



НУГ «Низкотемпературная магнитно-резонансная спектроскопия»

базовая кафедра физики низких
температур ФФ ВШЭ, ИФП РАН



Состав группы



Глазков Василий Николаевич

Руководитель НУГ



Ребров Ярослав Витальевич

*Студент, 1-ый курс
магистратуры*



Яфарова Адиля Фархадовна

*Студентка, 4-ый курс
бакалавриата*



**Крастилевский Иван
Александрович**

*Студент, 4-ый курс
бакалавриата*



Тимченко Савелий Георгиевич

*Студент, 2-ой курс
бакалавриата*



**Малиницкий Дмитрий
Андреевич**

*Студент, 2-ой курс
бакалавриата*



Ряжапов Айдар Хамзаевич

*Студент, 2-ой курс
бакалавриата*

Магнитный резонанс при низких температурах: как, зачем, и что нового и необычного можно узнать?

В.Н.Глазков

семинар 25.01.2024

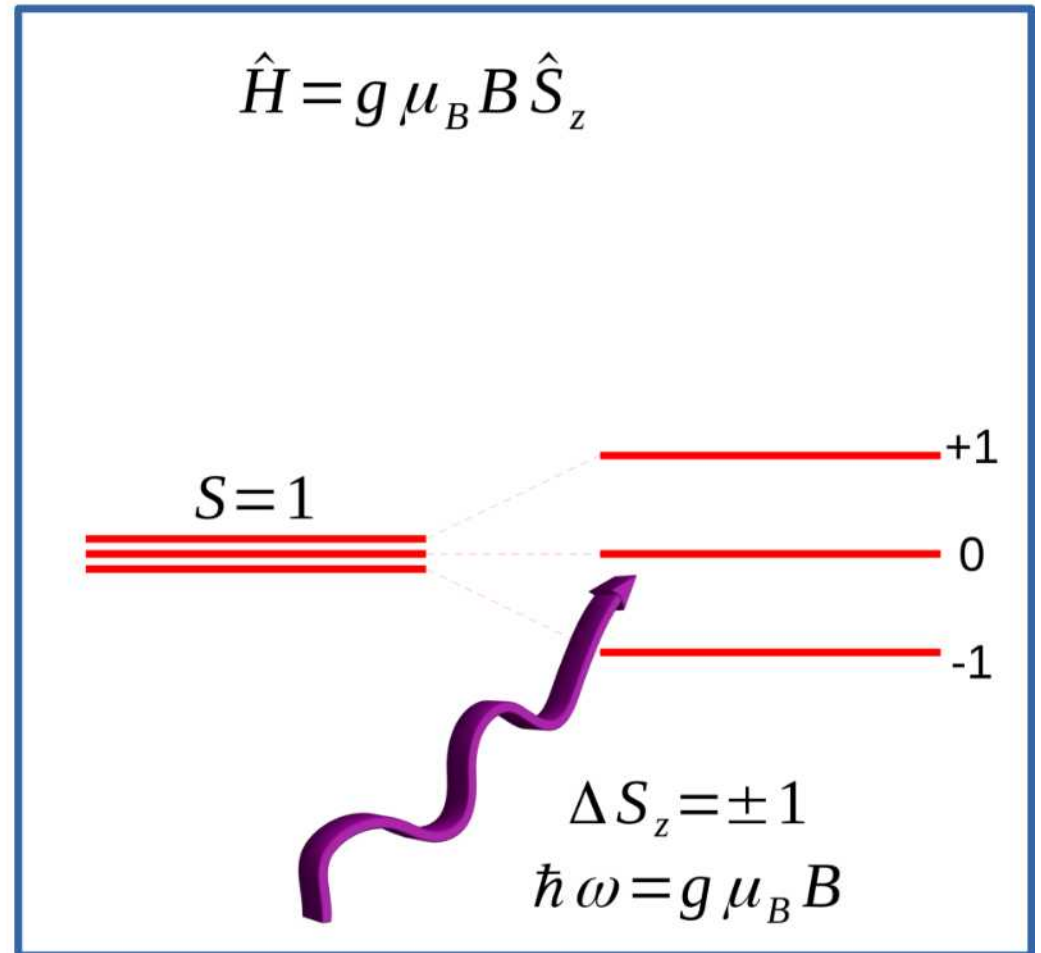
План доклада

- «Классический» ЭПР:
 - несколько наивных идей о работе метода
 - что можно измерить
 - пример: определение параметров спинового гамильтониана в LiGdF_4
- Низкотемпературная ЭПР спектроскопия в ИФП РАН
- Спиновые возбуждения в антиферромагнетиках
 - спиновые волны
 - результаты нейтронной спектроскопии и возможности магнитного резонанса
 - пример: антиферромагнитный резонанс в $\text{Ba}_2\text{MnGe}_2\text{O}_7$
- Магнитный резонанс в низкотемпературных парамагнетиках
 - неупорядоченные низкотемпературные состояния спиновых систем
 - примеры: магнитный резонанс триплетных возбуждений и другие...

«Классический» ЭТР



«Классический» ЭПР: резонанс



«Классический» ЭПР: резонанс

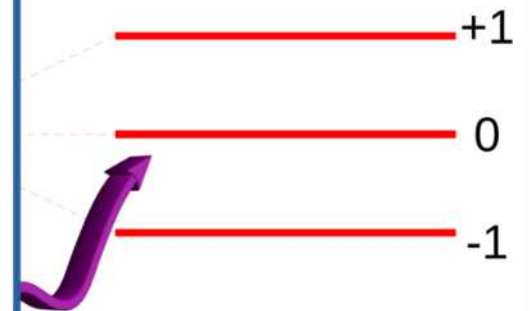


\vec{B}

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

Резонансная частота ($B = \text{const}$) или **резонансное поле** ($f = \text{const}$):

- определение g-фактора (зависит от магнитного иона и его окружения)
- определение анизотропии g-фактора (зависит от локальной симметрии магнитного иона и взаимодействий)
- определение количества магнитных ионов в образце



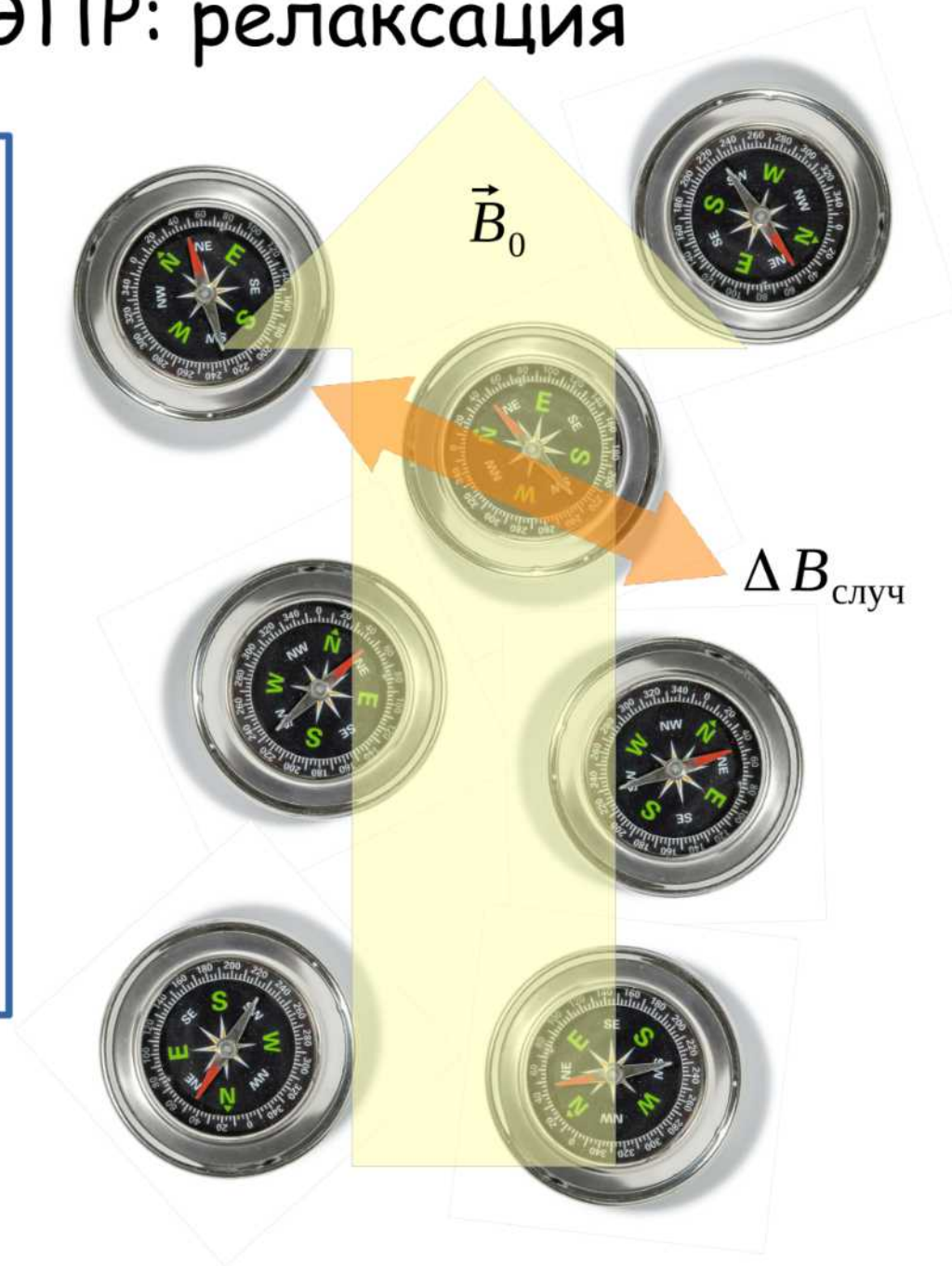
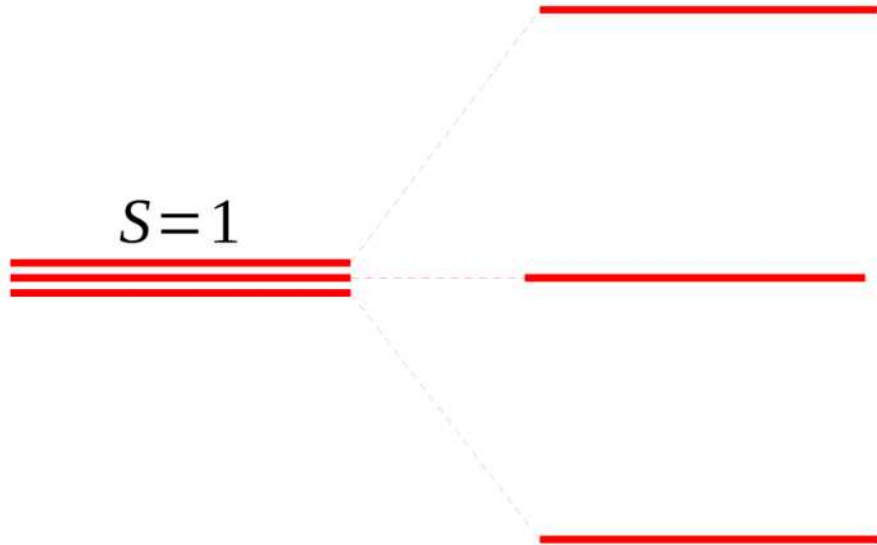
$$\Delta S_z = \pm 1$$

$$\hbar \omega = g \mu_B B$$

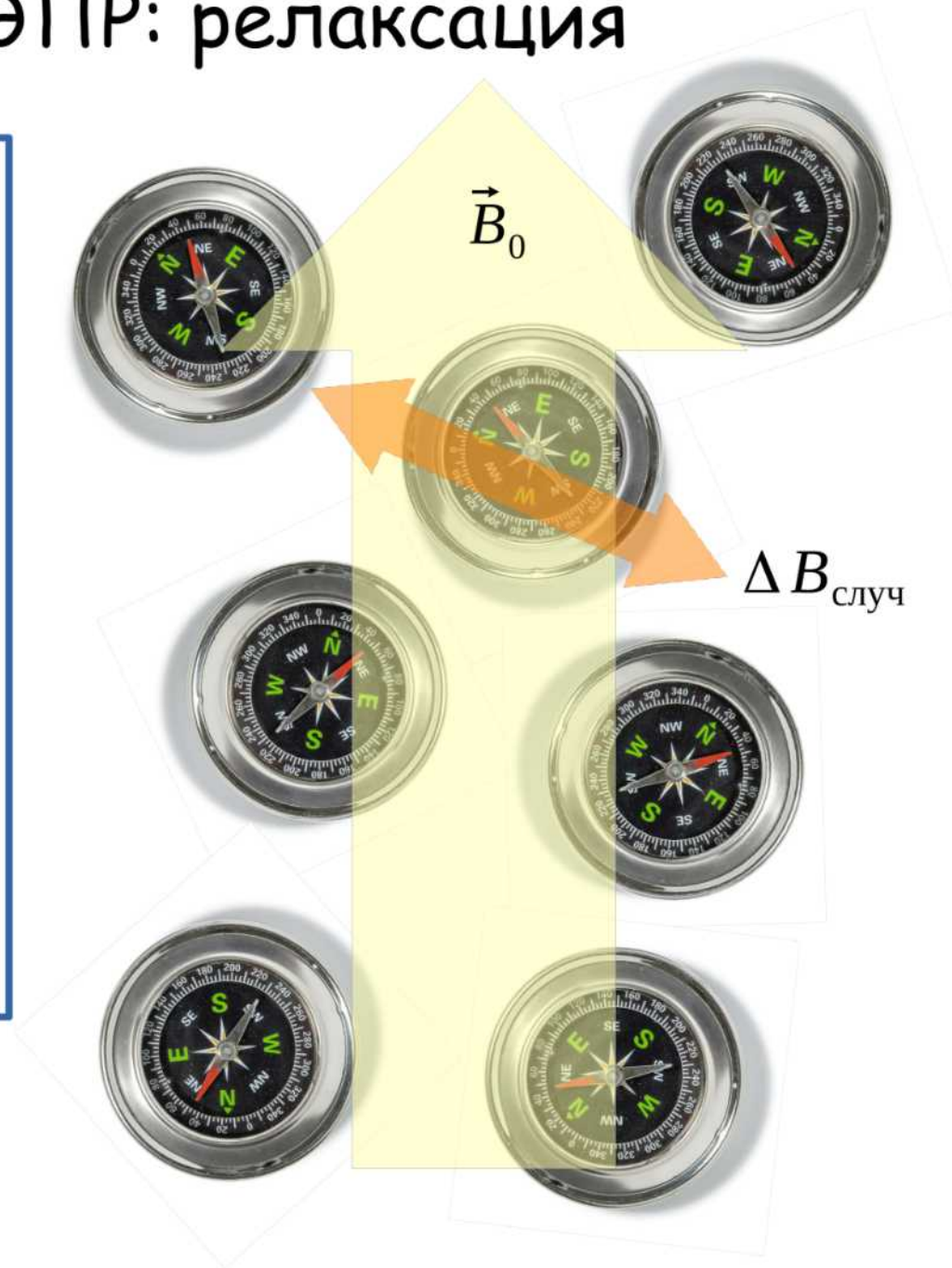
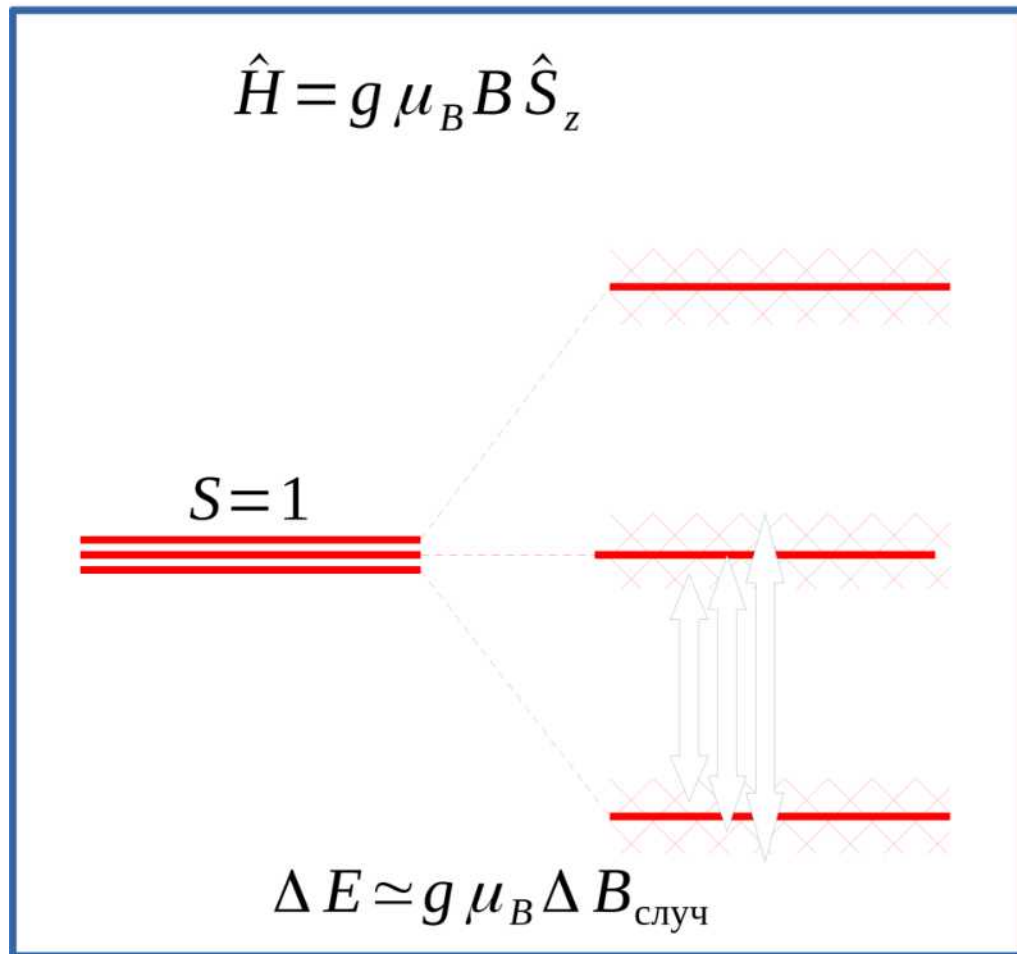
«Классический» ЭПР: релаксация

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

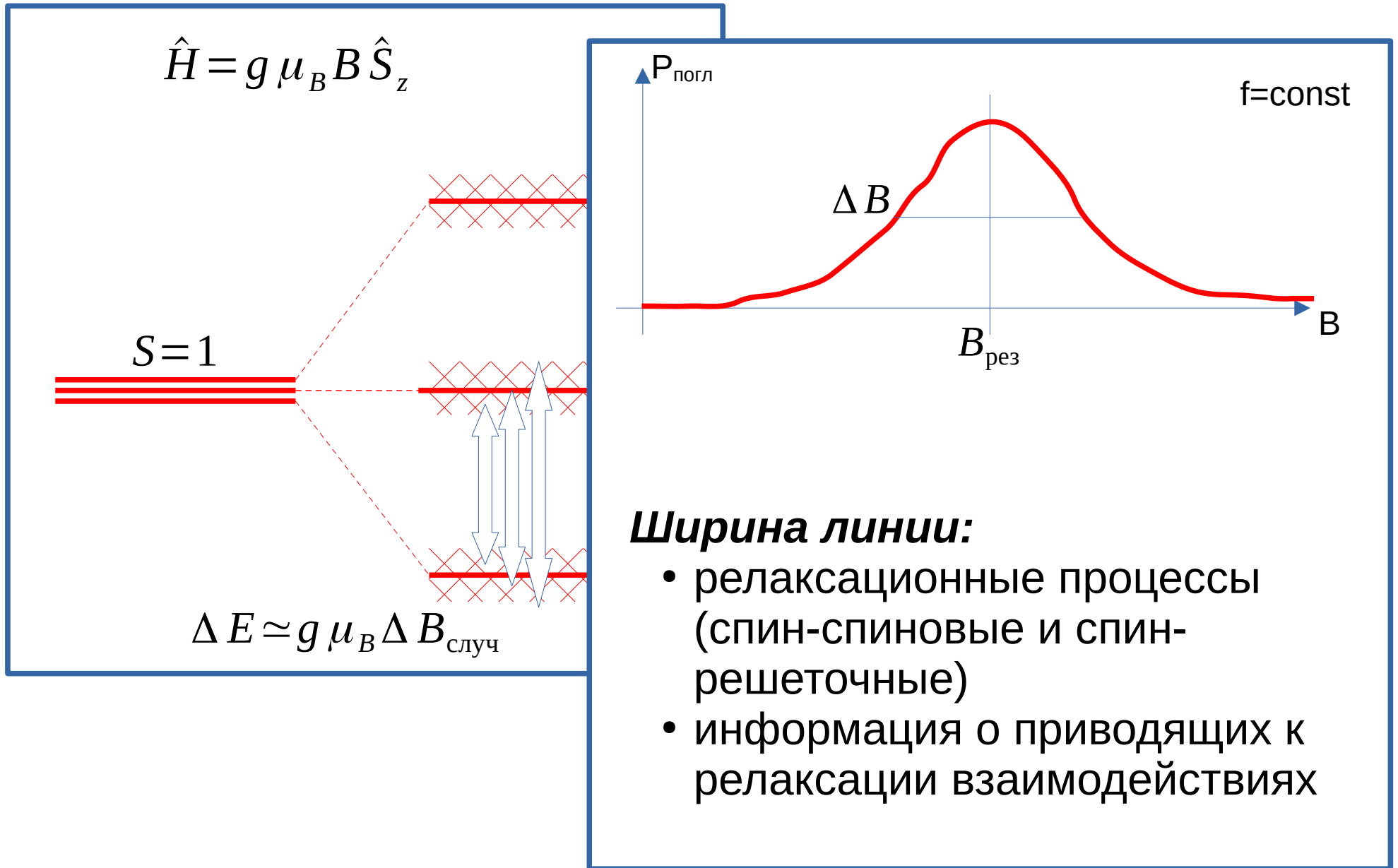
$S=1$



«Классический» ЭПР: релаксация



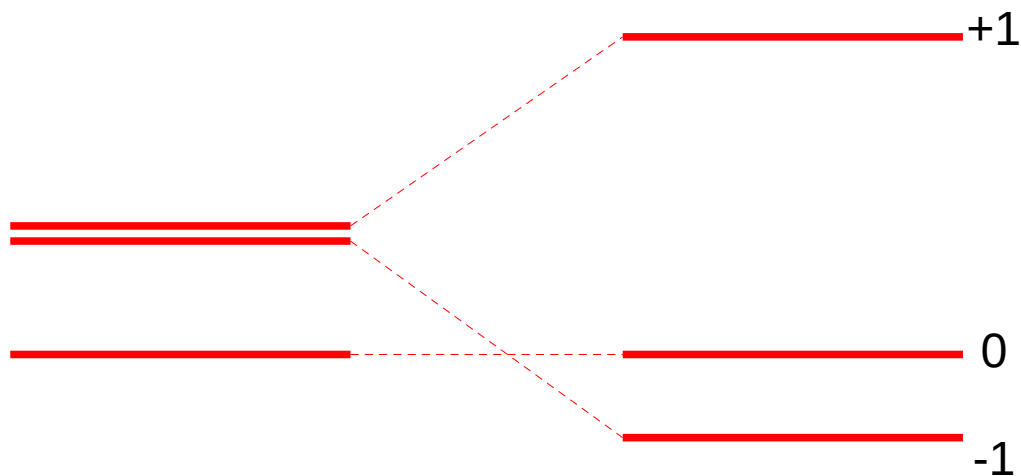
«Классический» ЭПР: релаксация



«Классический» ЭПР: тонкая структура спектра



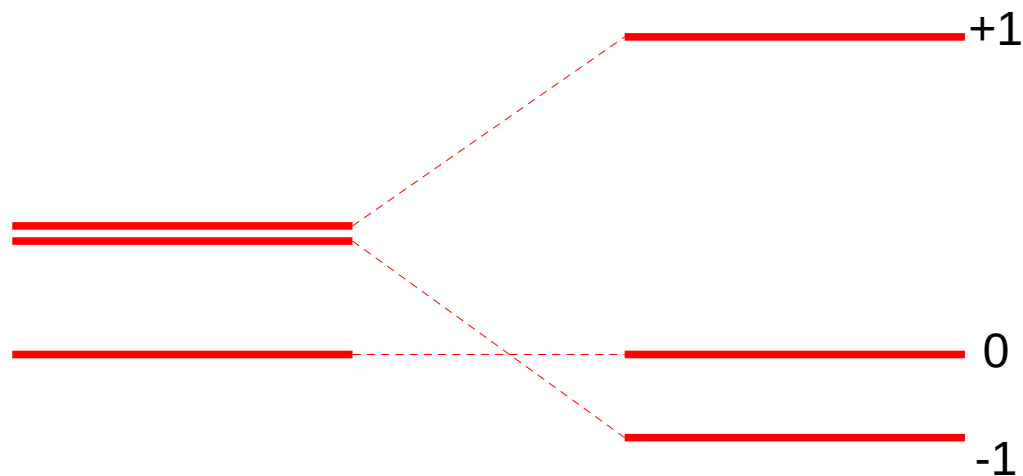
$$\hat{H} = D \hat{S}_z^2 + g \mu_B B \hat{S}_z$$



«Классический» ЭПР: тонкая структура спектра



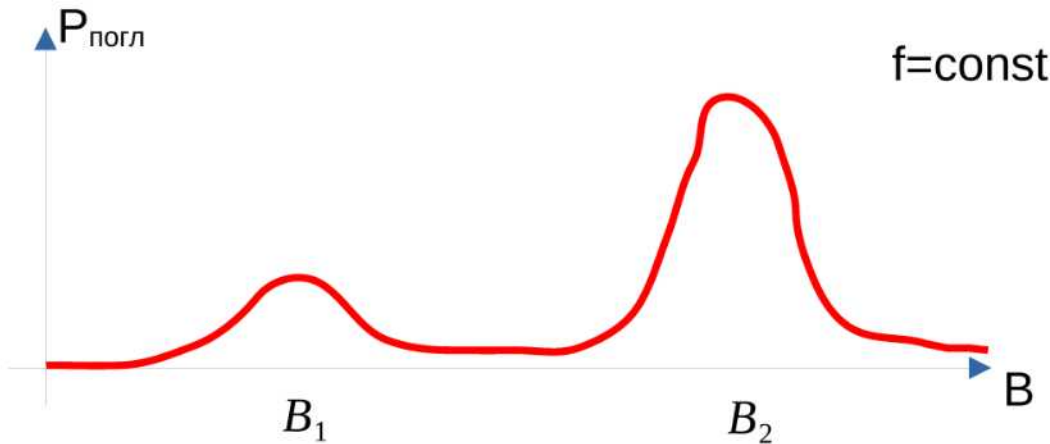
$$\hat{H} = D \hat{S}_z^2 + g \mu_B B \hat{S}_z$$



$$\begin{cases} \hbar \omega_1 = |D - g \mu_B B| \\ \hbar \omega_2 = |D + g \mu_B B| \end{cases} \quad \omega_1 \neq \omega_2$$

«Классический» ЭПР: тонкая структура

СПЕКТР



если $D > 0$, $g \mu_B B > D$

$$B_1 = g \mu_B B - D$$

$$B_2 = g \mu_B B + D$$

$$I_{mn} \propto \frac{1}{Z} (e^{-E_m/T} - e^{-E_n/T})$$

+1

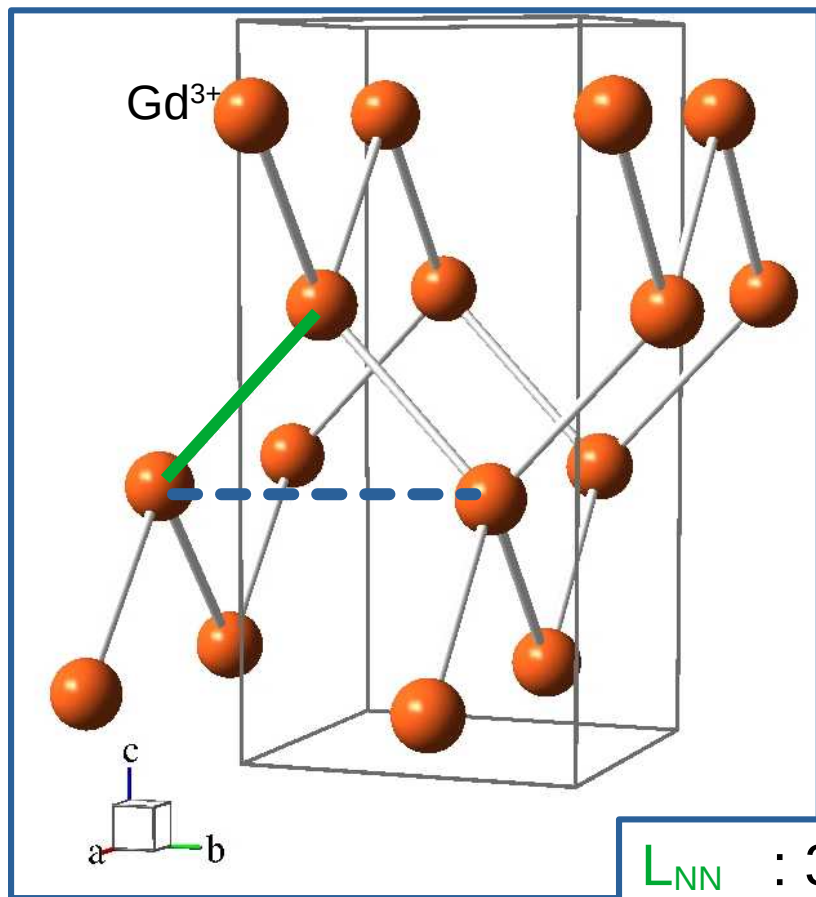
0

-1

$$\begin{cases} \hbar \omega_1 = |D - g \mu_B B| \\ \hbar \omega_2 = |D + g \mu_B B| \end{cases}$$

$$\omega_1 \neq \omega_2$$

Пример: параметры спинового гамильтониана в LiGdF_4



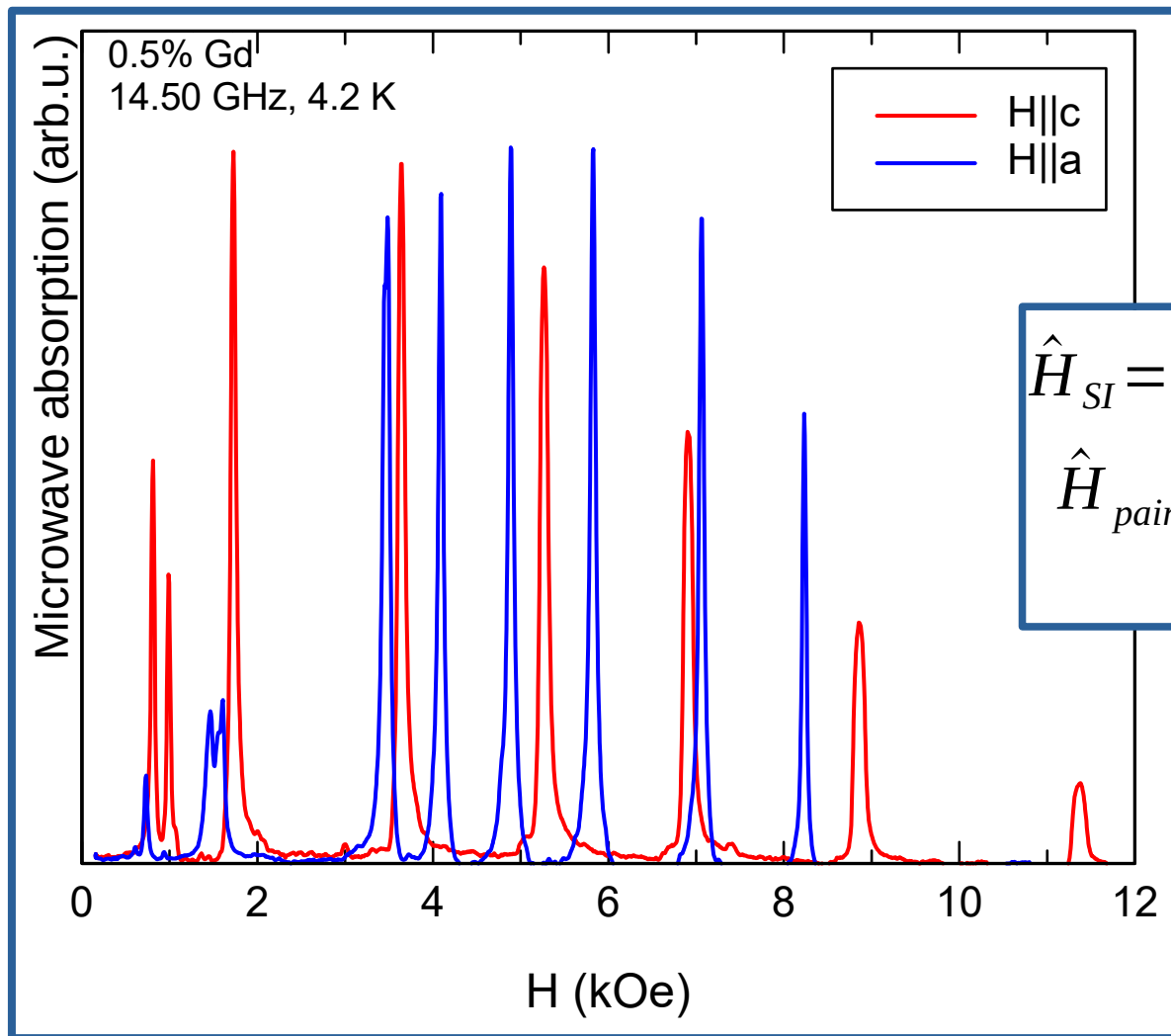
L_{NN} : 3.78Å
 L_{NNN} : 5.21Å

$$\hat{H}_{SI} = g \mu_B \vec{H} \hat{S} + D \hat{S}_z^2 + d \hat{S}_z^4 + e \hat{S}_x^2 \hat{S}_y^2$$

$$\hat{H}_{pair} = \hat{H}_{SI}^{(1)} + \hat{H}_{SI}^{(2)} + \hat{H}_{dd} + J \left(\hat{S}_1 \hat{S}_2 \right)$$

$$S(\text{Gd}^{3+}) = 7/2$$

Пример: параметры спинового гамильтониана в LiGdF_4



$$\hat{H}_{SI} = g \mu_B \vec{H} \hat{S} + D \hat{S}_z^2 + d \hat{S}_z^4 + e \hat{S}_x^2 \hat{S}_y^2$$

$$\hat{H}_{pair} = \hat{H}_{SI}^{(1)} + \hat{H}_{SI}^{(2)} + \hat{H}_{dd} + J \left(\hat{S}_1 \hat{S}_2 \right)$$

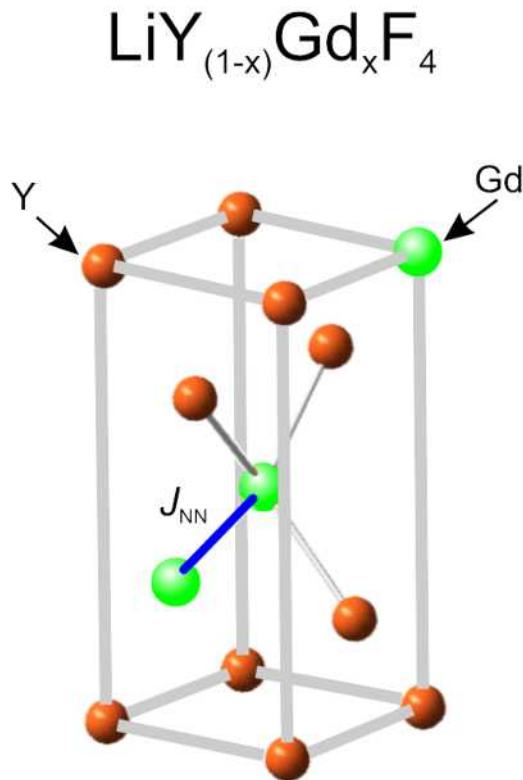
$$S(\text{Gd}^{3+}) = 7/2$$

$$D/k_B = -(0.096 \pm 0.002) \text{ K}$$

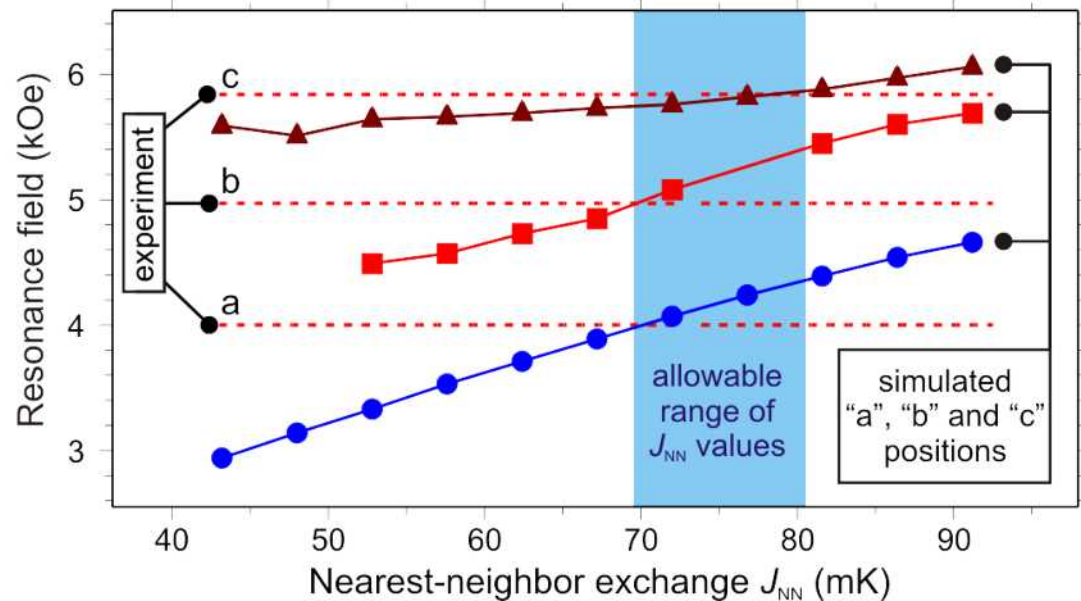
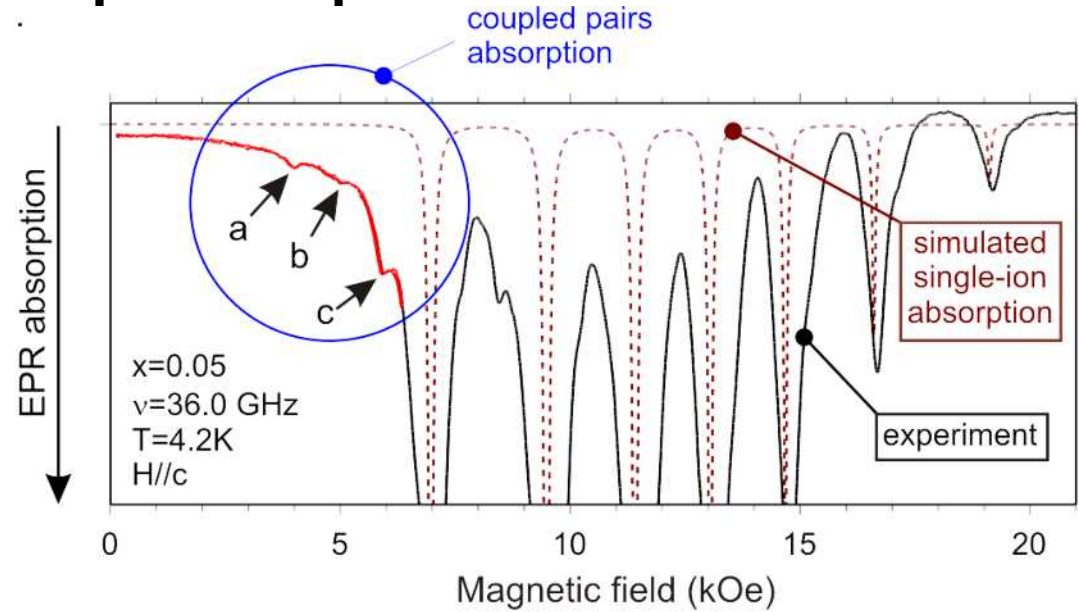
$$d/k_B = -(0.0018 \pm 0.0006) \text{ K}$$

$$e/k_B = (0.0020 \pm 0.0002) \text{ K}$$

Пример: параметры спинового



Y^{3+} – nonmagnetic
 Gd^{3+} – $S=7/2$



Немного о технике



Немного о технике

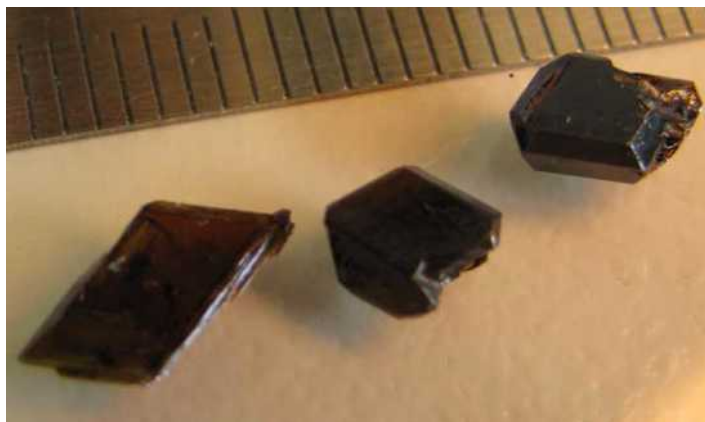
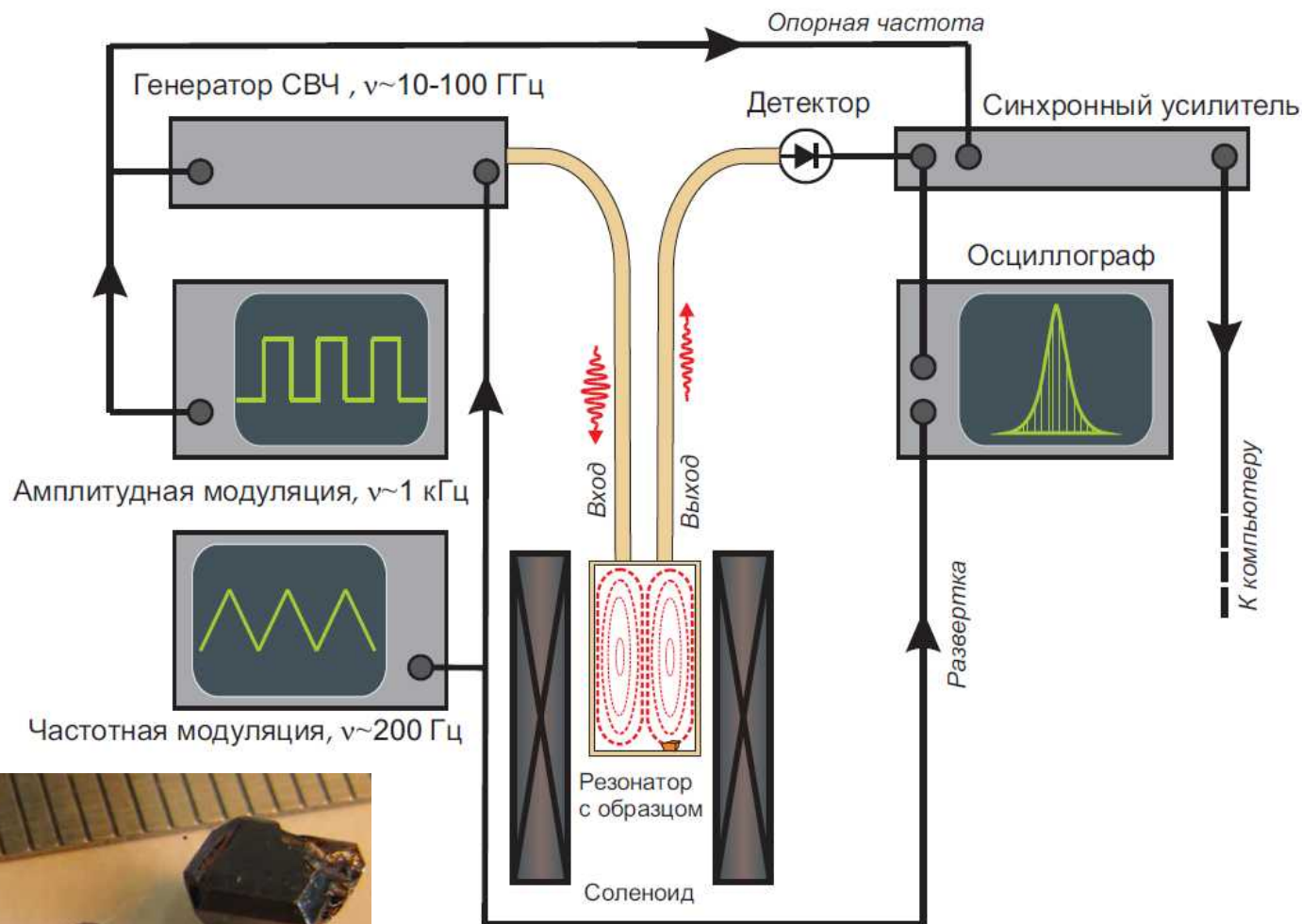


рис. из диссертации К.Ю.Поварова (ИФП, 2013)

фото из диссертации В.Н.Глазкова (ИФП, 2023)

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

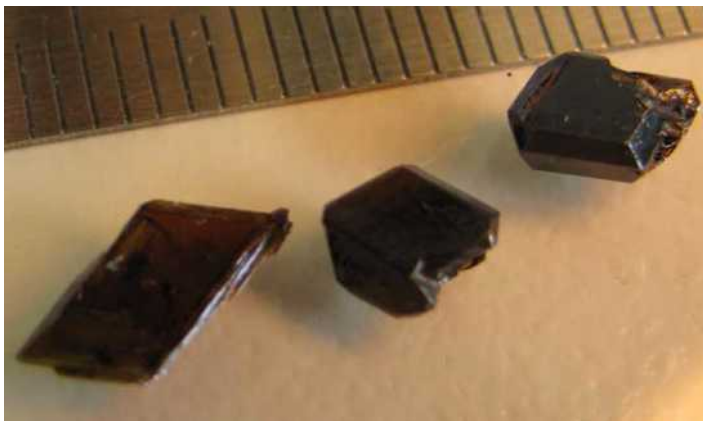
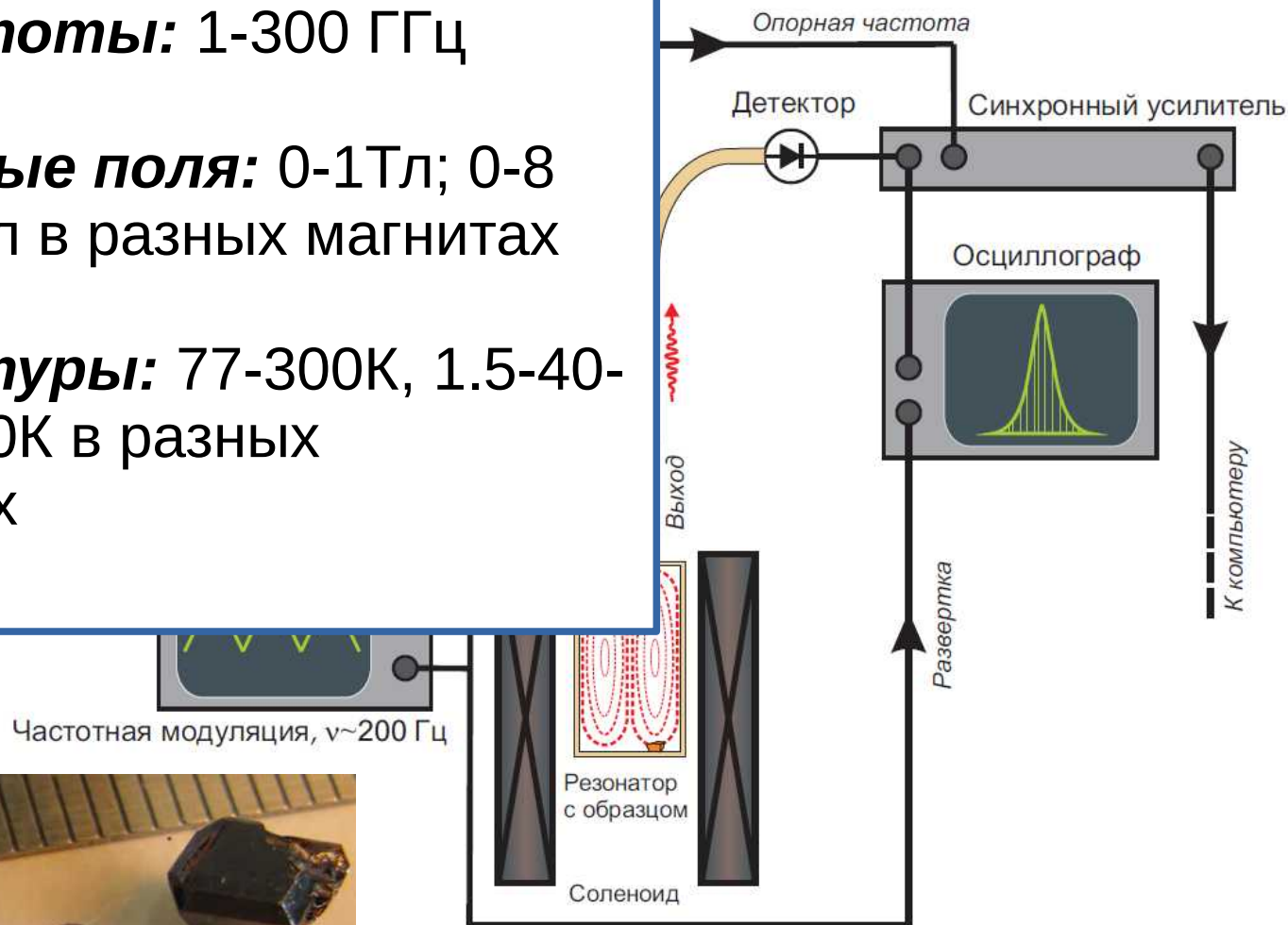


рис. из диссертации К.Ю.Поварова (ИФП, 2013)

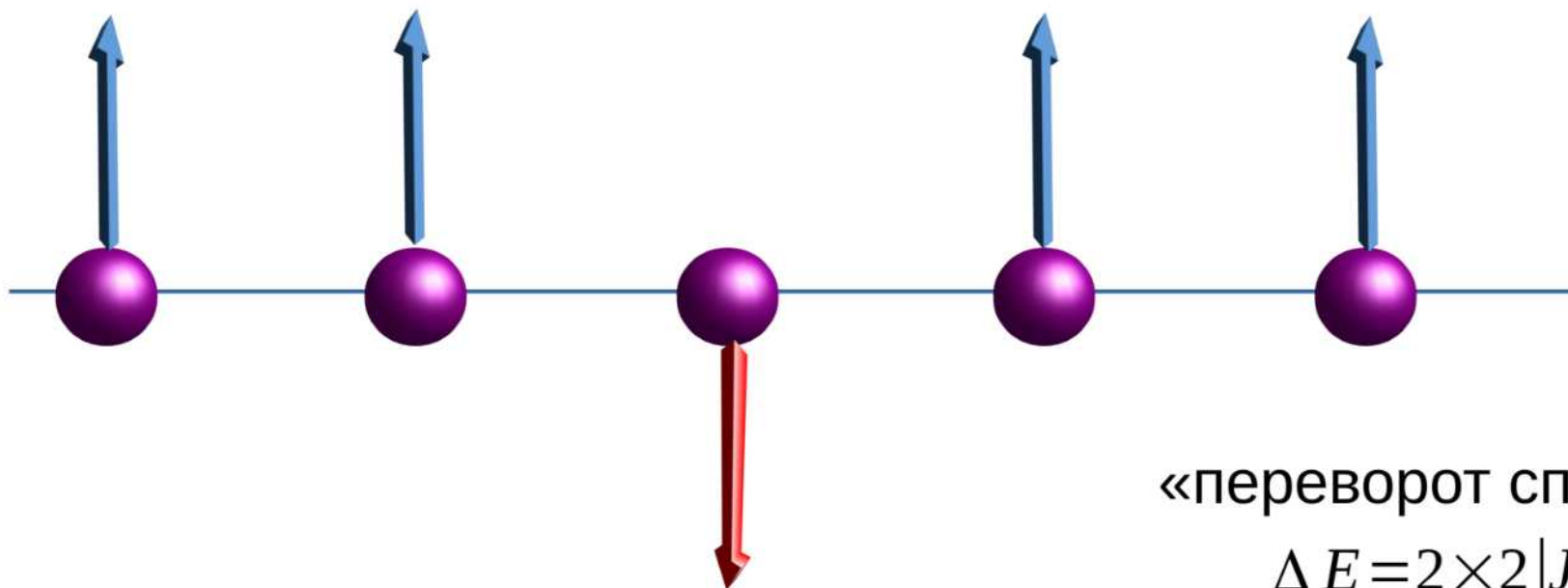
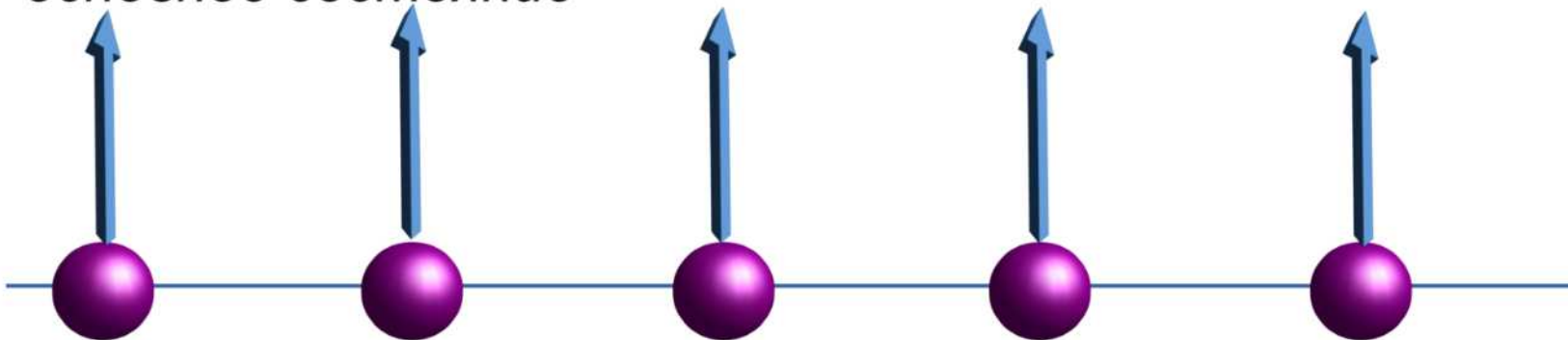
фото из диссертации В.Н.Глазкова (ИФП, 2023)

Антиферромагнетики



Элементарные возбуждения ферромагнетика

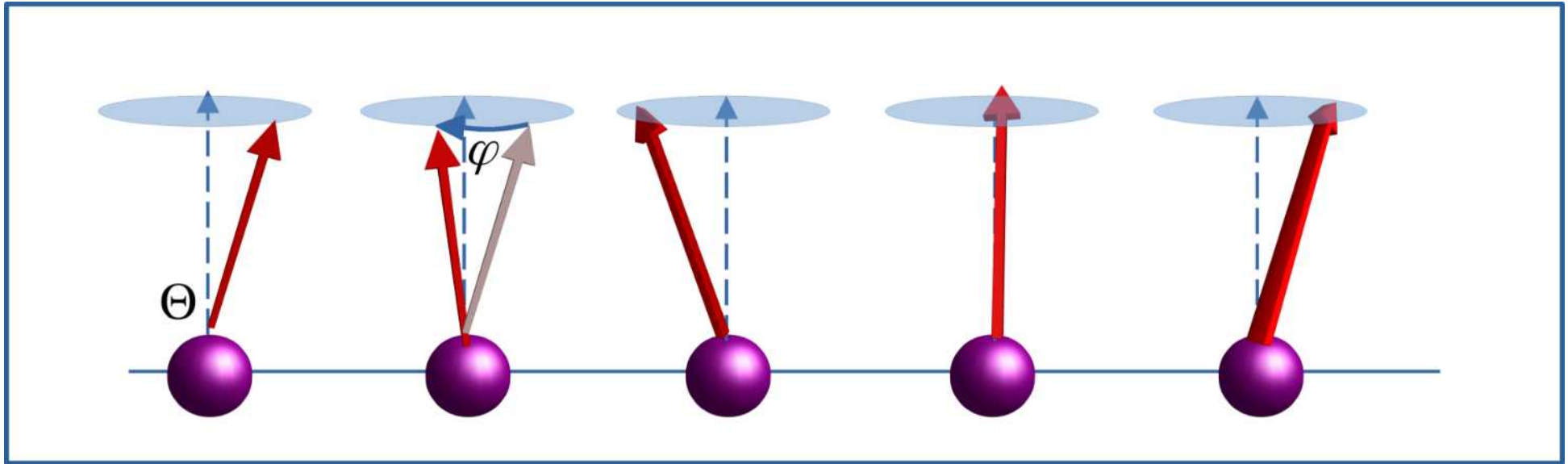
основное состояние



«переворот спина»?

$$\Delta E = 2 \times 2 |J| S^2$$

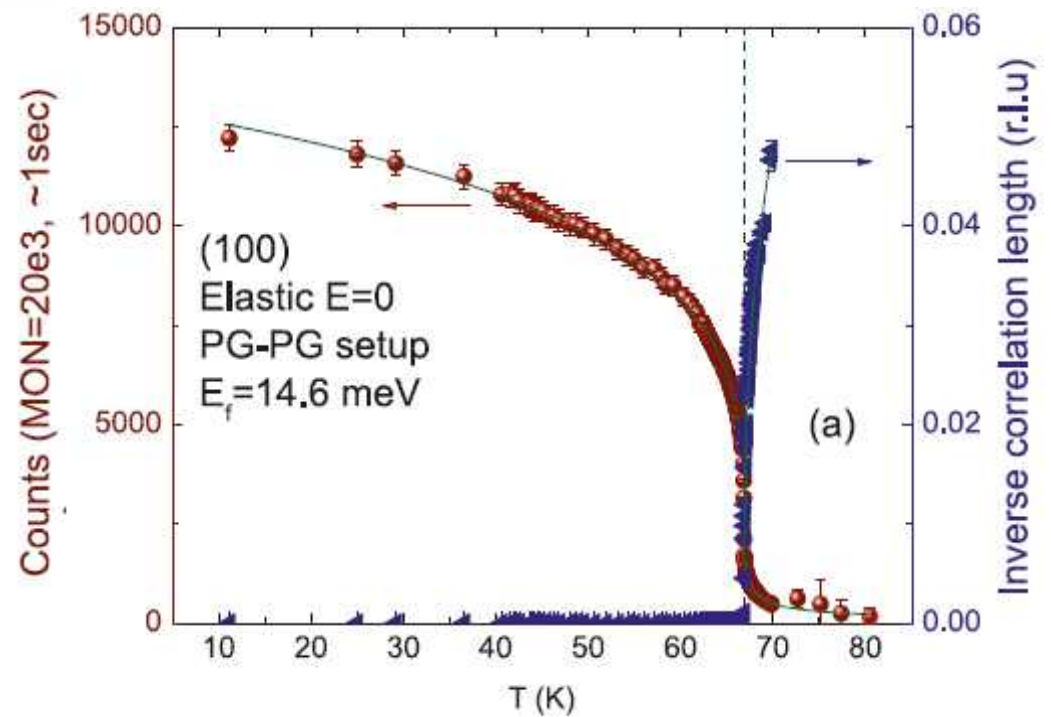
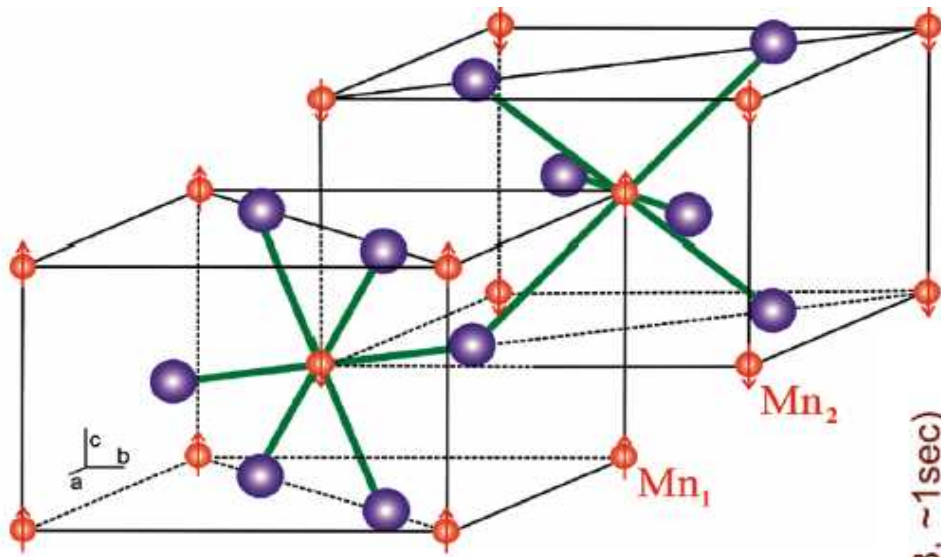
Спиновые волны: элементарные возбуждения «классического» гейзенберговского (ферро)магнетика



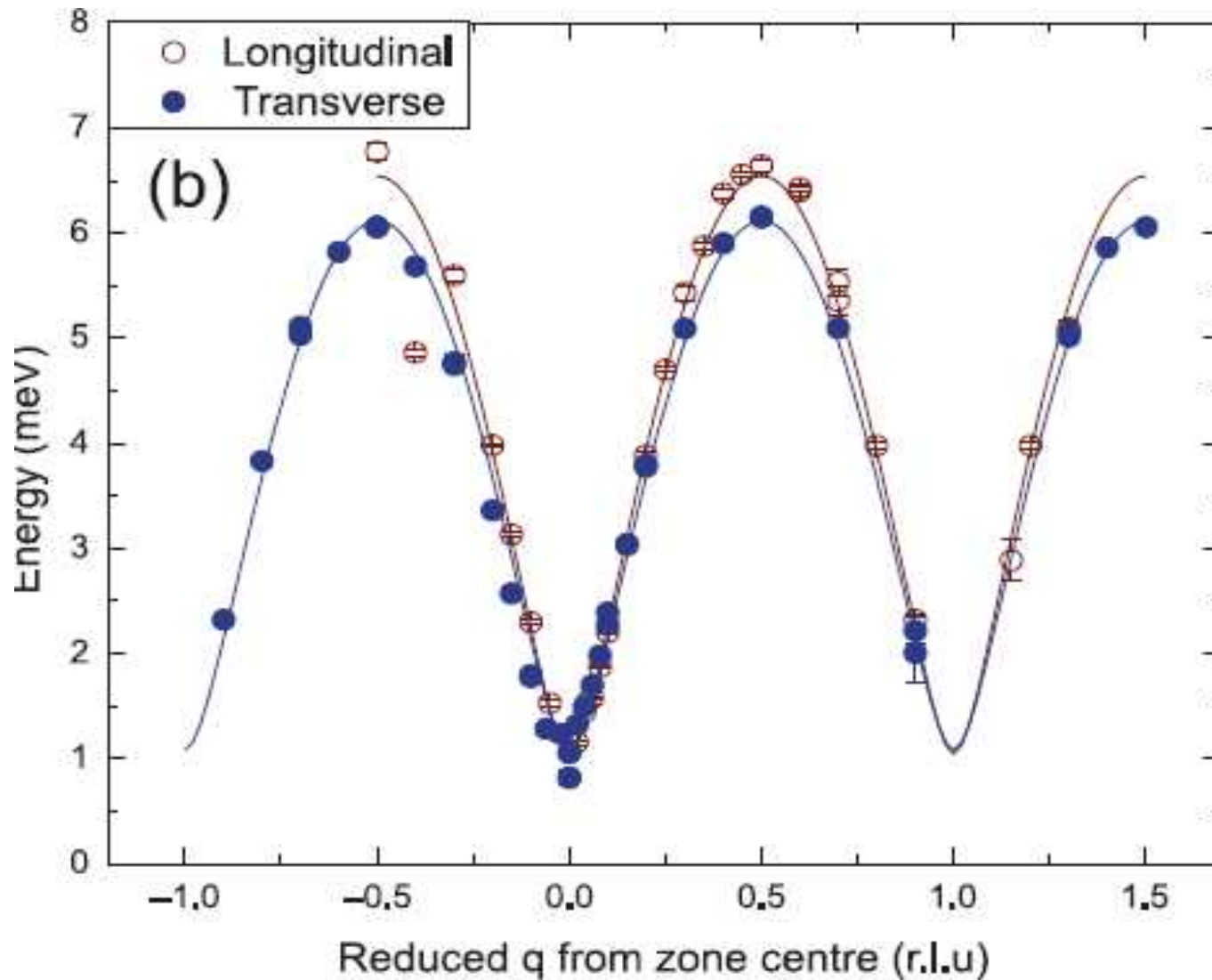
$$E = J \sum \vec{S}_i \vec{S}_{i+1} = J N S^2 \cos^2 \Theta + J N S^2 \sin^2 \Theta \cos \varphi = E_0 - 2 J S^2 N \sin^2 \Theta \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

$$\varphi_{\min} = \frac{2\pi}{N} \quad E \approx E_0 - 2 \frac{J S^2 \pi^2}{N} \sin^2 \Theta$$

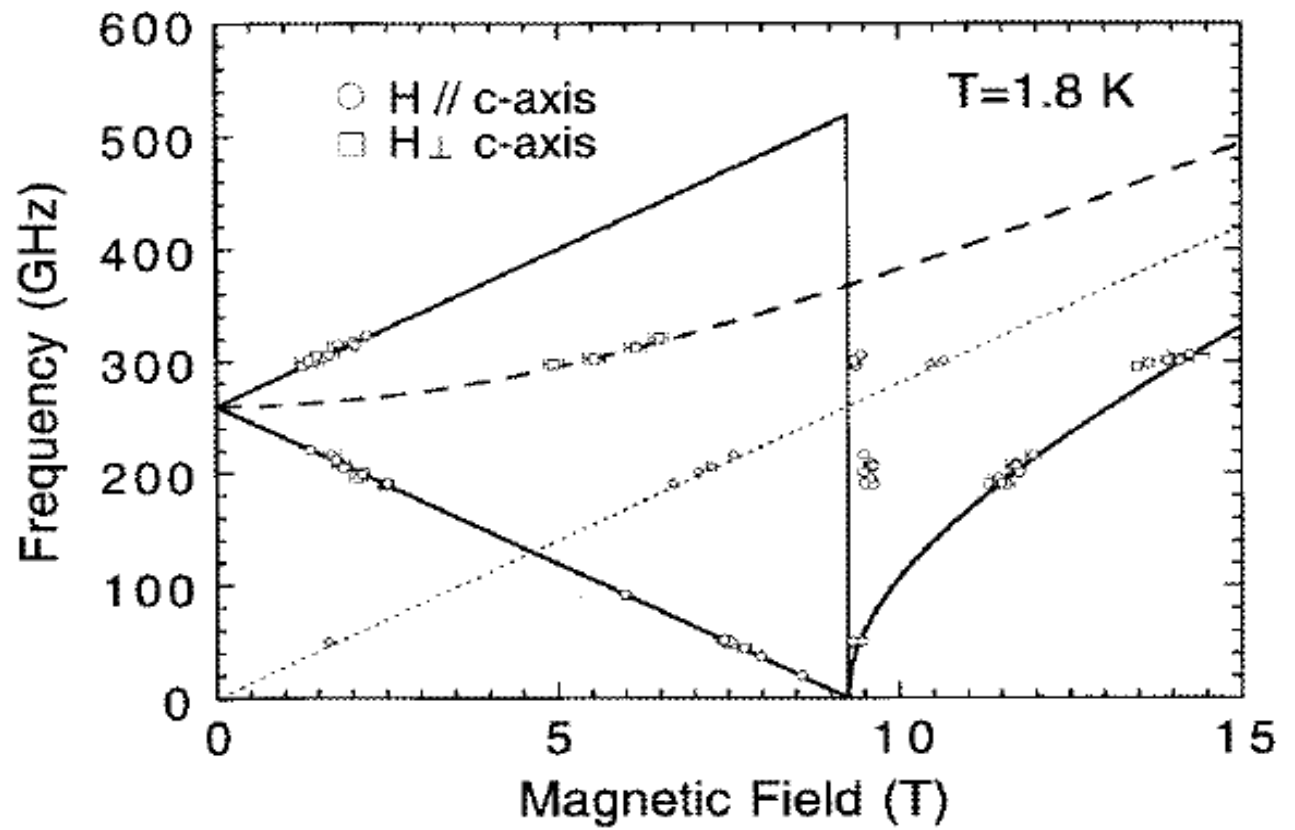
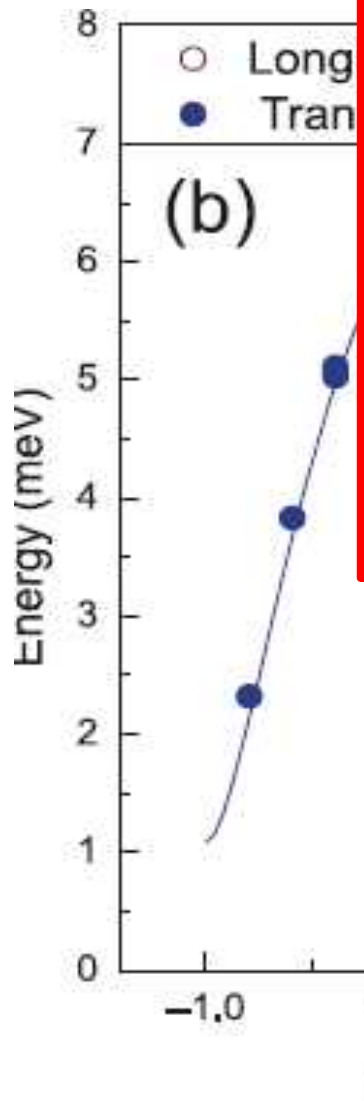
Спектр спиновых волн в антиферромагнетике



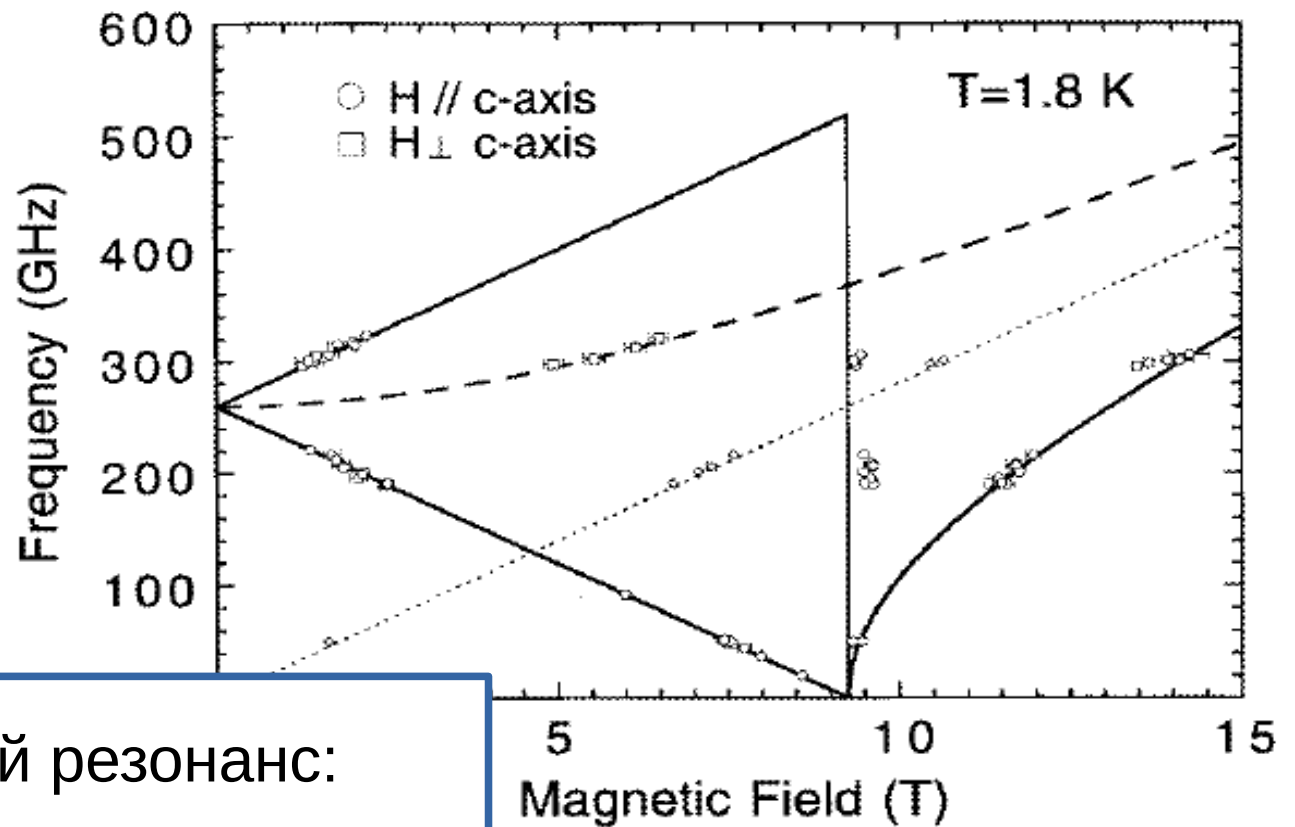
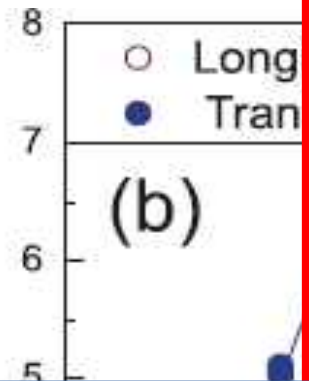
Спектр спиновых волн в антиферромагнетике



Спектр ант



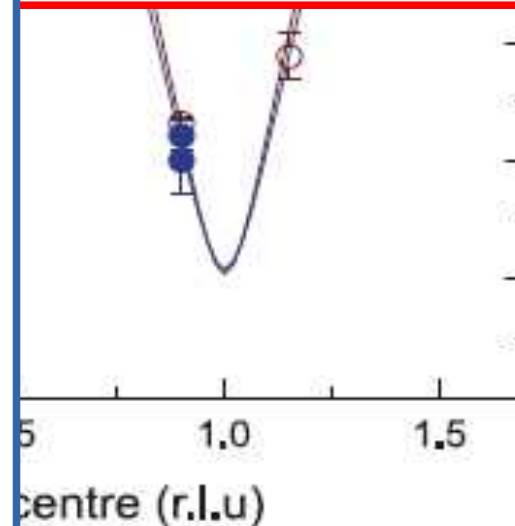
Спектр ант



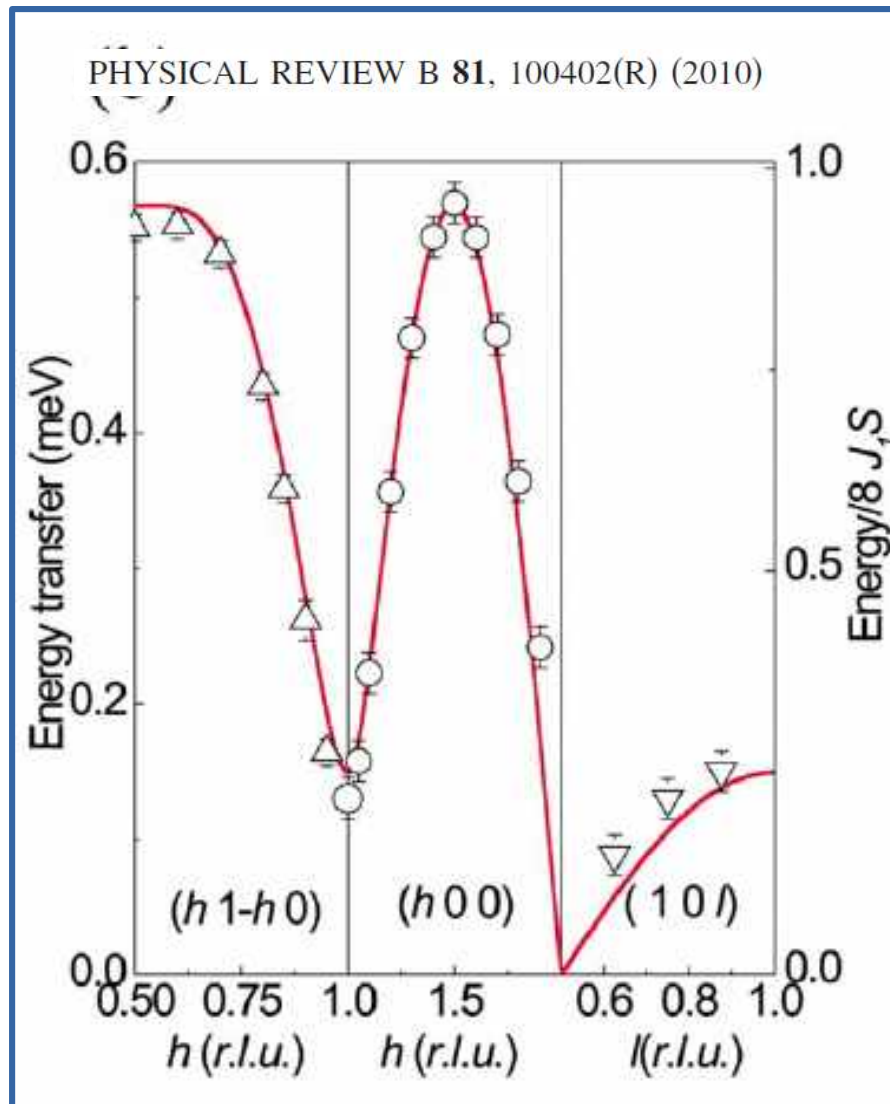
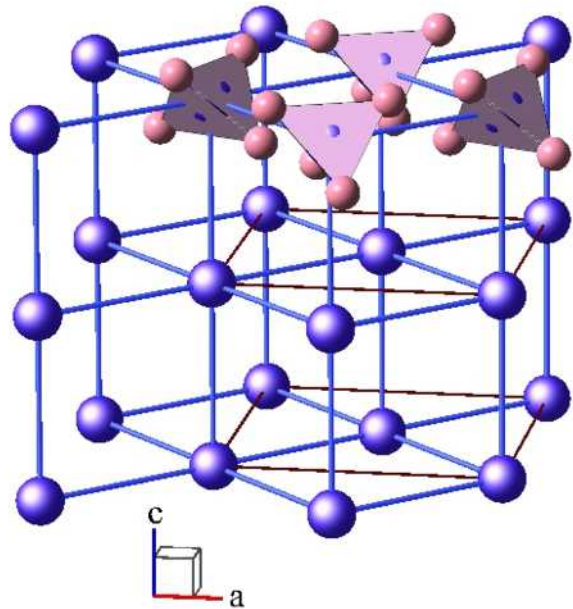
Антиферромагнитный резонанс:

- только в центре зоны ($q=0$)
- энергетическое разрешение на порядки лучше
- дешевле/быстрее/гибче

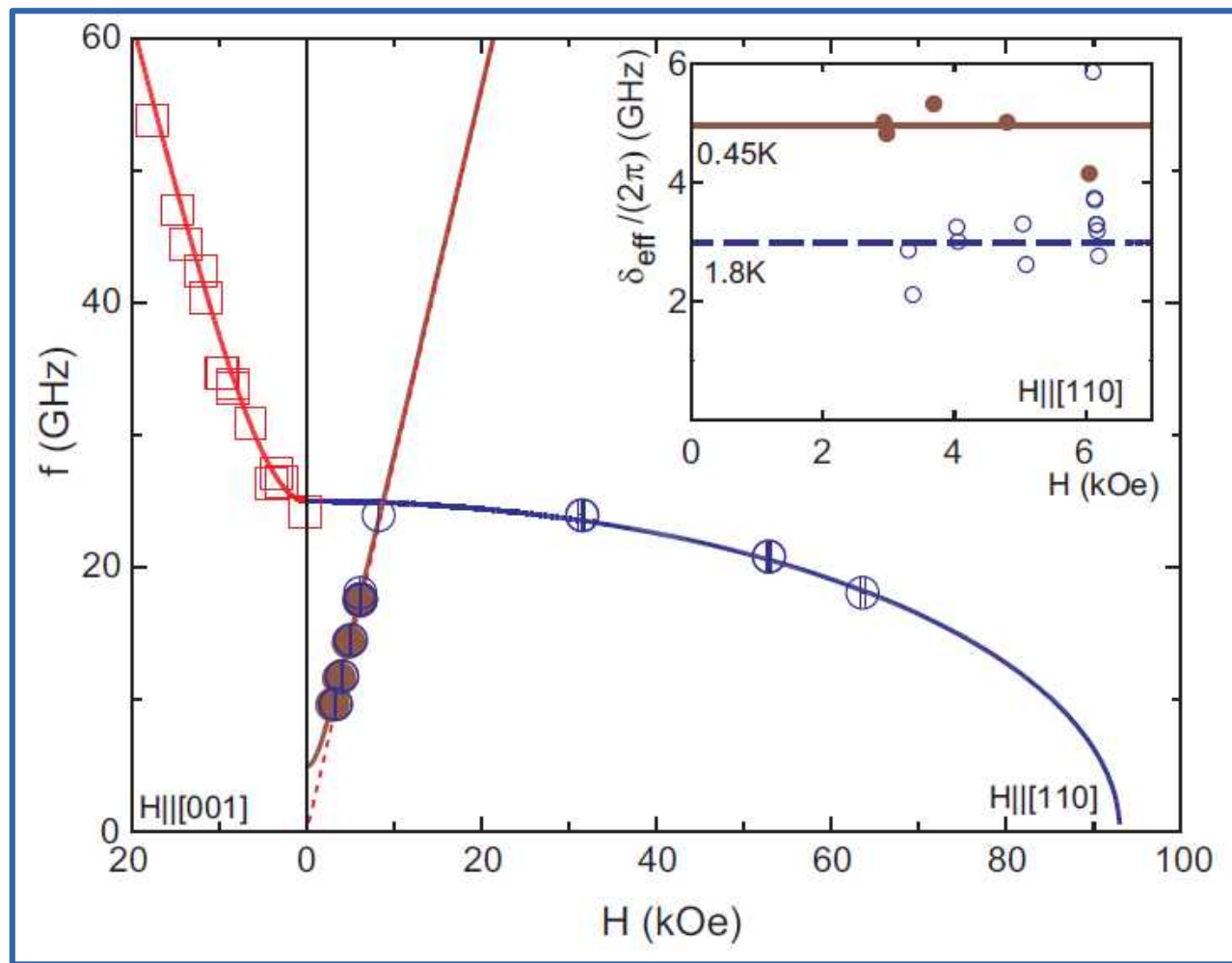
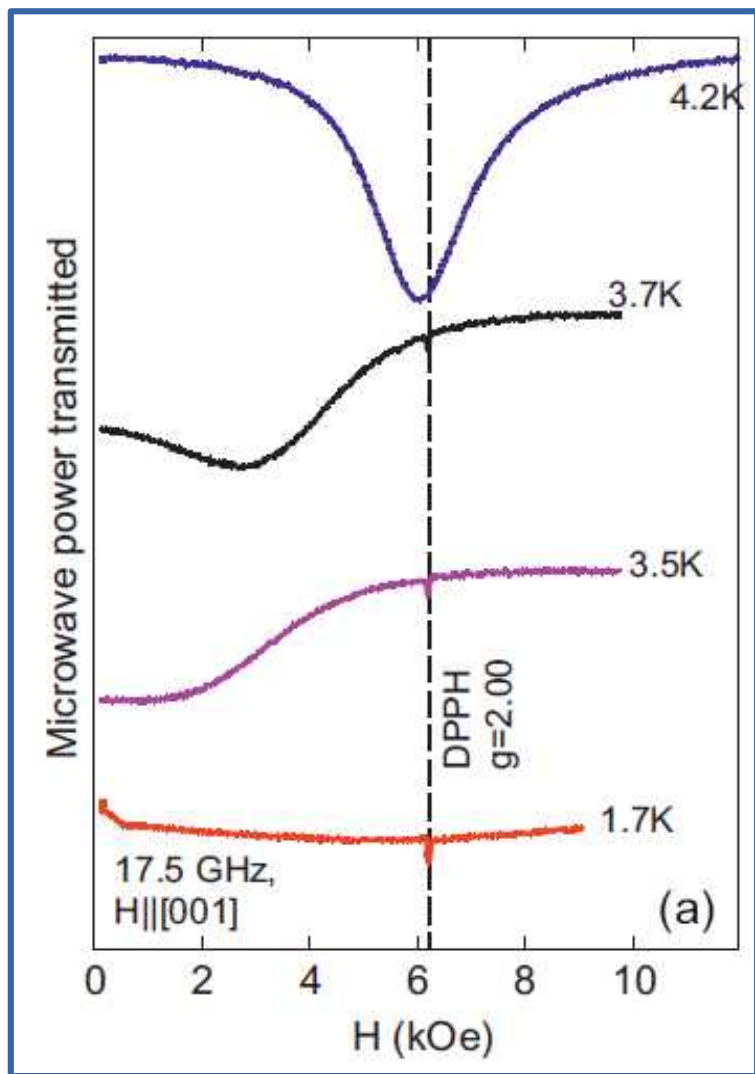
хорошо дополняющий метод
исследования



Пример: антиферромагнитный резонанс в Ba_2MnGeO_7



Пример: антиферромагнитный резонанс в Ba_2MnGeO_7



Низкотемпературные парамагнетики

«Обычные» антиферромагнетики

$$\hat{H} = \sum_{i,j} J_{ij} \hat{S}_i \hat{S}_j$$

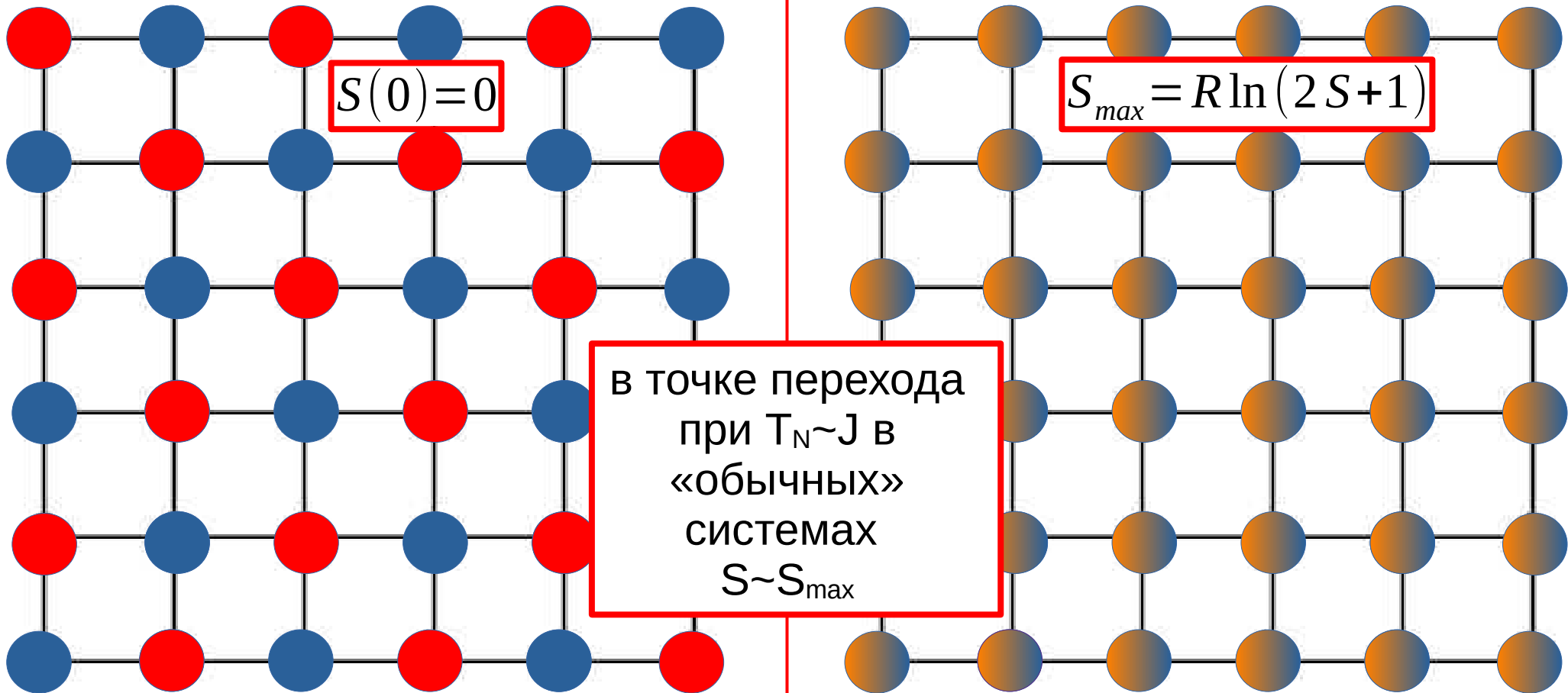
$$S(0) = 0$$

$$S_{max} = R \ln(2S+1)$$

в точке перехода
при $T_N \sim J$ в
«обычных»
системах
 $S \sim S_{max}$

упорядоченная фаза $T < T_N \sim J$

парамагнитная фаза $T > T_N$

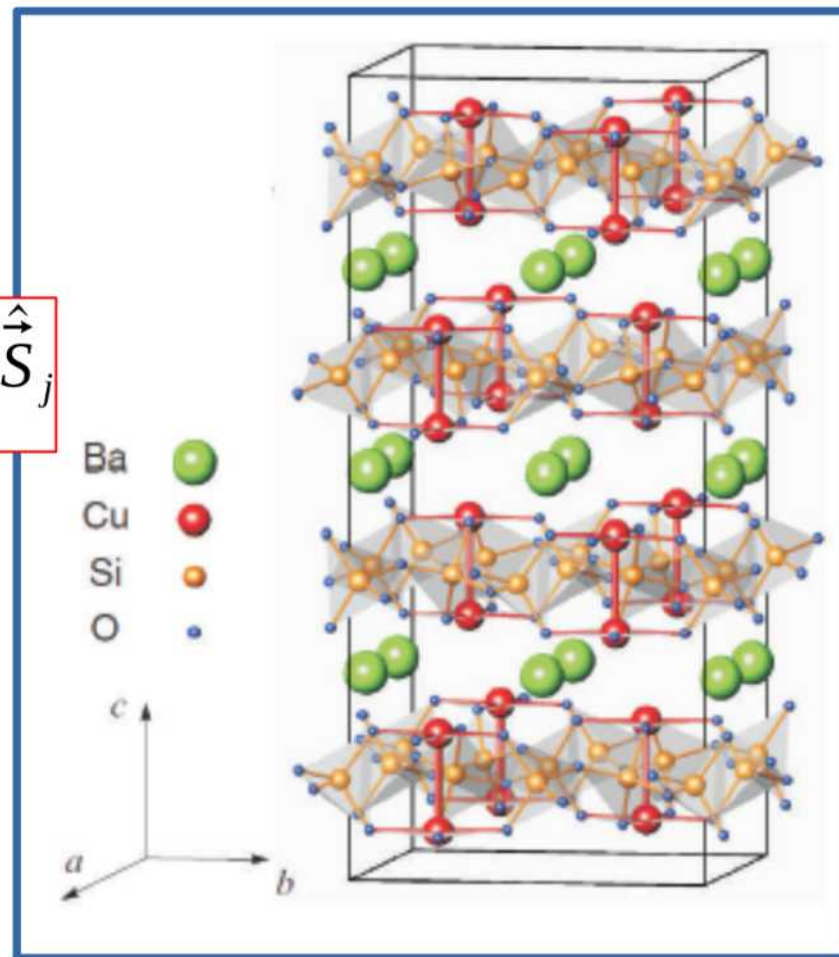
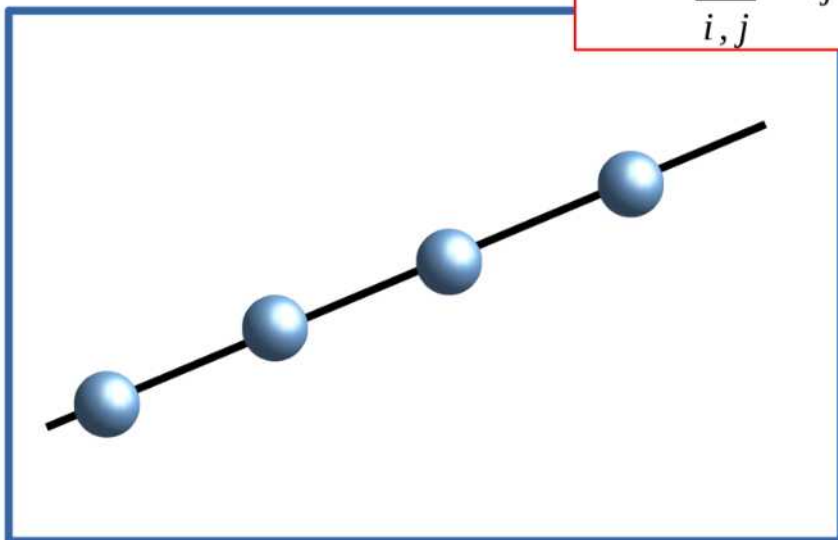


Низкотемпературные парамагнетики

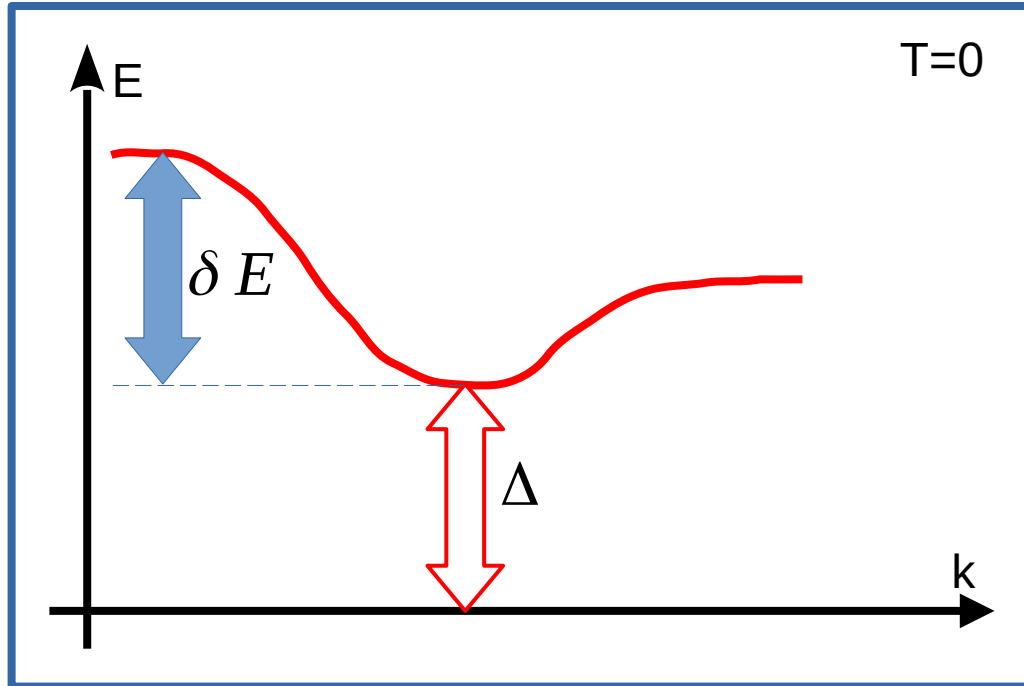
Спиновые системы остающиеся в парамагнитном состоянии при $T \ll J$,
когда энтропия $S \ll S_{\max}$

При $T \rightarrow 0$ описываются в терминах квазичастичных возбуждений.

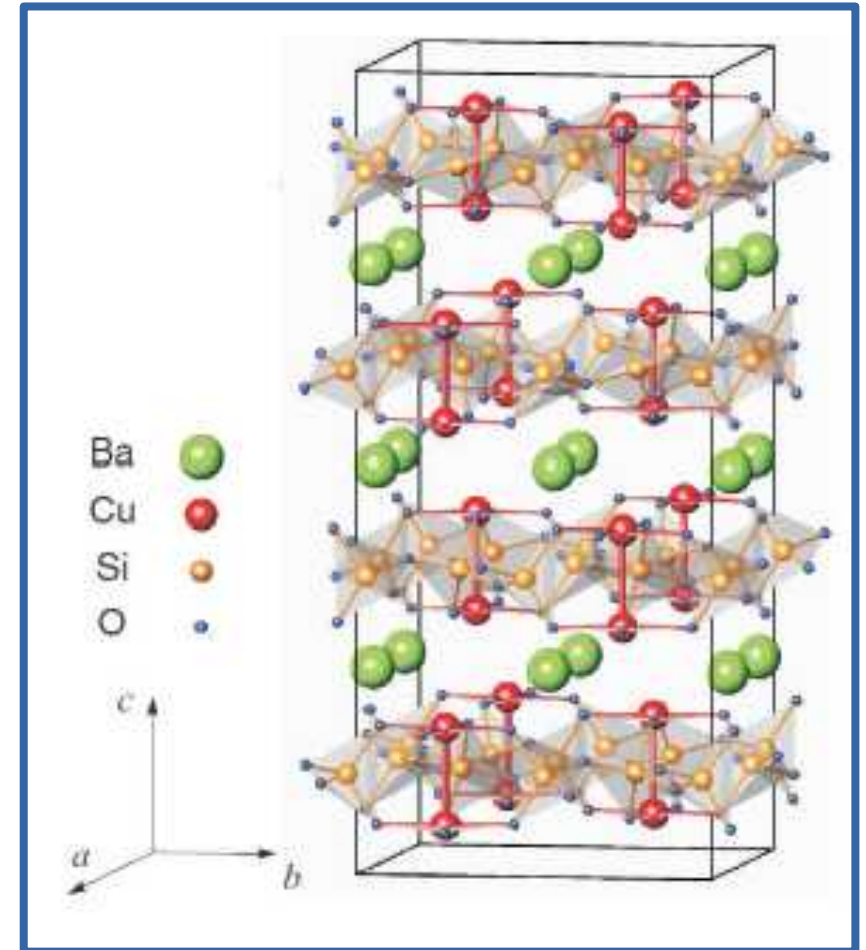
$$\hat{H} = \sum_{i,j} J_{ij} \hat{S}_i \hat{S}_j$$



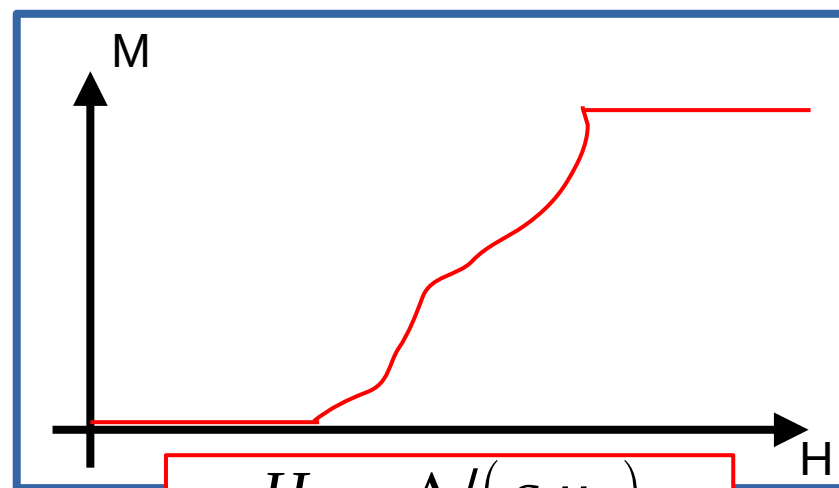
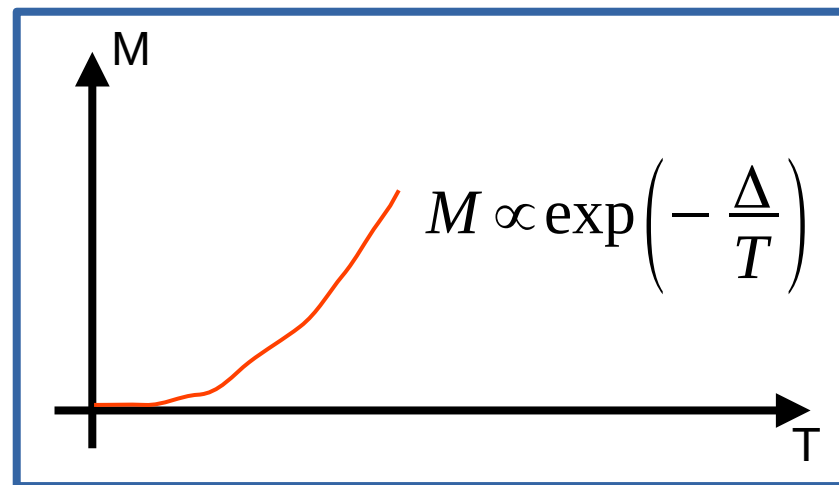
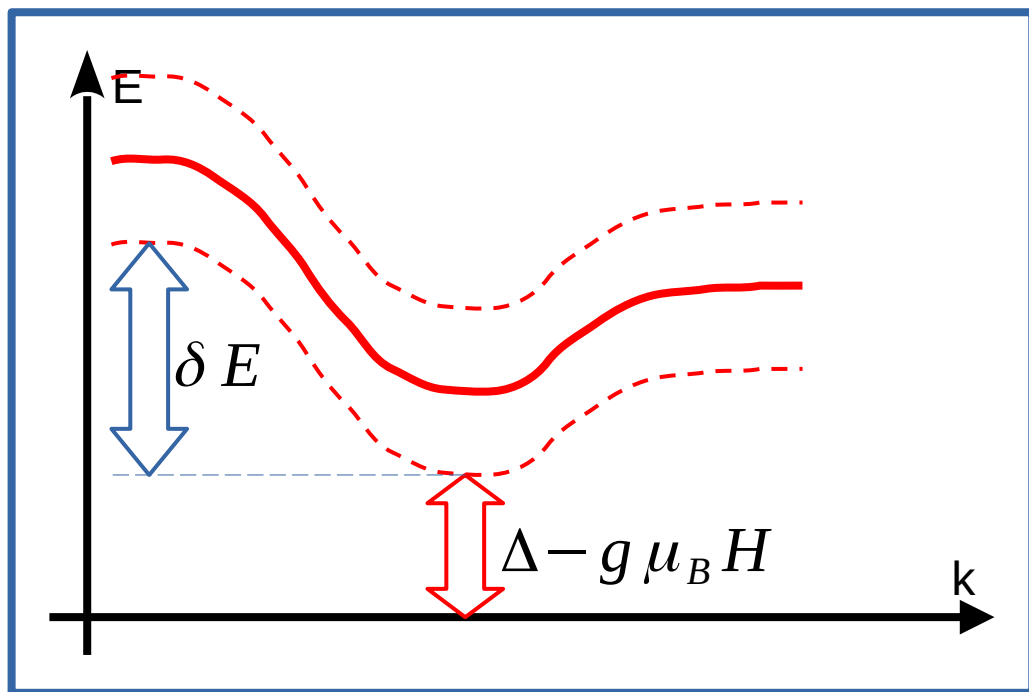
Низкотемпературные парамагнетики с щелевым спектром (спин-щелевые парамагнетики)



- отсутствие традиционного упорядочения вплоть до $T=0$
- синглетное основное состояние
- щель в спектре коллективных триплетных возбуждений



Спин-щелевые парамагнетики в магнитном поле



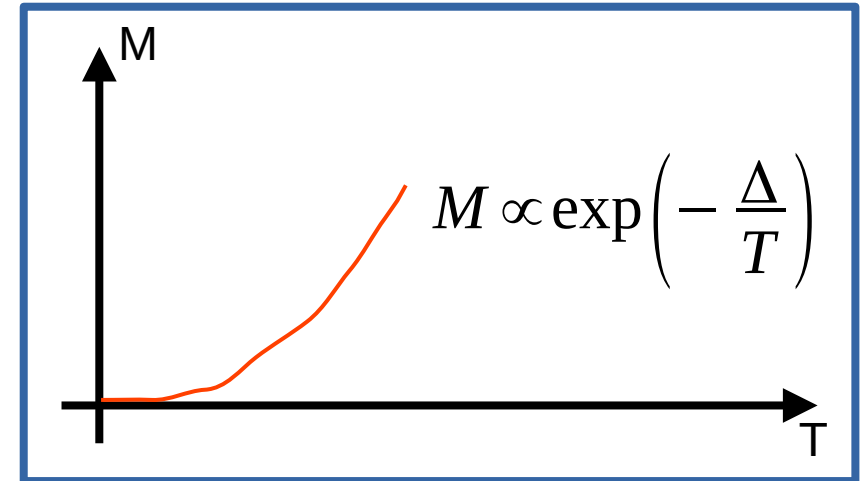
$$H_{c1} \sim \Delta / (g\mu_B)$$

$$H_{c2} \sim (\Delta E + \Delta) / (g\mu_B)$$

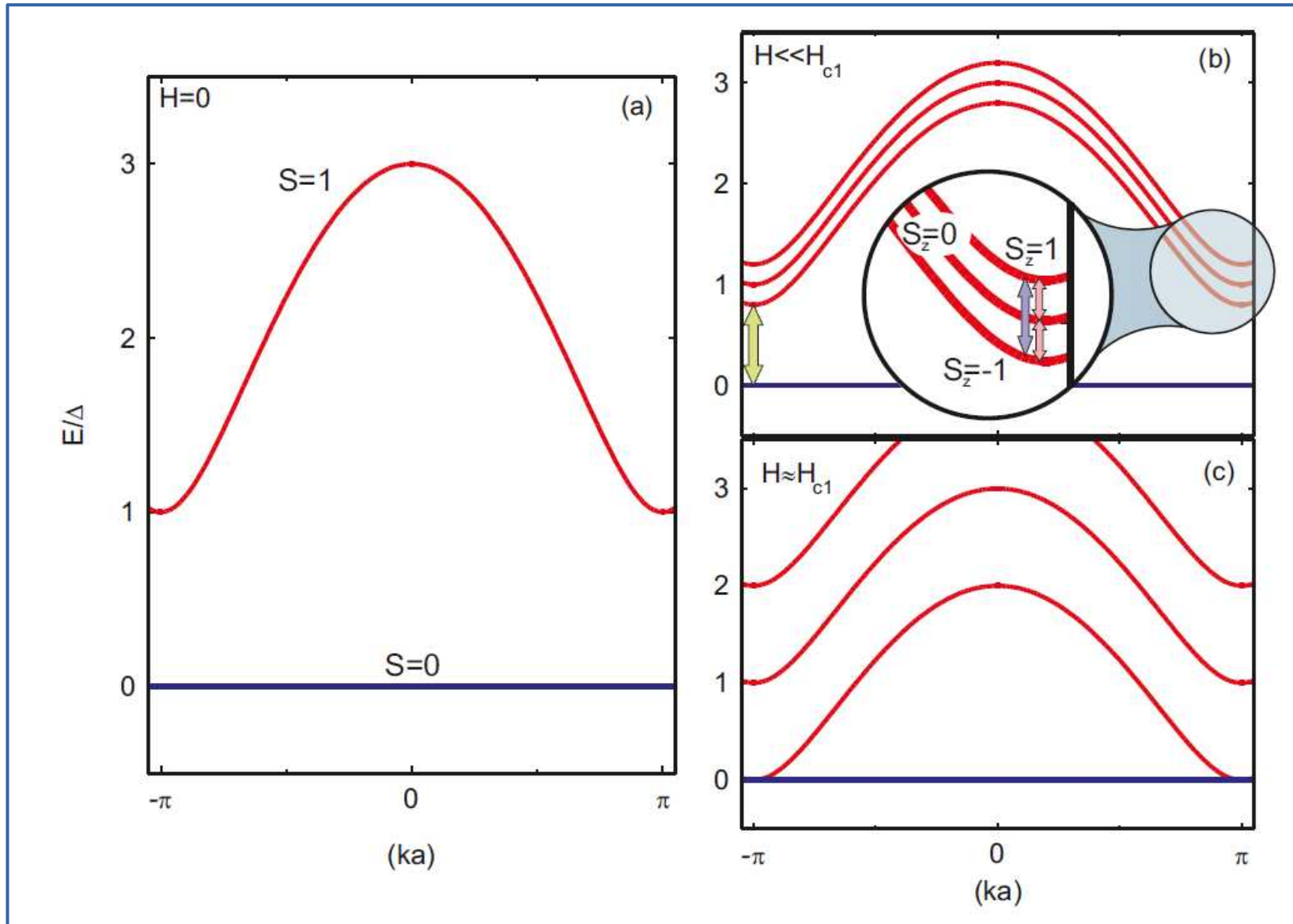
$T \ll \Delta$: Разреженный газ возбуждений

Задачи:

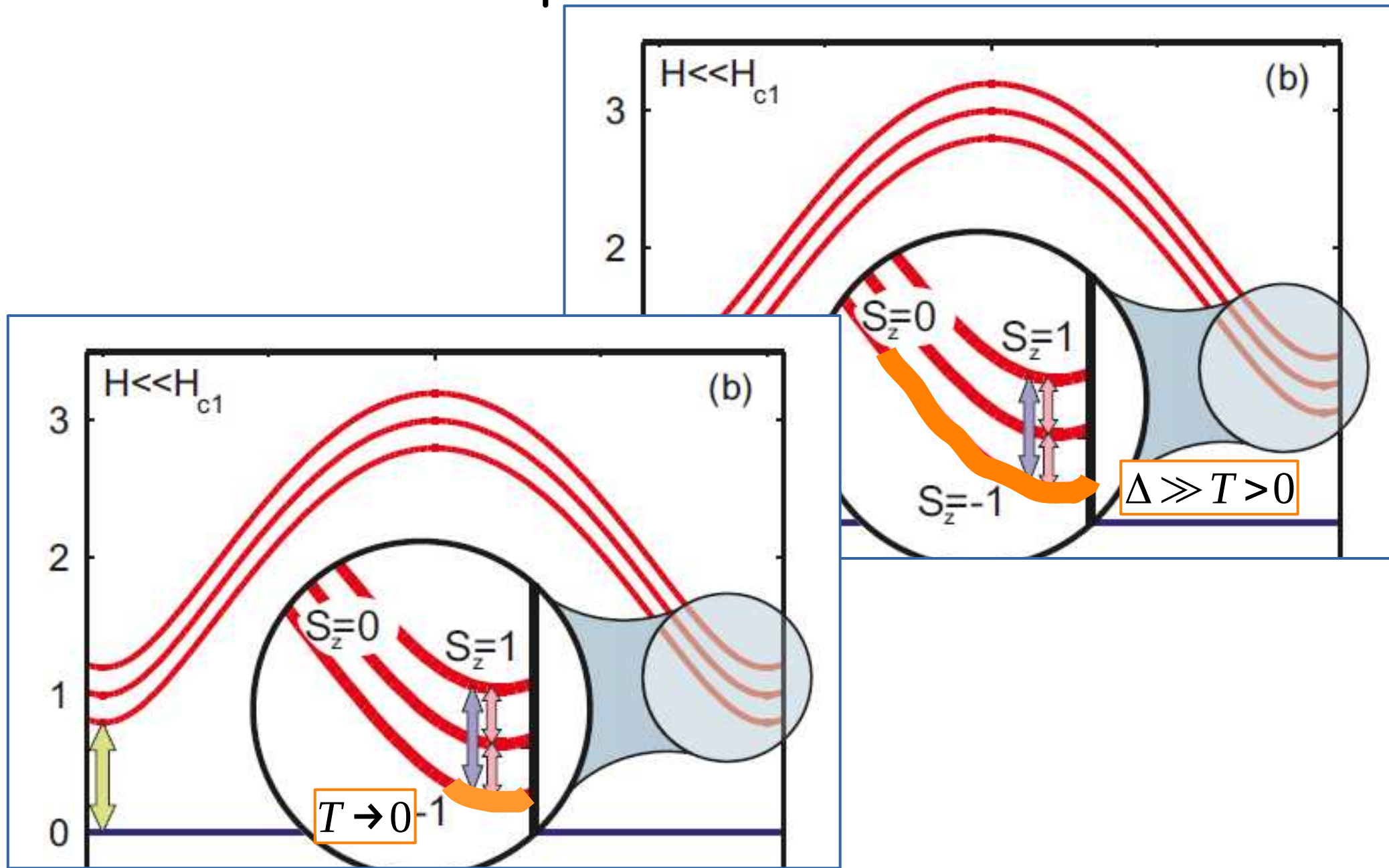
- эффективный гамильтониан для возбуждения с учетом негейзенберговских взаимодействий
- управление спектром возбуждений при помощи поля, управление концентрацией возбуждений при помощи изменения температуры
- взаимодействие возбуждений друг с другом



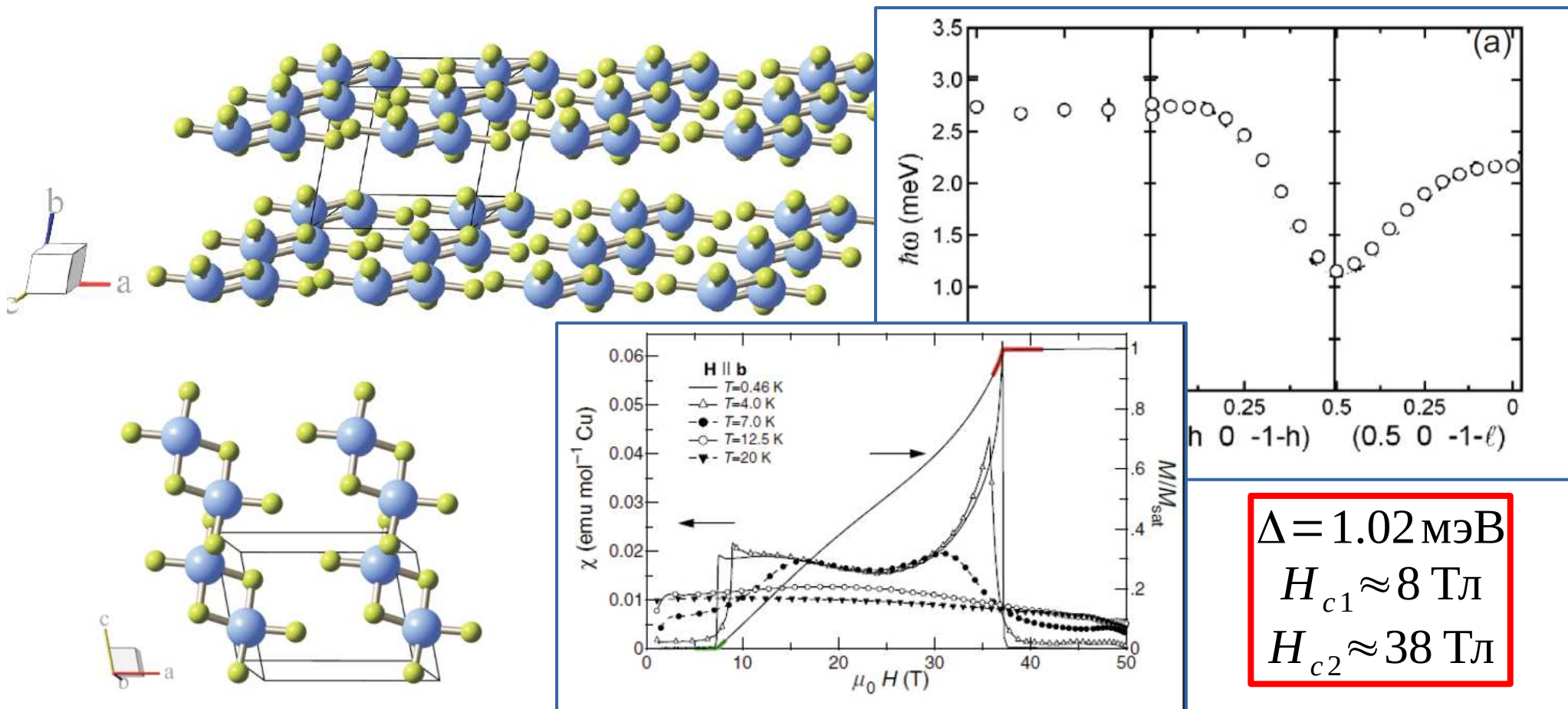
ЭСР спектроскопия в спин-щелевых парамагнетиках



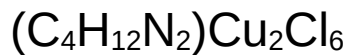
ЭСР спектроскопия в спин-щелевых парамагнетиках



ЭПР триплетных возбуждений на примере 2D димерной системы РНСС

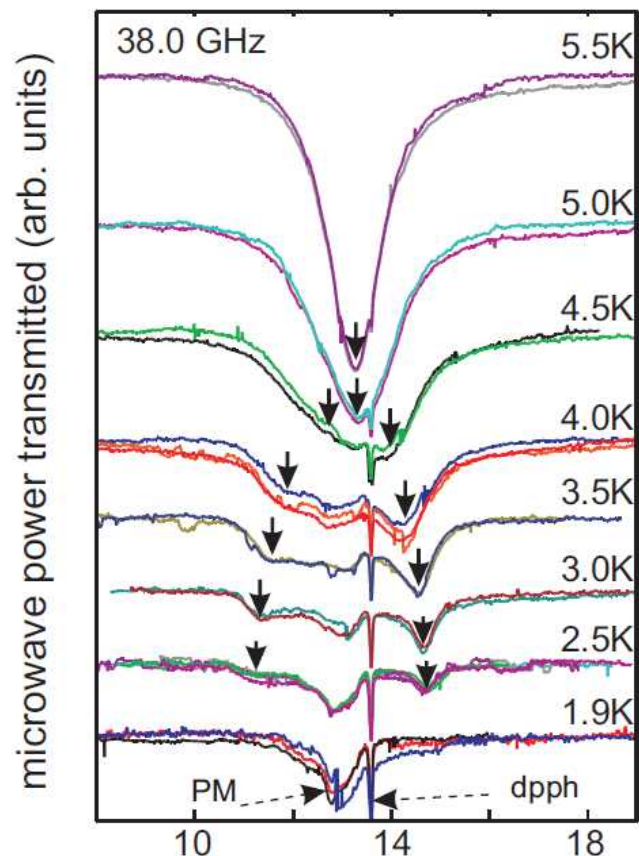
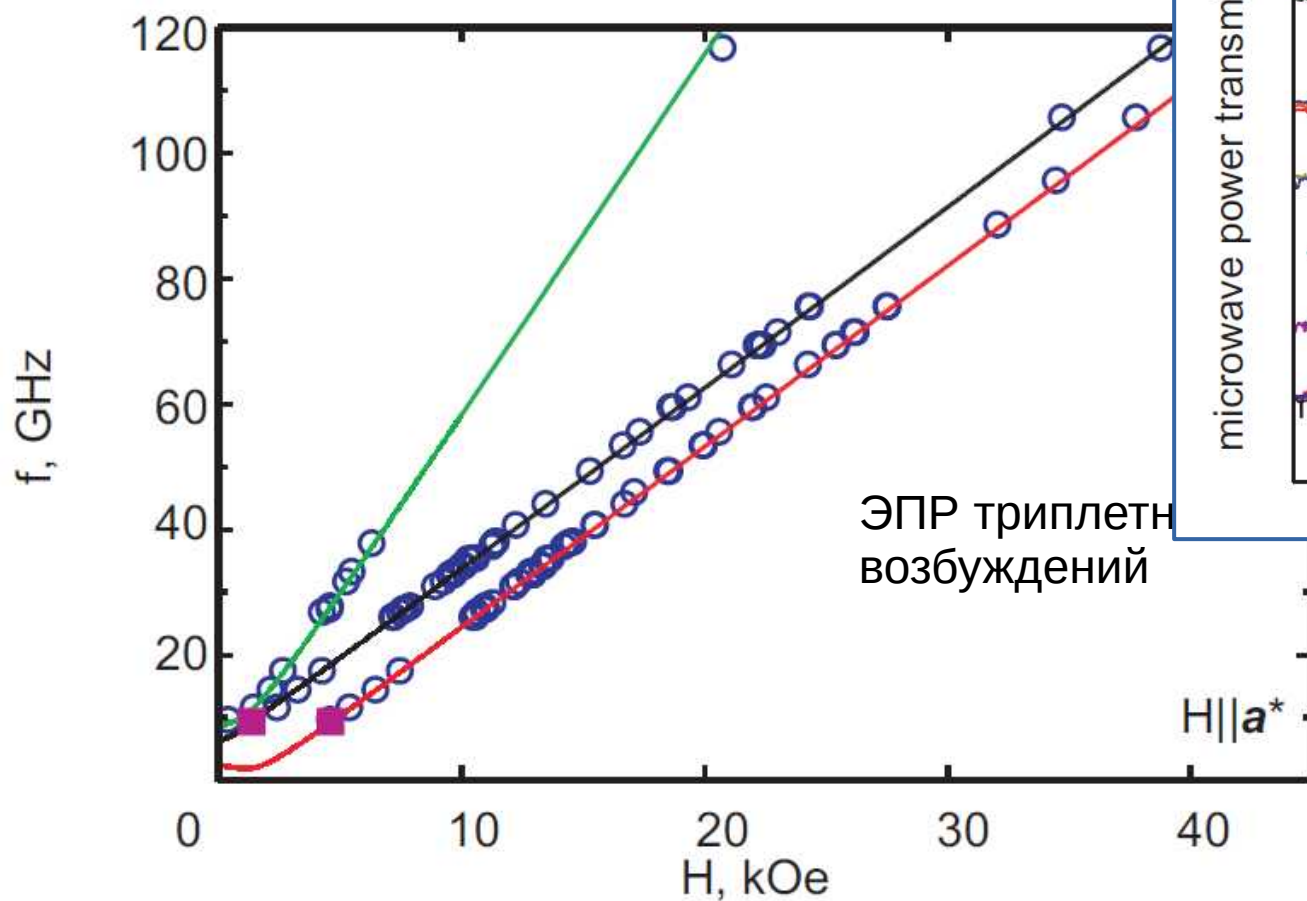


$\Delta = 1.02$ мЭВ
 $H_{c1} \approx 8$ Тл
 $H_{c2} \approx 38$ Тл

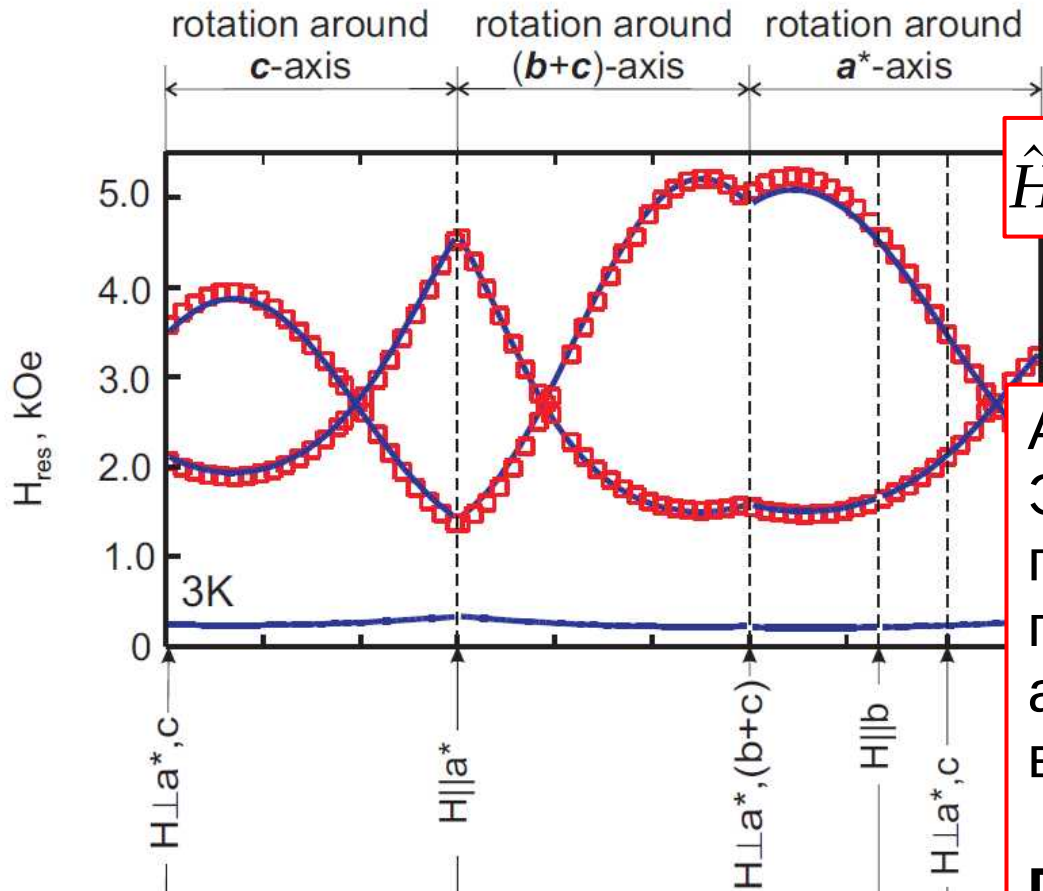


Магнитный резонанс в РНСС

В системе спинов $S=1/2$ коллективные возбуждения со спином $S=1$ чувствительны к эффективному кристаллическому полю



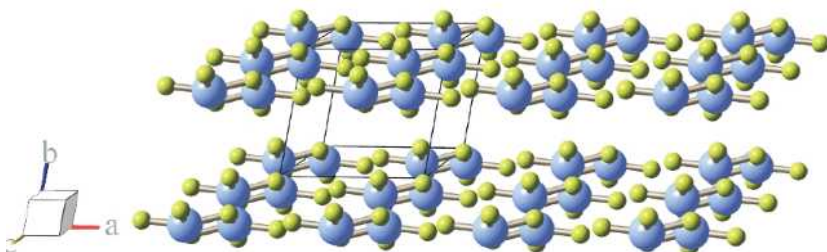
Параметры эффективной анизотропии для триплетных возбуждений



$$\hat{H}_{eff} = D \hat{S}_z^2 + E (\hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2) - g \mu_B \vec{B} \hat{S}$$

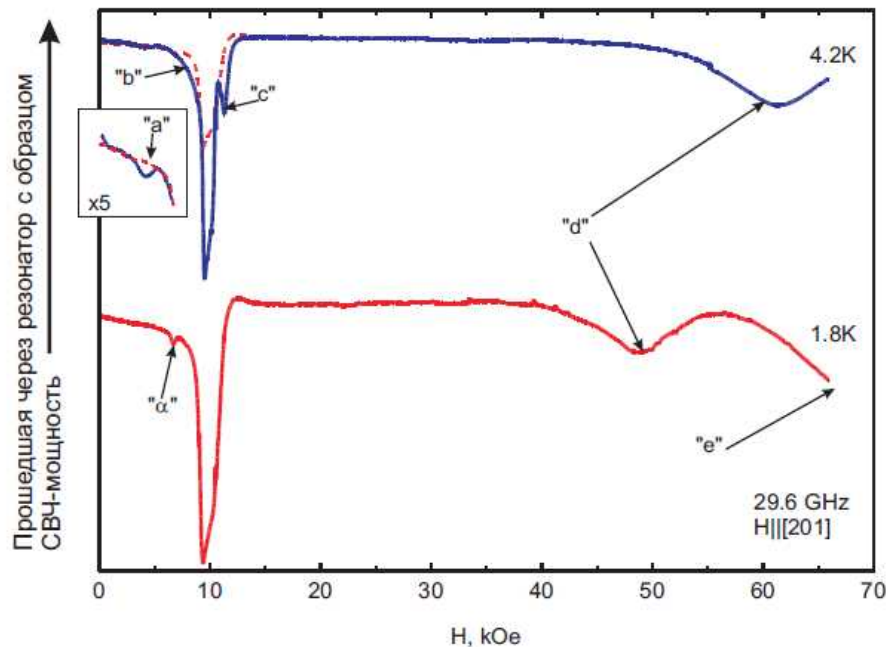
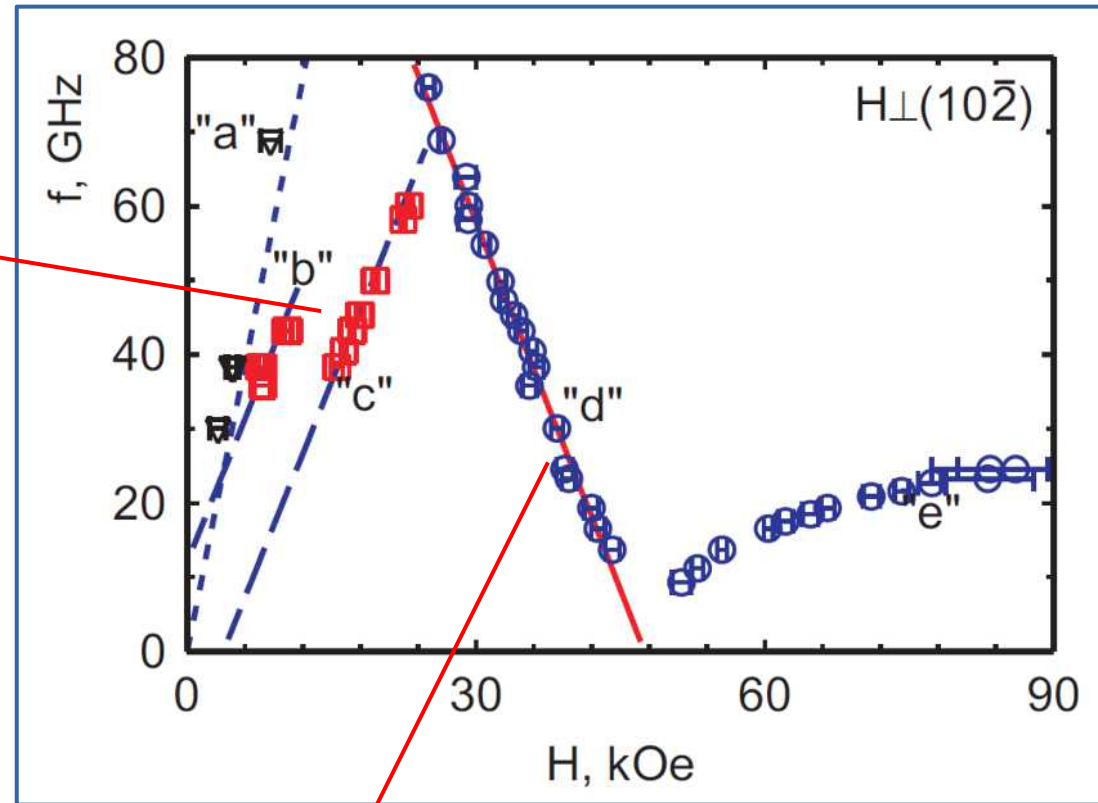
Анализ угловых зависимостей ЭПР триплетных возбуждений позволил независимо определить параметры эффективной анизотропии для триплетных возбуждений.

$$D_{eff} \approx -8 \text{ ГГц}$$



Магнитный резонанс в TlCuCl_3

Резонанс триплетных возбуждений

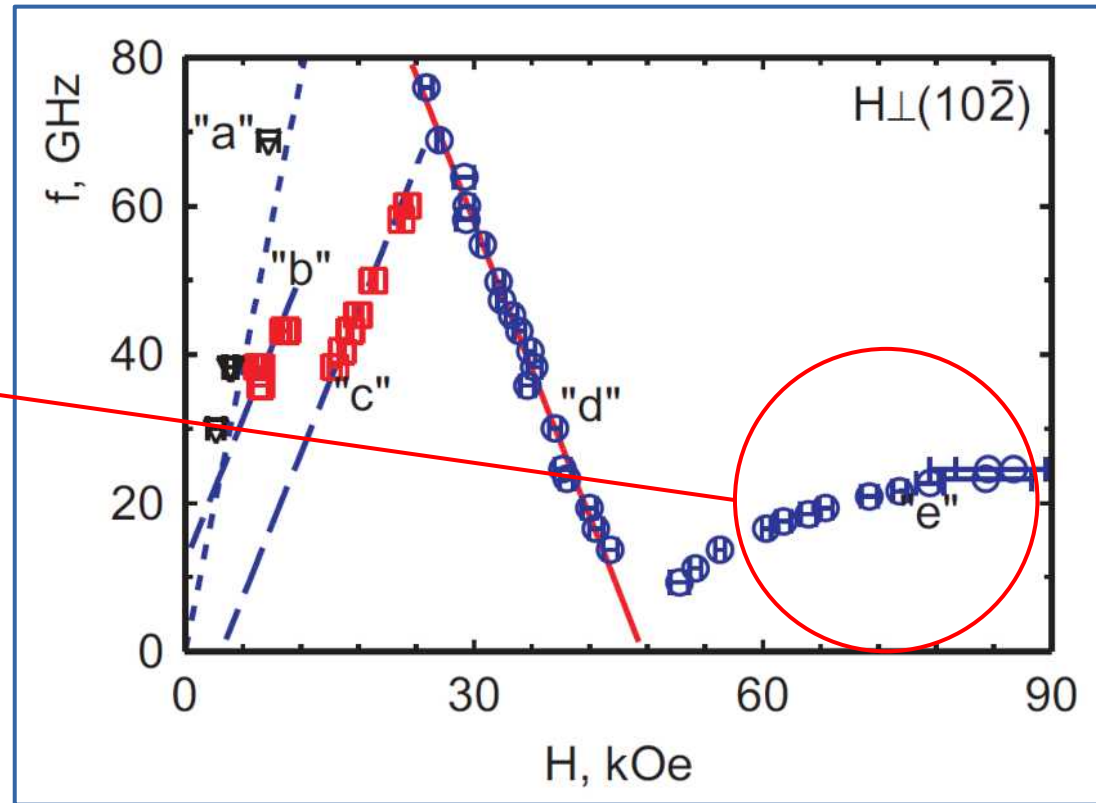
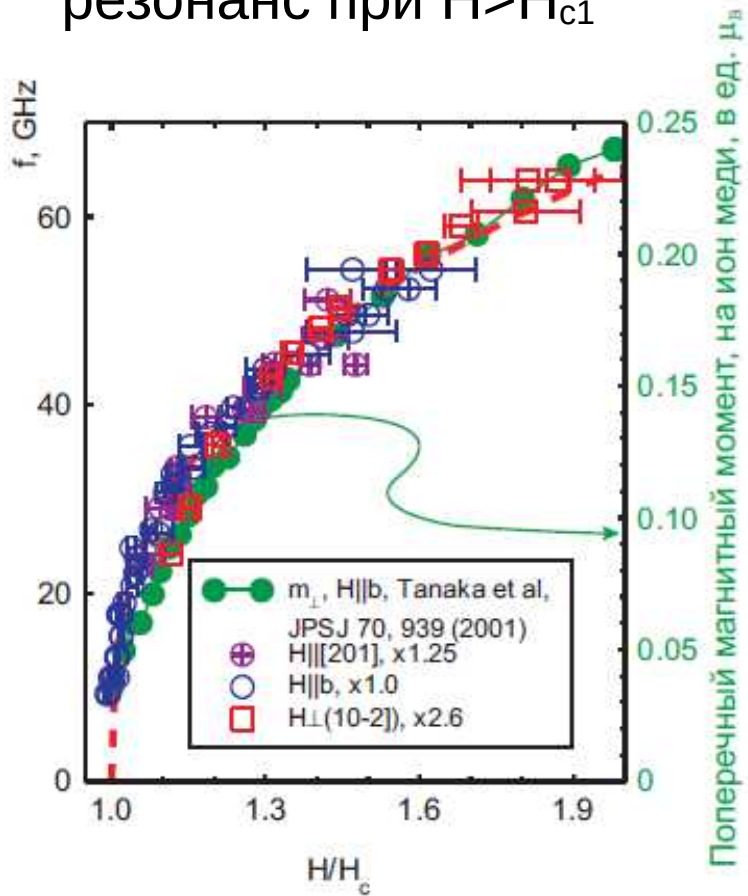


Синглет-триплетные переходы при $k=0$

$$\hbar \omega = \Delta - g \mu_B H$$

Магнитный резонанс в TlCuCl_3

Антиферромагнитный резонанс при $H > H_{c1}$

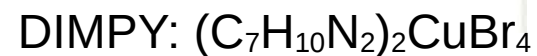
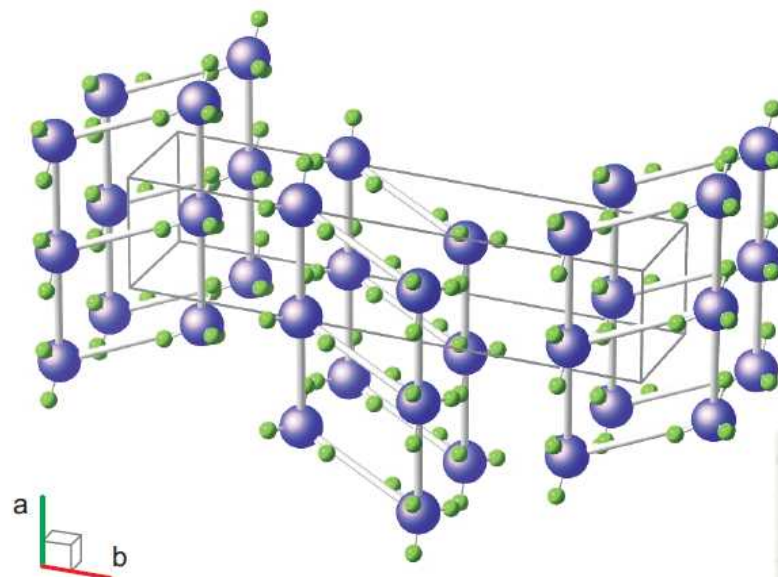
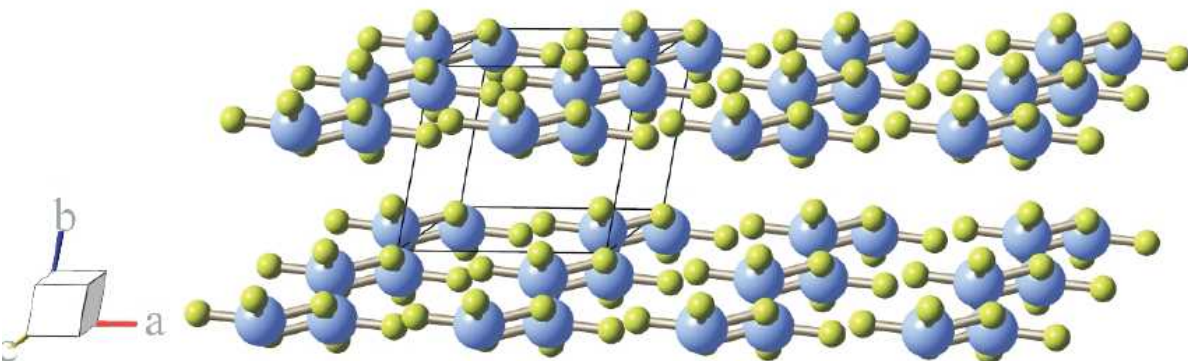
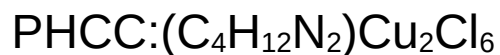


Режимы спиновой релаксации при различных температурах: димерное соединение РНСС и «спиновая лестница» DIMPY

$$\Delta = 1.02 \text{ мЭВ}$$

$$H_{c1} \approx 8 \text{ Тл}$$

$$H_{c2} \approx 38 \text{ Тл}$$

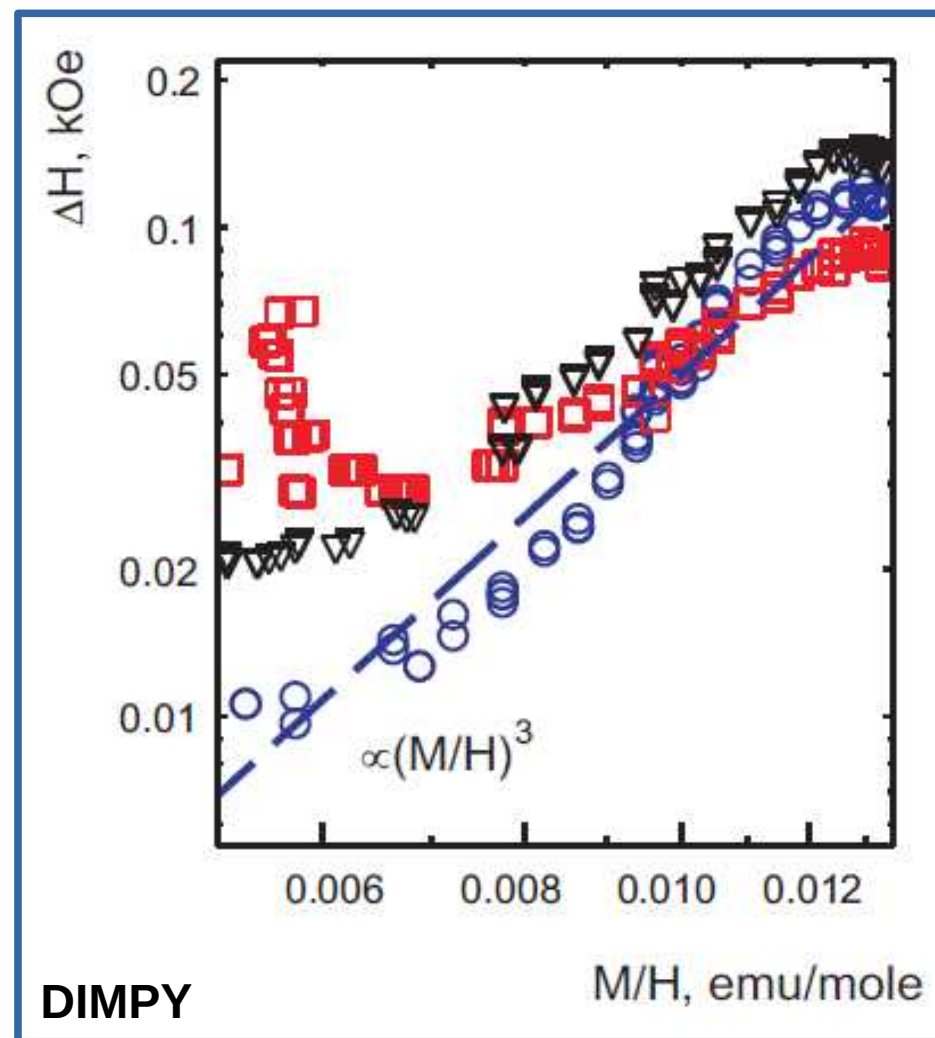
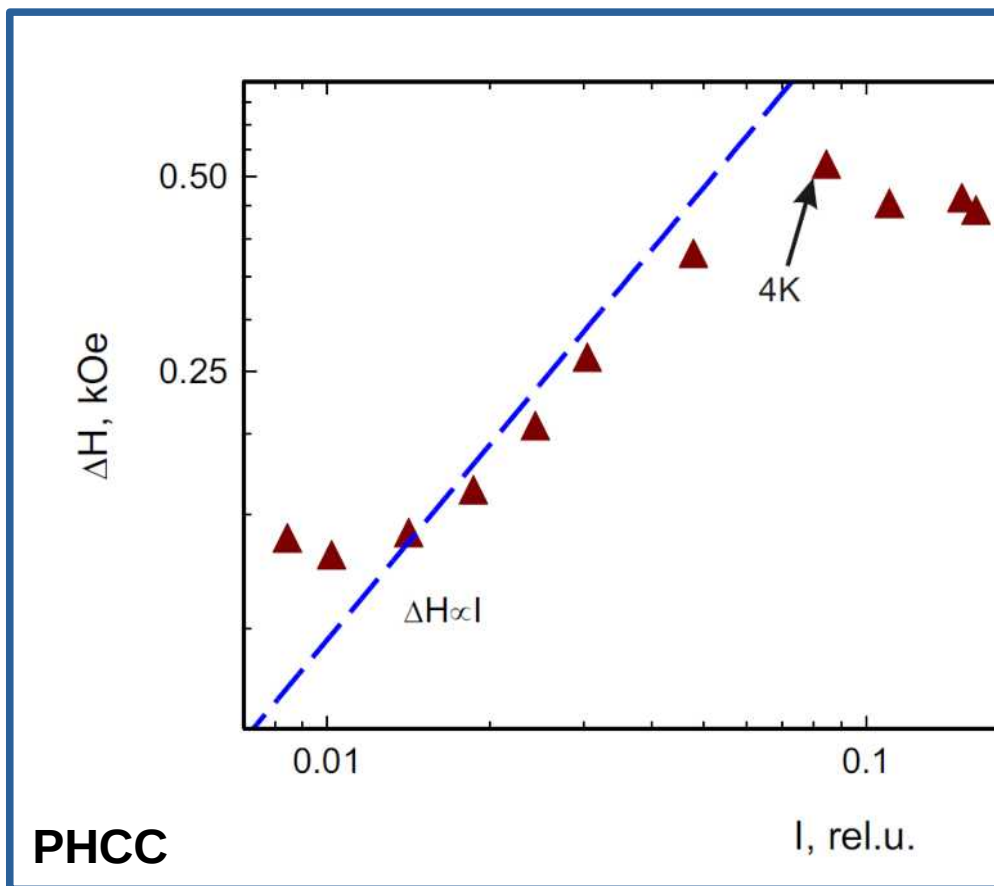


$$\Delta = 0.33 \text{ мЭВ}$$

$$H_{c1} \approx 3 \text{ Тл}$$

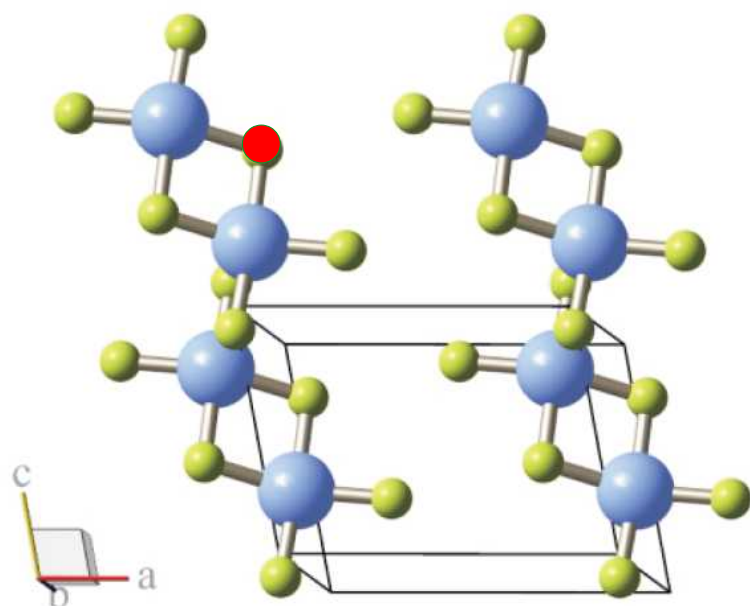
$$H_{c2} \approx 30 \text{ Тл}$$

Ширина линии ЭПР в режиме газа триплетных возбуждений

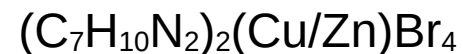
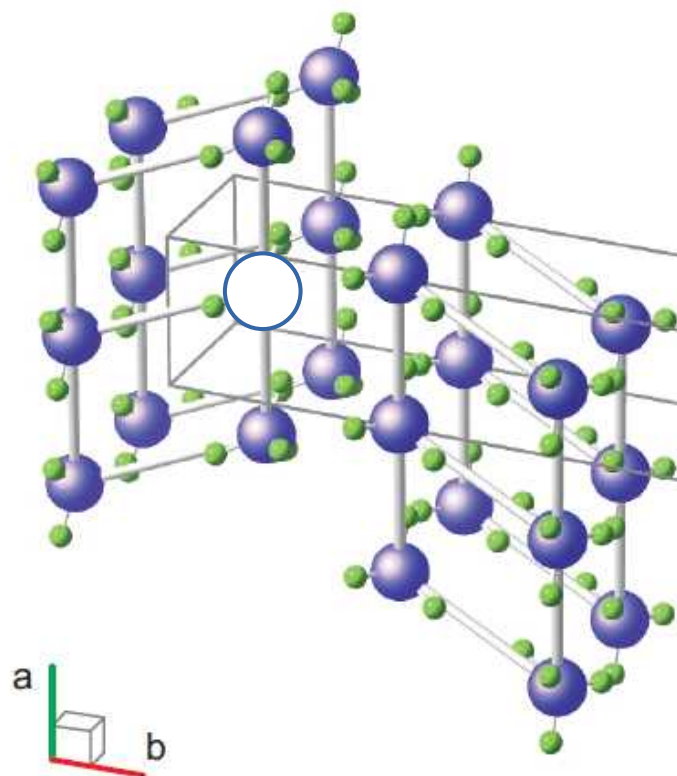


Формирование парамагнитных центров при немагнитном разбавлении спин-щелевых парамагнетиков

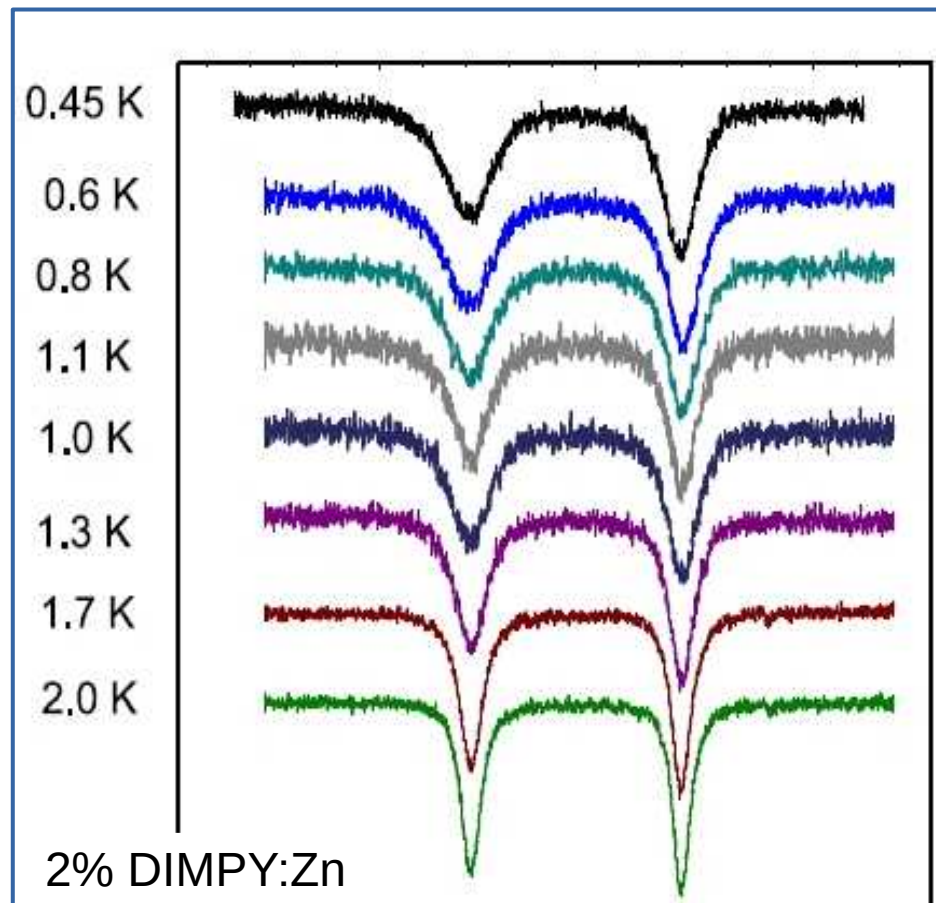
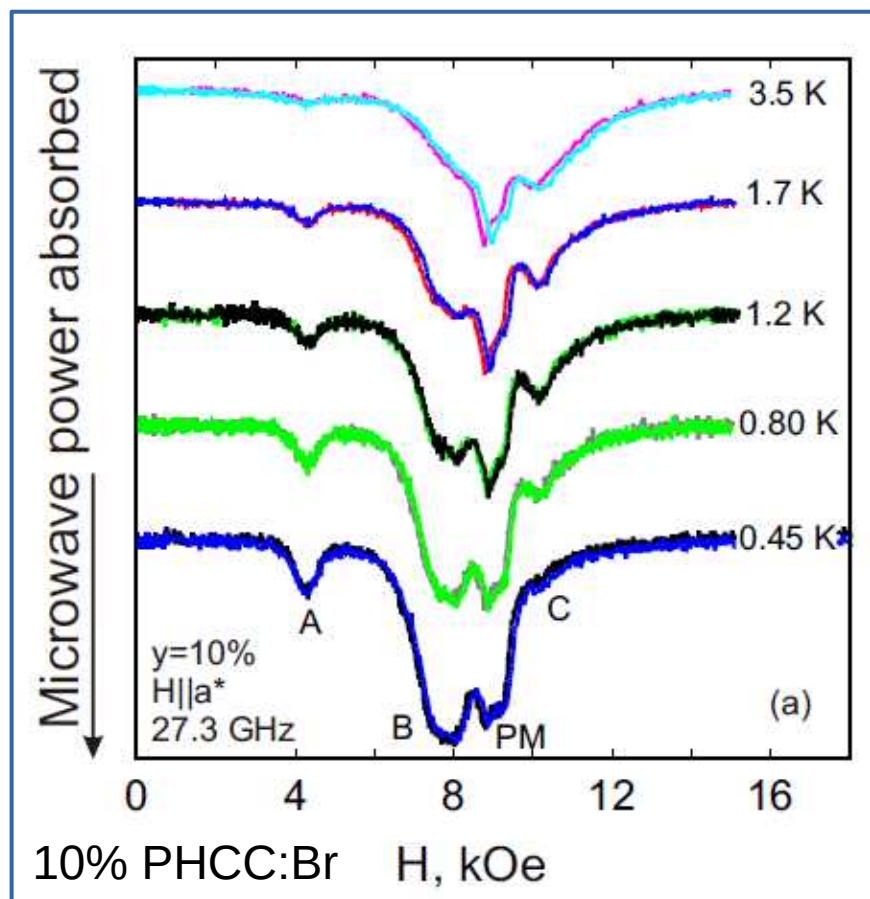
PHCC:Br



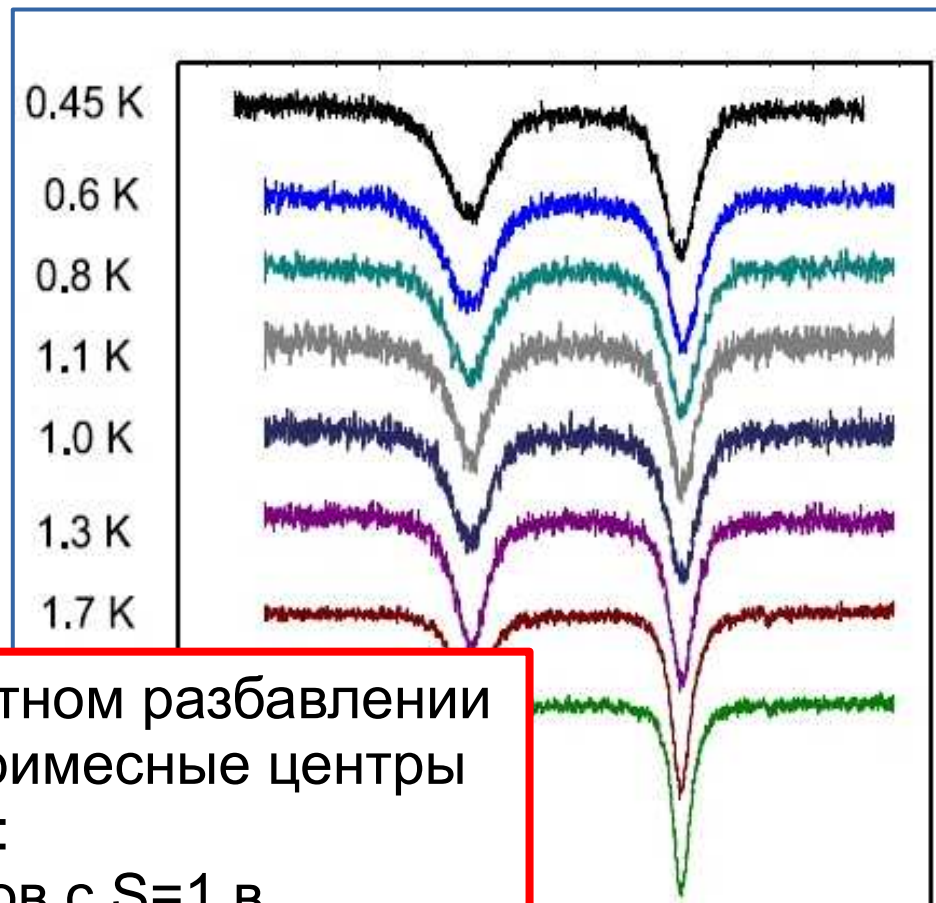
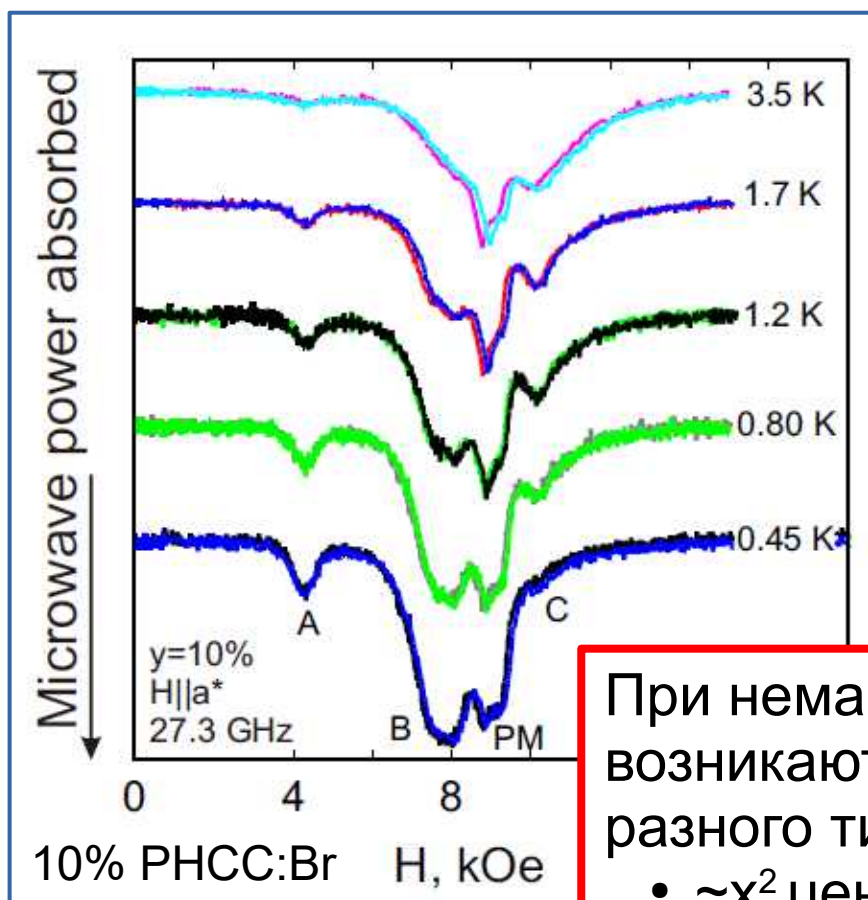
DIMPY:Zn



Формирование парамагнитных центров при немагнитном разбавлении спин-щелевых парамагнетиков



Формирование парамагнитных центров при немагнитном разбавлении спин-щелевых парамагнетиков



При немагнитном разбавлении возникают примесные центры разного типа:

- $\sim x^2$ центров с $S=1$ в PHCC:Br
- $\sim x$ центров с $S=1/2$ в DIMPY:Zn

Выводы

Магнитно-резонансная спектроскопия представляет широкий набор (иногда уникальных) возможностей для изучения низкотемпературных физических свойств различных спиновых систем