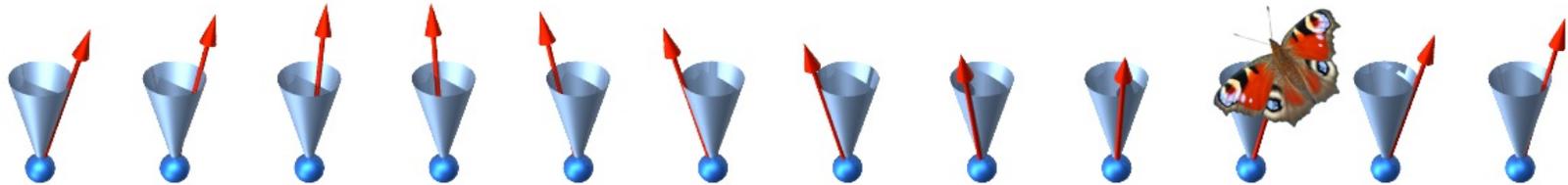


Необычные фермионы в одномерных антиферромагнетиках

К. Ю. Поваров



ETH

D-PHYS Laboratory for Solid State Physics

Neutron Scattering & Magnetism

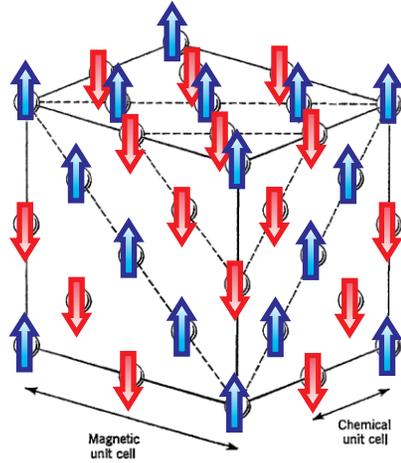
Приглашенная лекция в МФТИ

19 мая 2017

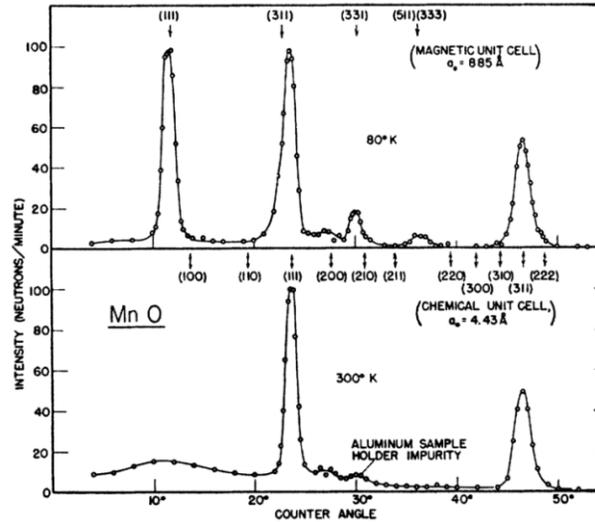
FNSNF

SWISS NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

Проблема антиферромагнетизма



L. Neel (1932)

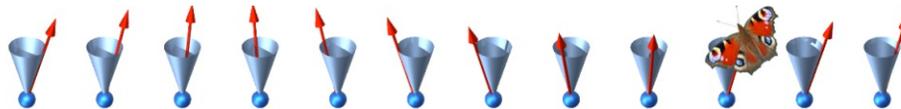


C. G. Shull (1949)

Теоретическая проблема:

Неелевское состояние **не является собственным** для обменного гамильтониана!

$$\hat{\mathcal{H}} = J_{ij} \sum_{\langle i, j \rangle} \hat{\mathbf{S}}_i \cdot \hat{\mathbf{S}}_j \quad \longleftrightarrow \quad \hat{\mathcal{H}} | \text{Neel state} \rangle \neq E | \text{Neel state} \rangle$$



Спиновые волны



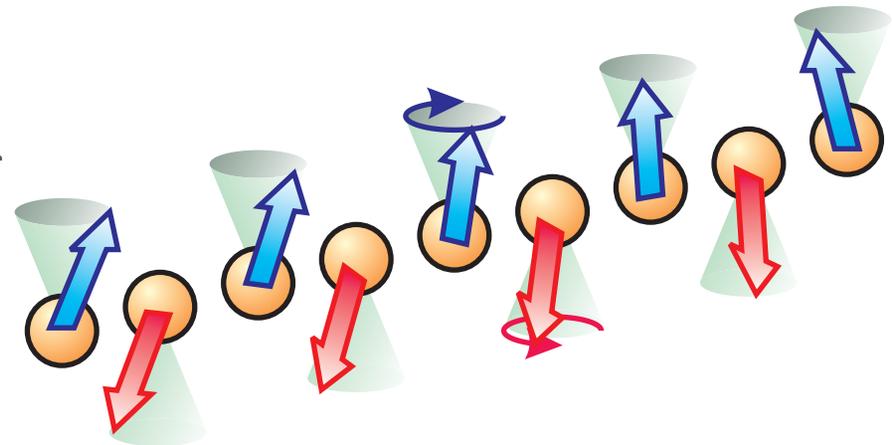
P. W. Anderson,
Phys. Rev. 86, 694 (1952)

Решение проблемы: спины
упорядочиваются не полностью

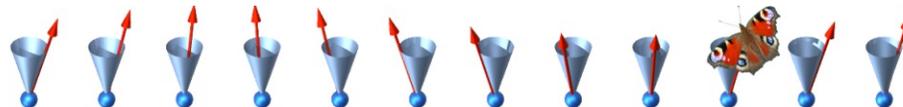


Часть магнитного момента
«съедена» квантовыми
флуктуациями,
т. е. спиновыми волнами
(бозоны!) при $T=0$.

$$S=1$$

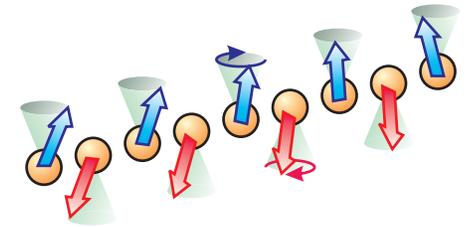


$$\omega(\mathbf{k}) \propto k$$



Инфракрасная катастрофа

$$\Delta S_D \propto \int_0^{k_{max}} \frac{d^D \mathbf{k}}{\omega(\mathbf{k})} \propto \int_0^{k_{max}} \frac{d^D \mathbf{k}}{k}$$

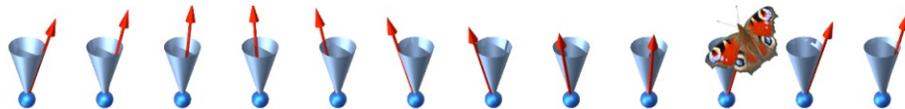


В двух- и трехмерном случае вычисление сходится

$$\Delta S_{D=2} \propto \int_0^{k_{max}} dk \quad \Delta S_{D=3} \propto \int_0^{k_{max}} k dk$$

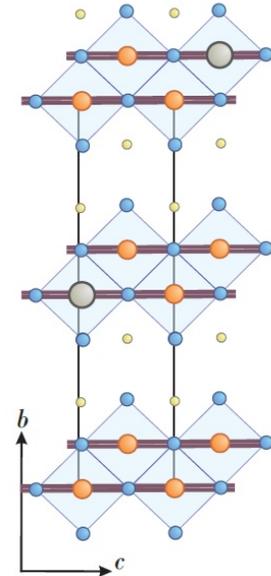
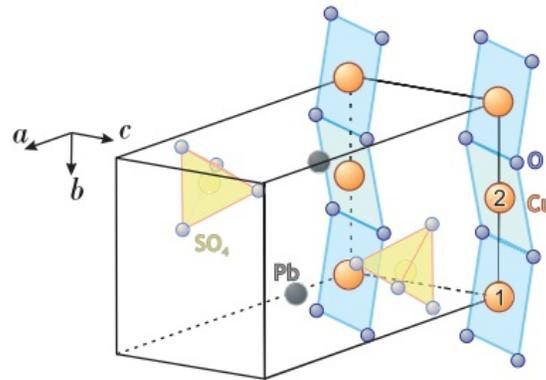
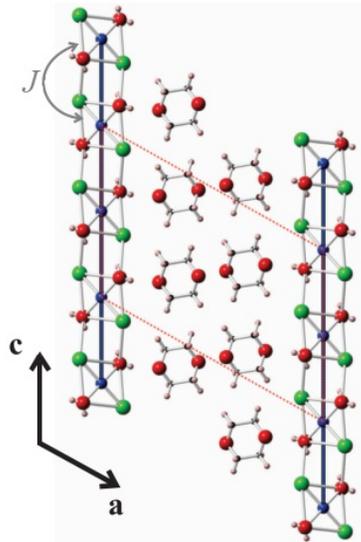
В одномерном случае - **инфракрасная катастрофа!**
Даже при $T=0$ магнитный порядок уничтожен.

$$\Delta S_{D=1} \propto \int_0^{k_{max}} \frac{dk}{k}$$



1D антиферромагнетики?

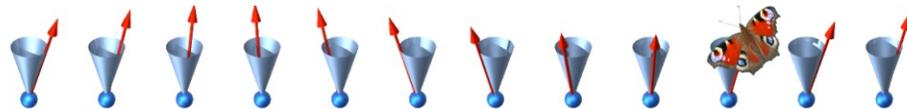
(квази)1D антиферромагнетики
действительно существуют



Упорядочение очень сильно подавлено, $T_N \ll J$

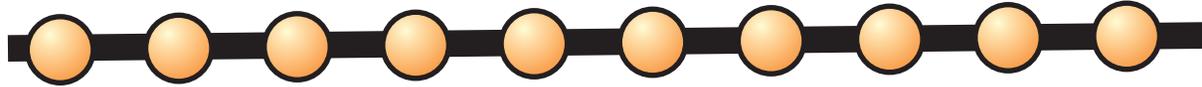
Но: сильные корреляции при $T < J$

Нам нужна теория 1D антиферромагнетика



Фермионный подход

Рассмотрим цепочечную XXZ модель ($S=1/2$)



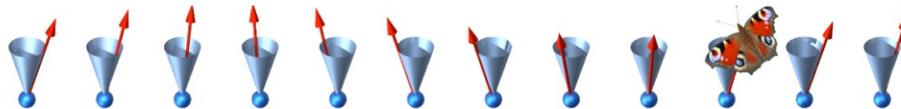
$$\hat{\mathcal{H}} = \sum_i \frac{J_{xy}}{2} (\hat{S}_i^+ \hat{S}_{i+1}^- + \hat{S}_i^- \hat{S}_{i+1}^+) + J_z \hat{S}_i^z \hat{S}_{i+1}^z$$

Попробуем сделать из спиновых операторов операторы квазичастиц...

$$\hat{c}_i^+ = \hat{S}_i^+, \quad \hat{c}_i = \hat{S}_i^-$$
$$\hat{S}_i^z = \hat{c}_i^+ \hat{c}_i - \frac{1}{2}$$

$$\{\hat{c}_i^+, \hat{c}_i\} = 1, \quad \{\hat{c}_i, \hat{c}_i\} = 0$$

коммутируют как фермионы!



Преобразование Йордана-Вигнера

Проблема: это не работает между узлами!

«Правильные» фермионы

Наши операторы

$$\{\hat{c}_i, \hat{c}_j\} = 0$$

$$[\hat{c}_i, \hat{c}_j] = 0$$

Нам необходима нелокальность!

Квазичастичные операторы

Обратное преобразование

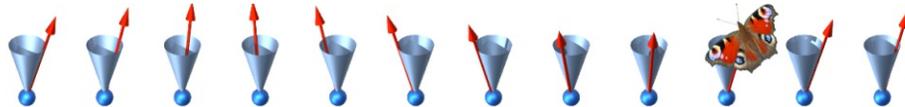
$$\hat{c}_i = \hat{S}_i^- \prod_{j<i} (-2\hat{S}_j^z)$$

$$\hat{S}_i^- = \hat{c}_i e^{-i\pi \sum_{j<i} \hat{c}_j^+ \hat{c}_j}$$

$$\hat{c}_i^+ = \hat{S}_i^+ \prod_{j<i} (-2\hat{S}_j^z)$$

$$\hat{S}_i^+ = \hat{c}_i^+ e^{i\pi \sum_{j<i} \hat{c}_j^+ \hat{c}_j}$$

P. Jordan, E. Wigner, Z. Phys. 47, 631 (1928)

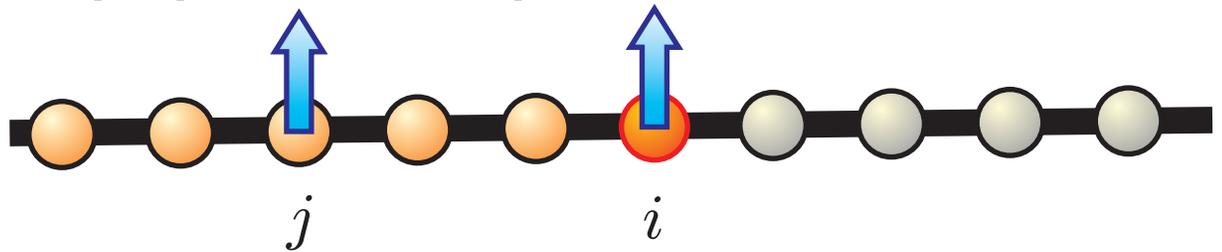


Преобразование Йордана-Вигнера

$$\hat{c}_i = \hat{S}_i^- \prod_{j < i} (-2\hat{S}_j^z)$$

$$\hat{c}_i^+ = \hat{S}_i^+ \prod_{j < i} (-2\hat{S}_j^z)$$

Информация про все спины слева

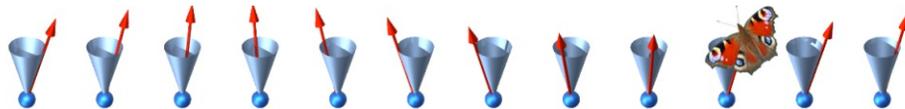


$$\{\hat{c}_i, \hat{c}_j\} = \hat{c}_i \hat{c}_j + \hat{c}_j \hat{c}_i$$

Один из них $(-1)^{N_\uparrow - 1}$ перевернули! $(-1)^{N_\uparrow}$

Теперь наши операторы коммутируют как фермионы!

$$\{\hat{c}_i^+, \hat{c}_j\} = \delta_{ij}, \quad \{\hat{c}_i, \hat{c}_j\} = 0$$



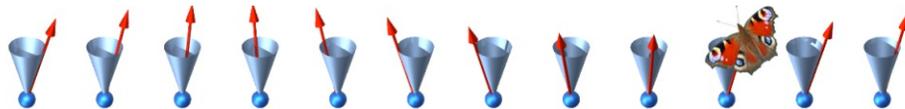
Фермионный гамильтониан

$$\hat{\mathcal{H}} = \sum_i \frac{J_{xy}}{2} (\hat{c}_i^+ \hat{c}_{i+1} + \hat{c}_i \hat{c}_{i+1}^+) + J_z (-\hat{c}_i^+ \hat{c}_i + \hat{c}_i^+ \hat{c}_i \hat{c}_{i+1}^+ \hat{c}_{i+1})$$

Свободные частицы Число частиц Взаимодействие

Абсолютно точное отображение

Без предположений об
основном состоянии!



Свободные фермионы

XУ-модель ($J_z=0$)

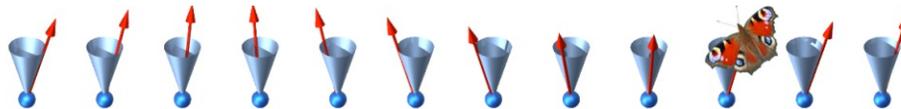
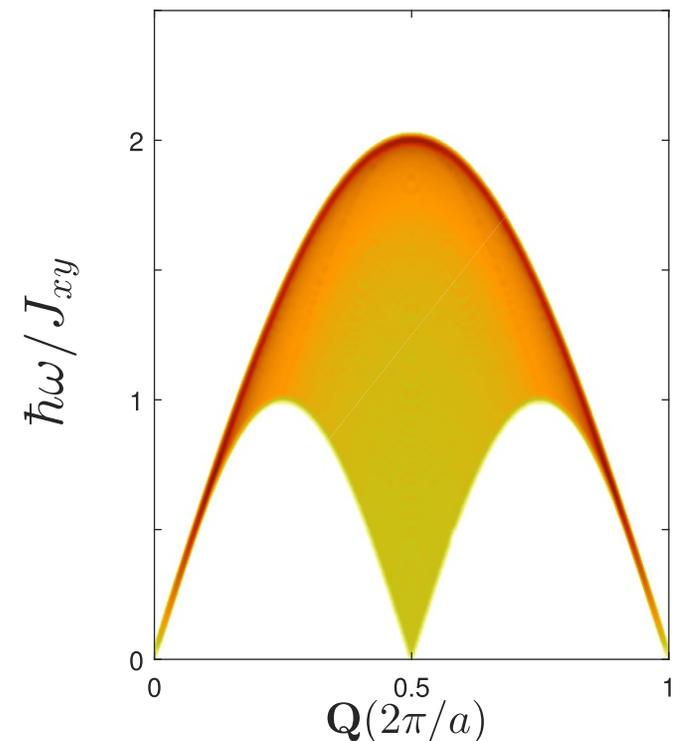
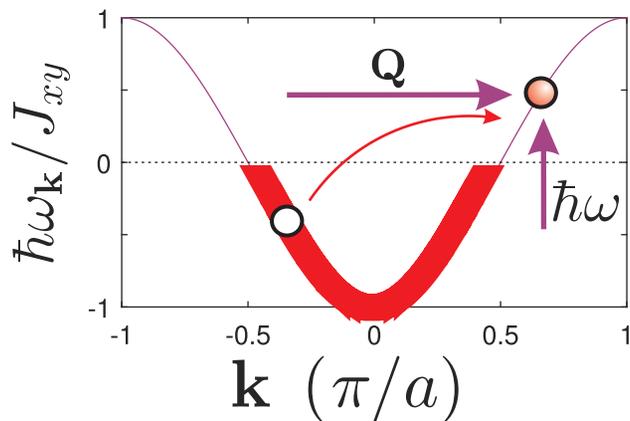
$$\hat{\mathcal{H}} = \frac{J_{xy}}{2} \sum_i \hat{c}_i^+ \hat{c}_{i+1} + \hat{c}_i \hat{c}_{i+1}^+$$

$$\hat{\mathcal{H}} = \sum_{\mathbf{k}} \hbar\omega_{\mathbf{k}} \hat{c}_{\mathbf{k}}^+ \hat{c}_{\mathbf{k}}$$

Свободные частицы

$$\hbar\omega_{\mathbf{k}} = -J_{xy} \cos(ka)$$

Мы возбуждаем фермионы парами (частица + дырка)!

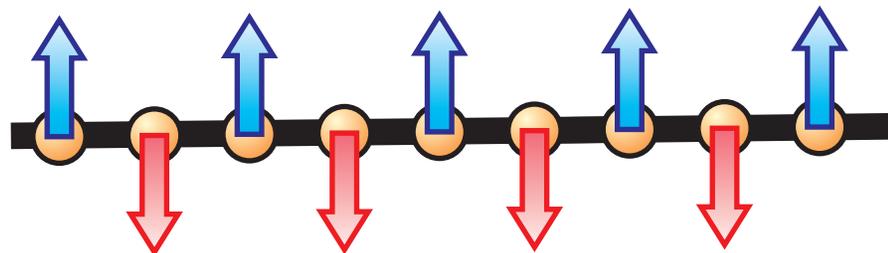


Модель Изинга

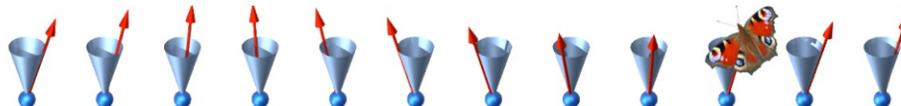
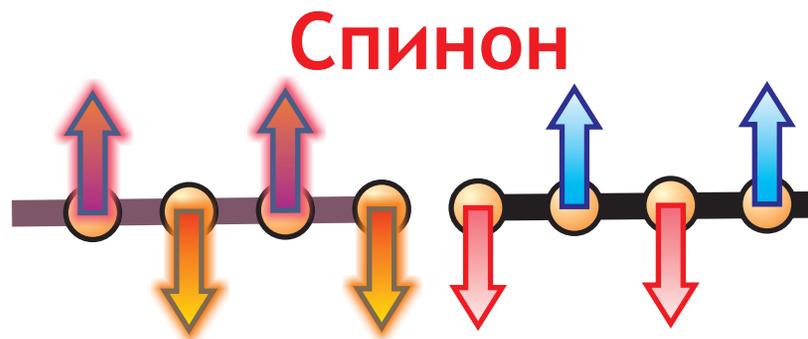
А что в обратном случае ($J_z > J_{xy}$)?

Доминирует
отталкивание!
 $J_z \hat{c}_i^+ \hat{c}_i \hat{c}_{i+1}^+ \hat{c}_{i+1}$

Основное состояние
неелевского типа!

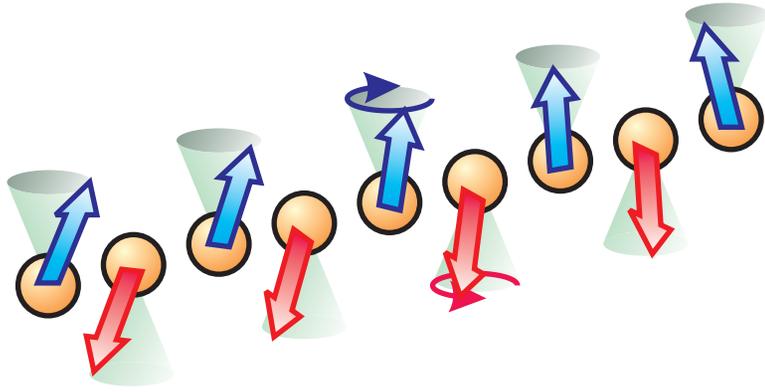


Элементарное возбуждение - доменная стенка



Распад спиновой волны

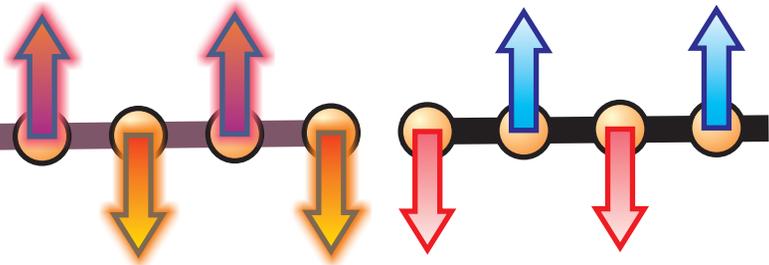
$$\Delta S = 1$$



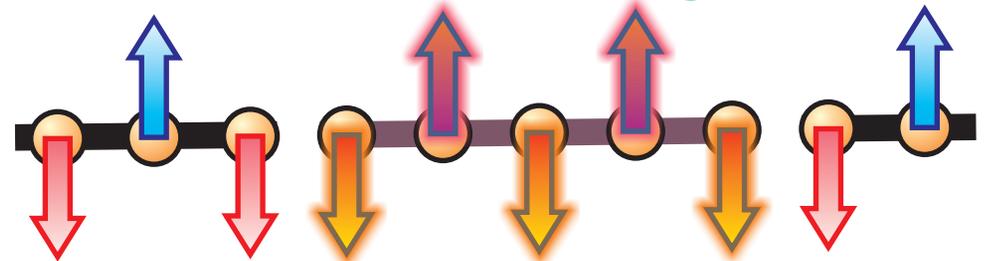
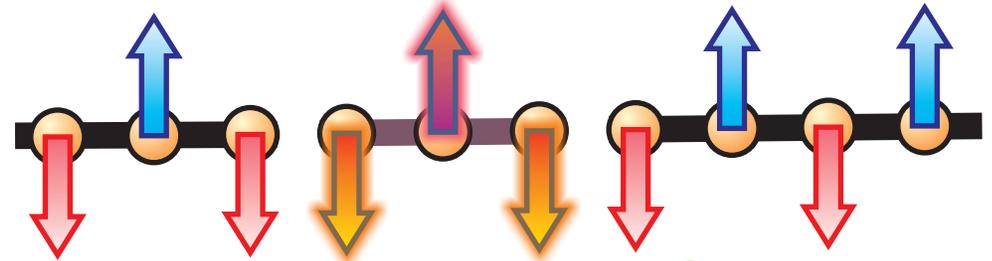
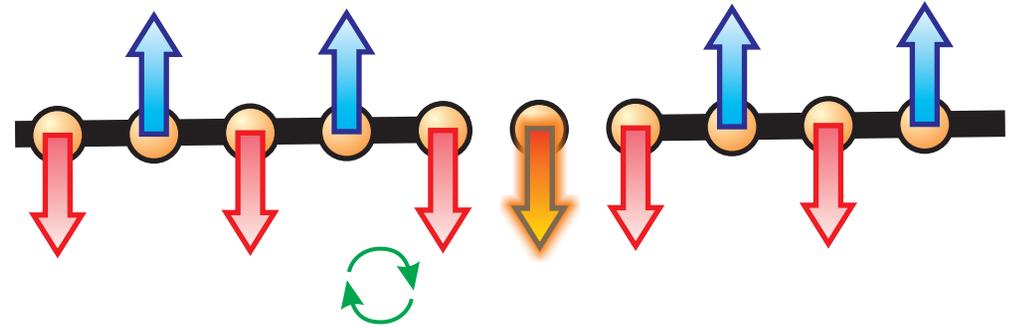
Спиновая волна



Два спиона
(доменных стенки)



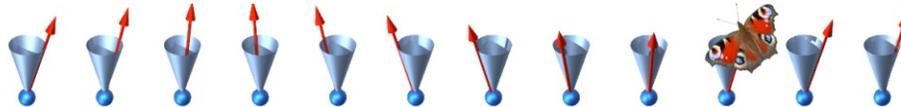
$$\Delta S = 1$$



$$\Delta S = 1/2$$

$$\Delta S = 1/2$$

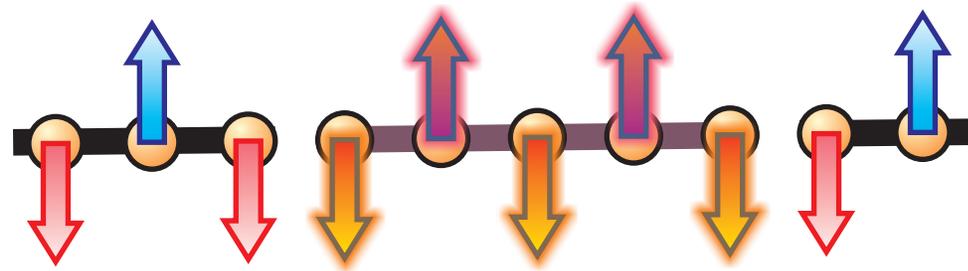
И так далее...



Двухспиновый континуум

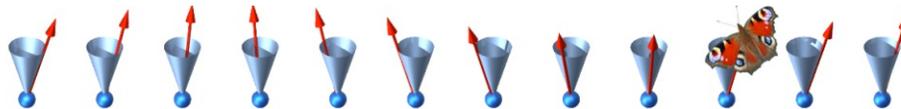
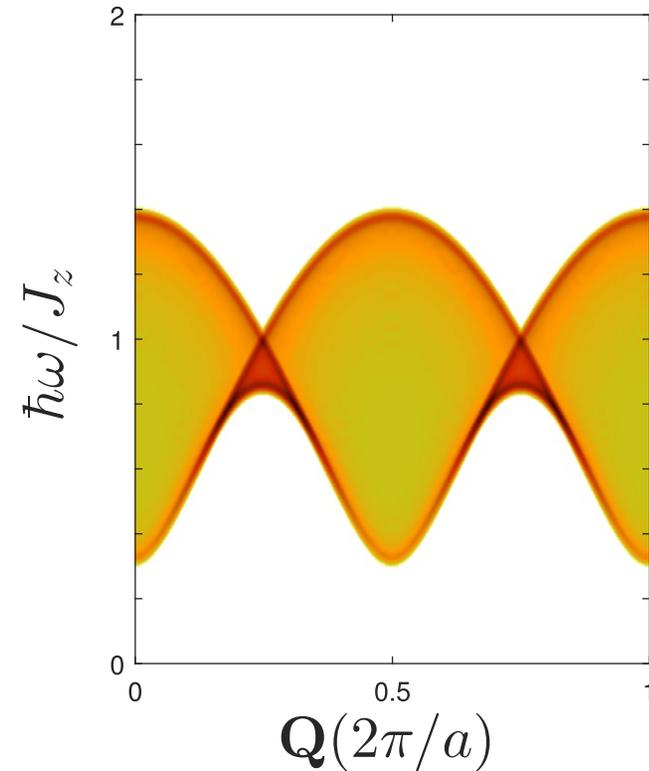
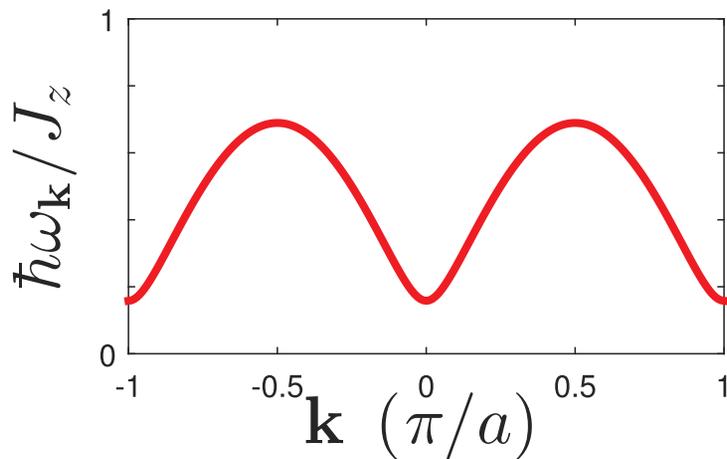
$$\Delta S=1$$

Мы всегда создаем
спиноны парами



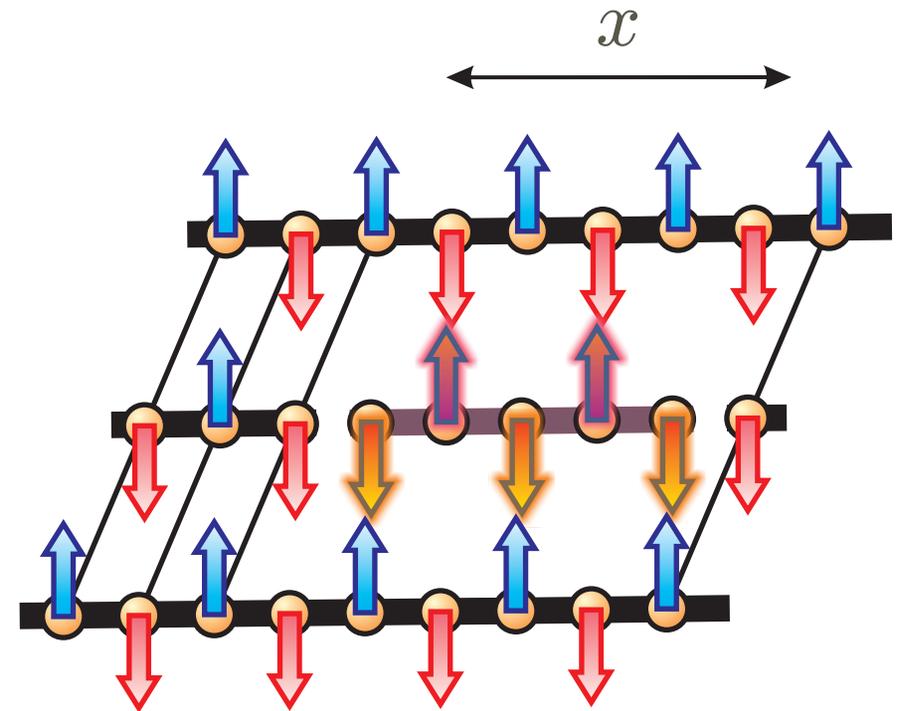
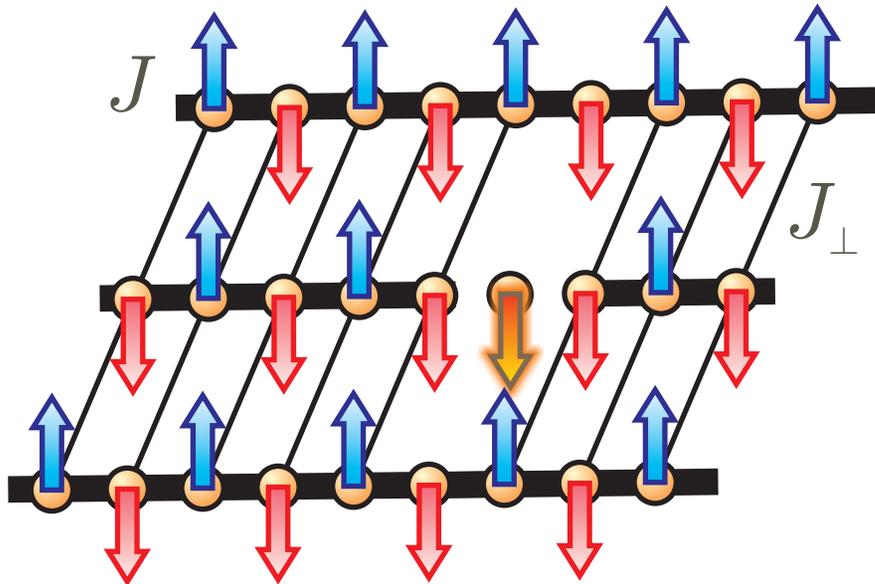
$$\hbar\omega = \hbar\omega_{\mathbf{k}} + \hbar\omega_{\mathbf{k}-\mathbf{Q}}$$

$$\hbar\omega_{\mathbf{k}} = \sqrt{J_z^2/4 - J_z J_{xy}/2 \cdot \cos(2ka)}$$



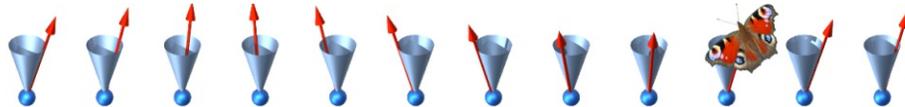
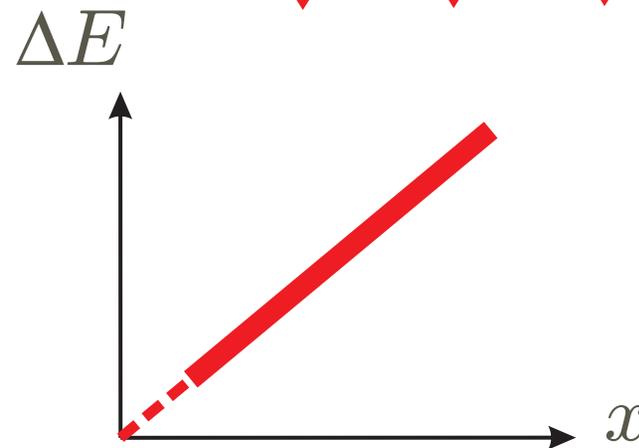
Конфайнмент

Спиноны перестают быть свободными при $D > 1$



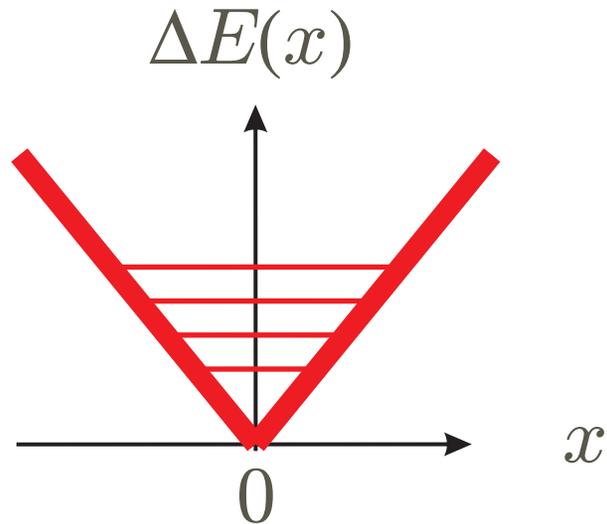
$$\Delta E \propto J_{\perp} x$$

Проигрыш в энергии
растет с расстоянием!



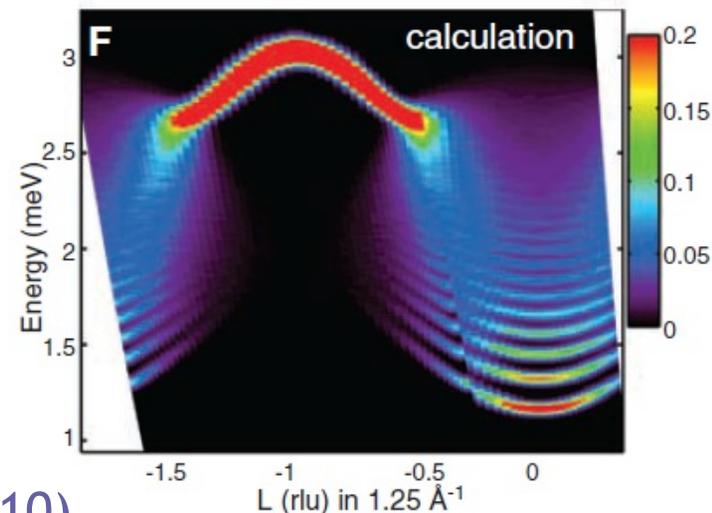
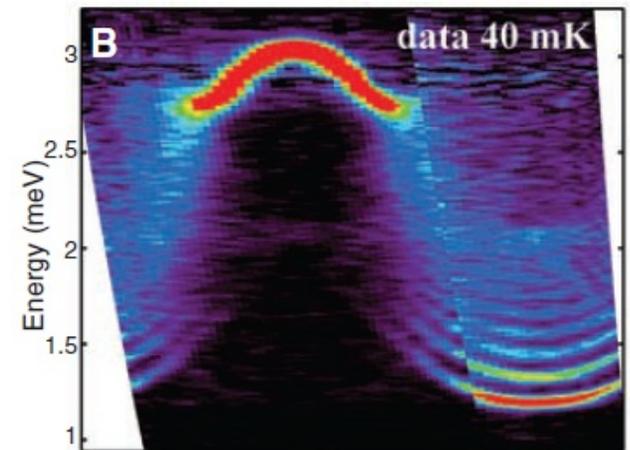
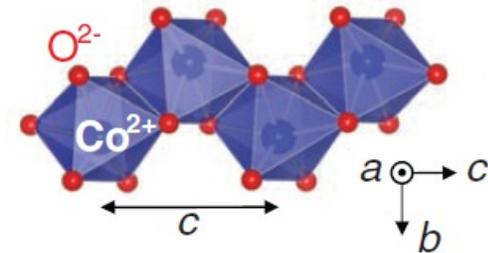
«Зееманова лестница»

Спиноны в линейном потенциале

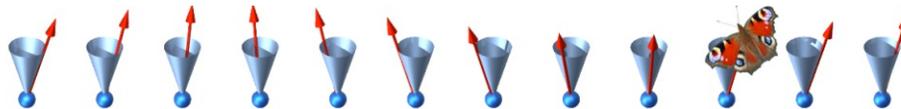


Дискретные уровни вместо континуума!

Непосредственно наблюдаемы!



R. Coldea et al., Science 327, 177 (2010)



Гейзенберговская цепочка

Привычный изотропный предел $J_z = J_{xy} = J$

В целом очень похоже на XY случай, порядка нет

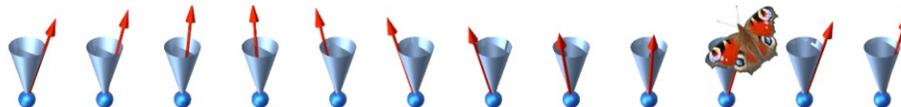
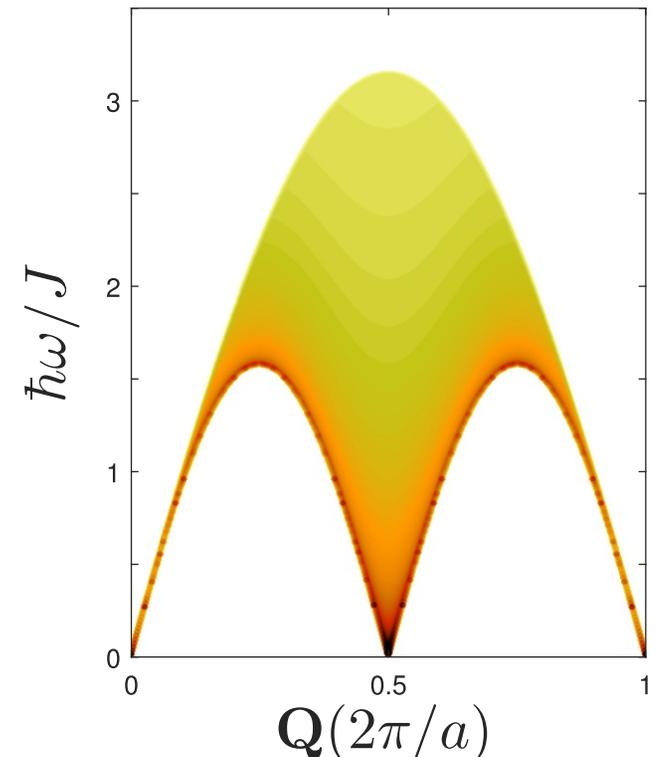
Линейная теплоемкость

$$C_p(T)/T = \text{const}$$

Ненулевая магнитная
восприимчивость

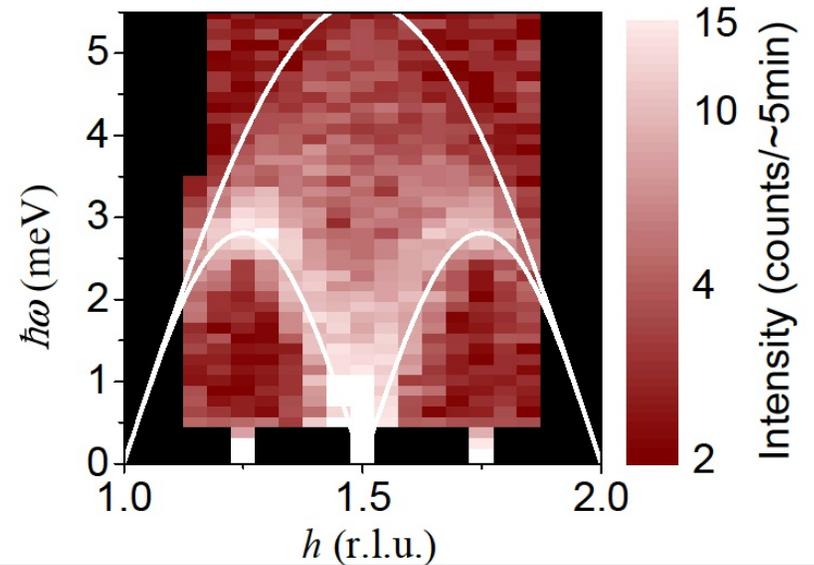
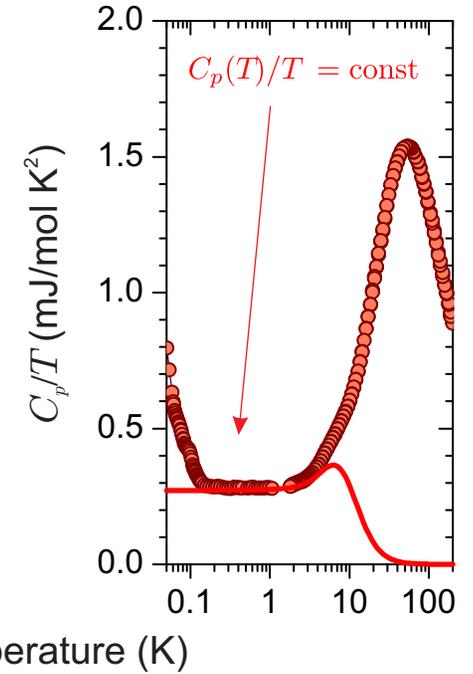
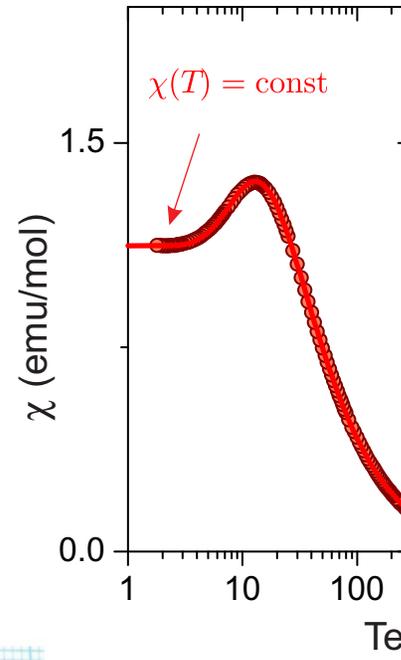
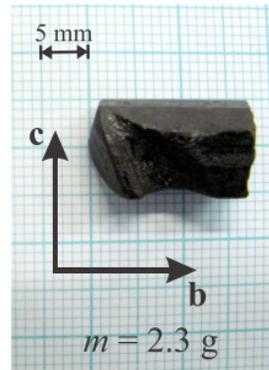
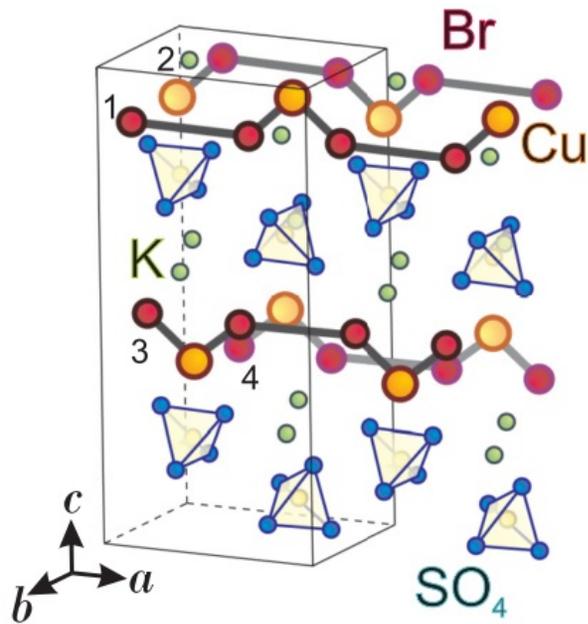
$$\chi(T) = \text{const}$$

Континуум возбуждений

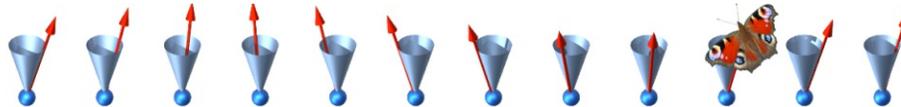


Спиновые цепочки

$K_2CuSO_4Br_2$:
хороший пример
спиновой цепочки

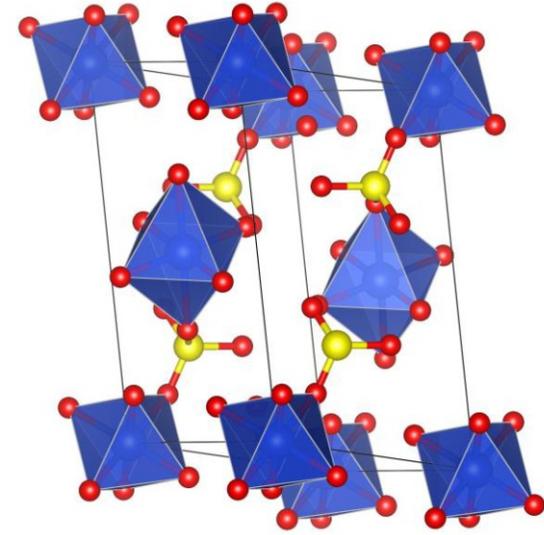
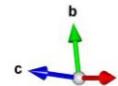
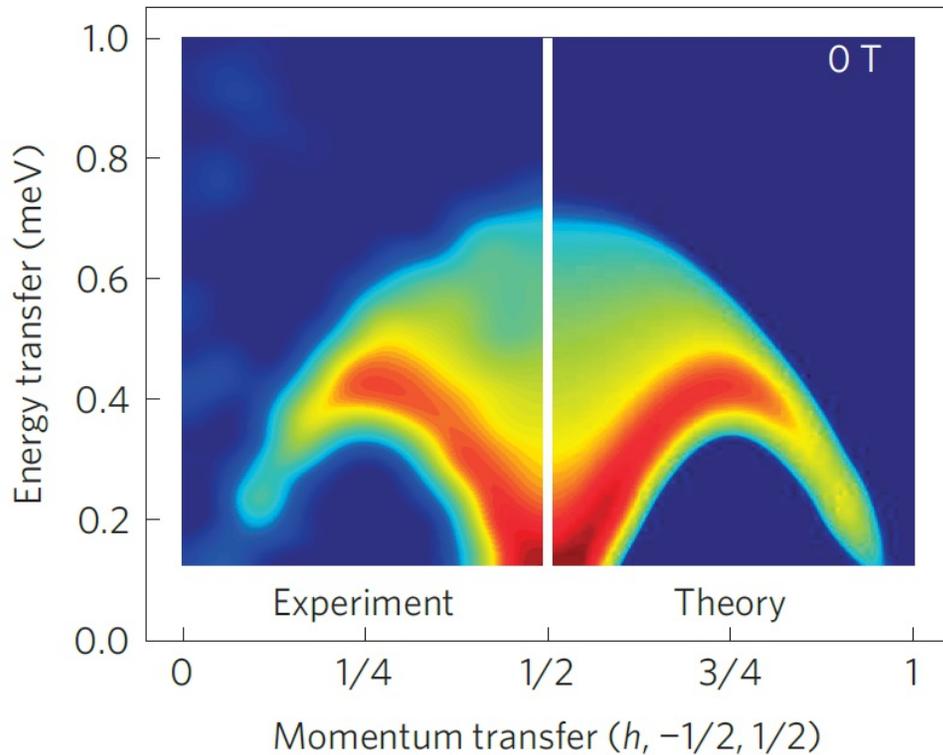


M. Hälg *et al.*, Phys. Rev. B 90, 174413 (2014)

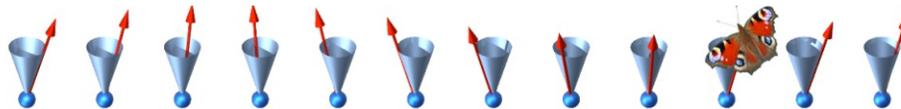


Спиновые цепочки

Медный купорос как
идеальный квантовый магнетик

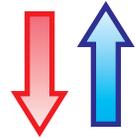


M. Mourigal *et al.*, Nature Physics 9, 435 (2013)



Гипотеза Халдейна

1D антиферромагнетик

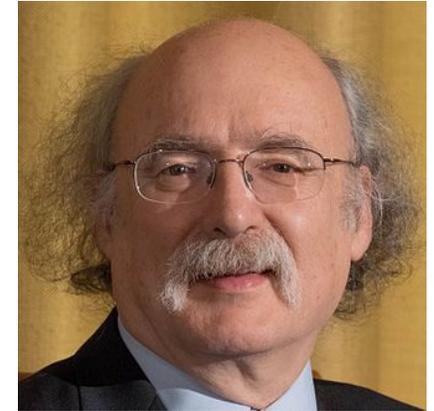
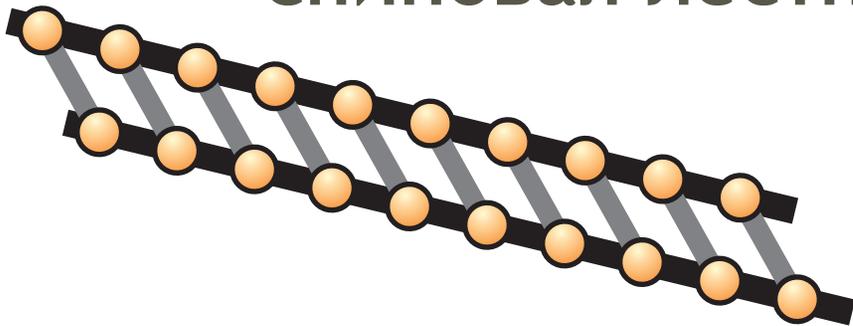


Жидкость экзотических фермионов

Не только цепочки...

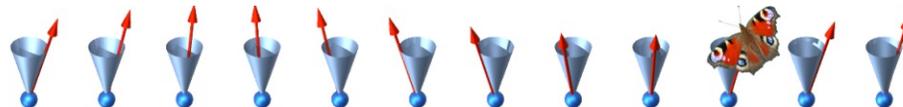
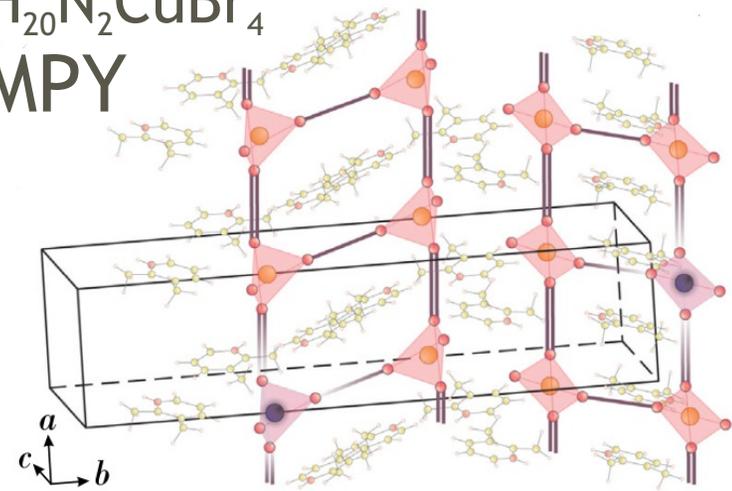
Например:

«спиновая лестница»



F. D. M. Haldane,
Phys. Rev. Lett. 45, 1358 (1980)

$C_{14}H_{20}N_2CuBr_4$
DIMPY



Спиновая лестница

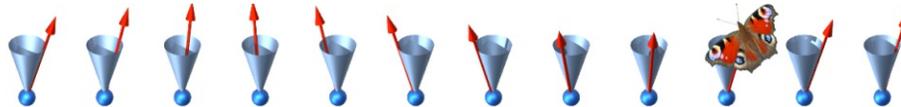
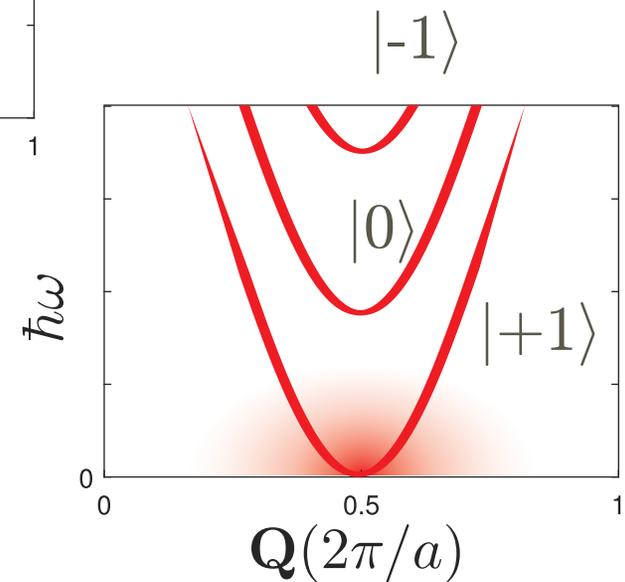
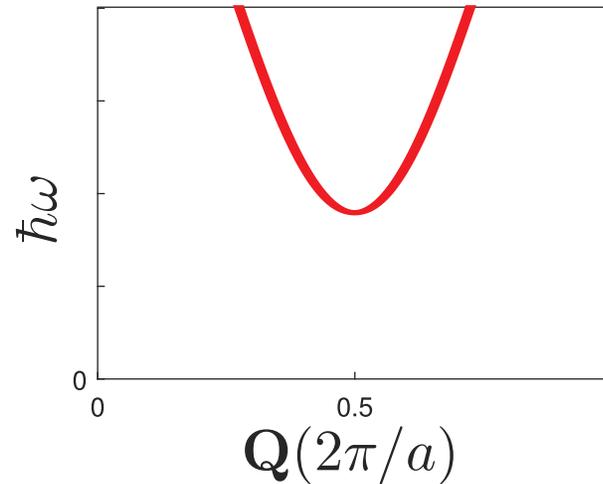
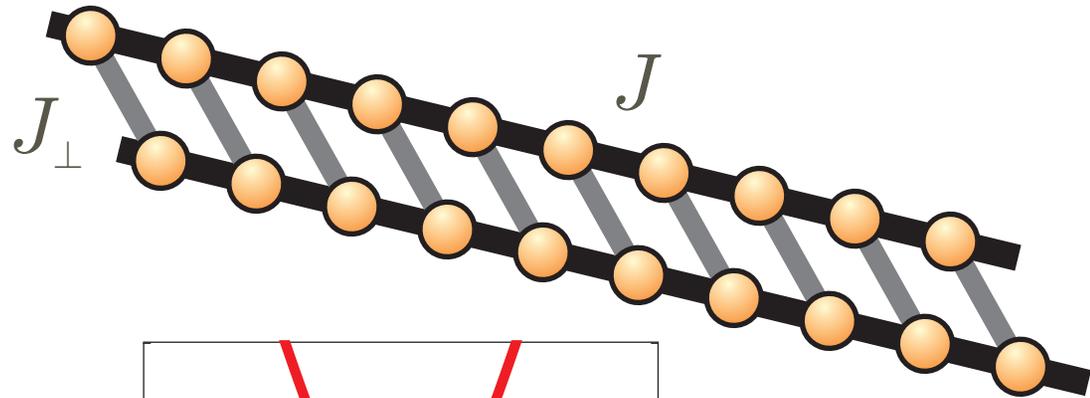
$$J \sim J_{\perp}$$

Спиноны сильно
связаны

Массивная бозонная
квазичастица

$S=1$, $S_z=0, +1, -1$: триплет

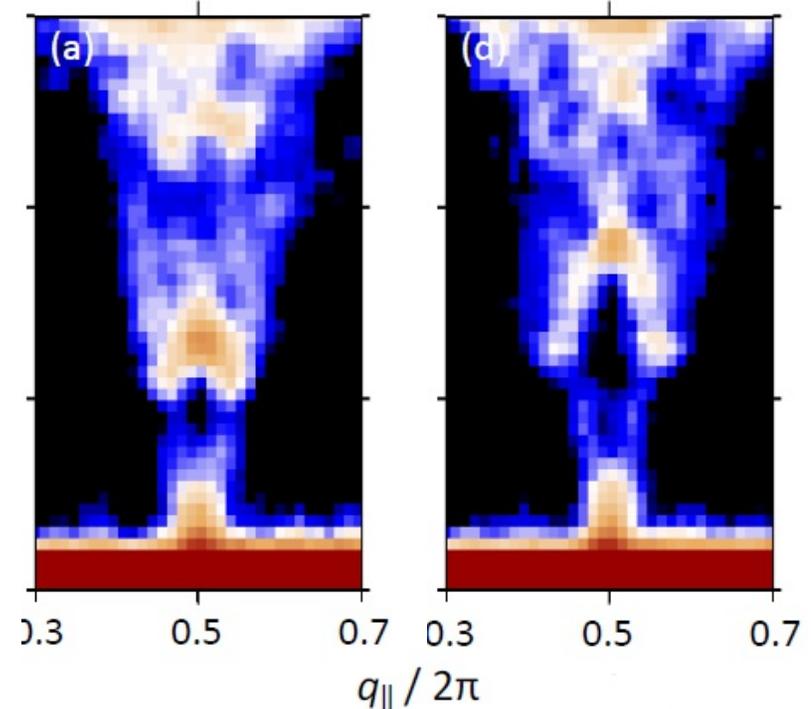
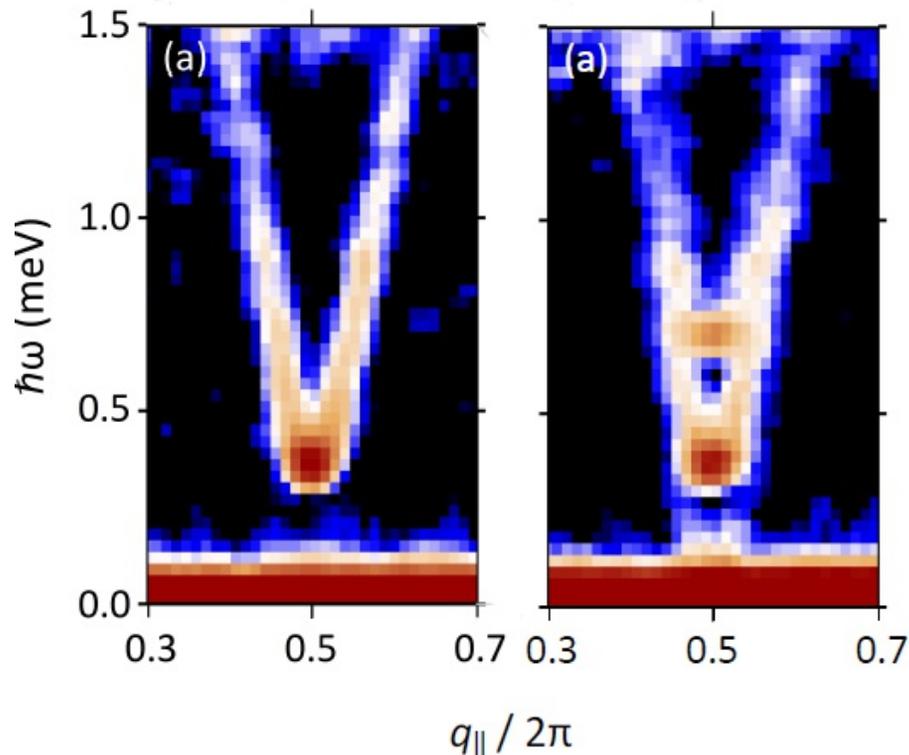
Ее можно
дестабилизировать
магнитным полем!



Спектр спиновой лестницы

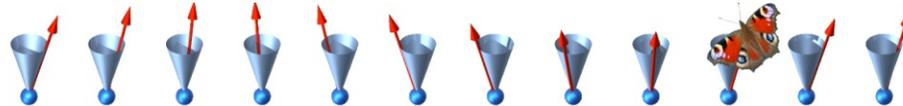
$H < H_c$:
возбуждения бозонного
типа со щелью

$H > H_c$:
континуум фермионов!



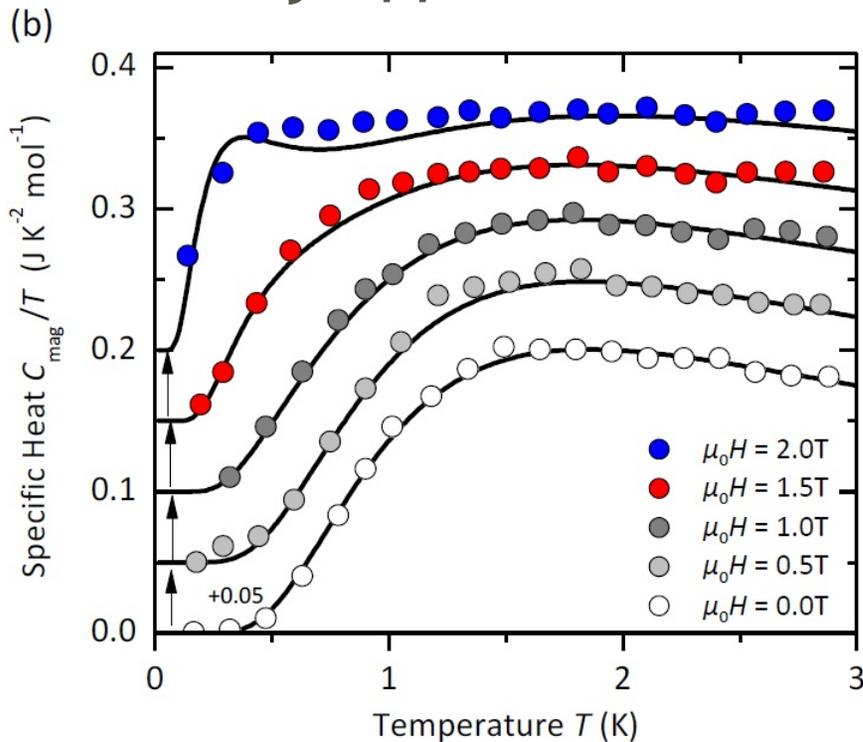
D. Schmidiger, PhD thesis (2014)

DIMPY

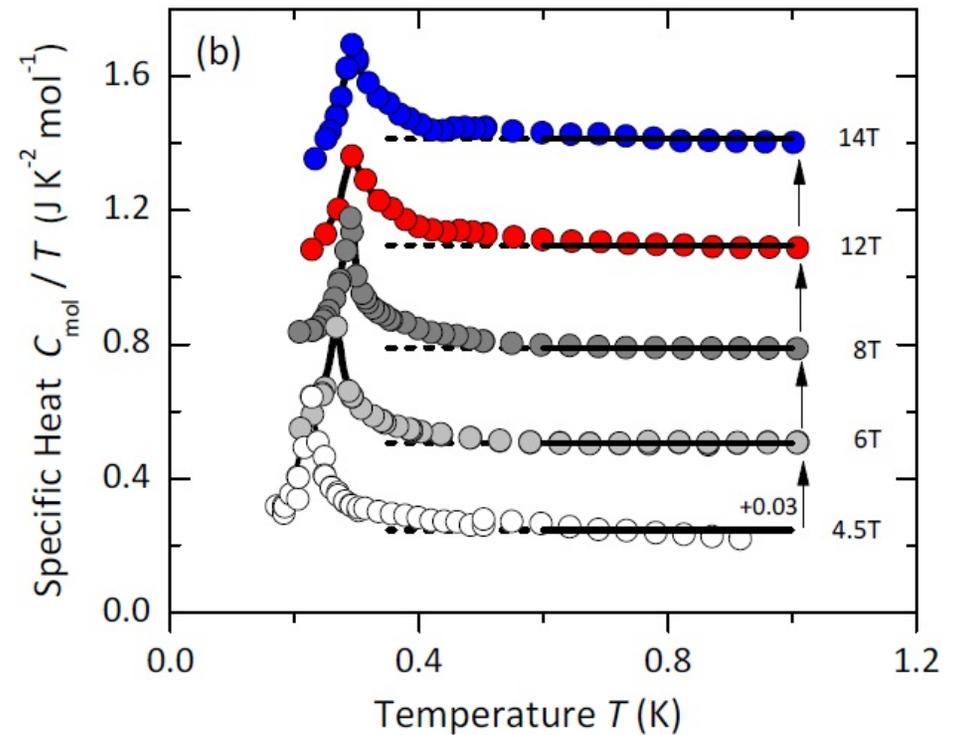


Теплоемкость спиновой лестницы

$H < H_c$:
термоактивированные
возбуждения

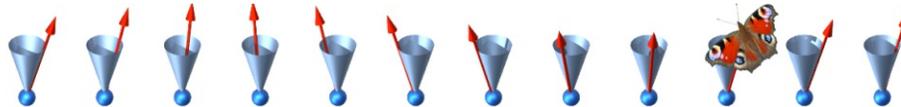


$H > H_c$:
линейный закон!



D. Schmidiger, PhD thesis (2014)

DIMPY

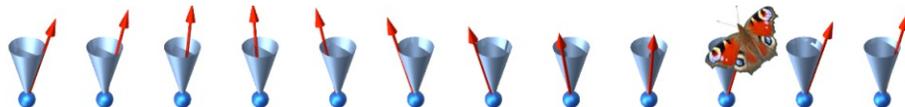


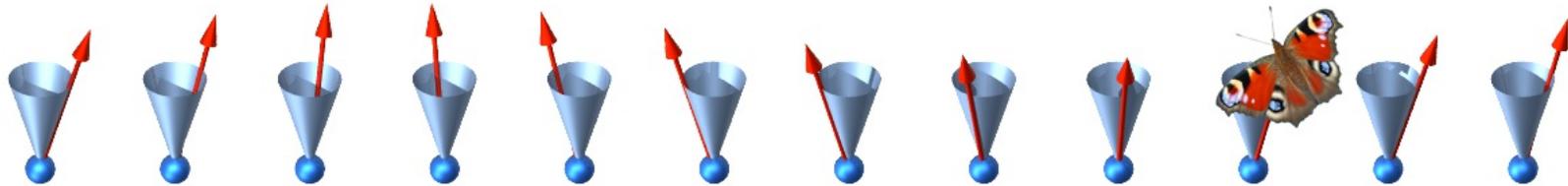
Главное

Бесщелевой 1D антиферромагнетик
- система квазичастиц-фермионов

Эти фермионы:

- принципиально **нелокальны**
(топологические возбуждения)
- возбуждаются **только** парами
- могут формировать **связанные состояния**
(аналогии с кварками; конфайнмент и т.д.)





ETH *D-PHYS Laboratory for Solid State Physics*
Neutron Scattering & Magnetism

