

# Коллективные моды магнитного резонанса в спин-щелевых магнетиках

А.И.Смирнов



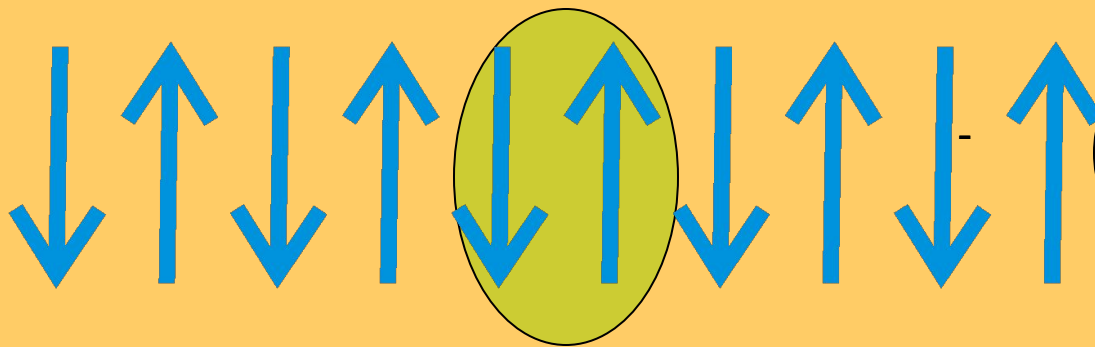
*Дополнительный материал по курсу  
Низкотемпературный магнетизм  
В весеннем семестре 2006/2007 учебного года*

# Гейзенберговский обмен и проблема основного состояния антиферромагнетиков

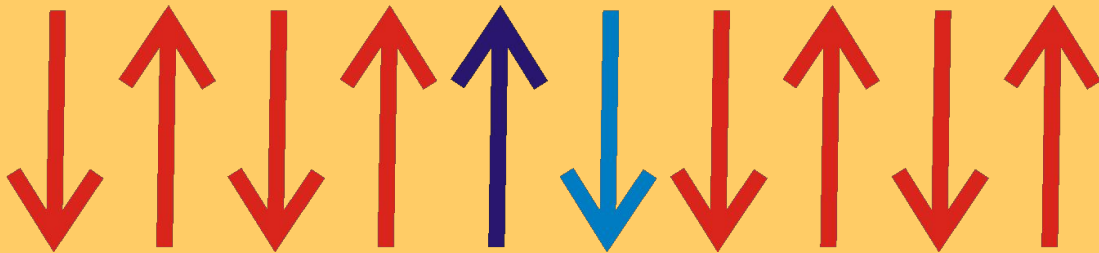
$$\mathcal{H} = \sum J_{i,i+1} \mathbf{S}_i \mathbf{S}_{i+1}$$

$$\mathcal{H} = J_{i,i+1} \sum [S_j^z S_{j+1}^z + 1/2(S_j^+ S_{j+1}^- + S_j^- S_{j+1}^+)]$$

$$S_i^+ = S_i^x + iS_i^y \quad S_i^- = S_i^x - iS_i^y$$

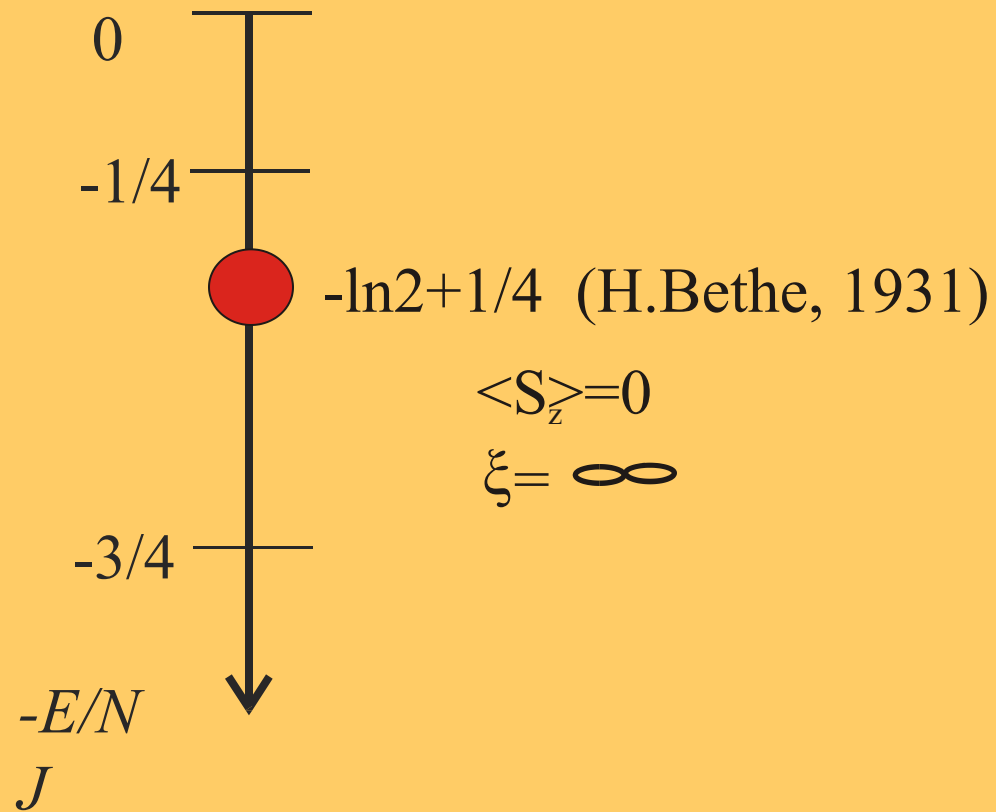


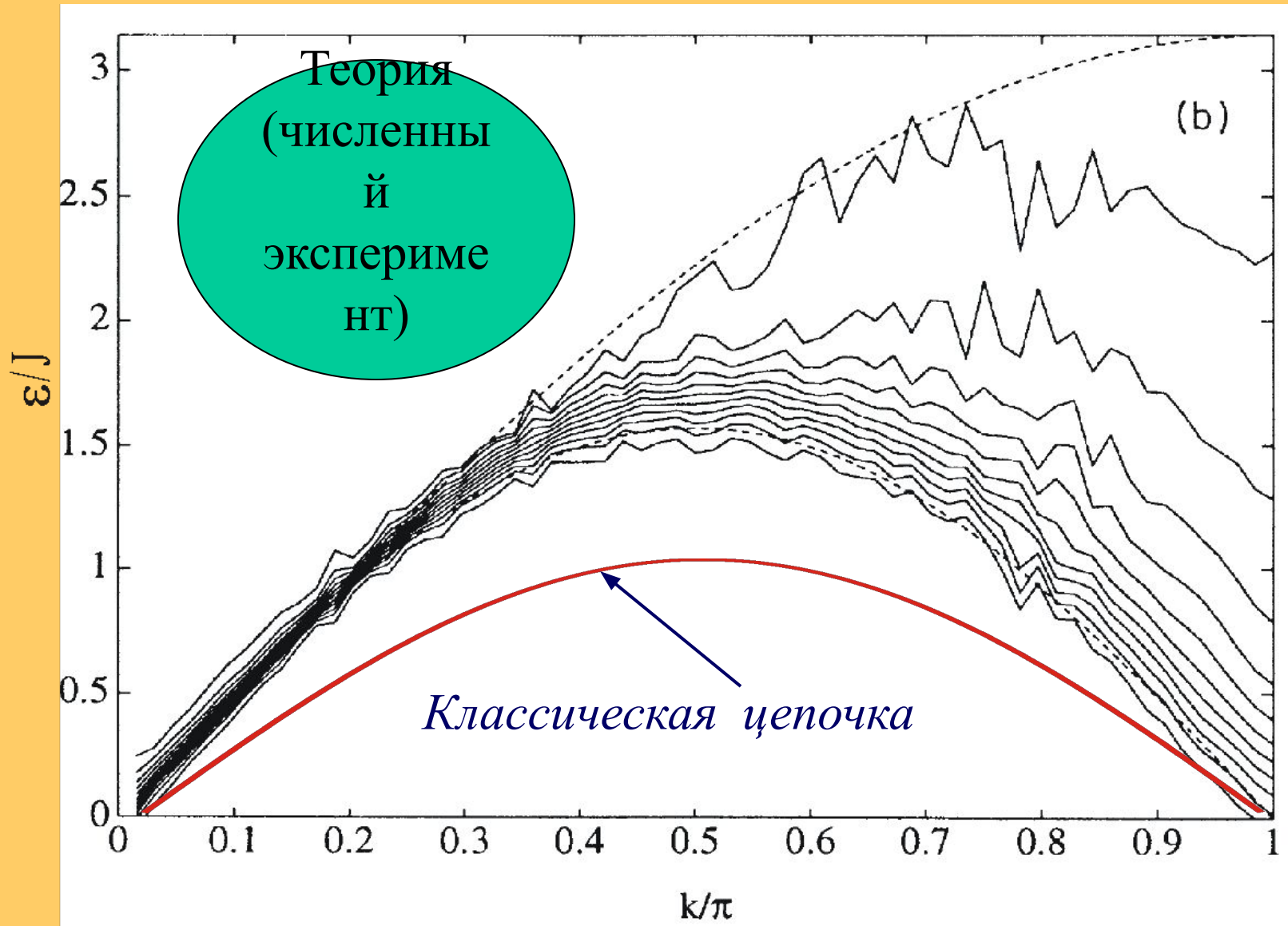
Это – классическое  
основное состояние  
для  $J > 0$



Но оно не является  
собственным  
для гамильтониана

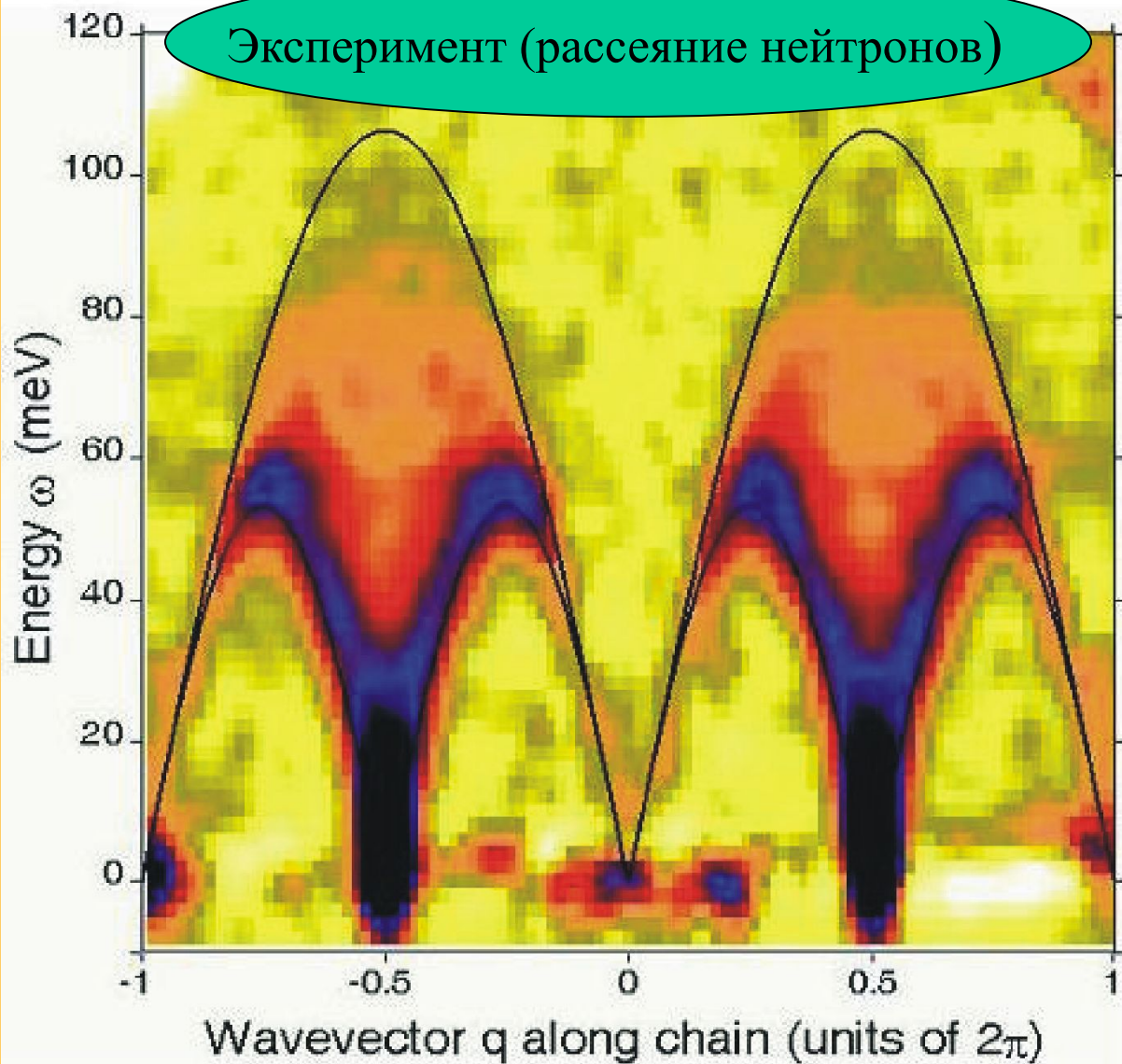
# Цепочка спинов $S=1/2$ (анзац Бете)



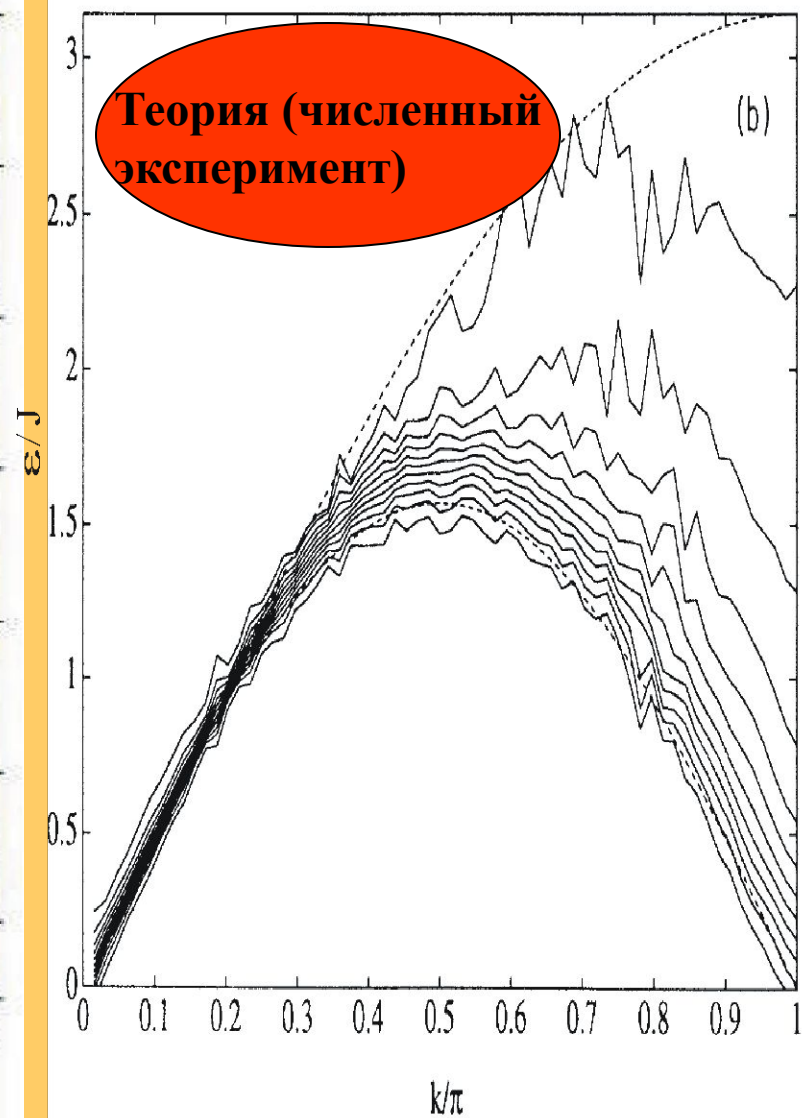


Спектр цепочки спинов  $1/2$ . С.Мешков 1993

Эксперимент (рассеяние нейтронов)



Теория (численный эксперимент)

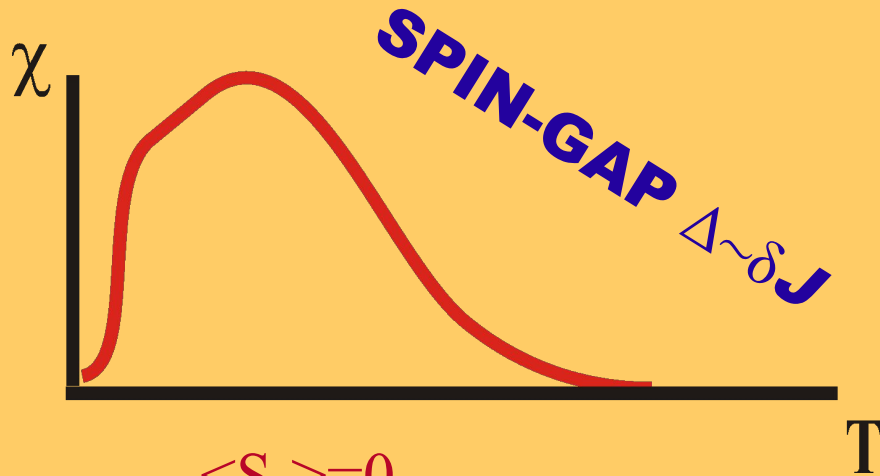
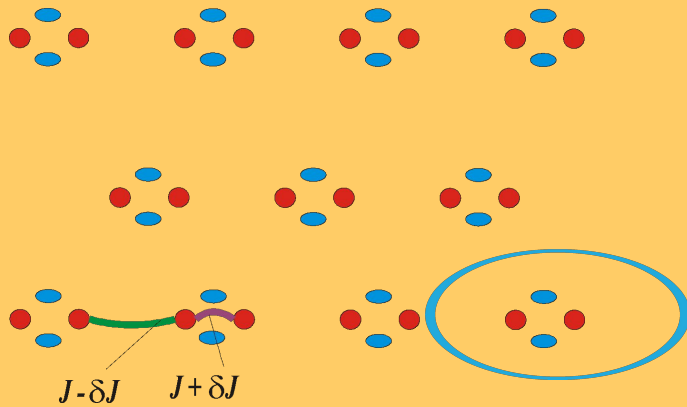


D. Tennant et al 2000

# Спин-щелевые АФМ цепочки

Димеризованные цепочки  $S=1/2$

*Например, в спин-пайерсовском  
магнетике*



$$\langle S_z \rangle = 0$$

$$\xi = v/\Delta$$

Халдейновские цепочки ( $S=1$ ):

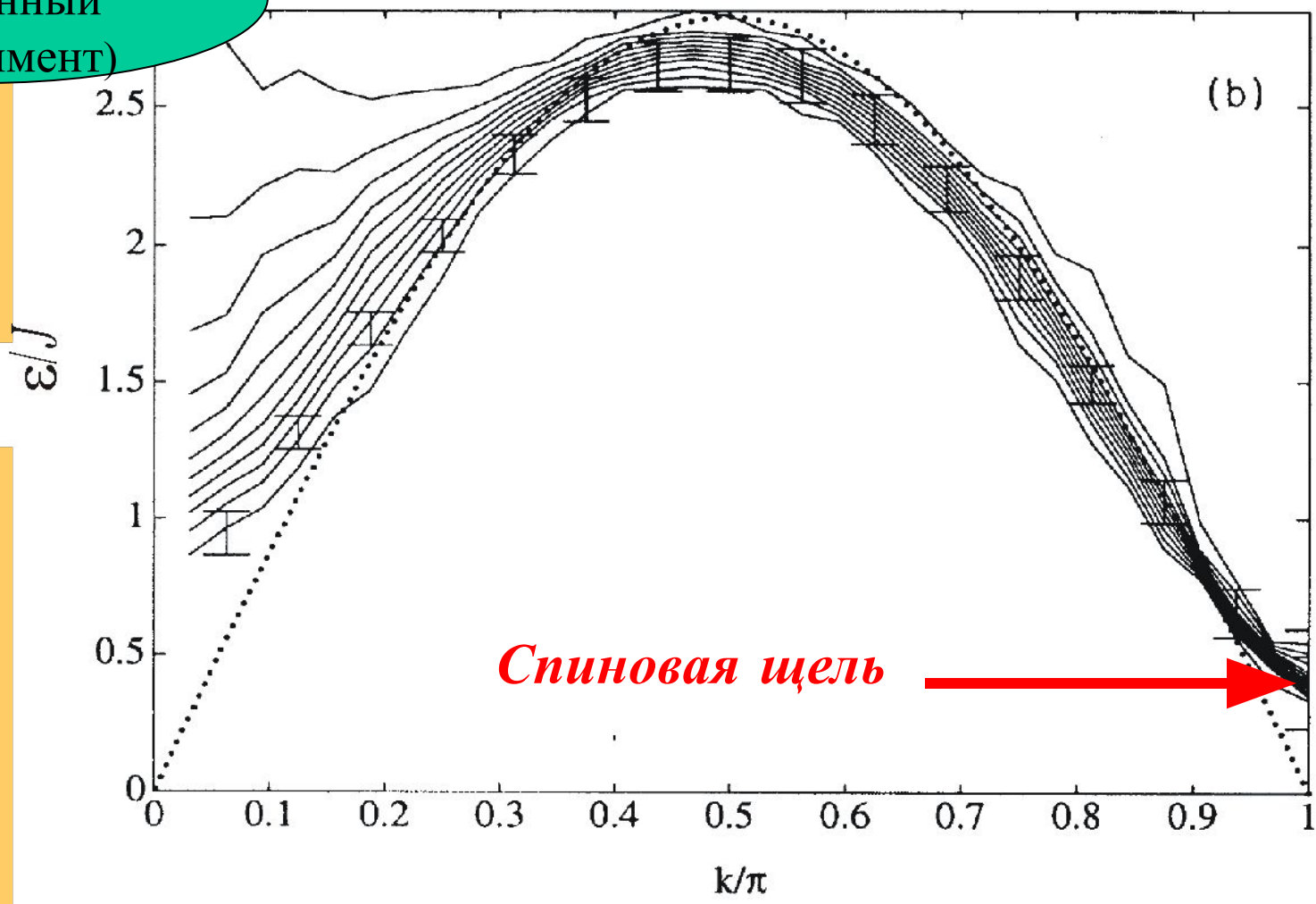
$$|g.s.\rangle =$$

$$\downarrow 0 \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow 0 \uparrow \downarrow \uparrow 0 \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow 0 \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow + \dots$$

$$\langle S \rangle = 0 \quad \xi \sim 7 \quad \text{Spin gap: } 0.41J$$

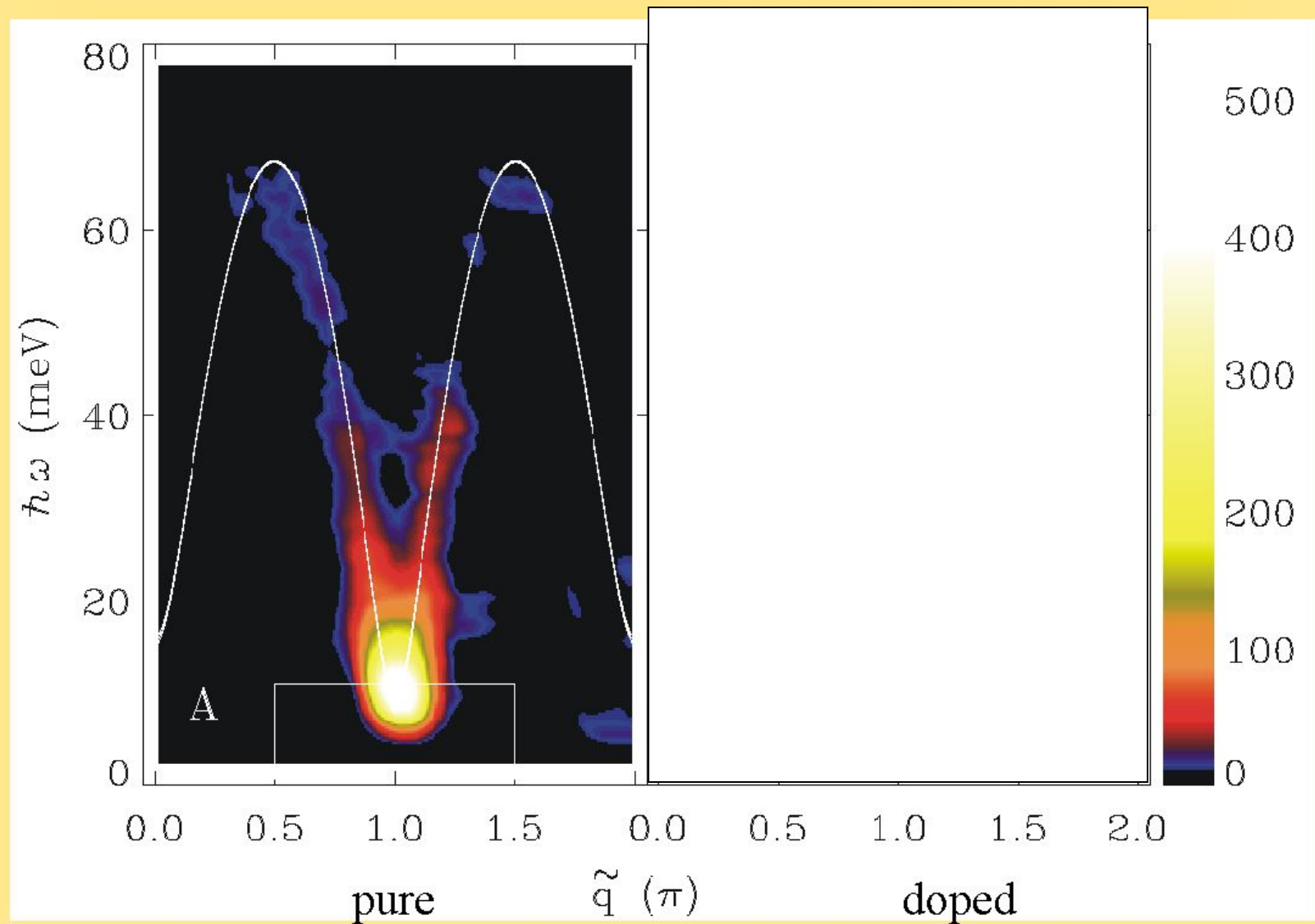


Теория  
(численный  
эксперимент)



Спектр возбуждений цепочки спинов  $S=1$   
С.Мешков PRB 1993

Spectrum of spin excitations in the Haldane magnet  $\text{Y}_2\text{BaNiO}_5$ . Xu *et al* Science 2000



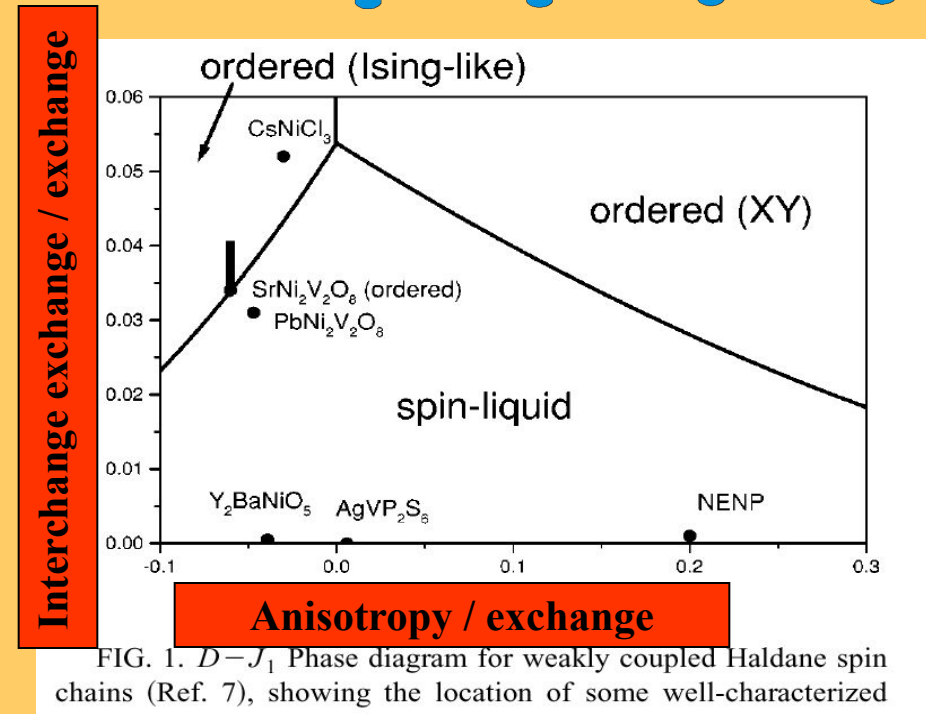
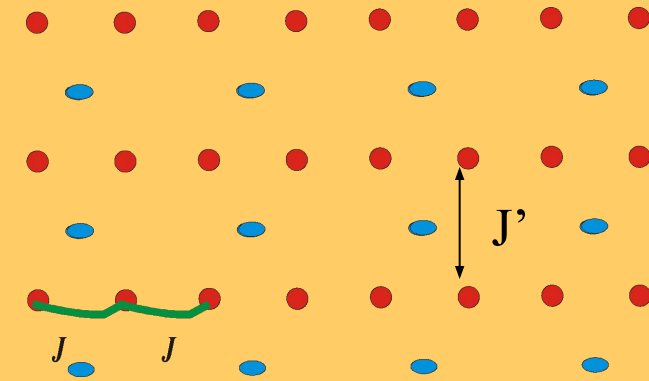


# Устойчивость неупорядоченных состояний к возмущениям

1. Однородная цепочка спинов  $S=1/2$  неустойчива :

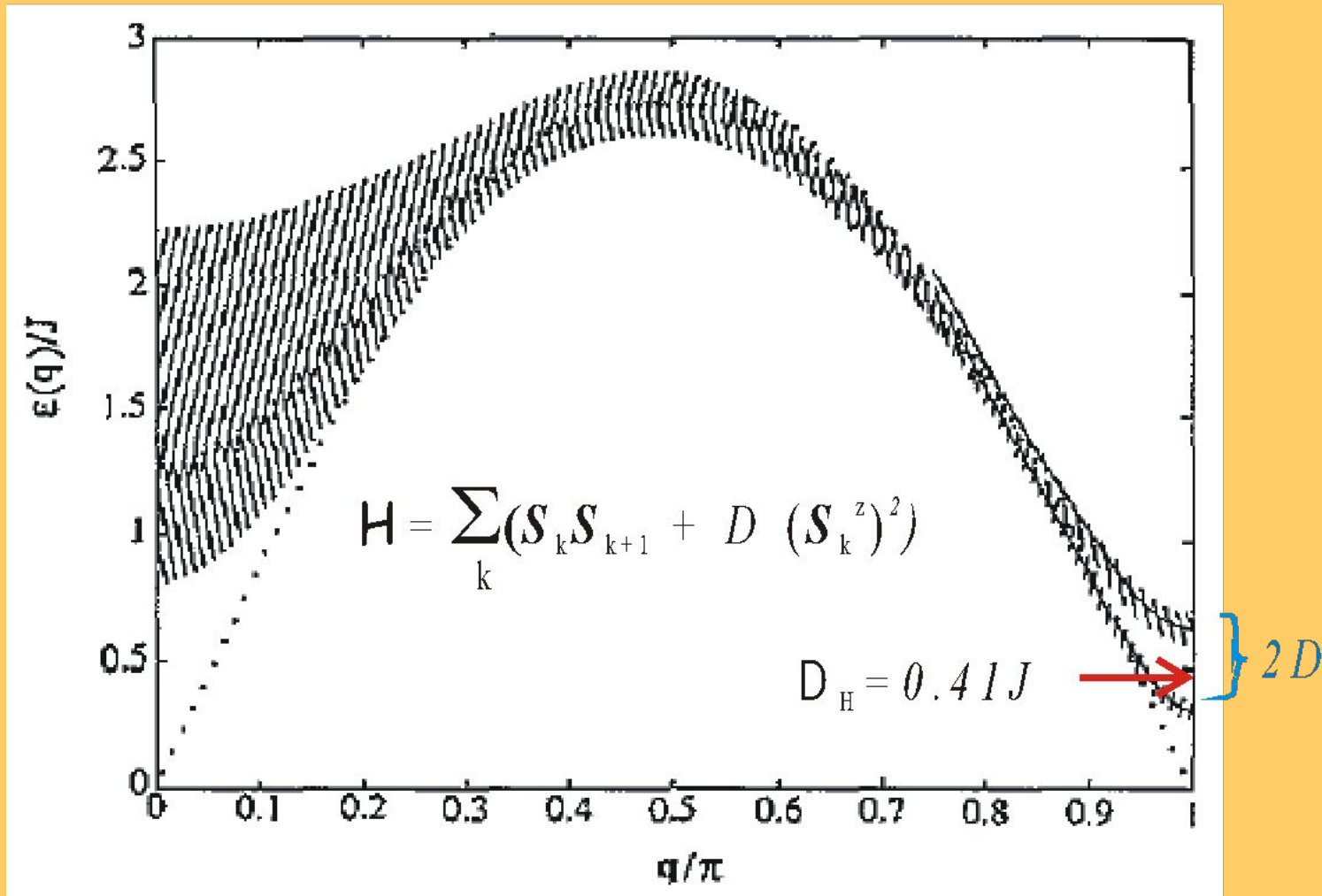
$$T_N \sim (JJ')^{1/2}$$

2. Спин-щелевые системы устойчивы, пока возмущение мало:  $J', D < \Delta$ .



Sakai and Takahashi diagram  
from Zheludev et al PRB 2000

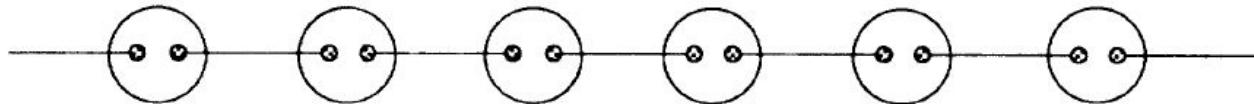
# Spin-1 chain with Dzyaloshinskii-Moriya interaction



Regnault et al JPCM 1993

# Степени свободы с $S=1/2$ на концах цепочек спинов $S=1$

( a )



( b )

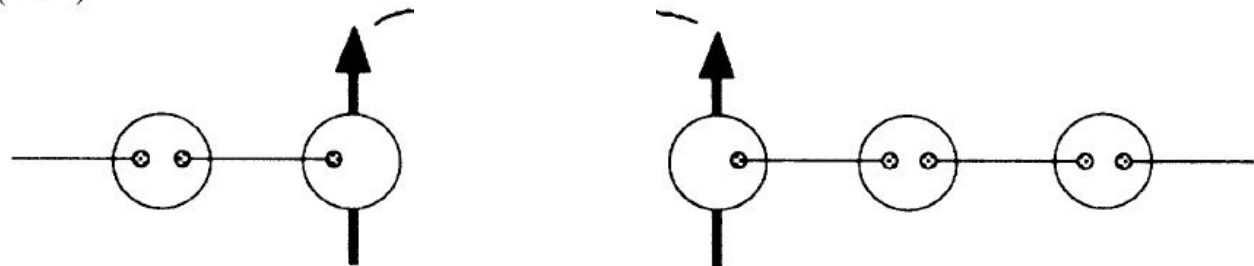
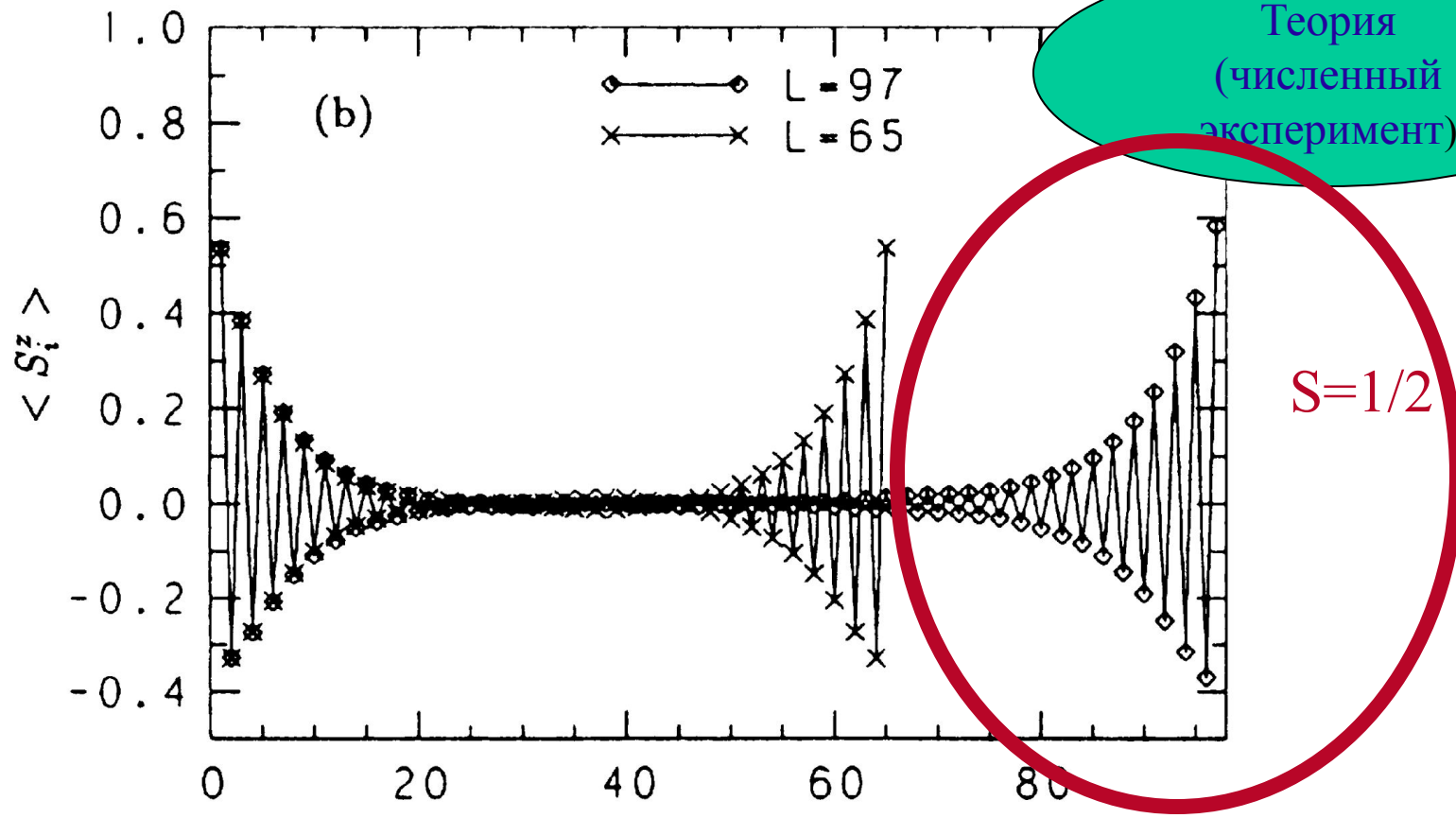


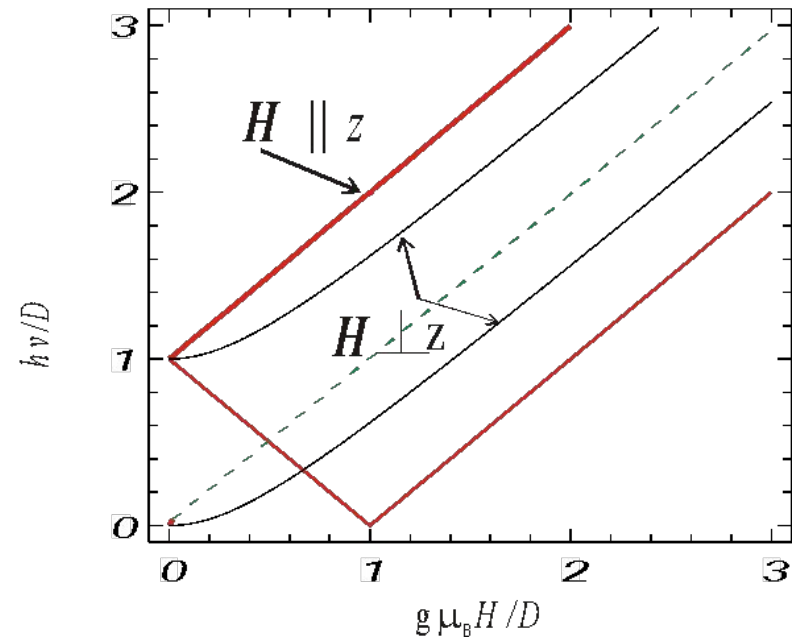
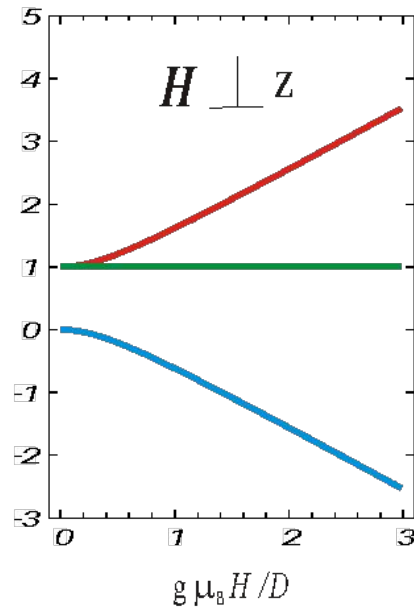
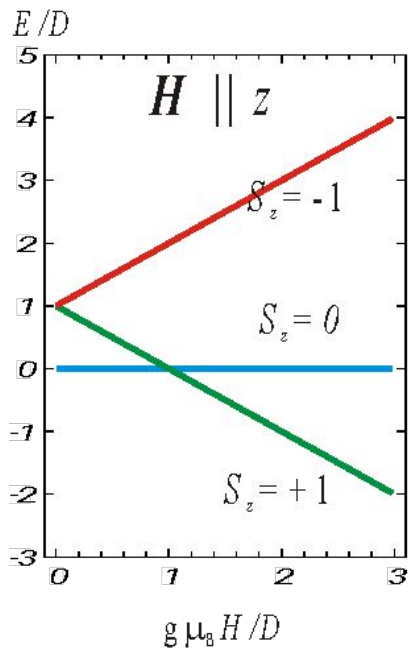
FIG. 1. (a) Diagrammatic representation for the valence-bond-solid ground state of an  $S=1$  linear-chain Heisenberg antiferromagnet. The larger circles show the atomic sites and the smaller ones the  $S=1/2$  states. The lines represent the valence bonds. (b) A host atom is substituted by an impurity, resulting in spin- $1/2$  states at host sites neighboring the impurity. The arrows show the spin moment.



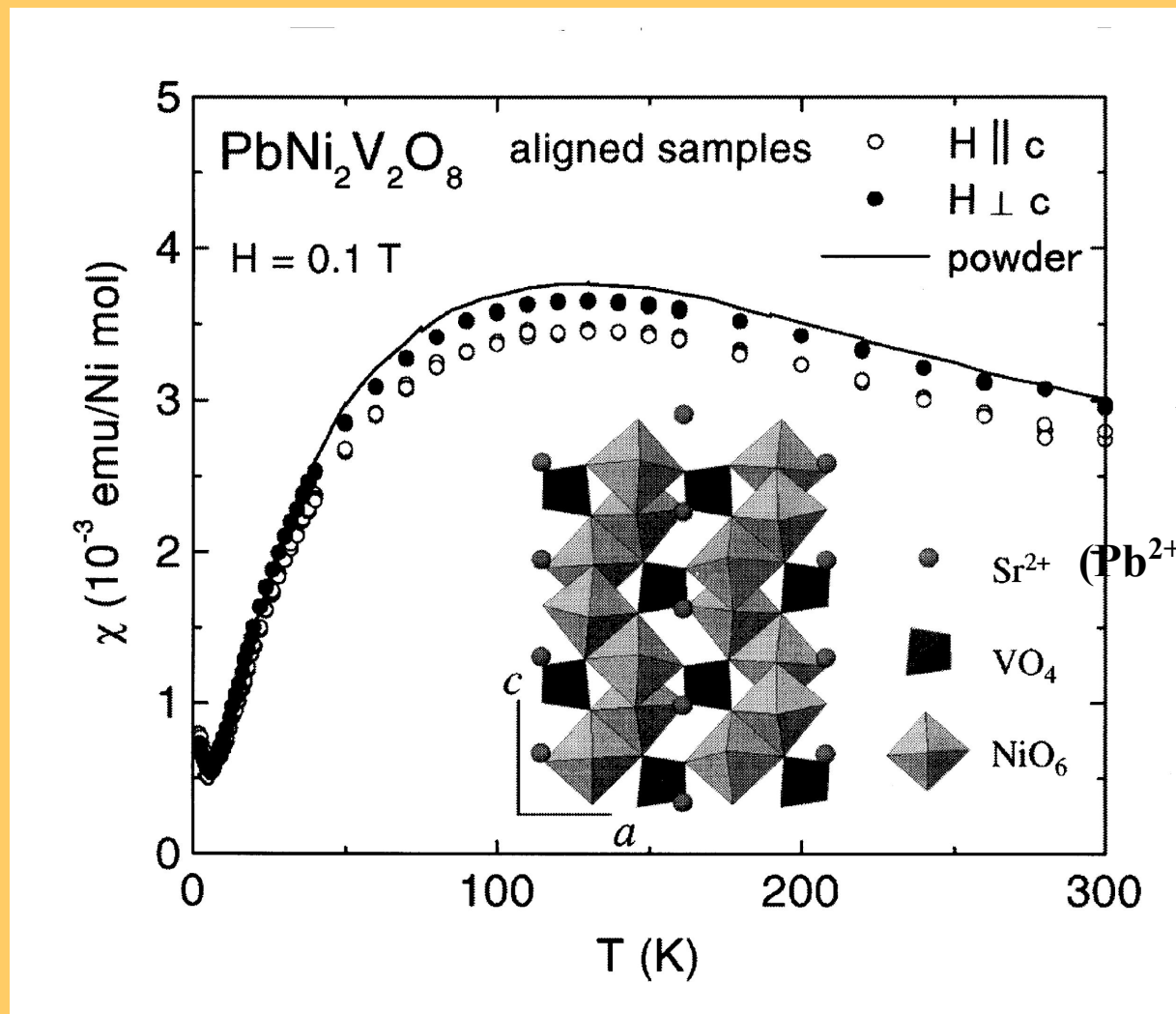
**FIG. 2.** (a) The staggered magnetic moments  $\langle S_i^z \rangle$  in chains with free boundaries at both ends in the cases of  $L = 13, 25,$  and  $33$ . (b) The staggered magnetic moments  $\langle S_i^z \rangle$  in chains with free boundaries at both ends in the cases of  $L = 65$  and  $97$ .

Spin sublevels and transition frequencies for spin  $S=1$   
in an axial crystal field

$$H = D (S^z)^2 + g \mu_B H S$$

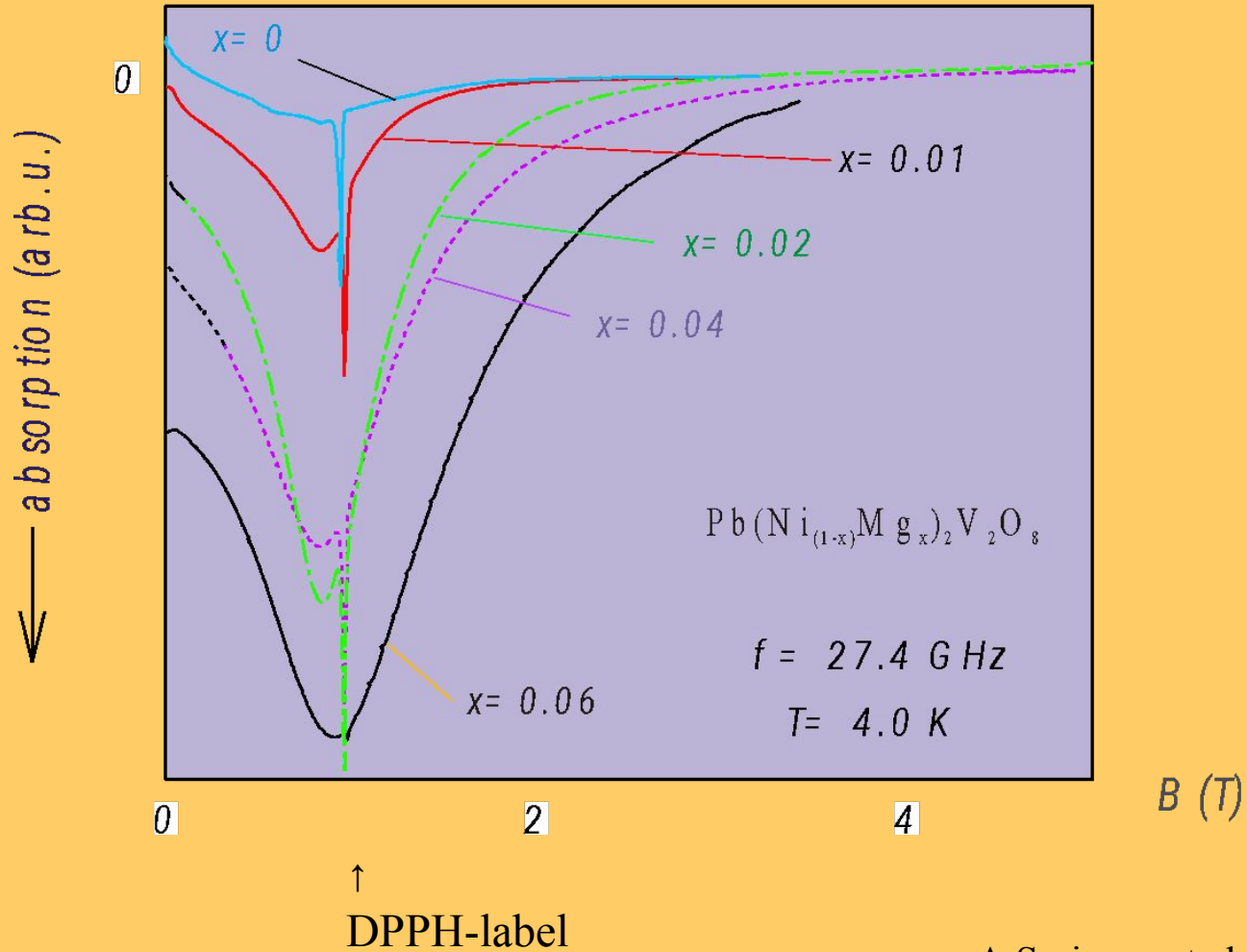


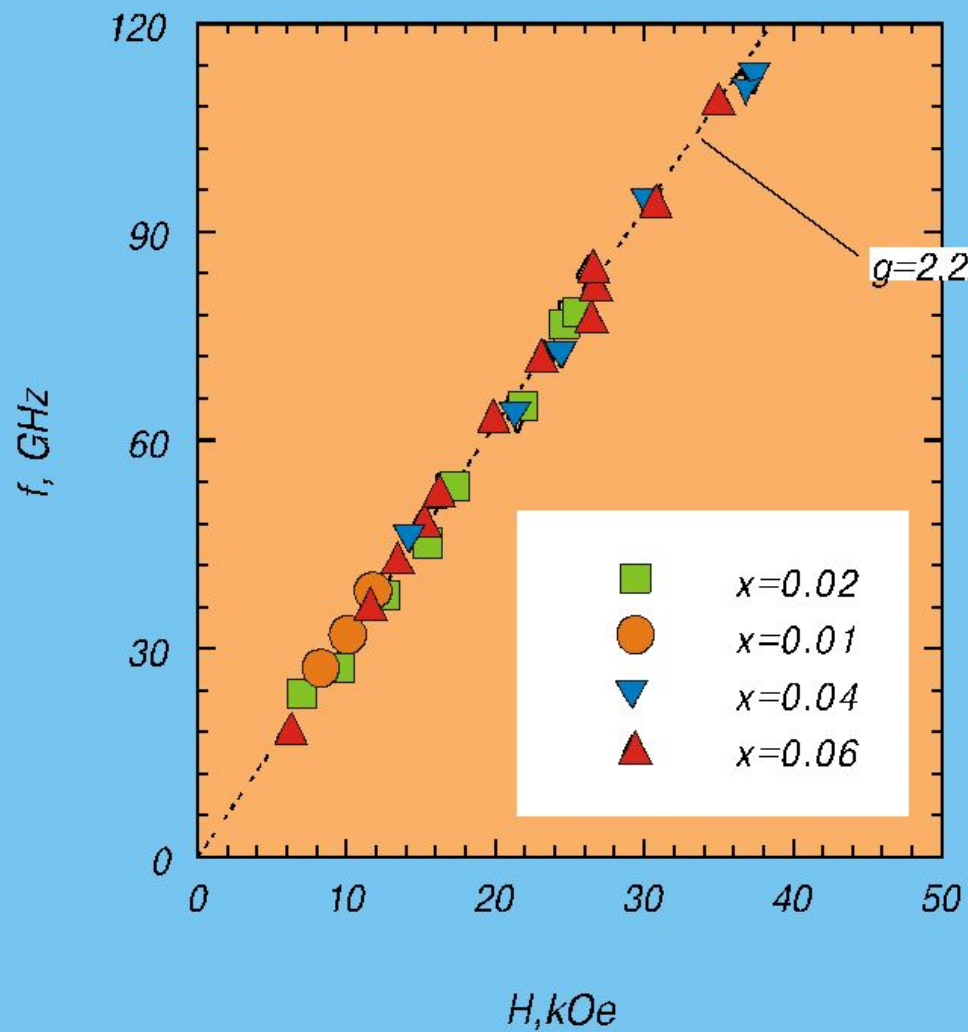
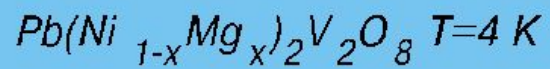
# Structure and susceptibility of a Haldane magnet



Uchiyama et al PRL 1999

# ESR intensity provided by diamagnetic dilution in the Haldane magnet

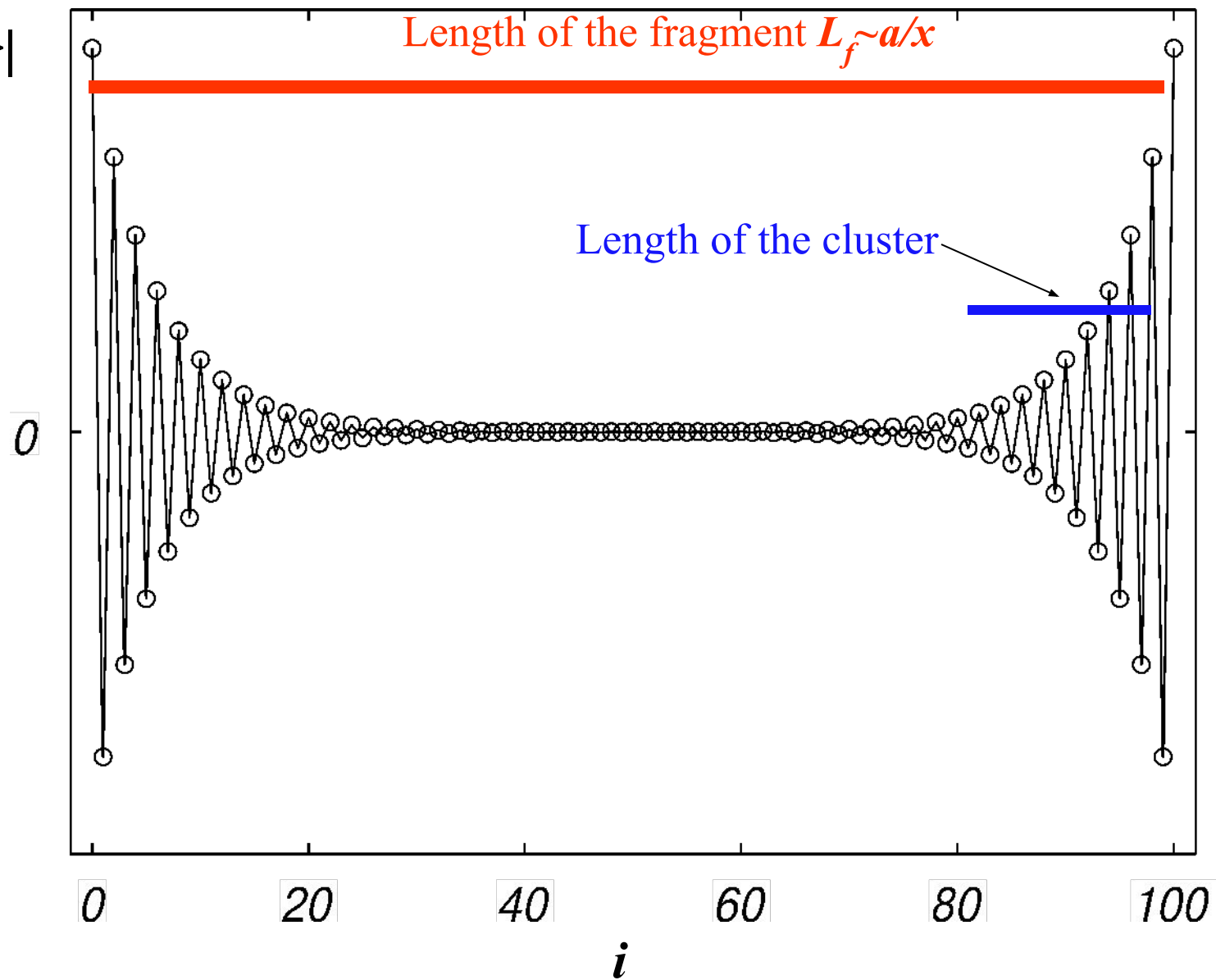




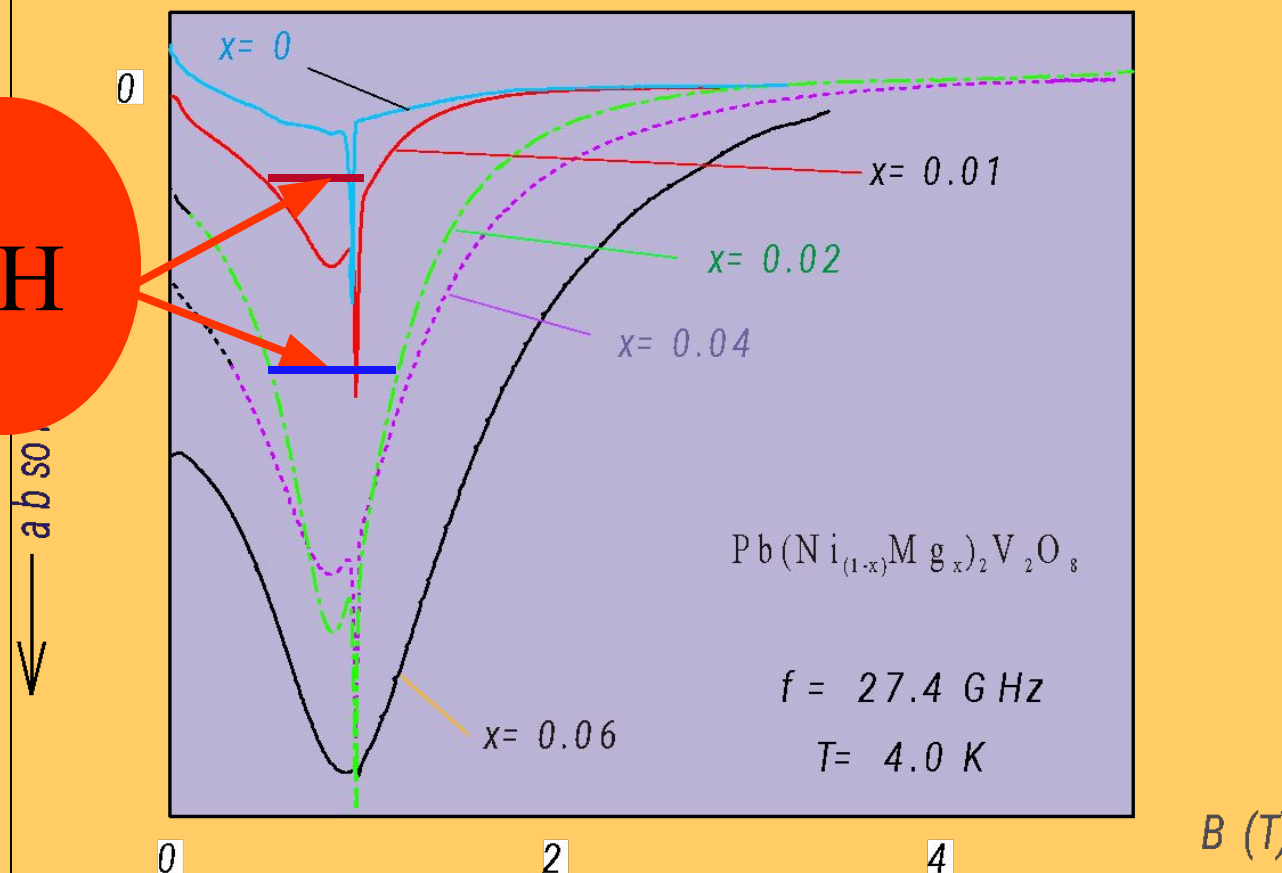
$S_{\text{eff}} = 1/2$



$$|\langle S_z^i \rangle|$$



ESR intensity provided by diamagnetic dilution in the Haldane magnet

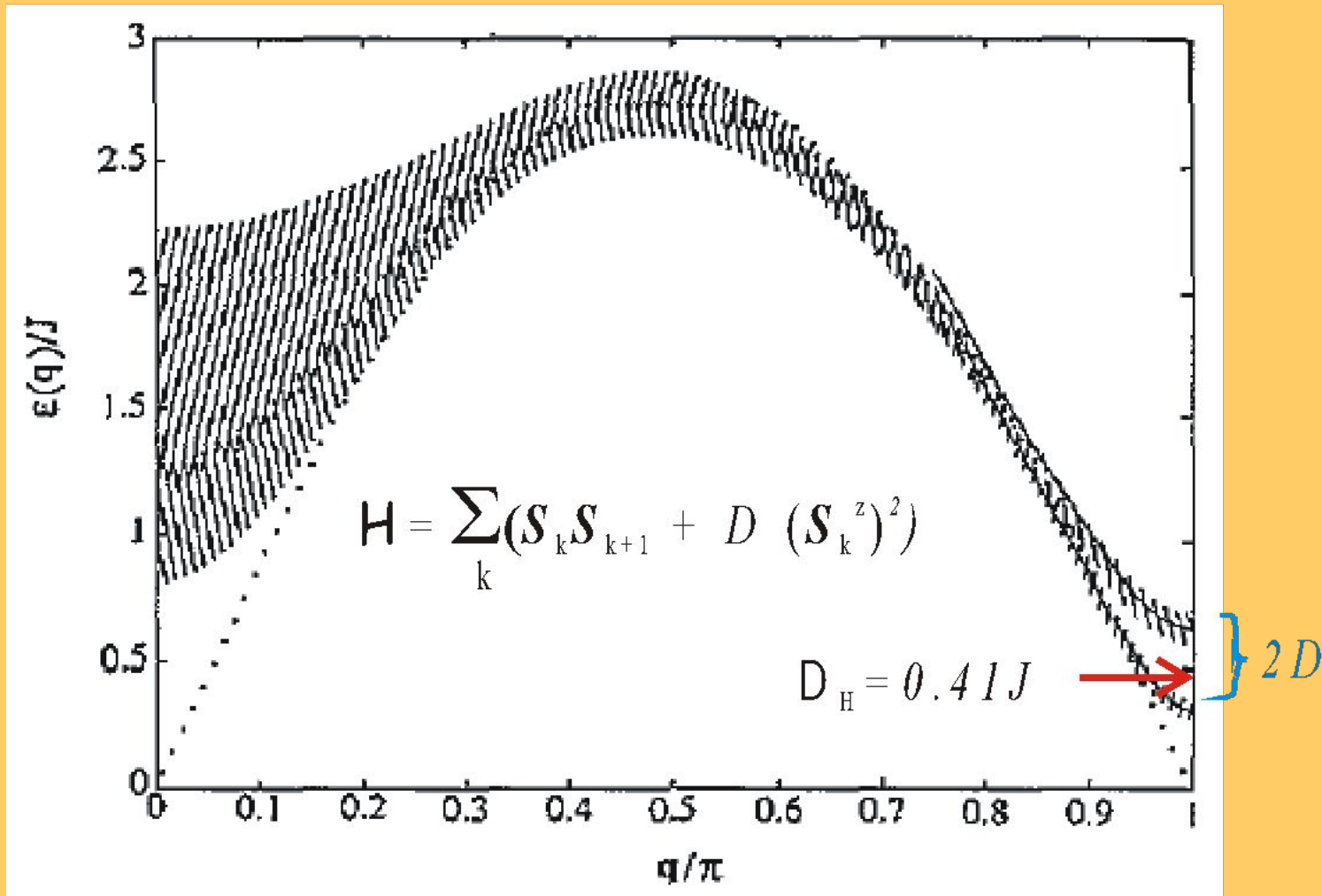


Increase of the linewidth with concentration indicates contacts of clusters

At the average chain fragment length of  $50a$  ( $x=2\%$ ) about a half of fragments are shorter than  $20a$   
HENCE:

$$L_{cl} \sim 10a$$

# Spin-1 chain with Dzyaloshinskii-Moriya interaction



Regnault et al JPCM 1993

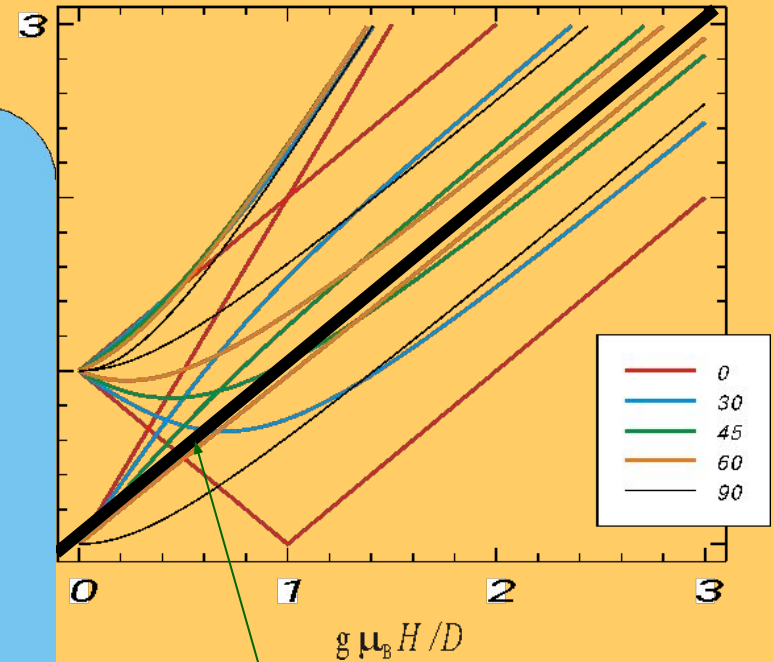
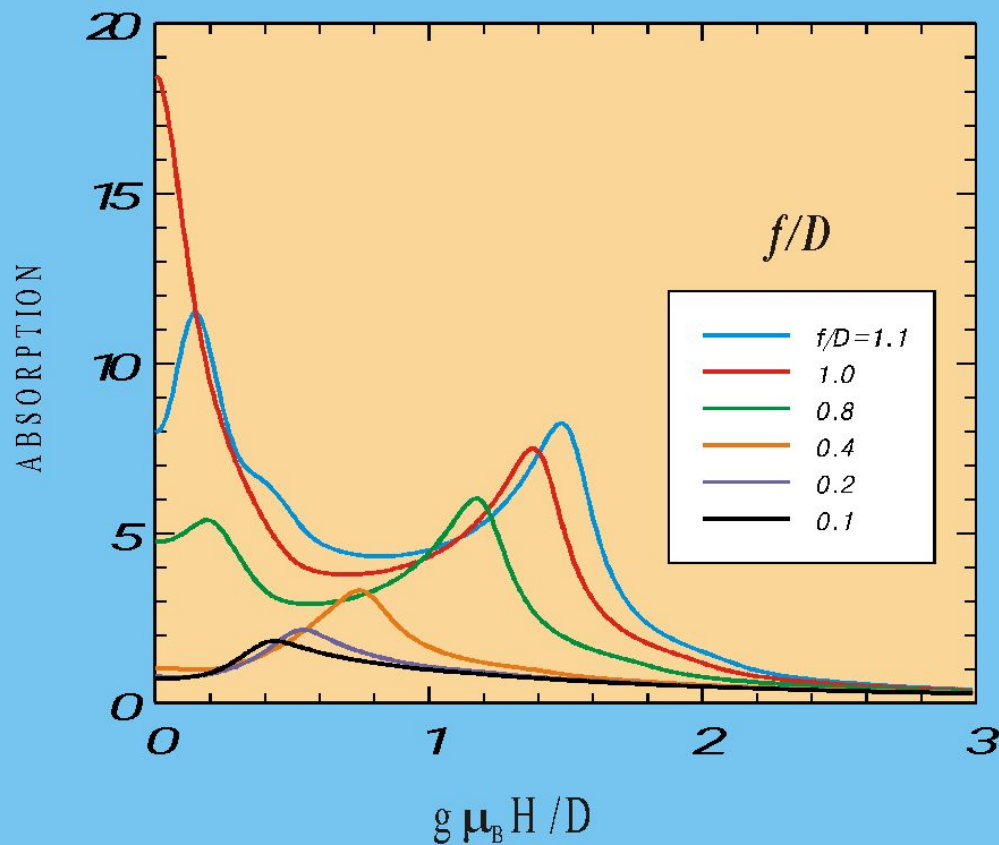
# Spin $S=1$ in a crystal field

$$H = D (S^z)^2 + g \mu_B H S$$

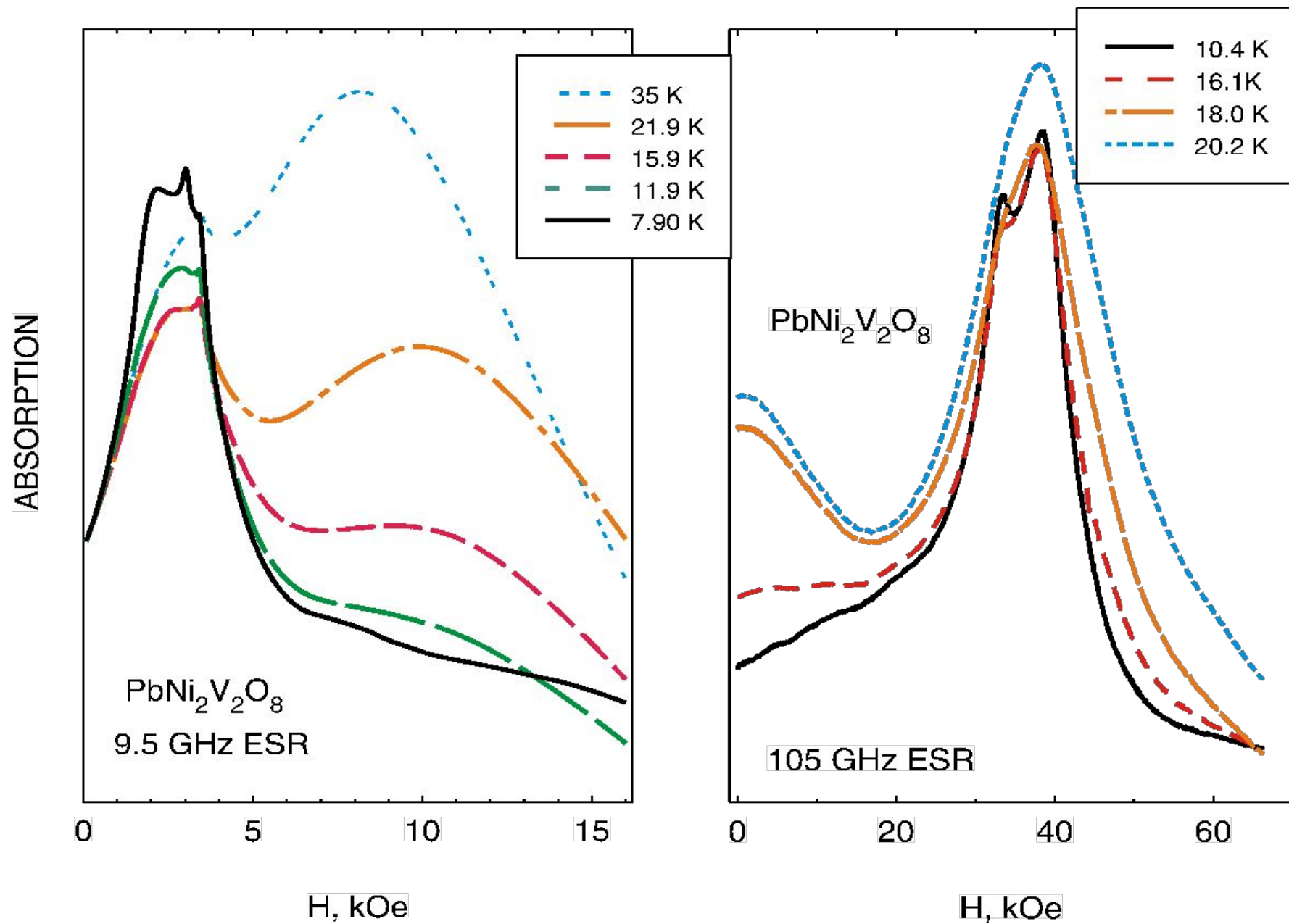
$E/D$

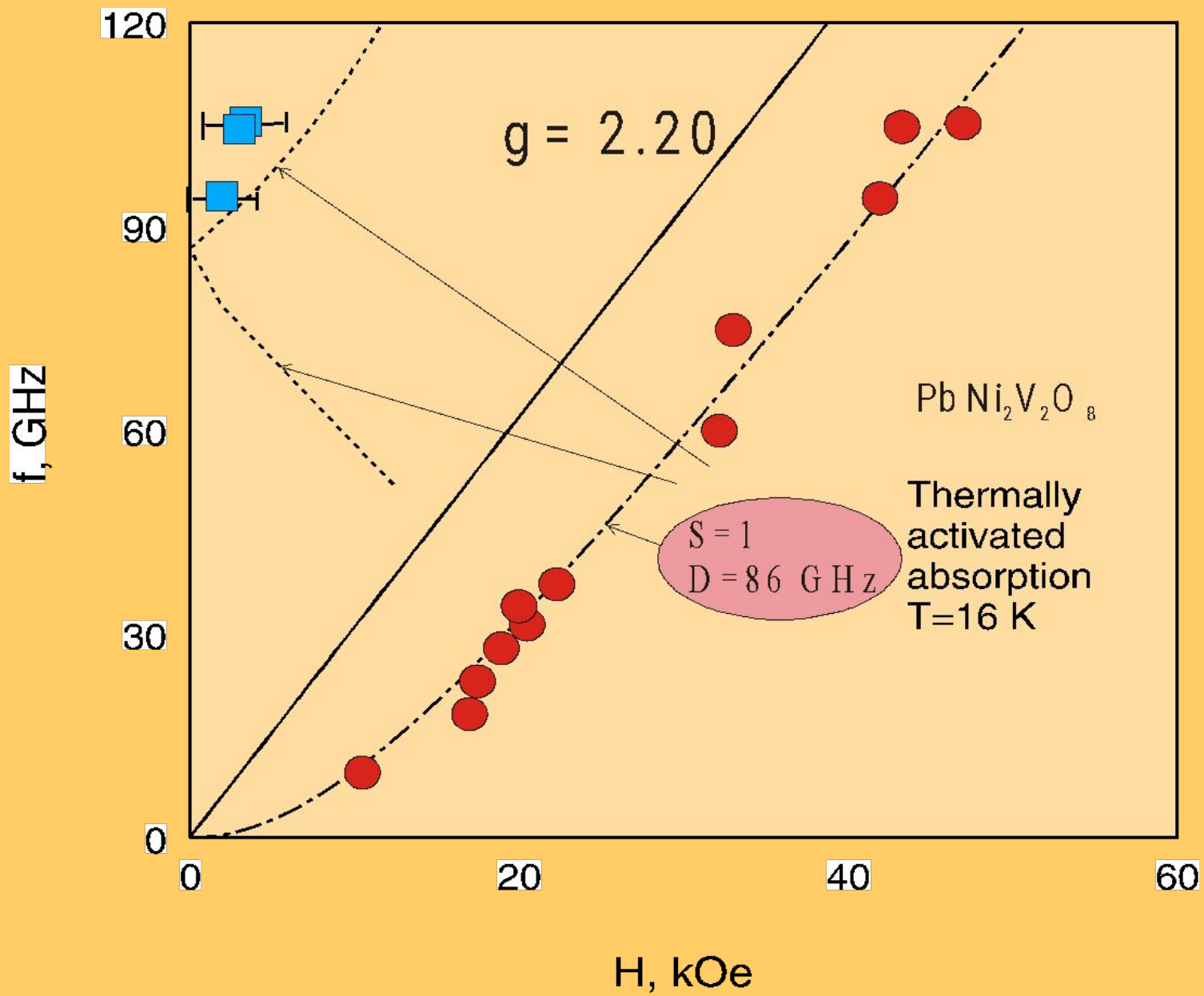


ESR in  $S=1$  powder, linewidth  $\Delta=0.1D$ ,  $T=2D$



$S=1/2$





$\langle S_z \rangle$

0

0

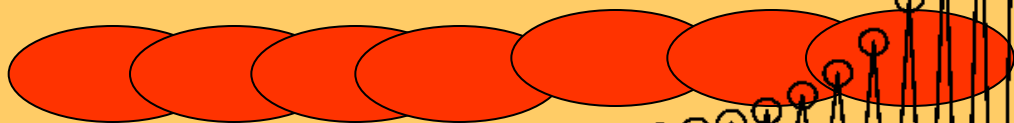
20

40

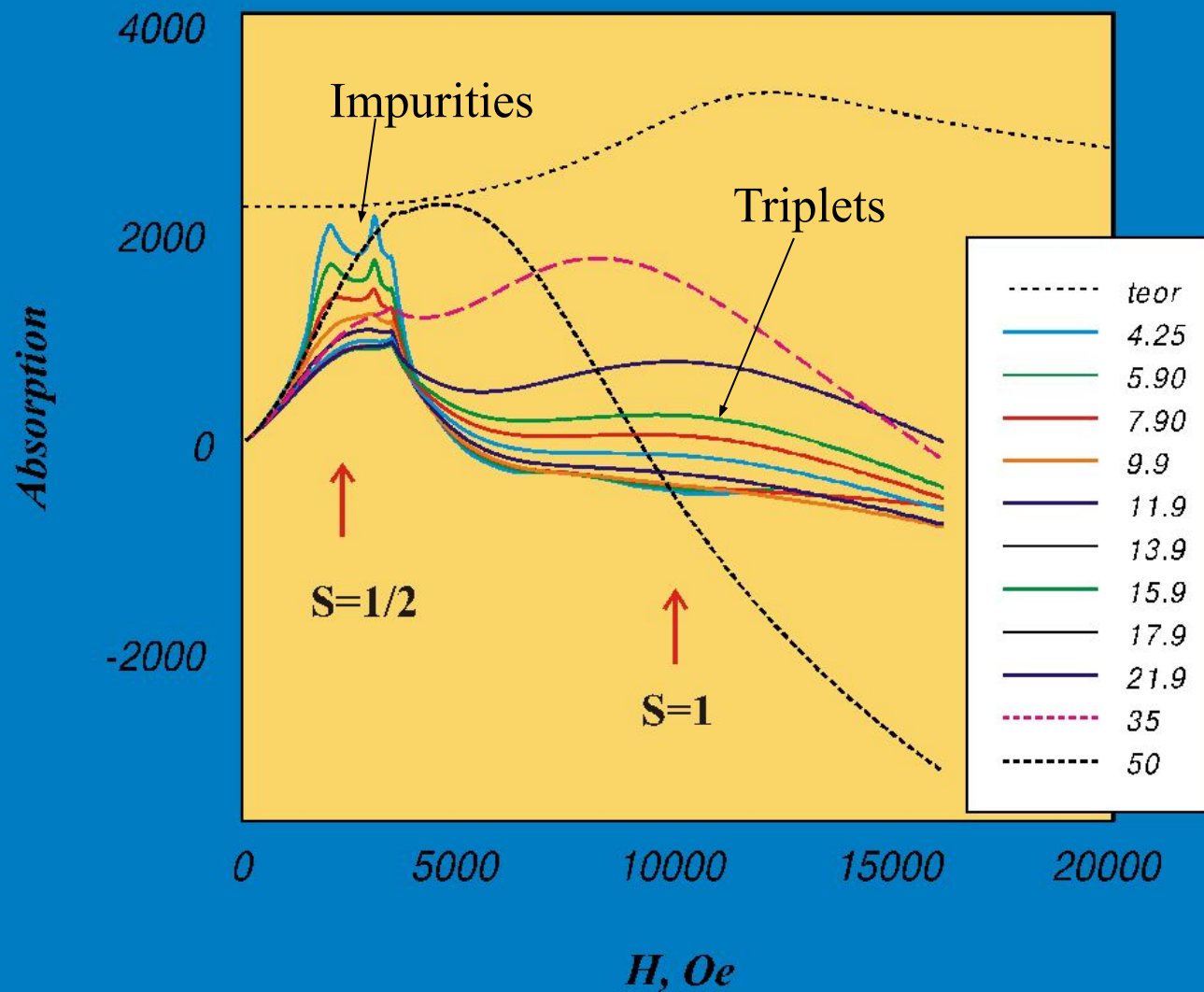
60

80

100

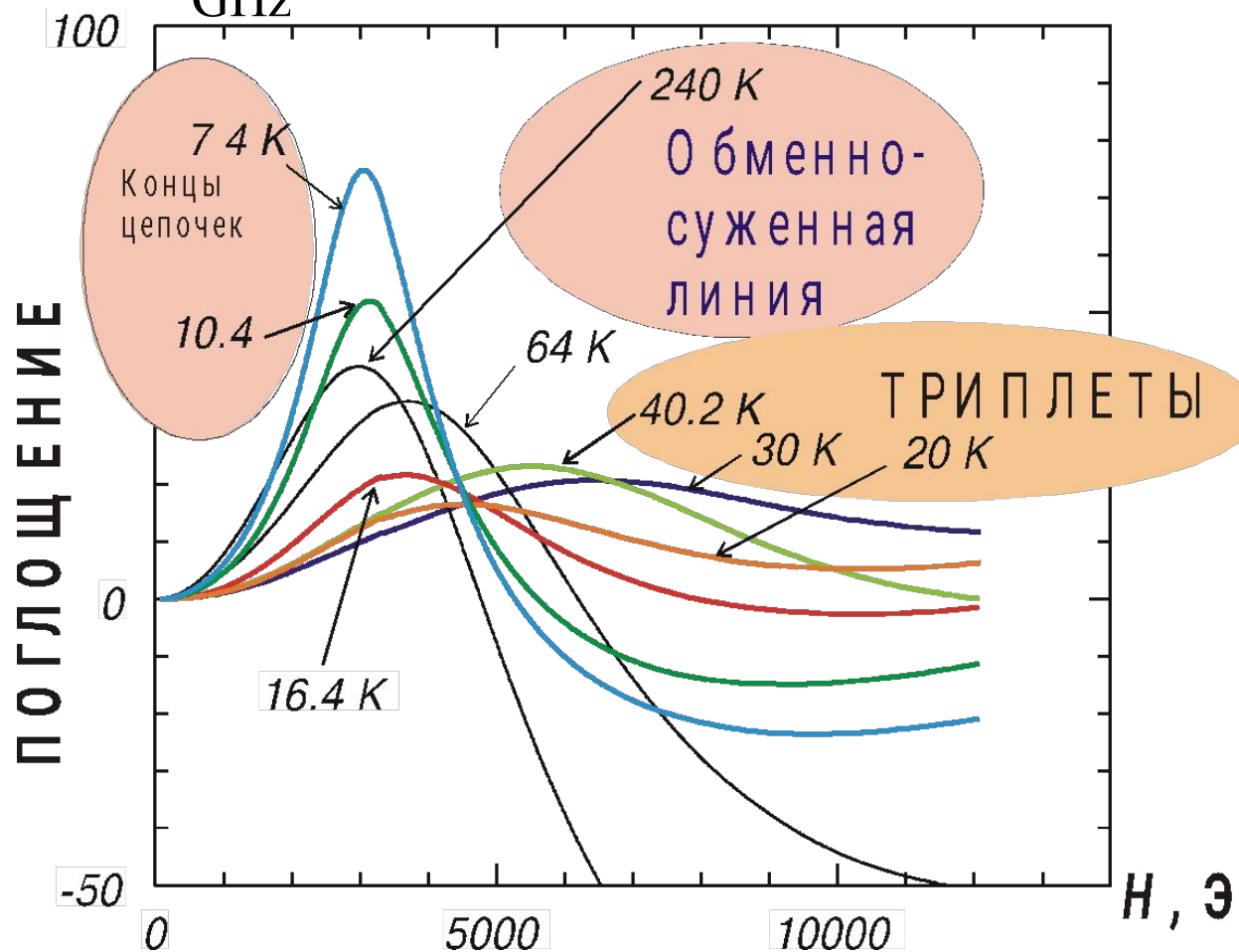


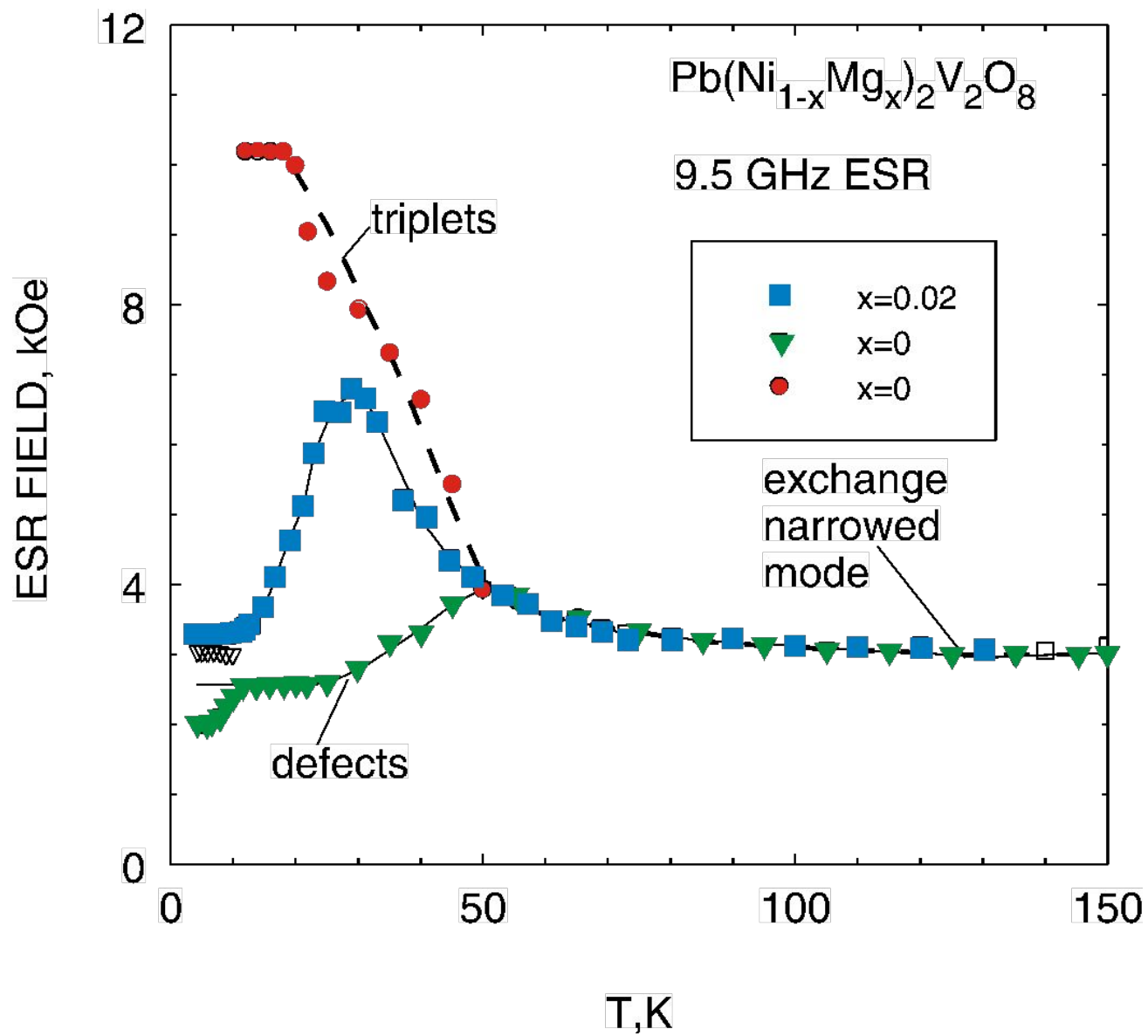
**PbNi<sub>2</sub>V<sub>2</sub>O<sub>8</sub> nominally pure : 9.5 GHz ESR**

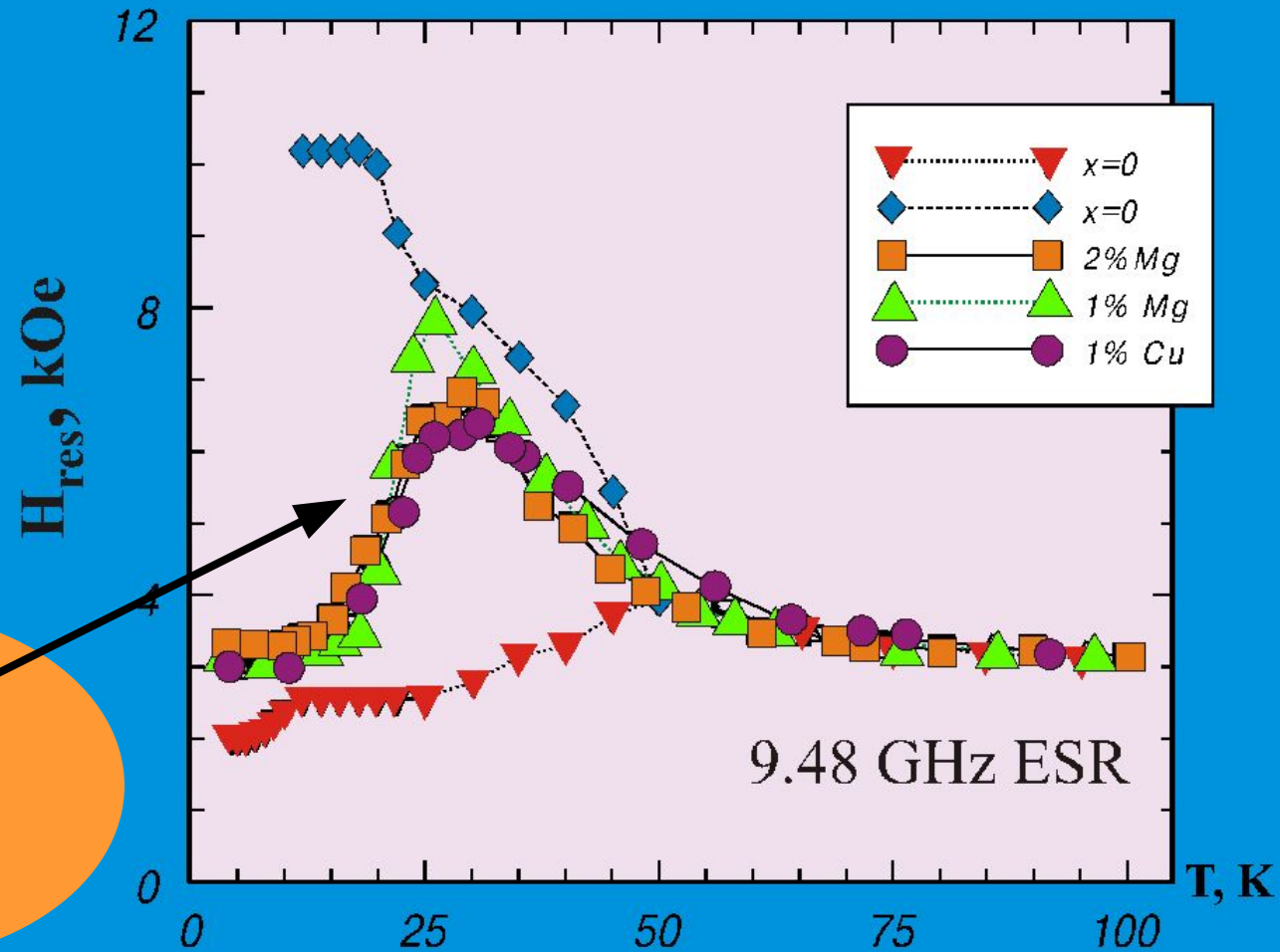




$\text{Pb}(\text{Ni}_{0.96}\text{Cu}_{0.04})_2\text{V}_2\text{O}_8, 9.5$   
GHz







Collective  
ESR mode  
Triplets &  
Chain Ends

## *Наблюдаемые сигналы магнитного резонанса*

ЭСР эффективных спинов  $S=1/2$ .

ЭСР эффективных спинов  $S=1$  термически активированных триплетов.

Коллективная мода триплетных возбуждений и эффективных спинов  $S=1/2$  на концах фрагментов спиговых цепочек. Коллективная конфигурация с эффективным спином  $S=1/2$  выживает при столкновениях с триплетами.

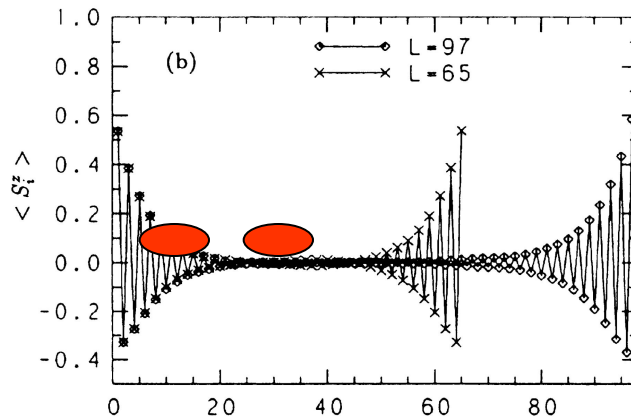


FIG. 2. (a) The staggered magnetic moments  $\langle S_i^z \rangle$  in chains with free boundaries at both ends in the cases of  $L = 13, 25,$  and  $33$ . (b) The staggered magnetic moments  $\langle S_i^z \rangle$  in chains with free boundaries at both ends in the cases of  $L = 65$  and  $97$ .

# 3D dimer net in monoclinic $\text{TlCuCl}_3$

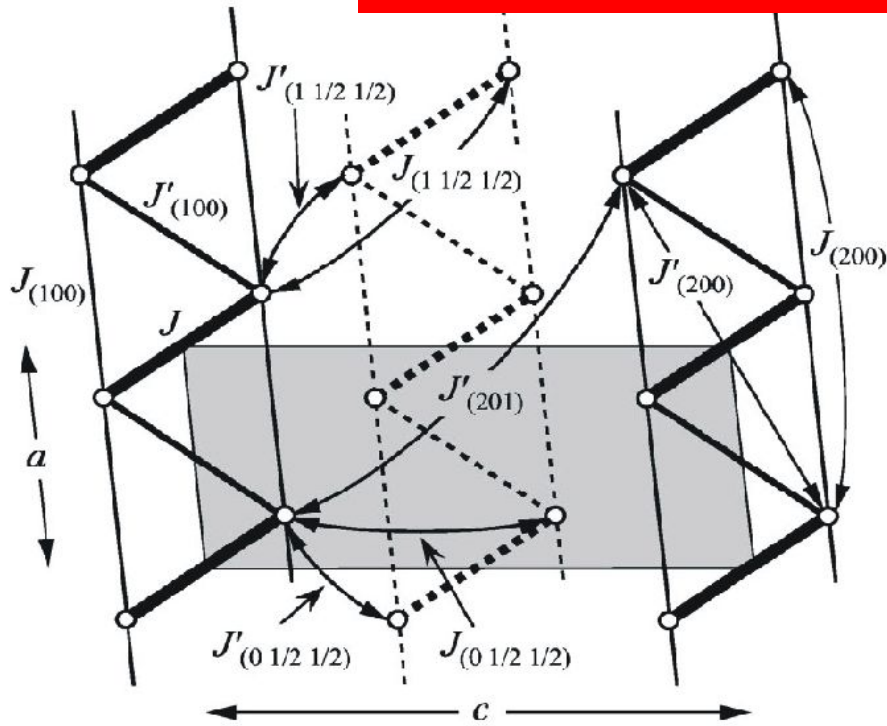
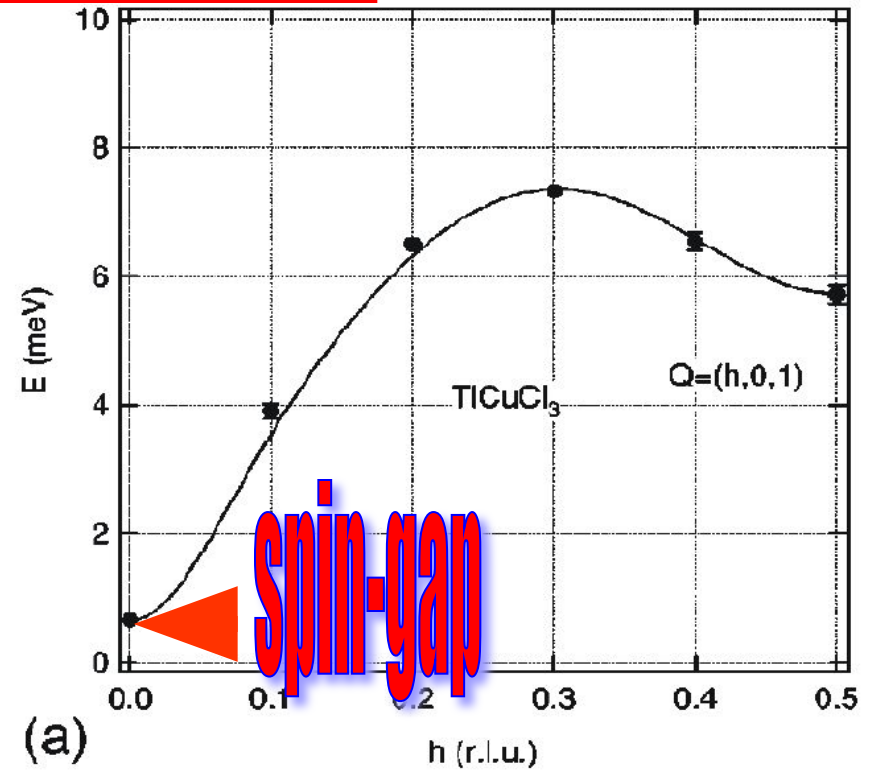


FIG. 1. Projection of  $\text{Cu}^{2+}$  ions with spin- $\frac{1}{2}$  on the  $a$ - $c$  plane.

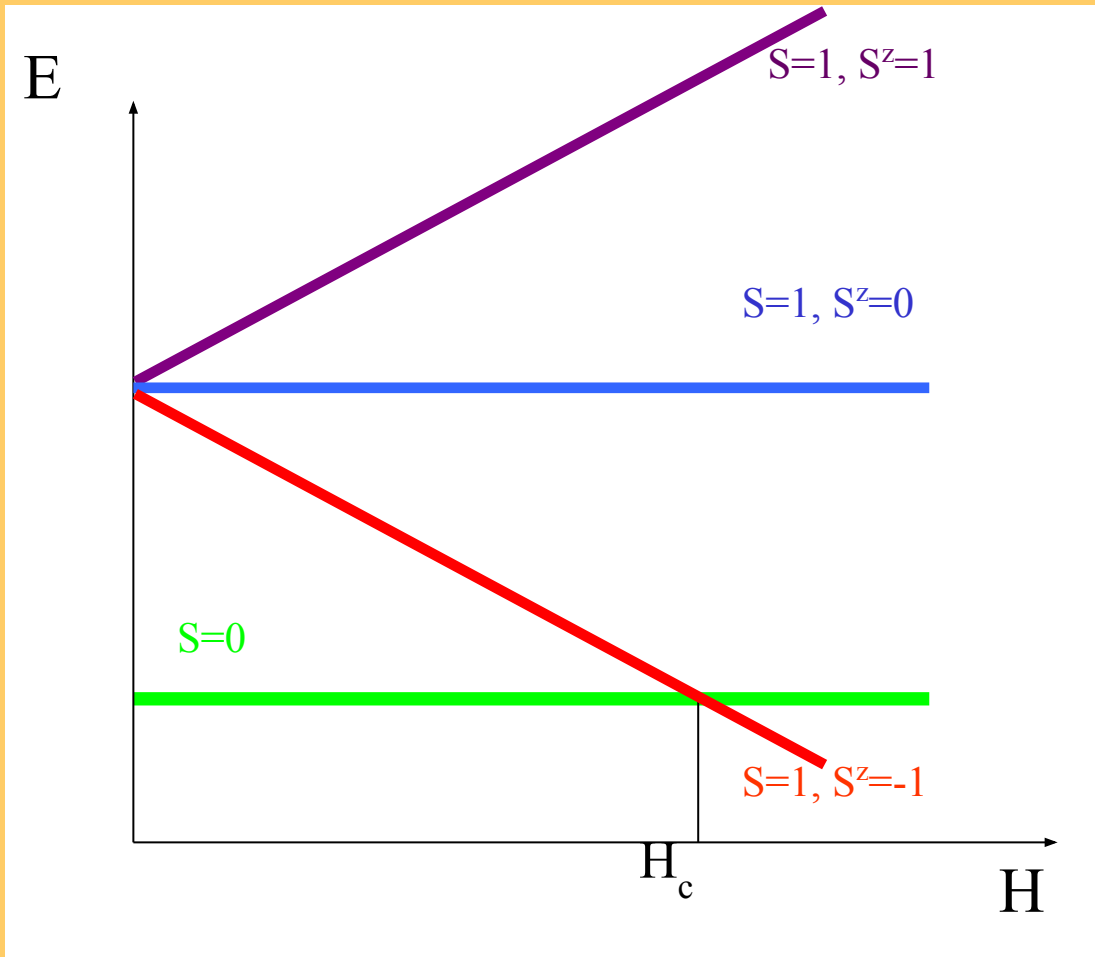


*These excitations are also triplets:  $S=1$*

**Magnetic excitations in the spin-gap system  $\text{TlCuCl}_3$**   
 PHYS. REV. B **65**, 094426 (2002) A. Oosawa et al.

*Как все-таки перевести квантовую спиновую жидкость в упорядоченное состояние?*

Способ 2: закрыть спиновую щель сильным магнитным полем



# Bose-Einstein Condensation of Dilute Magnons in $\text{TlCuCl}_3$

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

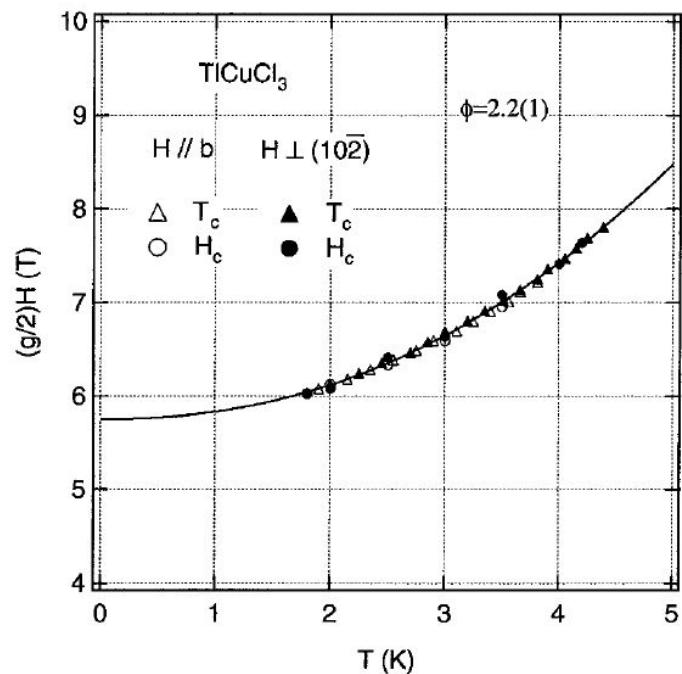


FIG. 1. The phase diagram in  $\text{TlCuCl}_3$ . The solid line denotes the fitting with the formula  $(g/2)[H_c(T) - H_c(0)] \propto T^\phi$  with  $(g/2)H_c(0) = 5.61$  T and  $\phi = 2.2$ .

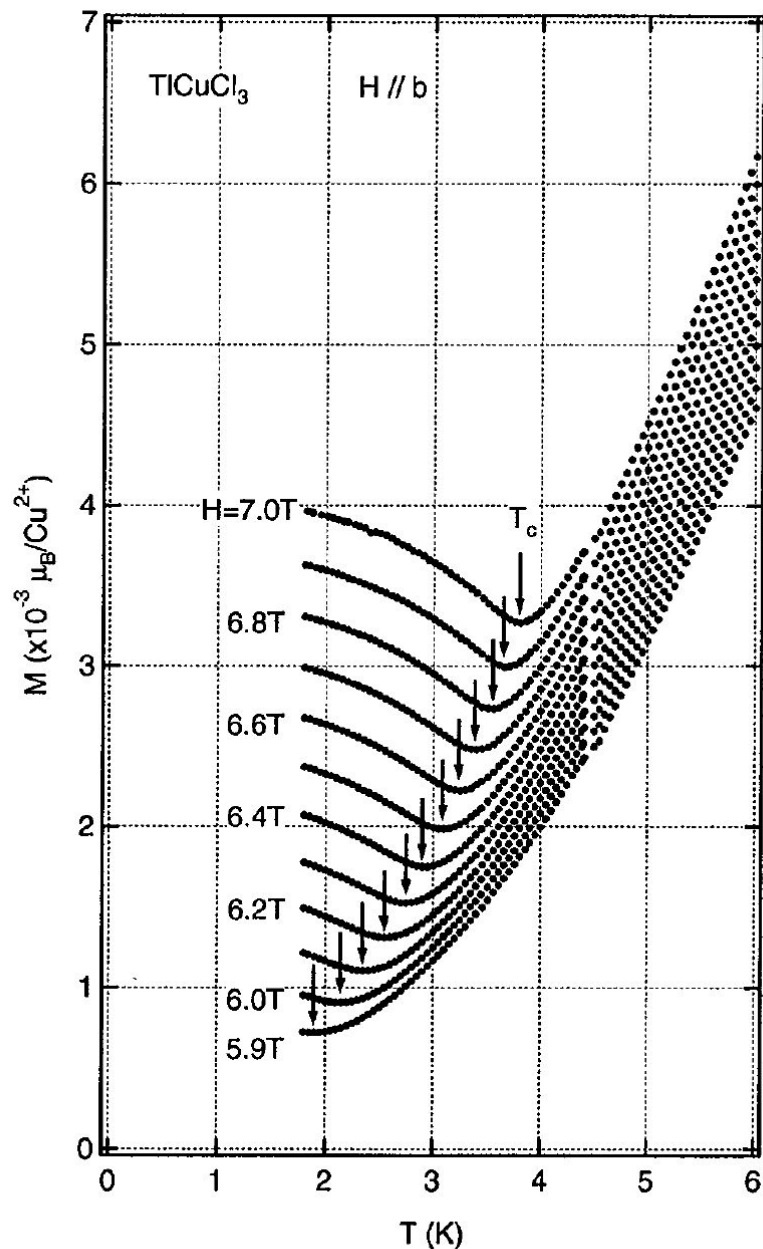
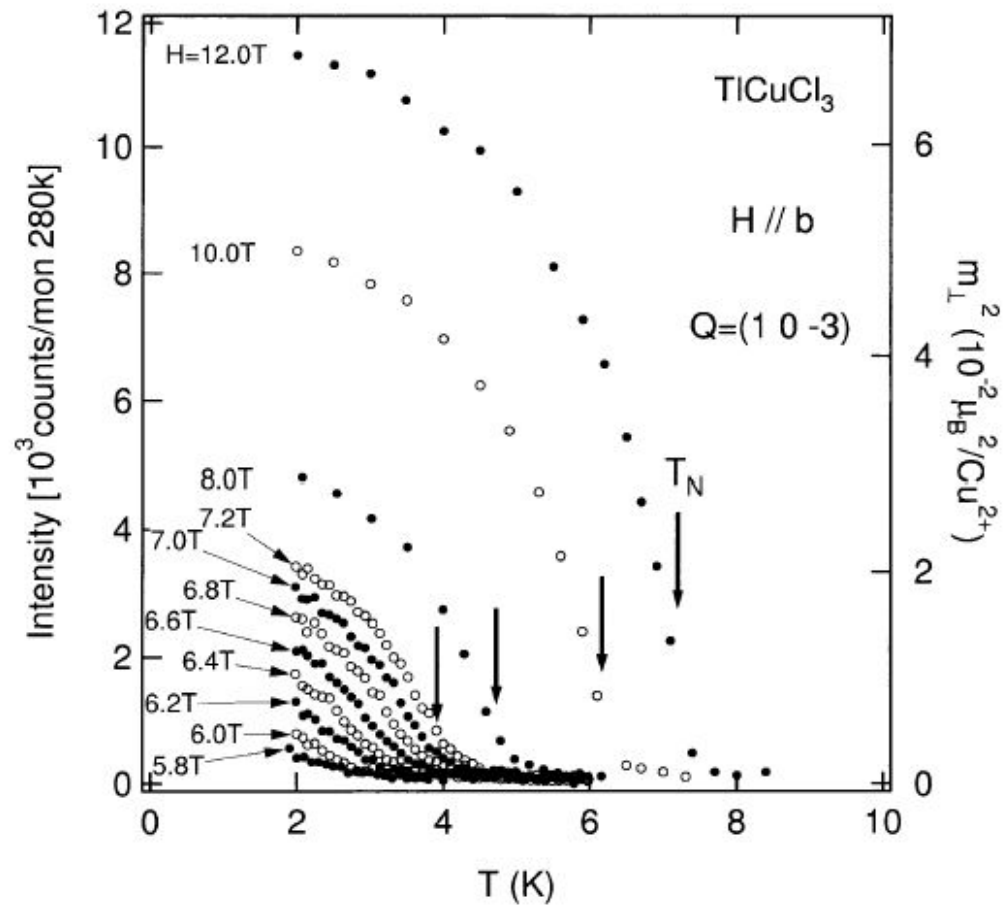
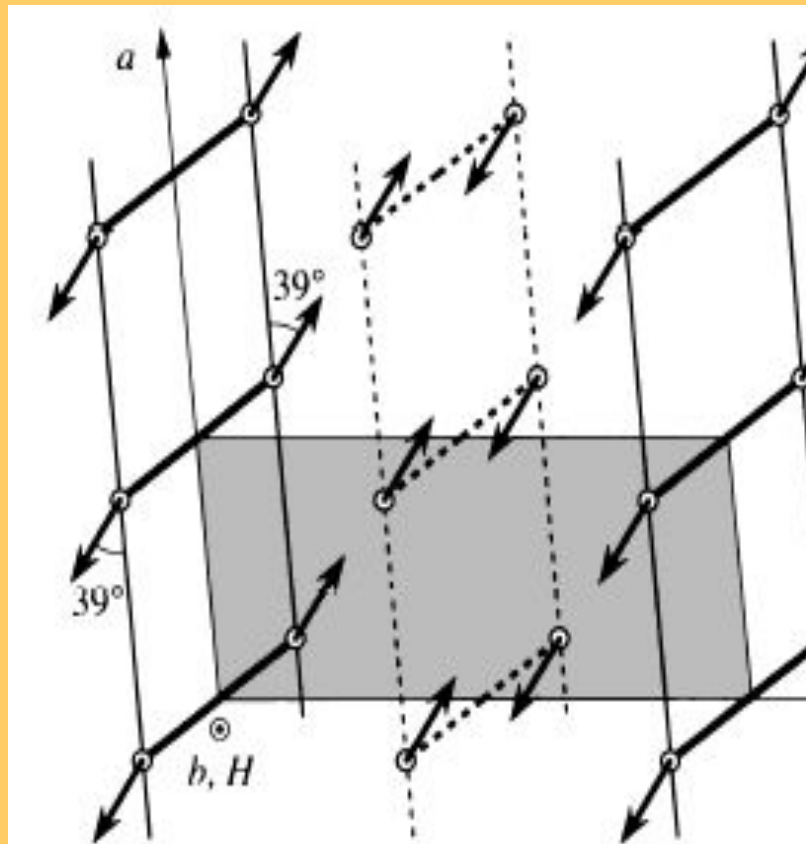


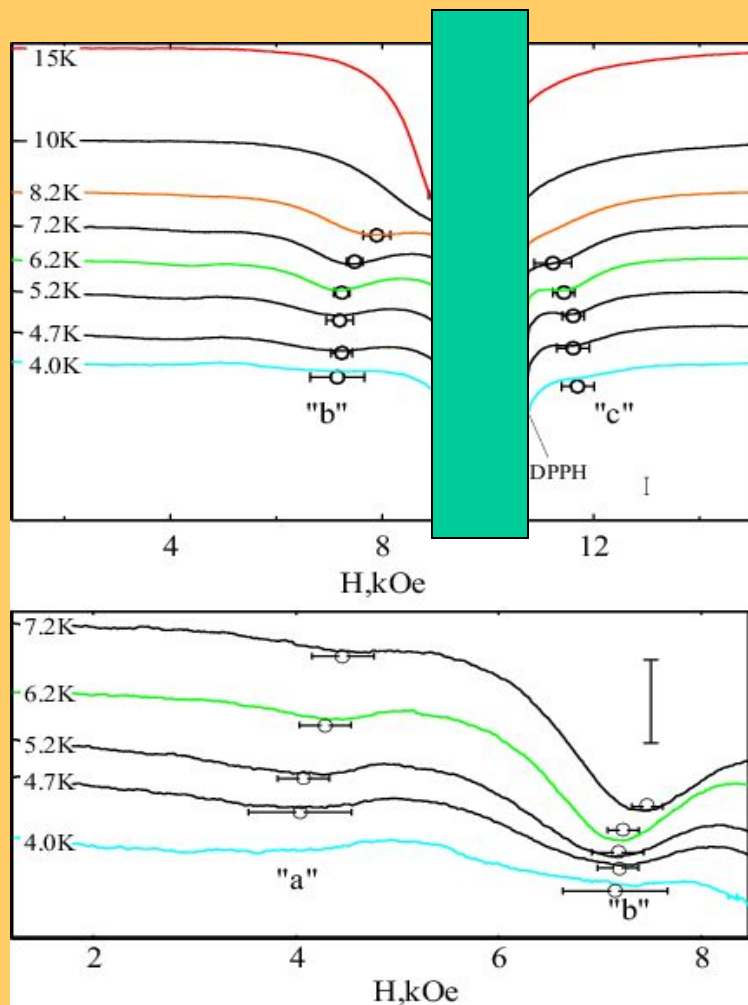
FIG. 2. The low-temperature magnetizations of  $\text{TlCuCl}_3$  for various magnetic fields  $H$ .

# Индукированный магнитным полем (!???) антиферромагнитный порядок в $\text{TlCuCl}_3$





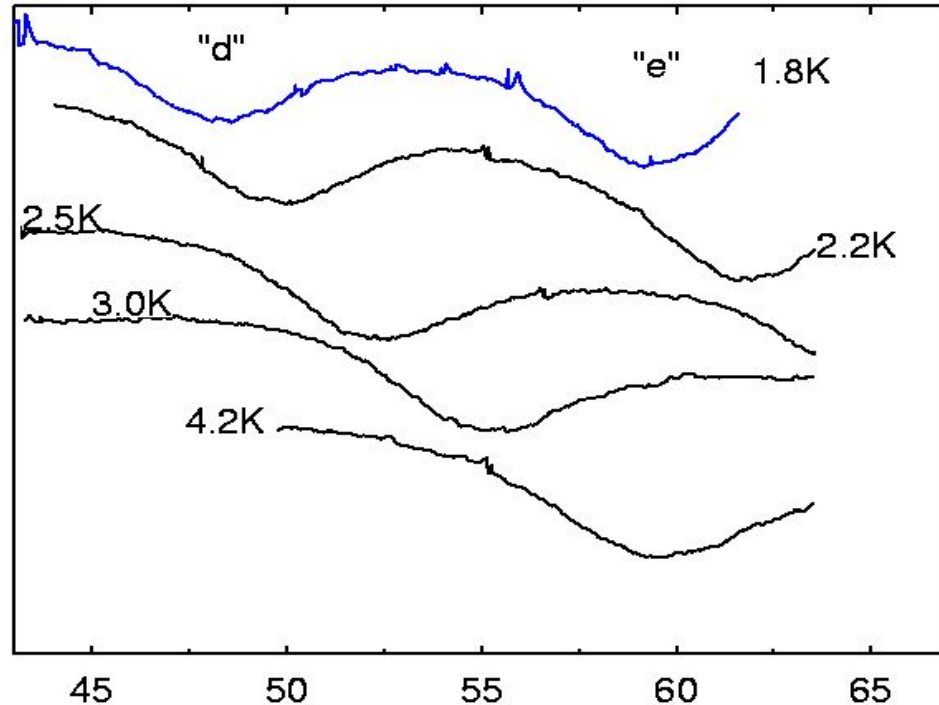
# Димерная сетка спинов $S=1/2$ в кристалле $\text{TiCuCl}_3$ : температурная зависимость спинового резонансного поглощения



Термически активированный сигнал магнитного резонанса, соответствующий изолированным спином  $S=1$  в кристаллическом поле: разреженный газ триплетных возбуждений в синглетной матрице из спинов  $S=1/2$ .

$H \parallel [10-2]$ ,  $f=30.05\text{ГГц}$

# $TlCuCl_3$ : ЭПР при различных температурах в больших полях.

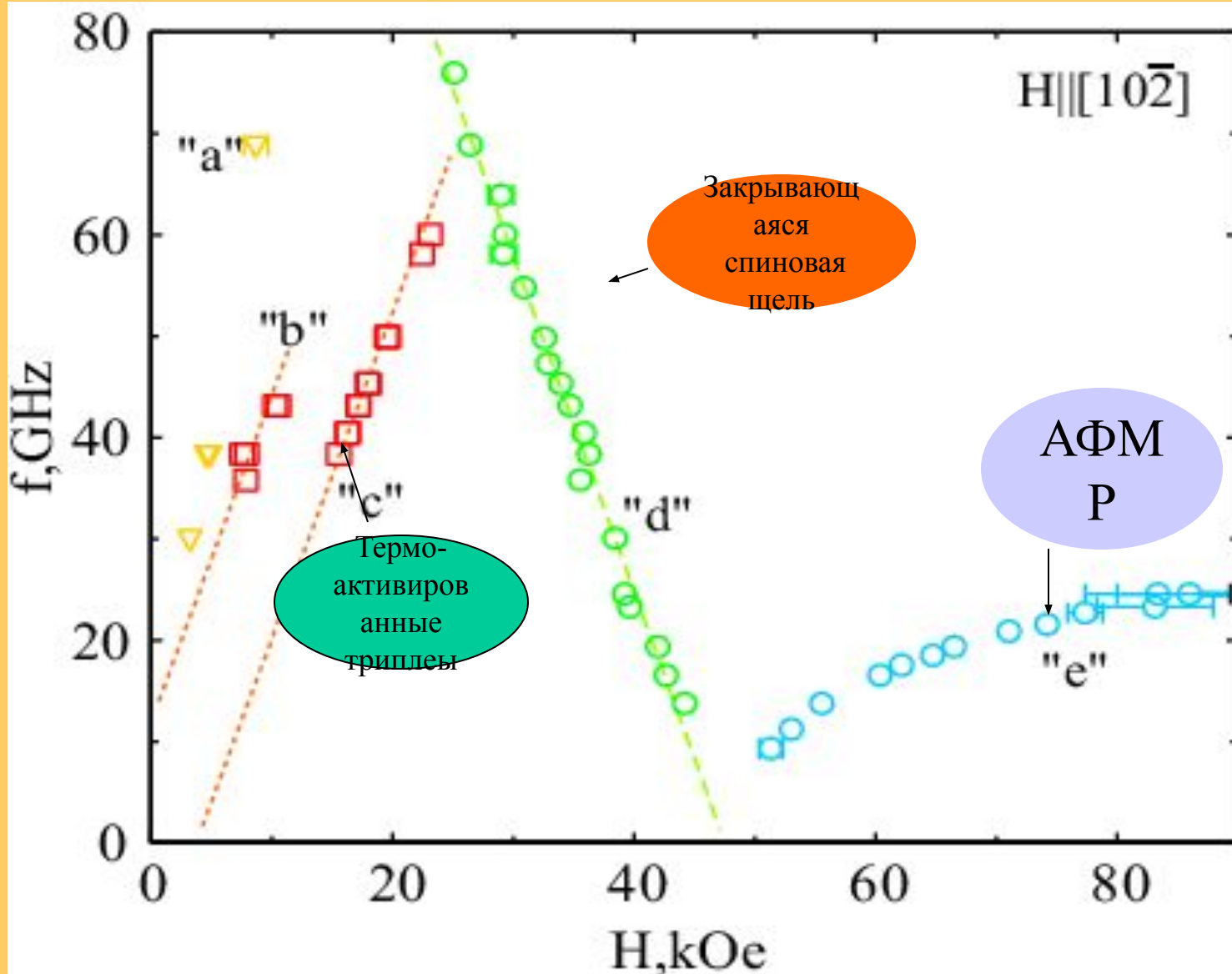


$H \parallel b$ ,  $f=26$  ГГц

В больших полях  
наблюдается две  
компоненты:  
“d” при  $H < H_c$   
“e” при  $H > H_c$

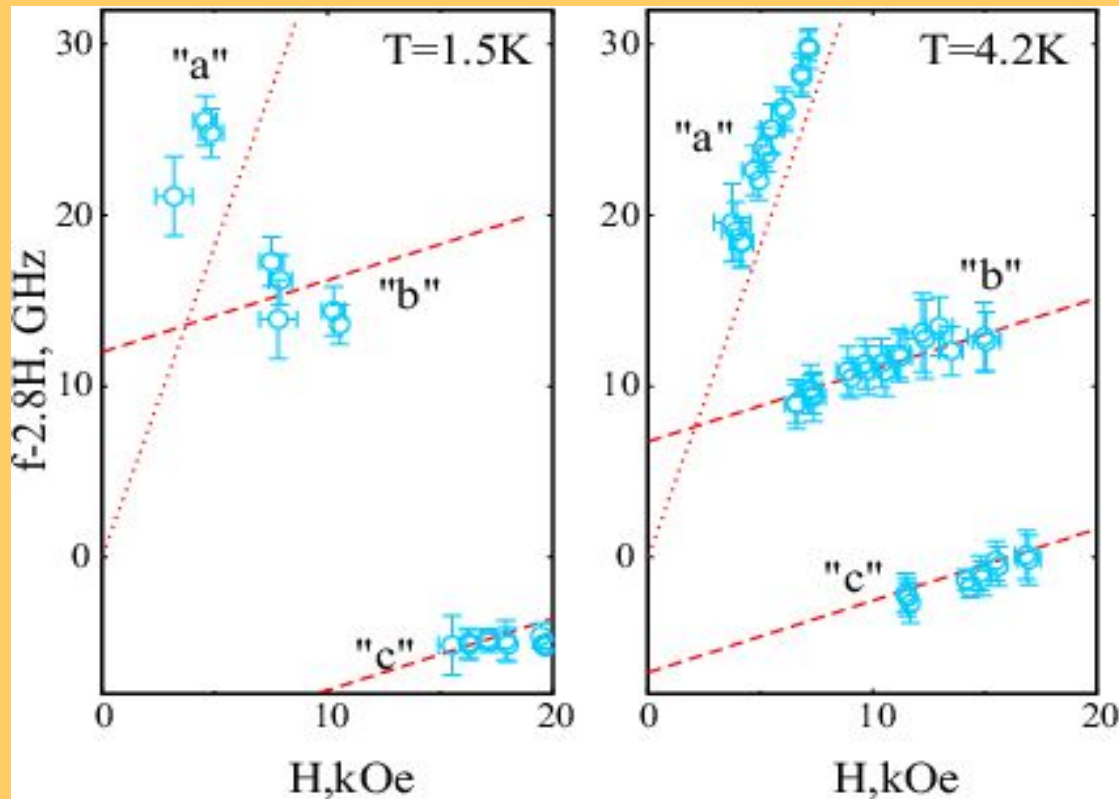
При повышении  
температуры обе  
компоненты смещаются  
в область больших  
полей.

# $\text{TlCuCl}_3$ : ESR



- "a", "b", "c" - переходы между расщепленными кристаллическим полем подуровнями  $S=1$
- "d" - переход между  $S=0$  и  $S^z=-1$
- "e" - АФМР

# TCuCl<sub>3</sub>: магнитный резонанс термоактивированных триплетов



$H \parallel [10-2]$

$$S_{\text{eff}} = 1 \text{ !!!!!}$$

$$H = DS_z^2 + E(S_x^2 - S_y^2) + g\mu_B \mathbf{S}H$$

$$D, E \ll g\mu_B H$$

$$f_a = 2 g\mu_B H$$

$$f_{b,c} = g\mu_B H \pm A$$


---


$$D = 8.0 \pm 0.7 \text{ ГГц}$$

$$E = 5.8 \pm 0.6 \text{ ГГц}$$

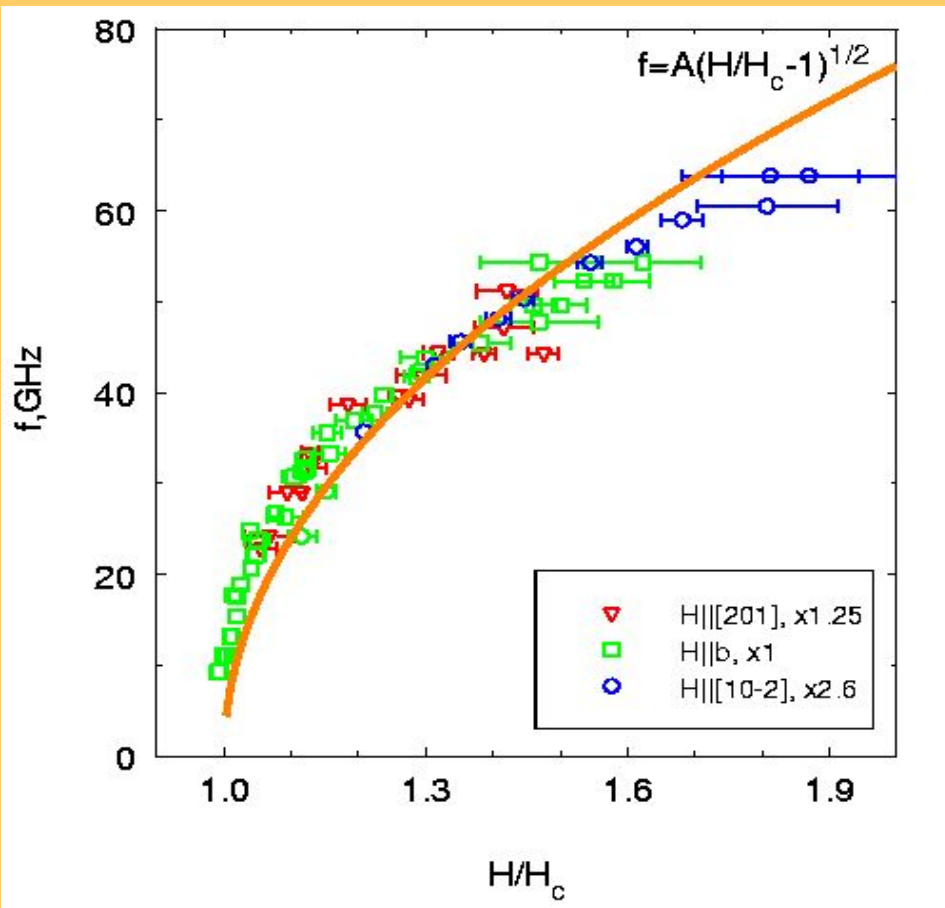
Наблюдаемые переходы между  
коллективными квантовыми  
состояниями

расщепление



Магнитное поле

Параметр порядка индуцирован полем и не насыщен. Теории такого АФМР нет. (Возможны продольные моды)



АФМР-прецессия параметра порядка. При  $H > H_{sf}$  спектр АФМР 2-подрешеточного АФМ:

$$f_1 = [(\gamma H)^2 \pm const_1]^{1/2}$$

$$f_2 = const_2$$

$$const_{1,2} = (H_{A1,2} H_E)^{1/2}$$

*const* пропорциональна параметру порядка, который зависит от поля.

## Основные эффекты

Эффективный спин  $S=1/2$  коллективного состояния спинов  $S=1$ .

Эффективный спин  $S=1$  коллективного состояния спинов  $S=1/2$

Эффективный спин  $S=1$  коллективного состояния спинов  $S=1$

Эти наблюдения возможны благодаря синглетному спин-щелевому состоянию, которое допускает существование разреженного газа спиновых возбуждений

Магнитный резонанс в индуцированной полем АФМ фазе  
(колебания малого параметра порядка)

*Спасибо за внимание*