

Элементарные возбуждения квантовых магнетиков в малых и больших магнитных полях

В.Н.Глазков, Ю.В.Красникова
ИФП РАН,

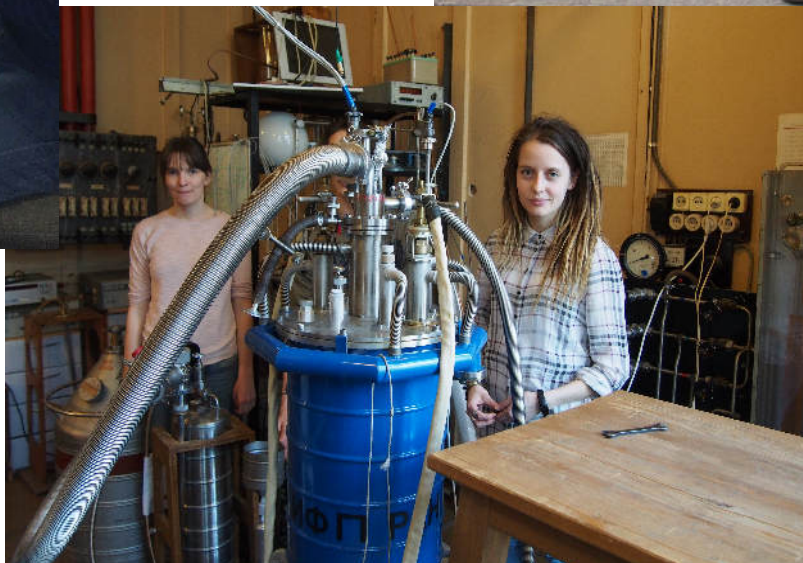
11 мая 2021



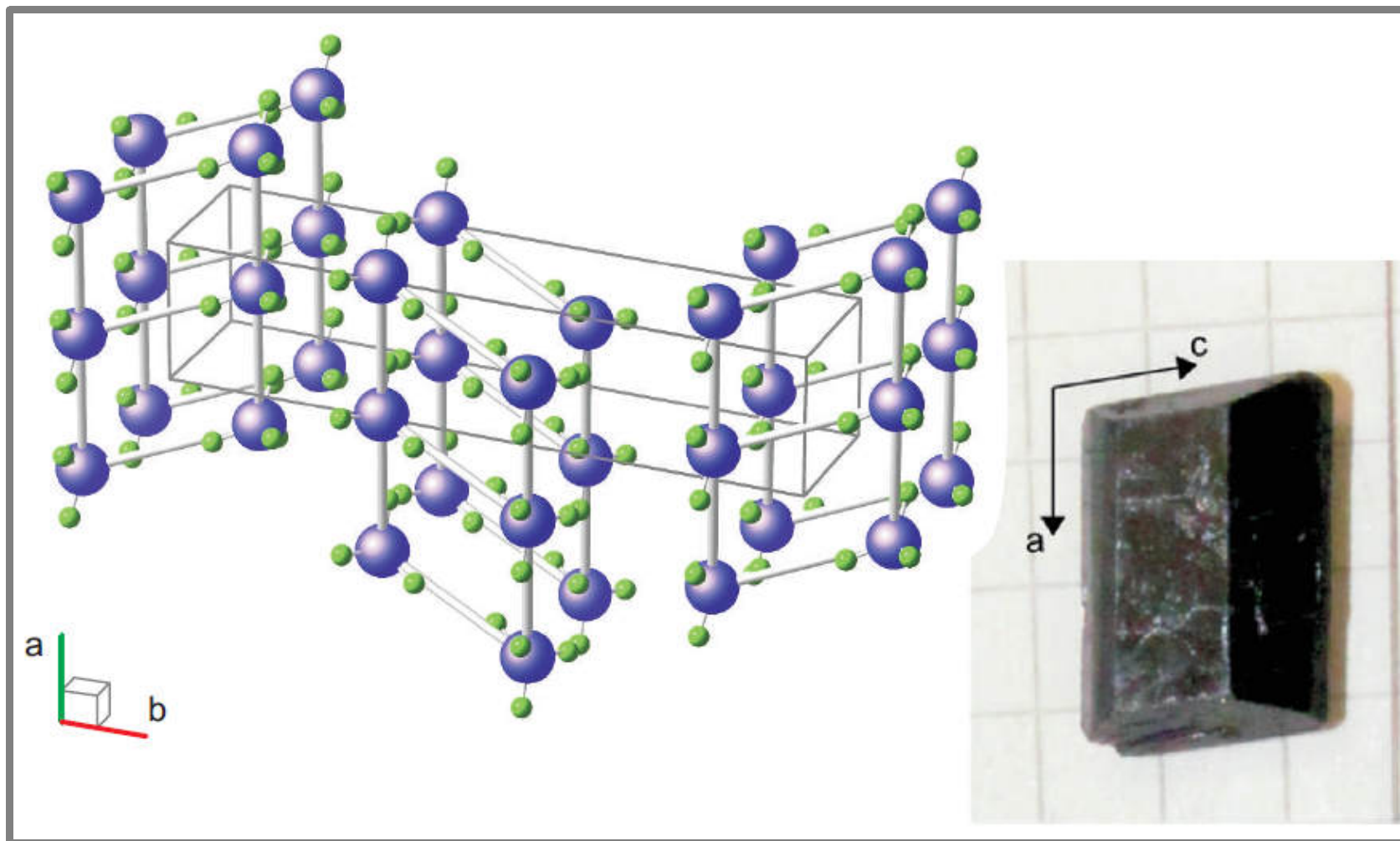


Группа изучения спиновой динамики ИФП РАН

<http://www.kapitza.ras.ru/rgroups/esrgroup>



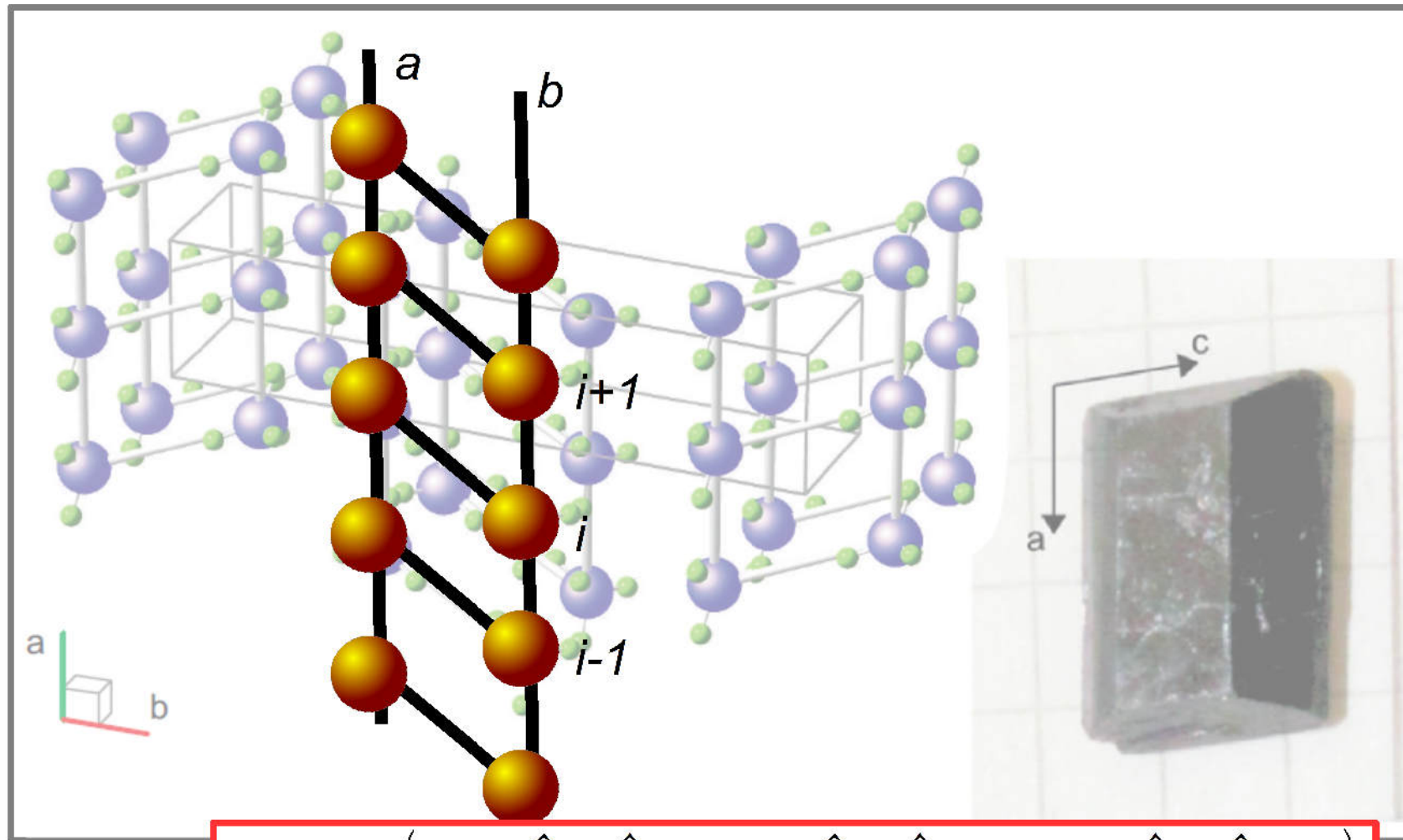
Магнетики типа "спиновая лестница"



Слева: фрагмент структуры квазиодномерного магнетика типа "спиновая лестница" $(C_7H_{10}N_2)_2CuBr_4$. Молекулы $C_7H_{10}N_2$ не показаны для ясности.

Справа: кристалл $(C_7H_{10}N_2)_2CuBr_4$ с естественной огранкой

Магнетики типа "спиновая лестница"

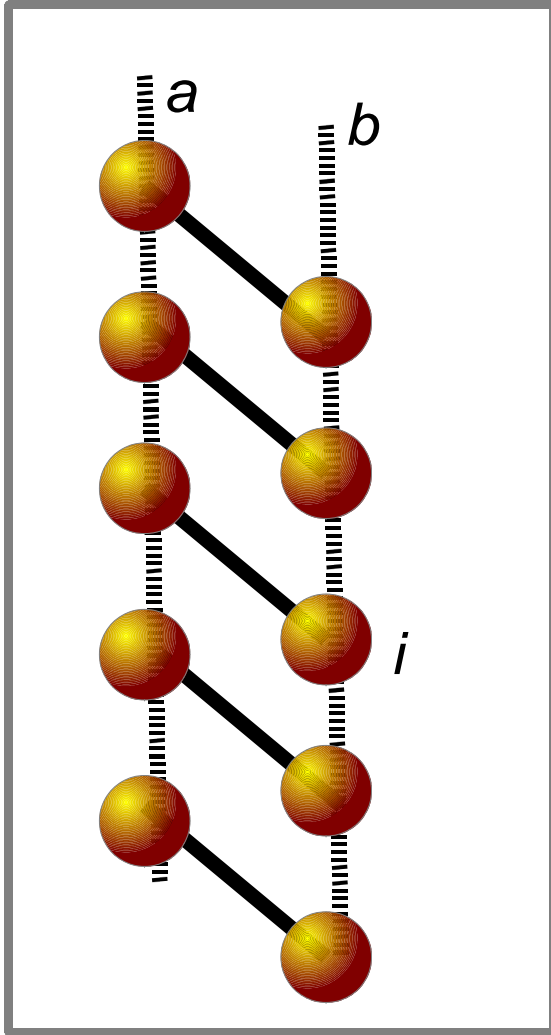


$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{\text{rung}} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i,b} + J_{\text{leg}} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i+1,a} + J_{\text{leg}} \hat{S}_{i,b} \hat{S}_{i+1,b} \right)$$

Слева: фрагмент структуры "спиновая лестница" $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N}_2)_2\text{CuBr}_4$. молекулы $\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N}_2$ не показаны для ясности.

Справа: кристалл $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N}_2)_2\text{CuBr}_4$ с естественной огранкой

Элементарные возбуждения в пределе "сильной связи": слабое поле



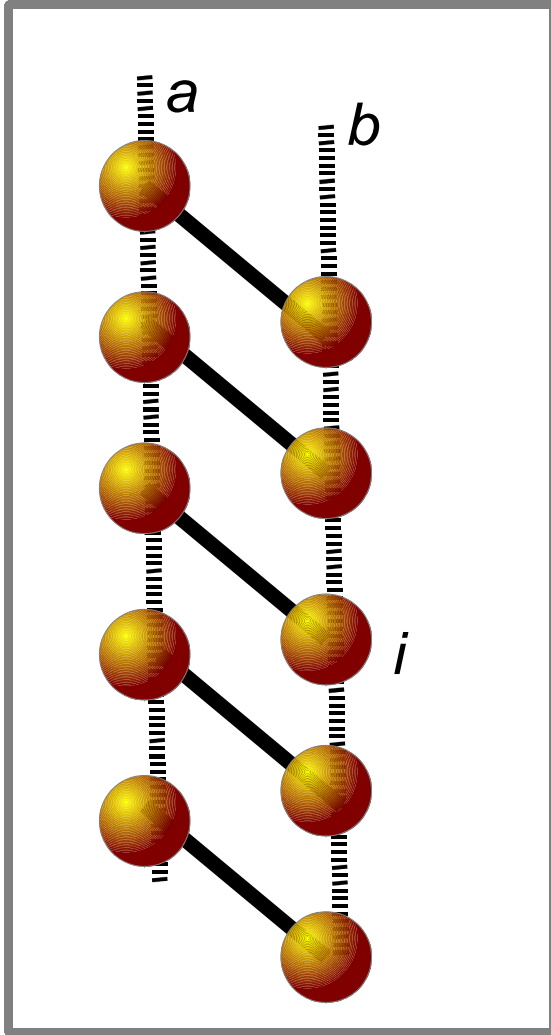
для одного димера

$$|\emptyset\rangle_i = \frac{|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle}{\sqrt{2}}, \quad E_{\emptyset} = -\frac{3J_{rung}}{4}$$

$$|1\rangle_i = |\uparrow\uparrow\rangle, \quad E_1 = \frac{J_{rung}}{4}$$

$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{\vec{S}}_{i,a} \hat{\vec{S}}_{i,b} + J_{leg} \hat{\vec{S}}_{i,a} \hat{\vec{S}}_{i+1,a} + J_{leg} \hat{\vec{S}}_{i,b} \hat{\vec{S}}_{i+1,b} \right)$$

Элементарные возбуждения в пределе "сильной связи": слабое поле



для одного димера

$$|\emptyset\rangle_i = \frac{|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle}{\sqrt{2}}, \quad E_{\emptyset} = -\frac{3J_{rung}}{4}$$

$$|1\rangle_i = |\uparrow\uparrow\rangle, \quad E_1 = \frac{J_{rung}}{4}$$

Связанные димеры

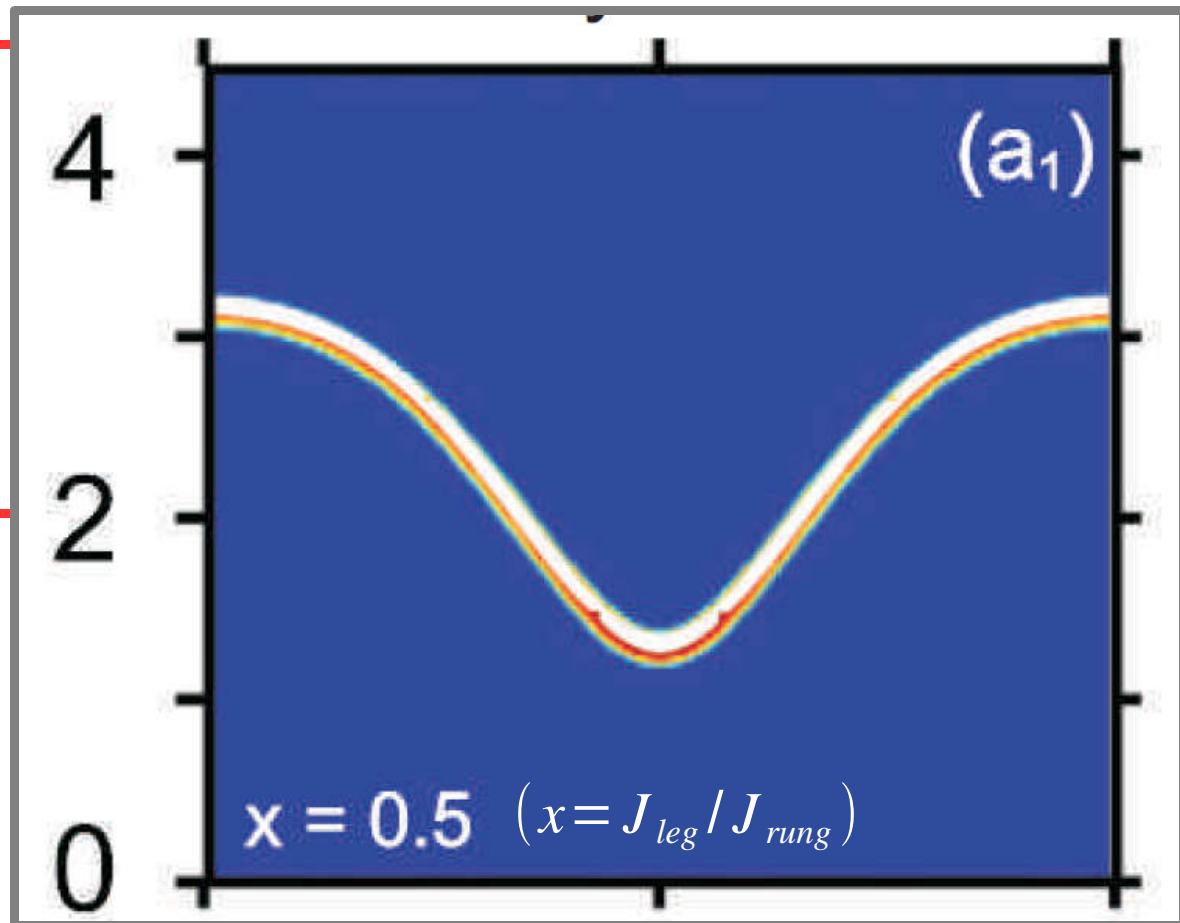
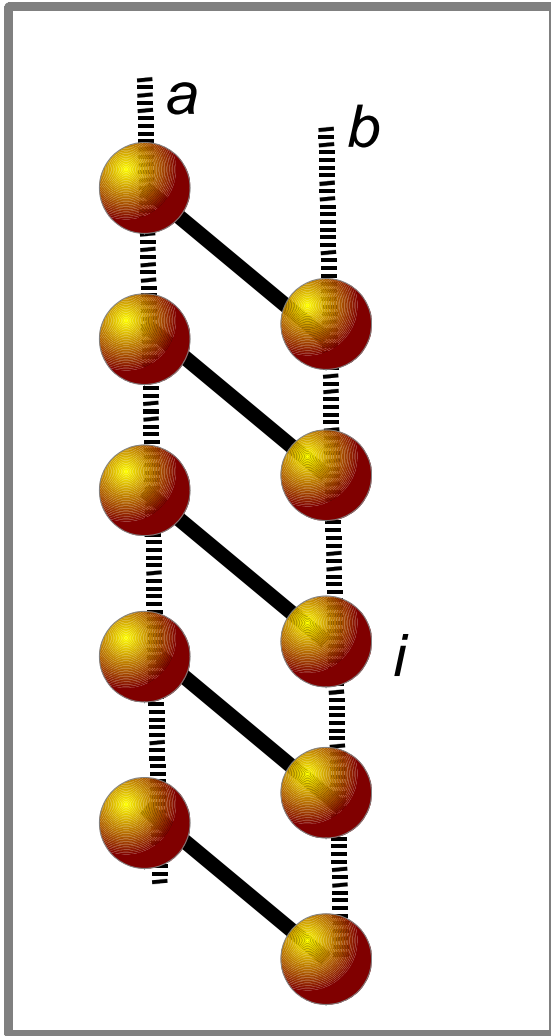
$$\Psi^{(0)} = |\dots \emptyset \emptyset \emptyset \emptyset \emptyset \emptyset \emptyset \emptyset \rangle$$

$$\Psi_j^{(1)} = |\dots \emptyset \emptyset 1_j \emptyset \emptyset \emptyset \emptyset \emptyset \rangle$$

$$\Psi_k^{(1)} = \sum_i \Psi_j^{(1)} e^{ikx_j}$$

$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{\vec{S}}_{i,a} \hat{\vec{S}}_{i,b} + J_{leg} \hat{\vec{S}}_{i,a} \hat{\vec{S}}_{i+1,a} + J_{leg} \hat{\vec{S}}_{i,b} \hat{\vec{S}}_{i+1,b} \right)$$

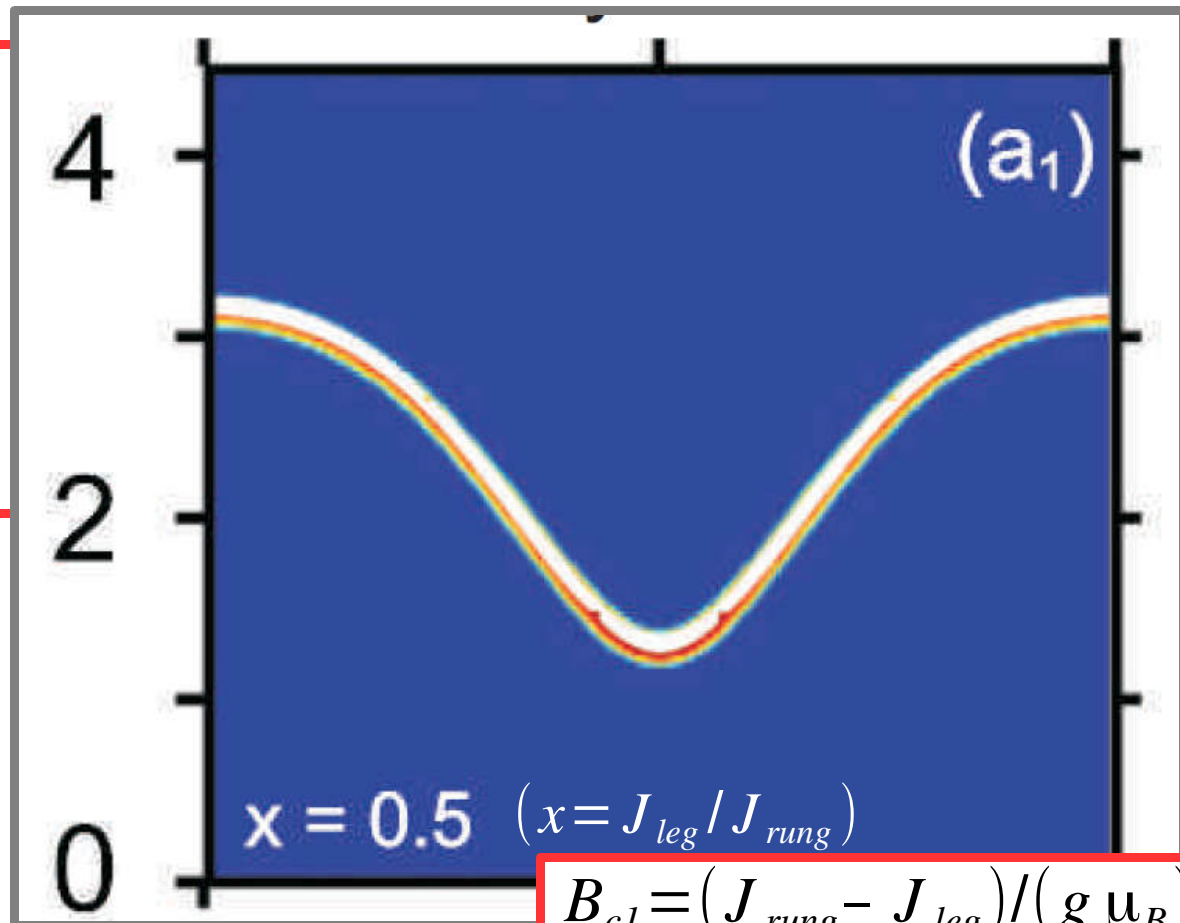
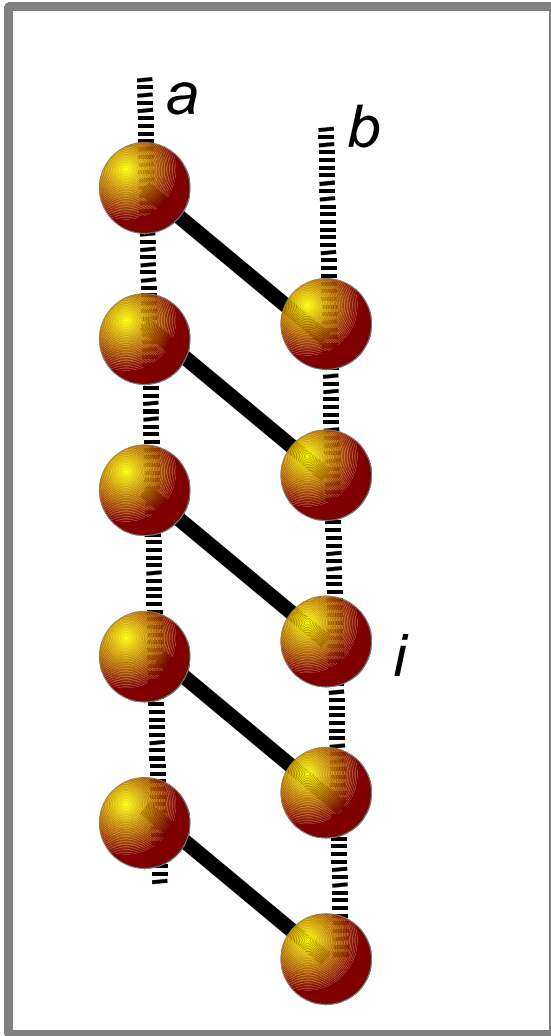
Элементарные возбуждения в пределе "сильной связи": слабое поле



$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i,b} + J_{leg} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i+1,a} + J_{leg} S_{i,b} S_{i+1,b} \right)$$

$$\varepsilon(k) = J_{rung} + J_{leg} \cos(ka) - g \mu_B B$$

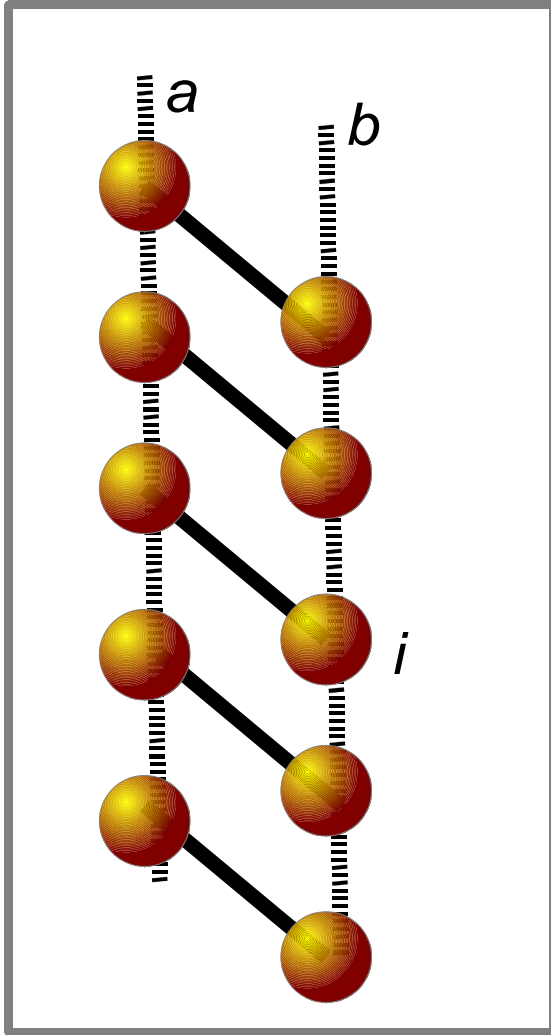
Элементарные возбуждения в пределе "сильной связи": слабое поле



$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i,b} + J_{leg} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i+1,a} + J_{leg} S_{i,b} S_{i+1,b} \right)$$

$$\varepsilon(k) = J_{rung} + J_{leg} \cos(ka) - g \mu_B B$$

Элементарные возбуждения в пределе "сильной связи": сильное поле



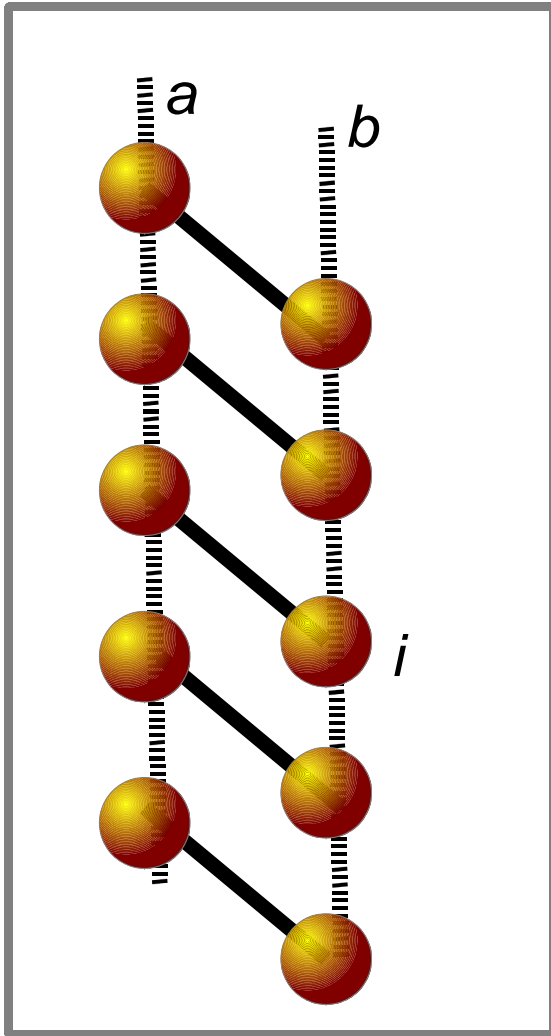
для одного димера

$$|1\rangle_i = |\uparrow \uparrow\rangle, \quad E_1 = \frac{J_{rung}}{4} - g \mu_B B$$

$$|\emptyset\rangle_i = \frac{|\uparrow \downarrow\rangle - |\downarrow \uparrow\rangle}{\sqrt{2}}, \quad E_\emptyset = -\frac{3J_{rung}}{4}$$

$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{\vec{S}}_{i,a} \hat{\vec{S}}_{i,b} + J_{leg} \hat{\vec{S}}_{i,a} \hat{\vec{S}}_{i+1,a} + J_{leg} \hat{\vec{S}}_{i,b} \hat{\vec{S}}_{i+1,b} - g \mu_B B (\hat{S}_{i,a}^z + \hat{S}_{i,b}^z) \right)$$

Элементарные возбуждения в пределе "сильной связи": сильное поле



для одного димера

$$|1\rangle_i = |\uparrow \uparrow\rangle, \quad E_1 = \frac{J_{rung}}{4} - g \mu_B B$$

$$|\emptyset\rangle_i = \frac{|\uparrow \downarrow\rangle - |\downarrow \uparrow\rangle}{\sqrt{2}}, \quad E_\emptyset = -\frac{3J_{rung}}{4}$$

Связанные димеры

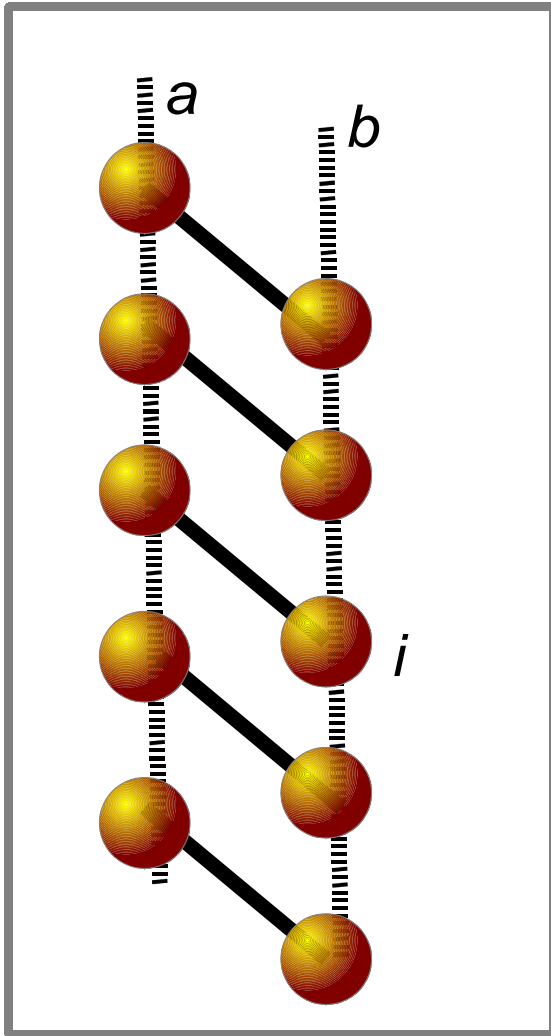
$$\Psi^{(0)} = |\dots 1111111111\rangle$$

$$\Psi_j^{(1)} = |\dots 111111 \emptyset_j 111111111111\rangle$$

$$\Psi_k^{(1)} = \sum_i \Psi_j^{(1)} e^{ikx_j}$$

$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{\vec{S}}_{i,a} \hat{\vec{S}}_{i,b} + J_{leg} \hat{\vec{S}}_{i,a} \hat{\vec{S}}_{i+1,a} + J_{leg} \hat{\vec{S}}_{i,b} \hat{\vec{S}}_{i+1,b} - g \mu_B B (\hat{S}_{i,a}^z + \hat{S}_{i,b}^z) \right)$$

Элементарные возбуждения в пределе "сильной связи": сильное поле



для одного димера

$$|1\rangle_i = |\uparrow \uparrow\rangle, \quad E_1 = \frac{J_{rung}}{4} - g \mu_B B$$

$$|\emptyset\rangle_i = \frac{|\uparrow \downarrow\rangle - |\downarrow \uparrow\rangle}{\sqrt{2}}, \quad E_\emptyset = -\frac{3J_{rung}}{4}$$

Связанные димеры

$$\Psi^{(0)} = |\dots 1111111111\rangle$$

$$\Psi_j^{(1)} = |\dots 111111 \emptyset_j 111111111111\rangle$$

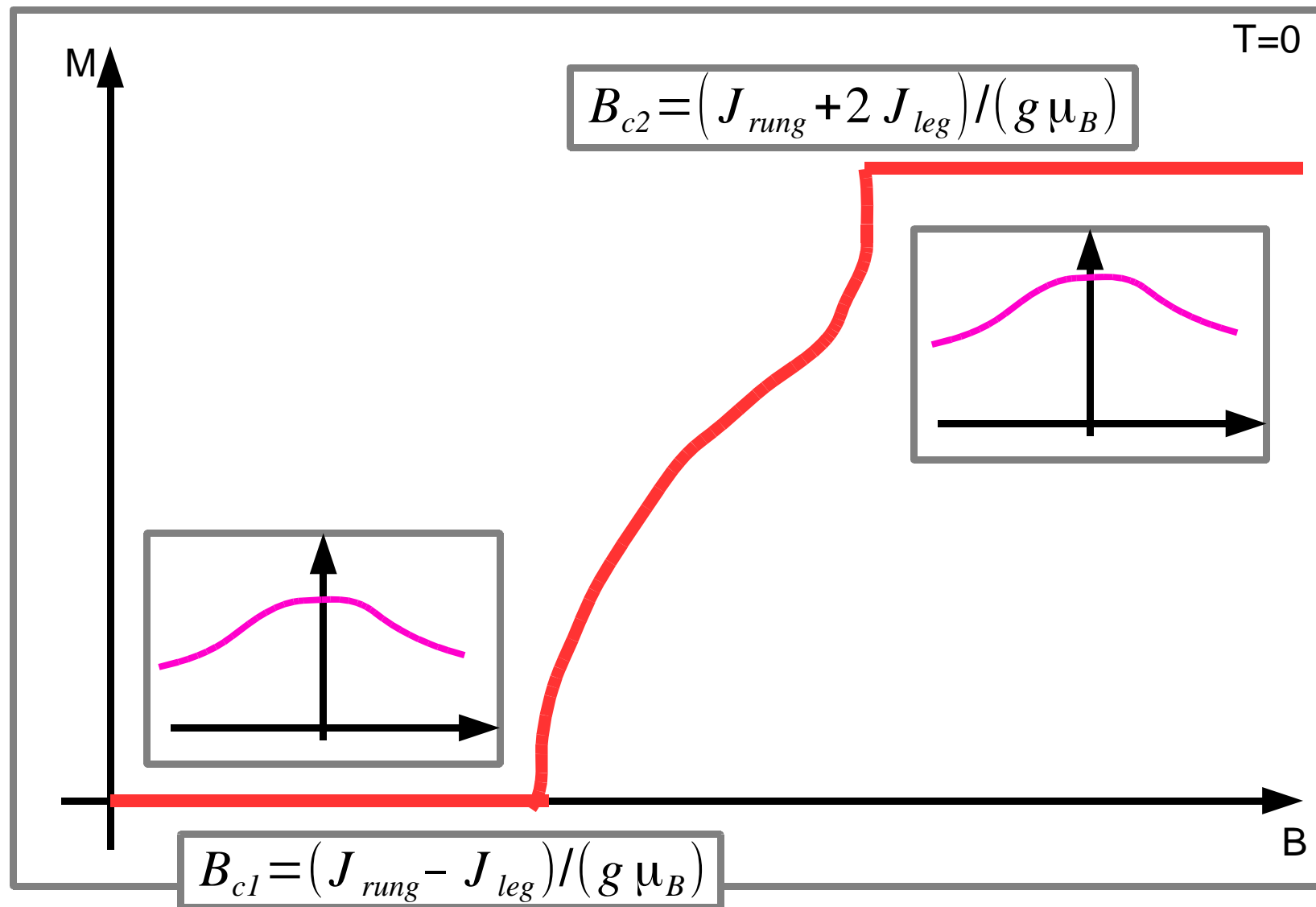
$$\Psi_k^{(1)} = \sum_i \Psi_j^{(1)} e^{ikx_j}$$

$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i,b} + J_{leg} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i+1,a} \right)$$

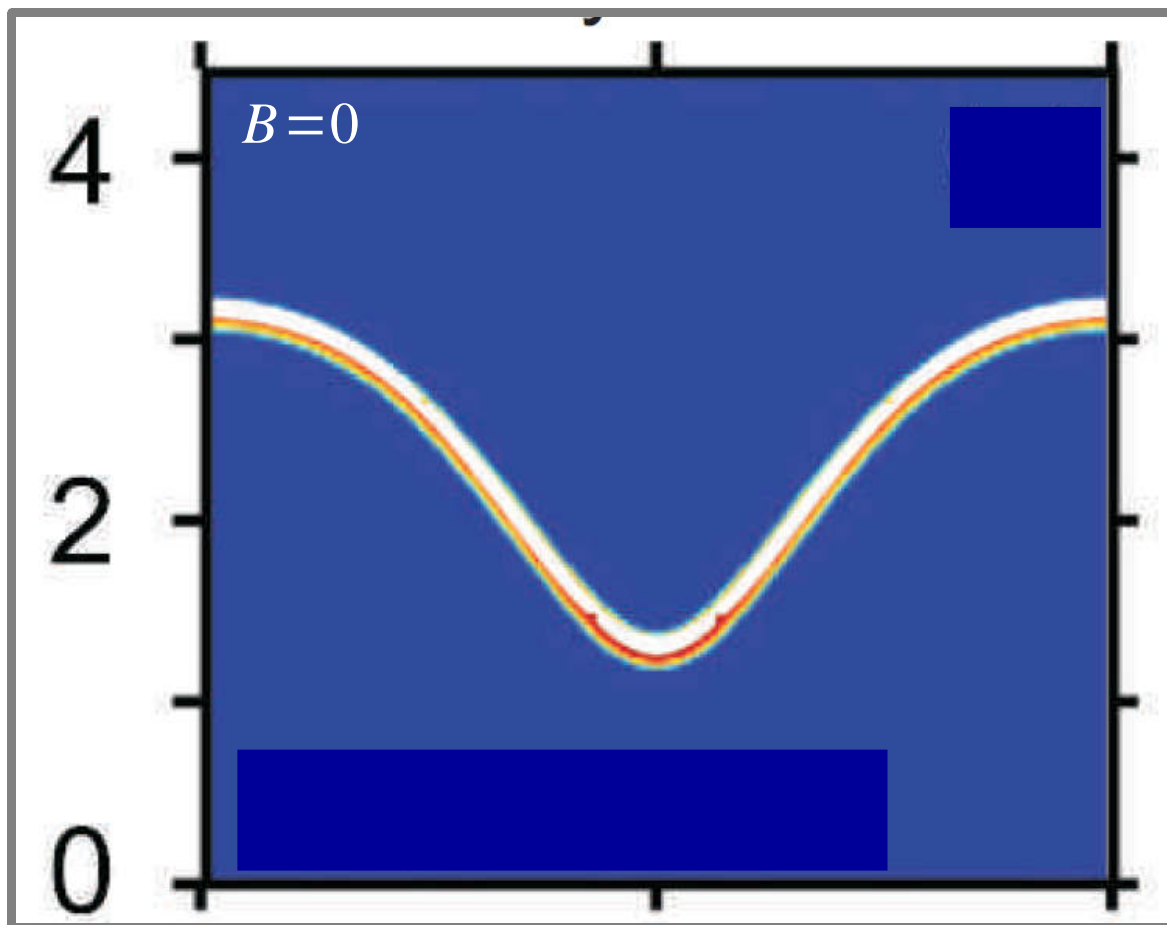
$$\varepsilon(k) = g \mu_B B - \left[J_{rung} + J_{leg} (\cos(ka) - 1) \right]$$

$$B_{c2} = (J_{rung} + 2J_{leg}) / (g \mu_B)$$

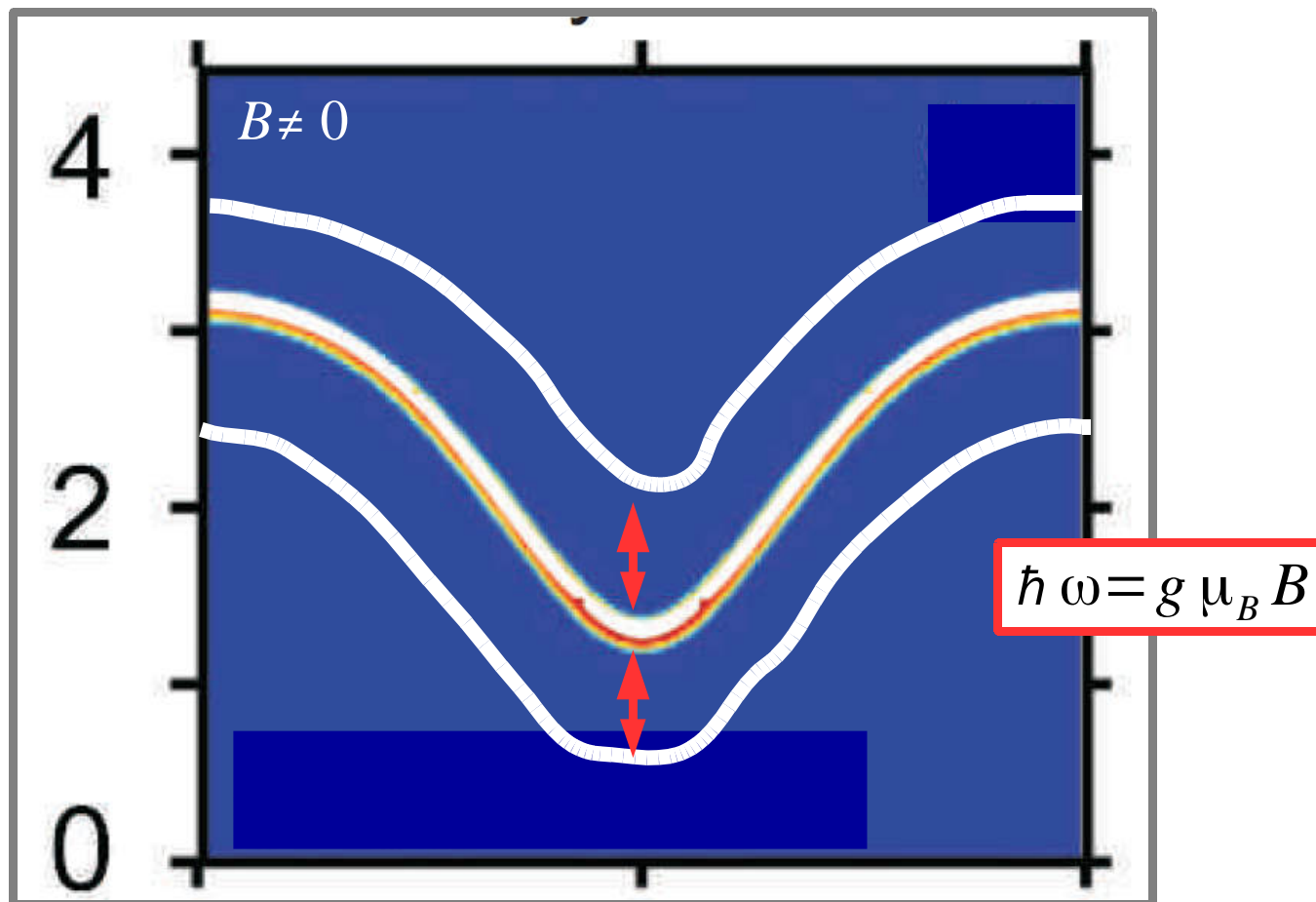
Процесс намагничивания "спиновой лестницы"



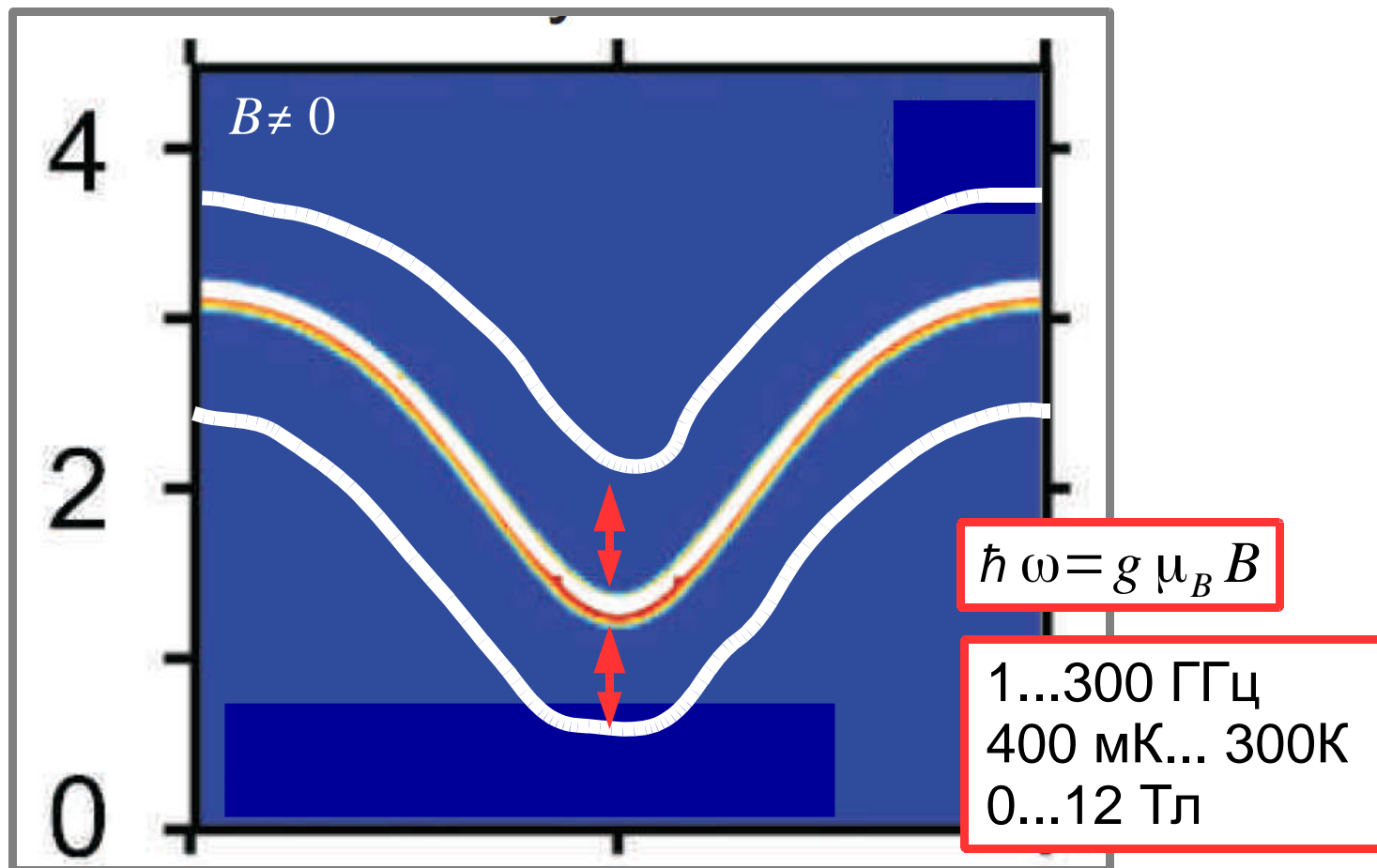
Что может увидеть экспериментатор при
помощи ЭТР?



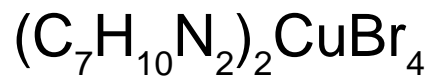
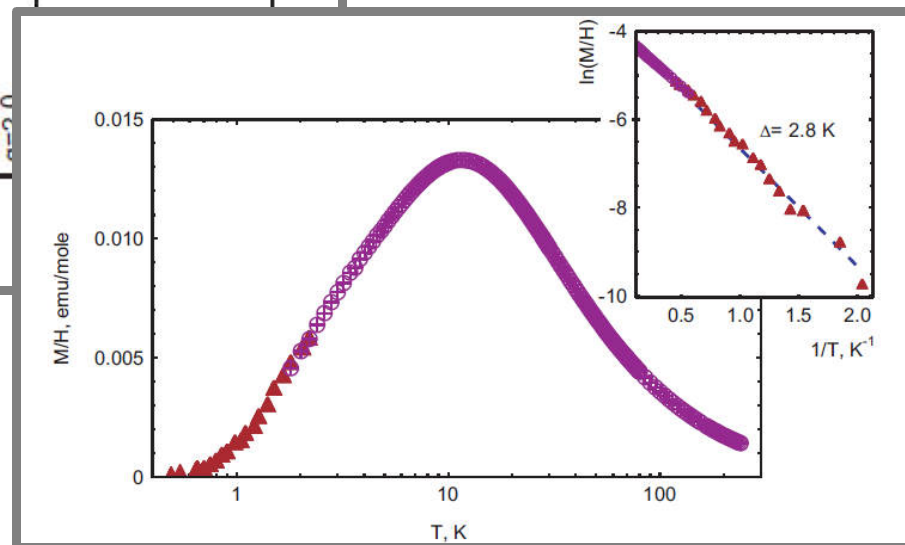
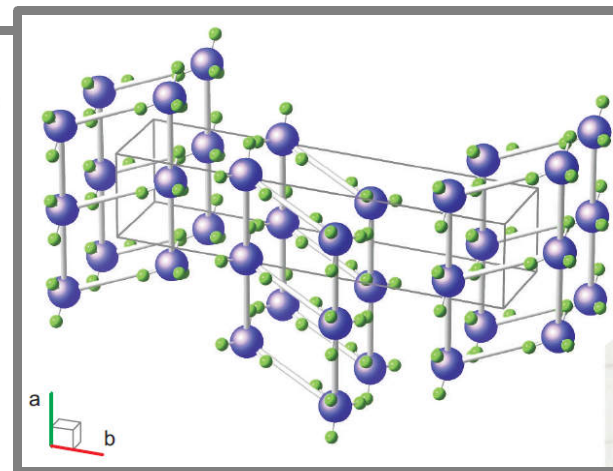
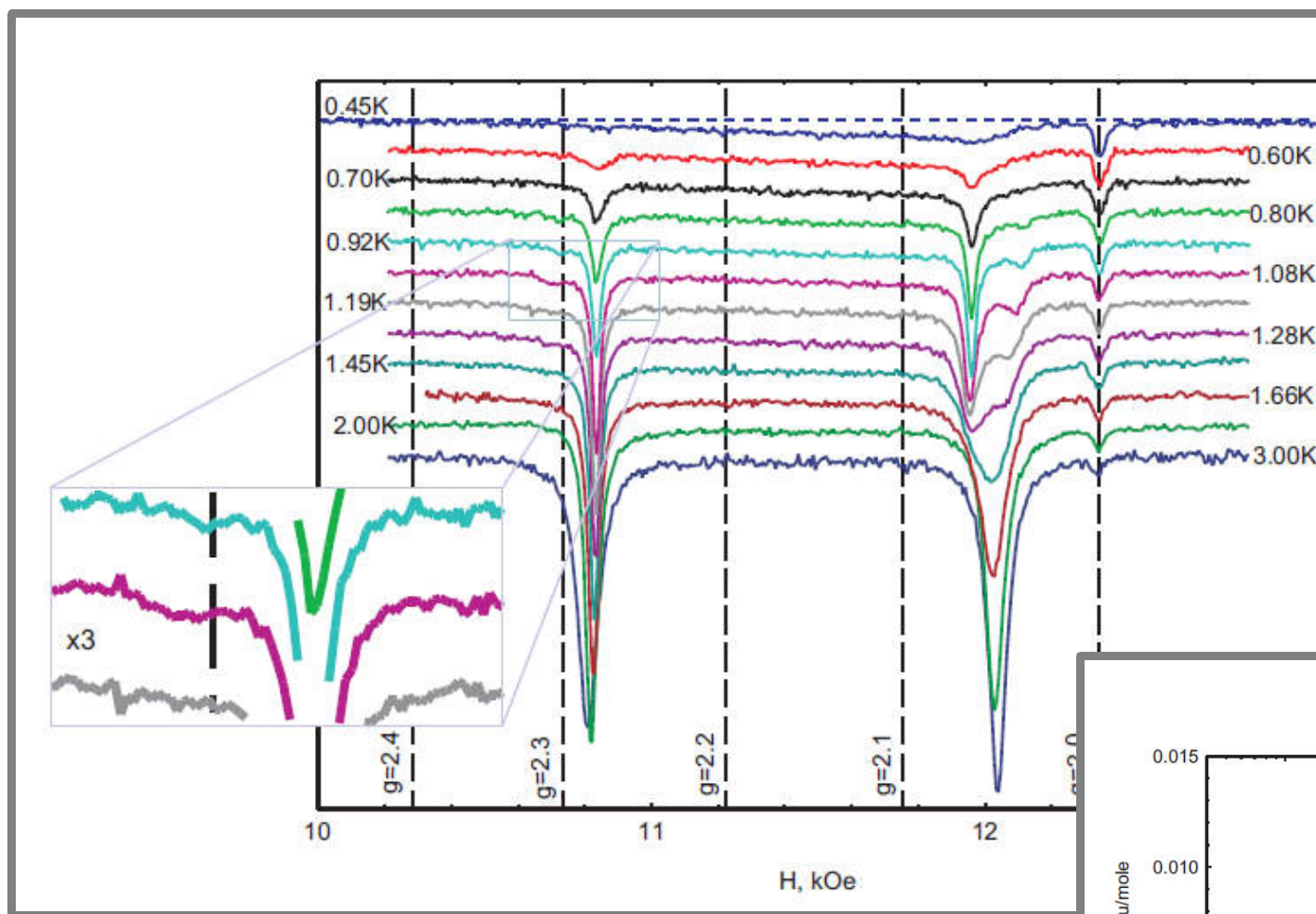
Что может увидеть экспериментатор при
помощи ЭПР?



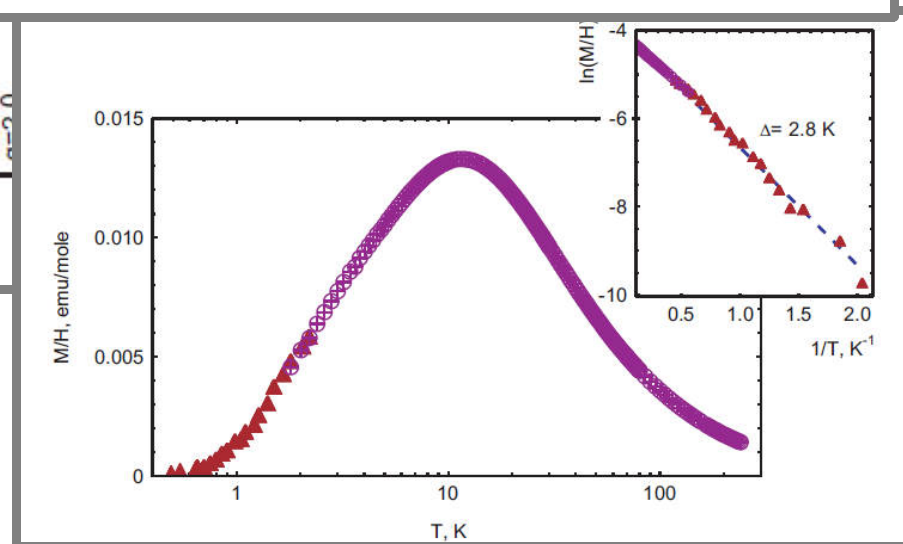
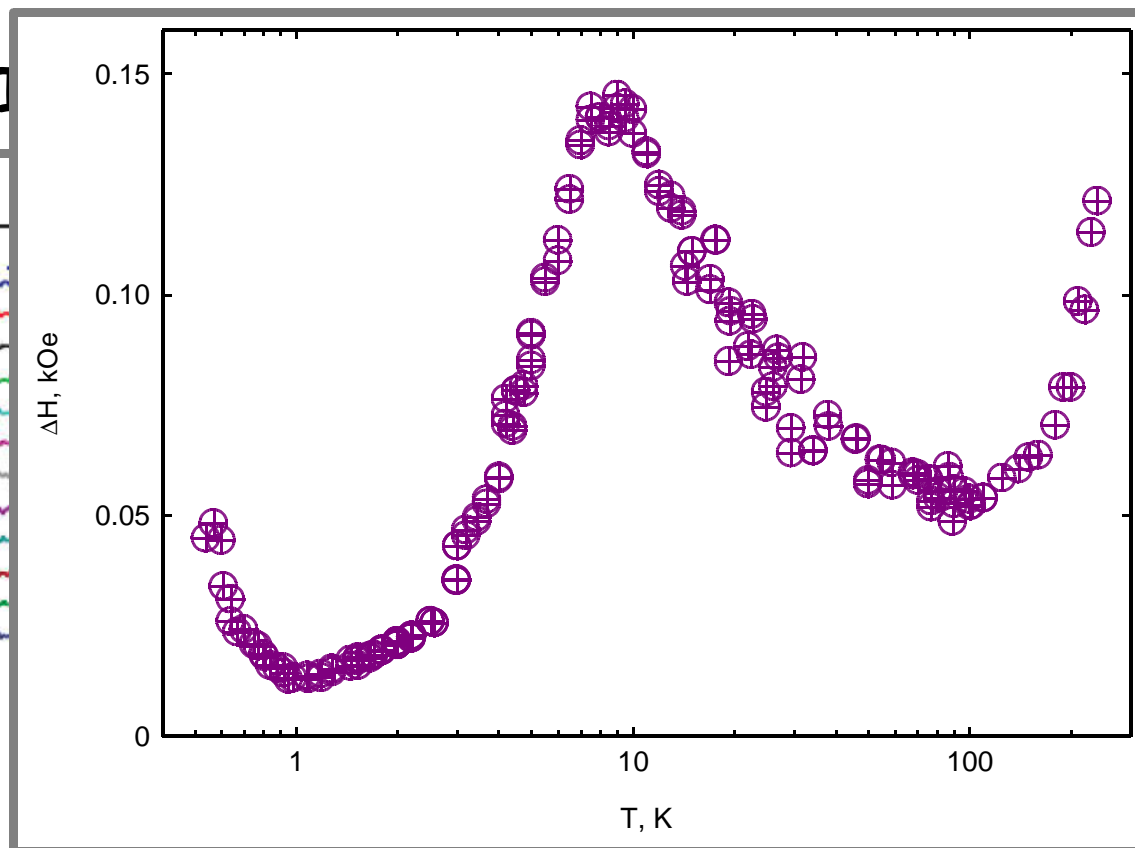
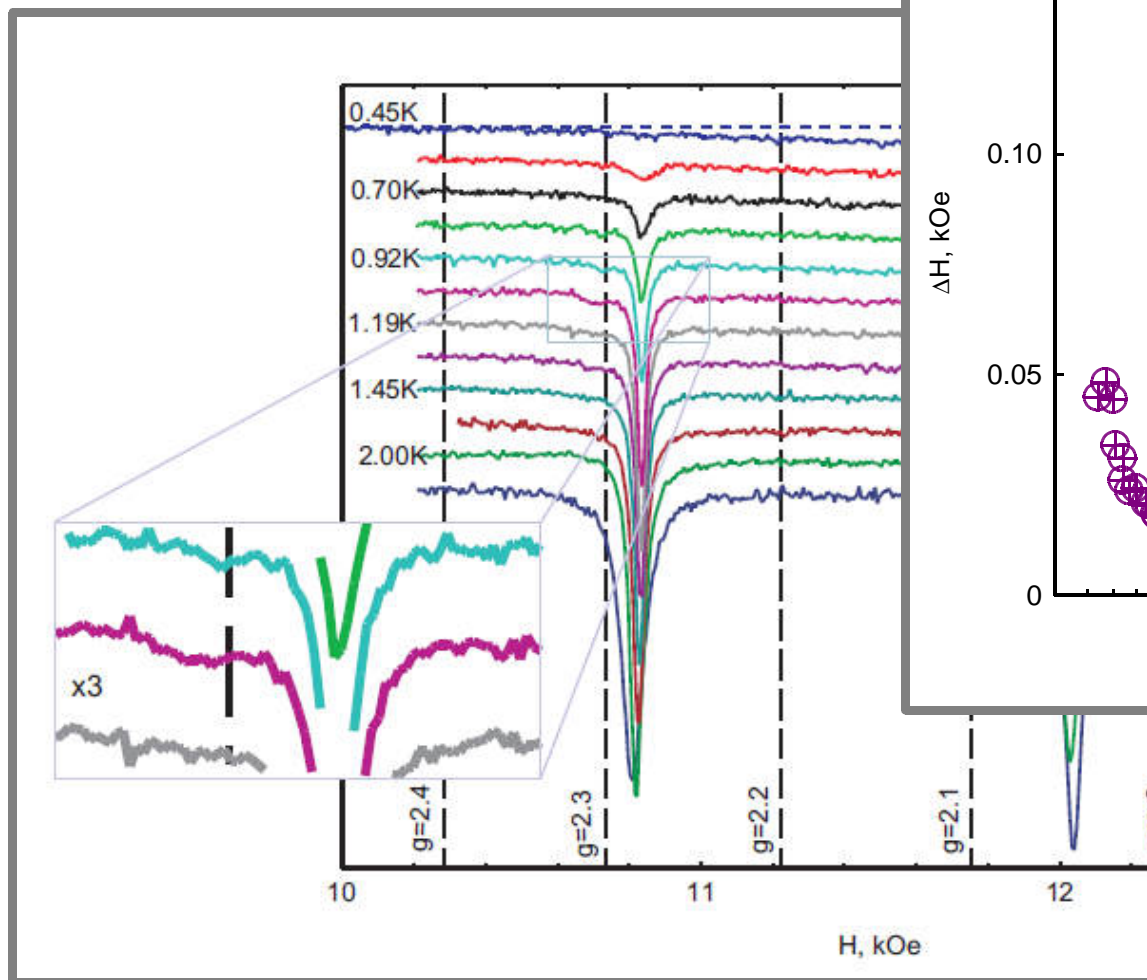
Что может увидеть экспериментатор при
помощи ЭПР?



Результаты в малых полях

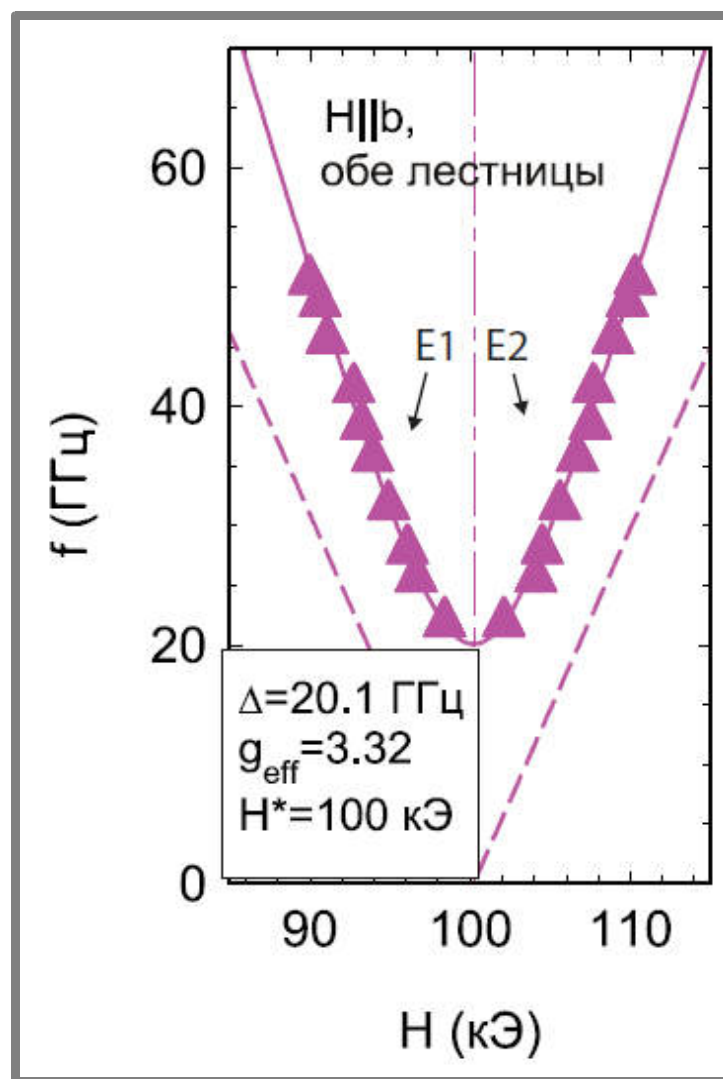
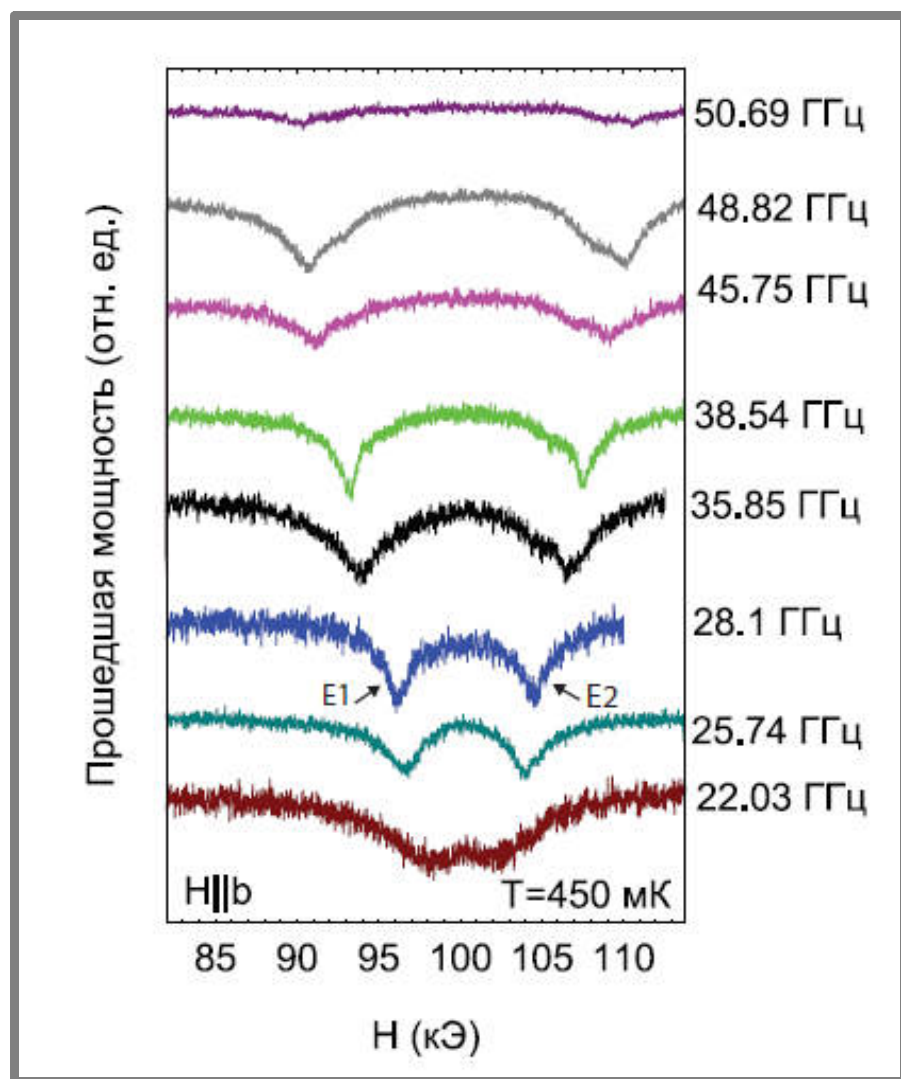


Результаты

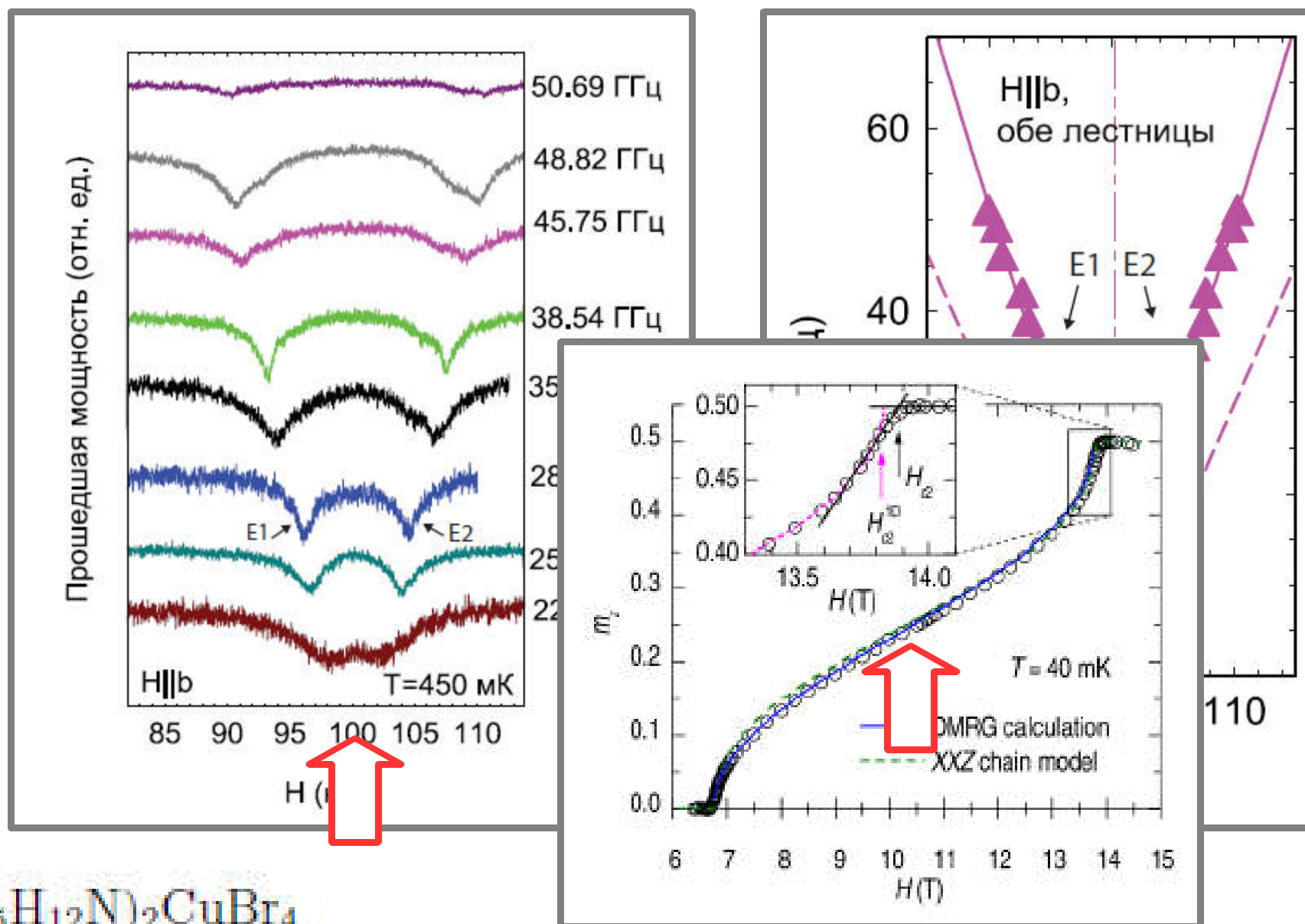


V.N. Glazkov, M. Fayzullin, Yu. Krasnikova, G. Skoblin, D.Schmidiger, A.Zheludev, "ESR study of the spin ladder with uniform Dzyaloshinskii-Moriya interaction", Physical Review B 92, 184403 (2015)

Неожиданный сигнал ЭПР в сильных полях



Неожиданный сигнал ЭПР в сильных полях

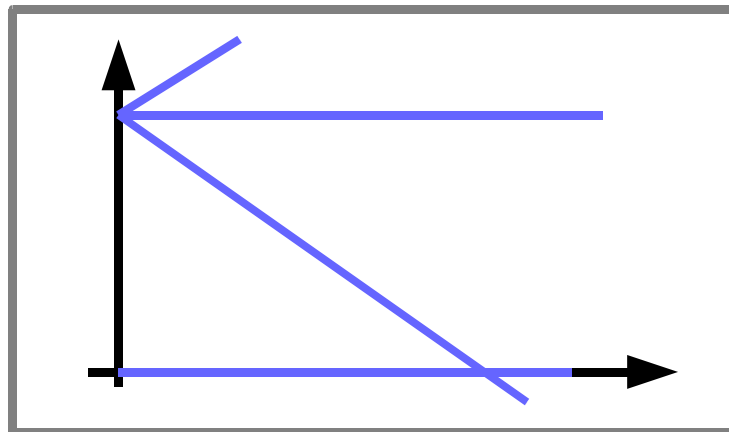


Эффективный гамильтониан

$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i,b} + J_{leg} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i+1,a} + J_{leg} \hat{S}_{i,b} \hat{S}_{i+1,b} - g \mu_B B (\hat{S}_{i,a}^z + \hat{S}_{i,b}^z) \right)$$

$$B_{c1} = (J_{rung} - J_{leg}) / (g \mu_B)$$

$$B_{c2} = (J_{rung} + 2 J_{leg}) / (g \mu_B)$$

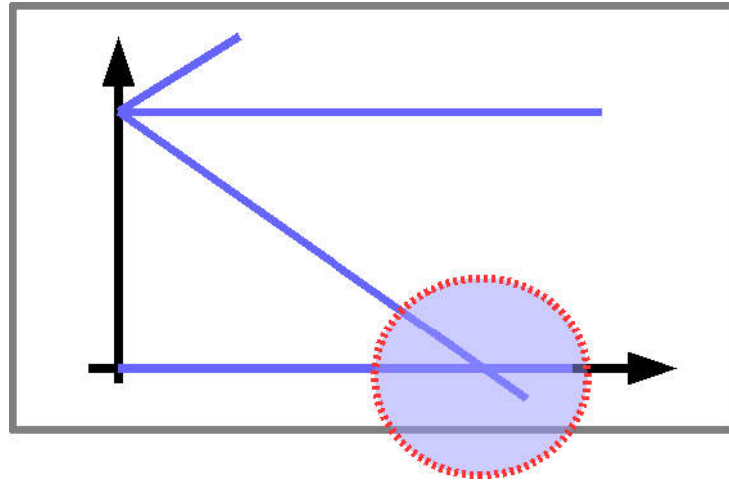


Эффективный гамильтониан

$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i,b} + J_{leg} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i+1,a} + J_{leg} \hat{S}_{i,b} \hat{S}_{i+1,b} - g \mu_B B (\hat{S}_{i,a}^z + \hat{S}_{i,b}^z) \right)$$

$$B_{c1} = (J_{rung} - J_{leg}) / (g \mu_B)$$

$$B_{c2} = (J_{rung} + 2 J_{leg}) / (g \mu_B)$$



$$\hat{H} = J_{leg} \sum_j \left(T_j^x T_{j+1}^x + T_j^y T_{j+1}^y + \frac{1}{2} T_j^z T_{j+1}^z \right) - \left(g \mu_B B - \left[J_{rung} + \frac{J_{leg}}{2} \right] \right) \sum_j T_j^z$$

Почему щель?

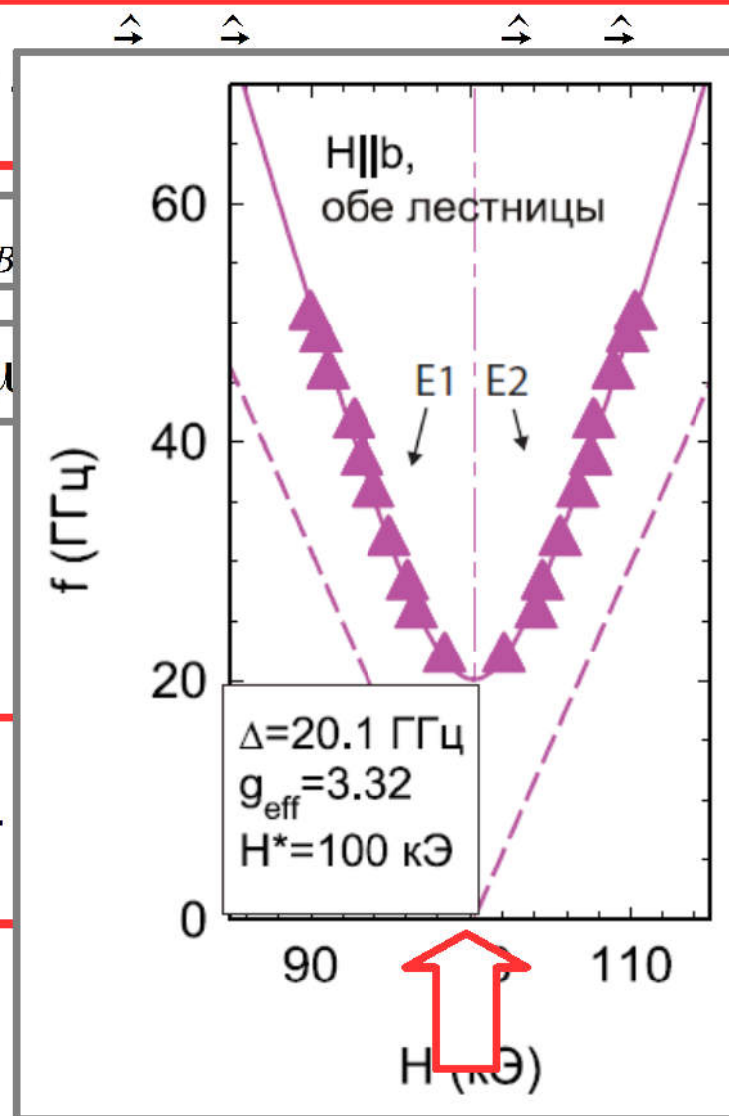
$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i,b} + \dots - g\mu_B B (\hat{S}_{i,a}^z + \hat{S}_{i,b}^z) \right)$$

$$B_{c1} = (J_{rung} - J_{leg}) / (g\mu_B)$$

$$B_{c2} = (J_{rung} + 2J_{leg}) / (g\mu_B)$$

$$\hat{H} = J_{leg} \sum_j \left(T_j^x T_{j+1}^x + \dots \right)$$

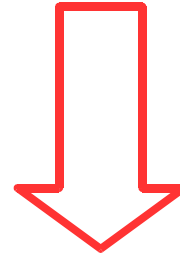
$$\left[J_{rung} + \frac{J_{leg}}{2} \right] \sum_j T_j^z$$



Анизотропные взаимодействия

$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i,b} + J_{leg} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i+1,a} + J_{leg} \hat{S}_{i,b} \hat{S}_{i+1,b} - g \mu_B B (\hat{S}_{i,a}^z + \hat{S}_{i,b}^z) \right)$$

$$\hat{H}_{DM} = \vec{D} \sum_j \left([\hat{S}_{j,a} \times \hat{S}_{j+1,a}] - [\hat{S}_{j,b} \times \hat{S}_{j+1,b}] \right), \quad \vec{D} = (D_x, 0, D_z)$$

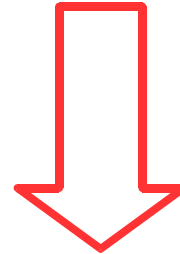


Упорядочение x-компоненты
псевдоспина

Анизотропные взаимодействия

$$\hat{H} = \sum_i \left(J_{rung} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i,b} + J_{leg} \hat{S}_{i,a} \hat{S}_{i+1,a} + J_{leg} \hat{S}_{i,b} \hat{S}_{i+1,b} - g \mu_B B (\hat{S}_{i,a}^z + \hat{S}_{i,b}^z) \right)$$

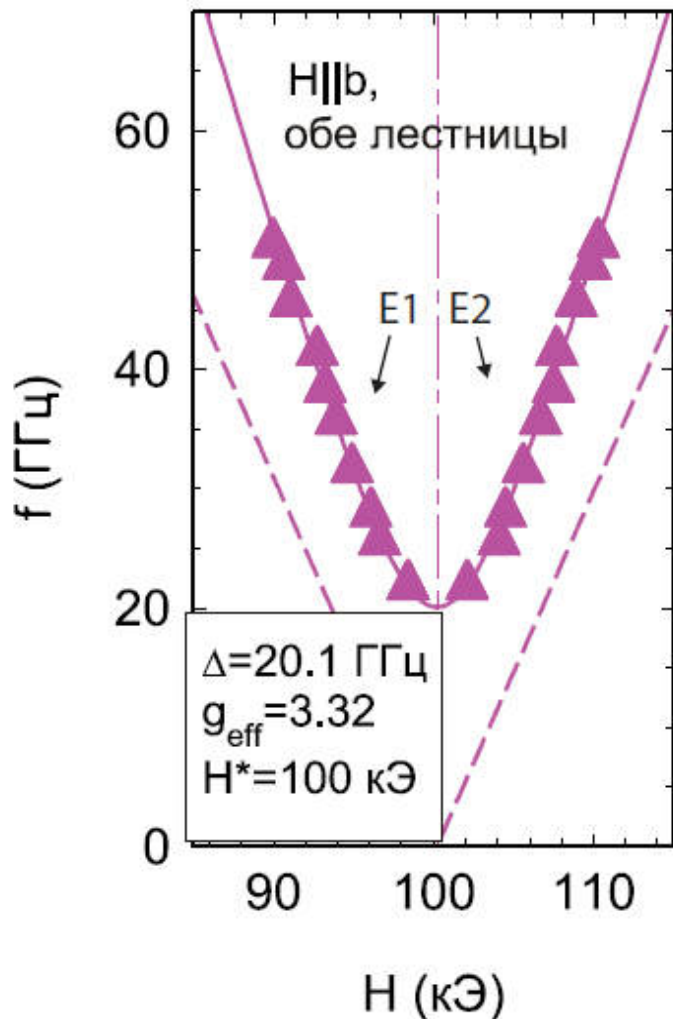
$$\hat{H}_{DM} = \vec{D} \sum_j \left([\hat{S}_{j,a} \times \hat{S}_{j+1,a}] - [\hat{S}_{j,b} \times \hat{S}_{j+1,b}] \right), \quad \vec{D} = (D_x, 0, D_z)$$



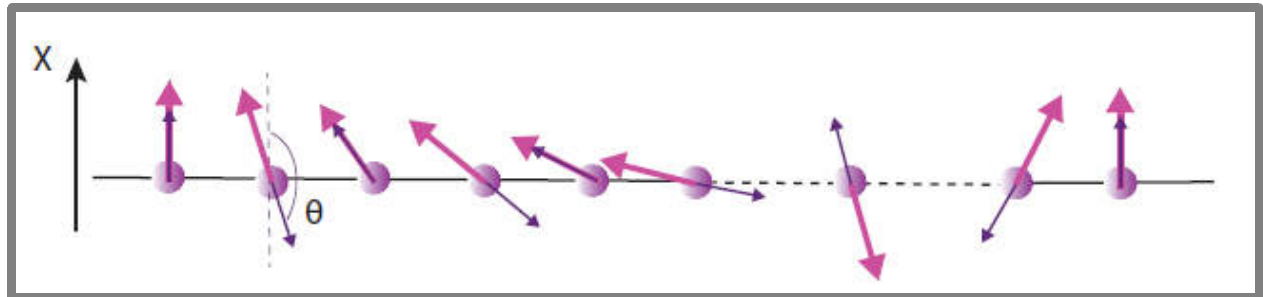
Упорядочение x-компоненты
псевдоспина

$$\left. \begin{aligned} |T_x = 1/2\rangle &= (|1\rangle + |\emptyset\rangle) / \sqrt{2} \\ |T_x = -1/2\rangle &= (|1\rangle - |\emptyset\rangle) / \sqrt{2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow (|1\rangle + e^{i\Theta} |\emptyset\rangle) / \sqrt{2}$$

Солитонное возбуждение высокополе- вой фазы "спиновой лестницы"



Yu.V. Krasnikova, S.C. Furuya, V.N. Glazkov, K.Yu. Povarov, D. Blosser, and A. Zheludev, "Anisotropy-induced soliton excitation in magnetized strong-rung spin ladders", Physical Review Letters **125**, 027204 (2020)



$$\left. \begin{aligned} |1/2\rangle &= (|1\rangle + |\emptyset\rangle) / \sqrt{2} \\ |-1/2\rangle &= (|1\rangle - |\emptyset\rangle) / \sqrt{2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow (|1\rangle + e^{i\Theta} |\emptyset\rangle) / \sqrt{2}$$

