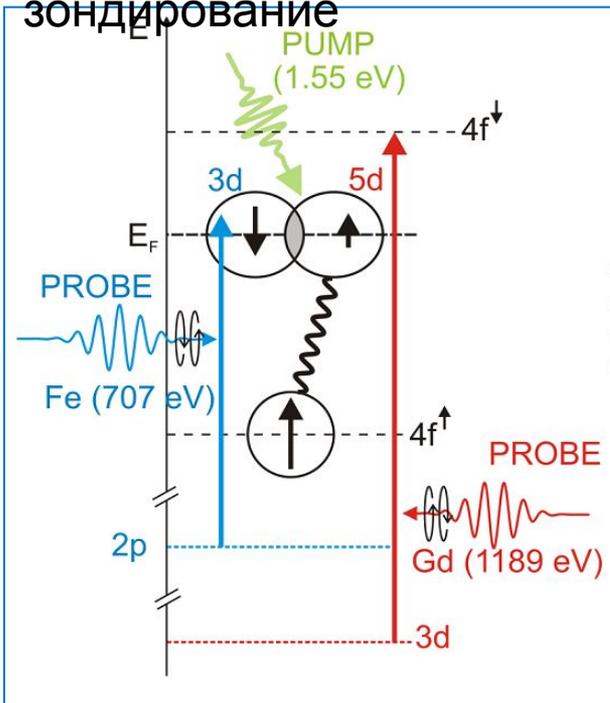
The write-read time is below 100 ps



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

# Сверхбыстрая динамика спинов в ферримагнетике GdFeCo

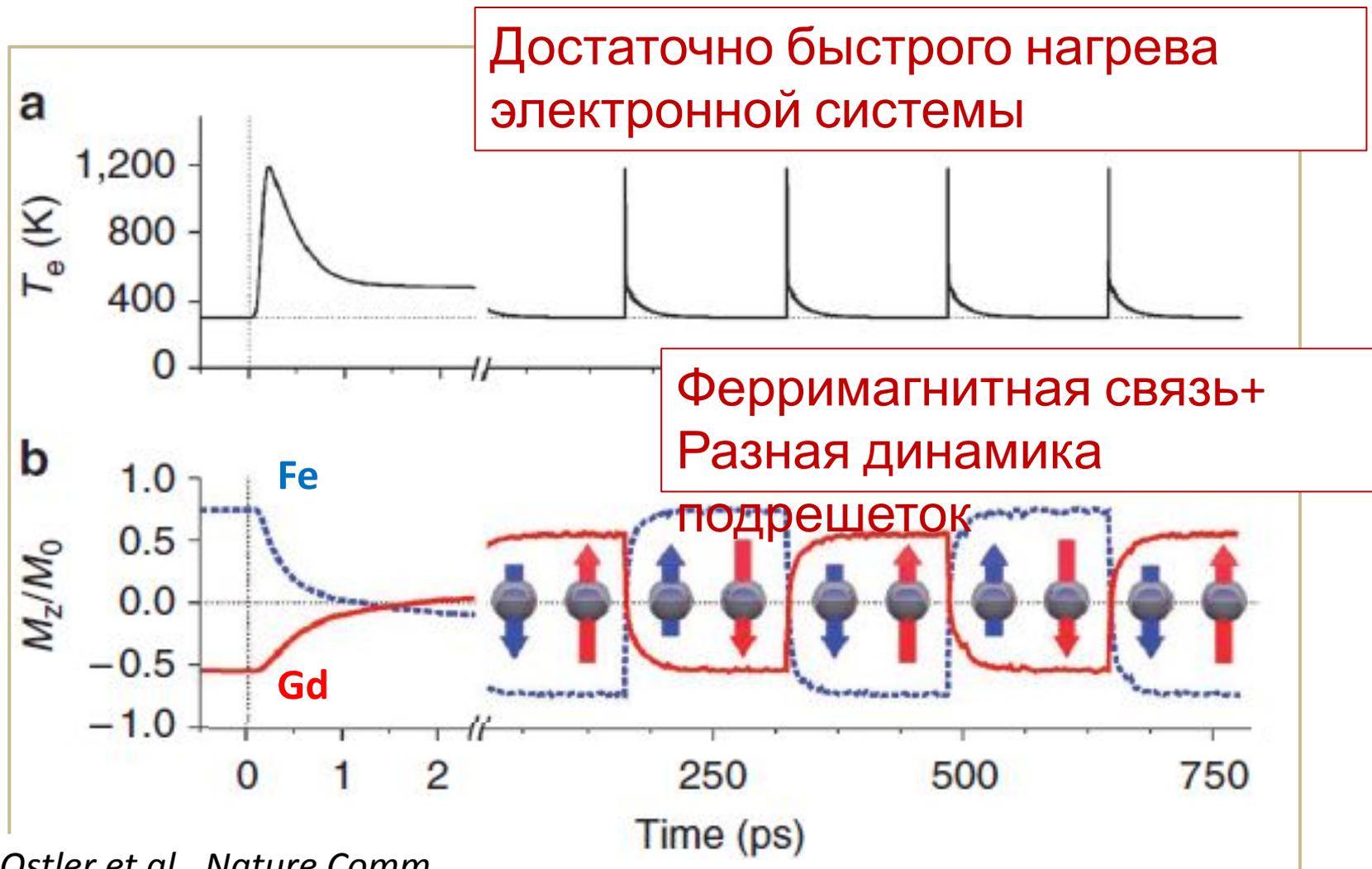
Оптическое возбуждение  
Рентгеновское зондирование



Разная динамика сверхбыстрого размагничивания в ферримагнетике

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

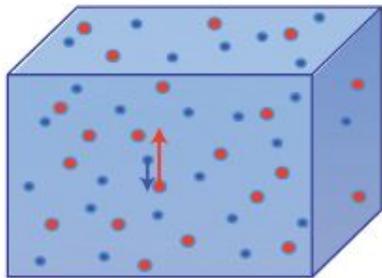
# К пониманию сверхбыстрого оптического переключения намагниченности



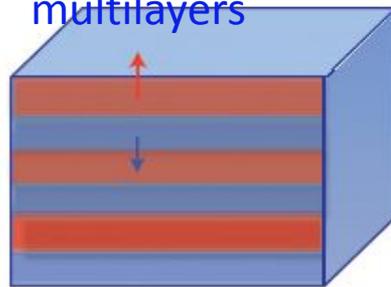
[T. Ostler et al., Nature Comm. (2012);  
J. Mentink et al., PRL (2012)]

# Что дальше? поиск различных структур для переключения

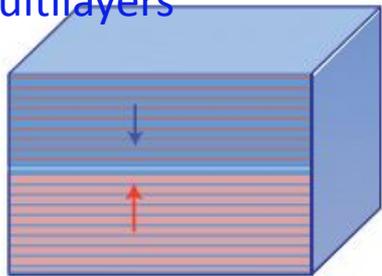
RE/TM alloy



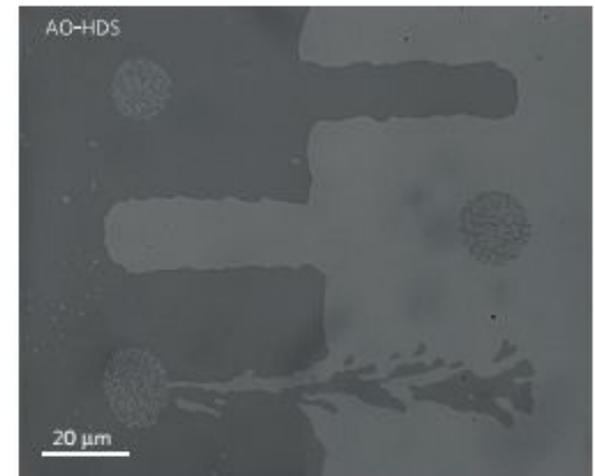
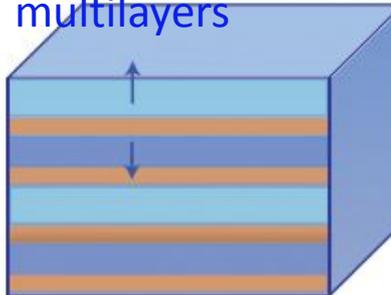
b RE/TM multilayers



RE/TM multilayers



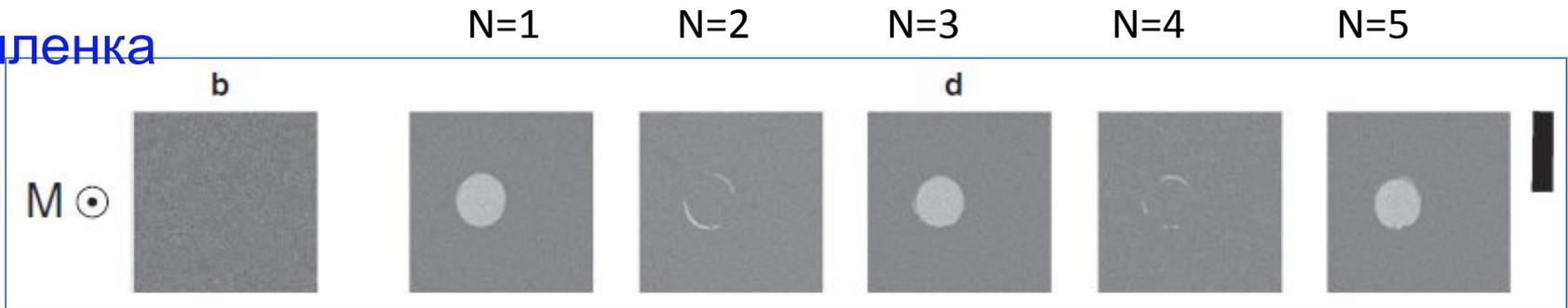
d TM1/TM2 multilayers



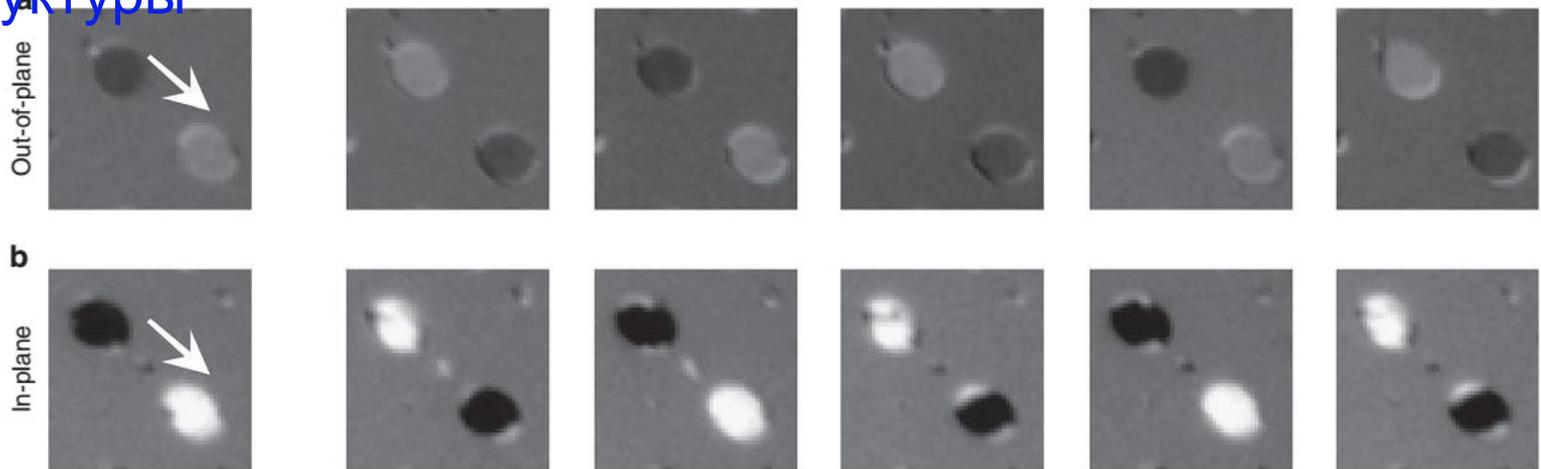
[S. Mangin et al., Nature Mater. (2014)]

# Что дальше? микронные масштабы

Сплошная  
пленка



2- $\mu\text{m}$   
структуры



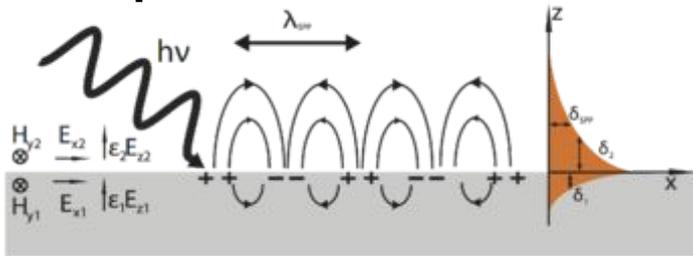
[T. Ostler et al., Nature Comm.  
(2012)]

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

# Что дальше?

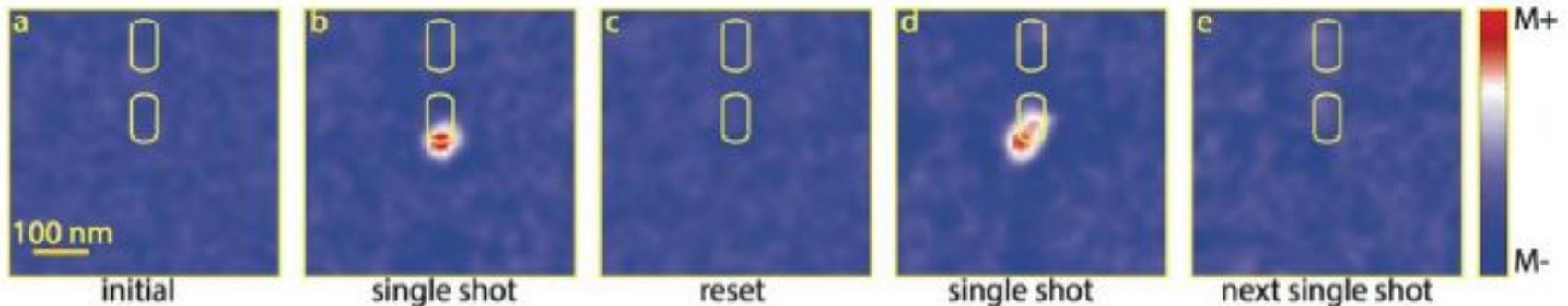
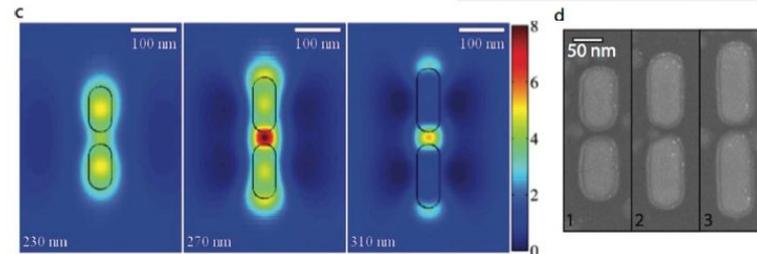
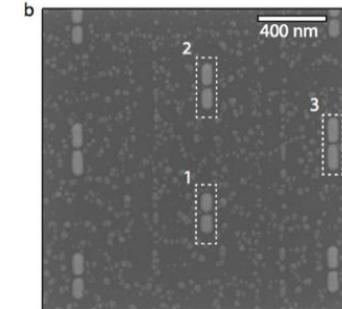
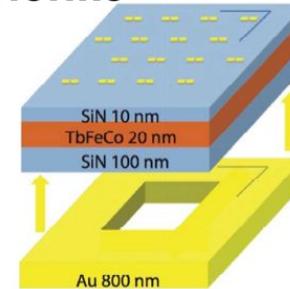
## переключение наноразмерных областей

### Поверхностный плазмон-поляритон



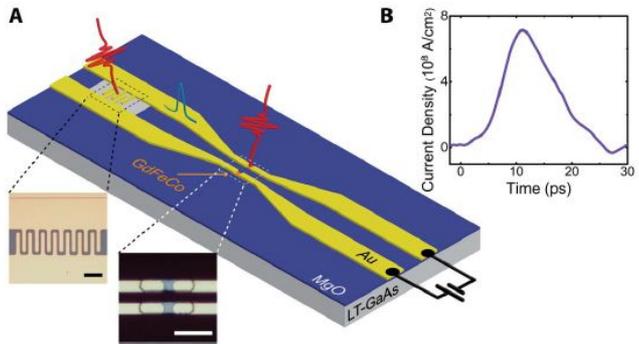
Фокусировка излучения  
за пределами дифракционного  
предела!

### Наноантенна на TbFeCo пленке

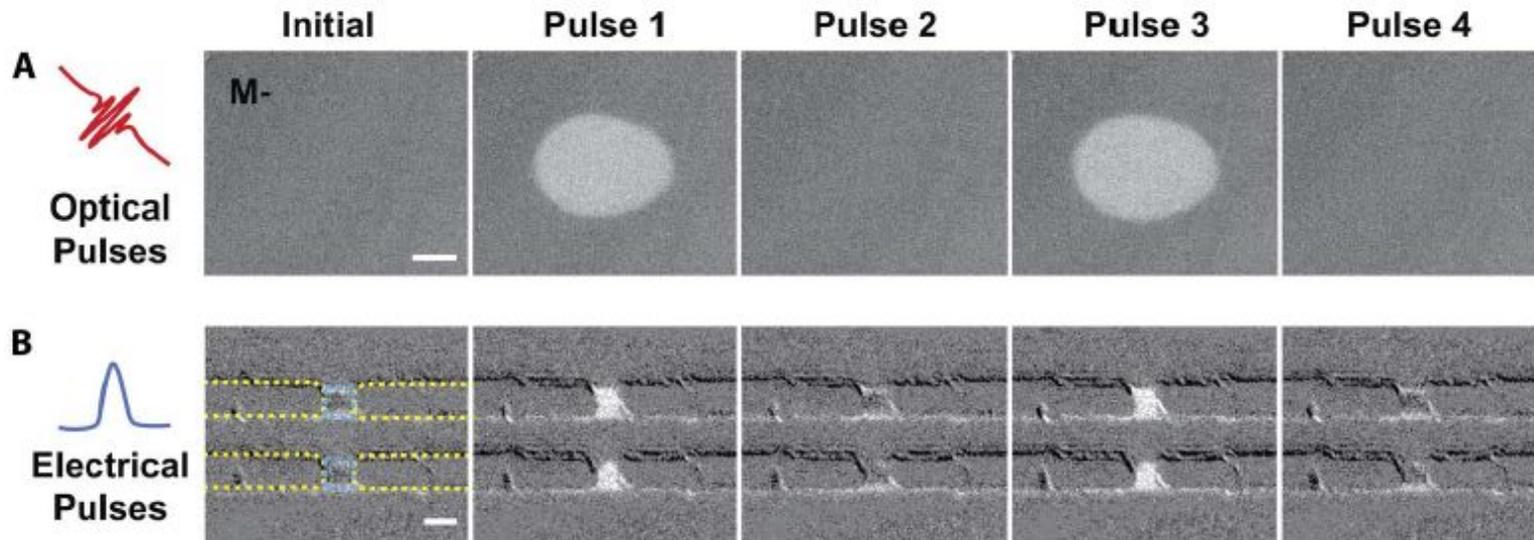


[Tian-Min Liu et al., NanoLetters (2016)]

# 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

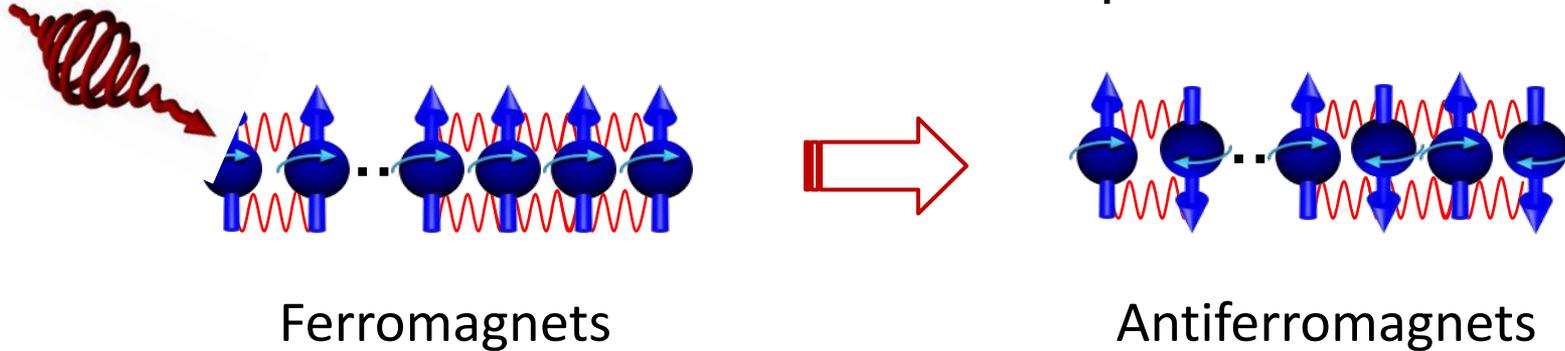
Позволяет достичь времен записи-считывания  $\sim 30$  ps

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**

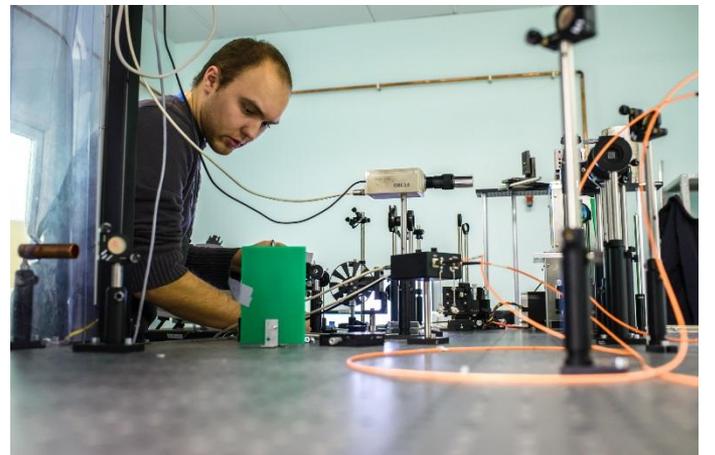
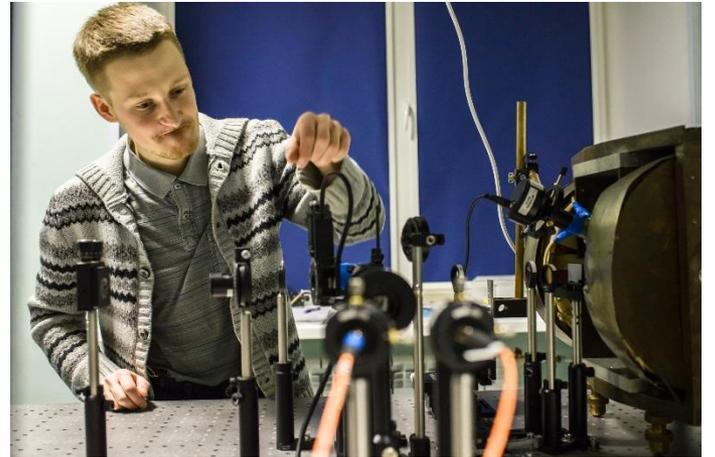
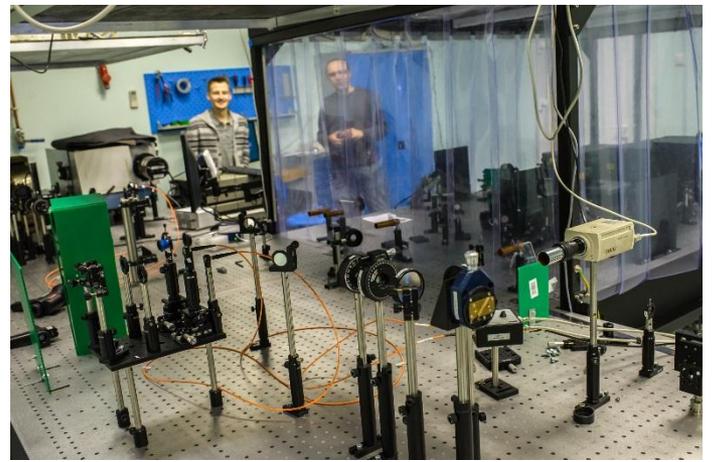
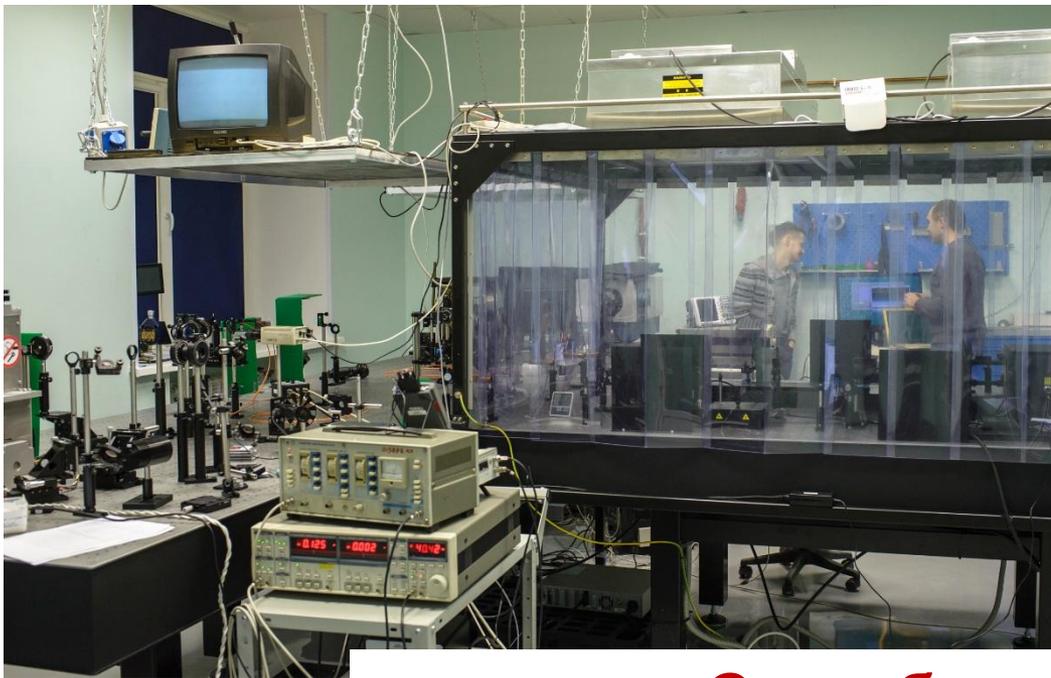
U. Atxitia  
O. Chubykalo-Fesenko

## **Institute of Magnetism, NASU**

B.A. Ivanov

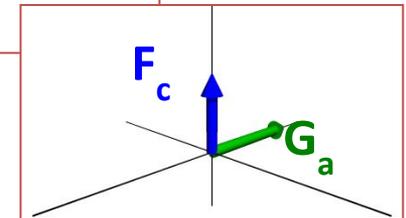
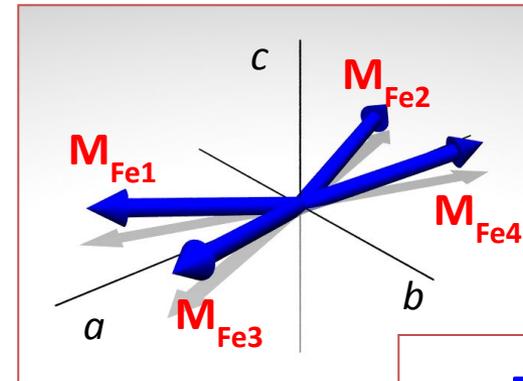
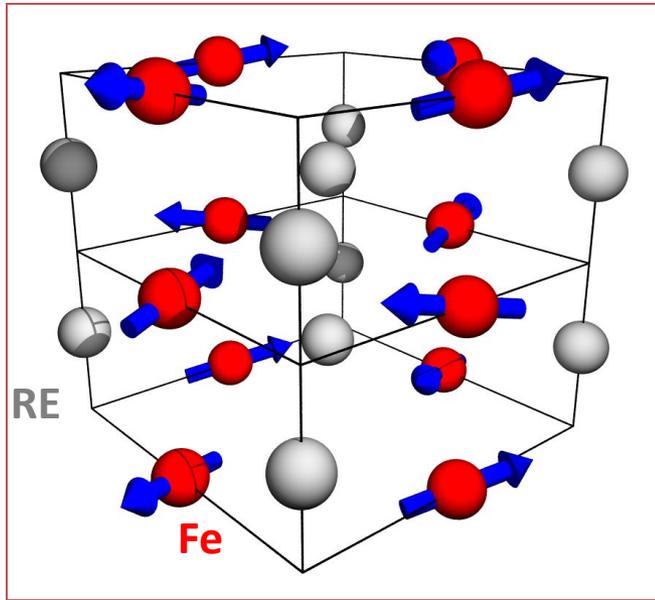
## **University of Konstanz**

S. Gerlach  
D. Hinzke  
U. Nowak



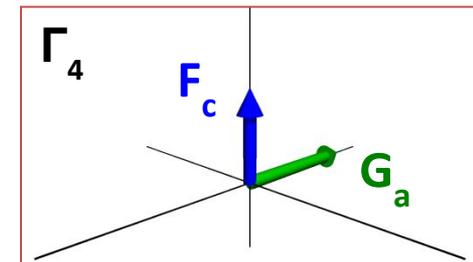
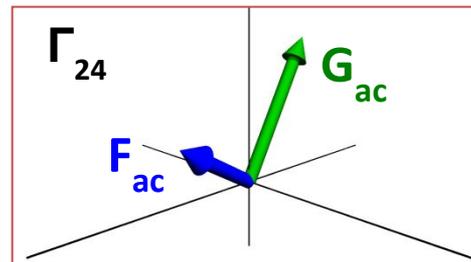
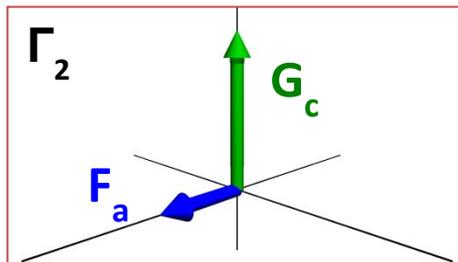
Спасибо за  
внимание!

# Spin reorientation phase transition in REFeO<sub>3</sub>

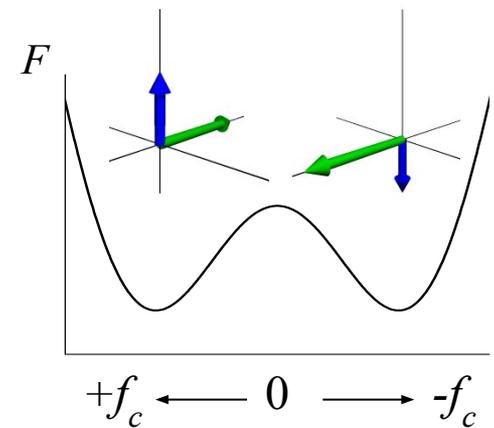
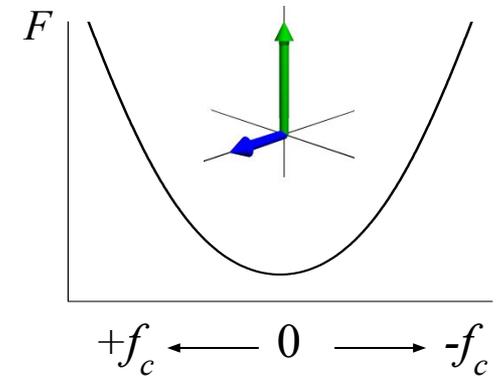
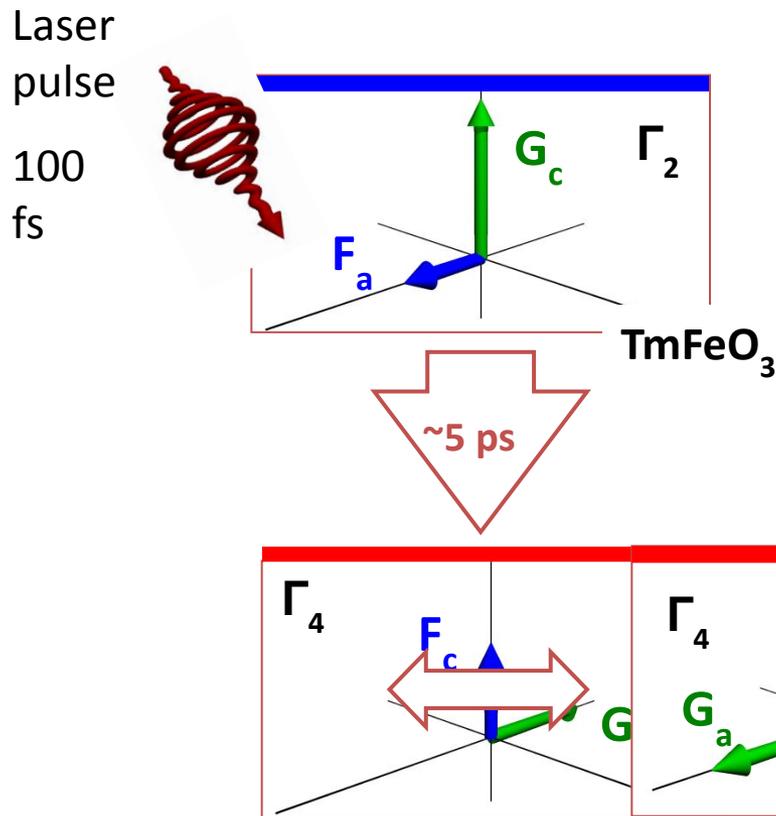


Spin reorientation (SR) phase transition

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



# 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)FeO<sub>3</sub>

$\Gamma_2$

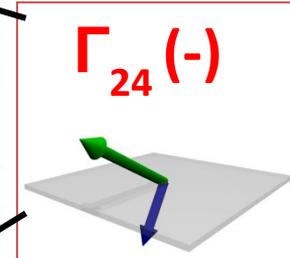
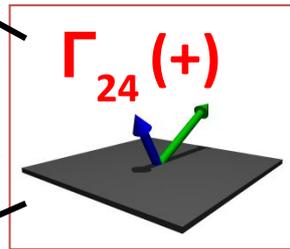
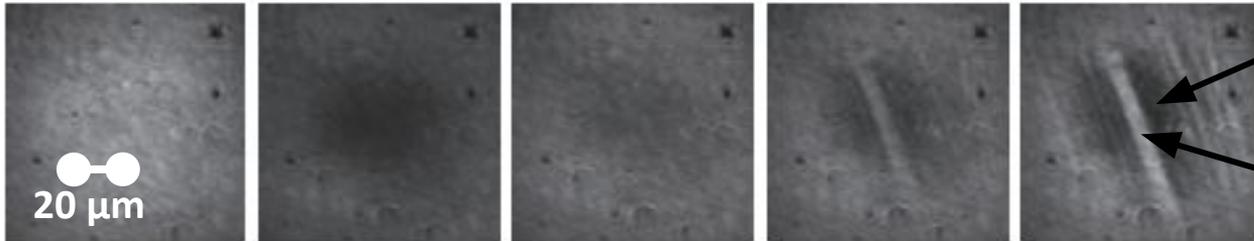
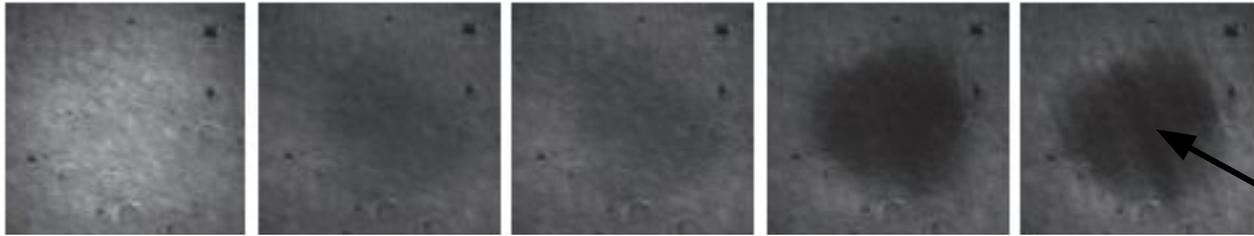
<0

0

2

5

15  $\Delta t$  (ps)



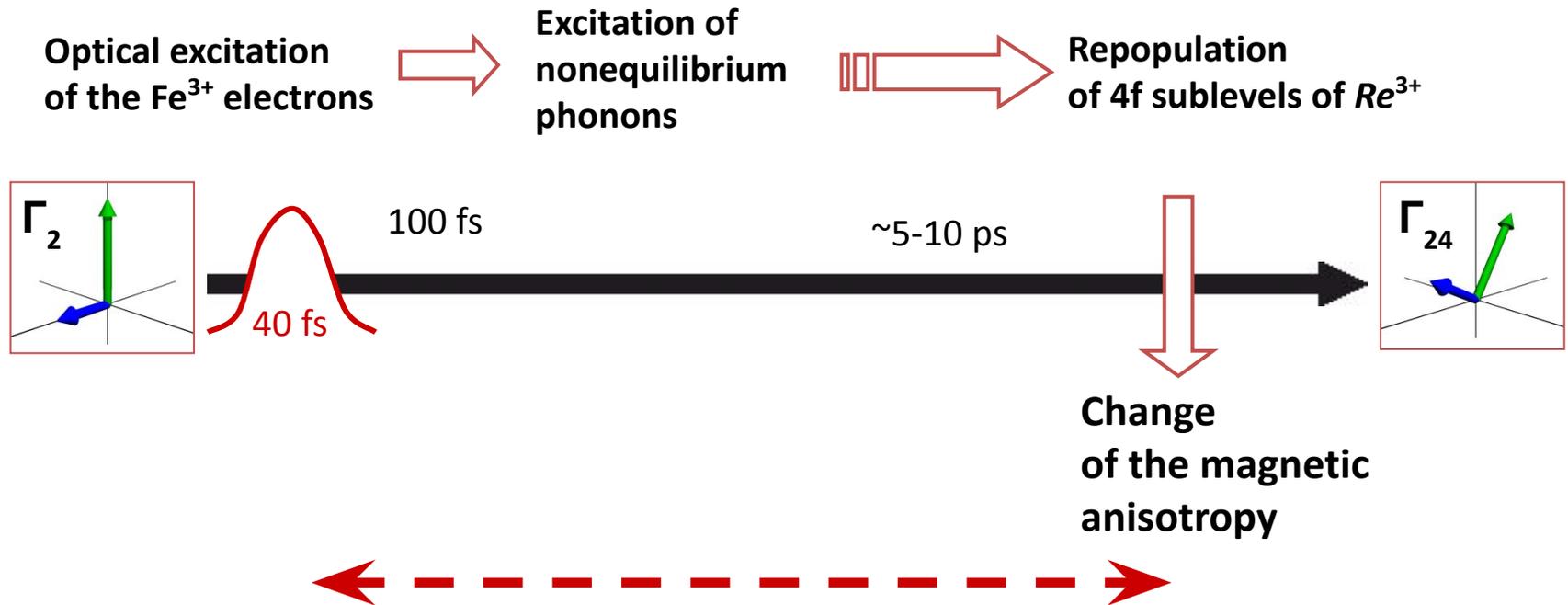
T=90 K

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

(2012)]

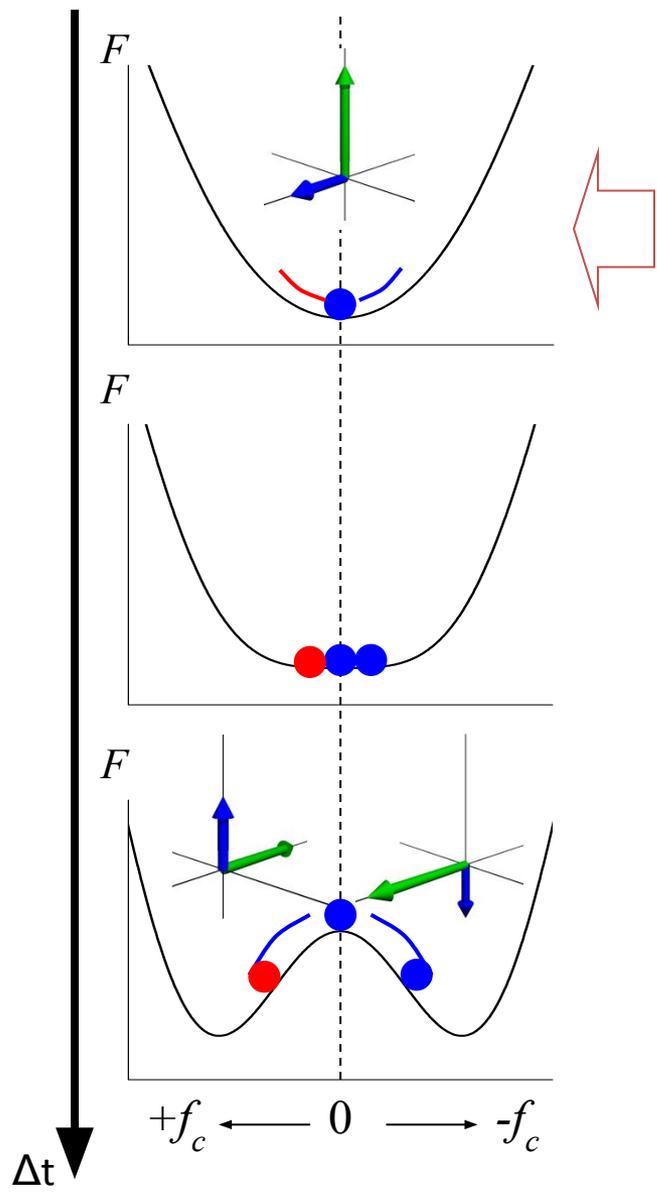
Ultrafast laser-induced SR transition  
controlled by a laser pulse polarization alone!

# Mechanism of the laser-induced SR transition



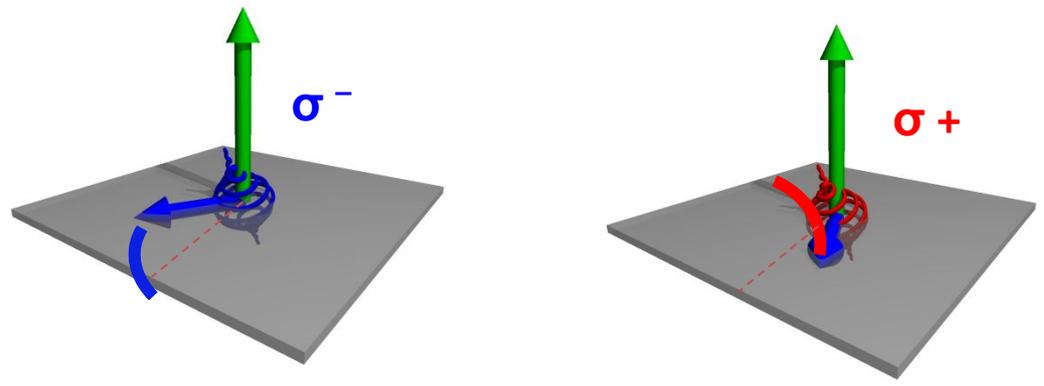
How and where the information about the laser pulse polarization is stored?

# Control of the laser-induced SR transition



## Ultrafast inverse Faraday effect

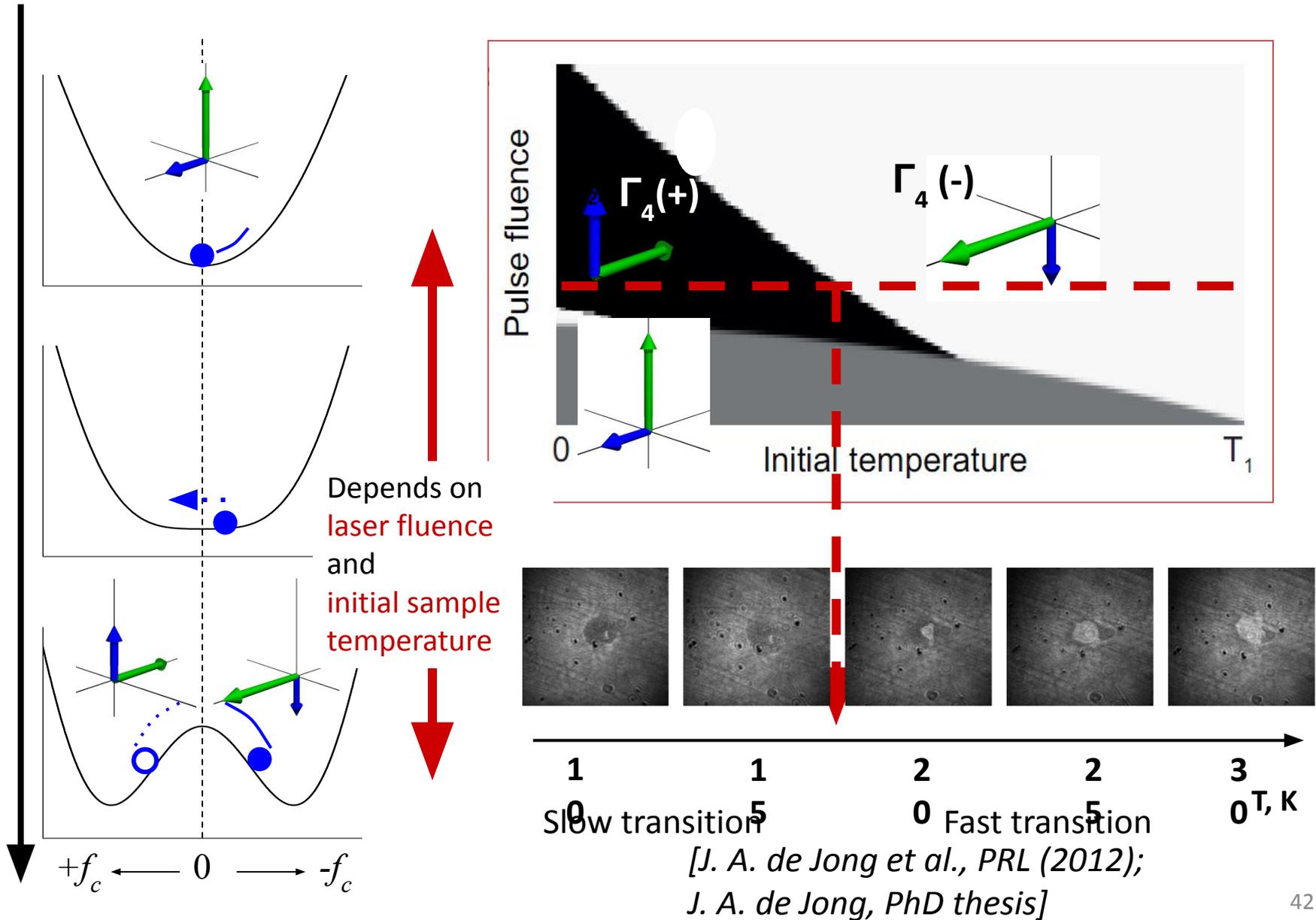
Impulsive excitation of the low amplitude magnetization precession ( $<10^\circ$ )



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  $\text{REFeO}_3$

Возможно благодаря

- Импульсному возбуждению прецессии намагниченности
- Пикосекундному нагреву решетки

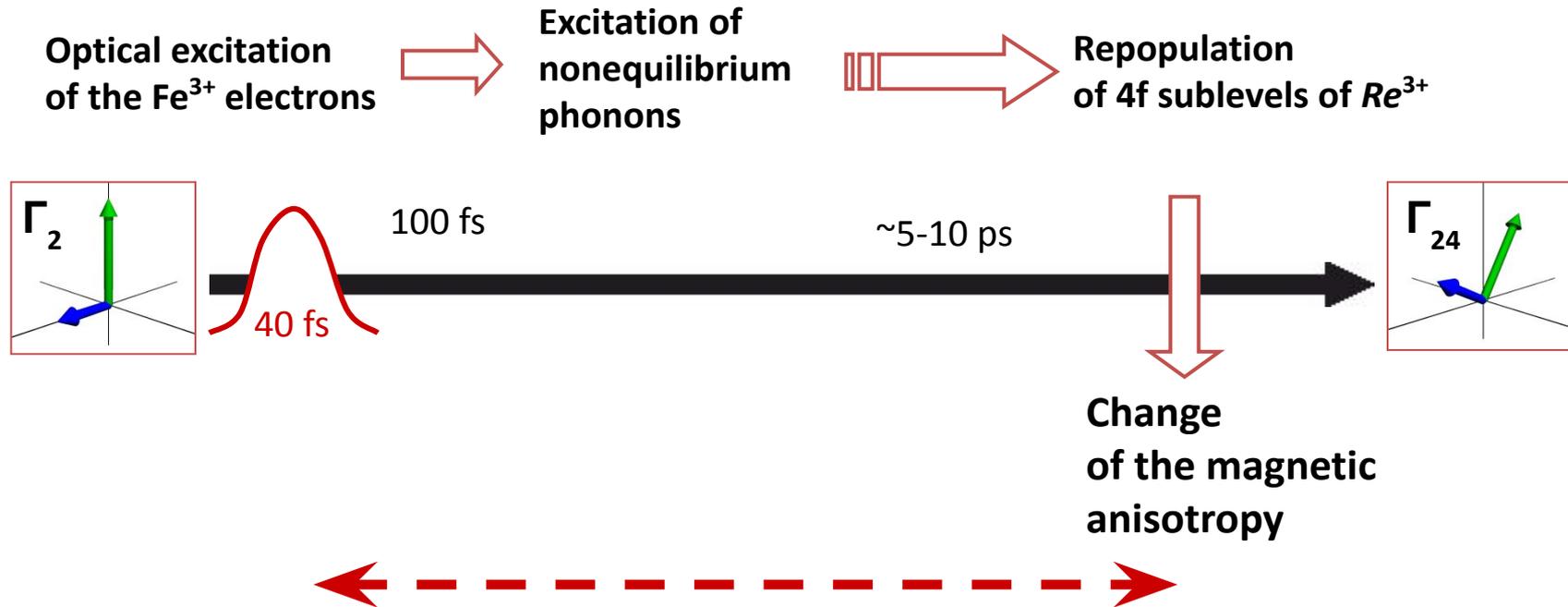
Фазовая диаграмма такого перехода определяется

- 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?

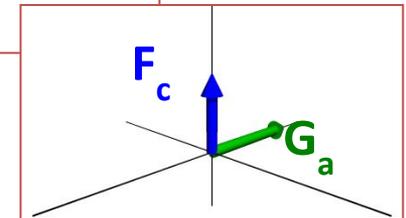
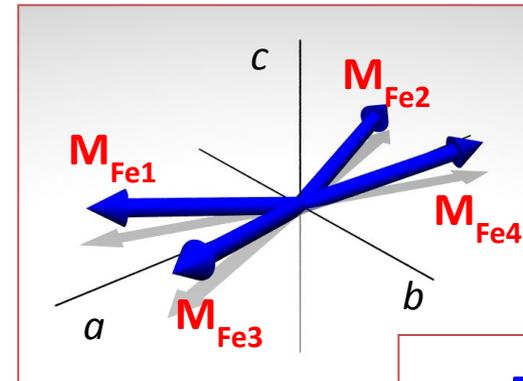
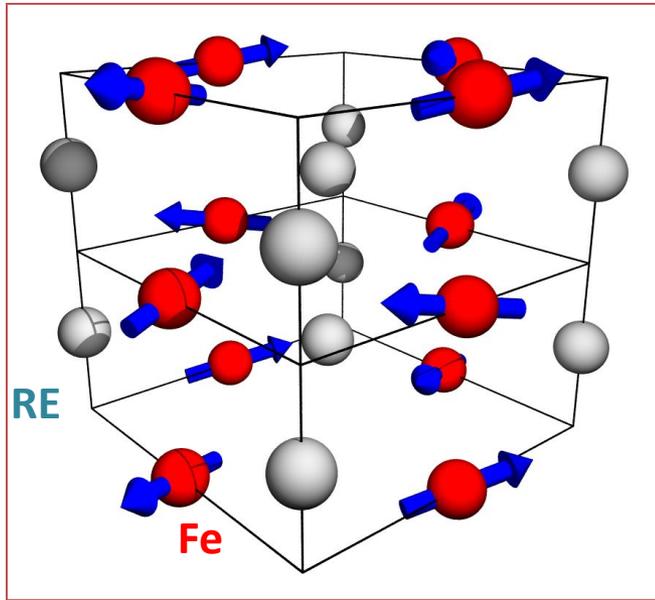
# Controlling spin dynamics by laser pulses

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

Controlling spin-reorientation phase transition  
in a dielectric REFeO<sub>3</sub>

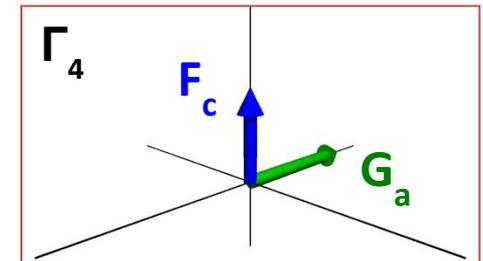
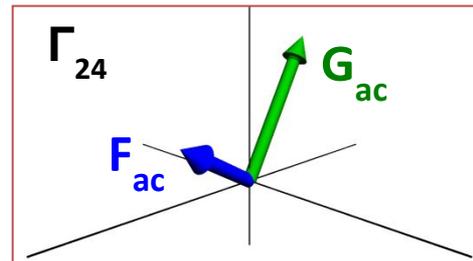
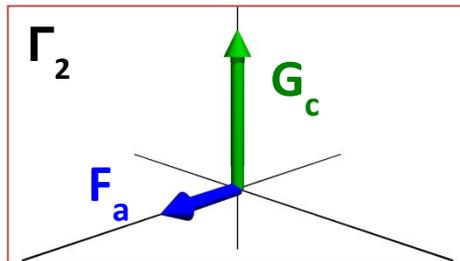
Controlling coherent and incoherent spin dynamics  
by steering the photo-induced energy flow

# Spin reorientation phase transition in REFeO<sub>3</sub>

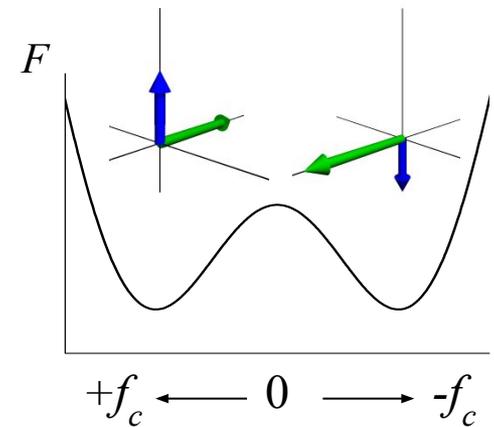
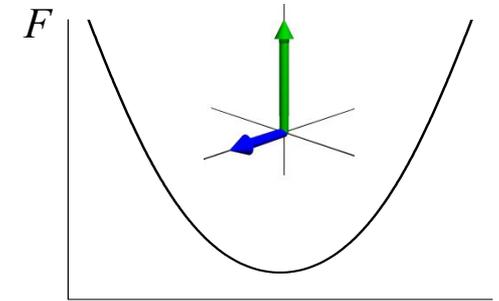
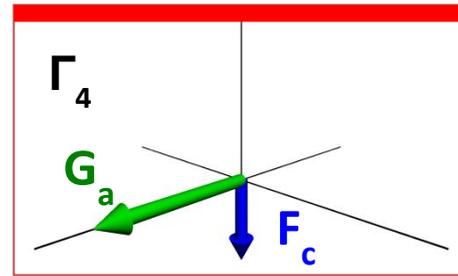
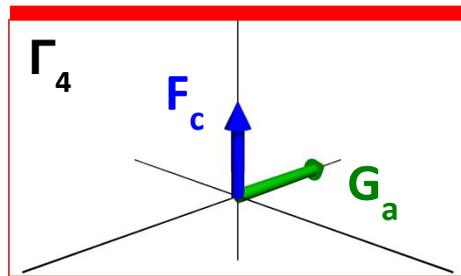
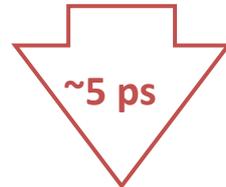
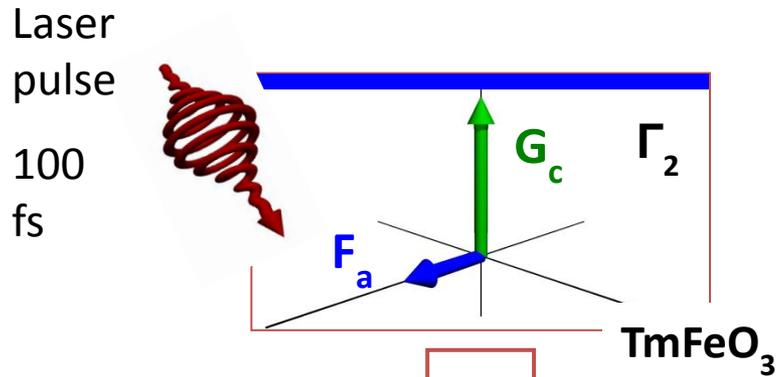


Spin reorientation (SR) phase transition

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



# Laser-induced spin-reorientation phase transition

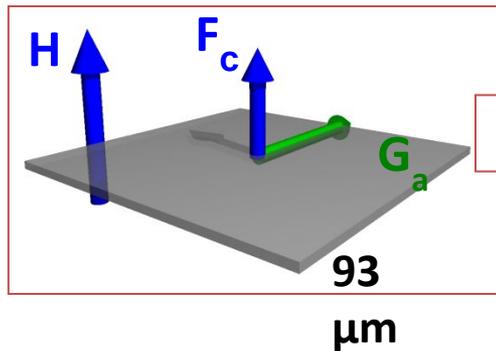


[A. V. Kimel et al., Nature (2004)]

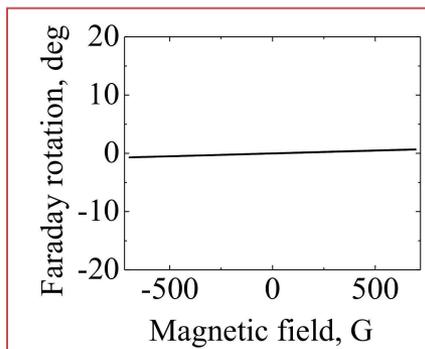
Controlling the phase transition  
by a single laser pulse alone?

How to lift the degeneracy?

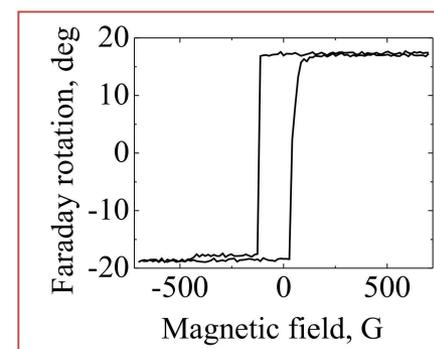
# Sample: rare-earth orthoferrite ( $\text{Sm}_{0.5}\text{Pr}_{0.5}\text{FeO}_3$ )



$T=70 \text{ K}$



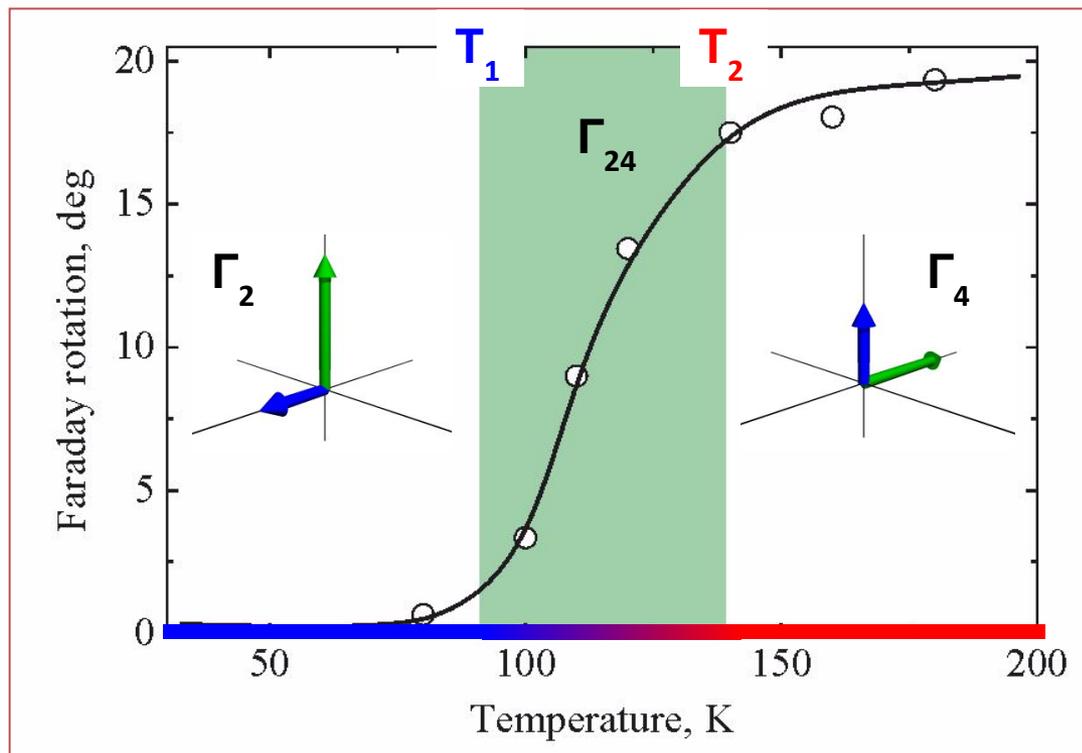
$T=180 \text{ K}$



$\sim F_c$

□ Phase transition at  
98-130 K

□ Large Faraday rotation  
 $\sim 20^\circ / 90 \mu\text{M}$



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

$\Gamma_2$

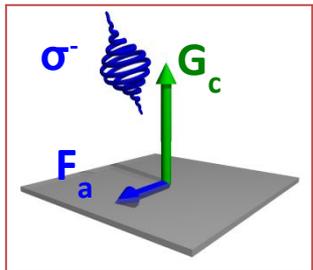
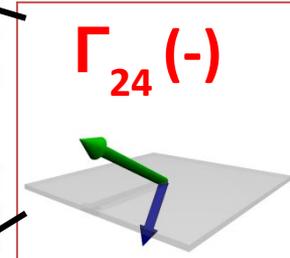
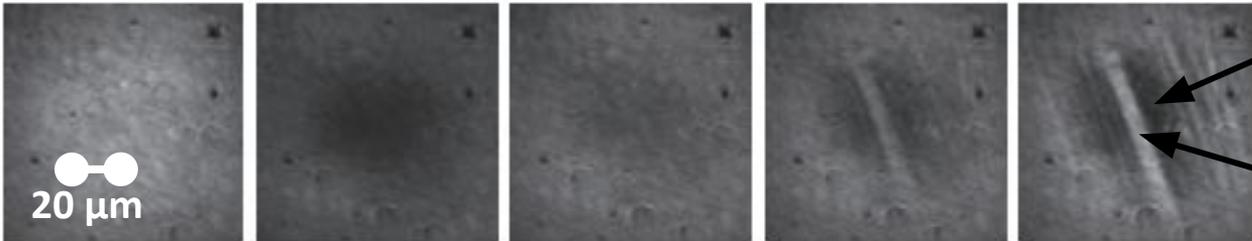
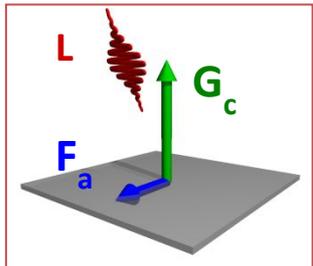
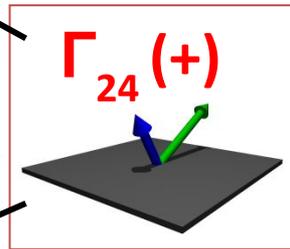
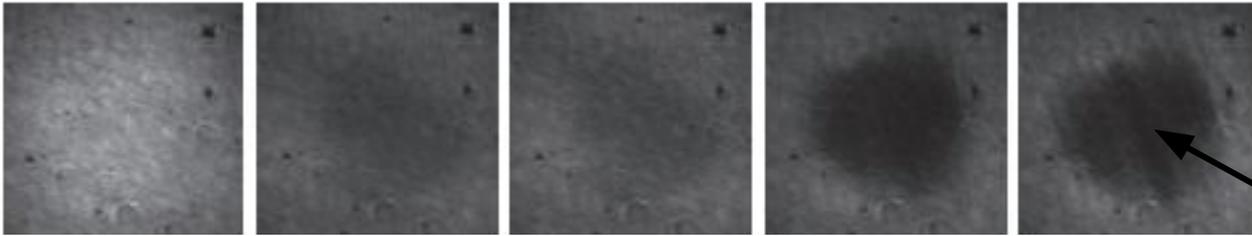
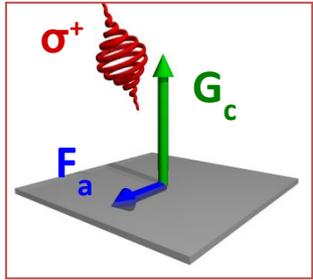
<0

0

2

5

15  $\Delta t$  (ps)

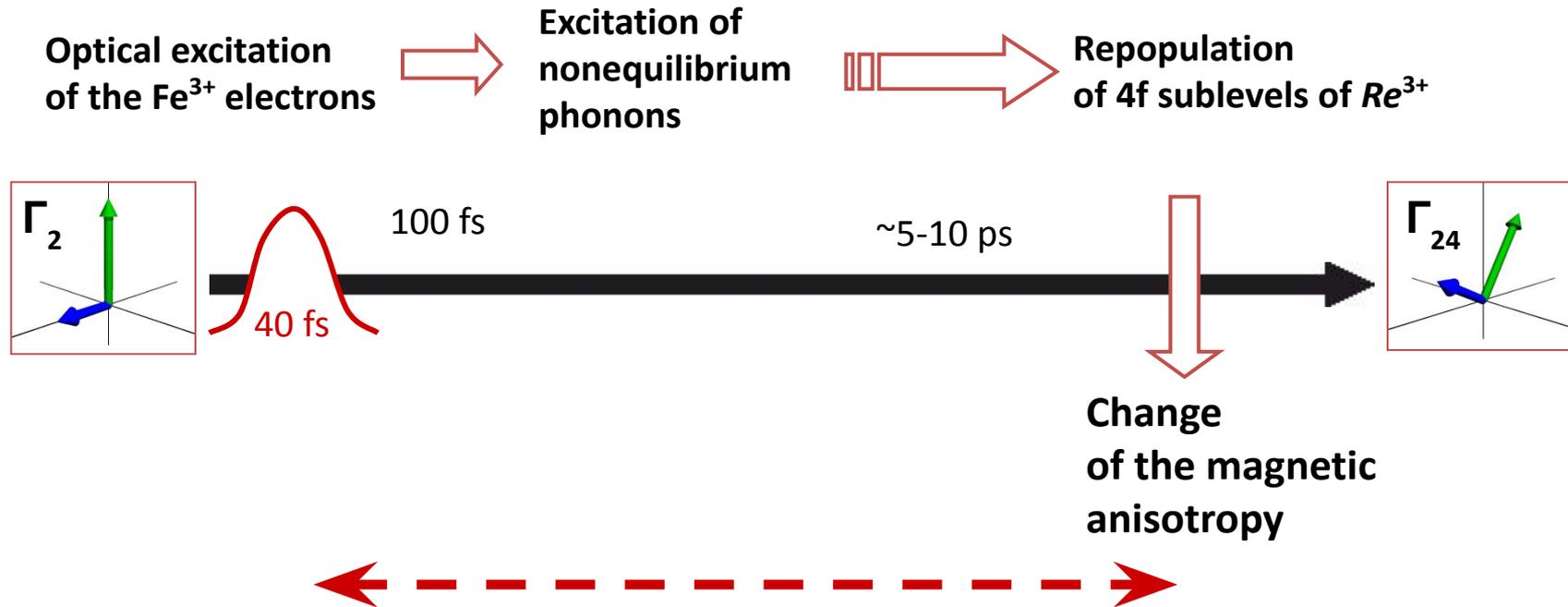


[de Jong et al., PRL (2012)]

T=90 K

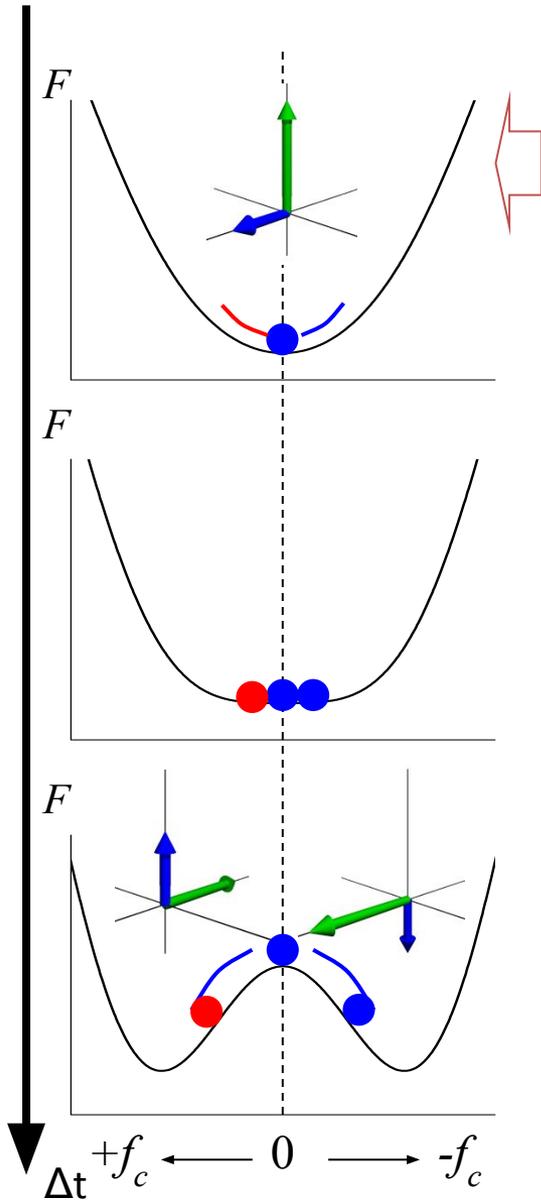
**Ultrafast laser-induced SR transition  
controlled by a laser pulse polarization alone!**

# Mechanism of the laser-induced SR transition



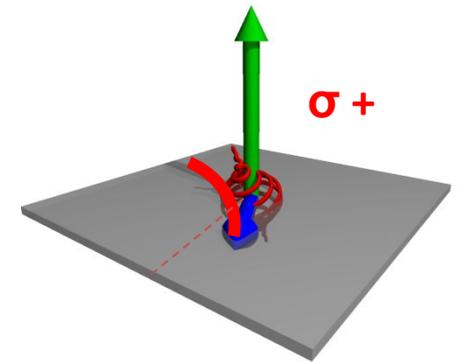
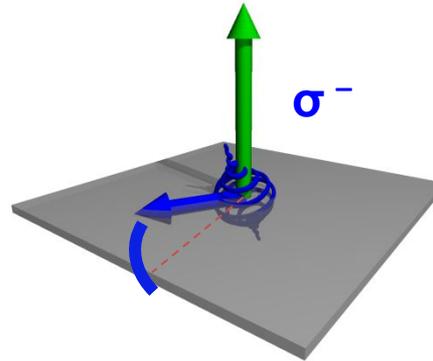
How and where the information about the laser pulse polarization is stored?

# Control of the laser-induced SR transition



## Ultrafast inverse Faraday effect

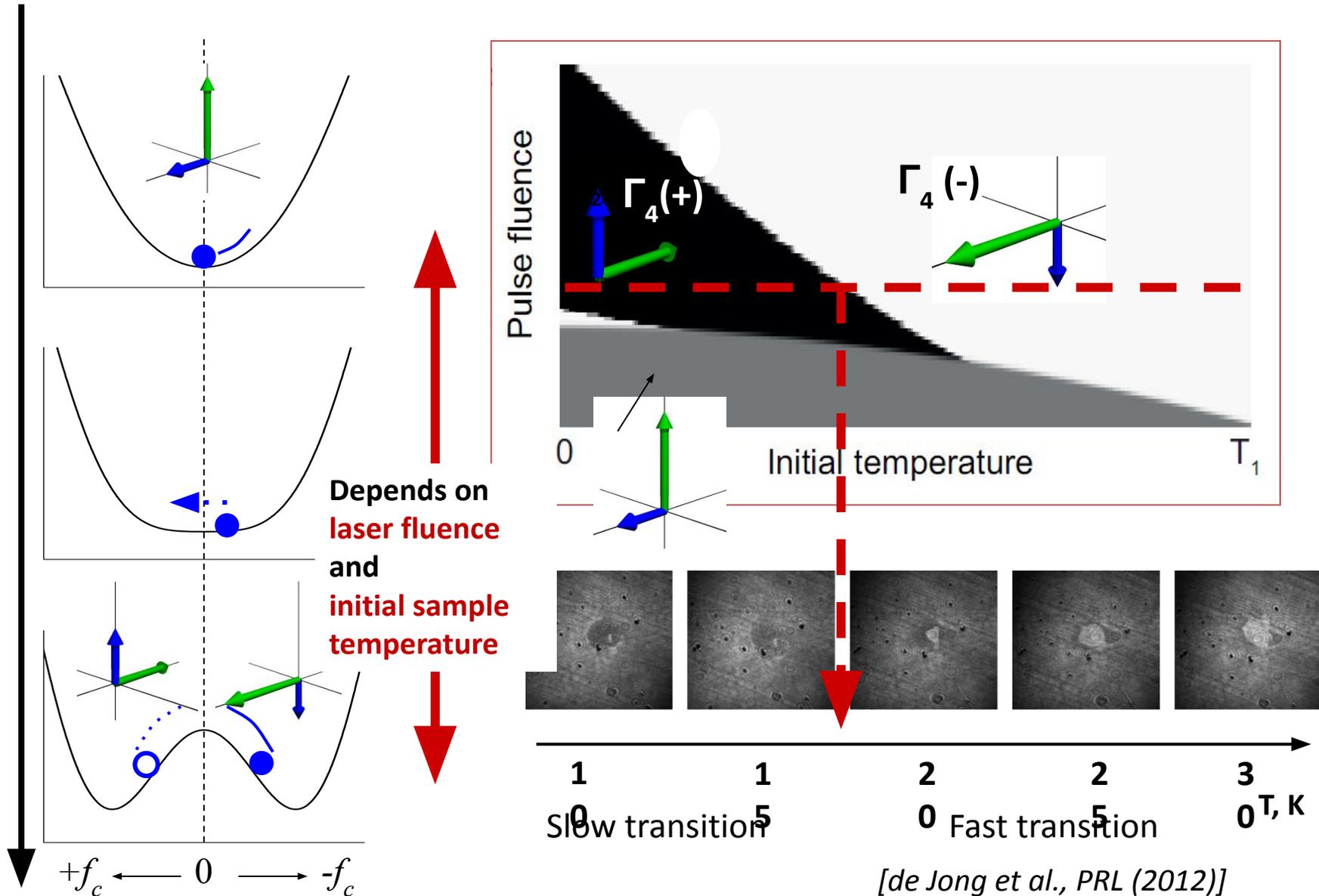
Impulsive excitation of the low amplitude magnetization precession ( $<10^\circ$ )



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 REFeO<sub>3</sub>

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

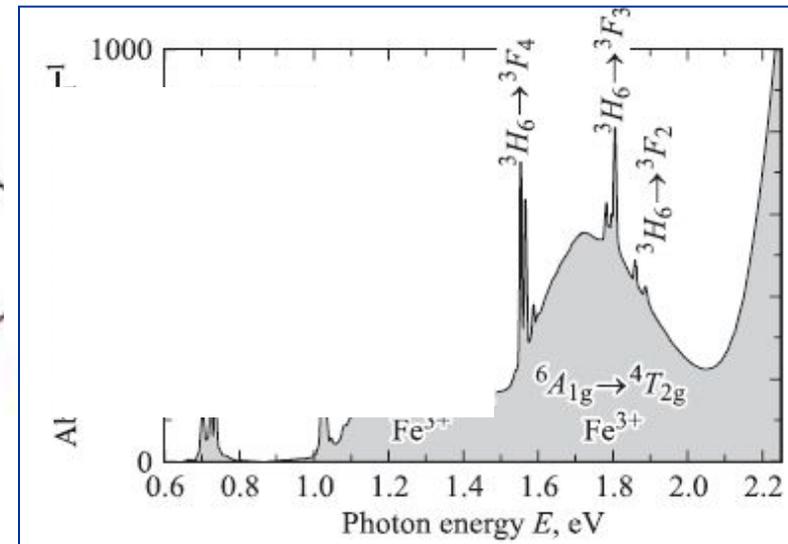
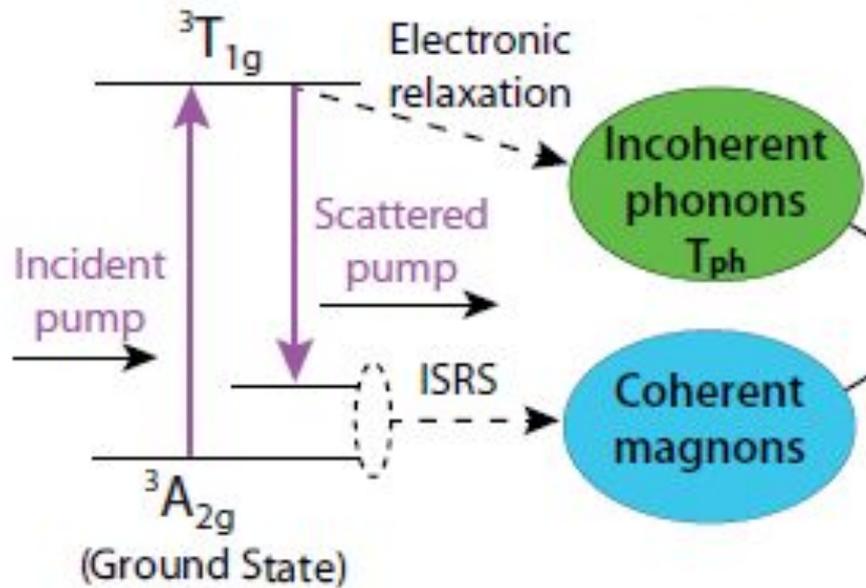
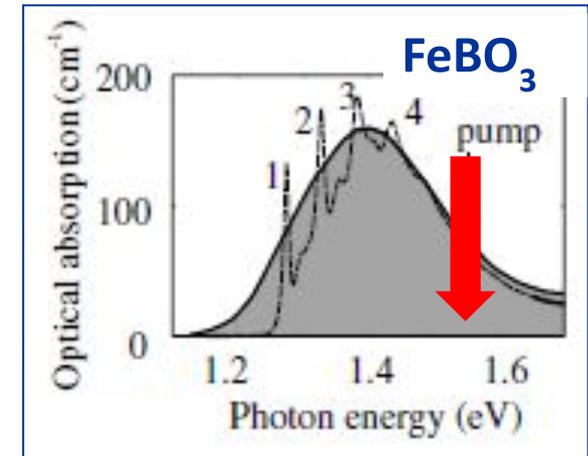
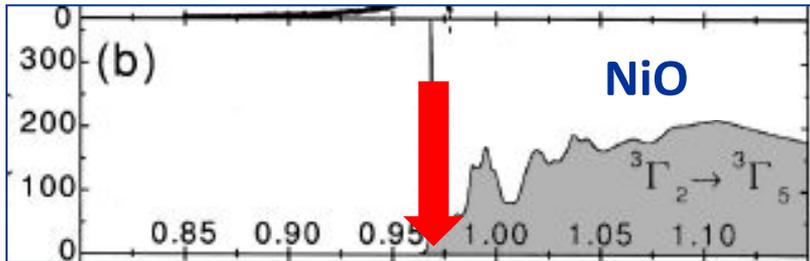
# Controlling spin dynamics by laser pulses

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

Controlling spin-reorientation phase transition  
in a dielectric REFeO<sub>3</sub>

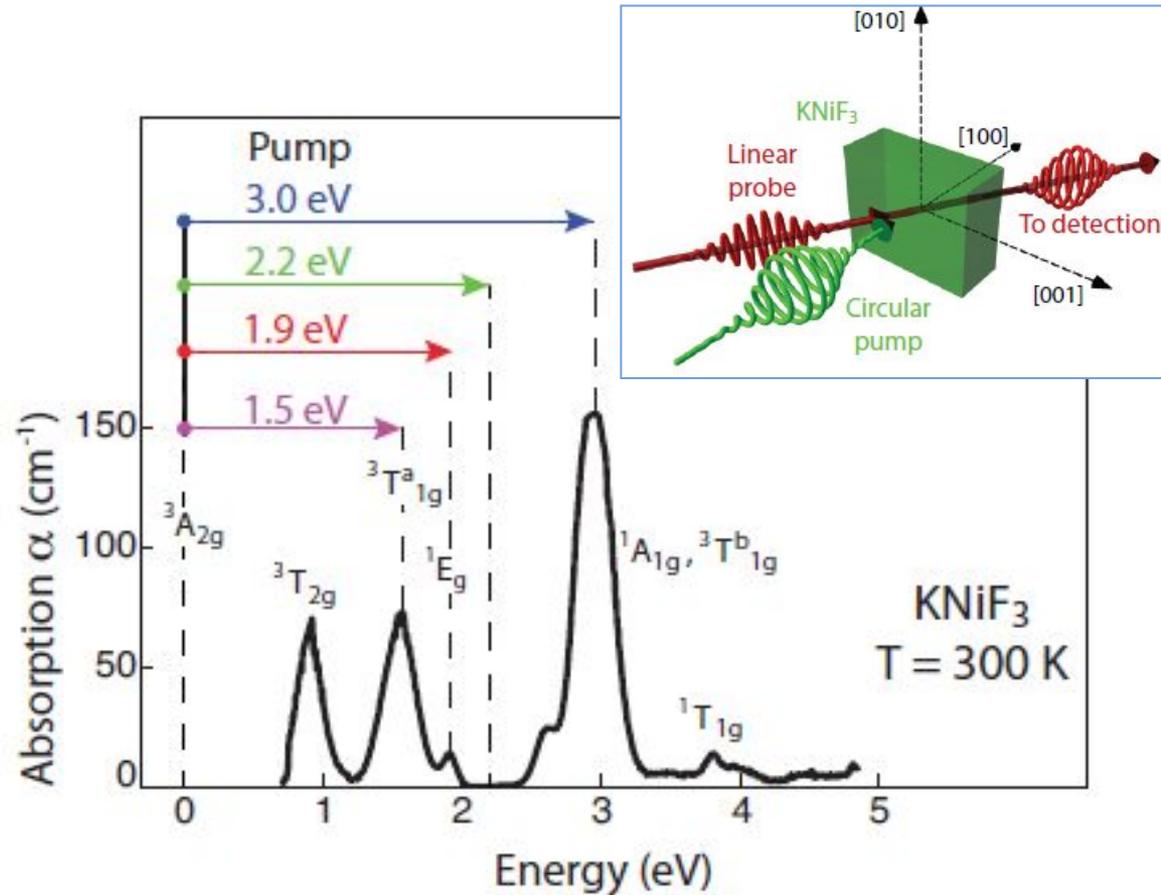
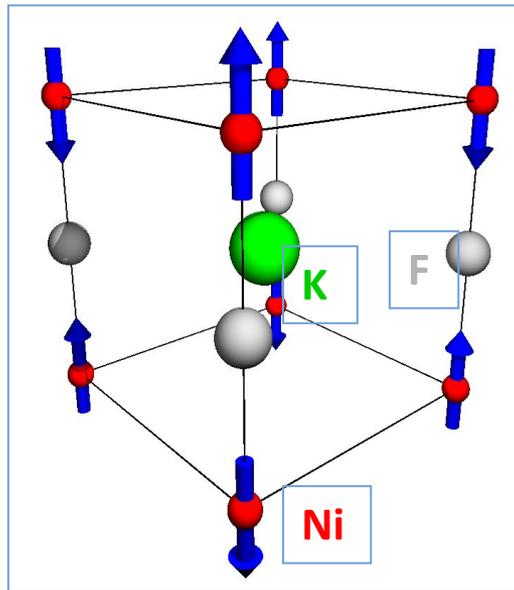
Controlling coherent and incoherent spin dynamics  
by steering the photo-induced energy flow

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



Can the optical excitation of spin system be selective?

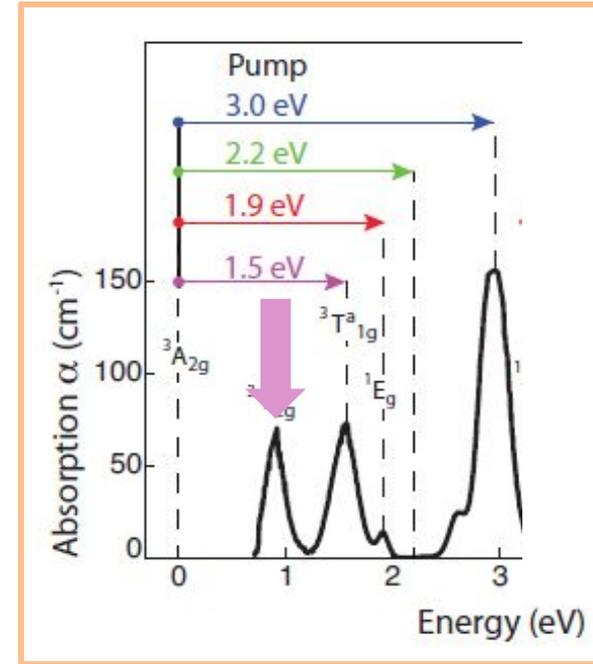
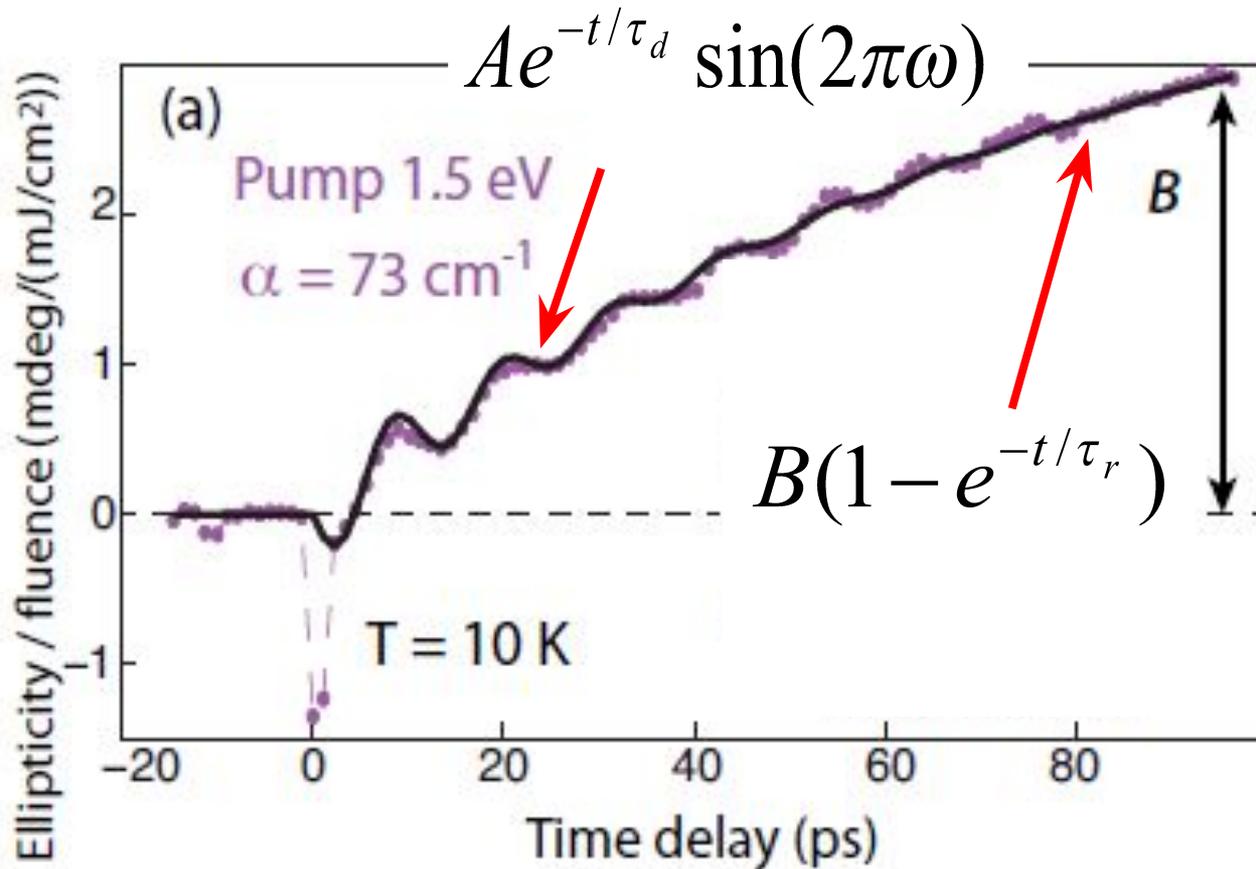
# Transparent antiferromagnet $\text{KNiF}_3$



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

[D. Bossini et al., submitted]

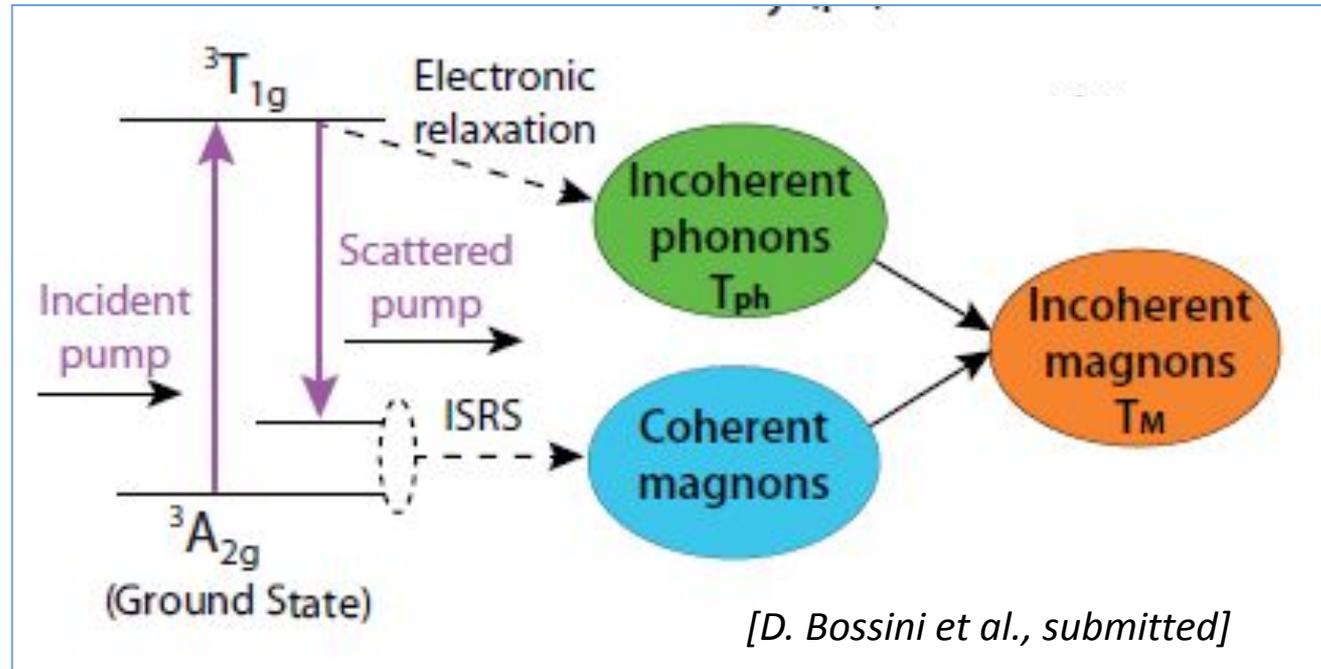
# Excitation of spin system: regime of finite absorption



$$\tau_d \neq \tau_r$$

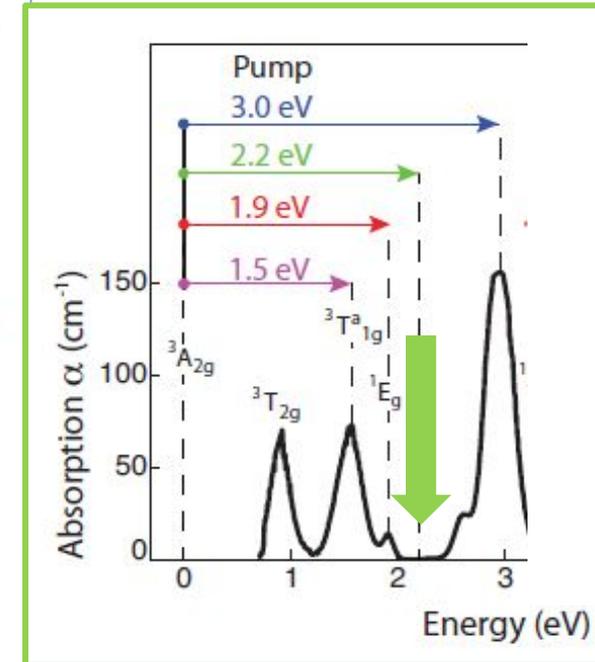
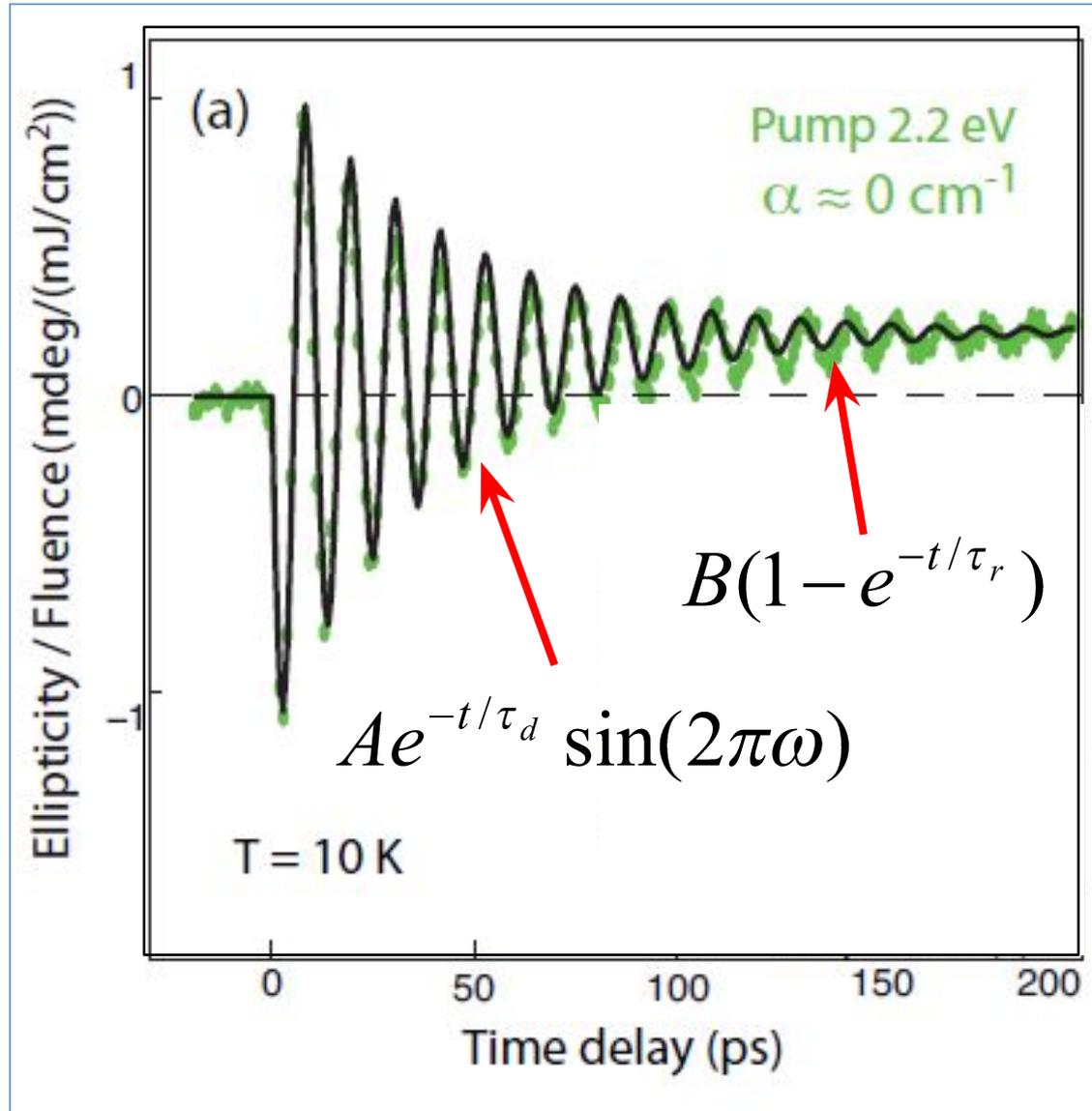
We observe two contributions:  
from coherent and incoherent magnons

# 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

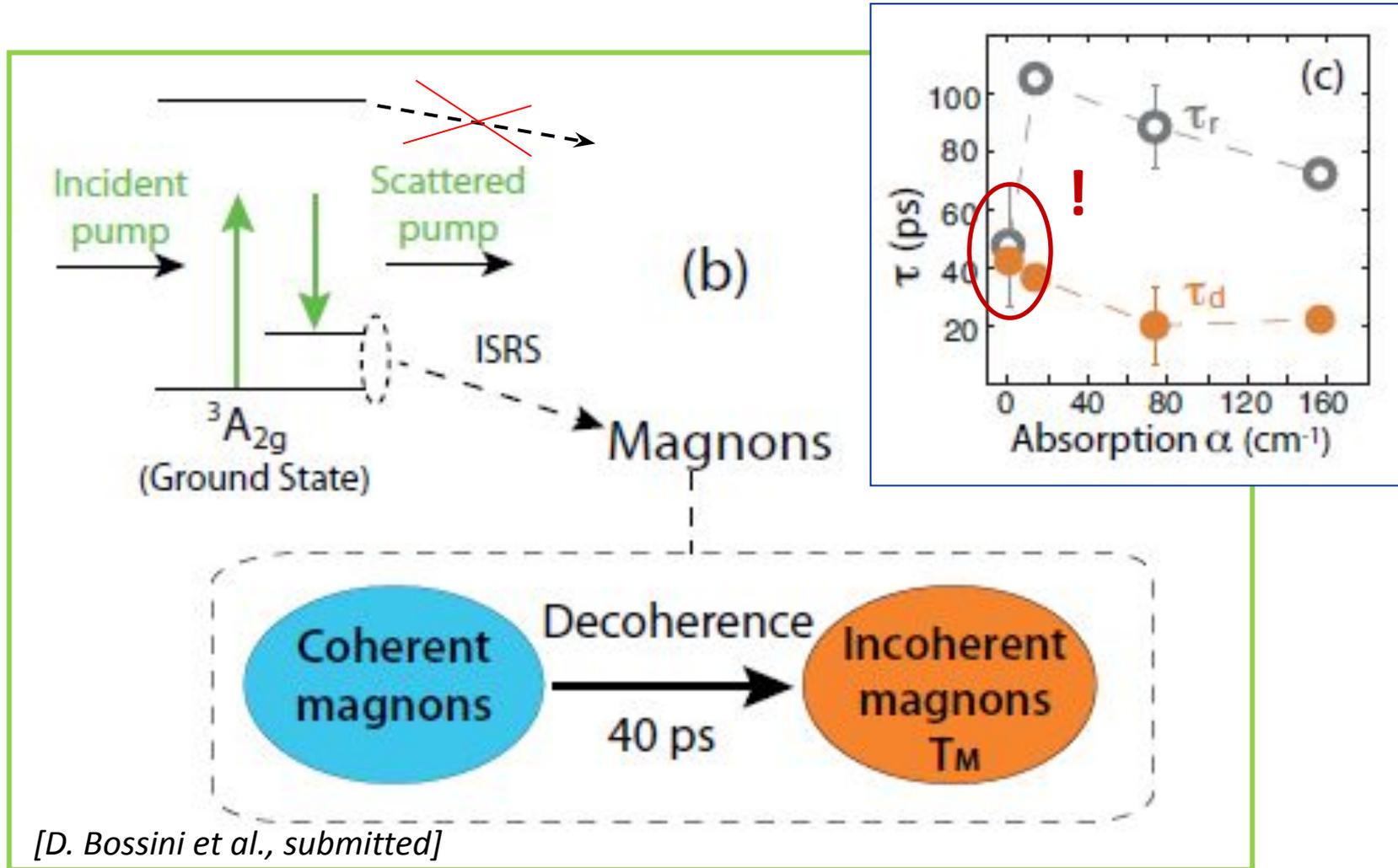
# Excitation of spin system: regime of zero-absorption



$$\tau_d \approx \tau_r$$

[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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .
- 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 (Fe<sub>64</sub>Ni<sub>36</sub>) 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.