



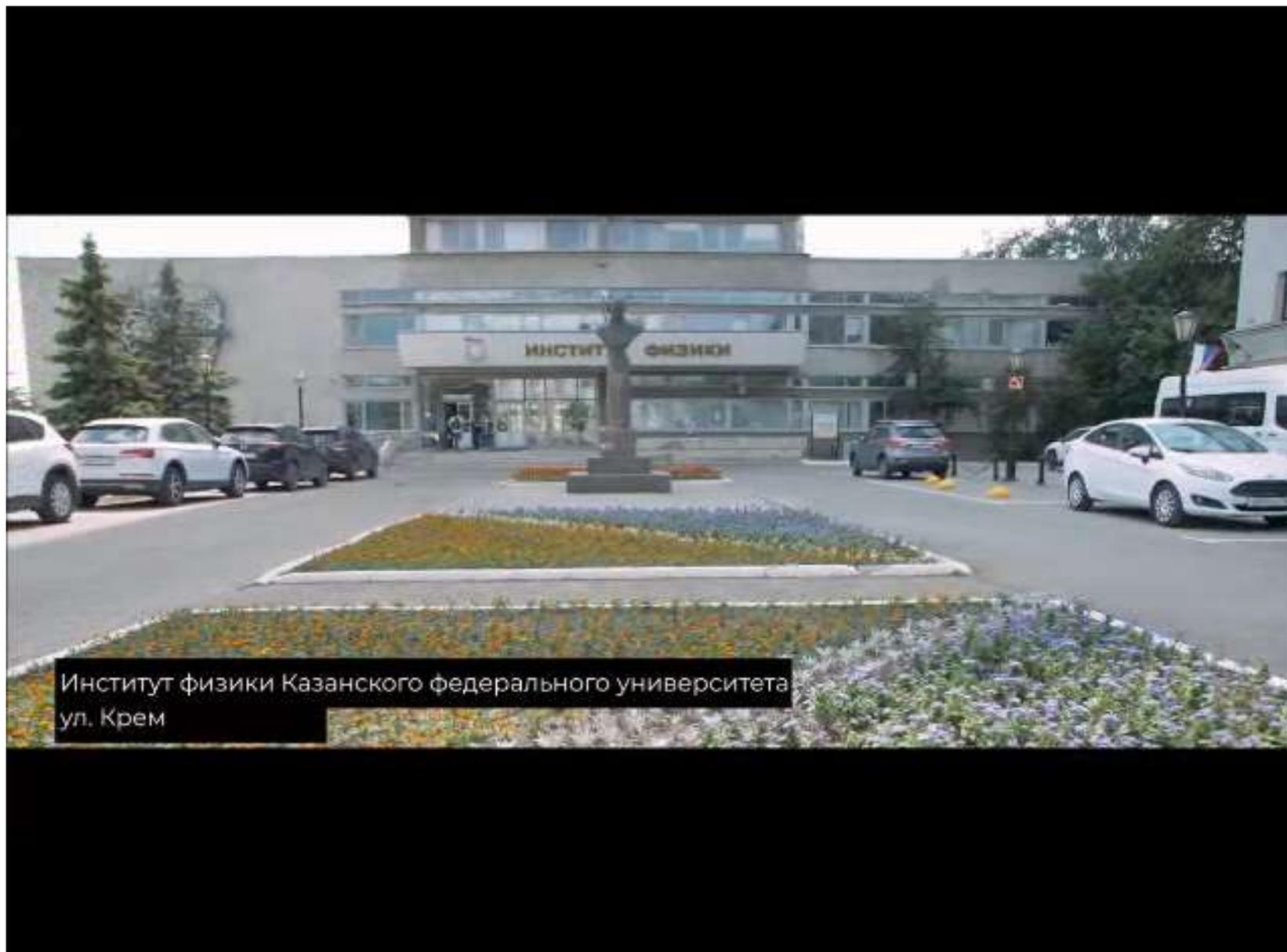
НУГ «Низкотемпературная магнитно-резонансная спектроскопия»



семинар 2/10/2024

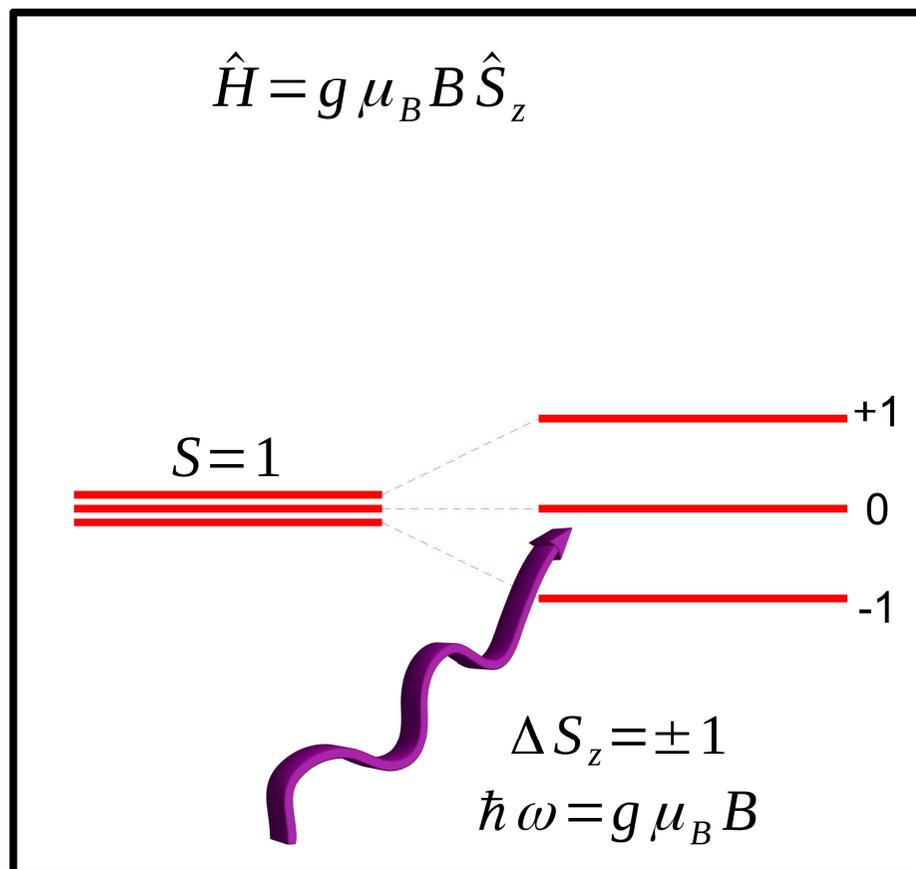
В.Н.Глазков

«Электронный магнитный резонанс в физике:
история и перспективы»



Институт физики Казанского федерального университета
ул. Крем

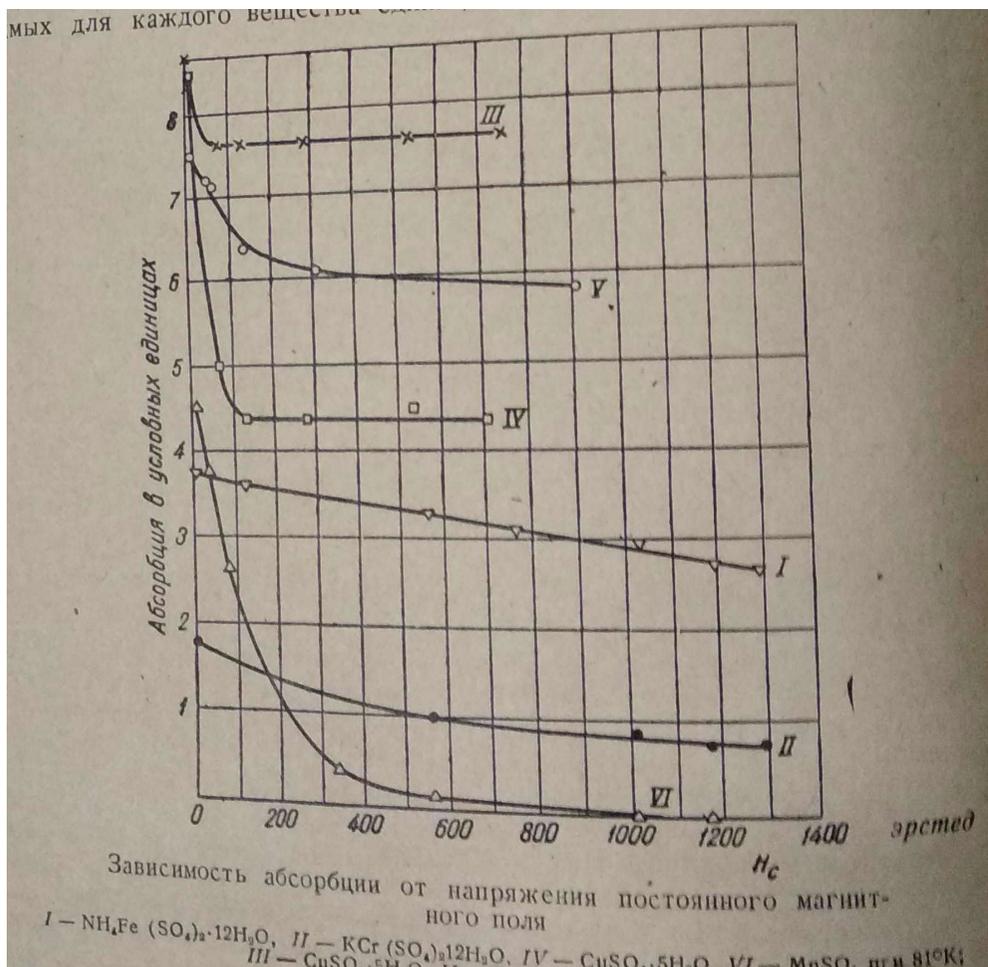
«Классический» ЭПР: резонанс



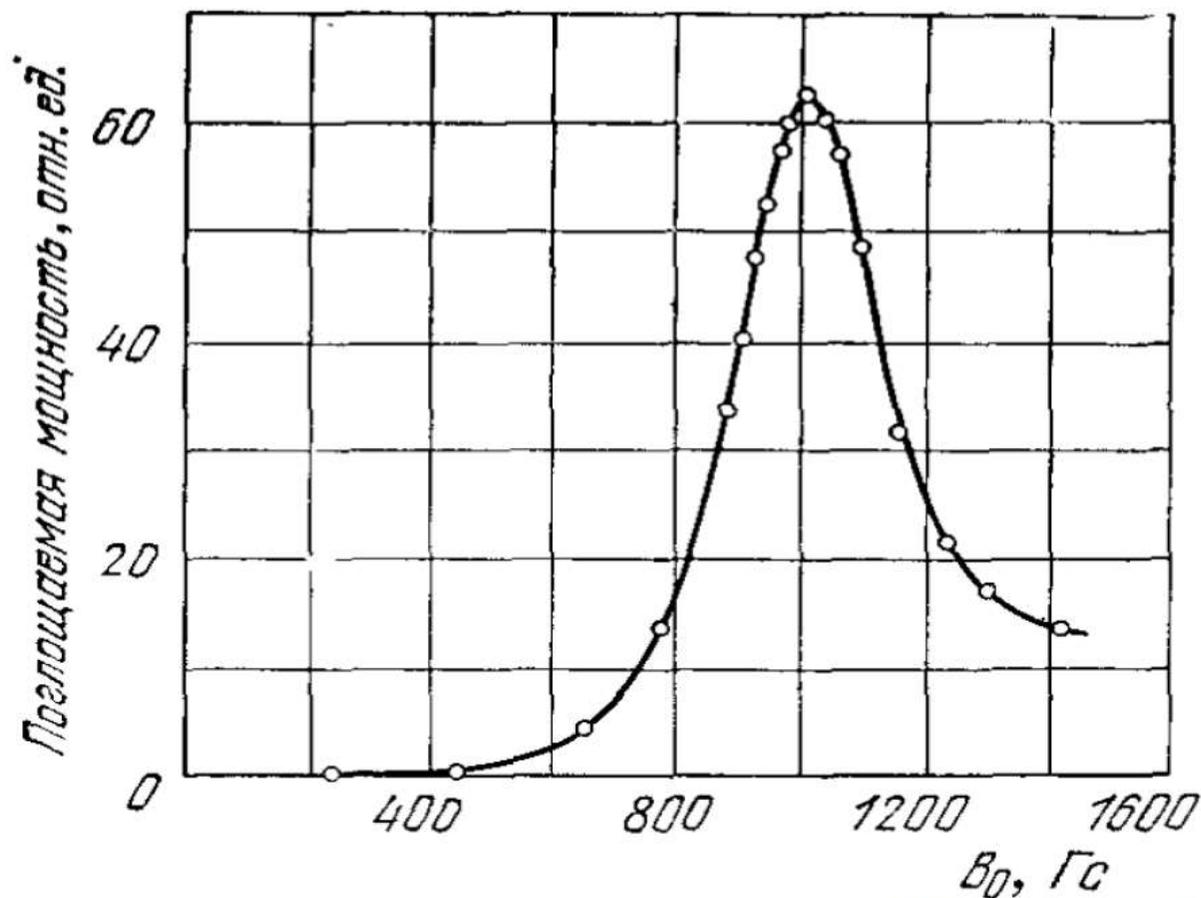
Как все начиналось...

ЖЭТФ т.14 стр. 407 (1944)

$\lambda = 8.5 \text{ м} (\approx 50 \text{ МГц})$

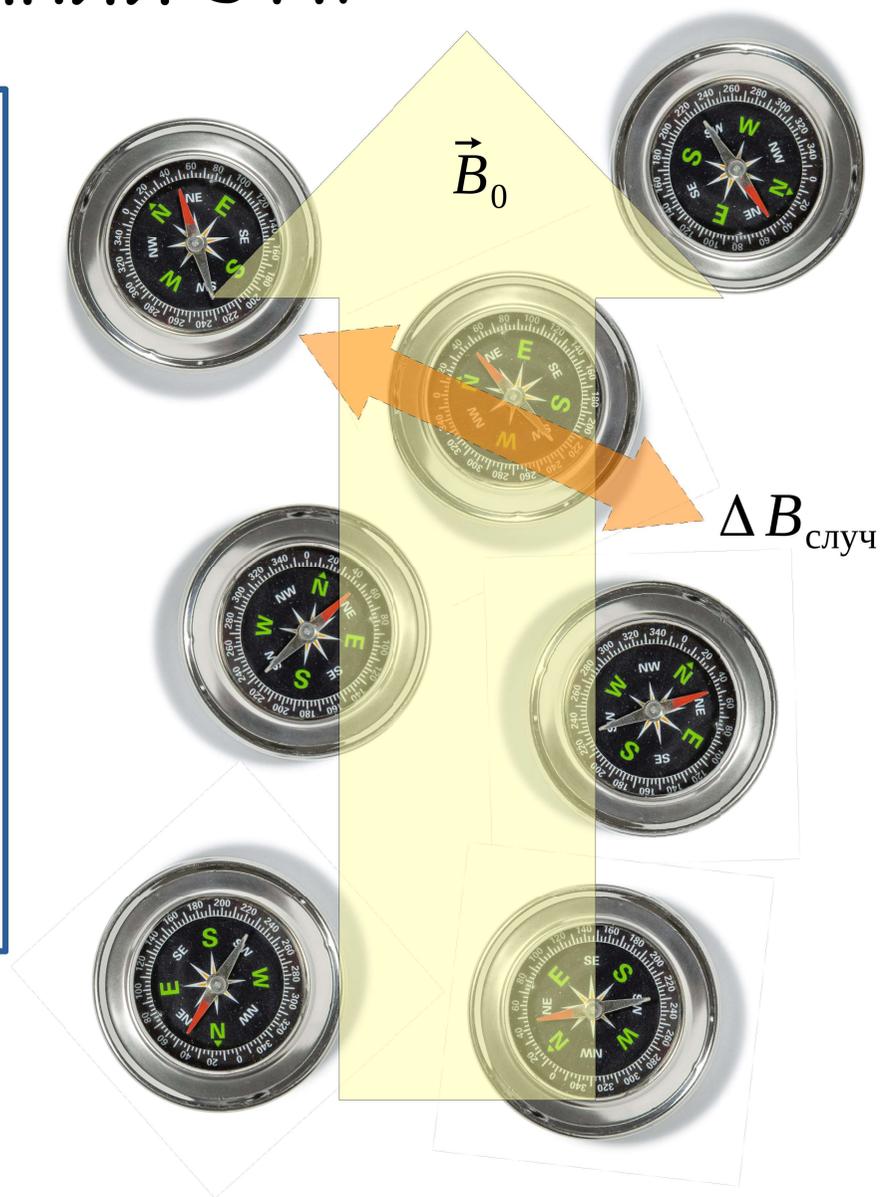
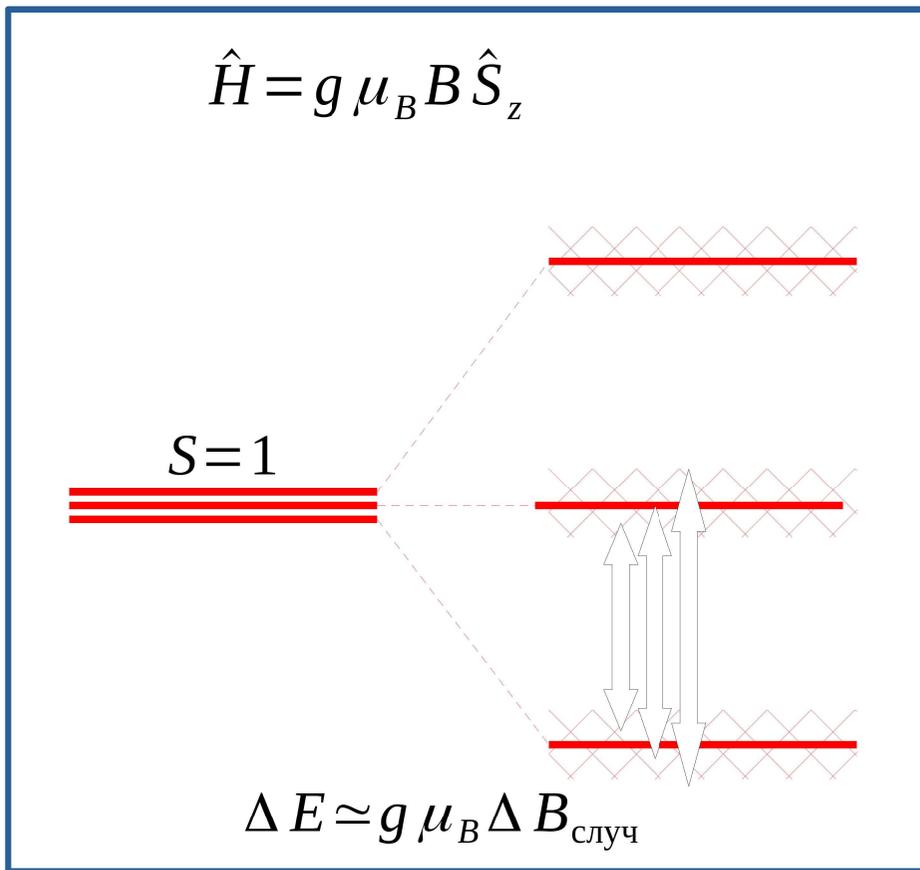


Как все начиналось...



Резонансное поглощение в $MnSO_4$. Температура 298К, частота 2.75 ГГц
данные Е.К.Завойского (*J.Phys USSR* 9, 211, 245, 447 (1945))

Ширина линии ЭПР



Ширина линии ЭПР

$$\hat{H} = g \mu_B B \hat{S}_z$$

$S=1$

$$\Delta E \simeq g \mu_B B$$

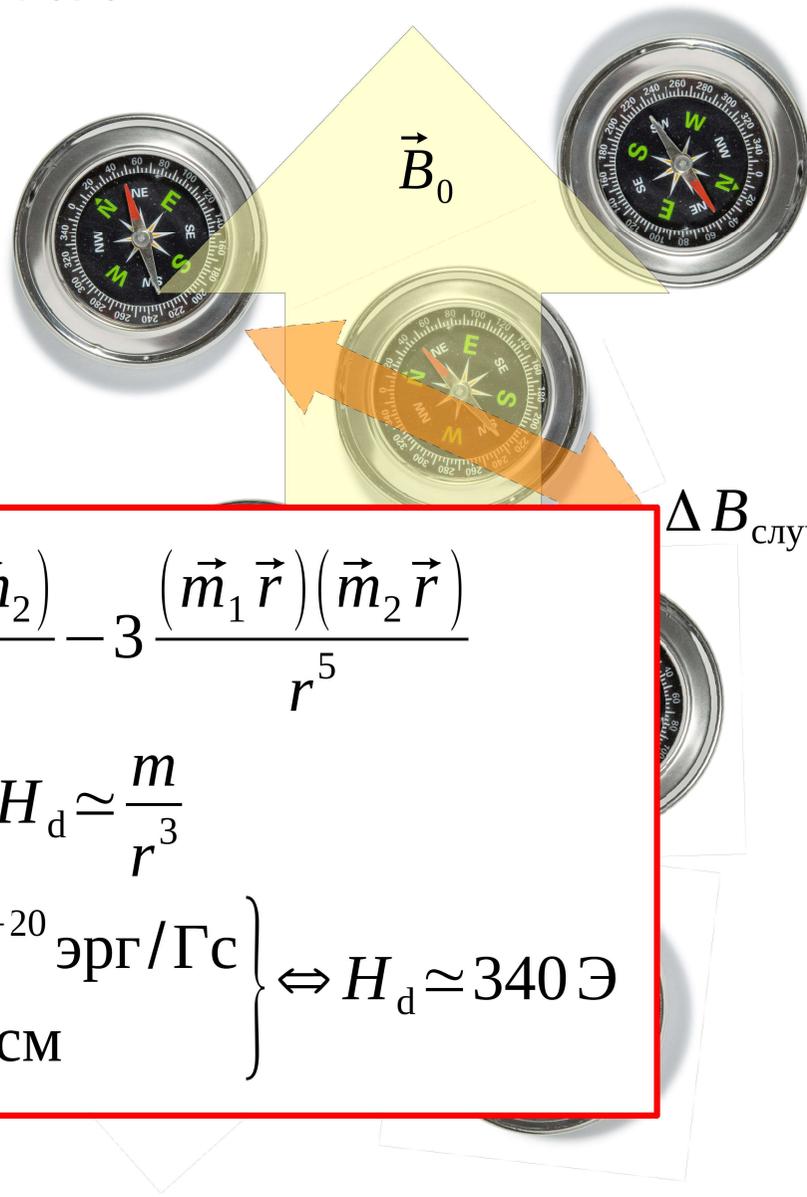
$$E_{d-d} = \frac{(\vec{m}_1 \vec{m}_2)}{r^3} - 3 \frac{(\vec{m}_1 \vec{r})(\vec{m}_2 \vec{r})}{r^5}$$

$$H_d \simeq \frac{m}{r^3}$$

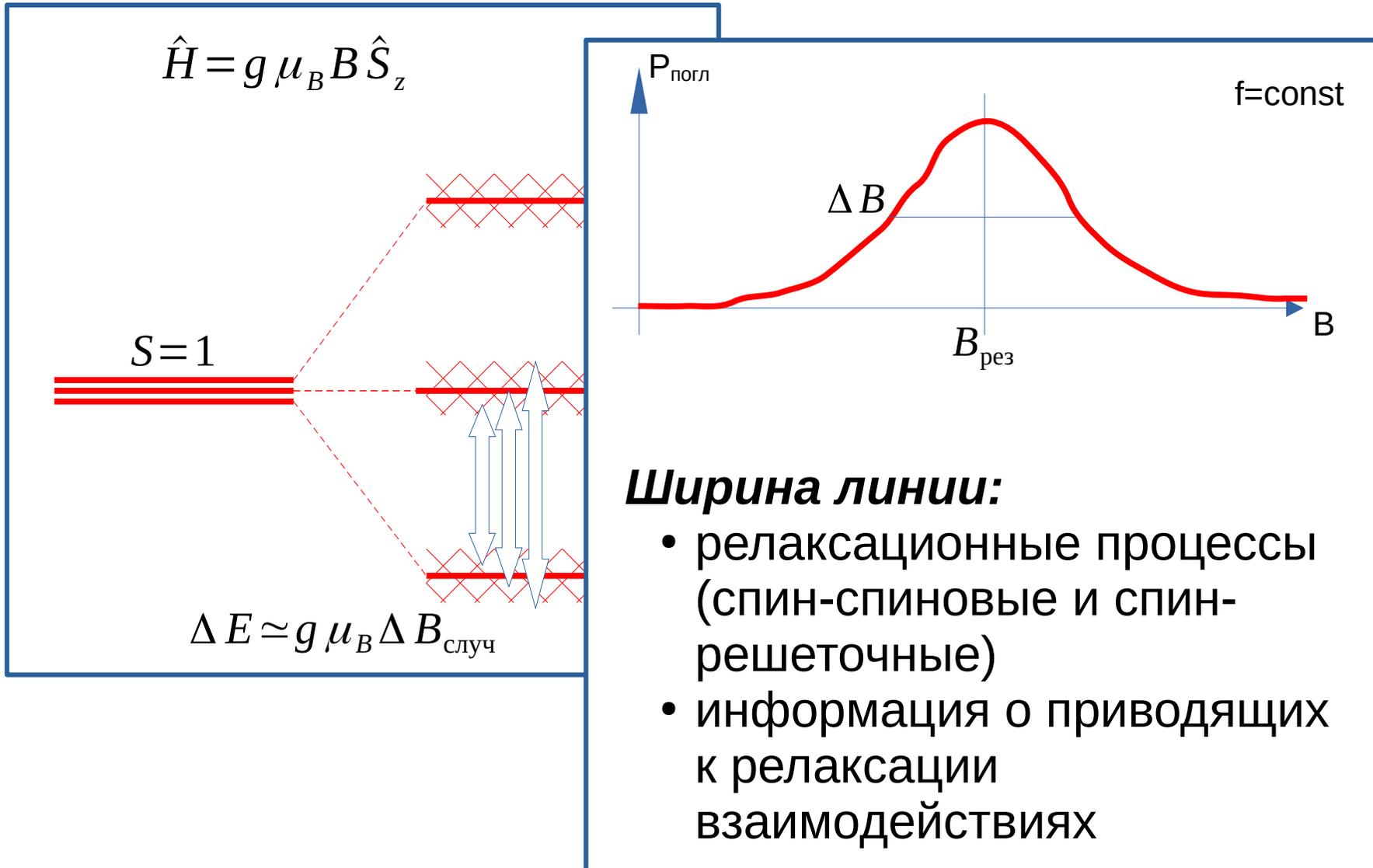
$$\left. \begin{array}{l} m = \mu_B = 0.93 \cdot 10^{-20} \text{ эрг/Гс} \\ r = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см} \end{array} \right\} \Leftrightarrow H_d \simeq 340 \text{ Э}$$

\vec{B}_0

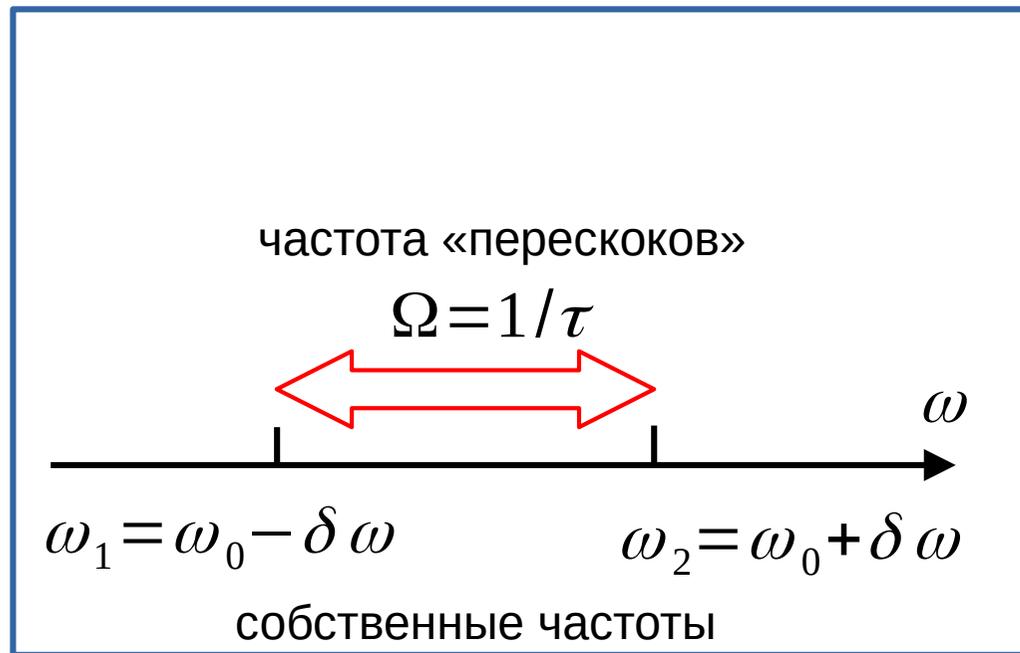
$\Delta B_{\text{случ}}$



Ширина линии ЭПР



Почему всё-таки виден сигнал ЭПР? Модель «сужения движением»

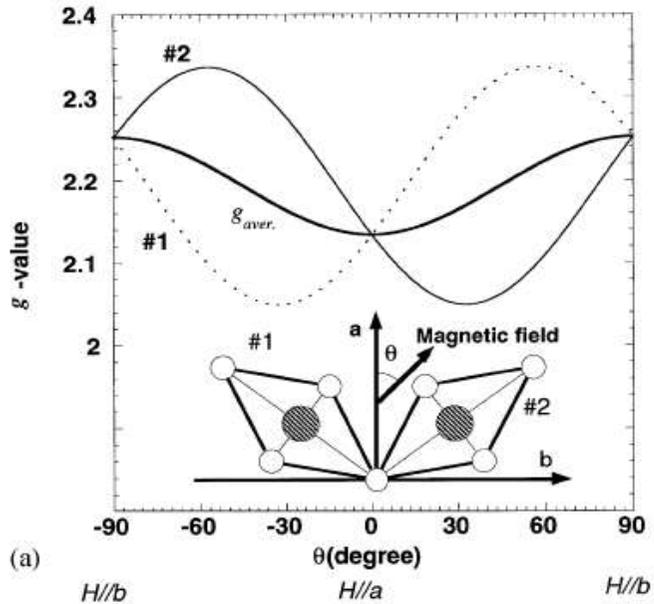


Модель «сужения движением»

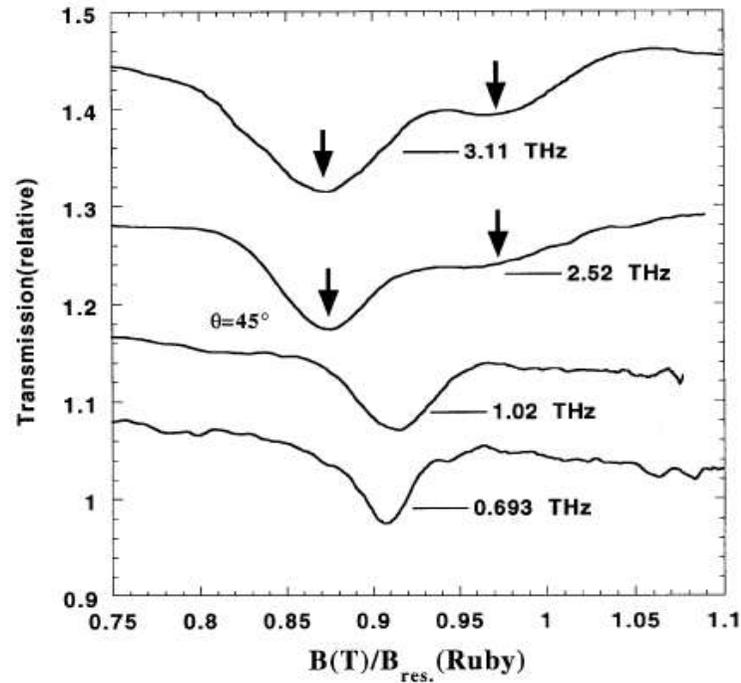


$$\delta\varphi = \delta\omega \times \tau$$
$$\Phi = \sum \delta\varphi \quad \langle \Phi \rangle = 0$$
$$\langle \Phi^2 \rangle = N(\delta\omega \times \tau)^2 = T\tau(\delta\omega)^2 \simeq 1$$
$$\Delta = \frac{1}{T} \simeq \frac{(\delta\omega)^2}{\Omega}$$

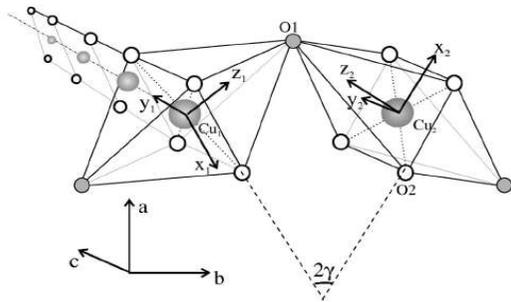
Пример разрешения обменно-суженного дублета в высокополевом ЭПР



H. Nojiri et al. | *Physica B* 246–247 (1998) 16–21

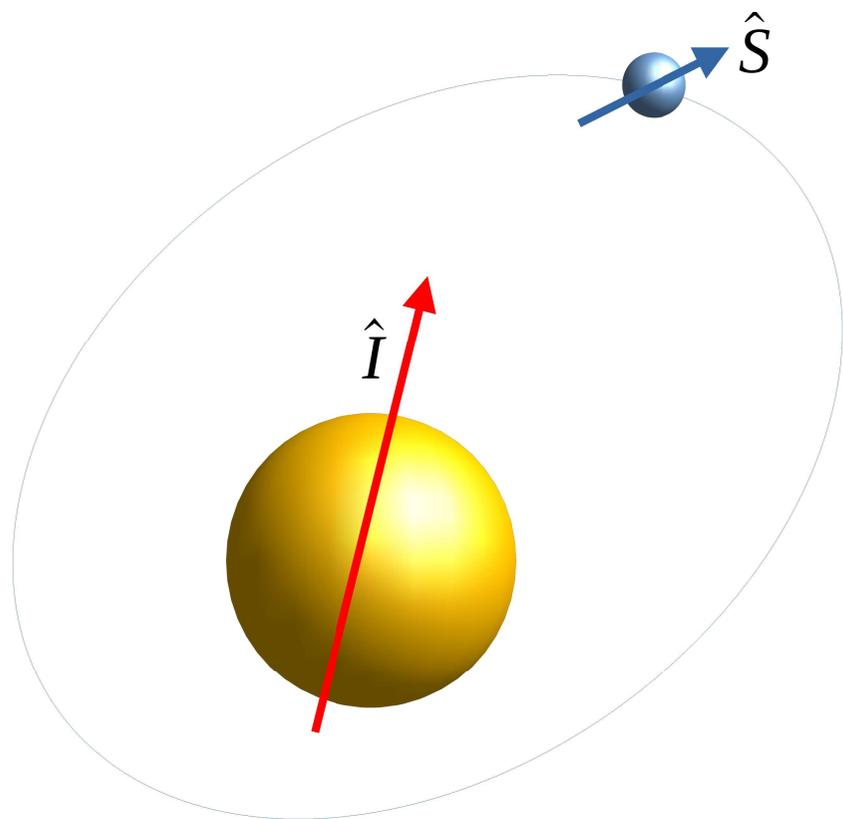


Частота 3 ТГц,
резонансное поле около 10 Тл.



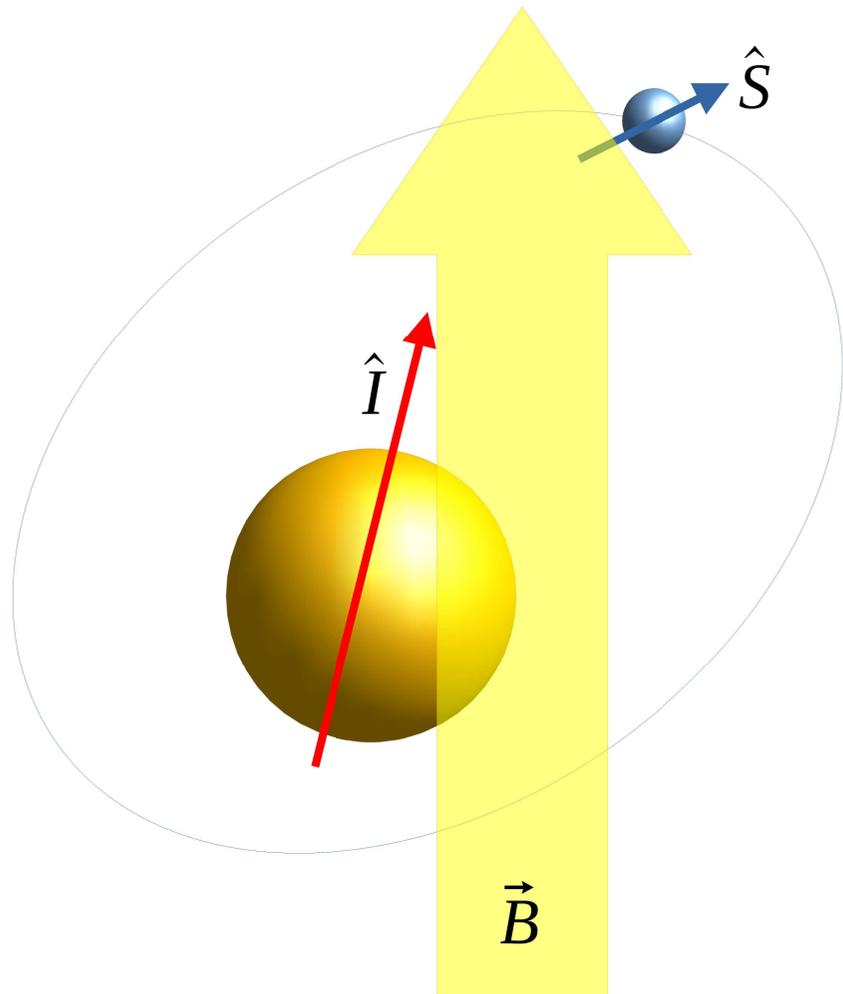
PHYSICAL REVIEW B 68, 014417 (2003)

Сверхтонкая структура спектра ЭПР (в т.ч. для химии и биологии)



$$E_{\text{d-d}} = \frac{(\vec{m}_1 \vec{m}_2)}{r^3} - 3 \frac{(\vec{m}_1 \vec{r})(\vec{m}_2 \vec{r})}{r^5}$$
$$\hat{H}_{\text{HF}} = A \hat{I} \hat{S}$$

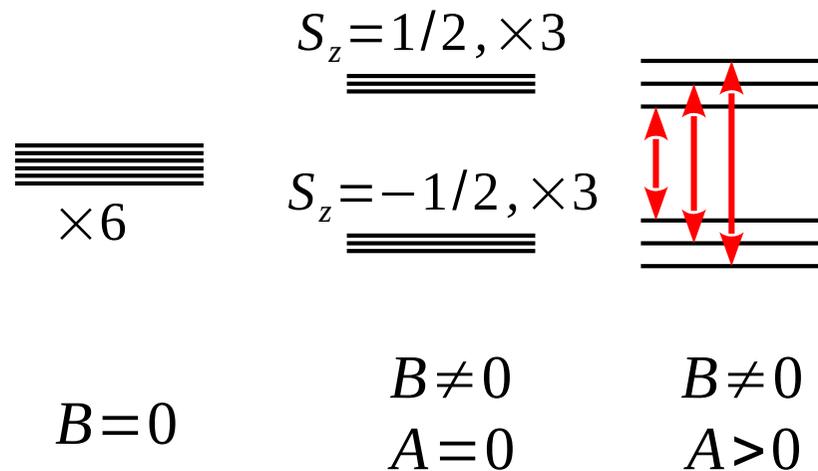
Сверхтонкая структура спектра ЭПР (в т.ч. для химии и биологии)



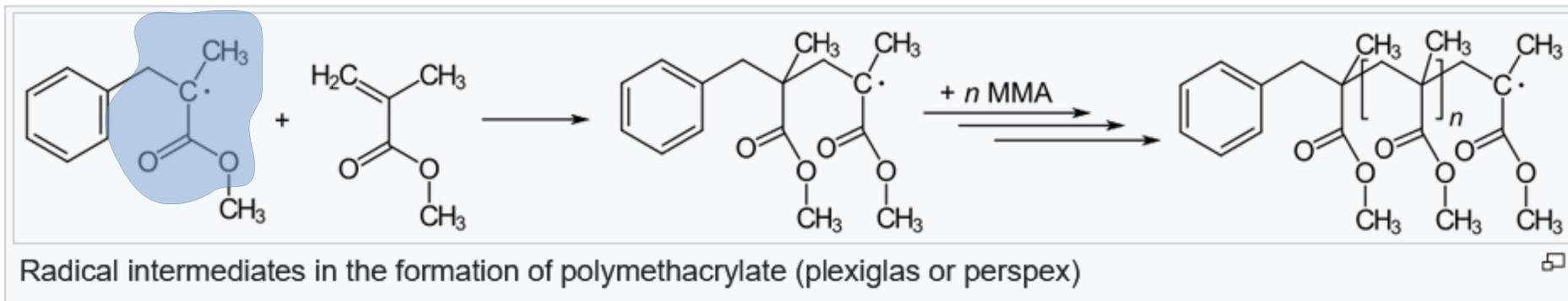
$$E_{\text{d-d}} = \frac{(\vec{m}_1 \vec{m}_2)}{r^3} - 3 \frac{(\vec{m}_1 \vec{r})(\vec{m}_2 \vec{r})}{r^5}$$

$$\hat{H}_{\text{HF}} = A \hat{I} \hat{S} \approx A \hat{I}_z \hat{S}_z$$

пример: $S=1/2, I=1$



Специфика органических молекул и свободных радикалов



Неспаренный электрон на молекулярной орбитали

- 1) большое расстояние между спинами, узкие линии (~ 1 Гс)
- 2) молекулярная орбиталь «охватывает» много атомов, электрон может испытывать сверхтонкое взаимодействие с многими ядрами = **индивидуальные спектры разных молекул**
- 3) возможность наблюдения за химией (биохимией) реакций «в реальном времени»

ЭПР и квантовые вычисления?



$$\begin{aligned}\vec{T} &= \vec{M} \times \vec{B} \\ \vec{L} &= \gamma \vec{M} \\ \frac{d\vec{M}}{dt} &= \vec{T} = \gamma \vec{M} \times \vec{B}\end{aligned}$$

ЭПР и квантовые вычисления?



$$\begin{aligned}\vec{T} &= \vec{M} \times \vec{B} \\ \vec{L} &= \gamma \vec{M} \\ \frac{d\vec{M}}{dt} &= \vec{T} = \gamma \vec{M} \times \vec{B}\end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} M_y B \\ -M_x B \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$M^{(\pm)} = M_x \pm i M_y$$

$$\frac{dM^{(+)}}{dt} = -i\gamma B M^{(+)}$$

$$M^{(+)} = \mu \exp(-i\Omega_L t), \quad \Omega_L = \gamma B$$

$$M^{(-)} = \mu \exp(i\Omega_L t)$$

ЭПР и квантовые вычисления?



$$\begin{aligned}\vec{T} &= \vec{M} \times \vec{B} \\ \vec{L} &= \gamma \vec{M} \\ \frac{d\vec{M}}{dt} &= \vec{T} = \gamma \vec{M} \times \vec{B}\end{aligned}$$

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix}$$

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} b \cos \omega t \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{b}{2} \cos \omega t \\ \frac{b}{2} \sin \omega t \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{b}{2} \cos \omega t \\ -\frac{b}{2} \sin \omega t \\ 0 \end{pmatrix}$$

ЭПР и квантовые вычисления?

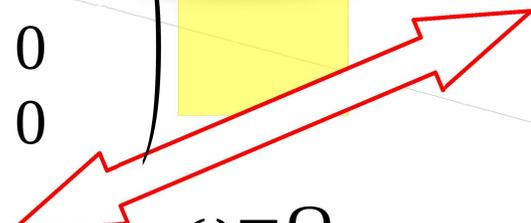
$t=0$



$$t = \tau_\pi$$
$$\tau_\pi \times (\gamma b / 2) = \pi$$



$$\vec{b} = \begin{pmatrix} b \cos \omega t \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



$\omega = \Omega_L$

Немного о технике



Немного о технике

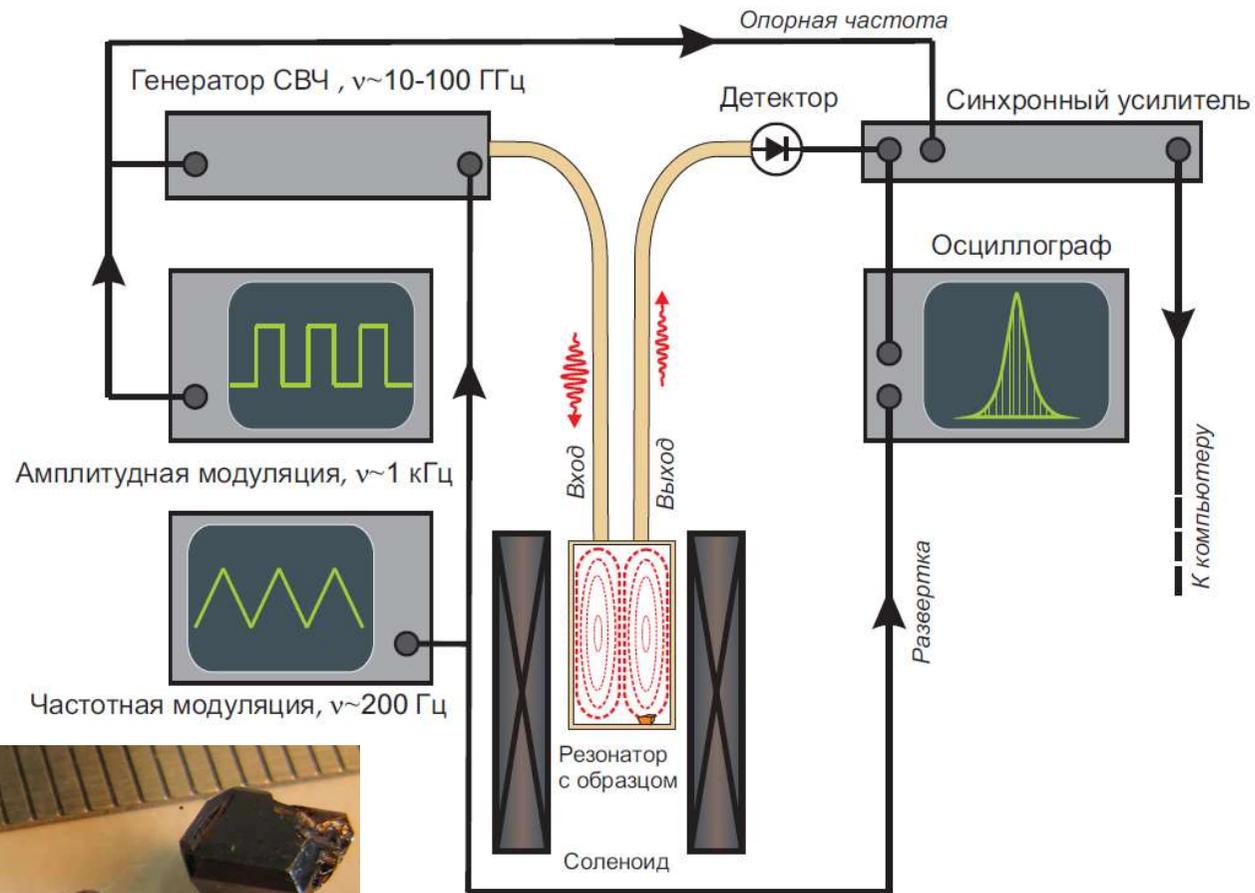


рис. из диссертации К.Ю.Поварова (ИФП, 2013)

фото из диссертации В.Н.Глазкова (ИФП, 2022)

Немного о технике

СВЧ-частоты: 1-300 ГГц

Магнитные поля: 0-1Тл; 0-8 Тл; 0-14 Тл в разных магнитах

Температуры: 77-300К, 1.5-40-70К, 0.4-10К в разных криостатах

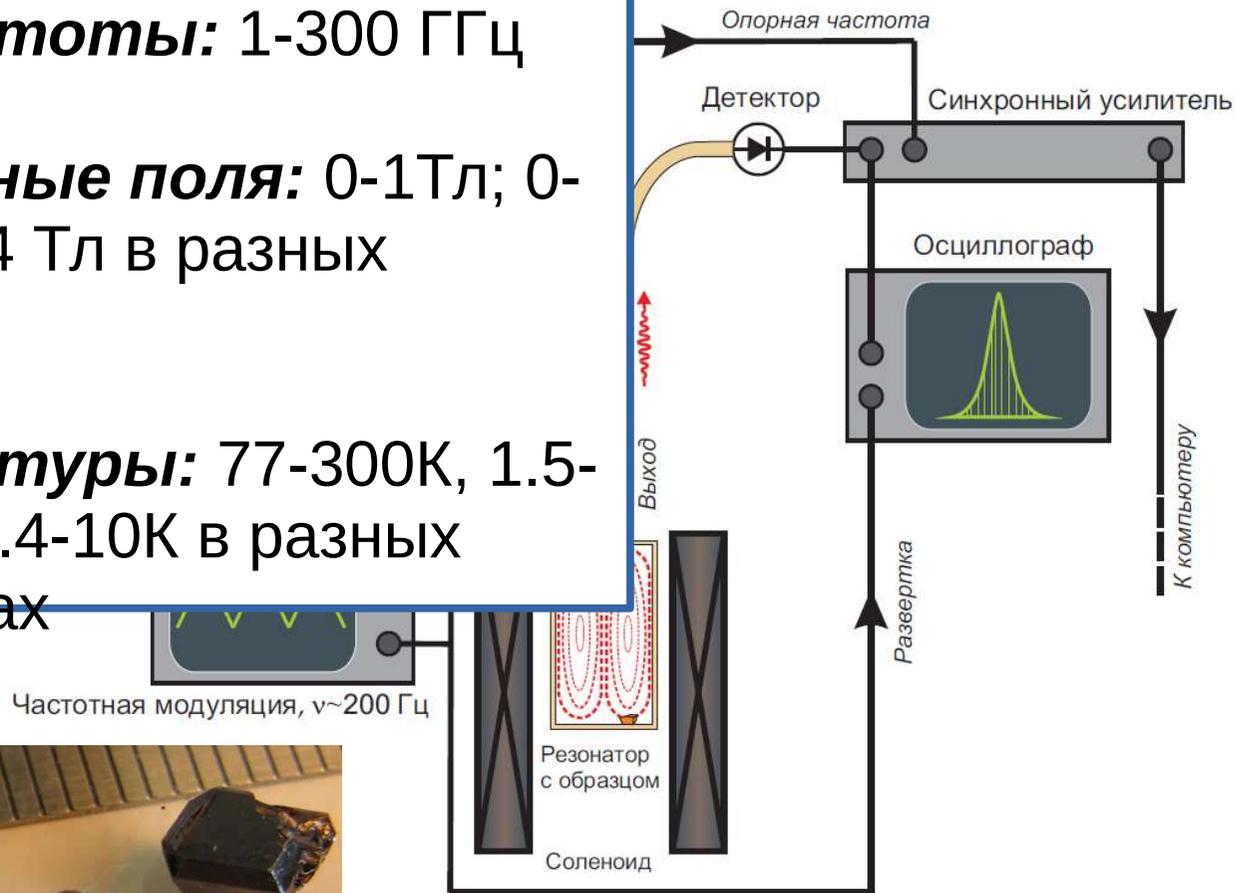


рис. из диссертации К.Ю.Поварова (ИФП, 2013)

фото из диссертации В.Н.Глазкова (ИФП, 2022)

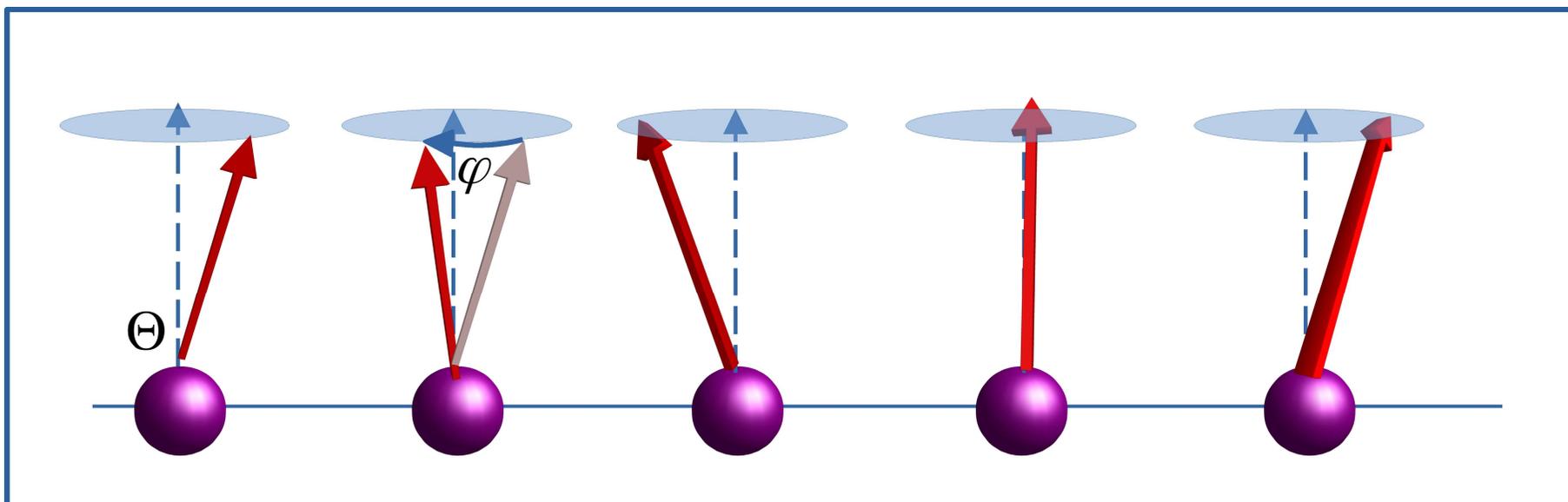
Антиферромагнетики



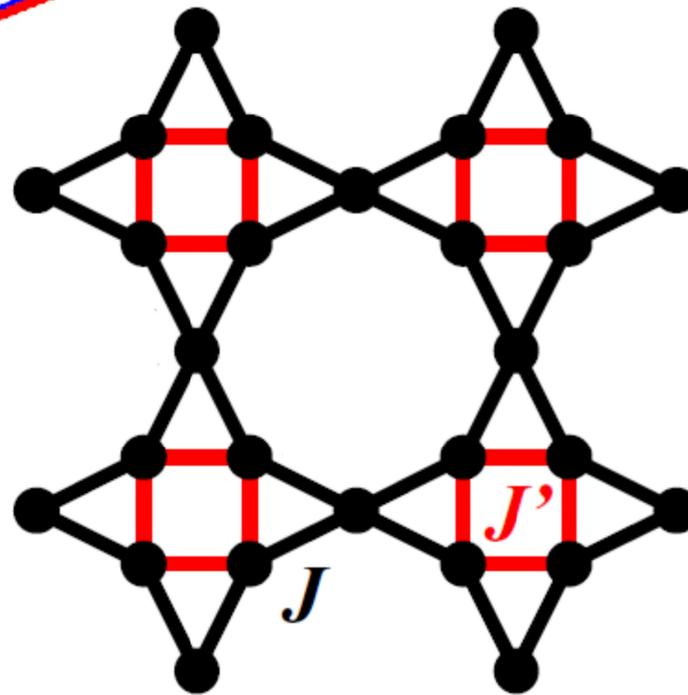
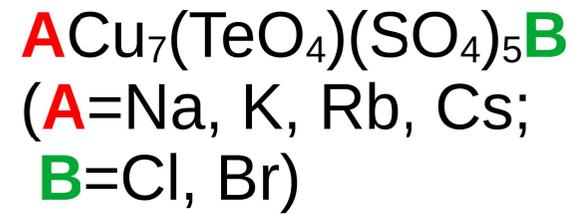
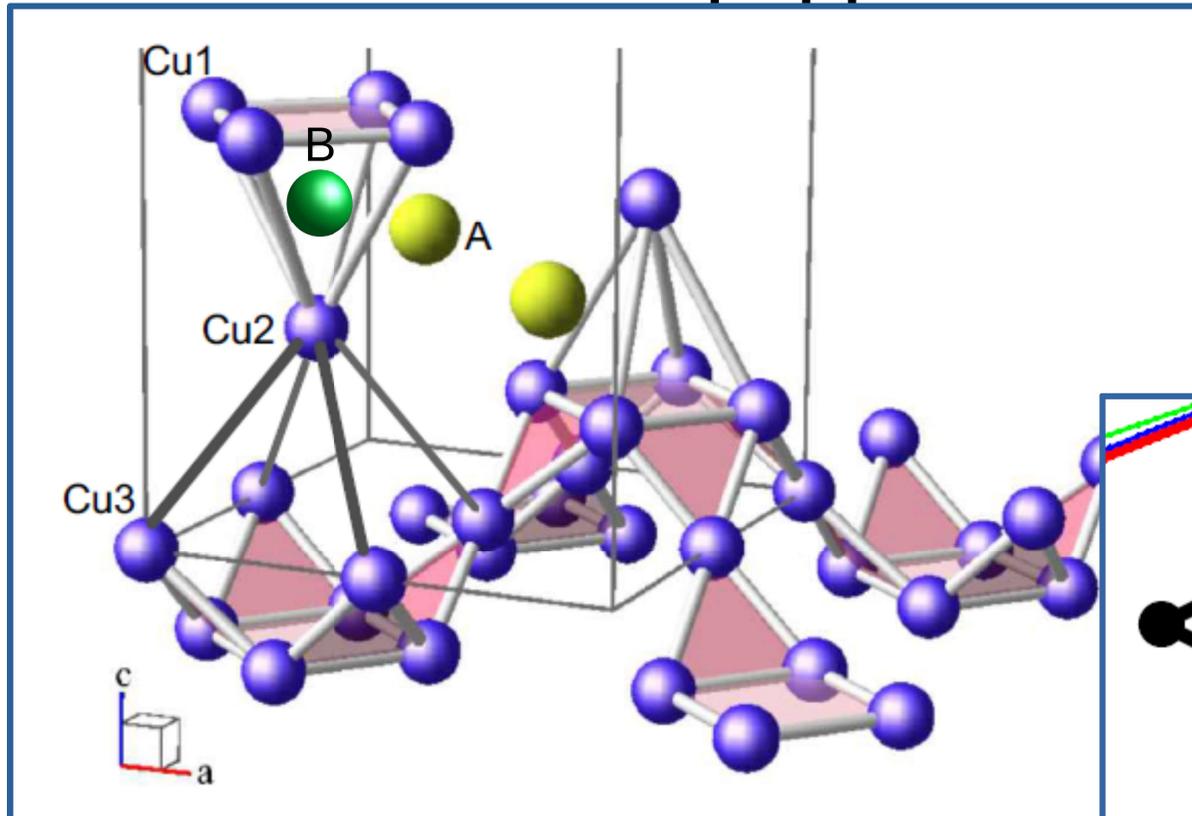
$$E = \sum_{i,j} J_{ij} \vec{S}_i \vec{S}_j$$



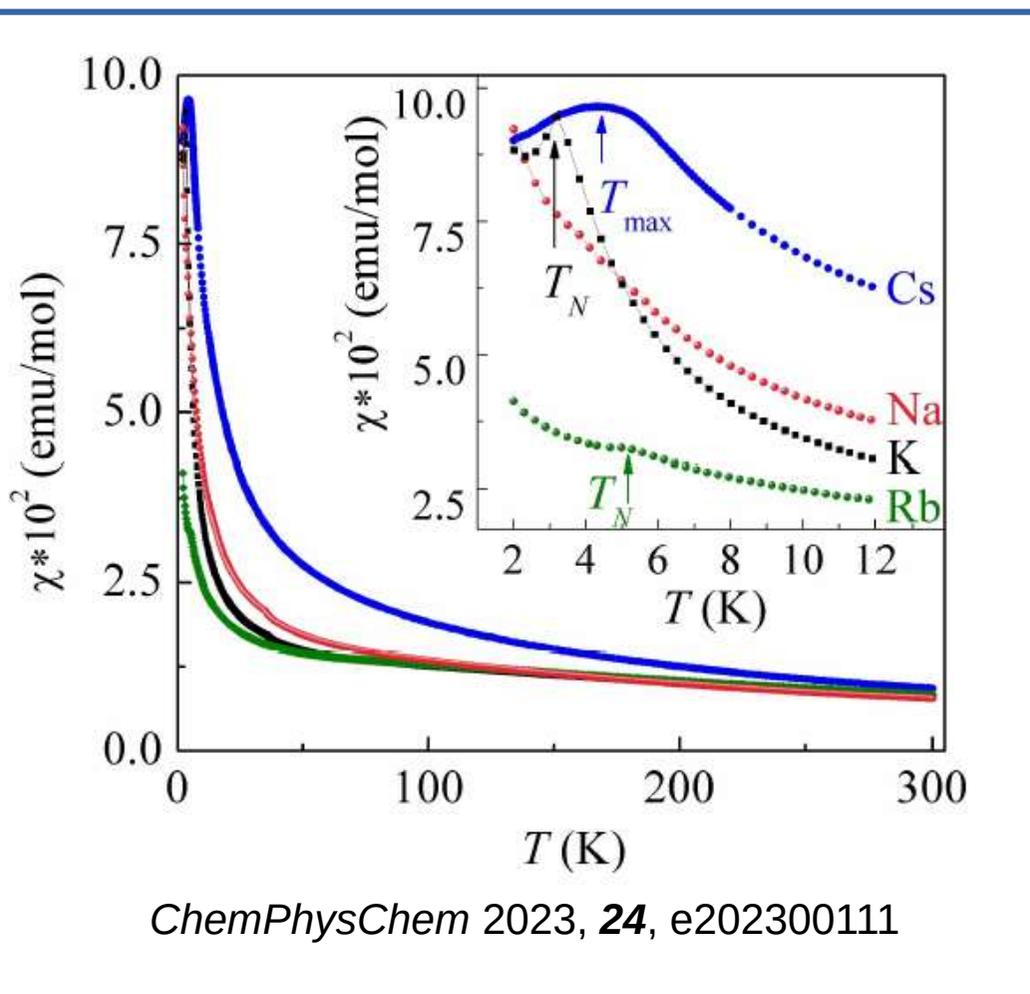
Спиновые волны: элементарные
коллективные возбуждения
«классического» гейзенберговского
магнетика



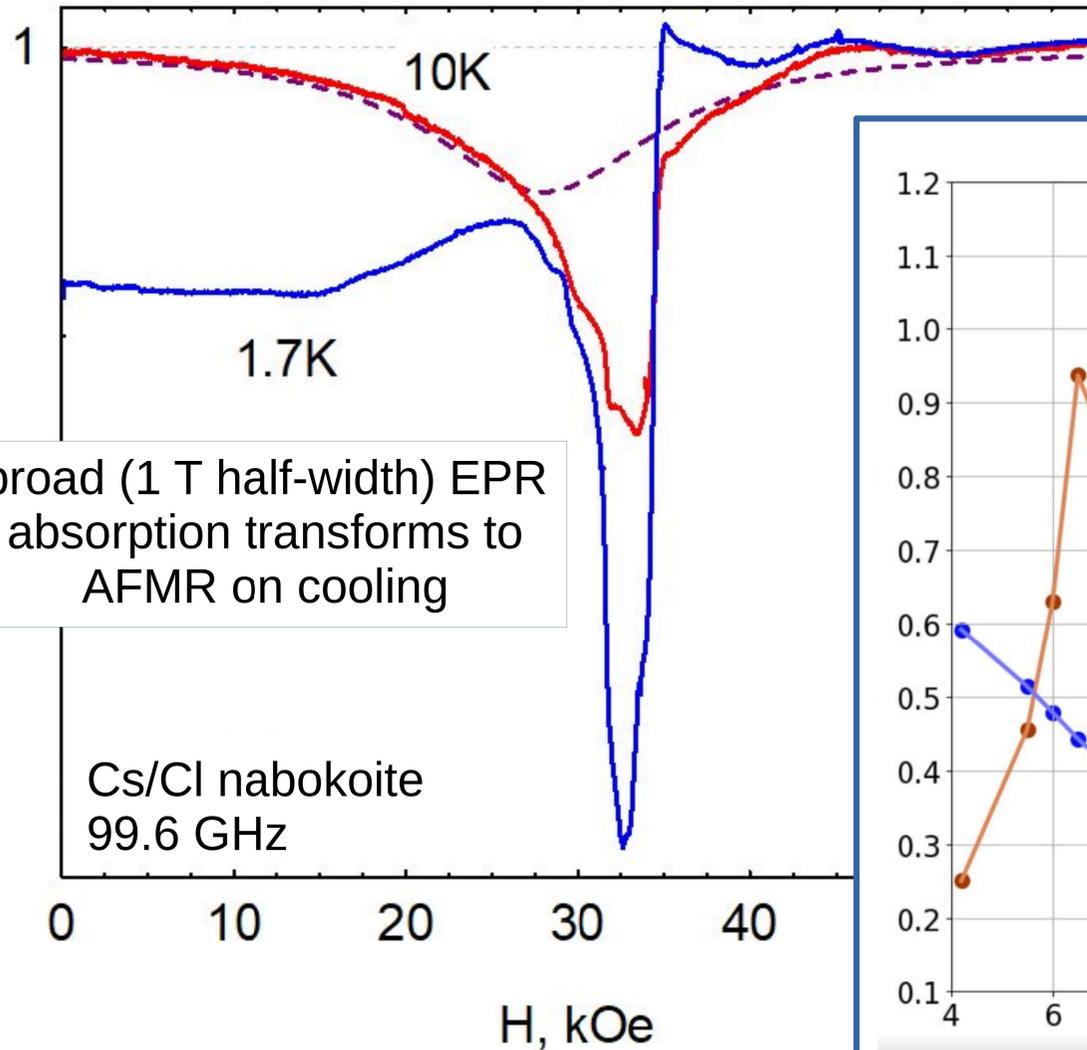
Фрустрация: «экзотические» антиферромагнетики



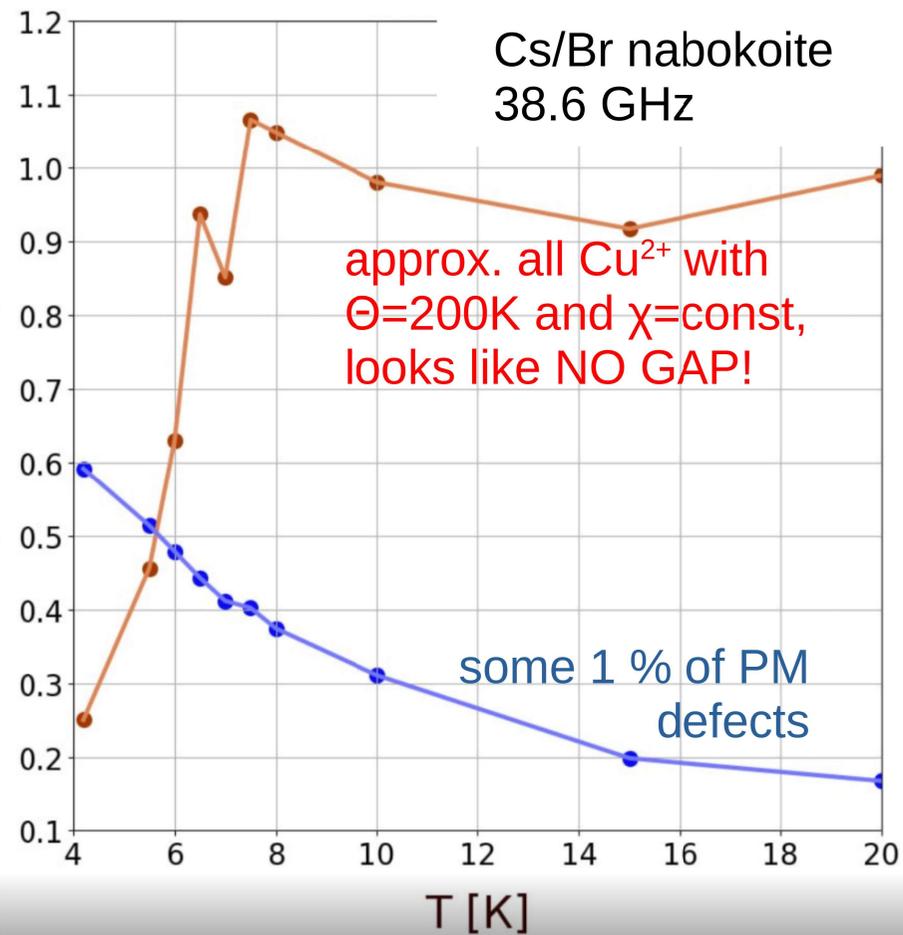
Чем может помочь ЭТР?



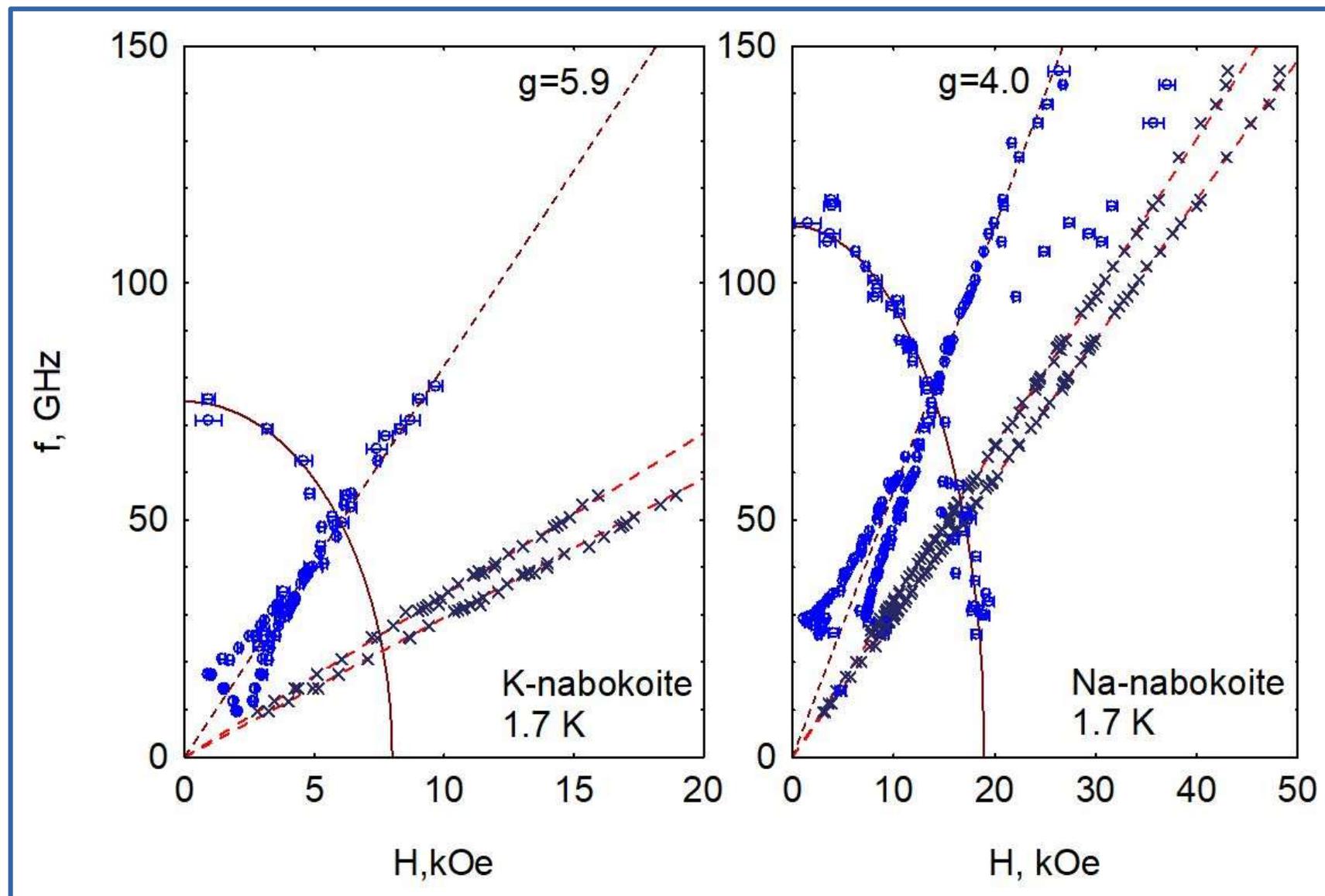
ЭПР разных подсистем



broad (1 T half-width) EPR absorption transforms to AFMR on cooling

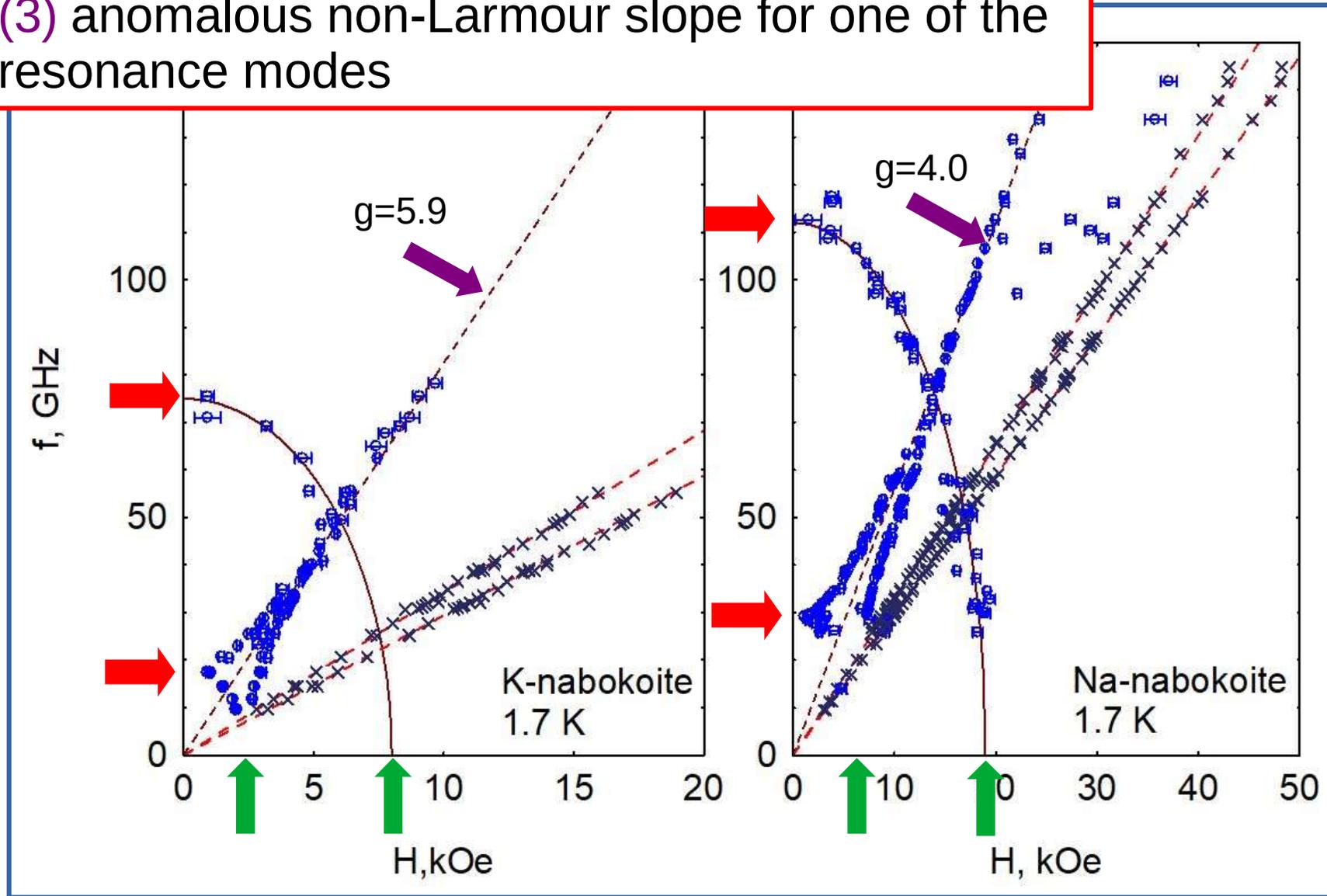


Антиферромагнитный резонанс (K/Cl; Na/Cl)

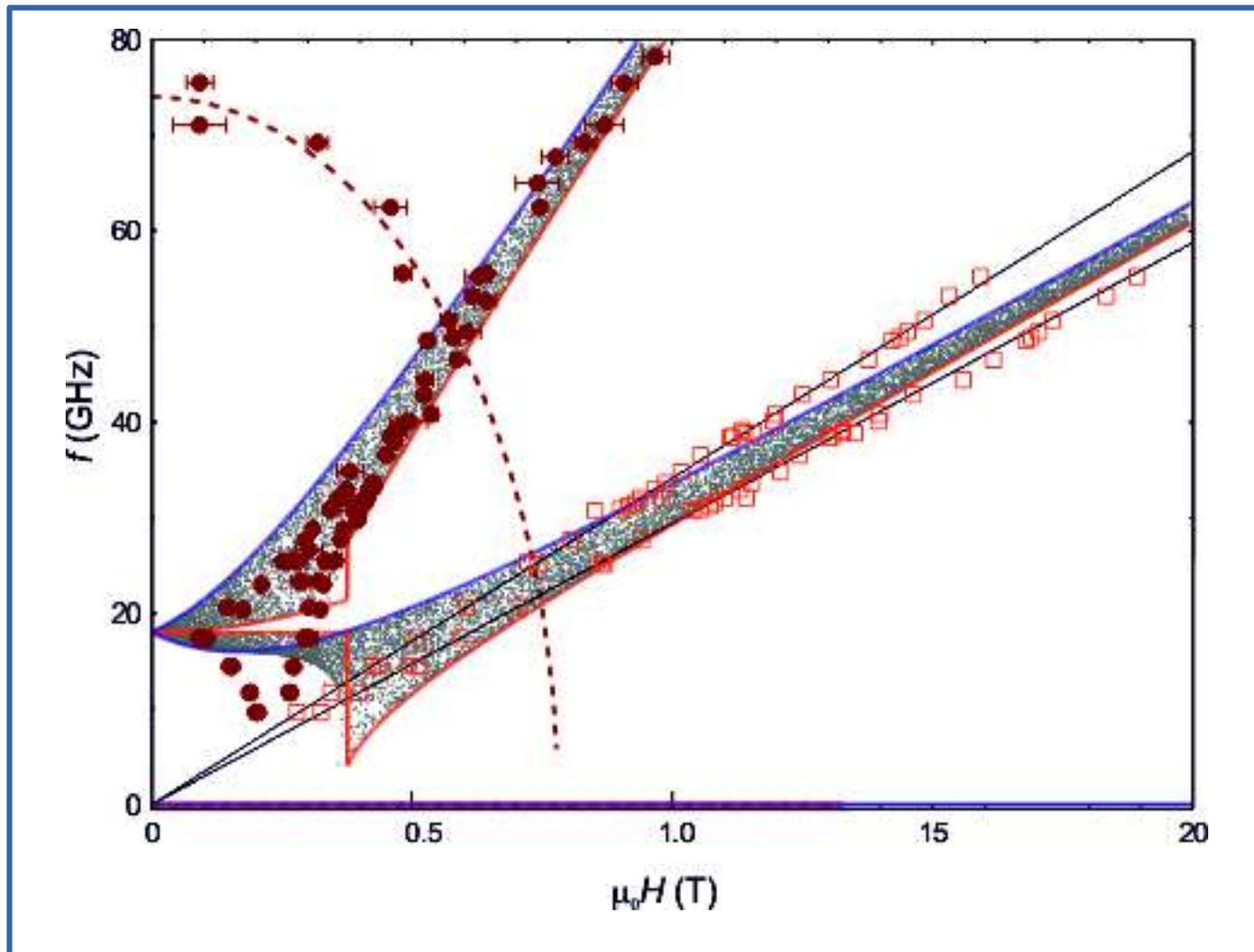


- (1) multiple gaps in magnon spectra
- (2) multiple spin-reorientations
- (3) anomalous non-Larmour slope for one of the resonance modes

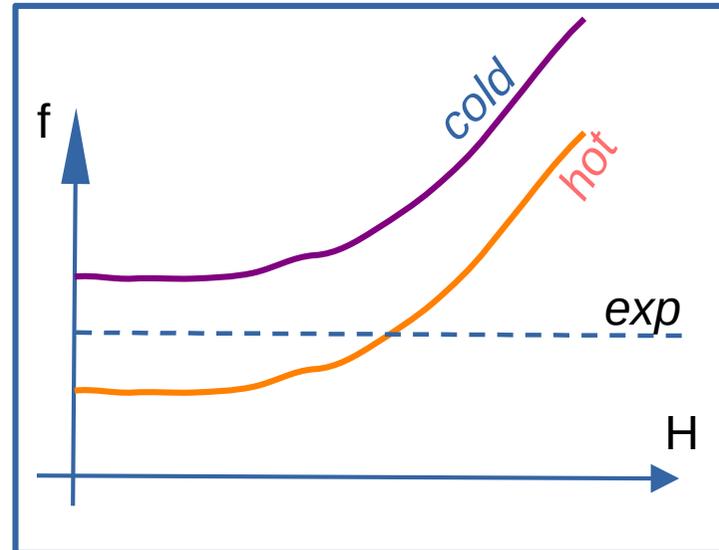
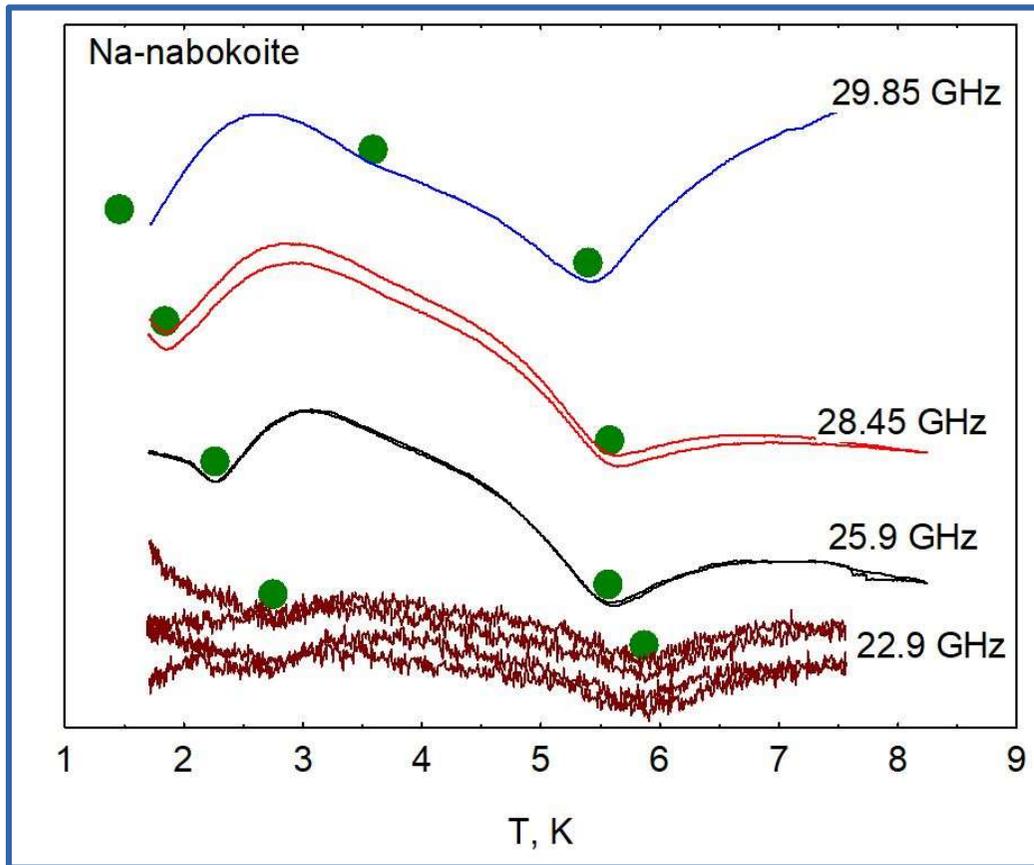
(Cl; Na/Cl)



Неколлинеарное антиферромагнитное упорядочение?!



«Температурный резонанс»: идея



«Температурный резонанс»: результаты

