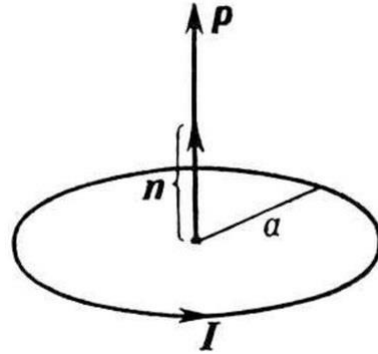


Семинар №7. Магноны.

1. Спиновые волны
2. Модель Гейзенберга
3. Магноны
4. Взаимодействие излучения с магнитоупорядоченными средами
- 5.Сверхбыстрый оптомагнетизм

Магноны – элементарные возбуждения в системе упорядоченных магнитных моментов

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}; \quad p_m = IS;$$
$$[p_m] = 1A \cdot m^2.$$



Магнитные моменты взаимодействуют через обменное и дипольно-дипольное взаимодействие .

Любые флуктуации распространяются как волны намагниченности

$$\mu = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N P_i$$

Спиновые волны - волны намагниченности в ферро-, антиферро- и ферримагнитных материалах с большими волновыми числами. Их можно рассматривать классически.

Это значит, что частиц много => статистика Бозе-Эйнштейна.

Магнитные свойства =>

~~Σ магнитные моменты ядер~~ + Σ спиновые e моменты + Σ орбитальные e моменты

малы

Электронны внутр. незаполненных
оболочек 3d, 4d, 5d, 5f

Рассмотрим механические моменты электрона

$$|p_l| = \hbar \sqrt{l(l+1)}, \quad l = 0, 1, 2, \dots$$

$$|p_s| = \hbar \sqrt{s(s+1)}, \quad s = \frac{1}{2}$$

Магнитные моменты электрона

$$|m_l| = \mu_B \sqrt{l(l+1)}$$

$$|m_s| = 2\mu_B \sqrt{s(s+1)}$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2mc} \text{ магнетон Бора}$$

Приводит к тому, что сумма магнитных моментов находится **под углом** к механическому моменту атома

Посчитаем суммарные механический и магнитный моменты

$$\vec{P}_J = \sum_n \vec{P}_{ln} + \sum_n \vec{P}_{sn} = \vec{P}_L + \vec{P}_s$$

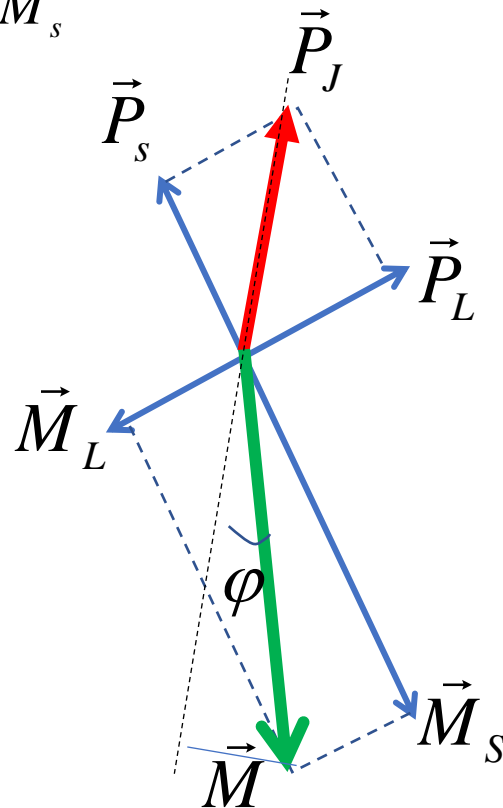
$$\vec{M}_J = \sum_n \vec{M}_{ln} + \sum_n \vec{M}_{sn} = \vec{M}_L + \vec{M}_s$$

$$|P_J| = \hbar \sqrt{J(J+1)}; J = L + S, \dots, |L - S|$$

$$\vec{P}_L \uparrow \downarrow \vec{M}_L, \quad \vec{P}_s \uparrow \downarrow \vec{M}_s$$

Суммарный магнитный момент атома находится под углом к его механическому моменту

=> Магнитный момент прецессирует вокруг механического



Энергия взаимодействия

Магнитное дипольно-дипольное взаимодействие

$$U = \frac{1}{3r^3} [(\vec{m}_1, \vec{m}_2) - 3(\vec{m}_1, \vec{e})(\vec{m}_2, \vec{e})]$$

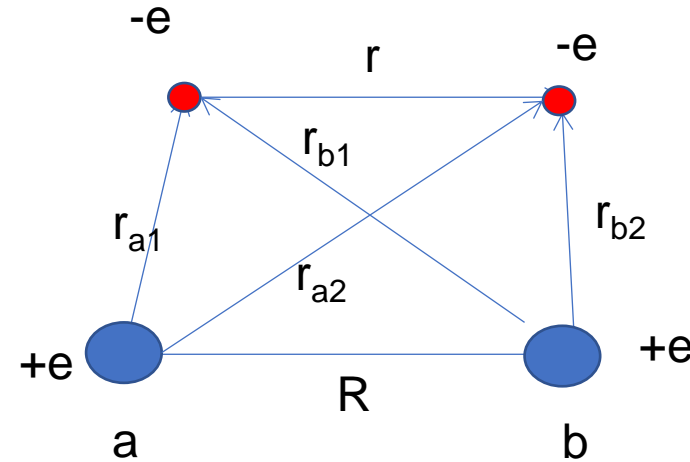
$$U \approx 1 \text{ мЭВ}$$

Обменное взаимодействие

$$U = \frac{e^2}{R} + \frac{e^2}{r} - \frac{e^2}{r_{a1}} - \frac{e^2}{r_{b1}} - \frac{e^2}{r_{a2}} - \frac{e^2}{r_{b2}}$$

$$U \approx 10 \text{ эВ}$$

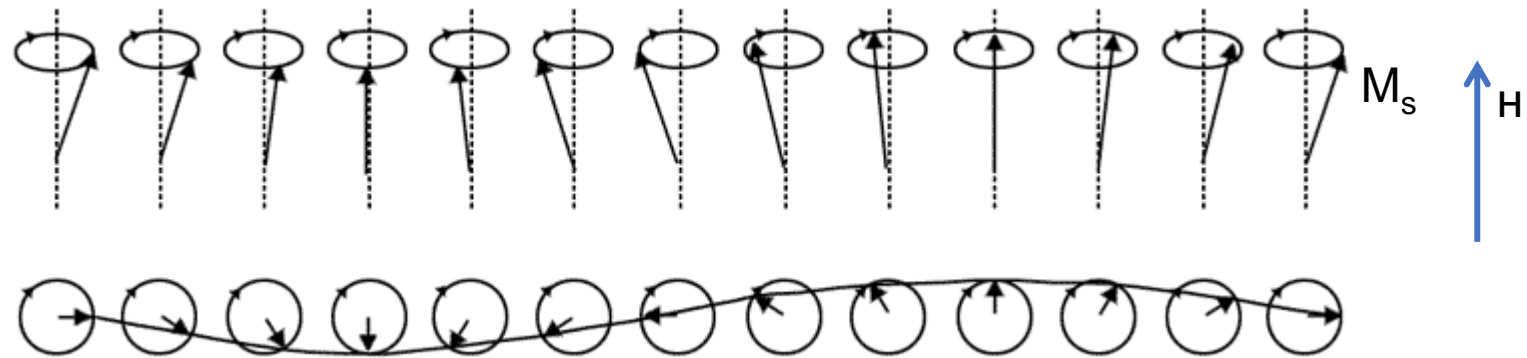
Под действием обменных сил упорядочиваются суммарные спиновые магнитные моменты, а орбитальные моменты, определяемые неспаренными электронами, могут быть ориентированы произвольно



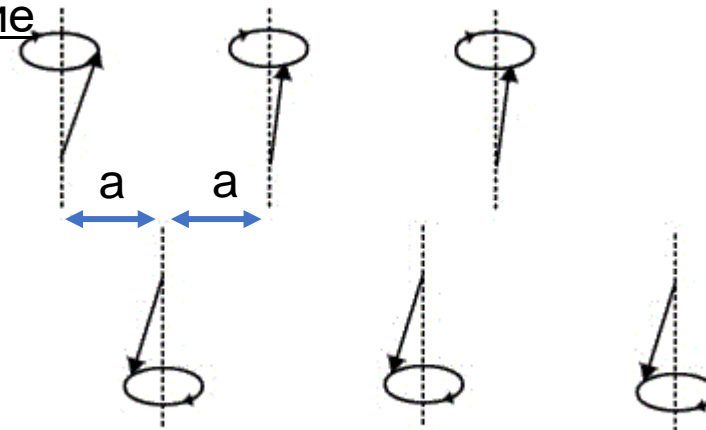
Спиновые волны – распространяющиеся колебания относительной ориентации спиновых магнитных моментов атомов в решетке.

При приложении внешних сил магнитные моменты M_s начинают прецессировать.

1. Ферромагнитное упорядочивание



2. Антиферромагнитное упорядочивание



Модель Гейзенберга

Рассмотрим линейную цепочку упорядоченных магнитных моментов M_{SH} .
В модели Гейзенберга магнитные моменты заменяются непрецессирующими векторами $M_{SH}=2N\mu_b$, N -число неспаренных электронов в атоме.

Обменная энергия 2х электронов $-2AS_iS_j$, A -обменный интеграл (обменное вз-ие)

Всех электронов
$$U = -2A \sum_{i,j}^N s_i s_j$$

Ограничимся взаимодействием ближайших соседей

$$\begin{aligned} U &= -2As_{p-1}s_p - 2As_p s_{p+1} = -2As_p(s_{p-1} + s_{p+1}) = \\ &= -M_p \left(-\frac{A}{\mu_B} \right) (s_{p-1} + s_{p+1}) = -M_p H_{eff} \end{aligned}$$

H_{eff} – эффективное магнитное поле,

действ. на магн. моменты

Далее запишем уравнения движения, описывающие динамику моментов импульсов во времени.

$$\frac{d\vec{P}_s}{dt} = \vec{M}_{\text{внеш}}$$

$$\frac{d\vec{P}_s}{dt} = \hbar \frac{d\vec{s}_p}{dt} = [\vec{M}_p, \vec{H}_{\text{eff}}] = -2\mu_b [\vec{s}_p, \vec{H}_{\text{eff}}]$$

$$\frac{d\vec{s}_p}{dt} = \frac{2A}{\hbar} \left([\vec{s}_p, \vec{s}_{p-1}] + [\vec{s}_p, \vec{s}_{p+1}] \right)$$

Приближение: $s_p^x, s_p^y \ll |s|$
 $s_p^z \approx |s|$

$$\frac{ds_p^x}{dt} = -\frac{2A|s|}{\hbar} (2s_p^y - s_{p-1}^y - s_{p+1}^y)$$

$$\frac{ds_p^y}{dt} = -\frac{2A|s|}{\hbar} (2s_p^x - s_{p-1}^x - s_{p+1}^x)$$

$$\frac{ds_p^z}{dt} = 0$$

Ищем решения в виде бегущих волн

$$s_p^x = U e^{-i(\omega t - kpa)}$$

$$s_p^y = V e^{-i(\omega t - kpa)}$$

$$\begin{vmatrix} i\omega & \frac{4A|S|}{\hbar}(1 - \cos ka) \\ -\frac{4A|S|}{\hbar}(1 - \cos ka) & i\omega \end{vmatrix} = 0 \quad \omega_s = \frac{4A|S|}{\hbar}(1 - \cos ka)$$

С внешним магнитным полем увеличивается жесткость системы, а значит и частота на величину $M_z H = 2\mu_B |S| H = E_0$

$$\hbar\omega_s = E_0 + 4A|S|(1 - \cos ka)$$

Антиферромагнетики $U = +2A \sum_{i,j}^N s_i s_j$

$$\hbar \omega_s = 4A|S| |\sin ka|$$

Квантование энергии спиновой волны:

$$E_k = m_k \hbar \omega_k$$

$$m_k = N \frac{u_k^2}{2|S|}$$

u_k – компонента спина $\perp z$

$$M^* = \left(\frac{\partial^2 E}{\partial p^2} \right)^{-1} \text{ – эффективная масса магнонов}$$

Как возбуждать? Как наблюдать?

Обзор: А.М. Калашникова, А.В. Кимель, Р.В. Писарев «Сверхбыстрый оптомагнетизм», УФН, 185, 1064 (2015)
<http://school.lpi.ru/arx/14/proceedings/kalashnikova.pdf>

Тип магнитного упорядочивания играет решающую роль во взаимодействии с электромагнитным излучением.

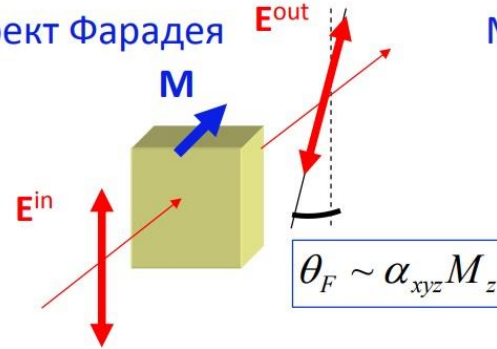
Введем намагниченности подрешеток M_1 и M_2

Ферромагнитный вектор $\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2$

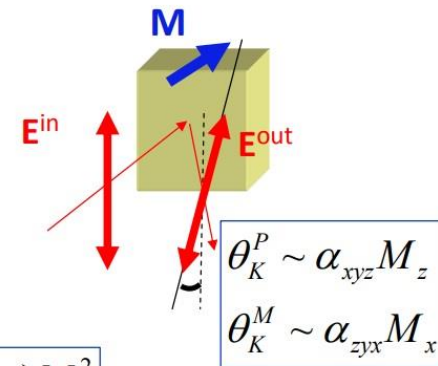
Антиферромагнитный вектор $\vec{L} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2$

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

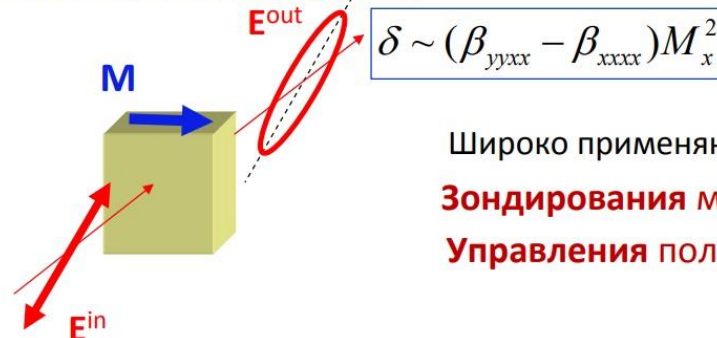
Эффект Фарадея



Магнитооптические эффекты Керра



Эффект Фохта (Котона-Мутона)

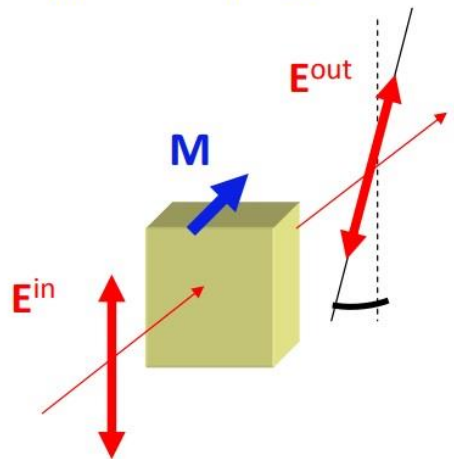


Широко применяются для

Зондирования магнитного состояния

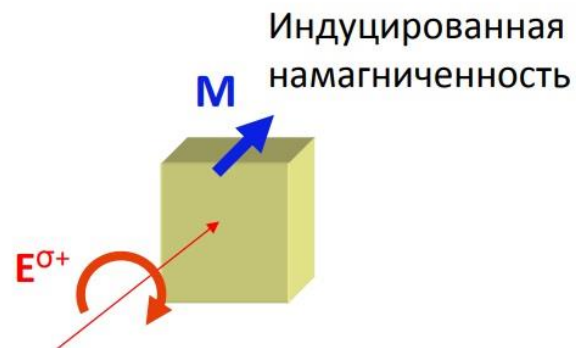
Управления поляризацией света

Эффект Фарадея



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

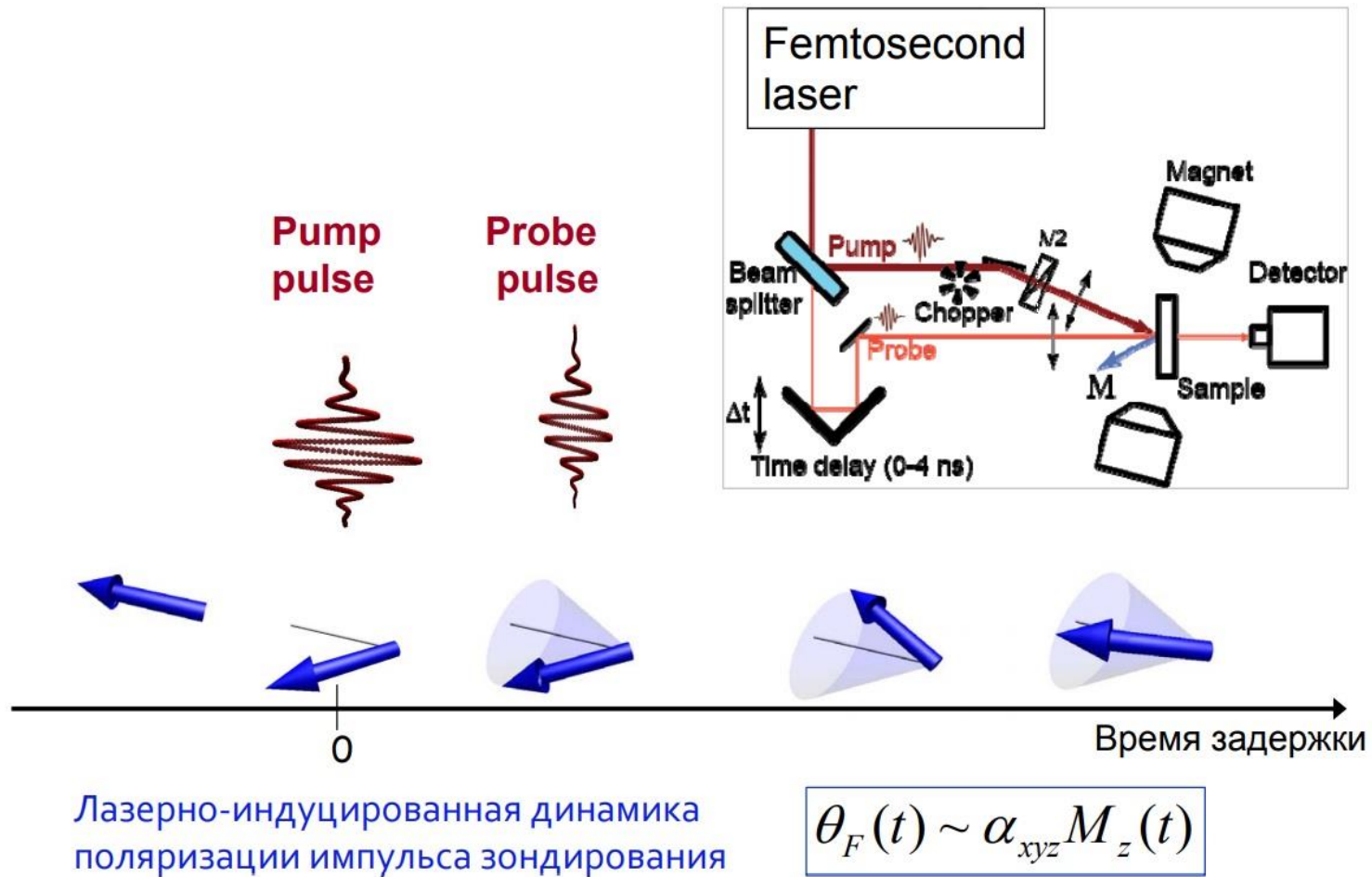
Обратный эффект Фарадея



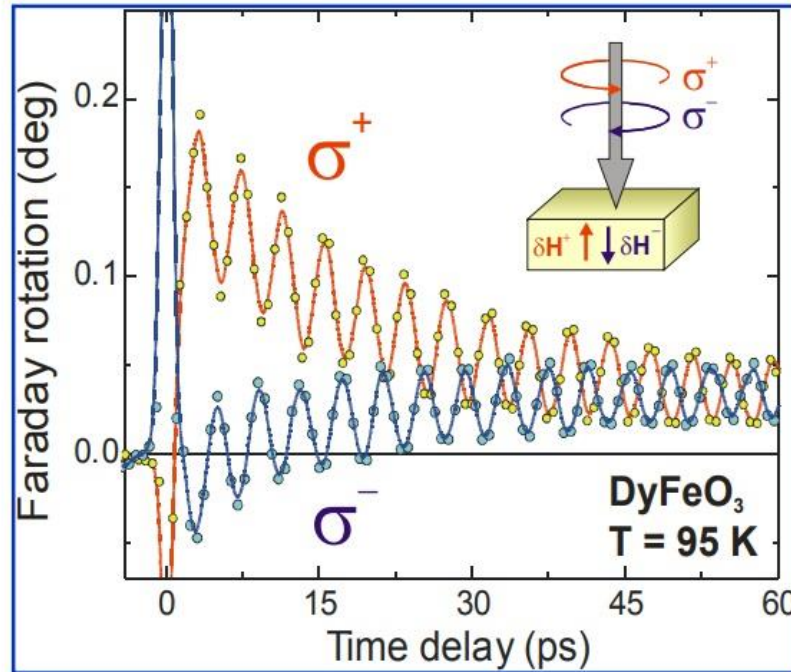
$$M_z \sim \alpha_{xyz} \mathbf{E} \times \mathbf{E}^*$$

Отклик магнитоупорядоченной среды
на фемтосекундный лазерный импульс?

Как исследовать лазерно-индуцированную динамику намагниченности?



Слабый ферромагнетик DyFeO₃

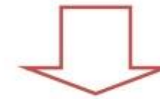


[A. V. Kimel et al., *Nature* **435**, 655 (2005)]

Импульс лазерно-
индуцированного
эффективного
магнитного поля

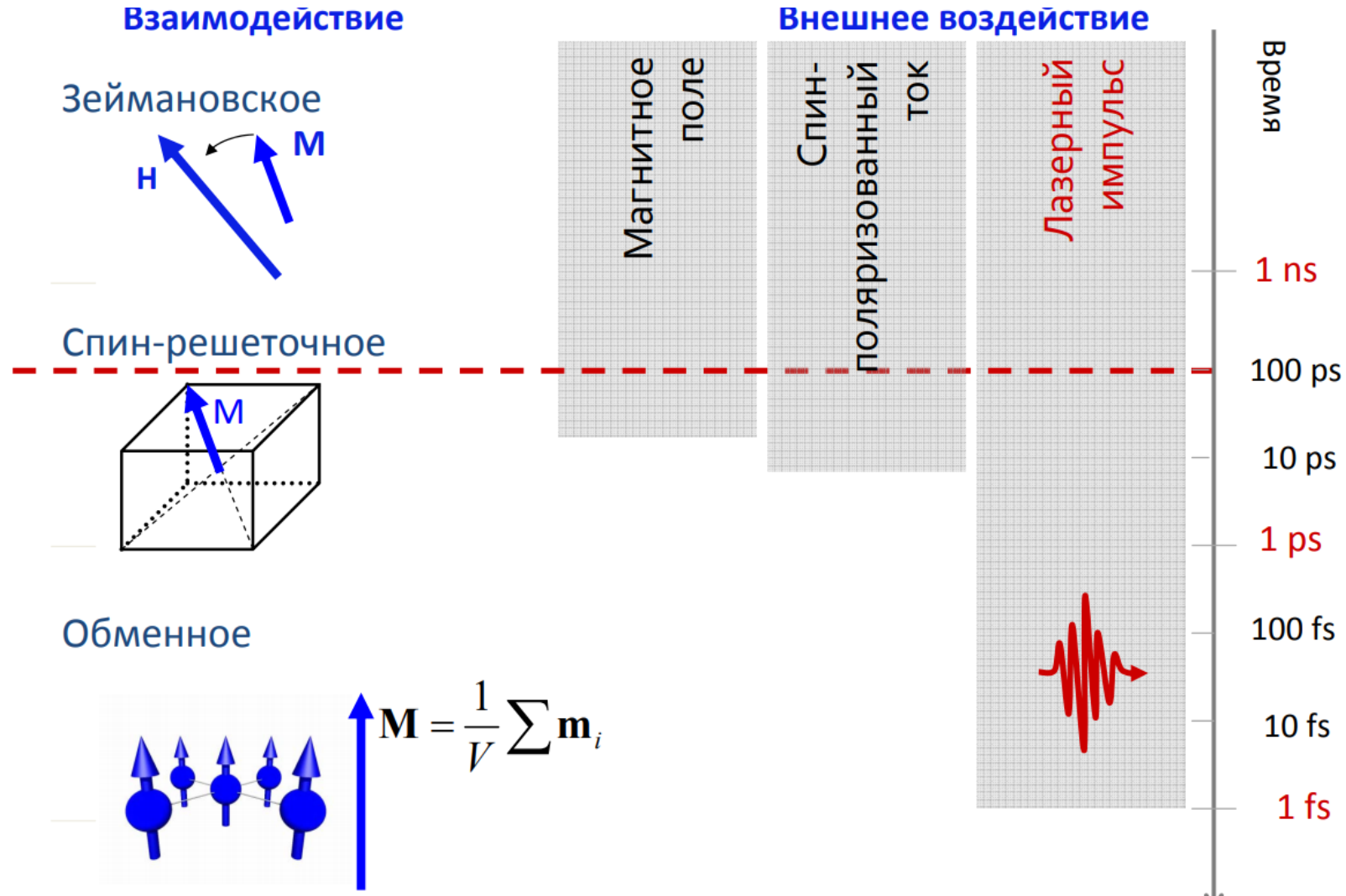
$$H_z \sim i\alpha_{xyz} (E_x E_y^* - E_y E_x^*)$$

Сверхбыстрый
обратный эффект Фарадея

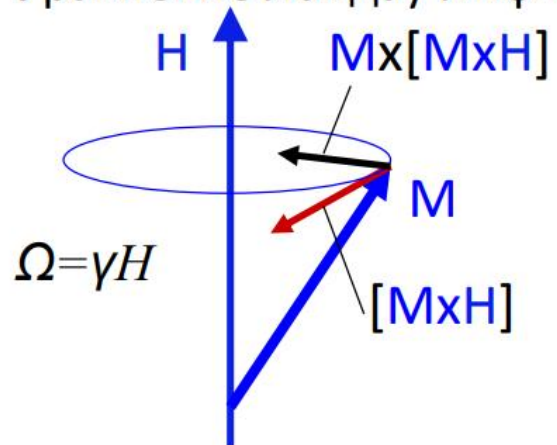


Возбуждение прецессии
намагниченности
и управление начальной фазой

Сверхбыстрый оптомагнетизм



Уравнение Ландау-Лифшица

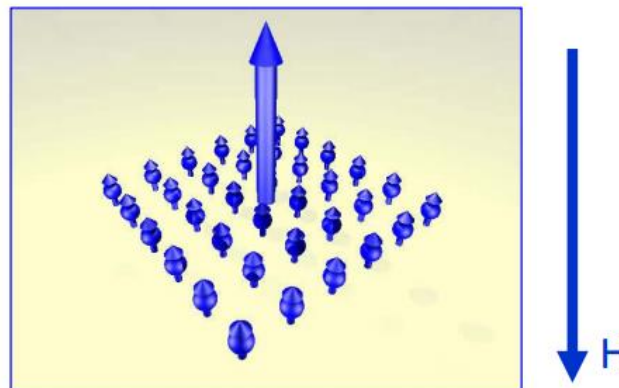


$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma [\vec{H}_{\text{эфф}} \cdot \vec{M}]$$

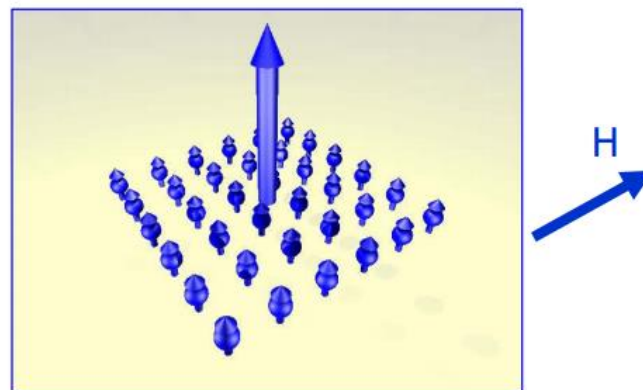
\vec{M} – намагниченность

$H_{\text{эфф}}$ – эффективное поле

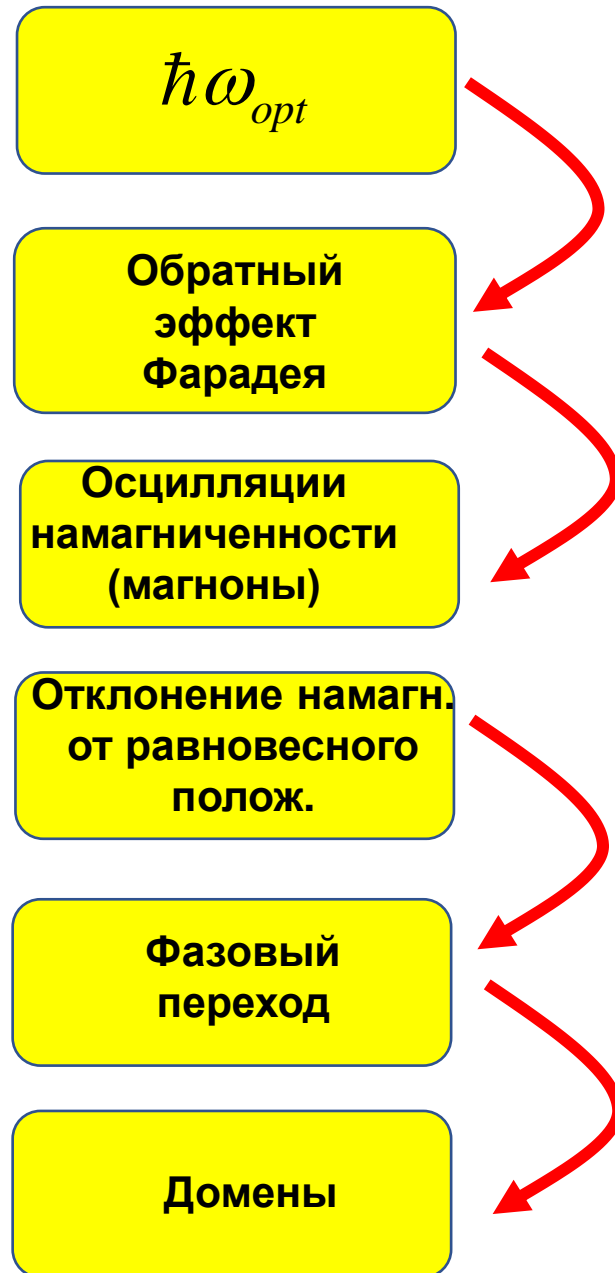
γ – гиромагнитное отношение

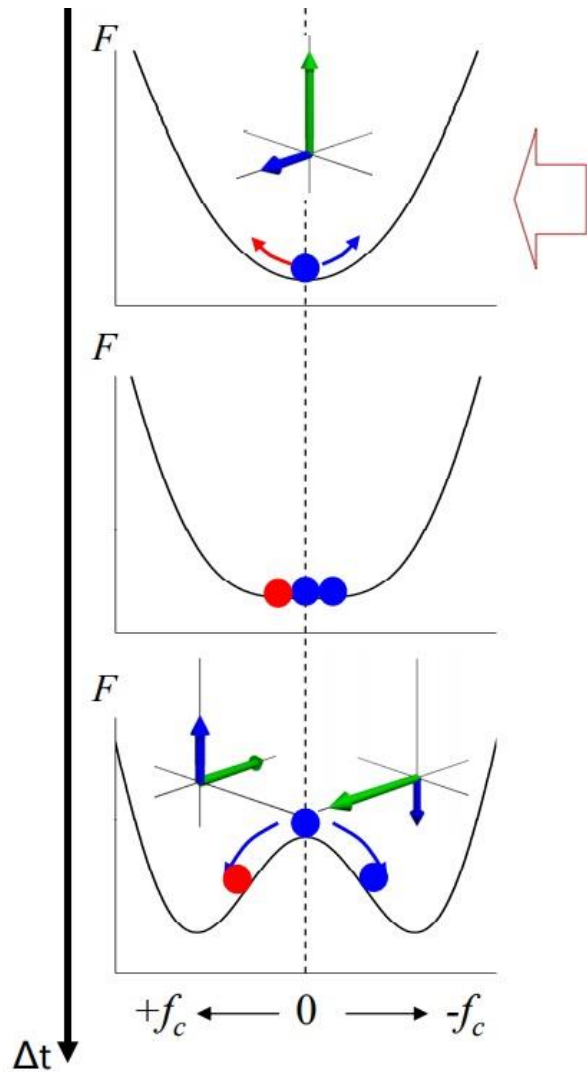


Характерное время - наносекунды



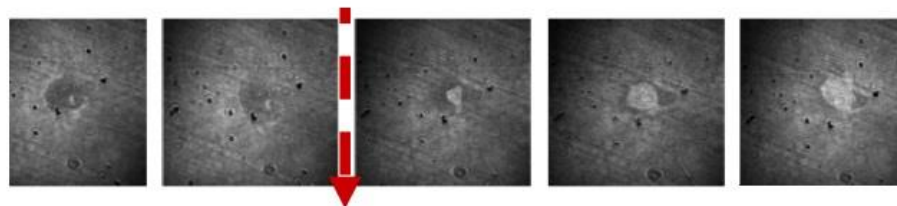
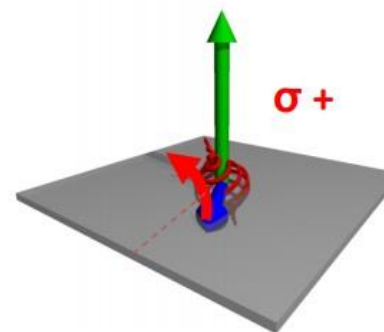
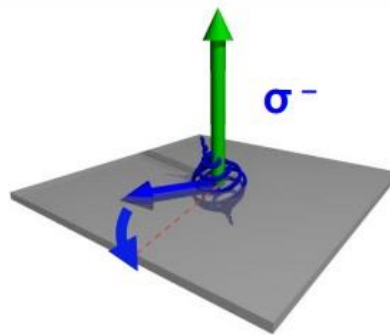
Лазерно-индуцированные фазовые переходы





Сверхбыстрый обратный эффект Фарадея

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



Лазерно-управляемая переполаризация домена!

Спасибо за внимание!