

Порядок и беспорядок в квантовых магнетиках

А.И.Смирнов

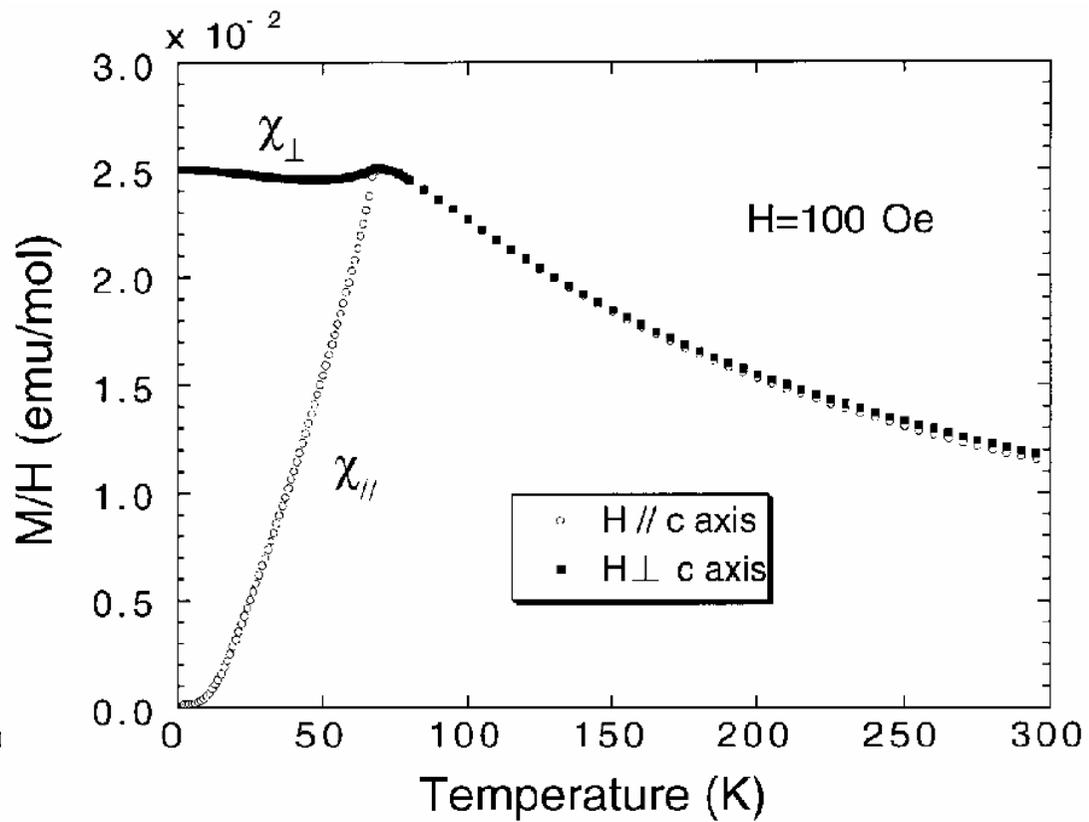
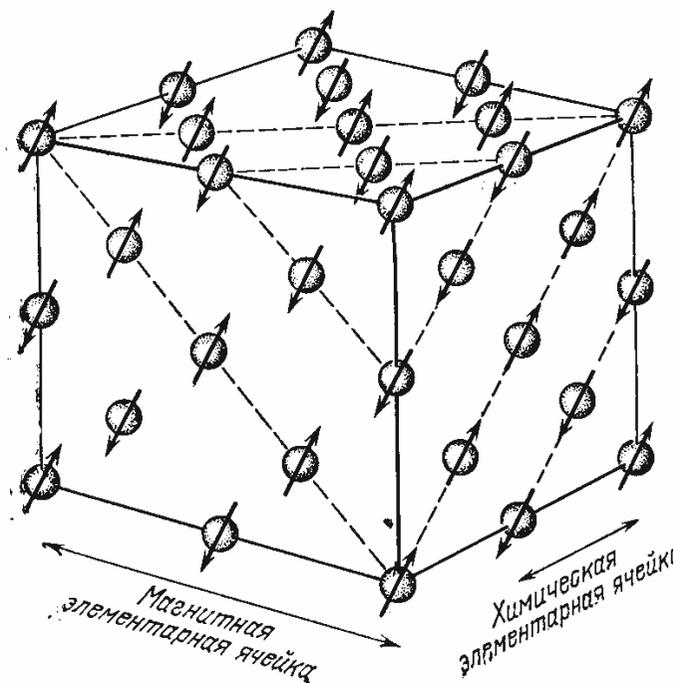
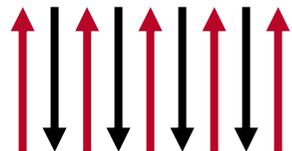


Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН



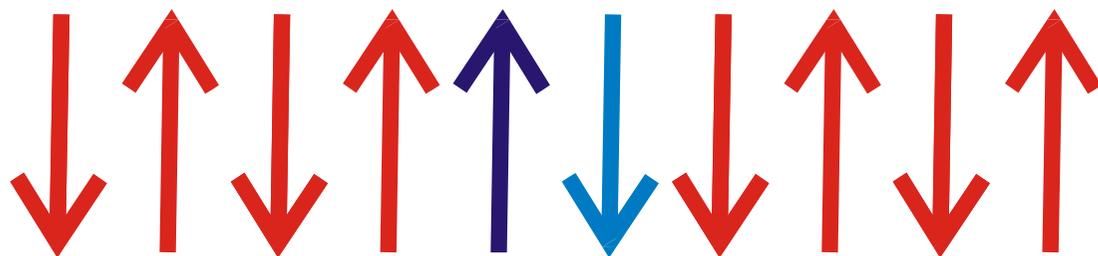
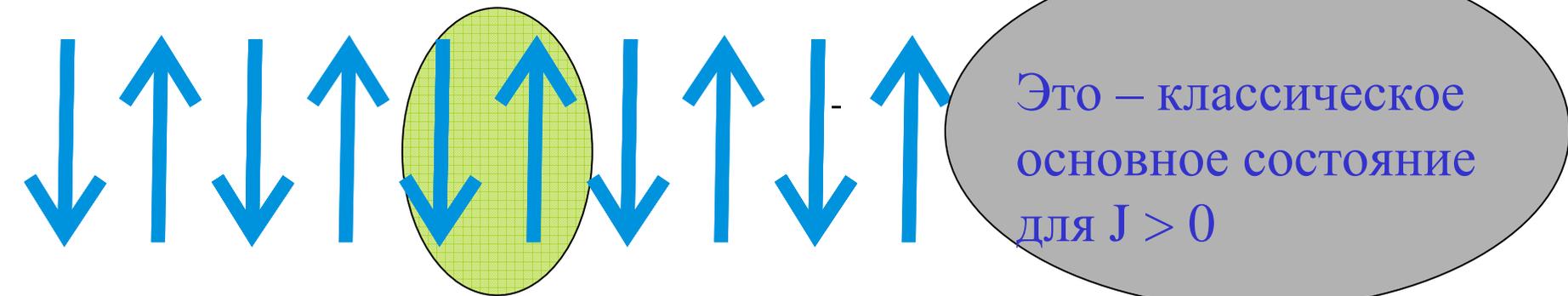
МФТИ 25 мая 2015

Антиферромагнетик



Гейзенберговский обмен и проблема основного состояния антиферромагнетиков

$$\mathcal{H} = \sum_{\langle i, j \rangle}^N J \hat{\mathbf{S}}_i \hat{\mathbf{S}}_j \quad \mathcal{H} = \sum_{\langle i, j \rangle}^N J \left[\hat{S}_i^z \hat{S}_j^z + \frac{1}{2} (\hat{S}_i^+ \hat{S}_j^- + \hat{S}_i^- \hat{S}_j^+) \right]$$

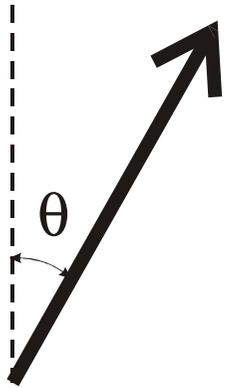


Но оно не является собственным для гамильтониана

В реальной антиферромагнитной структуре всегда есть редукция спина: $|\langle S_z^i \rangle| < S$

Нет порядка в одномерных АФМ спиновых цепочках даже при $T=0$

Редукция спина 100%



M_i Вклад спиновых волн в полную энергию и угол отклонения параметра порядка :

$$E \sim (\text{grad } \Theta)^2 \sim k^2 \Theta^2 \sim \varepsilon_k n_k$$

$$\omega_k = \alpha k$$

$$\Theta^2 \sim \varepsilon_k n_k / k^2 \sim n_k / k \sim 1/k$$

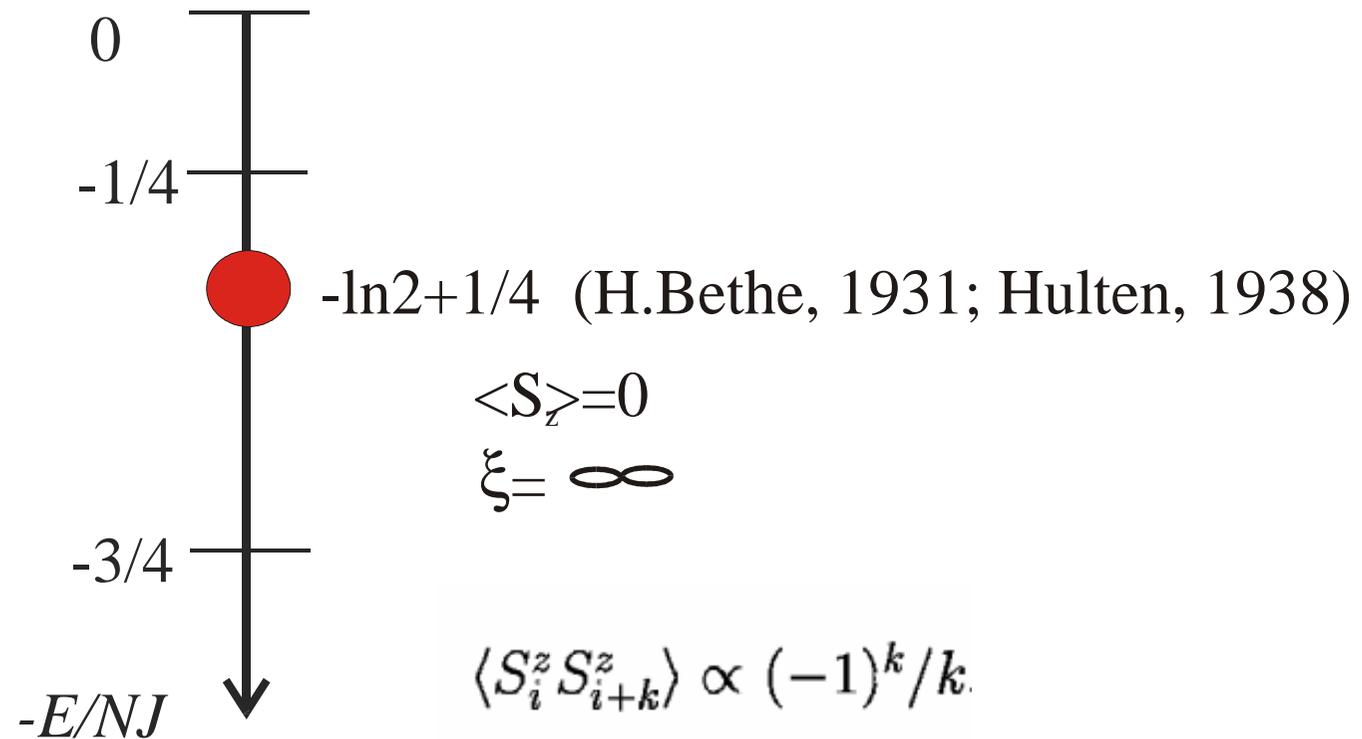
$$T=0$$

$$n_k = 1/2$$

$$\delta M \sim \int_k \theta^2 dk \sim \int_k dk/k \rightarrow \infty$$

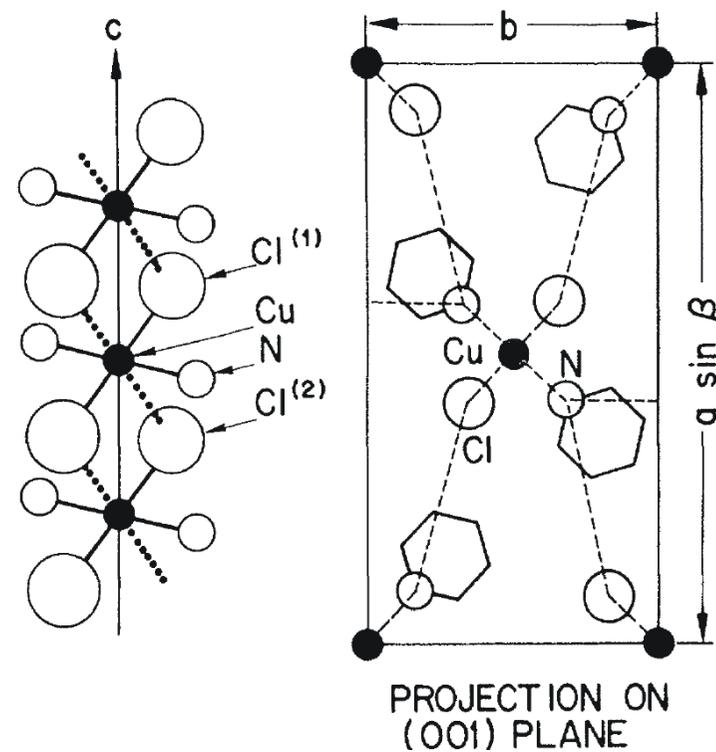
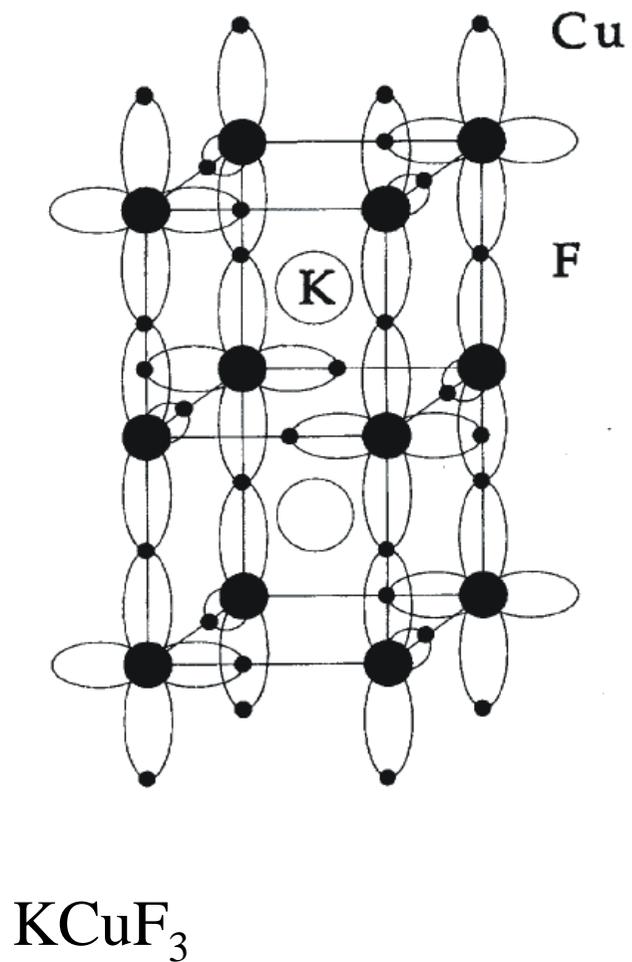
Порядка нет. А что же есть ?

Цепочка спинов $S=1/2$ (анзац Бете)

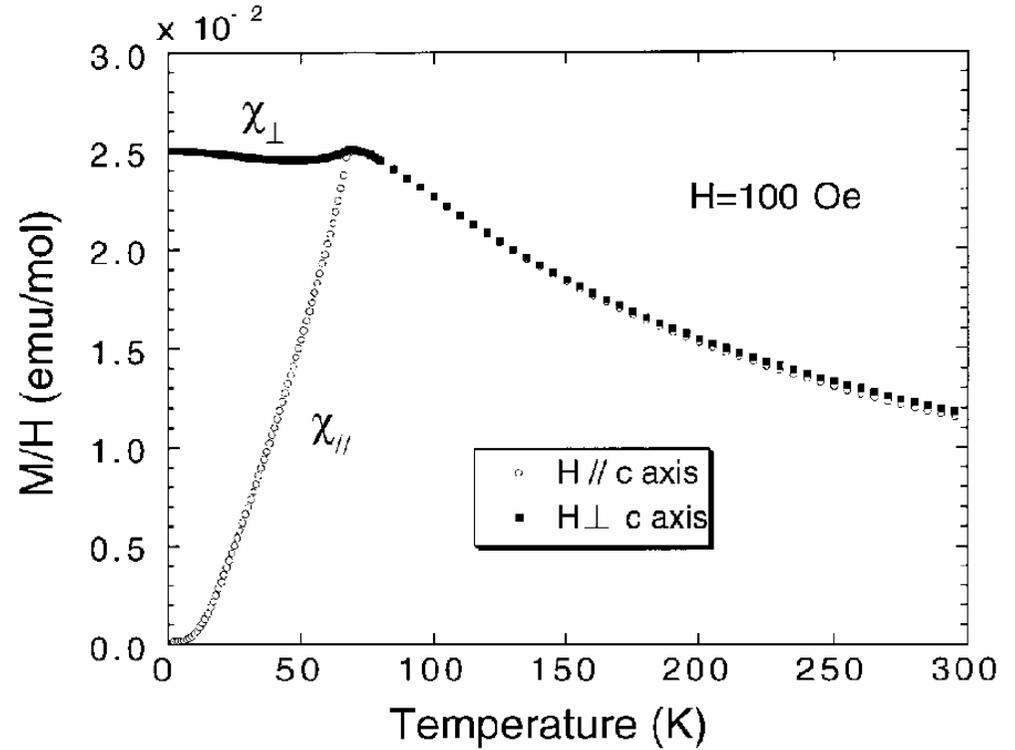
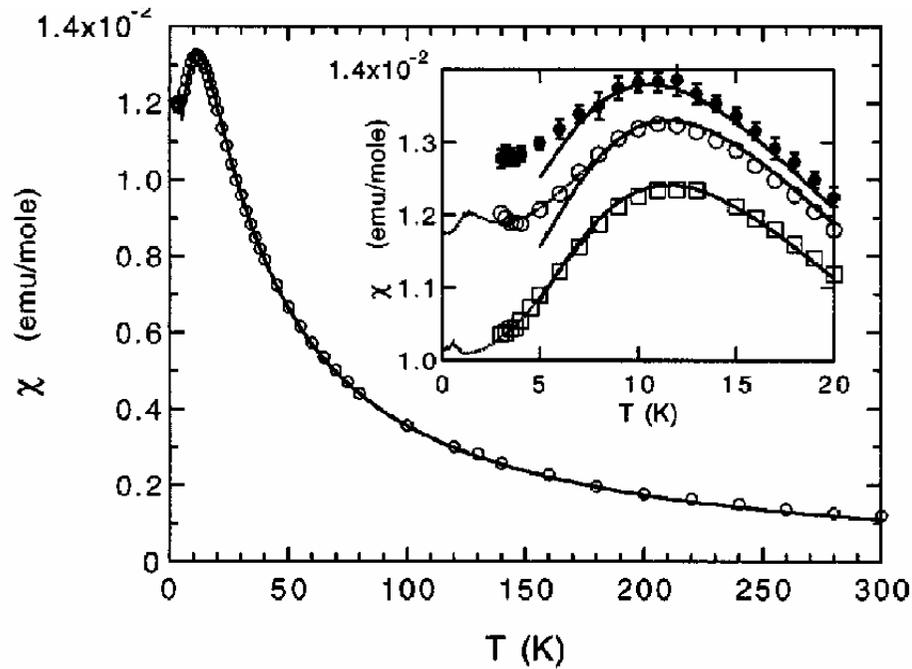


$T=0$ – критическая точка !

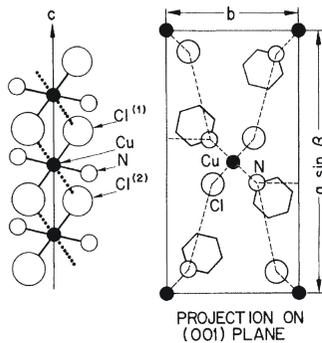
Примеры "одномерных" магнетиков в трехмерных кристаллах



Восприимчивость квантовых $S=1/2$ цепочек и антиферромагнетиков

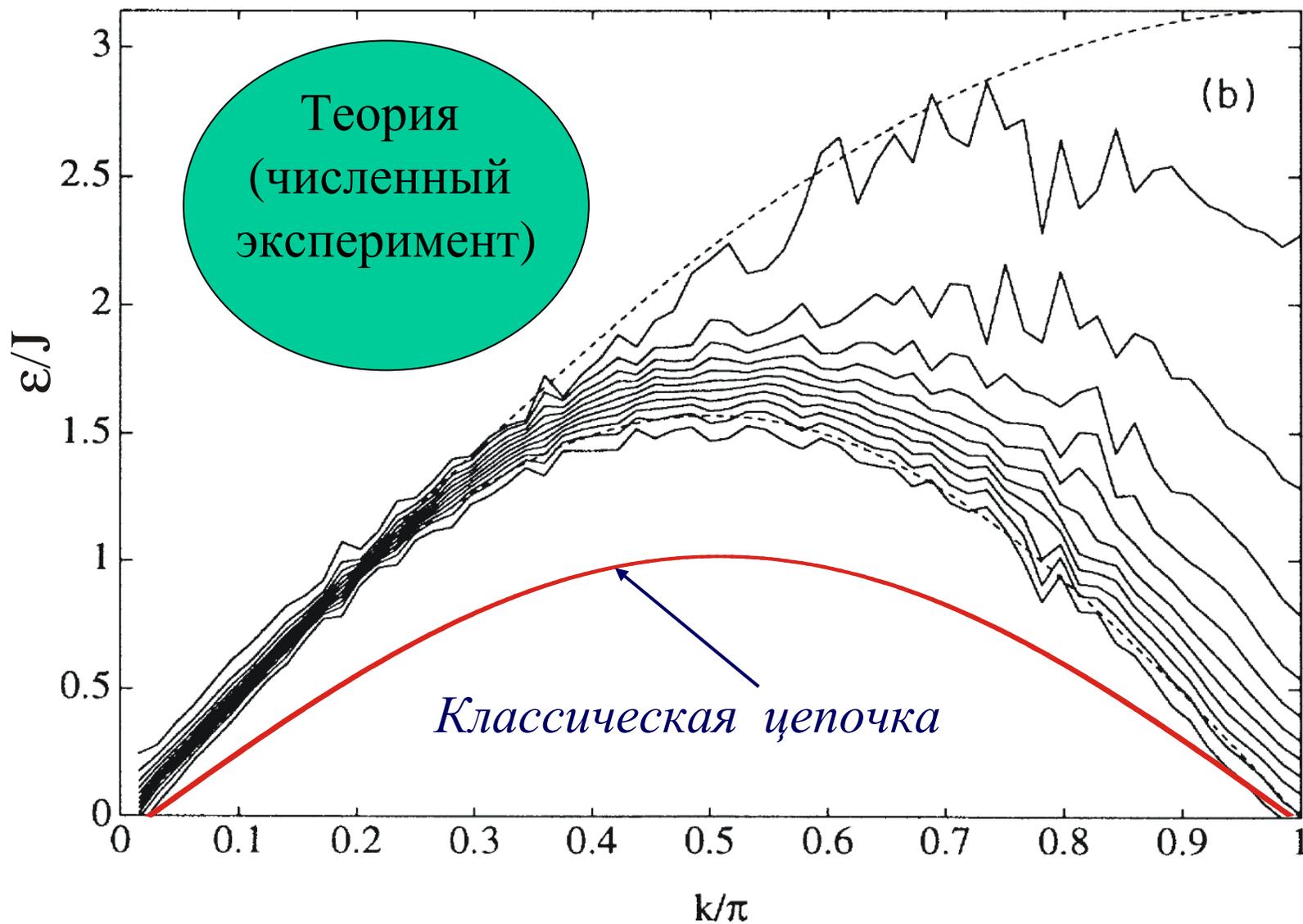


$S=1/2$ chains in copper benzoate

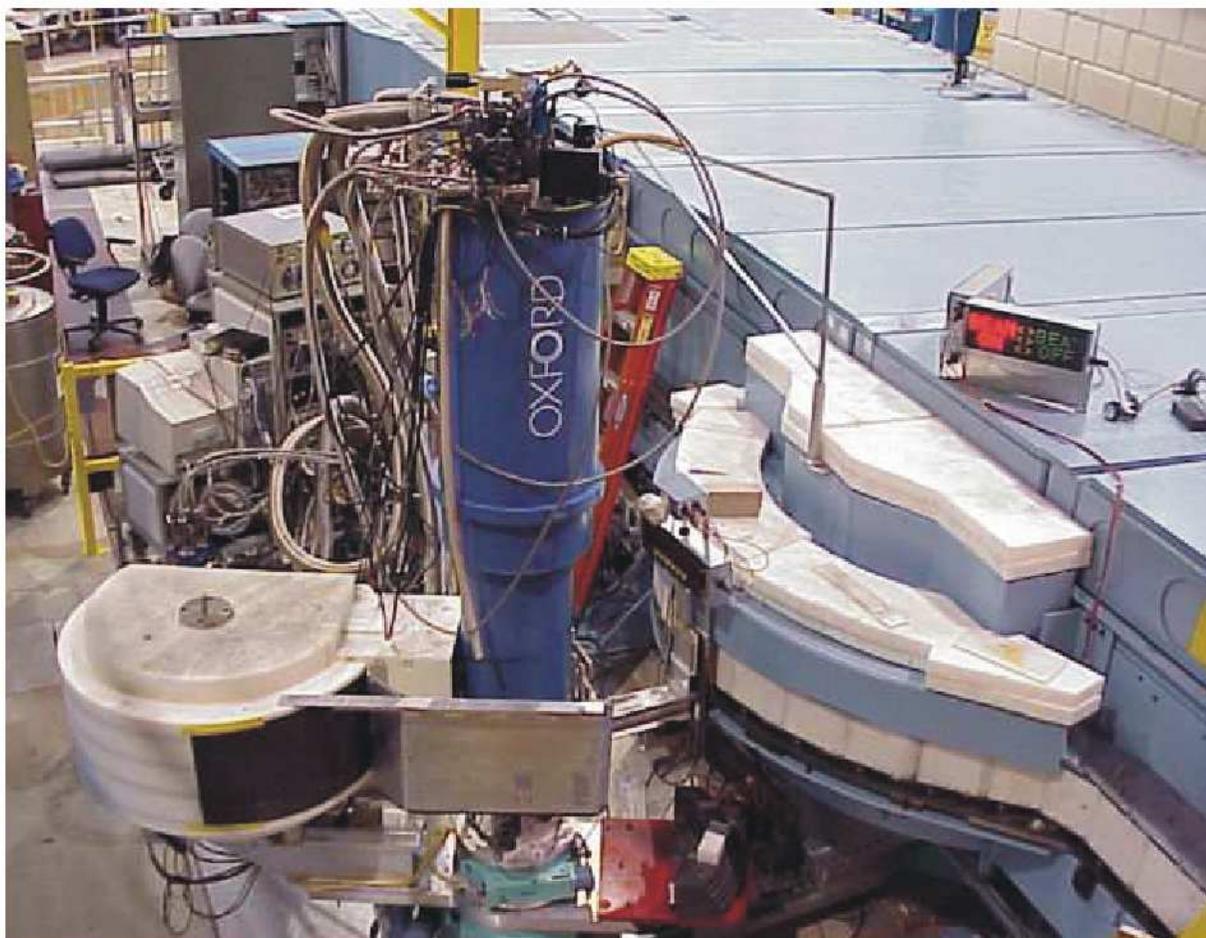


AFM MnF_2

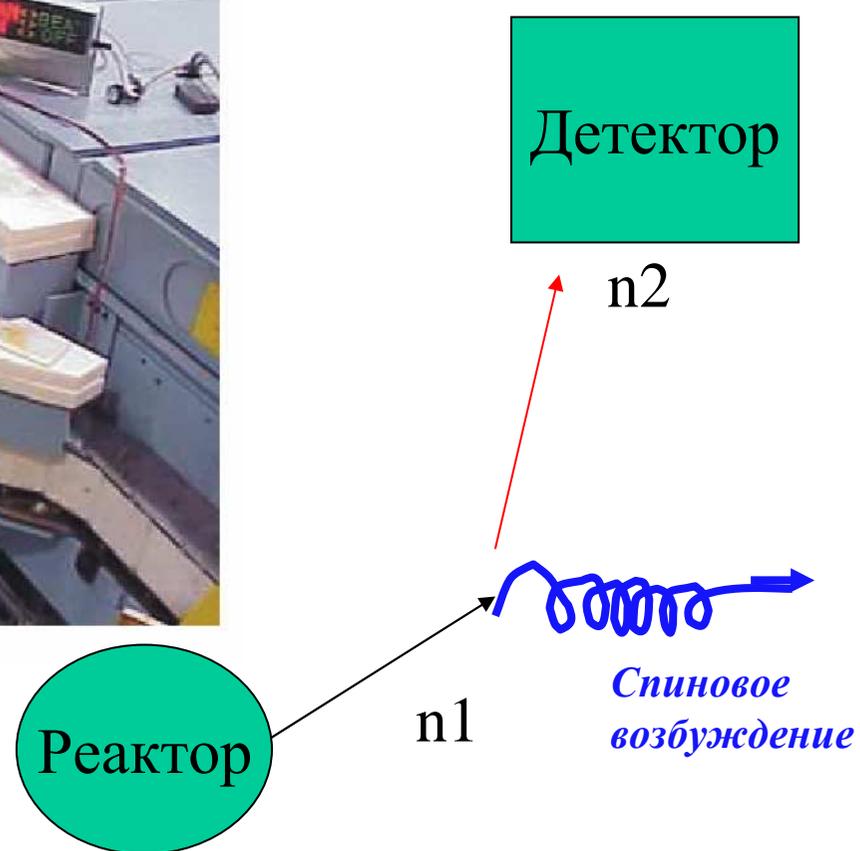
Спектр возбуждений в квантовом магнетике .

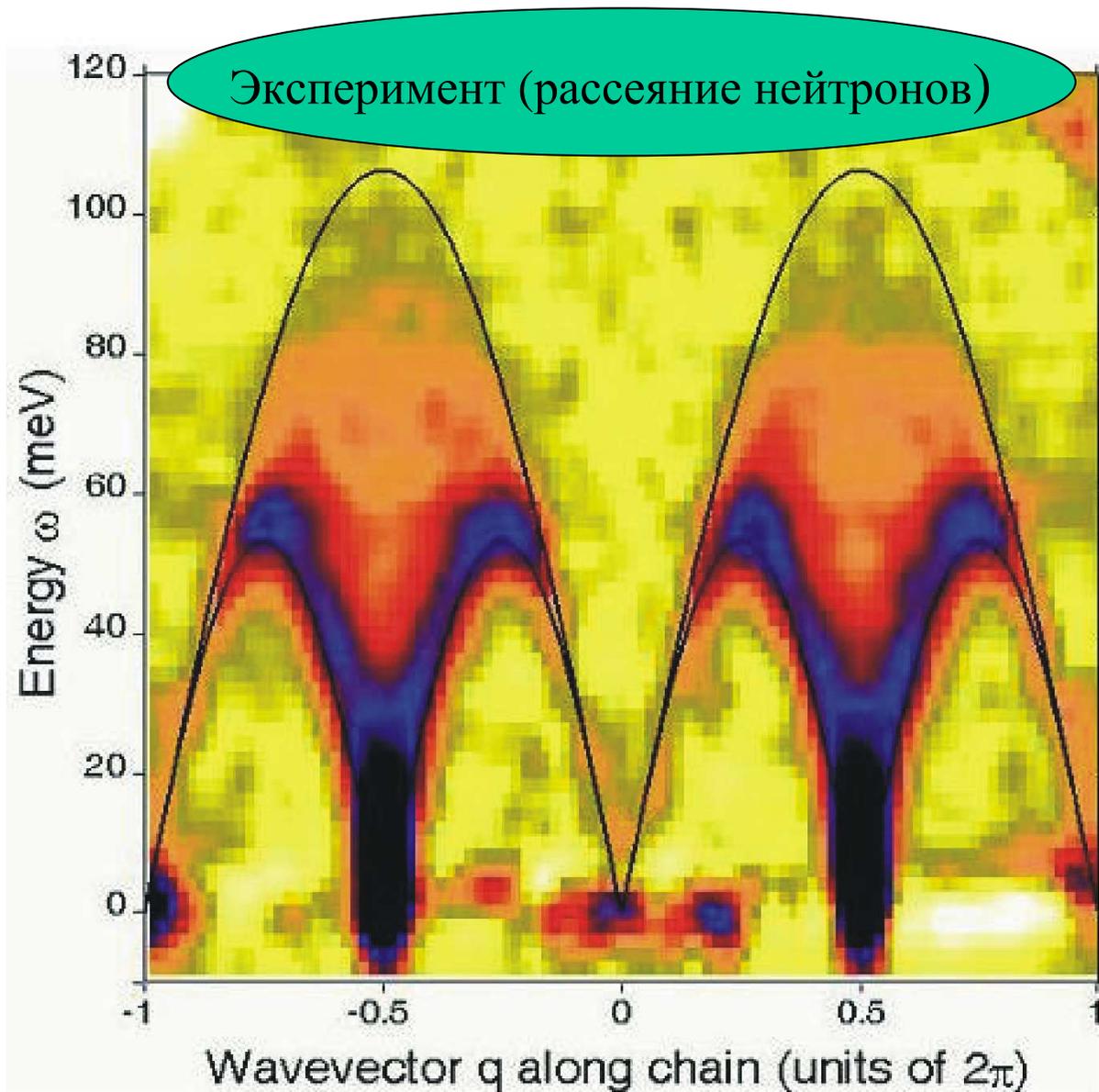


Спектр цепочки спинов $1/2$. С.Мешков 1993

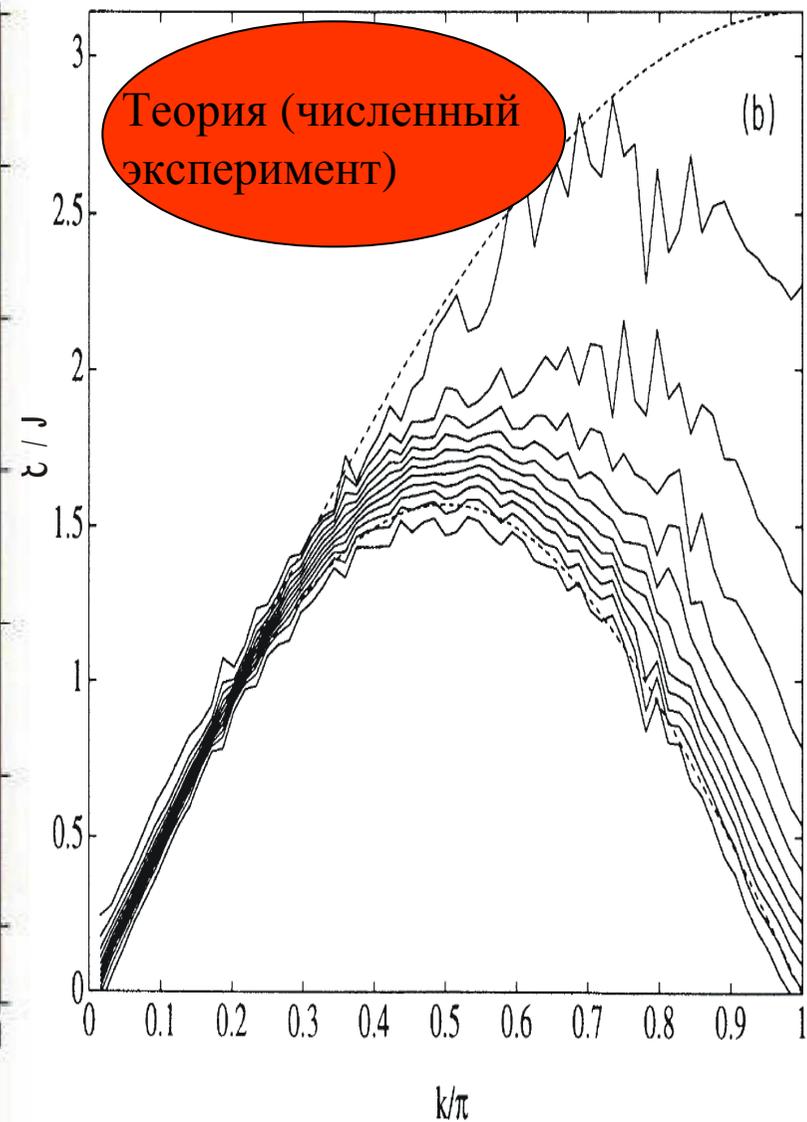


Нейтронный
спектрометр
NIST

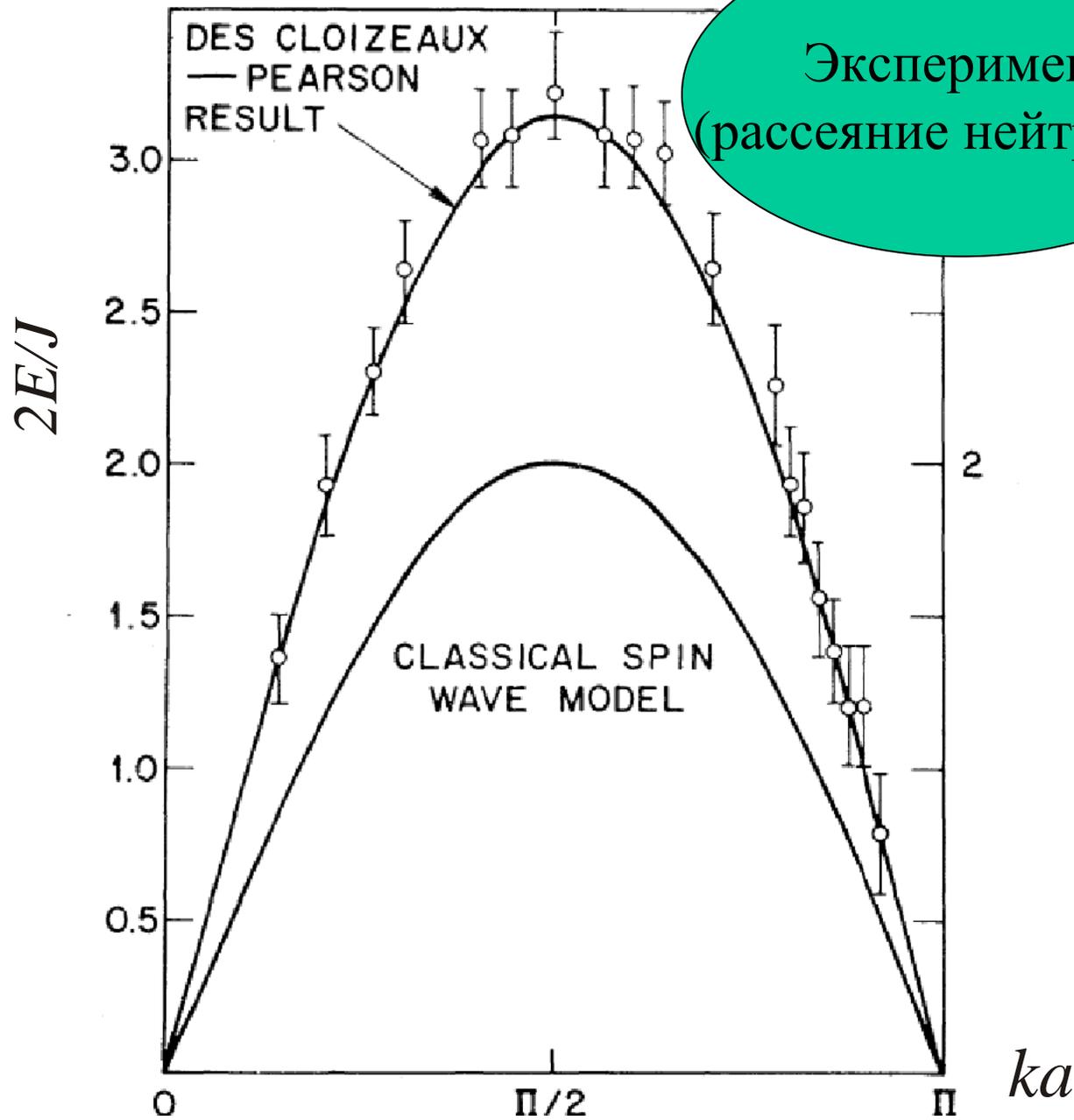




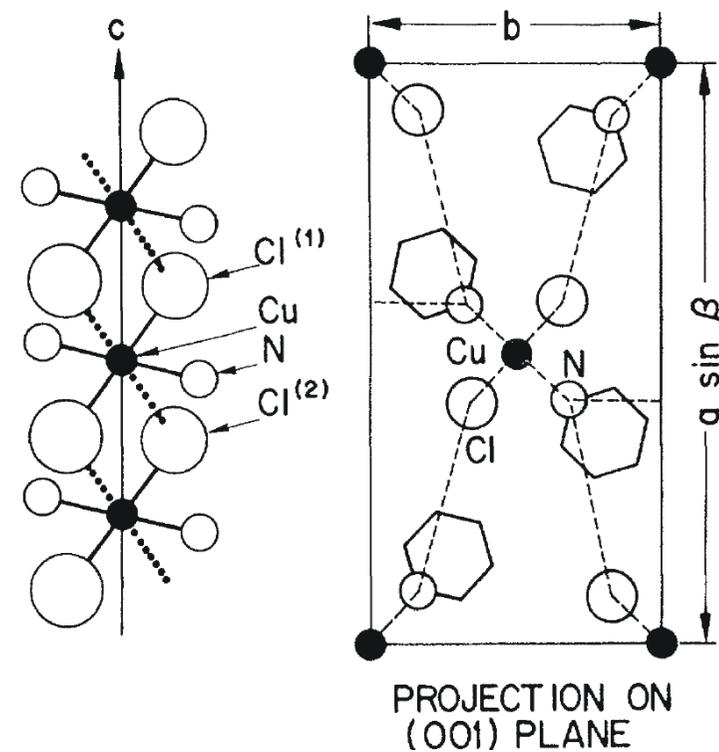
D. Tennant et al 2000 KCuF_3



$$\omega_u = 2 \omega_l(k/2)$$



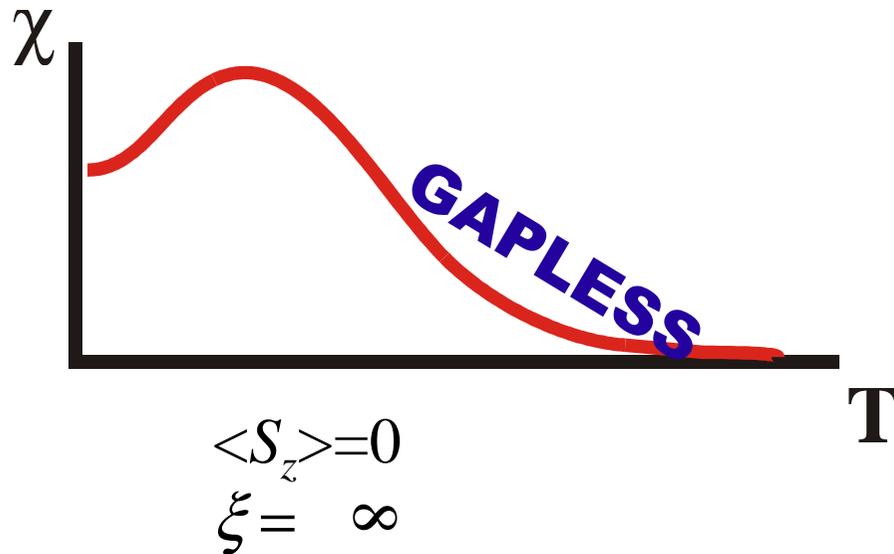
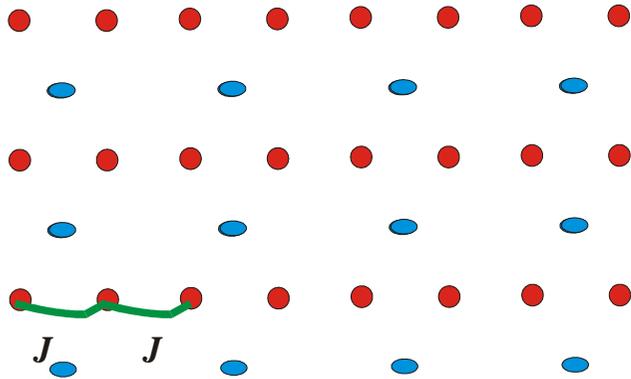
Спектр возбуждений
в $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{N}(\text{C}_5\text{H}_5)$



Endoh et al PRL1974

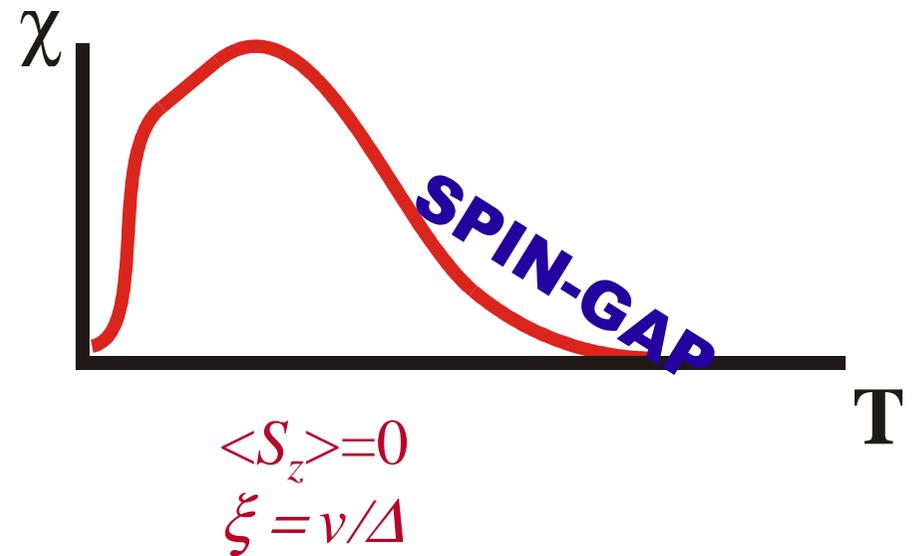
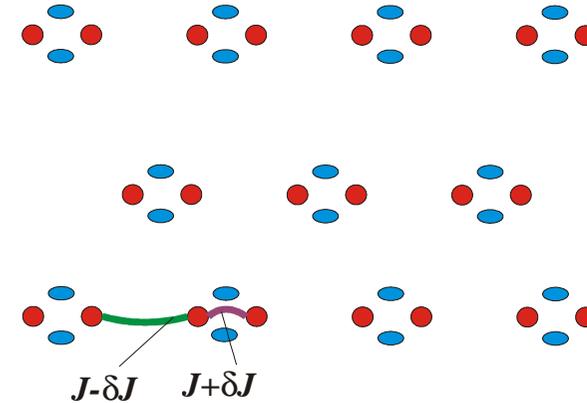
Щелевые и бесщелевые спиновые жидкости в системах спинов $S=1/2$

Спиновые цепочки

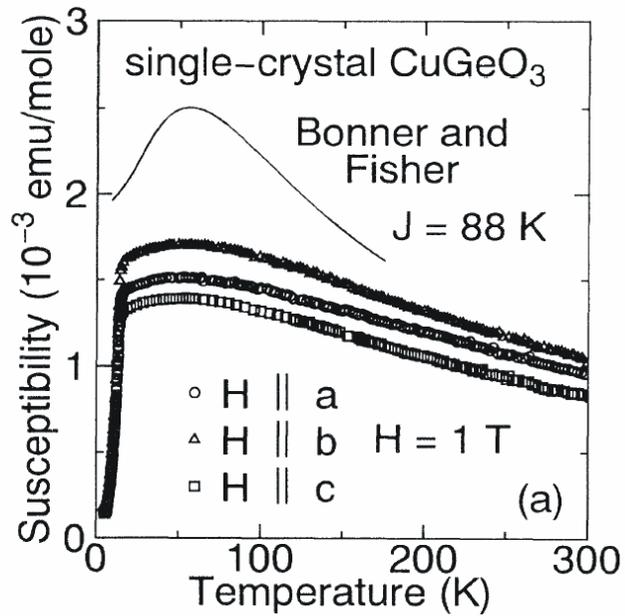


Бесщелевые системы неустойчивы и обычно упорядочиваются при очень низких температурах $k_B T \ll J$

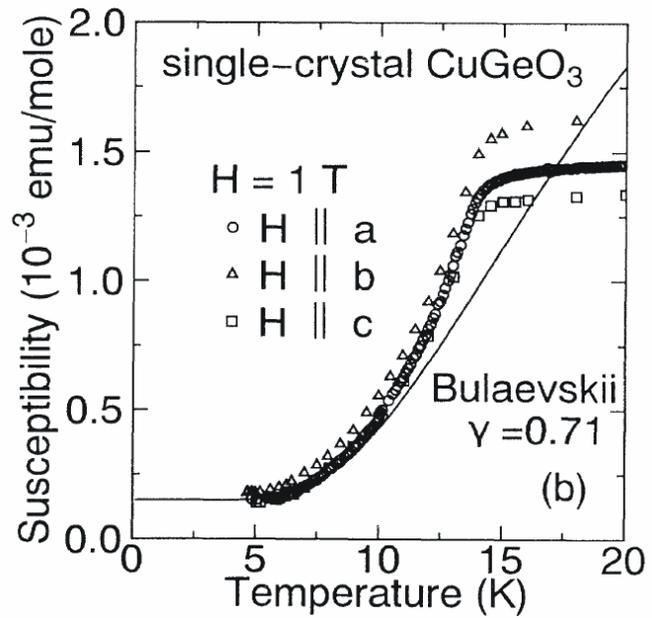
Связанные димеры спинов $S=1/2$



Щелевые системы устойчивы и не упорядочиваются до $T=0$



Восприимчивость
спин-пайерлсовского
магнетика



Hase et al PRL 1993

**Обычные магнетики демонстрируют
упорядочение при $T \sim J/k_B$**

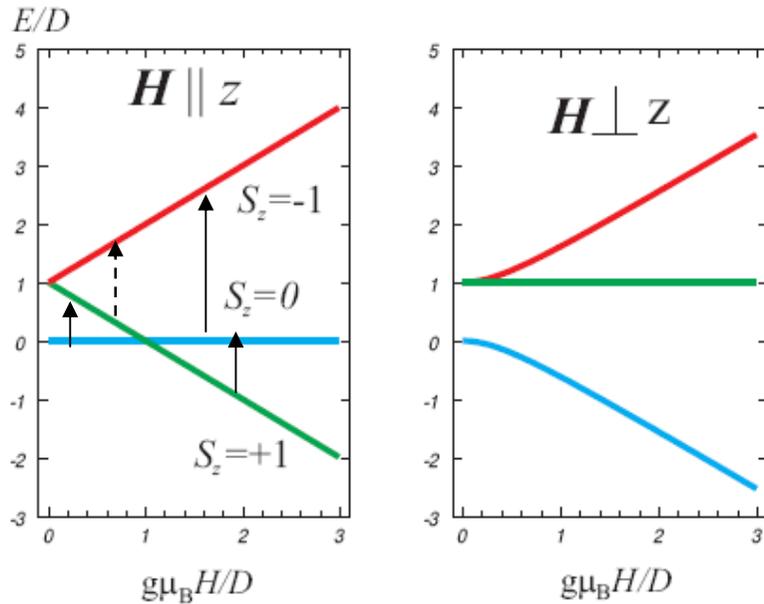
**Квантовые спиновые жидкости остаются
неупорядоченными ($\langle S_z^i \rangle = 0$) при $T \ll J/k_B$**



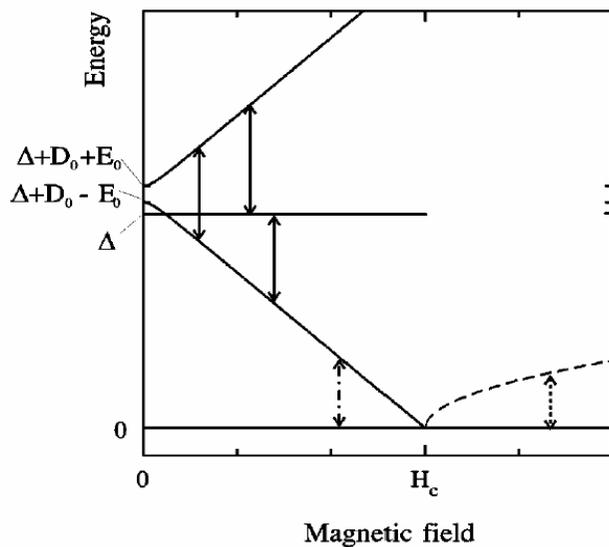
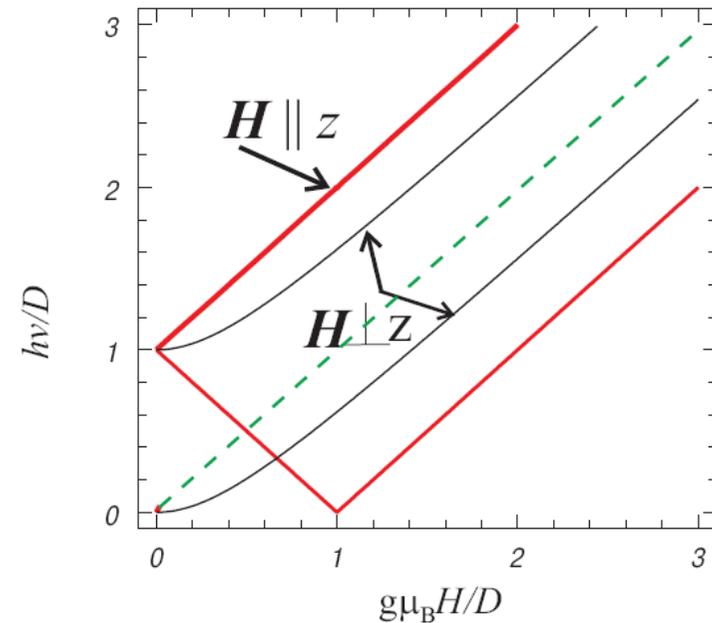
Рисунок из презентаций О.Старыха и А. Чубукова

Как квантуются возбуждения в квантовой спиновой жидкости?

Рассмотрим щелевые спиновые жидкости. Разрушение синглетного состояния димера дает $S=1$. Расщепление подуровней спина $S=1$ в магнитном и кристаллическом поле известно.



Переходы между уровнями



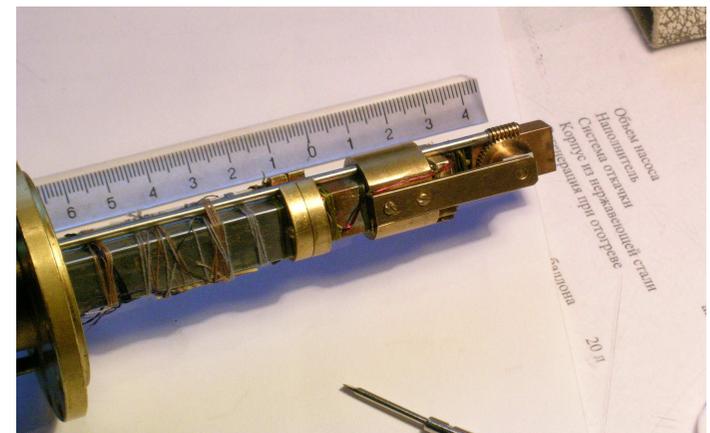
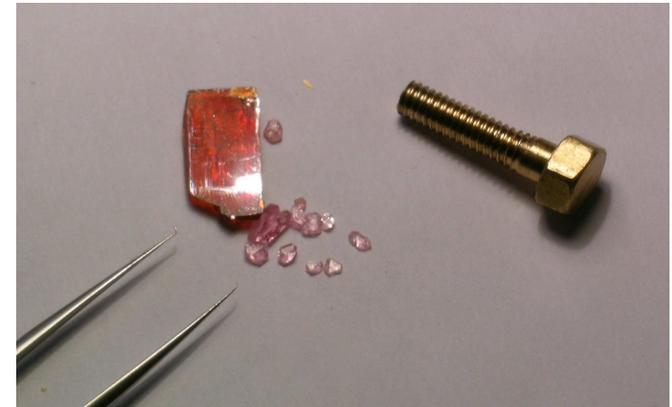


Спектрометр магнитного резонанса

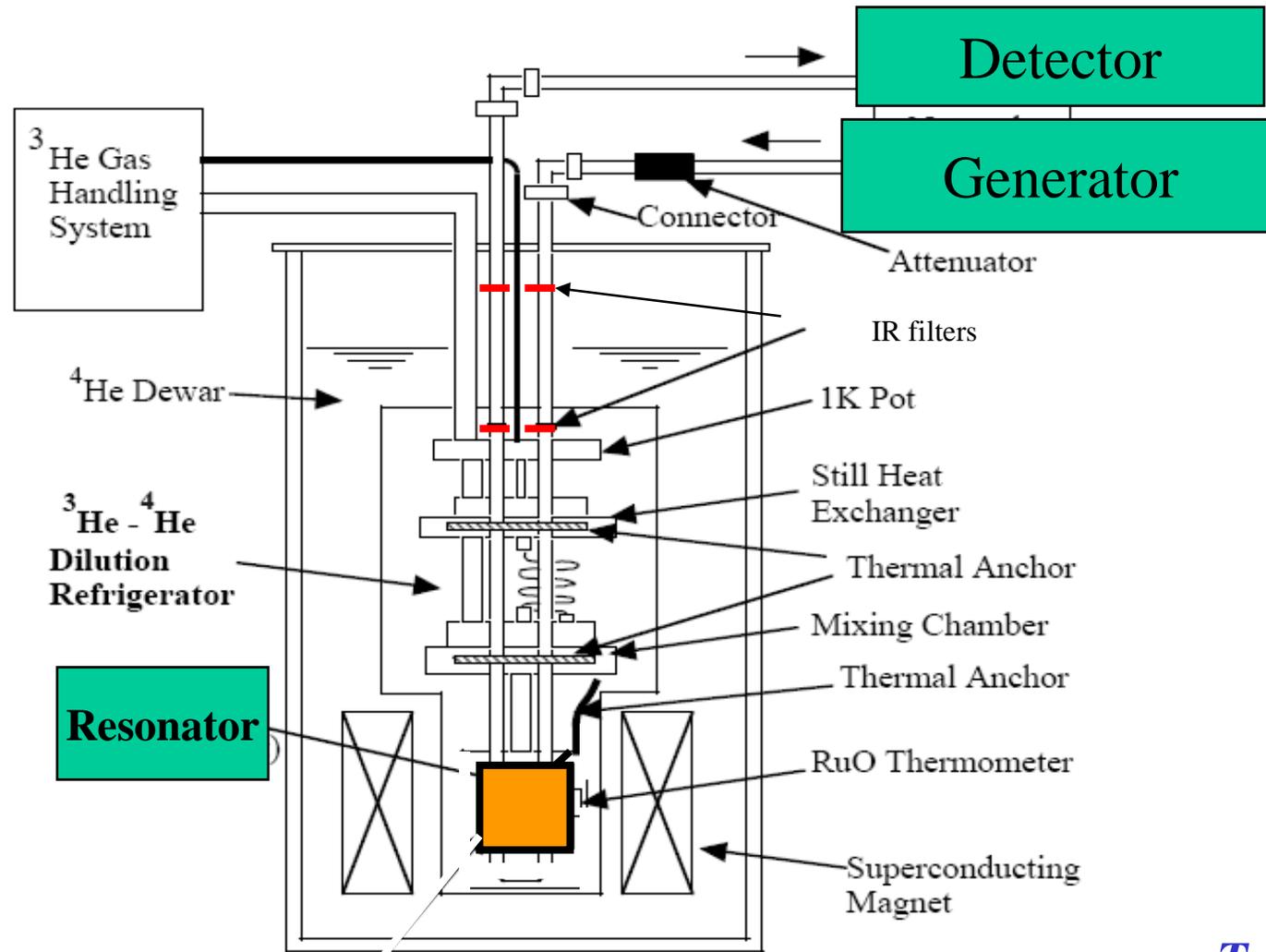
$f=1-250$ GHz

$T= 0.04 -1$ К, $0.4- 4$ К, $1.3-300$ К

$H=14$ T



Микроволновый спектрометр магнитного резонанса с криостатом



$T = 0.05 - 20 \text{ K}$

$B = 14 \text{ T}$

Freq. range 1-350 GHz

Dilution cryostat with microwave insert



TiCuCl₃ - трехмерная сеть димеров спинов S=1/2.

PRL 2000 T. Nikuni,* M. Oshikawa, A. Oosawa, and H. Tanaka

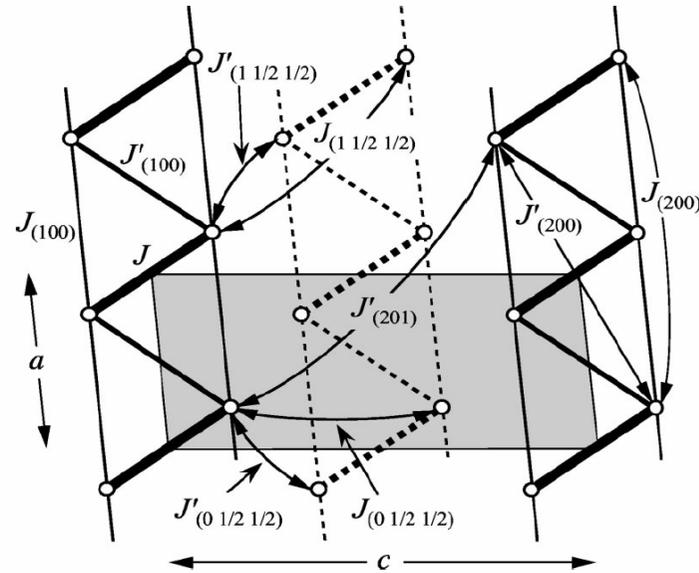
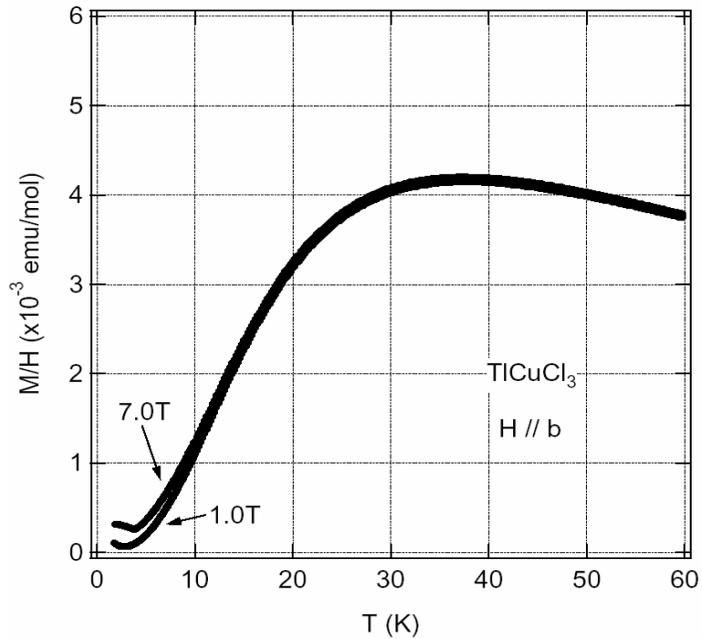
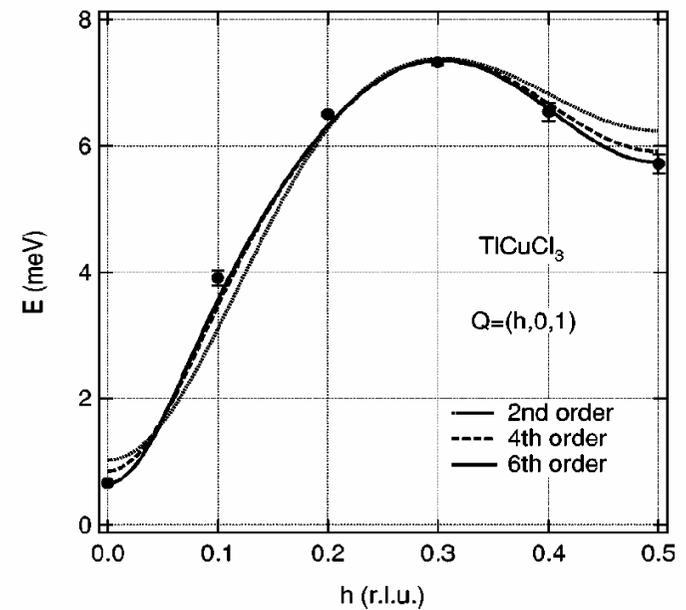


FIG. 1. Projection of Cu²⁺ ions with spin- $\frac{1}{2}$ on the a-c

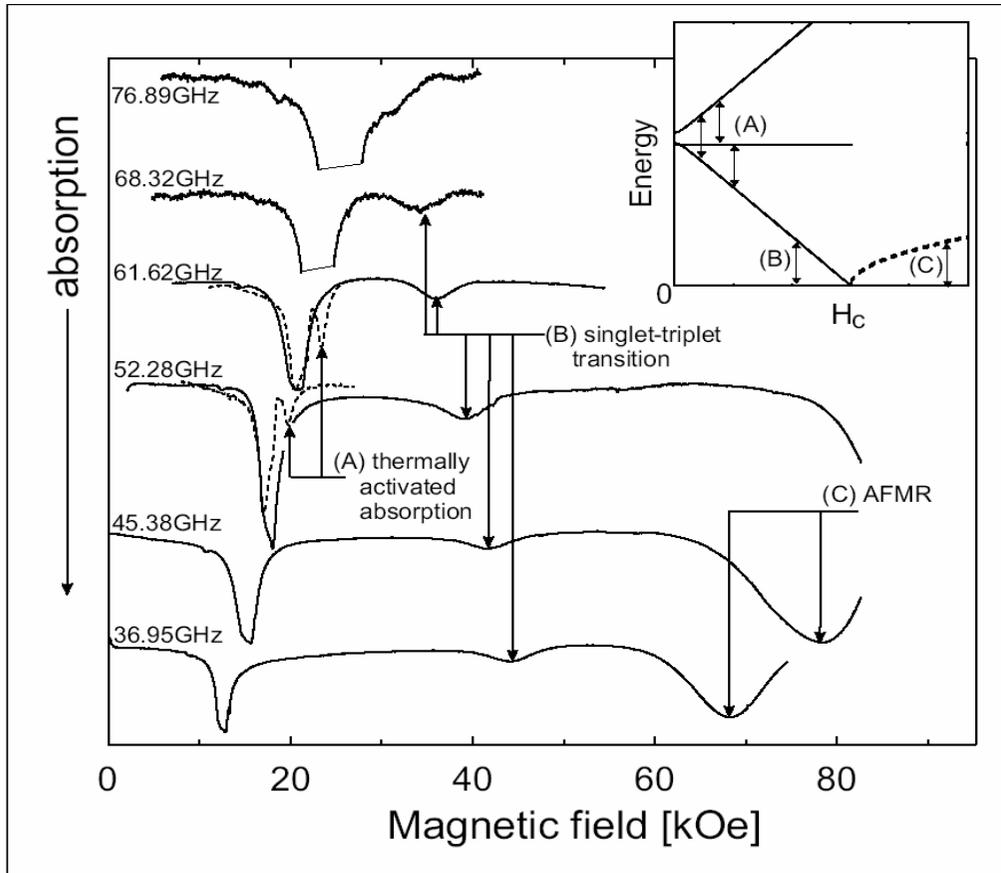


Спиновая щель: восприимчивость вымерзает

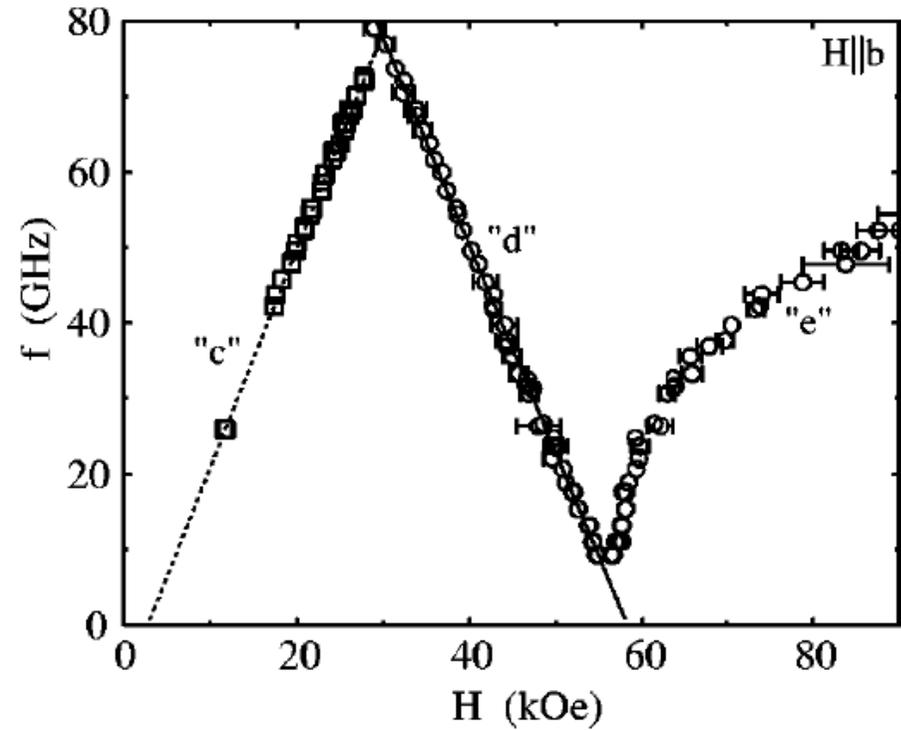


Спектр коллективных возбуждений

Частотно-полевая зависимость: закрывание спиновой щели полем. $H||b$, $TiCuCl_3$



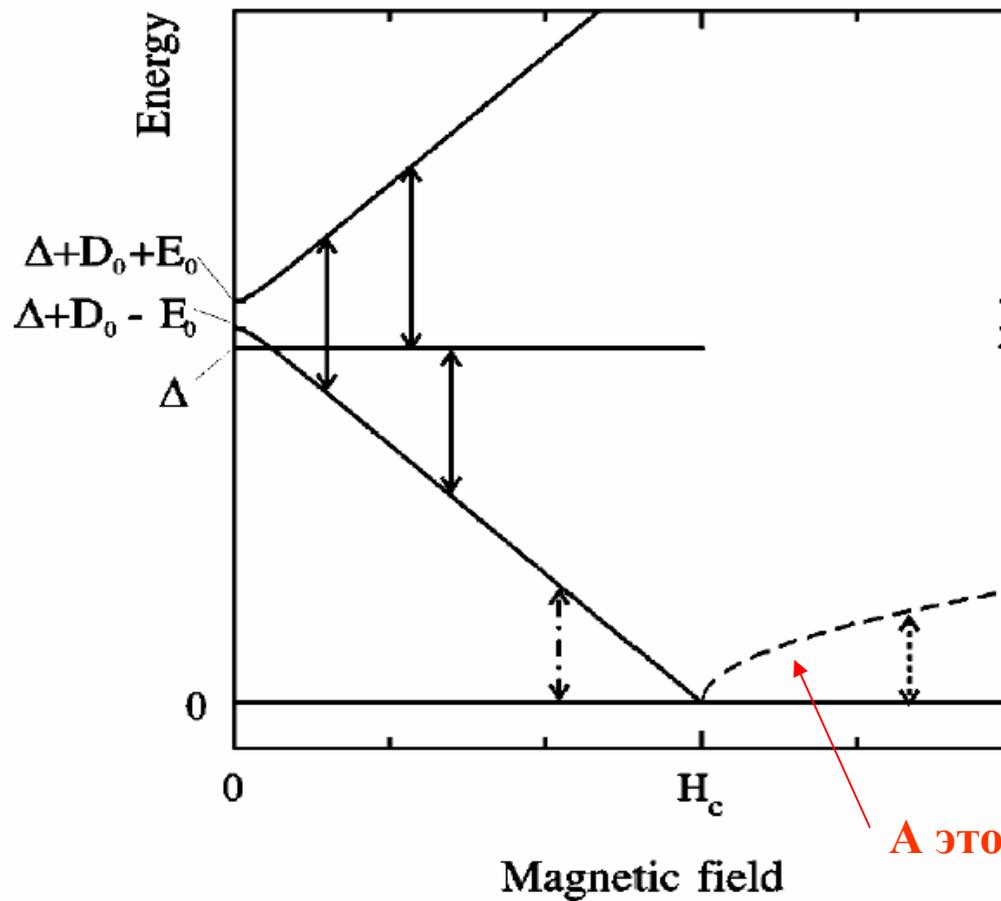
$T=1.5$ (solid lines)
 $T=4.2$ (dashed lines)



Glazkov et al PRB 2004



Наблюдаемые переходы между
КОЛЛЕКТИВНЫМИ КВАНТОВЫМИ
СОСТОЯНИЯМИ



$\Delta = 156 \text{ GHz} = 7.5 \text{ K}$

$D_0 = 8.0 \text{ GHz}$

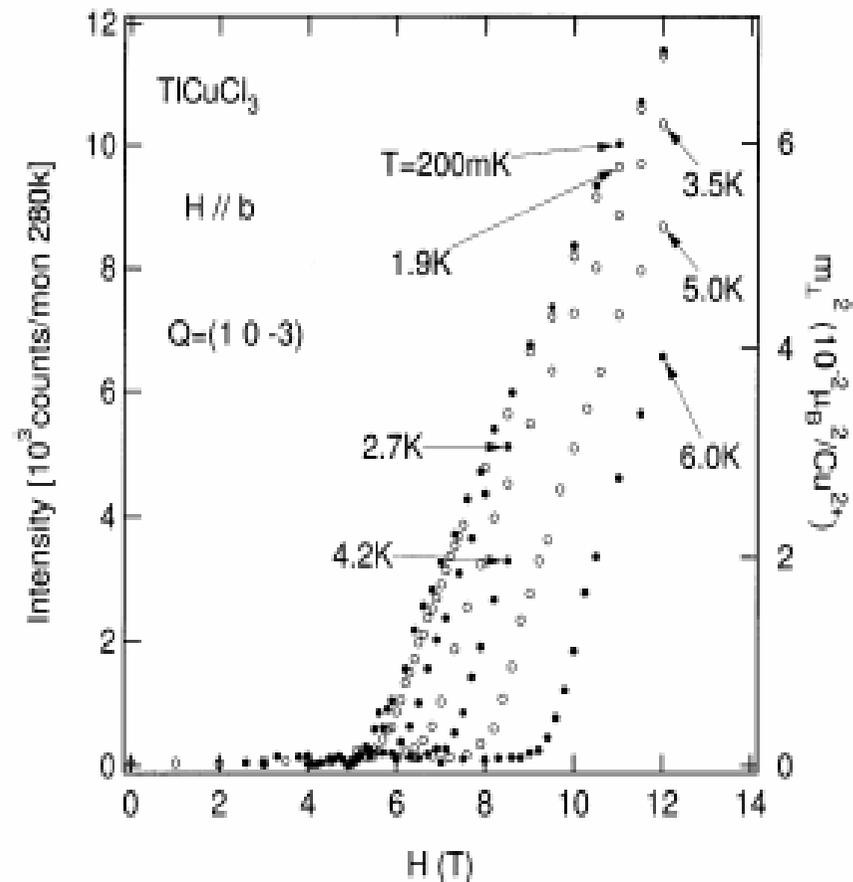
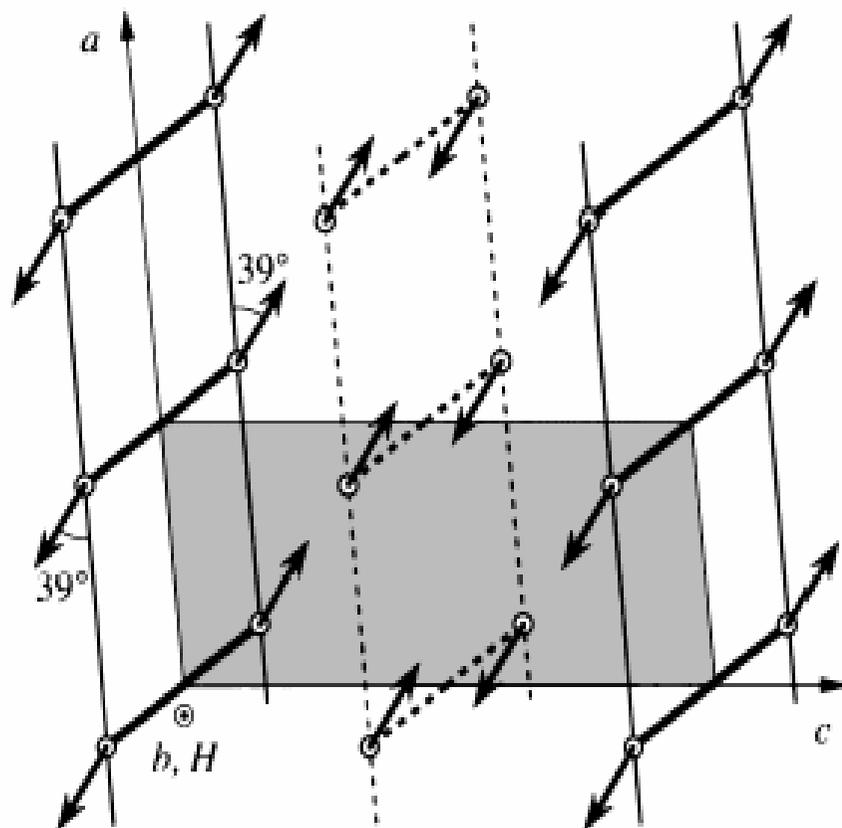
$E_0 = 5.8 \text{ GHz}$

$H = DS_z^2 + E(S_x^2 - S_y^2) + g\mu_B SH$

А это что ?

V.Glazkov et al PRB 2004

Индукированный магнитным полем антиферромагнитный порядок в TlCuCl_3



H. Tanaka et al JPSJ 2001

Выводы для спин-щелевых магнетиков

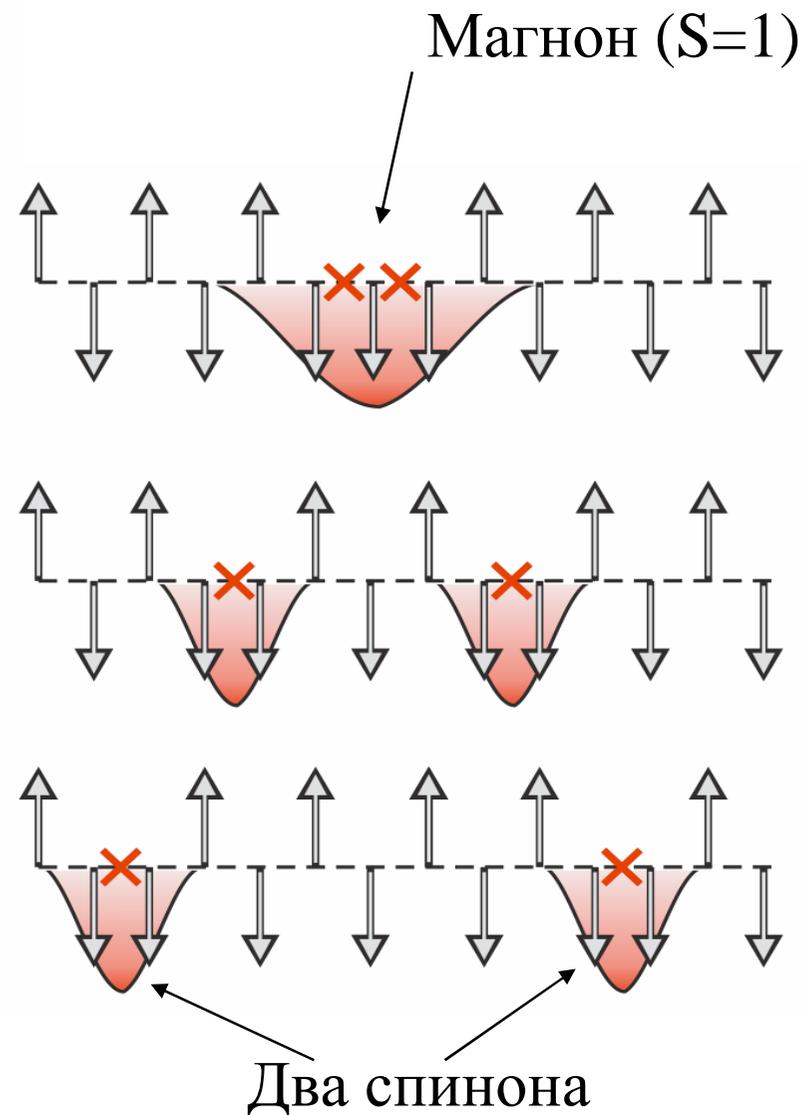
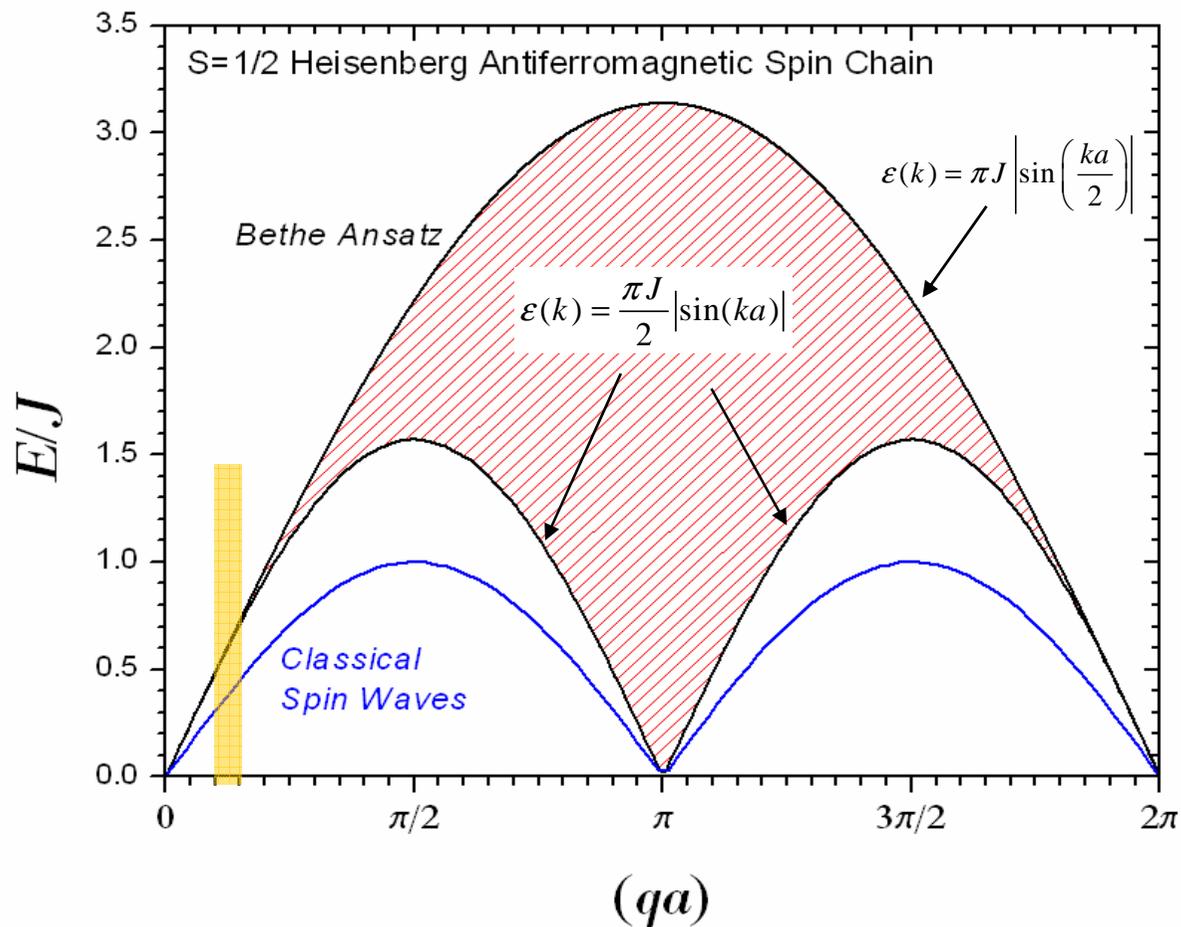
Обнаружены коллективные возбуждения, несущие спин $S=1$

Магнитное поле закрывает щель и индуцирует антиферромагнитное упорядочение

В этой новой фазе при $T=0$, $\langle S_i \rangle \ll S$

**Вернемся к бесщелевым спиновым жидкостям:
Каков спин элементарного возбуждения ?
Есть ли вообще элементарные возбуждения
в континууме ?.**

Спиноны в $S=1/2$ НАФМ цепочке

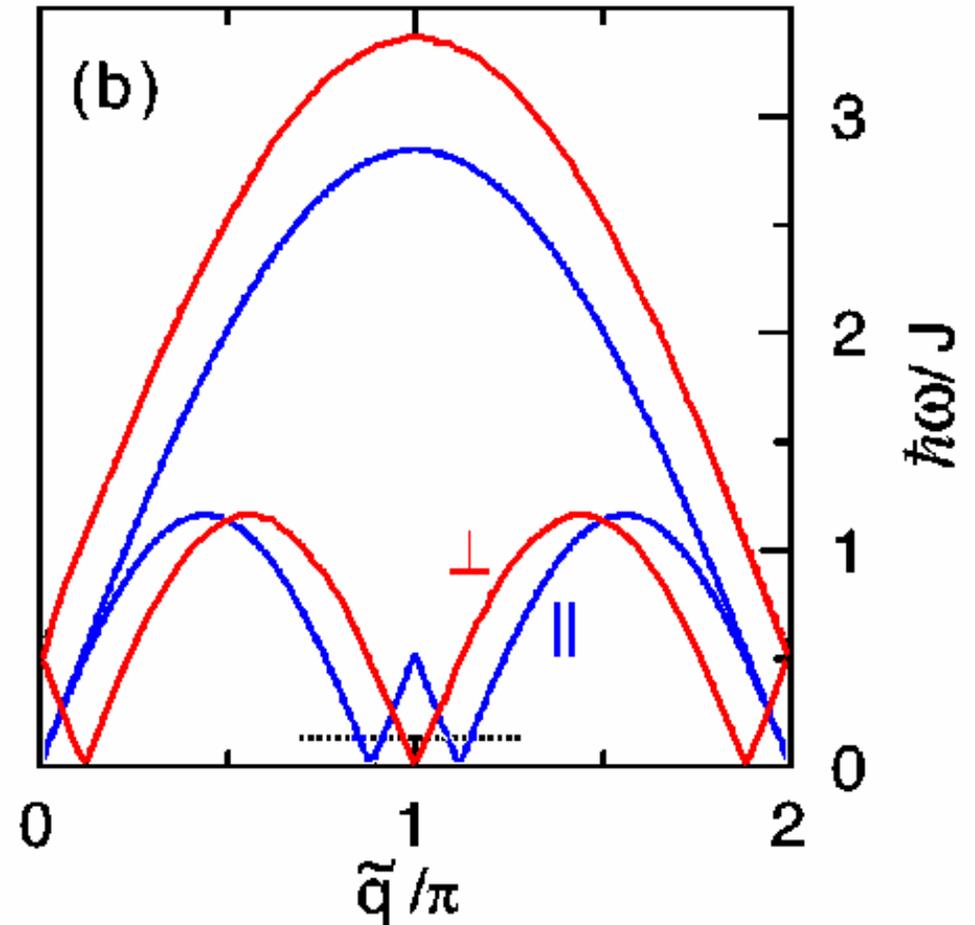
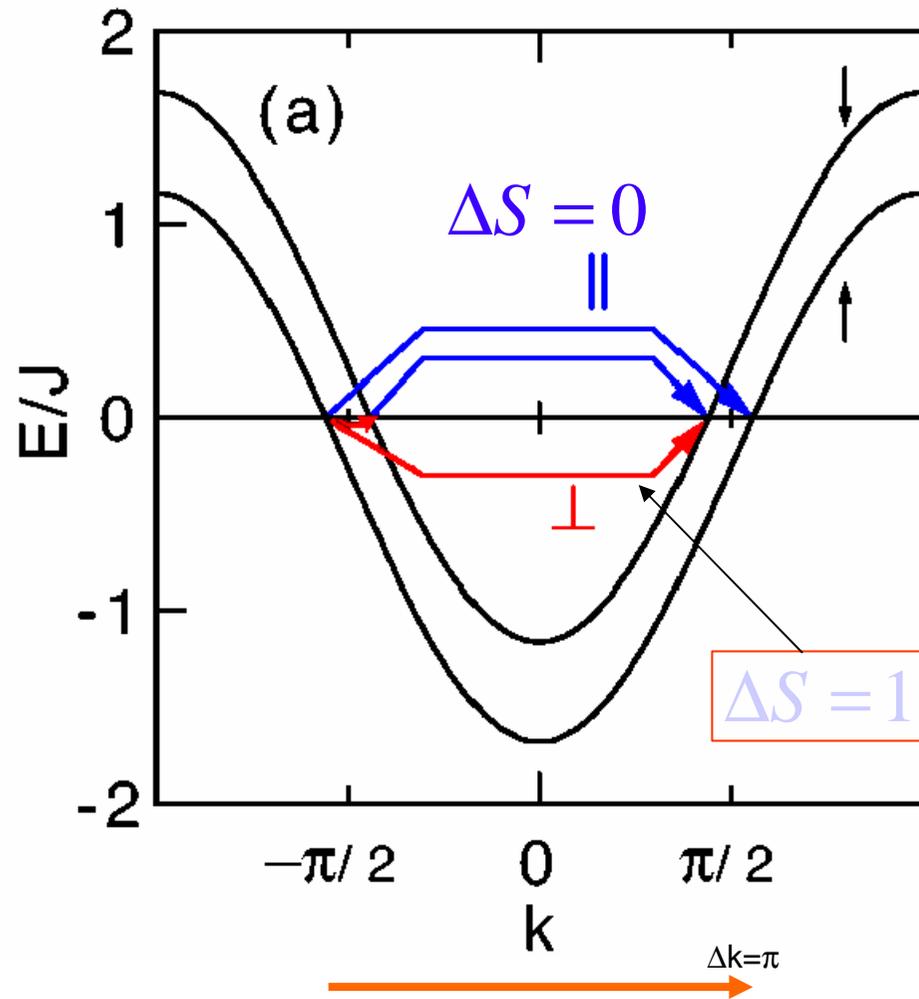


Померанчук 1941: fermionic spinons in paramagnetic insulators. ЖЭТФ 11, 226 (1941)

Фаддеев и Тахтаджан 1981. *What is the spin of a spin wave?* Phys. Lett. A 85, 375 (1981).

Спиноны – фермионы!

Спиноны-фермионы. Предсказание для эксперимента: В магнитном поле мягкие моды соответствуют переходам на поверхности Ферми

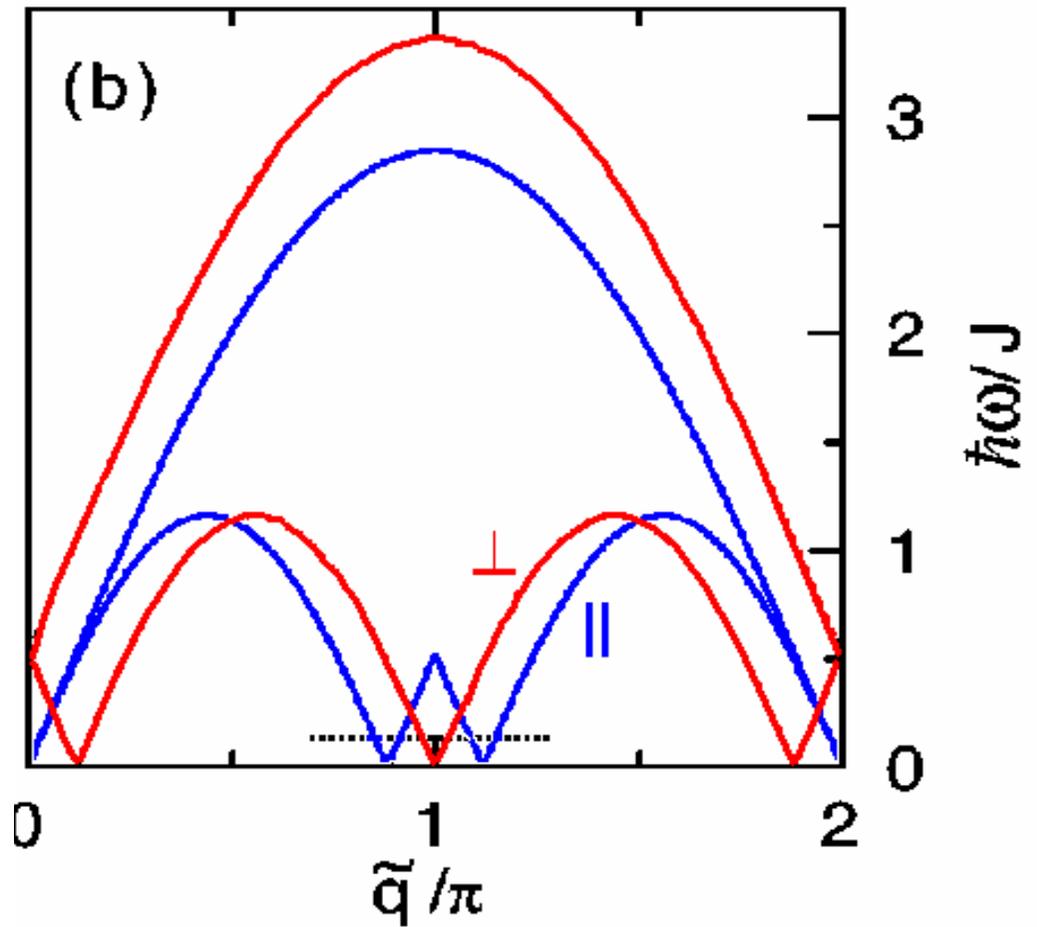
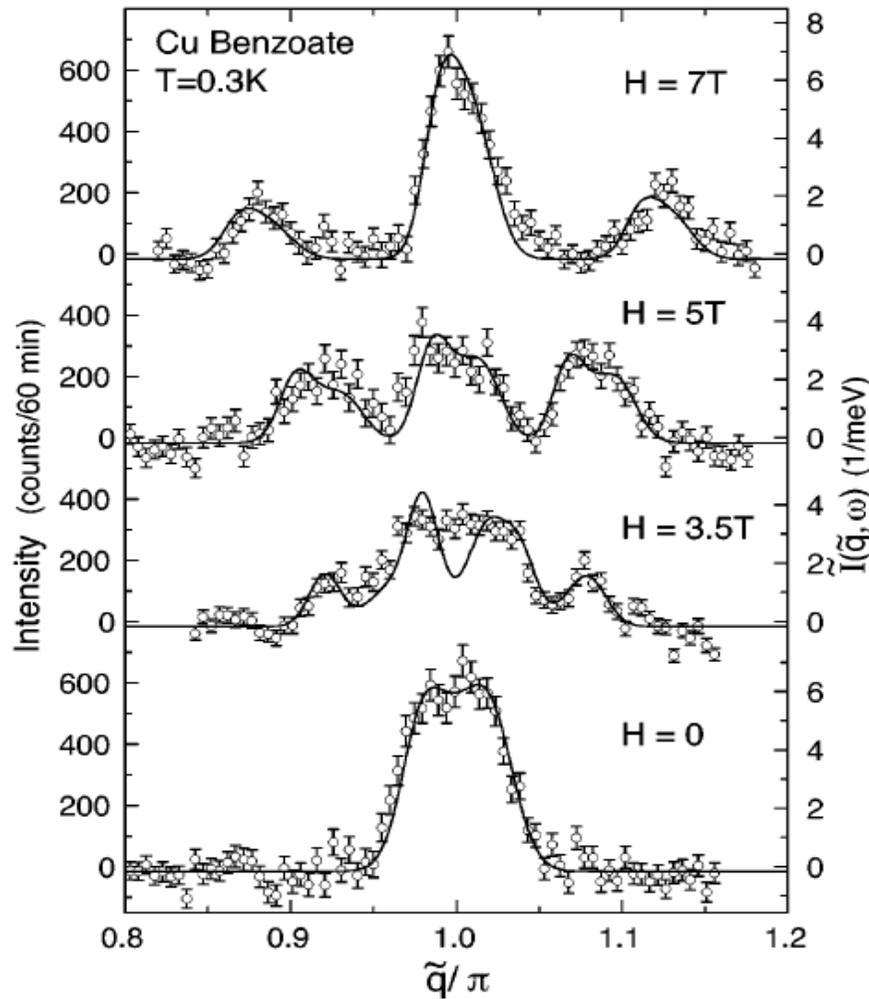


D. C. Dender et al, PRL **79** 1750 (1997)

Neutron scattering from copper benzoate, $\text{Cu}(\text{C}_6\text{D}_5\text{COO})_2 \cdot 3\text{D}_2\text{O}$,

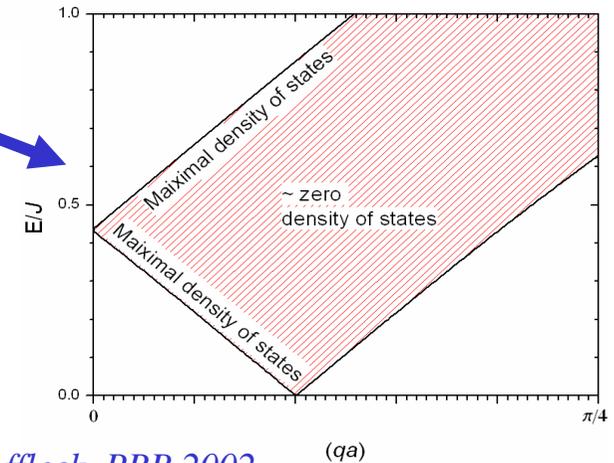
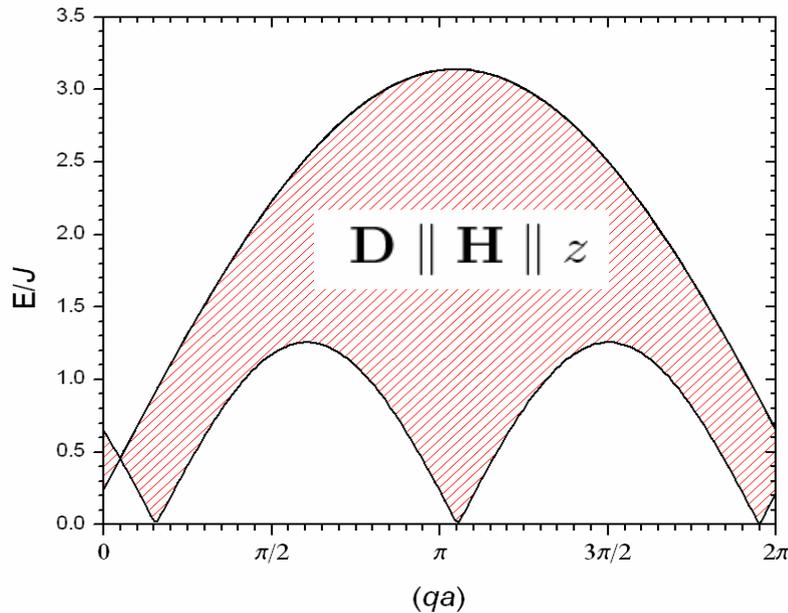
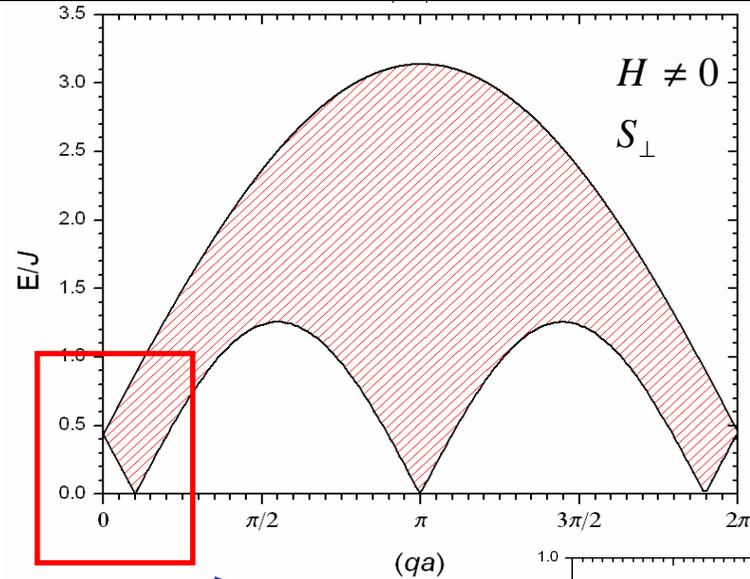
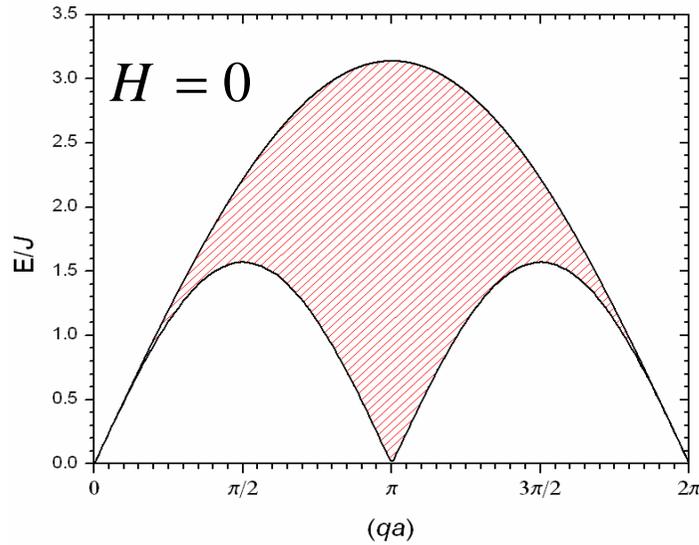
Continuum boundaries in a magnetic field and soft modes of fermionic system

Spinons: fermions



D. C. Dender et al, PRL **79** 1750 (1997)

Трансформация континуума в магнитном поле и при наличии однородного взаимодействия Дзялошинского-Мории



Oshikawa, Affleck, PRB 2002

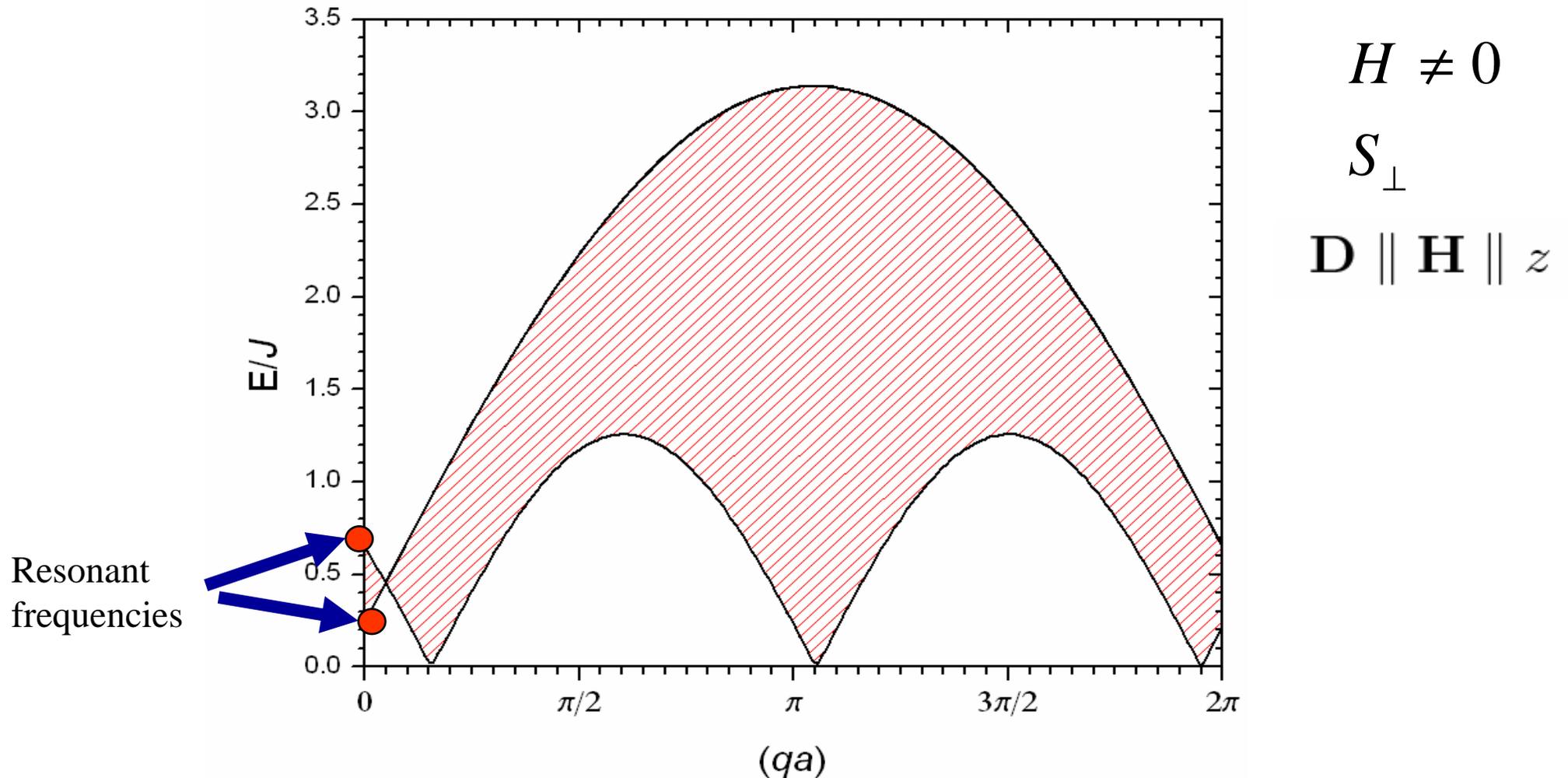
$$\mathcal{H} = \sum_n J(\mathbf{S}_n \cdot \mathbf{S}_{n+1}) + (\mathbf{D} \cdot [\mathbf{S}_n \times \mathbf{S}_{n+1}]) - \mu_B g(\mathbf{H} \cdot \mathbf{S}_n)$$

The transformation $S_n^+ = S_n^+ e^{i\alpha n}$ $\alpha = -D/J$

excludes DM interaction, but **results in the shift**
of **spectrum along in** the momentum space (note the classical spiral g.s.)

Gangadharaiah, Sun, Starykh, PRB 78 054436 (2008)

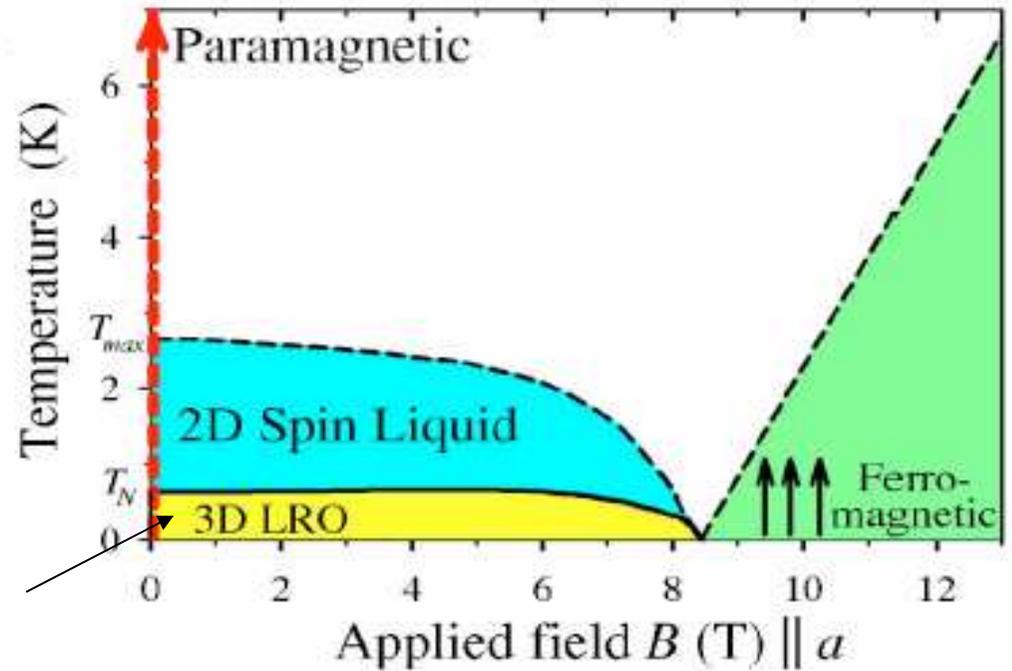
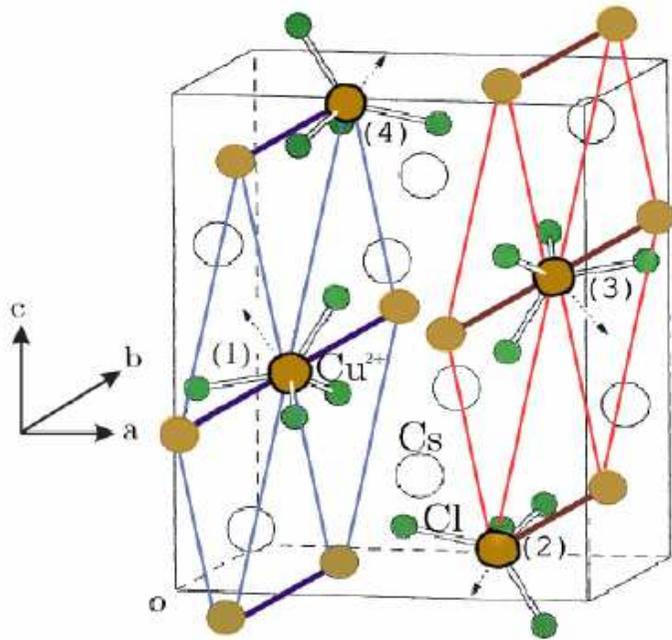
Спинонный дублет магнитного резонанса



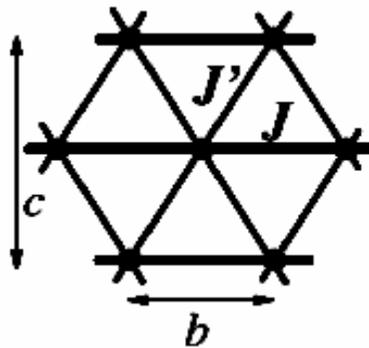
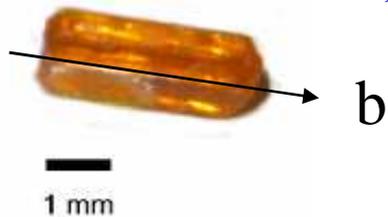
Дублет линий магнитного резонанса должен возникнуть благодаря взаимодействию Дзялошинского-Мория и наличию континуума.

Дублет можно искать в квазиодномерном AFM Cs_2CuCl_4 так как в нем есть однородное взаимодействие Дзялошинского-Мории

R. Coldea et al, PRL **88** 137203 (2002), PRB 2003



Reduced 3DLRO $\delta S/S=0.25$

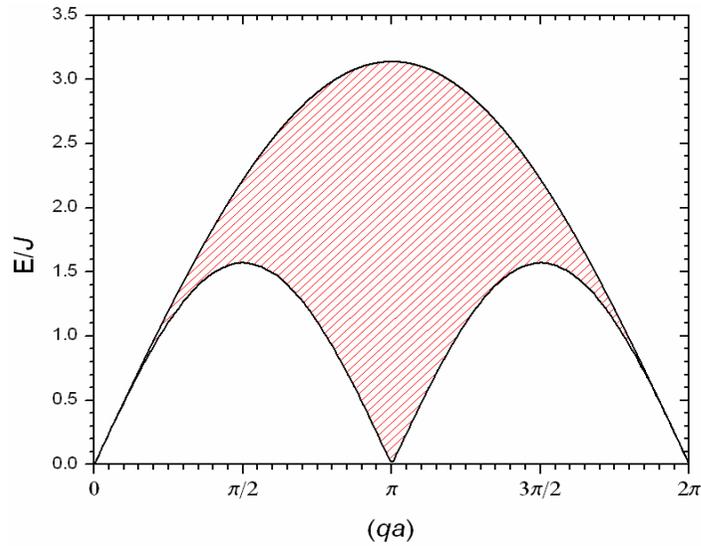


$$J = 0.375(5) \text{ meV}$$

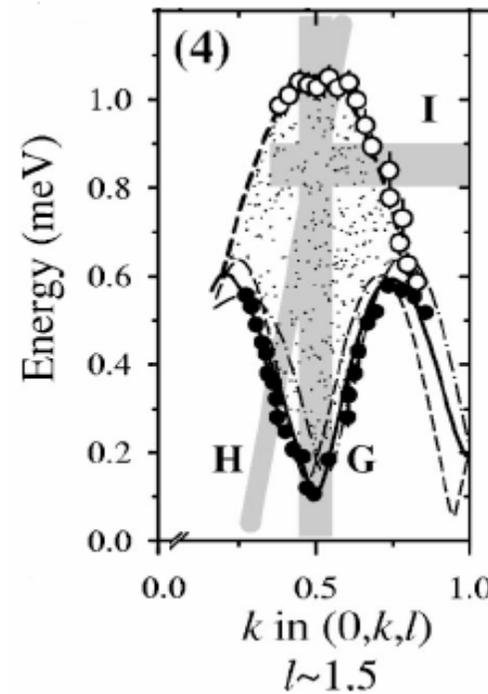
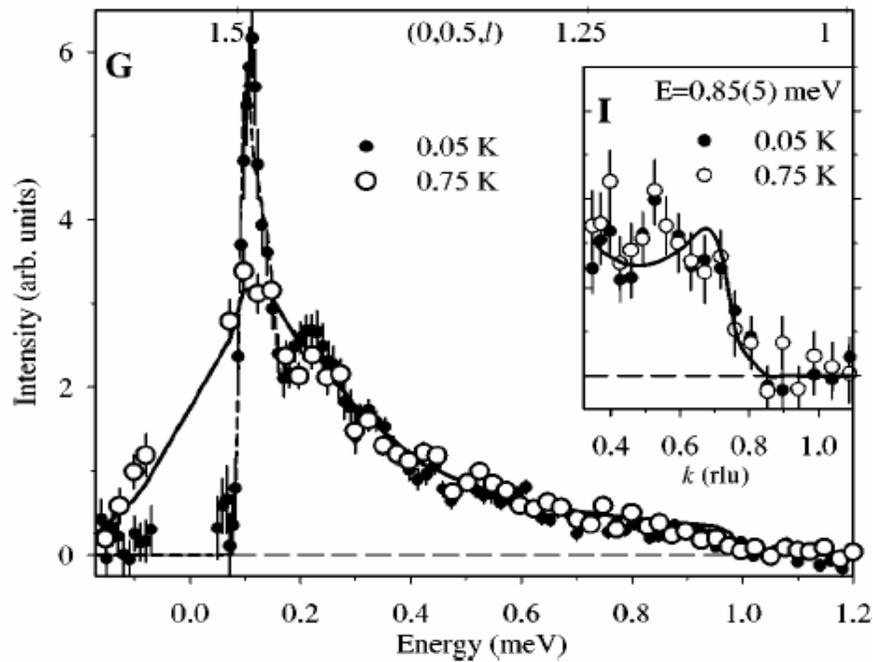
$$J'/J = 0.33(1)$$

$$J'' \sim 0.05J$$

$\text{Cu}^{2+}, S=1/2$

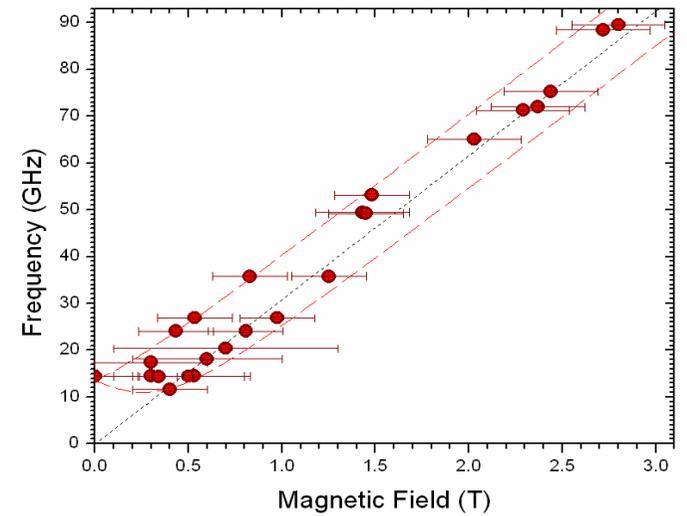
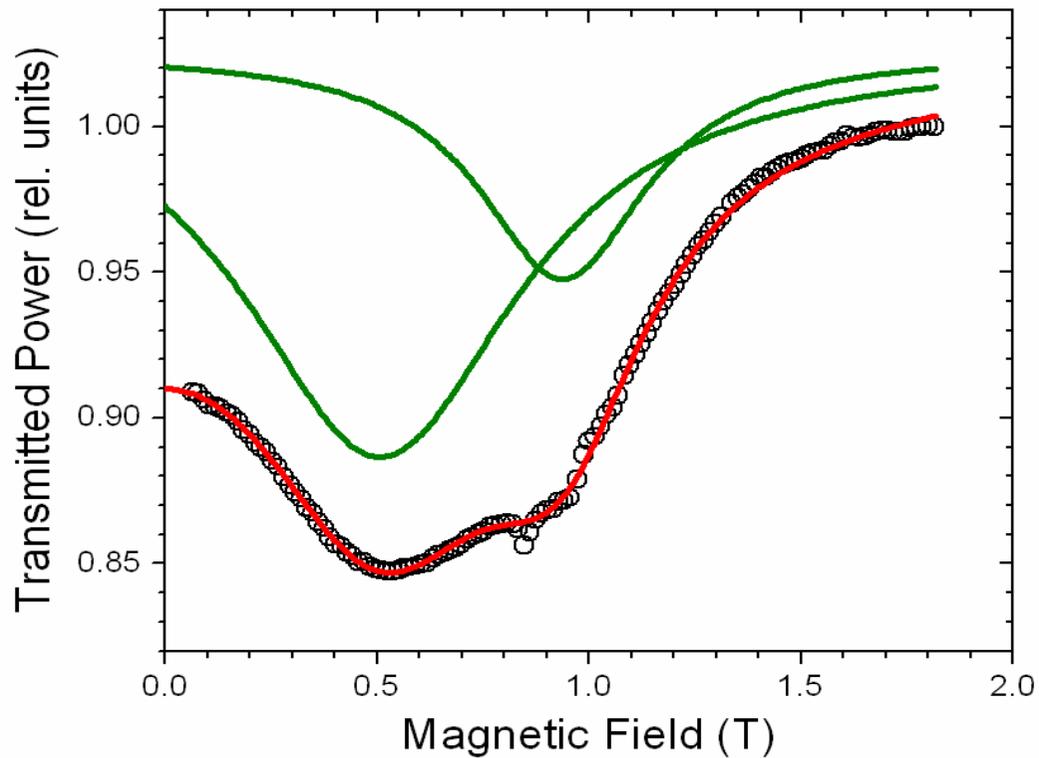


В спин-жидкостной фазе Cs_2CuCl_4 наблюдается континуум возбуждений, характерный для цепочки спинов $S=1/2$



Магнитный резонанс в спин-жидкостной фазе

Расщепление при $H \parallel a, c$

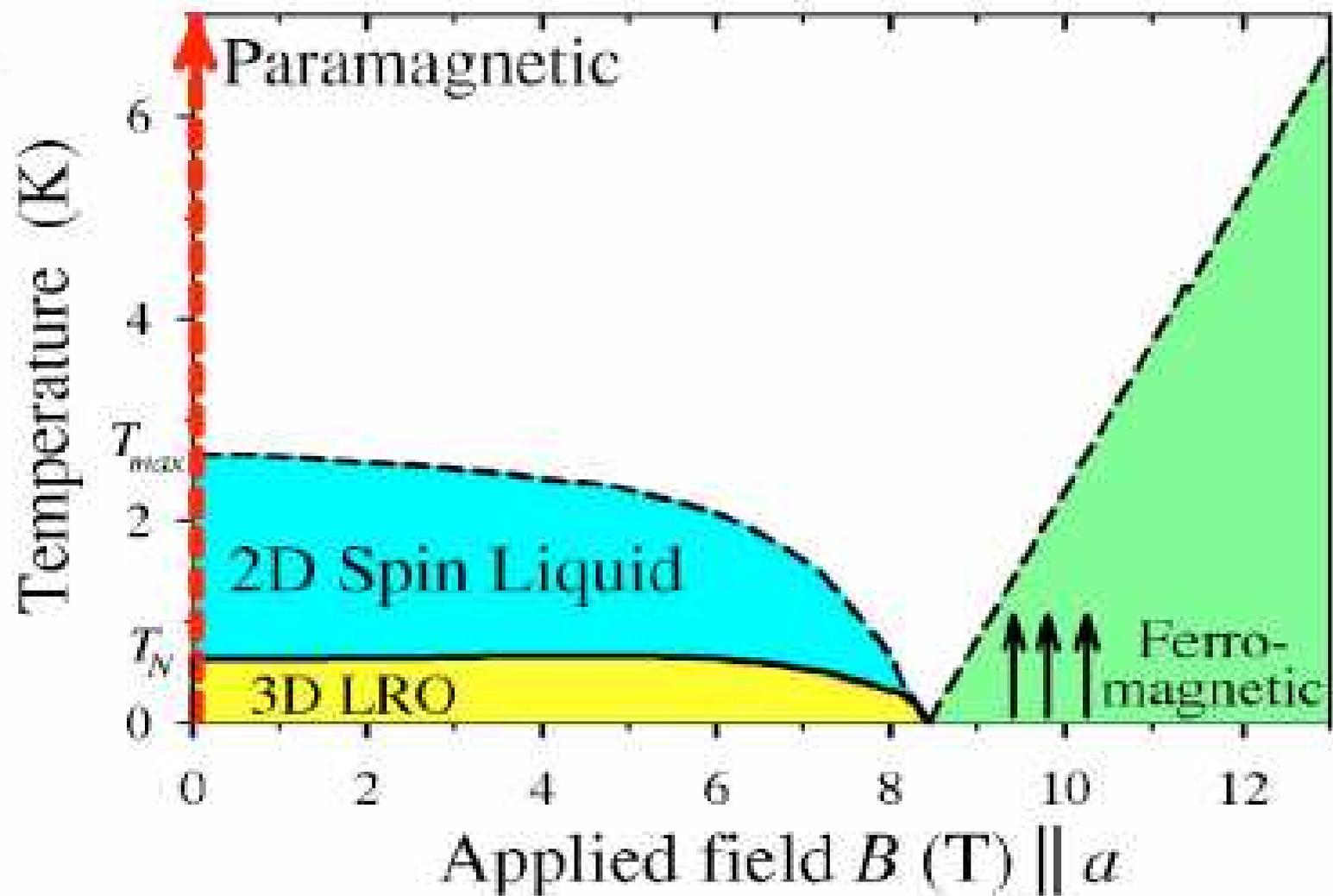


$T=1.3$ K

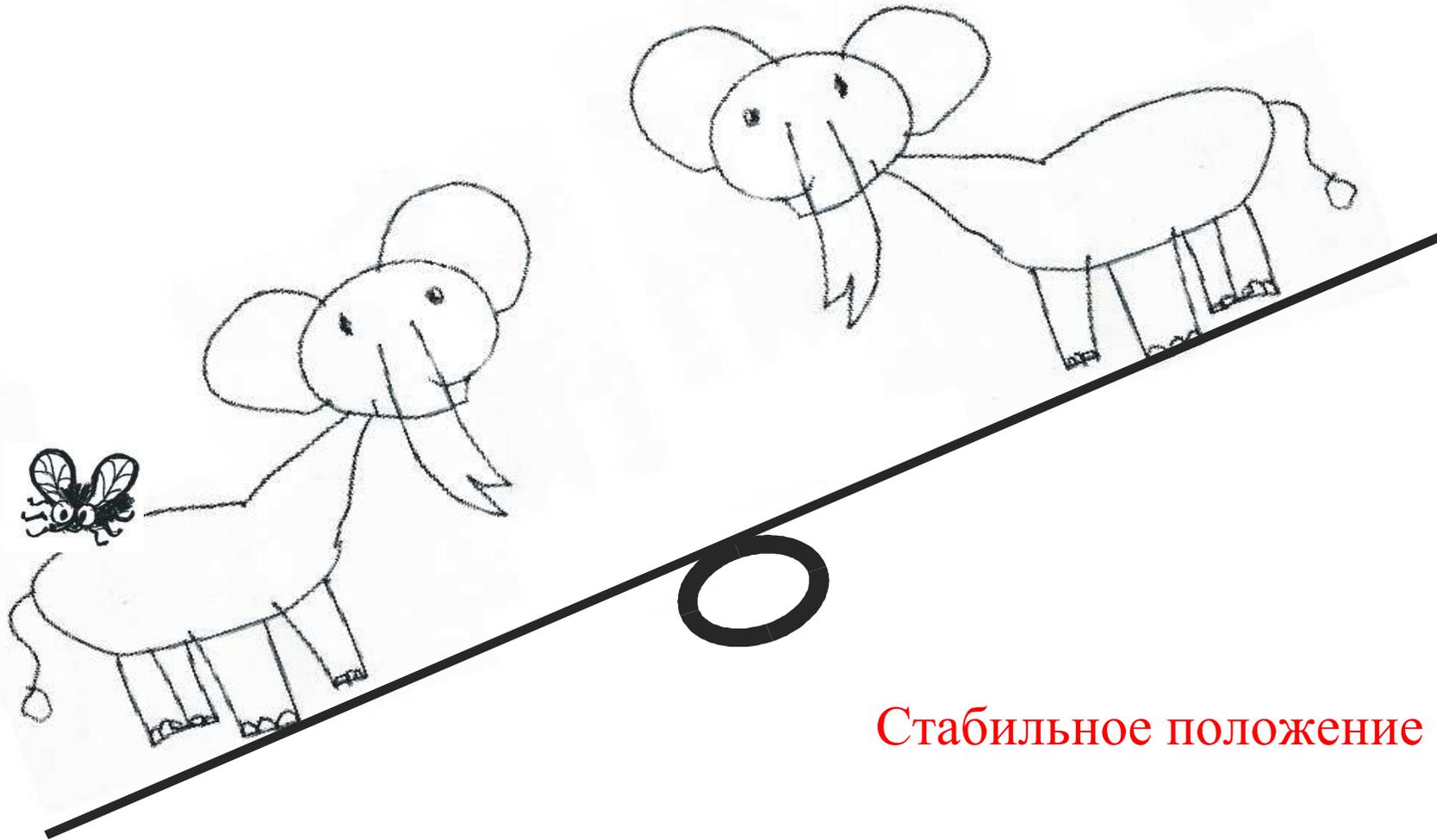
$\nu=26.92$ GHz

Povarov et al PRL 2011

"Слабое" упорядочение в квантовом магнетике



**Влияние фрустрации и слабых взаимодействий
на формирование спин-жидкостного или упорядоченного состояния**

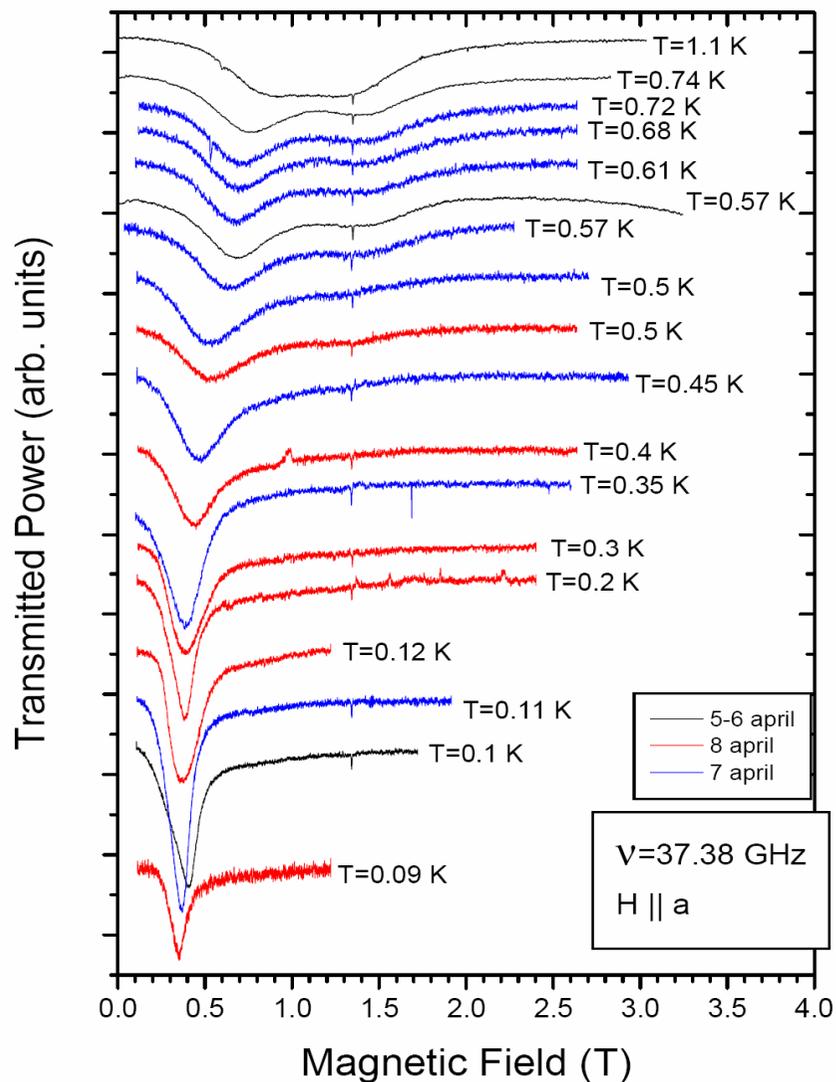


Стабильное положение

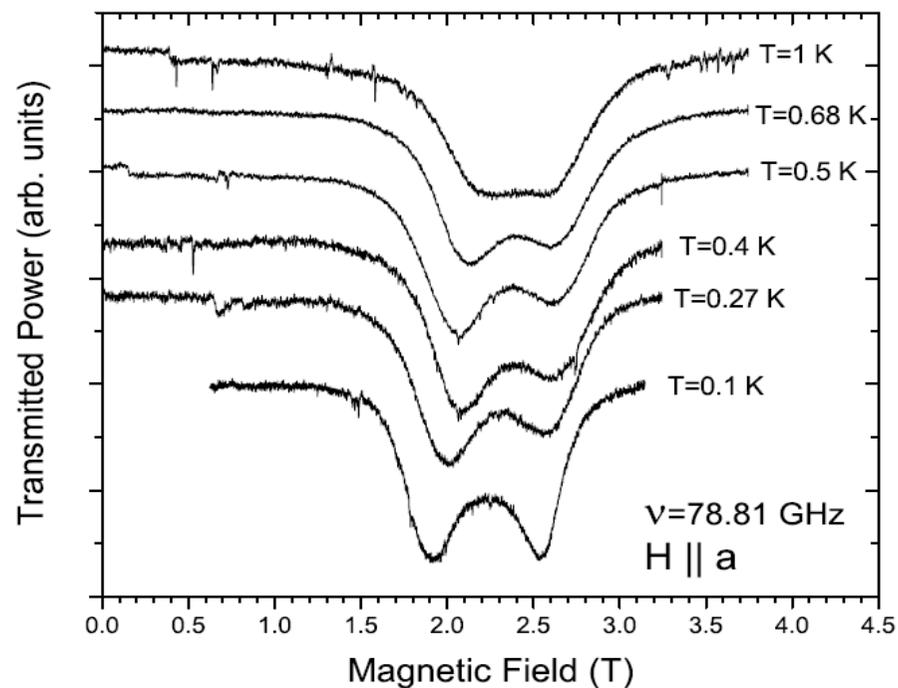
В упорядоченной фазе квантовые флуктуации уменьшают S_z на 25%.
 Каким будет спектр возбуждений – как в упорядоченном АФМ
 или как в спиновой жидкости?

Различная эволюция сигнала ЭСР при охлаждении

Низкая частота



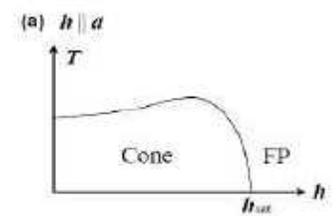
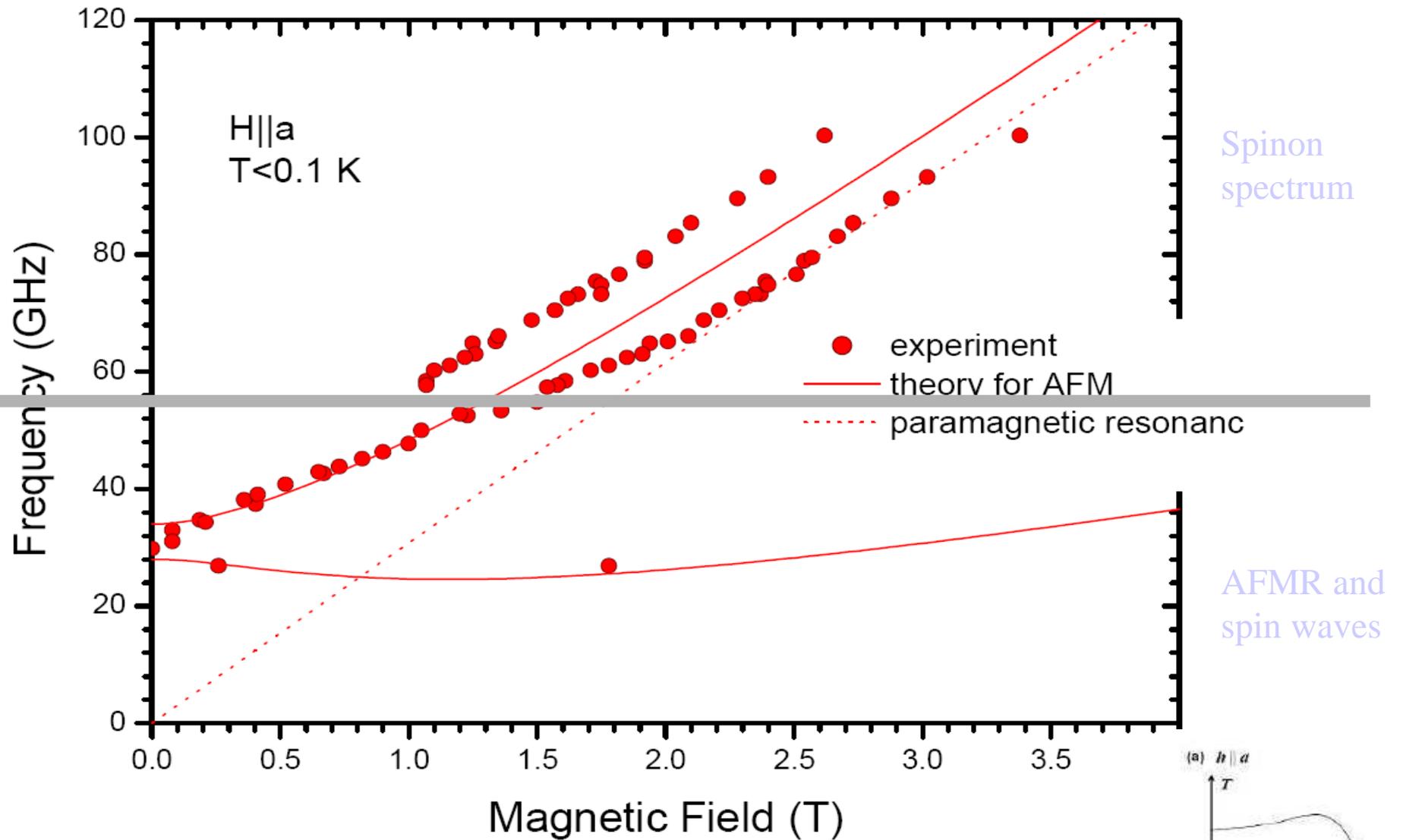
Высокая частота



$$J/h = 90 \text{ GHz}$$

Smirnov et al. PRB 85, 184423 (2012)

*Кроссовер
от антиферромагнитного резонанса
к магнитному резонансу спинов*



Выводы:

Спин-жидкостные фазы при $T=0$ в сильно-коррелированных антиферромагнитным обменом системах (спиновые цепочки, димерные сети и др.)

Кванты элементарных возбуждений с $S=1$ и $S=1/2$.

Сосуществование спектров спин-жидкостных и упорядоченных фаз в слабоупорядоченных системах.

Спасибо за внимание

МФТИ 25 мая 2015