

Магнитный резонанс в высоких магнитных полях и на высоких частотах.

Часть 2: Магнитный резонанс в антиферромагнетиках и коллективных парамагнетиках.

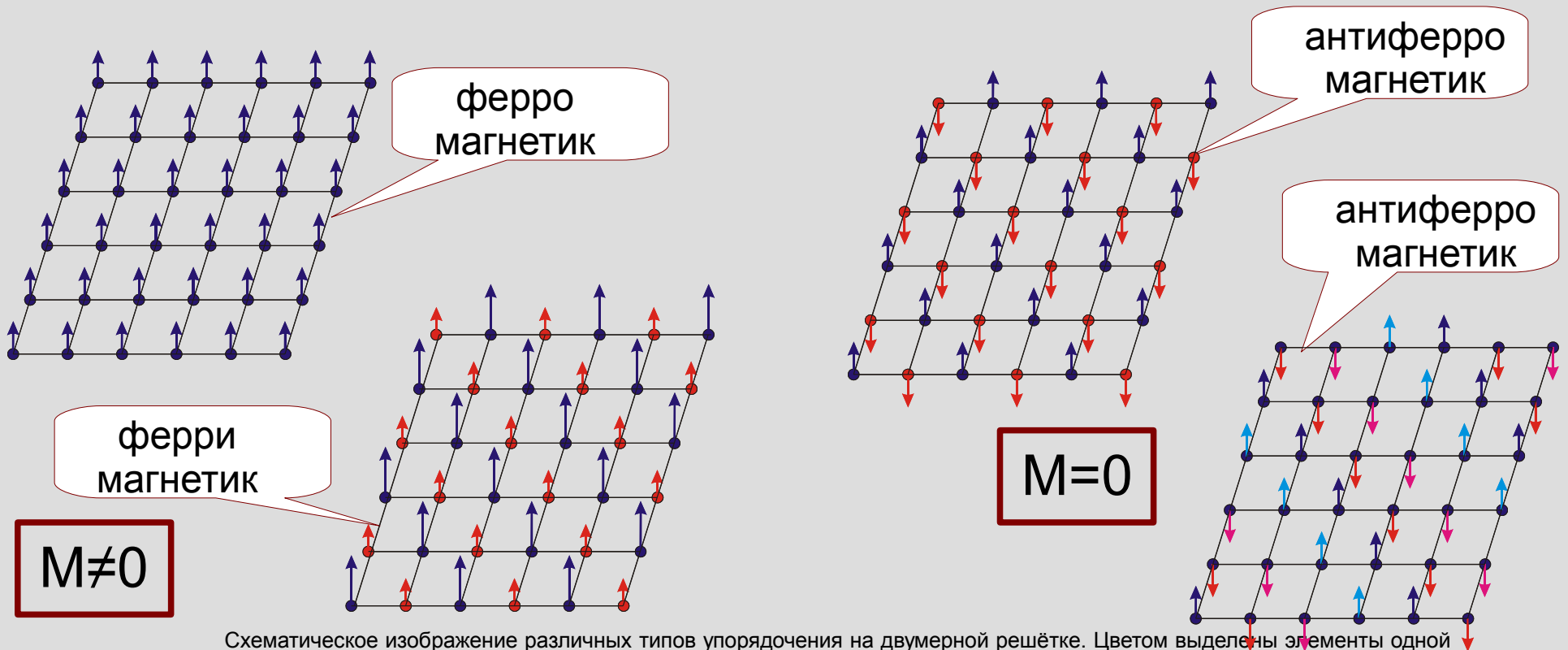
В.Н.Глазков

Институт физических проблем им. П.Л.Капицы РАН



Упорядоченные состояния магнетиков

$$\hat{H} = \frac{1}{2} \sum_{i,j} J_{ij} \hat{S}_i \hat{S}_j$$



Схематическое изображение различных типов упорядочения на двумерной решётке. Цветом выделены элементы одной подрешётки. Слева направо: ферромагнетик, коллинейрный ферримагнетик, коллинейрная антиферромагнитная структура неелевского типа с двумя подрешётками, коллинейрная антиферромагнитная структура типа "два вверх-два вниз" с четырьмя подрешётками.

Модель молекулярного поля.

«Классические» спины

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i,j} J_{ij} \vec{S}_i \vec{S}_j$$

конфигурация спинов с минимальной энергией

$$\{\vec{S}_i\}$$

перевернём i -ый спин $\delta E_i = E(\text{перев. } i\text{-ый}) - E(\text{исх.}) = 2\vec{S}_i \left(\sum_j J_{ij} \vec{S}_j \right)$



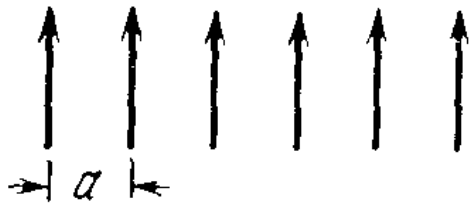
Приближение среднего поля (приближение молекулярного поля): заменить все S_j средними значениями

$$\vec{B}_i^{(eff)} = \frac{1}{g\mu_B} \sum_j J_{ij} \vec{S}_j$$

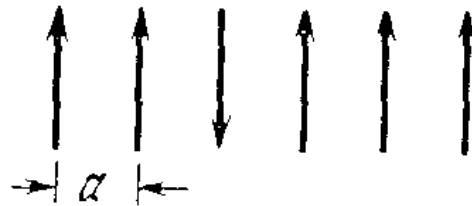
Спиновые волны в ферромагнетике.

Модель: ферромагнитная цепочка спинов

$$E = J \sum_{i=0}^N \vec{S}_i \cdot \vec{S}_{i+1} \quad J < 0$$



основное состояние



перевернутый спин,
энергия возбуждения
 $2JS^2$



спиновая волна, сколь
угодно малая энергия
для цепочки заданной
длины

Спиновые волны в ферромагнетике.

$$\vec{B}_i = \frac{J}{g\mu_B} (\vec{S}_{i+1} + \vec{S}_{i-1})$$

прецессия i-ого спина в эффективном поле

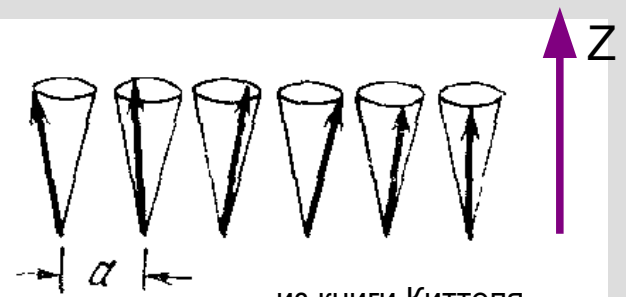
$$\hbar \frac{d\vec{S}_i}{dt} = (g\mu_B \vec{S}_i) \times \vec{B}_i = J (\vec{S}_i \times \vec{S}_{i+1} + \vec{S}_i \times \vec{S}_{i-1})$$

$$\frac{dS_i^x}{dt} = \frac{JS}{\hbar} (S_i^y - S_{i+1}^y + S_i^y - S_{i-1}^y)$$

$$\frac{dS_i^y}{dt} = -\frac{JS}{\hbar} (S_i^x - S_{i+1}^x + S_i^x - S_{i-1}^x)$$

$$\frac{dS_i^z}{dt} = 0 + \underline{Q}(S^x S^y)$$

$$\vec{S}_i \cdot \vec{S}_{i+1} \quad J < 0$$



из книги Киттеля

спиновая волна, сколь угодно малая энергия для цепочки заданной длины

Спиновые волны в ферромагнетике.

$$S_p^x = u e^{i(ka p - \omega t)}$$

$$S_p^y = v e^{i(ka p - \omega t)}$$

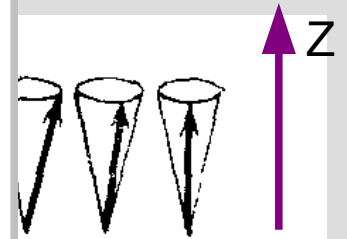
$$\vec{B}_i = \frac{J}{g\mu_B}$$

прецессии

$$\hbar \frac{d\vec{S}_i}{dt} = ($$

$$\begin{vmatrix} -i\omega & \frac{JS}{\hbar}(2 - e^{ika} - e^{-ika}) \\ -\frac{JS}{\hbar}(2 - e^{ika} - e^{-ika}) & -i\omega \end{vmatrix} = 0$$

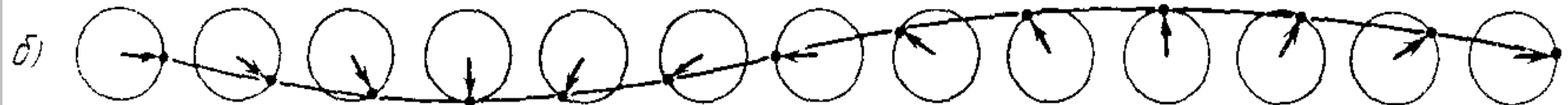
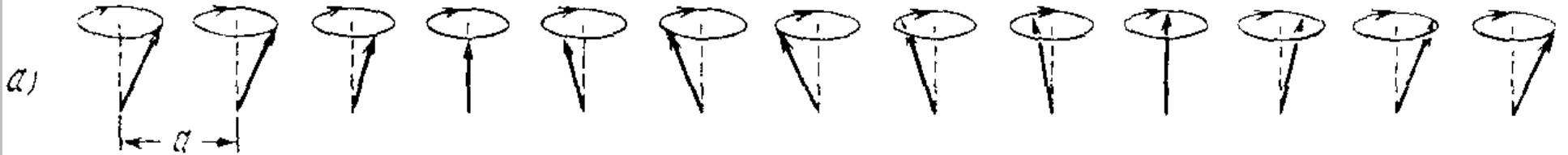
$J < 0$



из книги Киттеля
олна, сколь

$$d S_i^x = JS (S_{i-1}^y - S_{i+1}^y)$$

уюдно малая энергия
для цепочки заданной



из книги Киттеля

Спиновые волны в ферромагнетике.

$$S_p^x = u e^{i(ka p - \omega t)}$$

$$S_p^y = v e^{i(ka p - \omega t)}$$

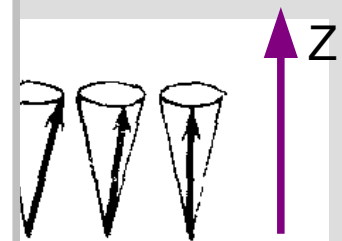
$$\vec{B}_i = \frac{J}{g\mu_B}$$

прецессии

$$\hbar \frac{d\vec{S}_i}{dt} =$$

$$\begin{vmatrix} -i\omega & \frac{JS}{\hbar}(2 - e^{ika} - e^{-ika}) \\ -\frac{JS}{\hbar}(2 - e^{ika} - e^{-ika}) & -i\omega \end{vmatrix} = 0$$

$J < 0$



из книги Киттеля
спинная волна, сколь
малая энергия
эпючки заданной

$$-\omega^2 + 4 \left(\frac{JS}{\hbar} \right)^2 (1 - \cos(ka))^2 = 0$$

$$\omega = 2|J| \frac{S}{\hbar} (1 - \cos(ka)) = 4|J| \frac{S}{\hbar} \sin^2 \frac{ka}{2}$$

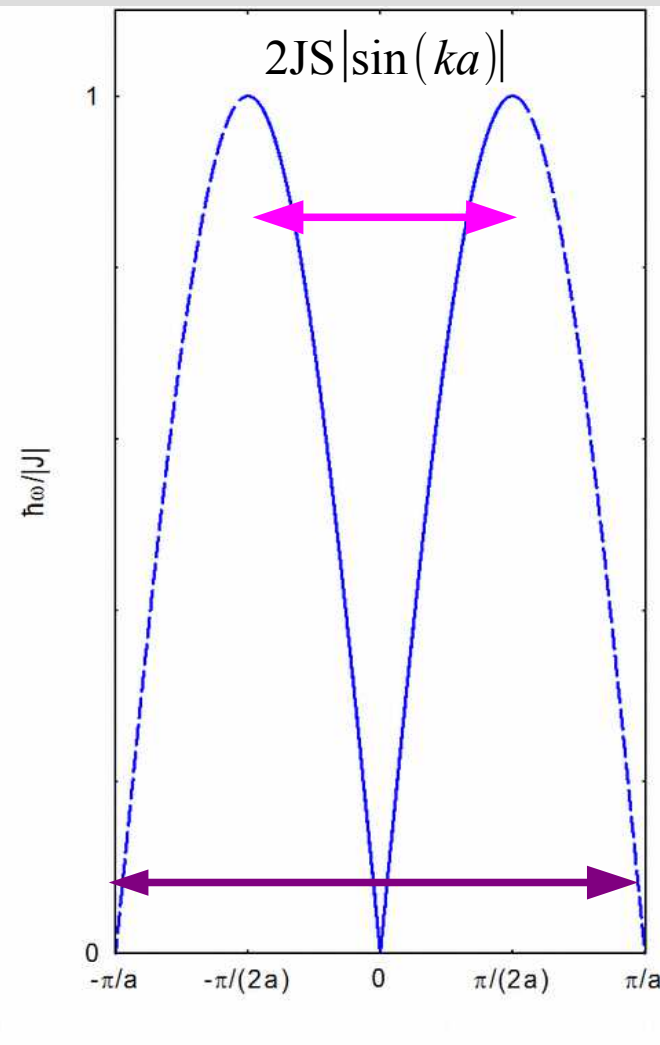
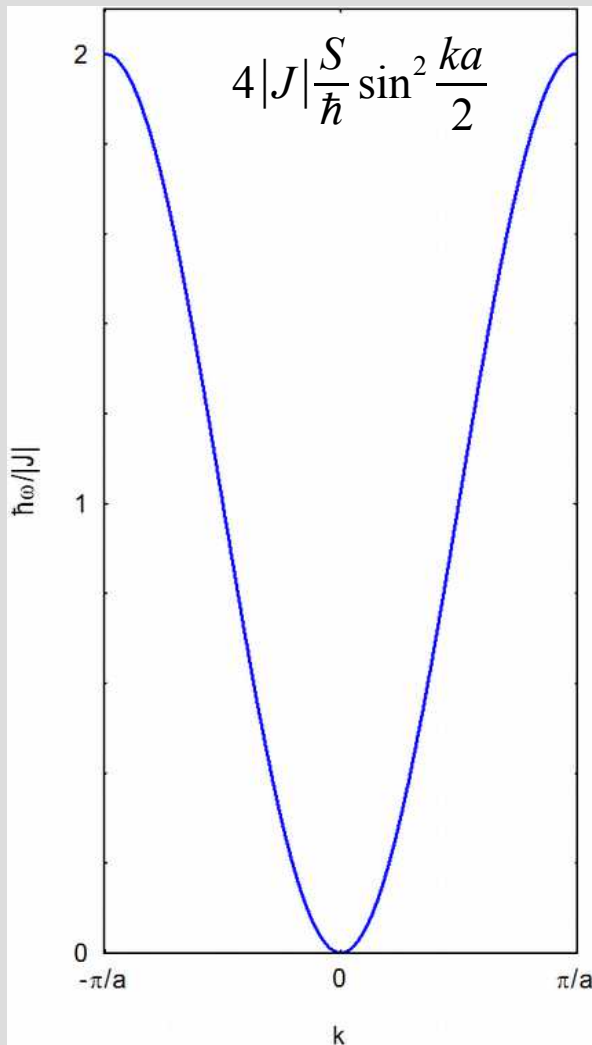
- 1) при малых k $\omega \propto k^2$
- 2) единственная «поляризация»



из книги Киттеля

Сравнение спектров спиновых волн для ферро- и антиферромагнетиков

МОДЕЛЬ СПИНОВОЙ ЦЕПОЧКИ

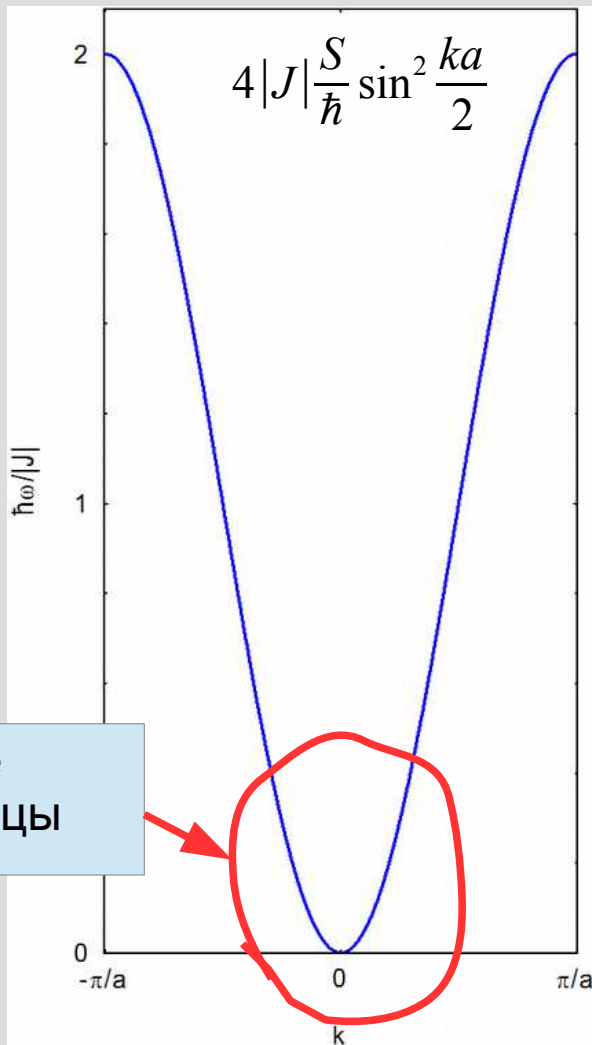


магнитная
1 з.Бр.

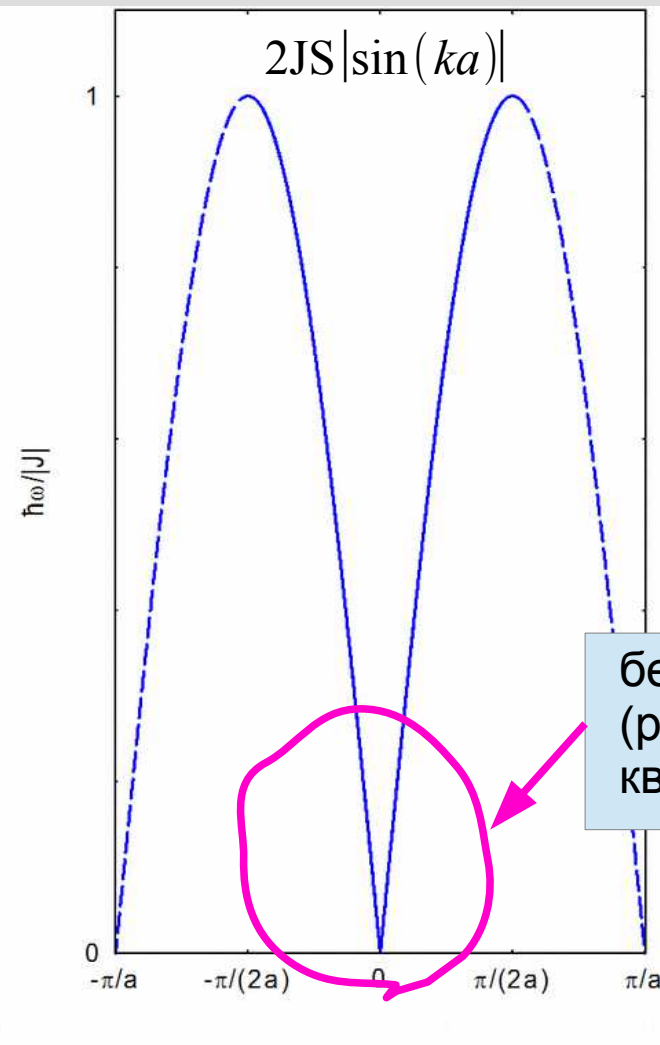
кристаллограф.
1 з.Бр.

Сравнение спектров спиновых волн для ферро- и антиферромагнетиков

МОДЕЛЬ СПИНОВОЙ ЦЕПОЧКИ

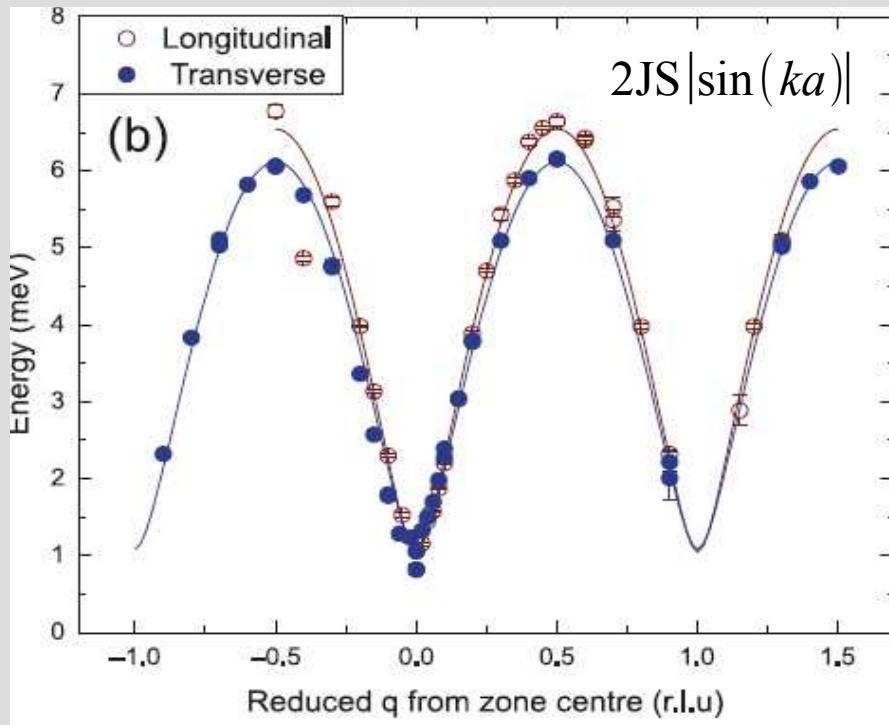


МАССИВНЫЕ
КВАЗИЧАСТИЦЫ



БЕЗМАССОВЫЕ
(РЕЛЯТИВИСТСКИЕ)
КВАЗИЧАСТИЦЫ

Экспериментально наблюдаемые спектры спиновых волн в антиферромагнетиках. Что видит АФМР?



MnF₂, спектры для двух поляризаций антиферромагнитных магнонов с волновым вектором \mathbf{k} , измеренные по неупругому рассеянию нейтронов. Волновой вектор нормирован на вектор обратной решётки. Кривые — расчёт в модели спиновых волн.

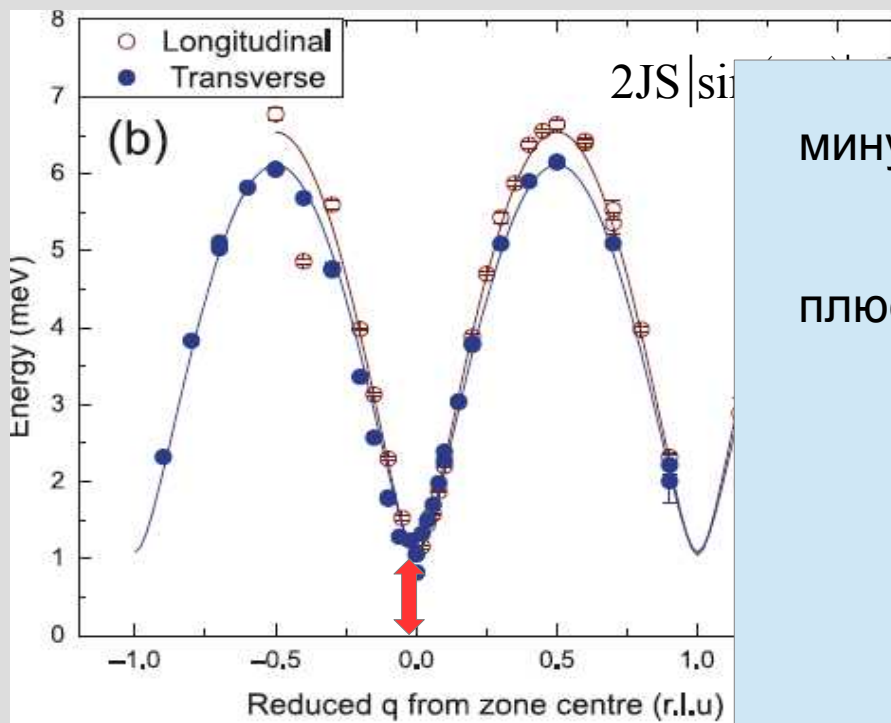
Z. Yamani, Z. Tun, and D.H. Ryan, "Neutron scattering study of the classical antiferromagnet MnF₂: a perfect hands-on neutron scattering teaching course.", Canadian Journal of Physics 88, 771 (2010)

Спектр не зануляется из-за эффектов анизотропных взаимодействий: квазичастицы «приобретают массу».

INS: рассеяние нейтронов с передачей энергии и импульса магнонам. Рождает магноны во всей первой зоне Бриллюэна.

АФМР: поглощение фотона с длиной волны $\sim 1\text{ см}$, $k \ll k_B \Rightarrow$ Рождение магнона в центре зоны Бриллюэна

Экспериментально наблюдаемые спектры спиновых волн в антиферромагнетиках. Что видит АФМР?



Спектр не зануляется из-за эффектов

минусы:

только $k=0$

плюсы:

физика малых установок

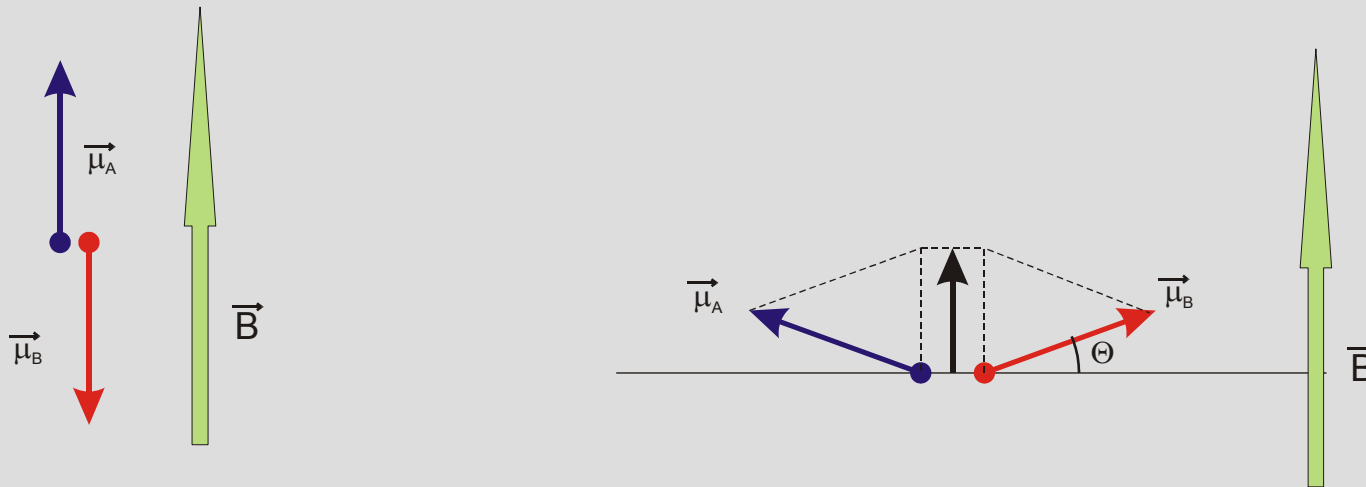
энергетическое разрешение лучших INS спектрометров $\sim 0.1 \text{ мэВ} = 20 \text{ ГГц}$,
рутинное разрешение ЭПР спектрометров 1 ГГц

АФМР даёт возможность с высоким разрешением изучать влияние анизотропных эффектов на антиферромагнитное упорядочение.

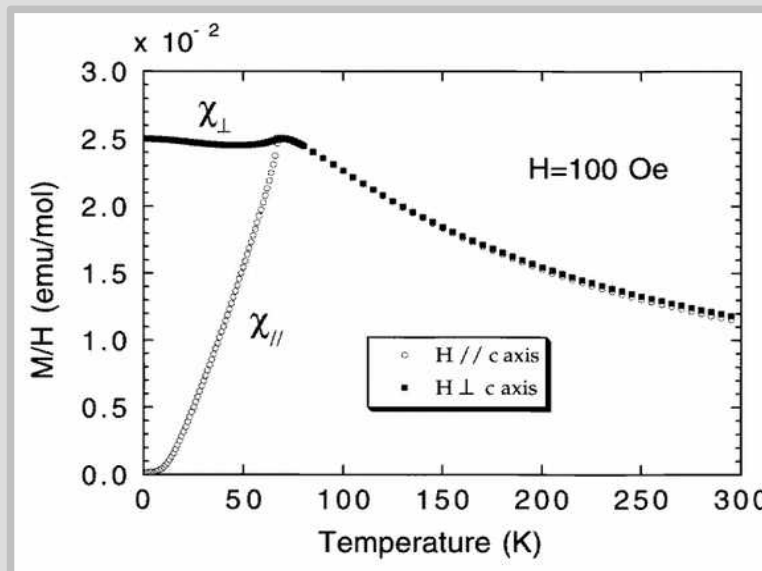
MnF₂, спектры для двух поляризаций антиферромагнитных магн волновым вектором, измеренные по неупругому рассеянию ней Волновой вектор нормирован на вектор обратной решётки. Крив модели спиновых волн.

Z. Yamani, Z. Tun, and D.H. Ryan, "Neutron scattering study of the antiferromagnet MnF₂: a perfect hands-on neutron scattering teachi Canadian Journal of Physics 88, 771 (2010)

Спин-переориентационные переходы и АФМР.



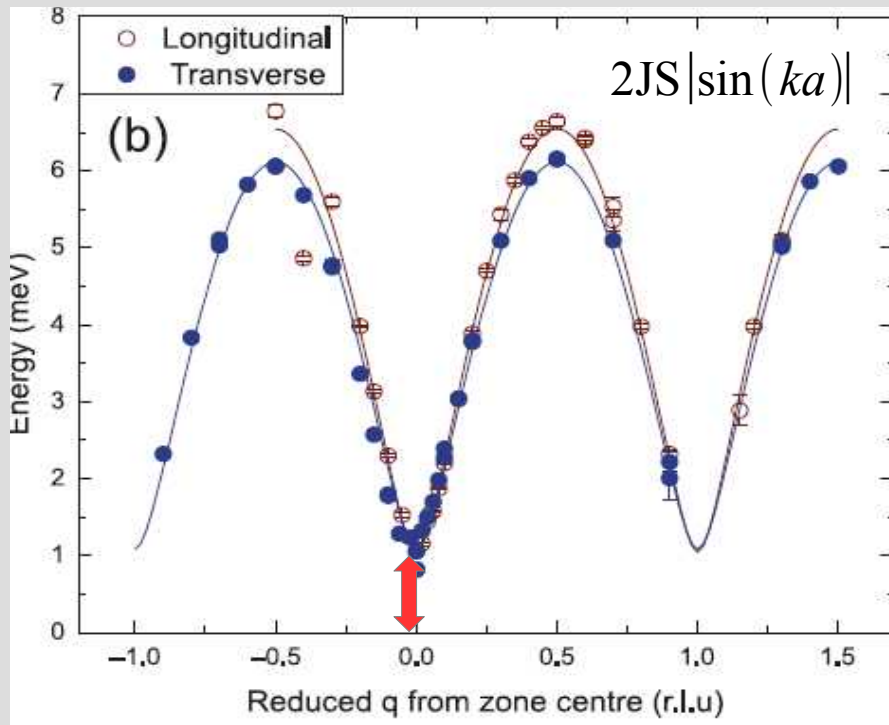
Двухподрешёточный антиферромагнетик с легкоосной анизотропией в магнитном поле, приложенном параллельно (слева) и перпендикулярно (справа) лёгкой оси.



Экспериментально измеренная намагниченность антиферромагнетика MnF2 в двух ориентациях магнитного поля.

Спин-флоп переход: проигрыш в энергии анизотропии, но выигрыш в энергии намагничивания. В точке перехода есть мягкая мода! Зануление одной из частот АФМР.

Точка Нееля и АФМР.



Связанная с анизотропией щель в спектре антиферромагнитных спиновых волн пропорциональна параметру порядка (намагниченности подрешётки).

Можем ожидать изменение спектра ЭПР-поглощения при переходе через точку Нееля.

Т.е. АФМР позволяет определять температуру перехода.

Частотно-полевая зависимость АФМР (коллинеарный случай).

$T=0$, антиферромагнитный параметр порядка \vec{l} , $|\vec{l}|=1$

Поле этих векторов описывает состояние антиферромагнетика, в т.ч. все спиновые волны.

$$L(\vec{l}, \dot{\vec{l}}) = K - \Pi$$

$$\mathcal{K}_H = \frac{I}{2} \left(\dot{\vec{l}} + \gamma [\vec{l} \times \vec{H}] \right)^2$$

теорема Лармора

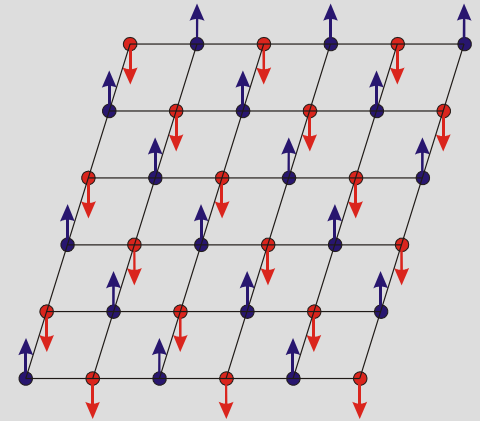
$$\chi_{\perp} = I\gamma^2$$

статическая восприимчивость

$$U = -\frac{b}{2} l_z^2$$

$b > 0$ «легкая ось» ($b < 0$ «лёгкая плоскость»)

+ вклады в потенциальную энергию от пространственной неоднородности поля векторов l , но для АФМР на $k=0$ это не существенно



Частотно-полевая зависимость АФМР (коллинеарный случай).

$$\mathcal{L} = \frac{\chi_{\perp}}{2\gamma^2} \left(\dot{\vec{l}} + \gamma \left[\vec{l} \times \vec{H} \right] \right)^2 + \frac{b}{2} l_z^2$$

далее стандартно для физики — варьируем действие и получаем уравнения динамики. (подробности будут в рассылке)

$$\vec{H} \perp Z \quad H_c = \sqrt{b/\chi_{\perp}}$$

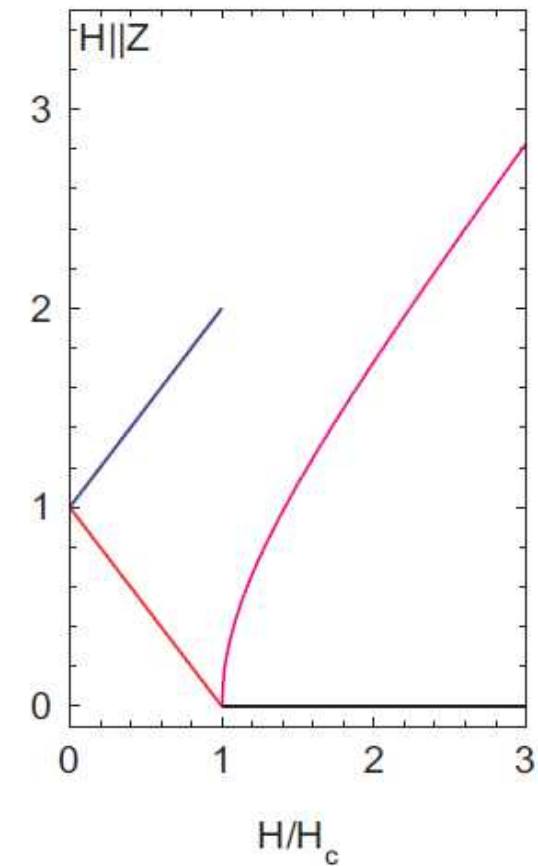
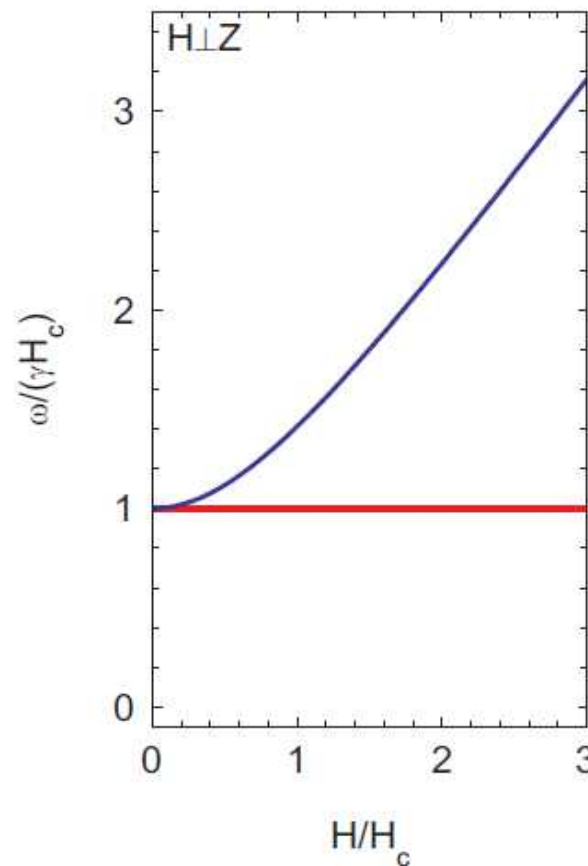
$$\omega_1^2 = \gamma^2 H_c^2; \quad \omega_2^2 = \gamma^2 (H^2 + H_c^2)$$

$$\vec{H} \parallel Z \quad H < H_c$$

$$\omega_{1,2} = \gamma (H_c \pm H)$$

$$\vec{H} \parallel Z \quad H > H_c$$

$$\omega_1 = 0; \quad \omega_2^2 = \gamma^2 (H^2 - H_c^2)$$



Частотно-полевая зависимость АФМР (коллинеарный случай).

$$\mathcal{L} = \frac{\chi_{\perp}}{2} (\dot{\vec{l}} + \gamma [\vec{l} \times \vec{H}])^2 + \frac{b}{2} l^2$$

далее стандартно для физики — варьируем действие и получим уравнения динамики. (в рассылке)

Можно определить:

- ориентацию осей анизотропии
- величину щелей в нулевом поле
- поля спин-переориентационных переходов
- температуру перехода

$$\vec{H} \perp$$

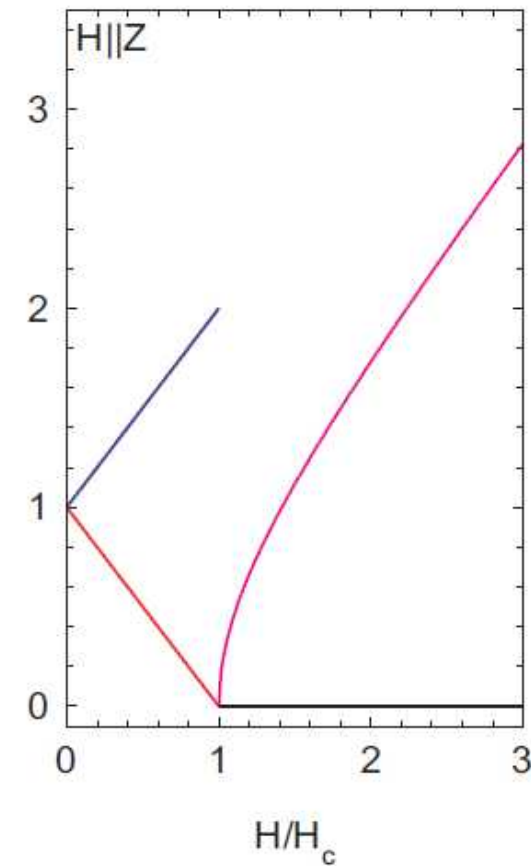
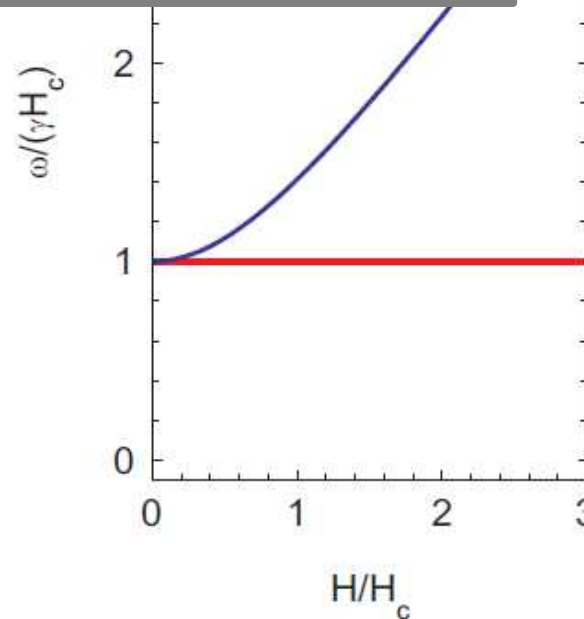
$$\omega_1^2 =$$

$$\vec{H} \parallel Z \quad H < H_c$$

$$\omega_{1,2} = \gamma (H_c \pm H)$$

$$\vec{H} \parallel Z \quad H > H_c$$

$$\omega_1 = 0; \omega_2^2 = \gamma^2 (H^2 - H_c^2)$$



Изменение резонансного поля в T_N

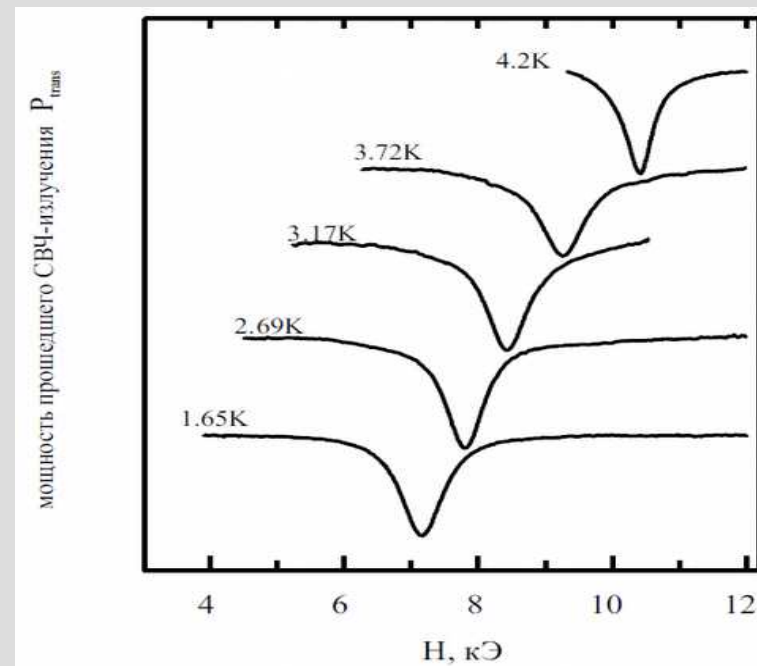
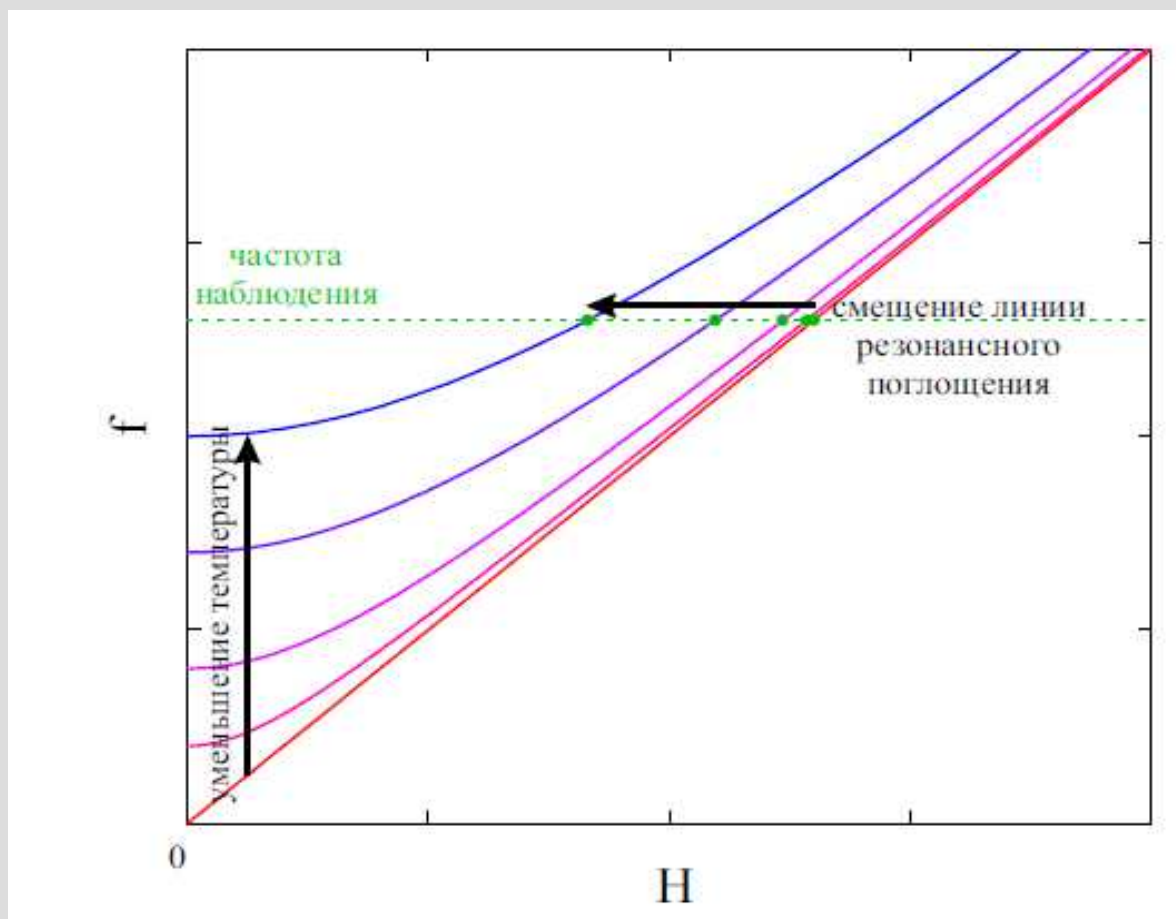
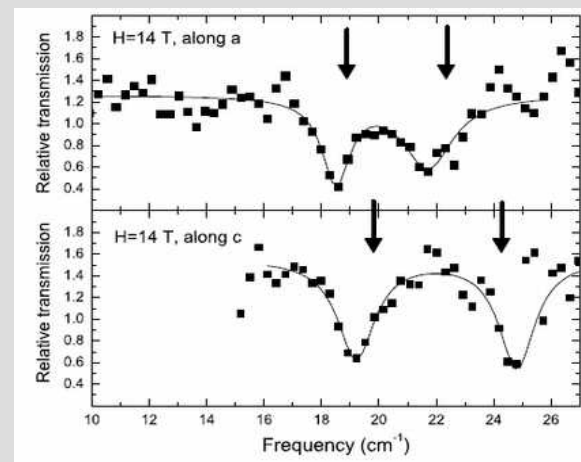
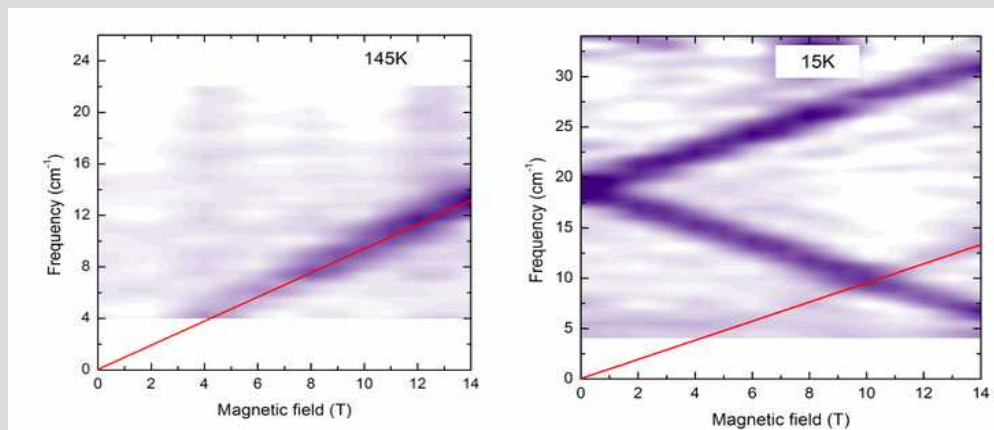
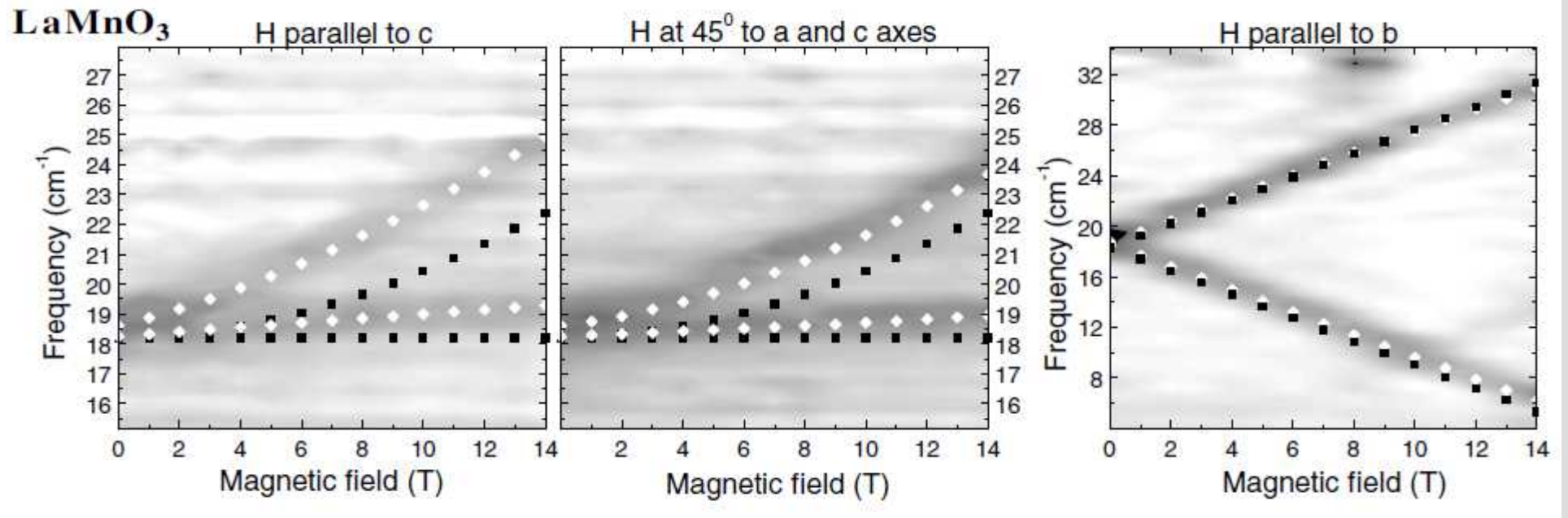


Рис. 7.6: Эволюция линии ЭПР с температурой в образце $\text{Cu}_{1-x}\text{Mg}_x\text{GeO}_3$ с концентрацией примеси 4.57%. $f = 31$ ГГц, $\mathbf{H} \parallel \mathbf{a}$, $T_N = 4.2$ К.

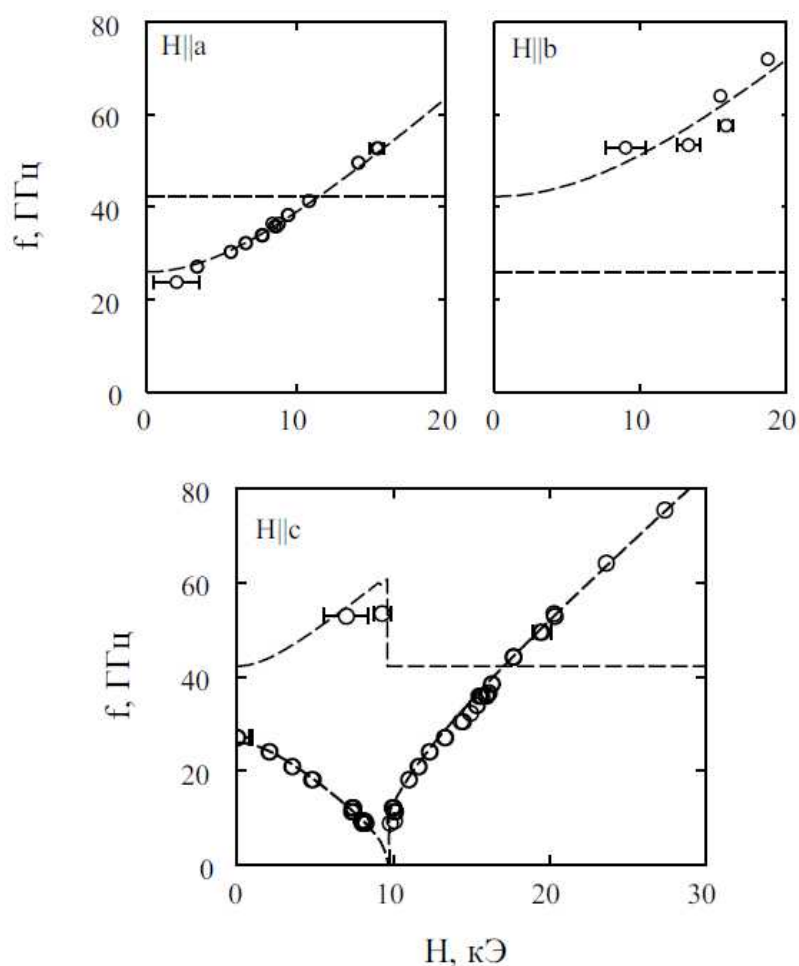
(данные автора)

Одноосный случай.



Talbayev et al,
PRL **93**, 017202
(2004)

Измерение $f(H)$ в двухподрешёточном антиферромагнетике с орторомбической анизотропией

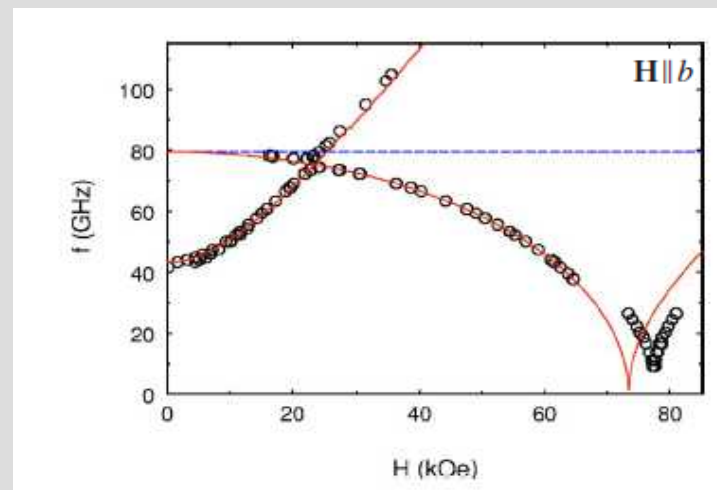
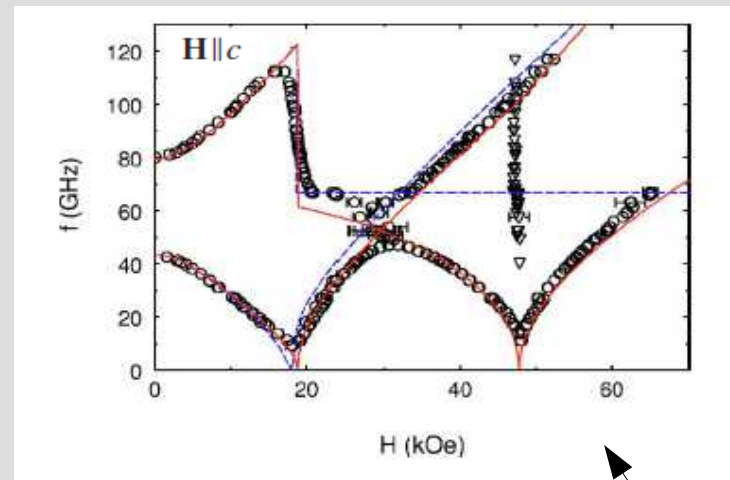
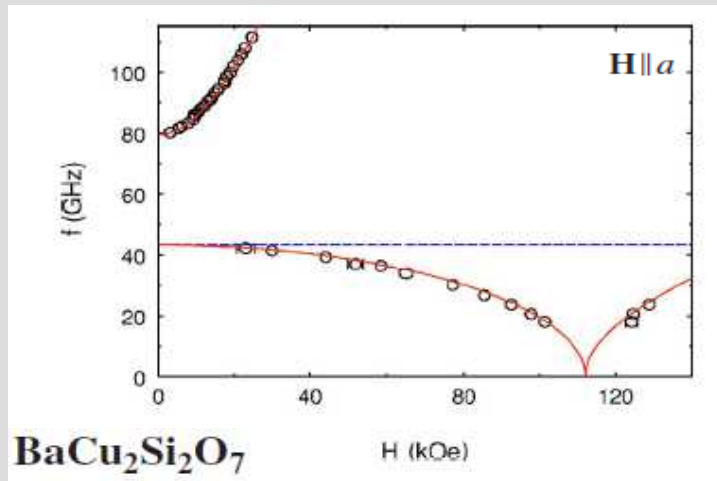


$$U = -\frac{b_1}{2} l_z^2 - \frac{b_2}{2} l_y^2$$

Снятие вырождения — разные щели;
Смягчение одной из мод в поле спин-флота

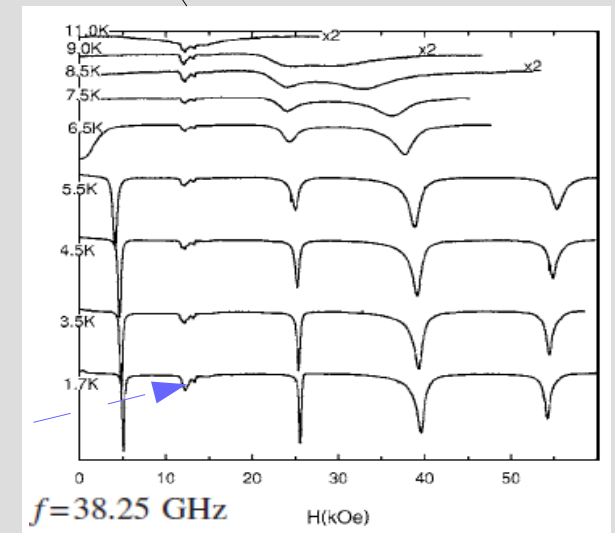
Рис. 7.2: Спектр АФМР в $\text{Cu}_{1-x}\text{Mg}_x\text{GeO}_3$ $x=3.20\%$, $T=1.8$ К. Пунктирные кривые — результат подгонки формулами для антиферромагнитного резонанса в антиферромагнетике с орторомбической анизотропией (см. текст). (данные автора)

Необычные спин-переориентационные переходы

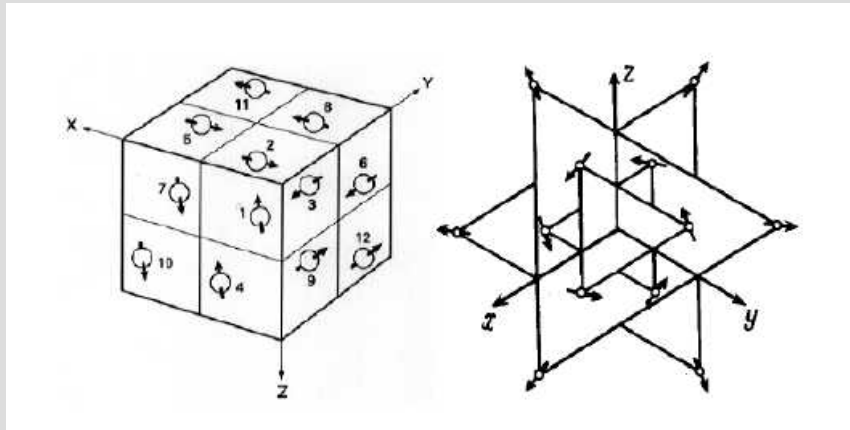


PHYSICAL REVIEW B 72, 104401 (2005)

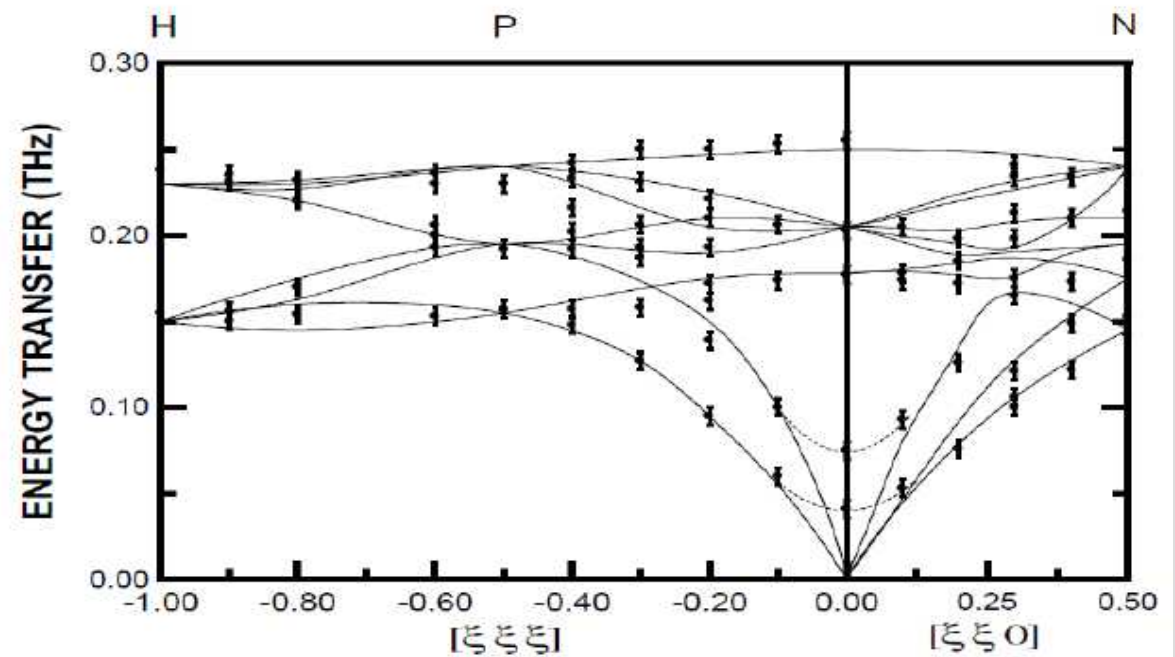
ПМ дефекты, но в принципе можно изучать эффекты типа разделения фаз



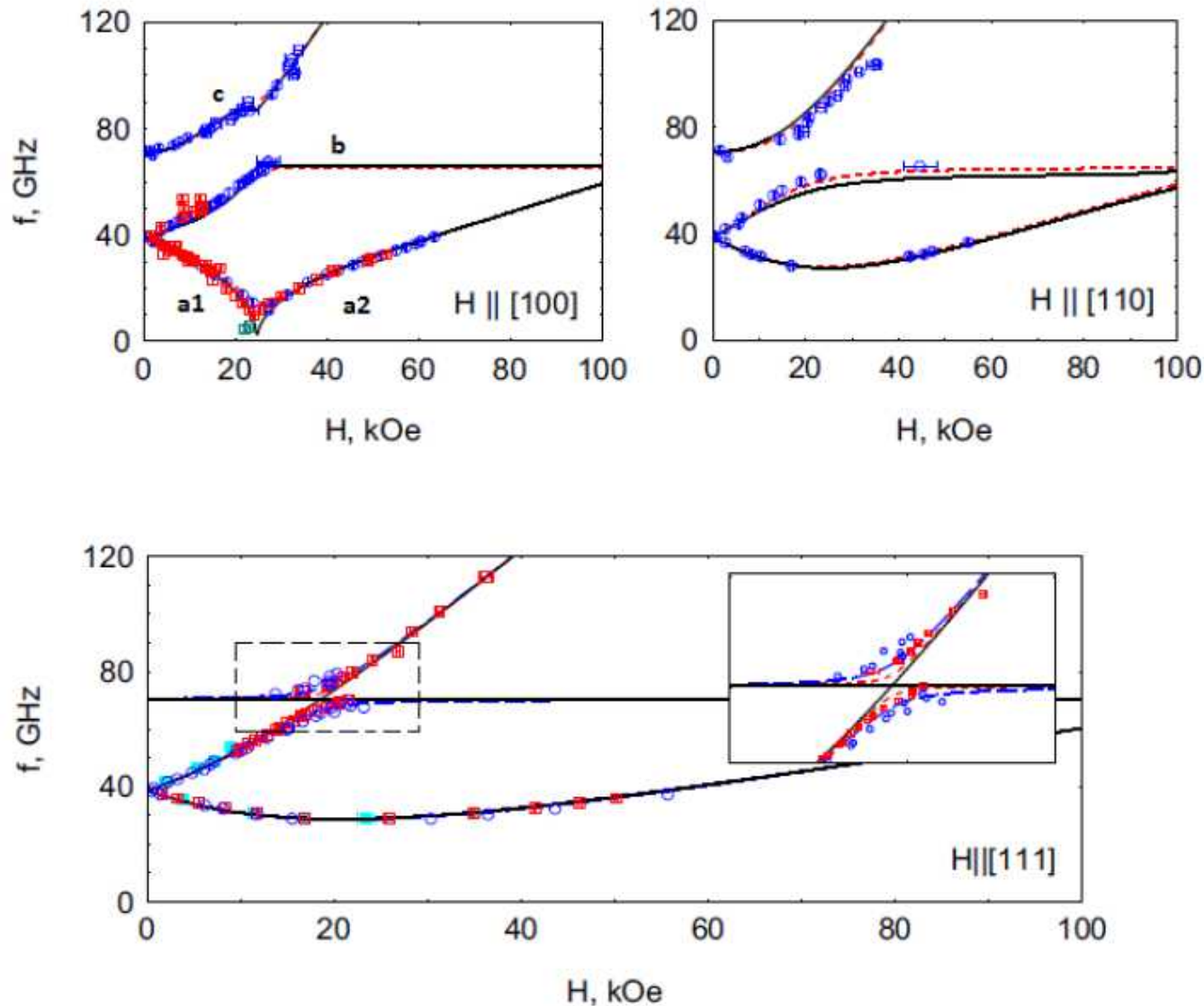
АФМР в неколлинеарном магнетике



12 подрешёток, «акустические» и «оптические» (обменные) моды спиновых колебаний



АФМР в неколлинеарном антиферромагнетике

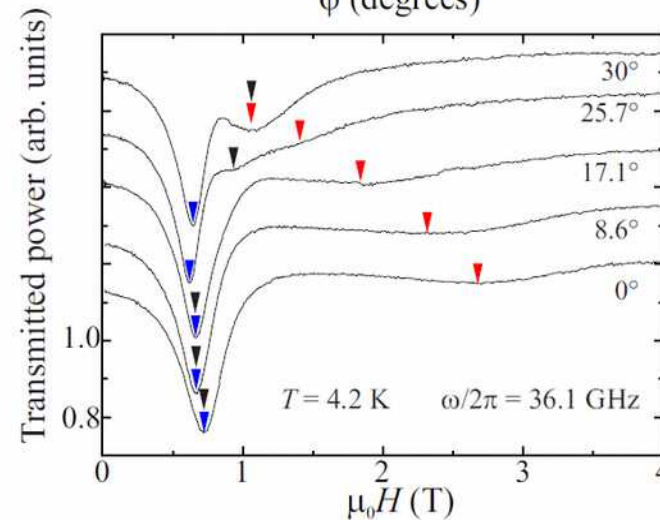
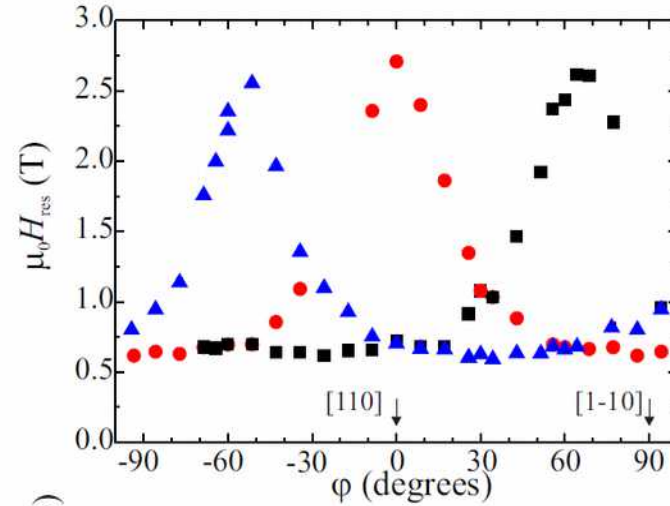
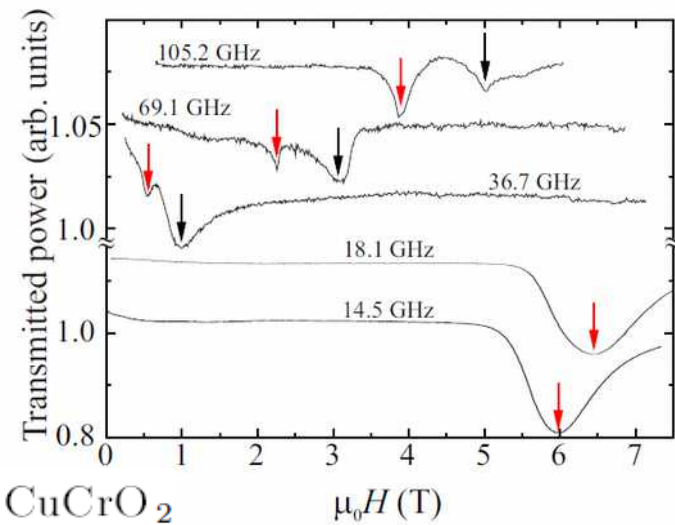
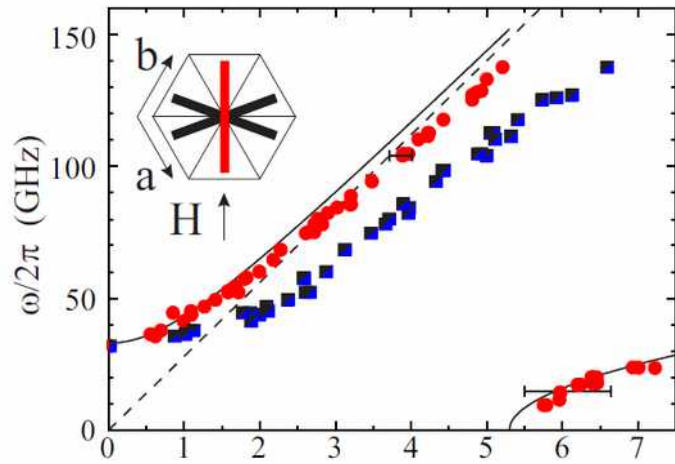


1) На одну ветвь больше! Способ идентифицировать неколлинеарные состояния

2) Смягчение мод в поле спин-переориентационного перехода

3) Щели, информация об осях анизотропии.

Антиферромагнитные домены.



Возможность различать домены, изучать влияние на них разных воздействий (FC/ZFC итп.).

Промежуточные выводы. АФМР.

АФМР — способ с высоким разрешением изучать спиновые волны на $k=0$

Позволяет получить информацию об

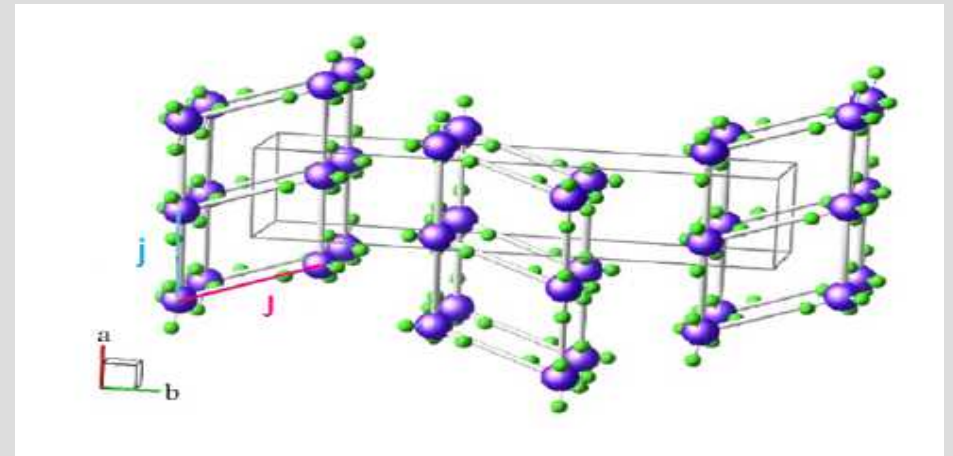
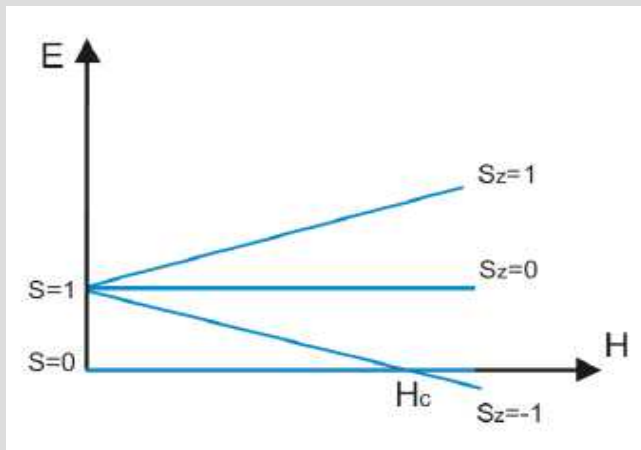
- устройстве антиферромагнитно-упорядоченного состояния (коллинеарное/неколлинеарное, оси анизотропии),
- фазовых переходах в антиферромагнетике (температуры и поля фазового перехода),
- фазах и доменах.

Коллективные парамагнетики и спиновые жидкости.



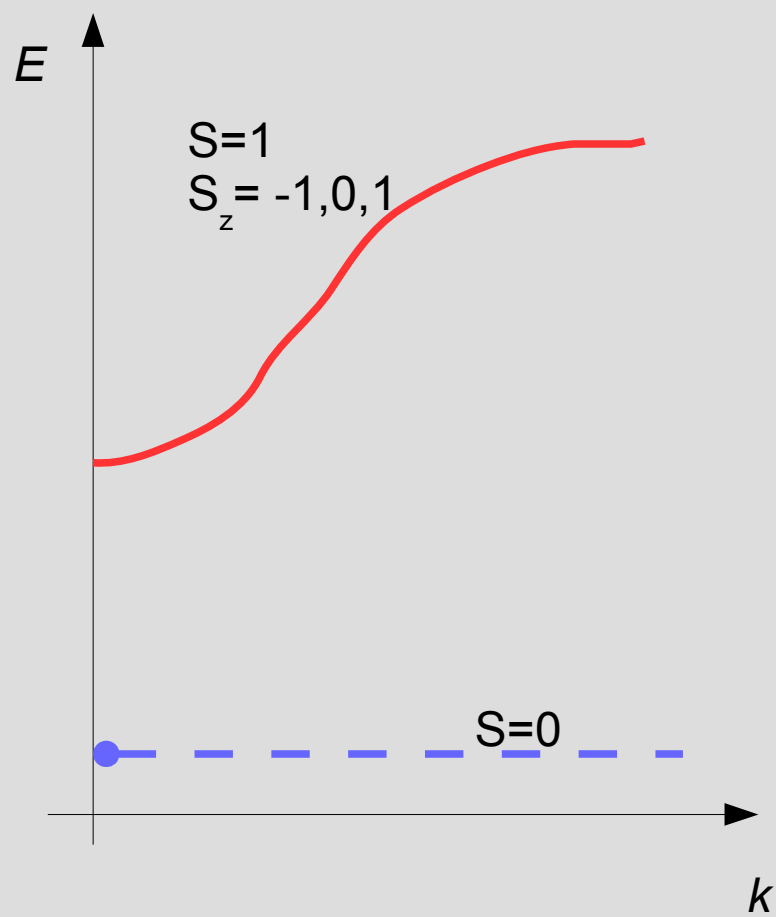
$$\hat{H} = J \hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2 = \frac{J}{2} (S_{\text{полн}}^2 - S_1^2 - S_2^2)$$

- Антиферромагнитный димер:
- основное состояние с $S=0$
 - возбуждённое состояние с $S=1$

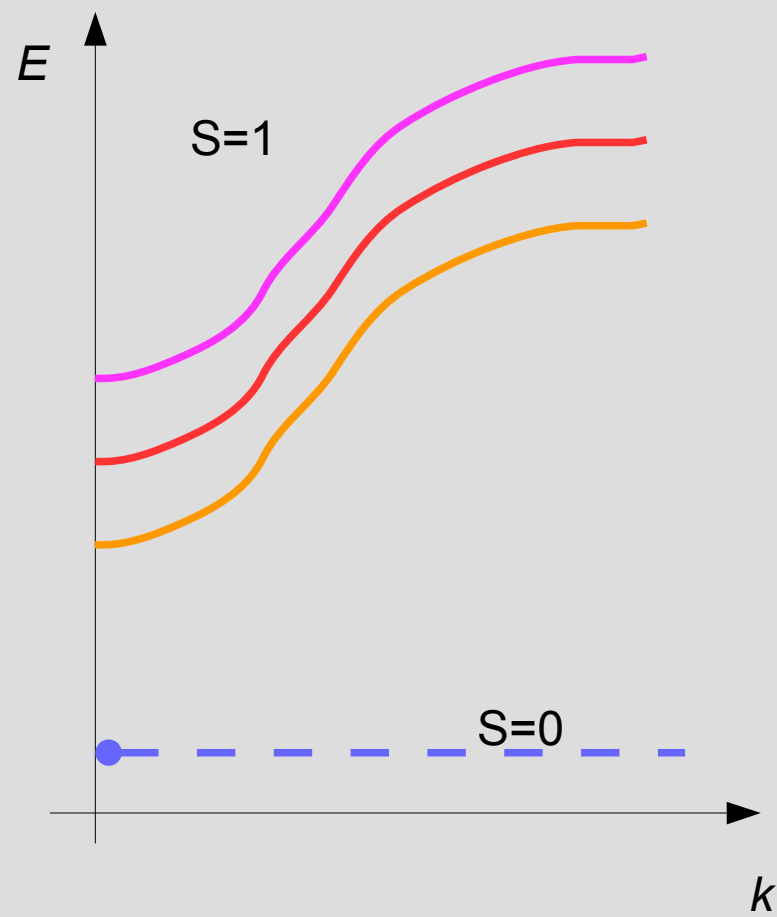


взаимодействующие димеры в реальном кристалле

Спектр возбуждений

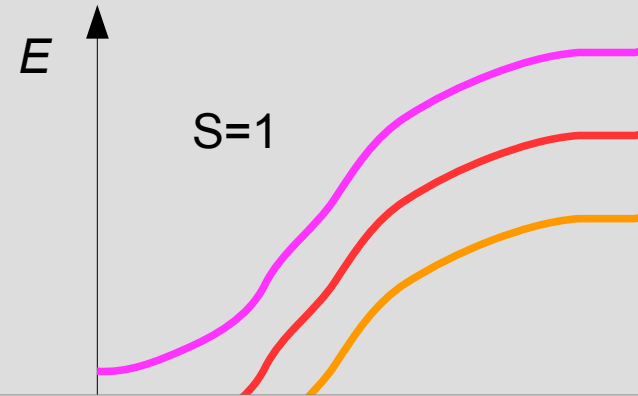
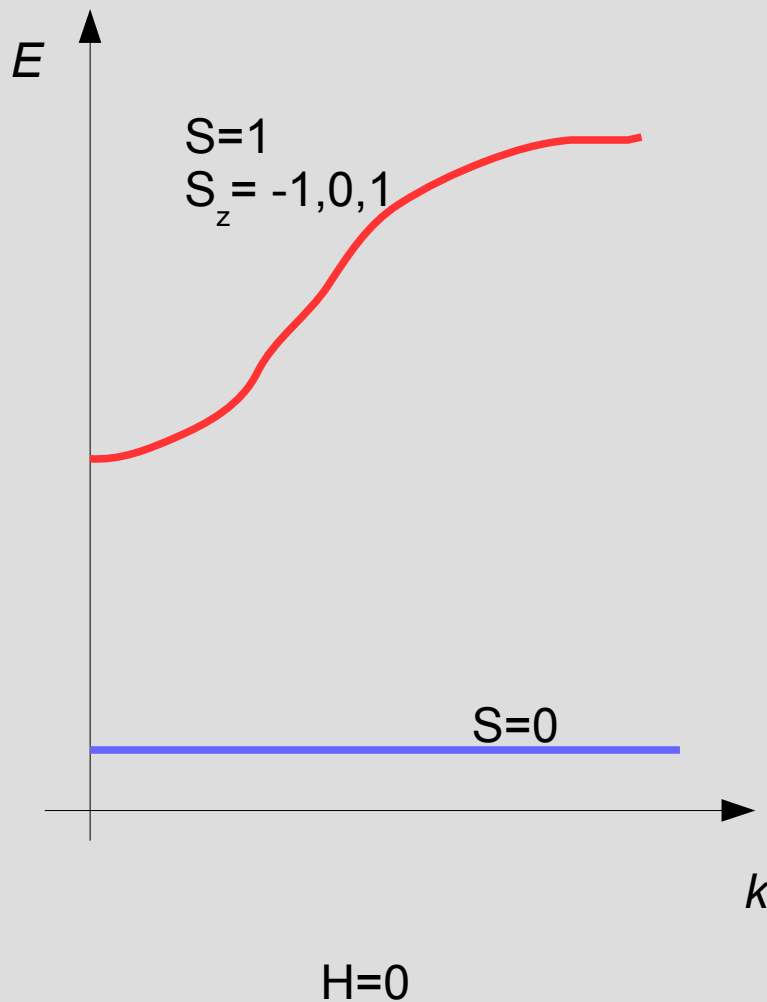


$H=0$



$H>0$

Спектр возбуждений



Нет дальнего порядка
Есть сильное взаимодействие
и ближние корреляции

«ЖИДКОСТЬ»

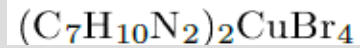
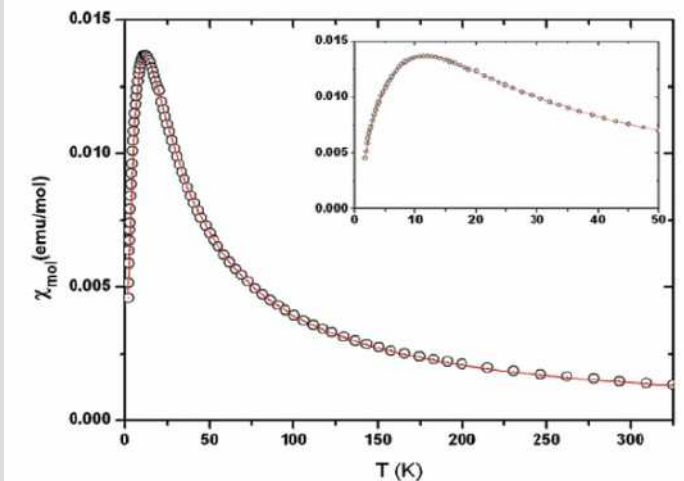
Щель в спектре возбуждений.
Вымерзание магнитных
свойств при $T=0$

идеальный
газ
возбуждений

Возможность уменьшить и даже
закрыть щель в спектре
приложением магнитного поля

«magnon
BEC»

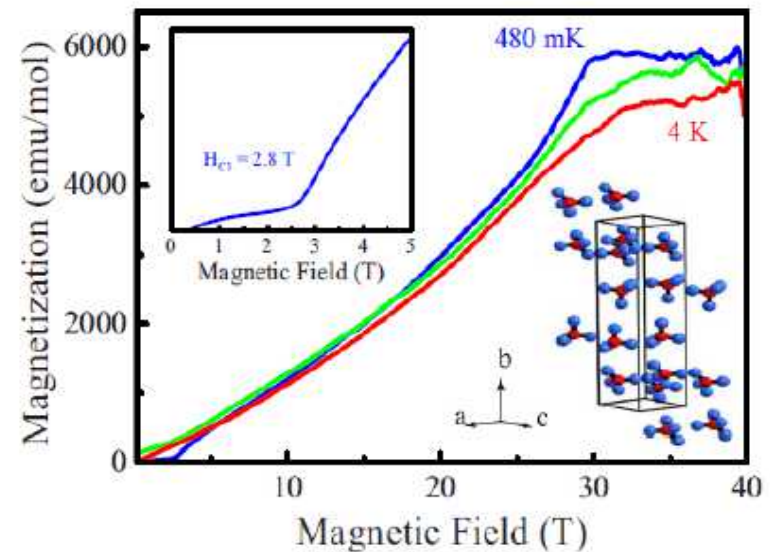
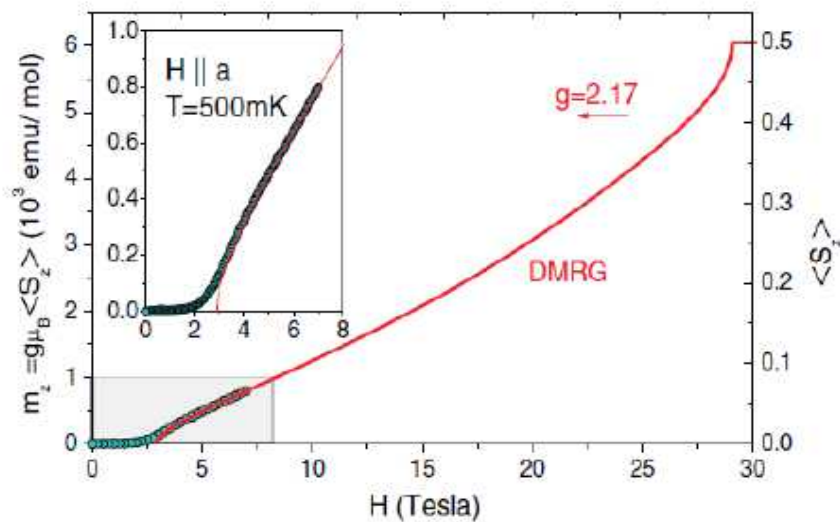
Статические магнитные свойства



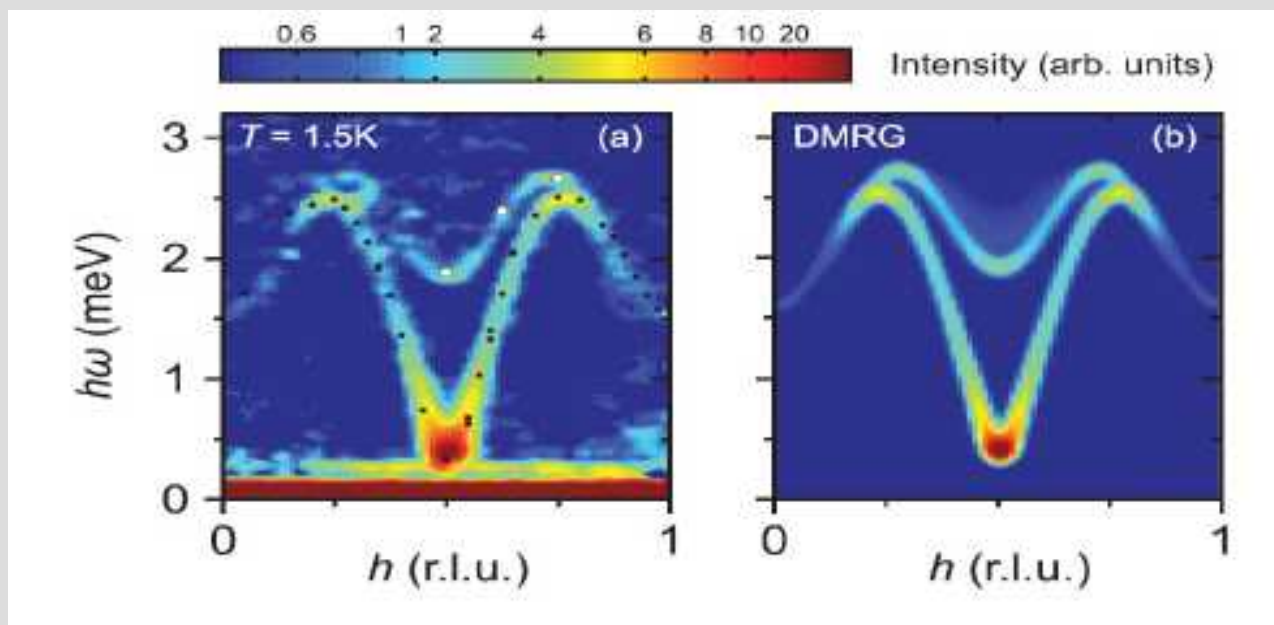
A. Shapiro, C. P. Landee, M. M. Turnbull, J. Jornet, M. Deumal, J. J. Novoa, M. A. Robb, and W. Lewis, *J. Am. Chem. Soc.* **129**, 952 (2007).

D. Schmidiger, P. Bouillot, S. Mühlbauer, S. Gvasaliya, C. Kollath, T. Giamarchi, and A. Zheludev, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 167201 (2012).

J. L. White, C. Lee, O. Gunaydin-Sen, L. C. Tung, H. M. Christen, Y. J. Wang, M. M. Turnbull, C. P. Landee, R. D. McDonald, S. A. Crooker, J. Singleton, M.-H. Whangbo, and J. L. Musfeldt, *Phys. Rev. B* **81**, 052407 (2010).



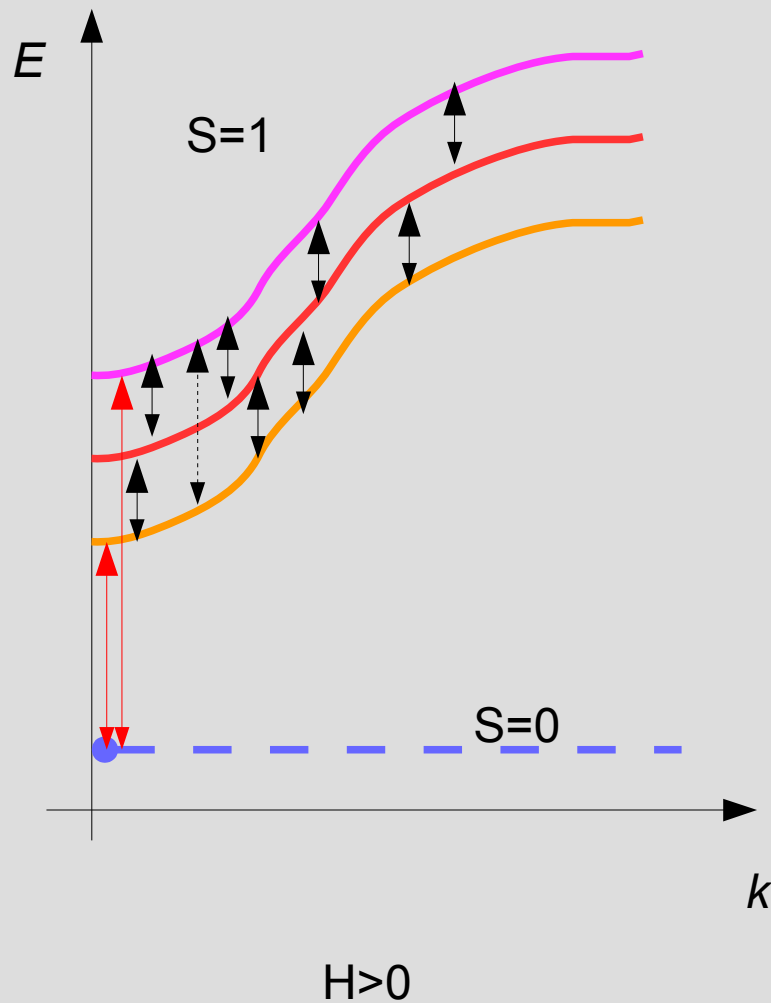
Пример измеренного спектра возбуждений (INS)



D. Schmidiger, P. Bouillot, T. Guidi, R. Bewley, C. Kollath, T. Giamarchi, and A. Zheludev, *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 107202 (2013).

Что увидит ЭПР?

ЭПР-переходы

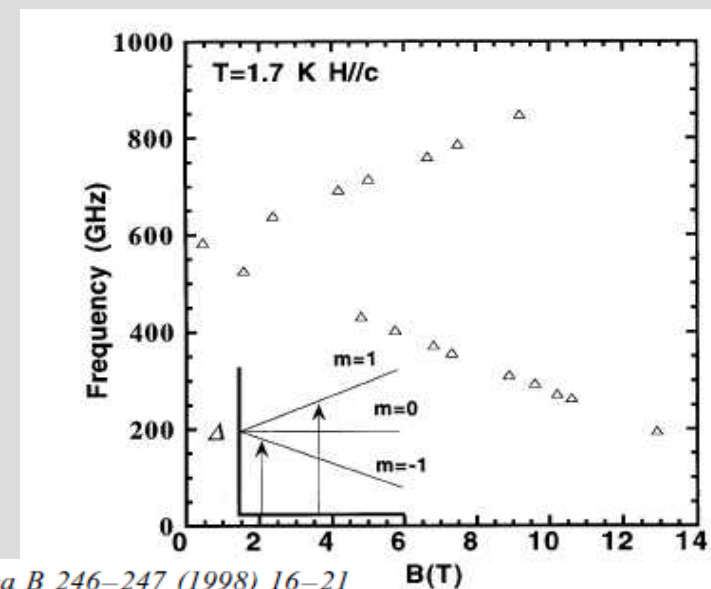
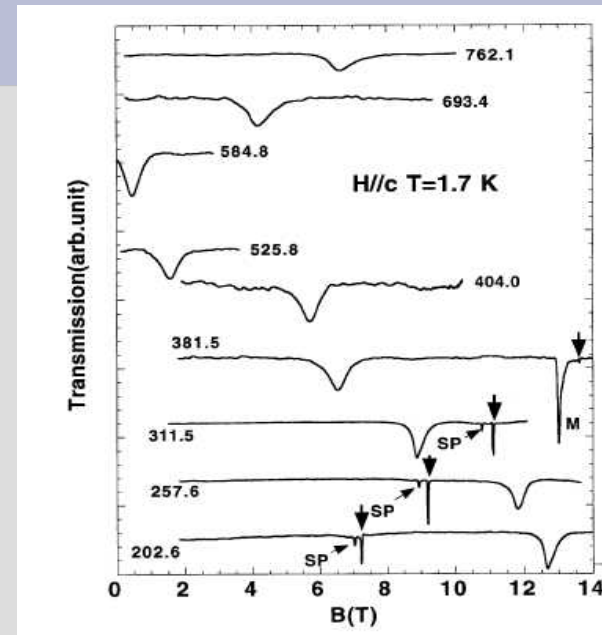
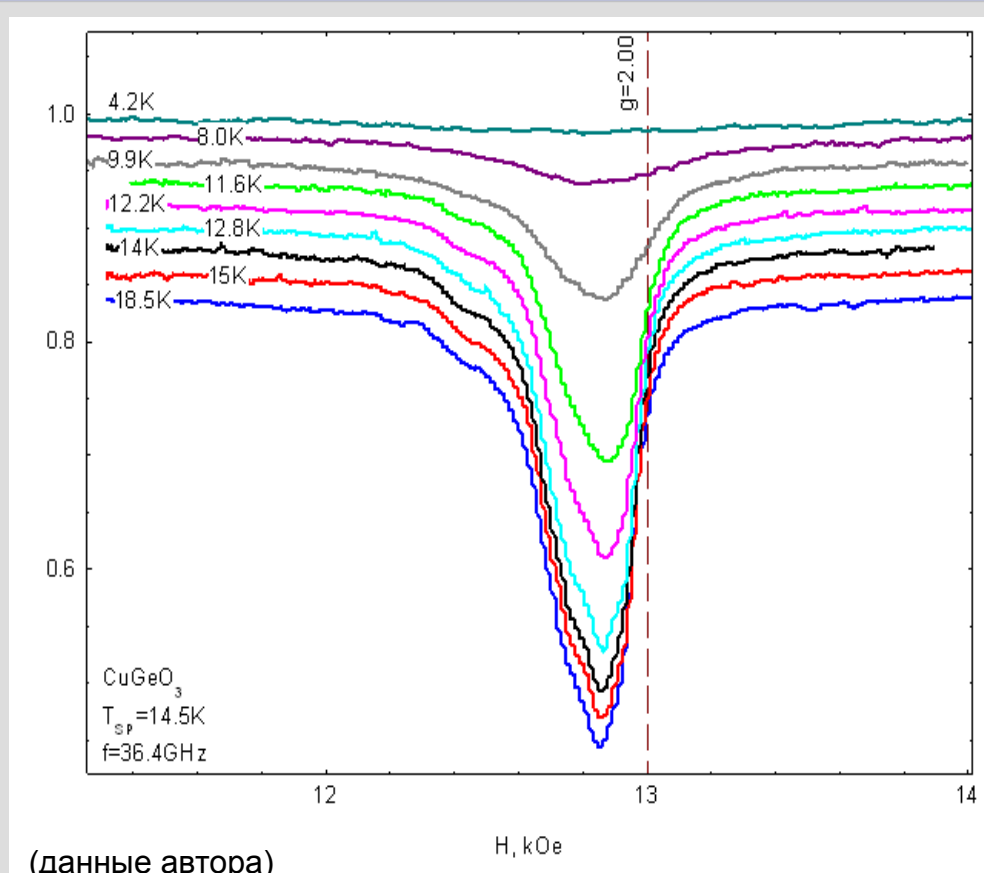


Переходы с $\Delta S_z = 1$ между триплетными подуровнями. По всей зоне Бриллюэна (з-н сохр. импульса $\Delta k = 0$).

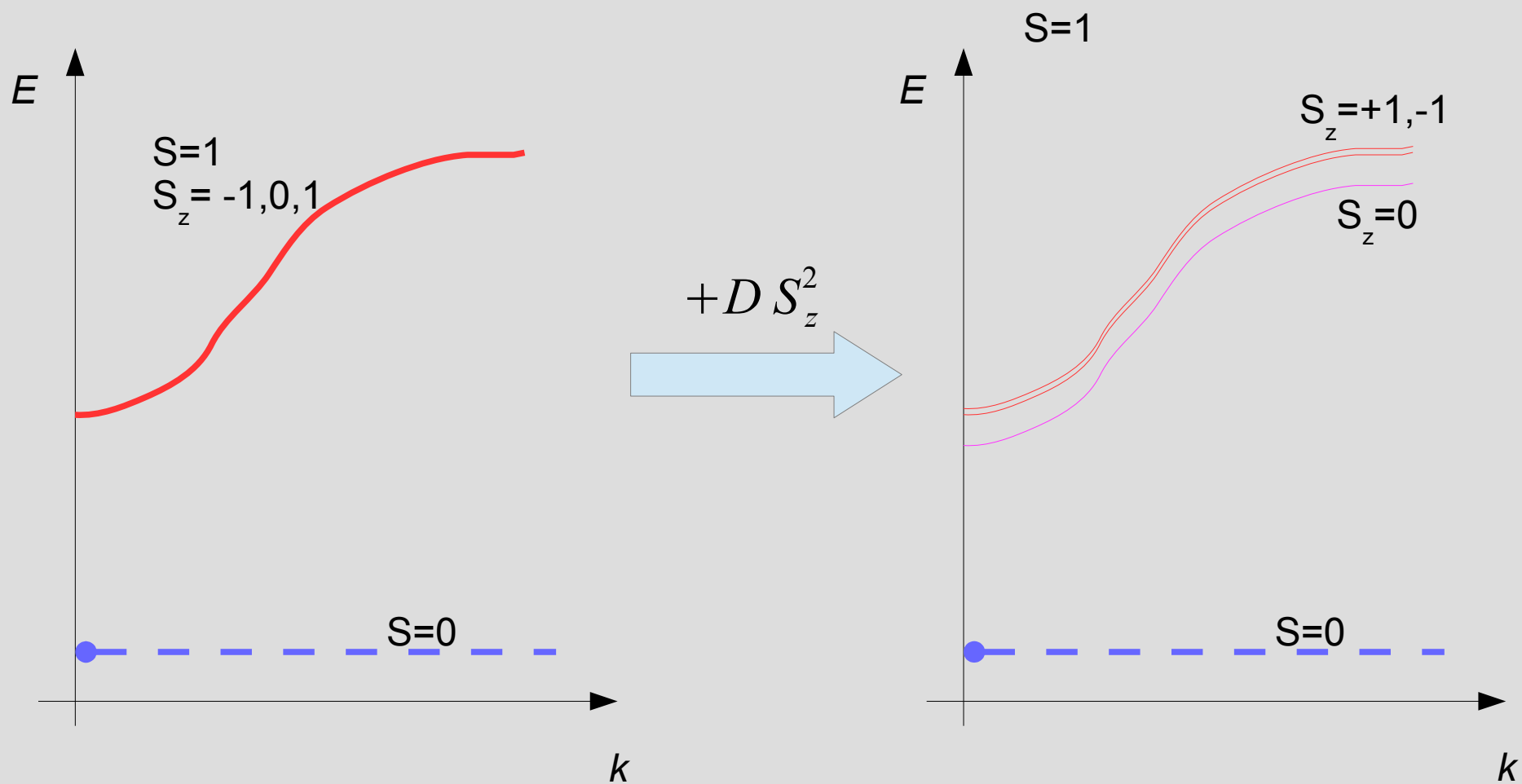
«Двухквантовые» переходы с $\Delta S_z = 2$, если нарушена аксиальная симметрия

Переходы синглет-триплет, если есть перемешивание состояния с $S=1$ и $S=0$.

Пример экспериментальных данных

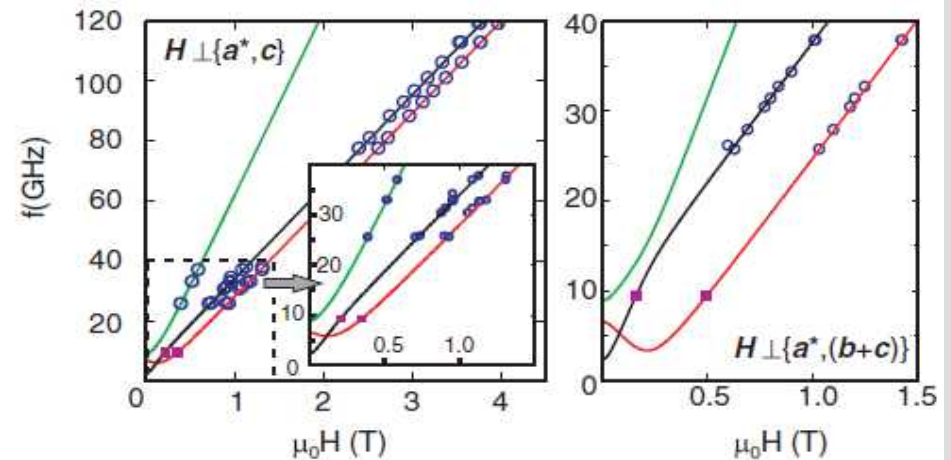
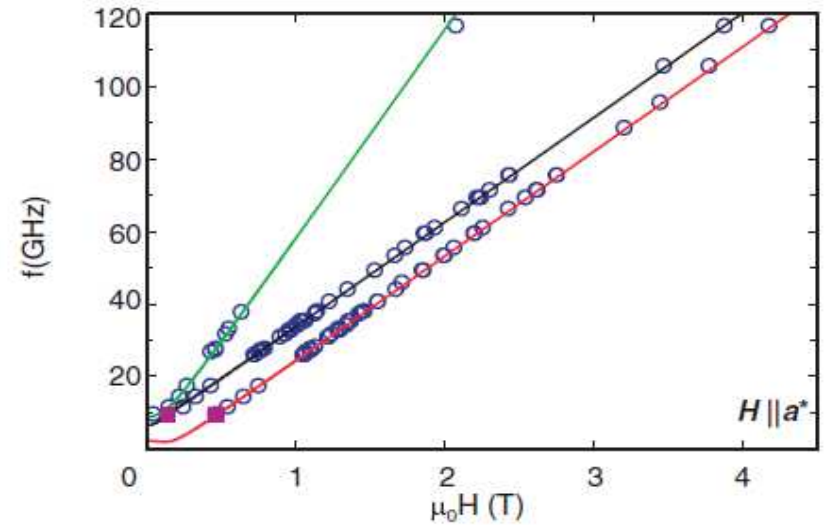
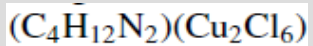
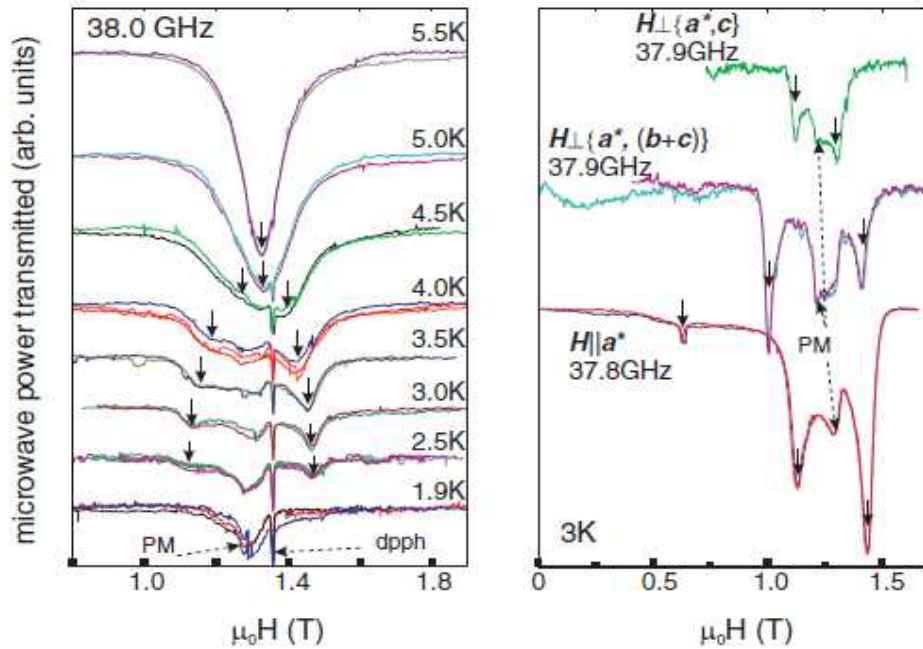


Эффективное кристаллическое поле для триплетных возбуждений.

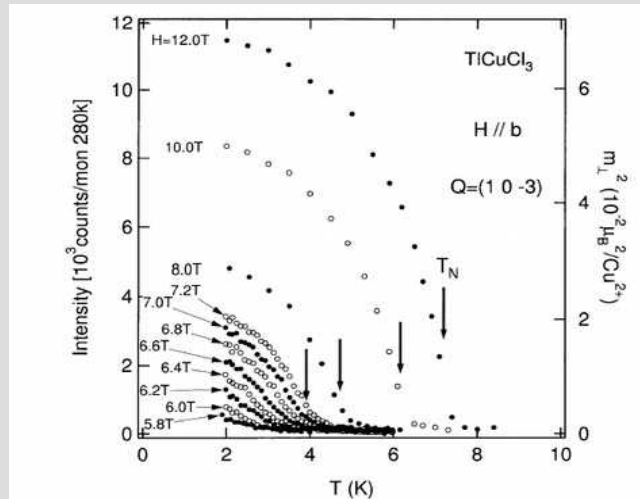
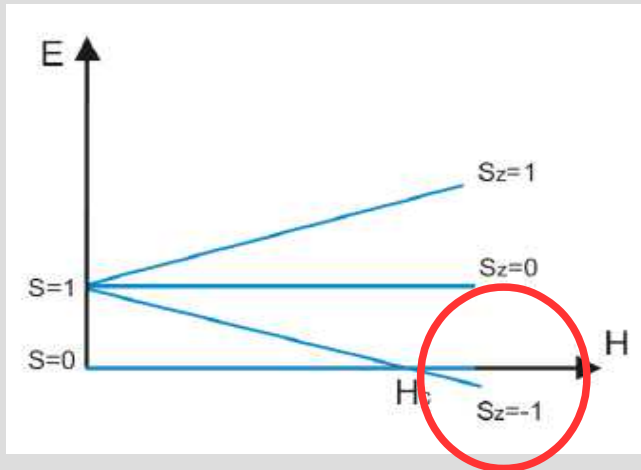
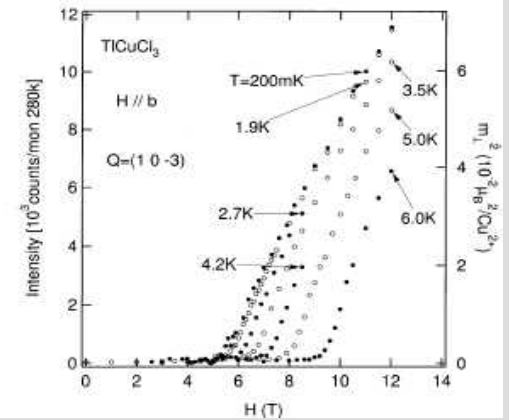
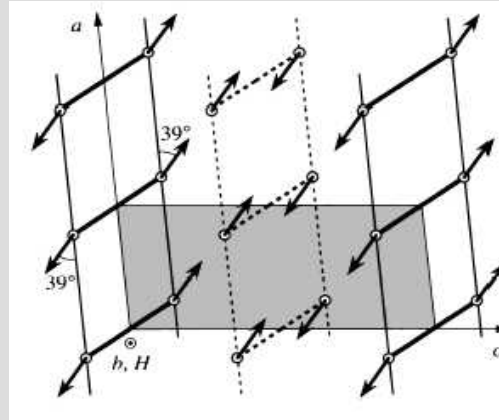


коллективный, а не одноионный эффект: многоспиновое делокализованное триплетное возбуждение «чувствует» анизотропные спин-спиновые взаимодействия

Эффективное кристаллическое поле: эксперимент

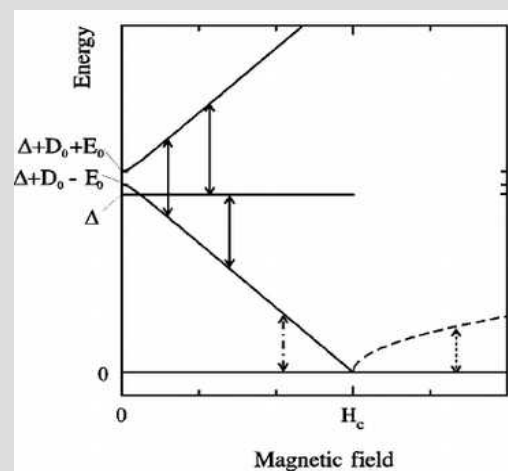
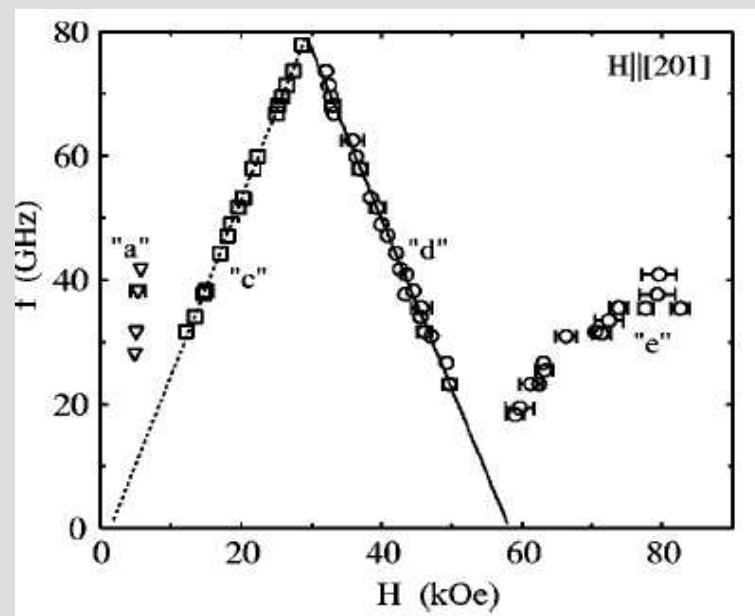
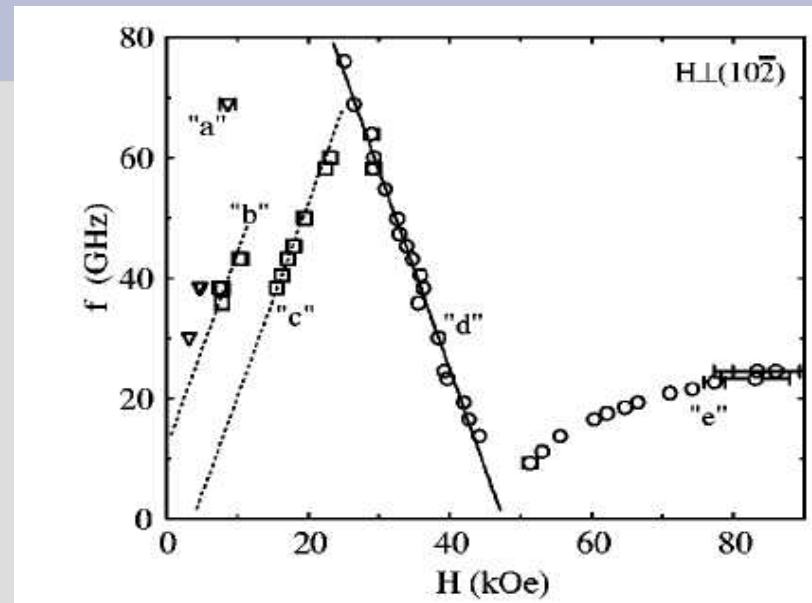
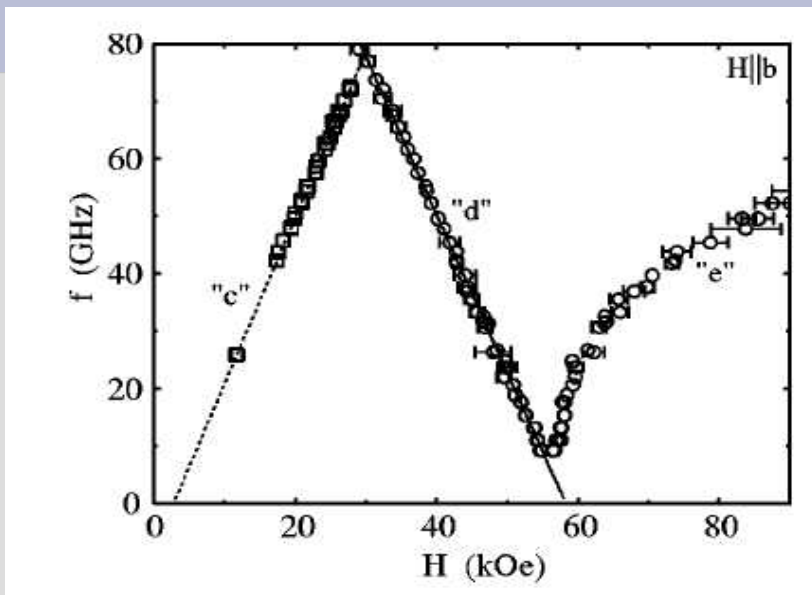


Индукированный полем антиферромагнетизм



TiCuCl₃

ЭПР в TlCuCl_3 : *all included*



Промежуточные выводы: коллективные парамагнетики

ЭПР в коллективных парамагнетиках (спиновых жидкостях) позволяет получить информацию о тонкой структуре спектра коллективных возбуждений, его анизотропных свойствах, фазовых переходах.

Высокое энергетическое разрешение ЭПР спектроскопии позволяет получать данные существенно дополняющие INS и другие техники.

