

**Аспирант 2 года обучения Цуварев Егор Сергеевич**  
**лаборатории квантовой теории конденсированного состояния**

**Научный руководитель** – д.ф.-м.н. Кассан-Оглы Феликс Александрович

**Специальность** 1.3.8. – Физика конденсированного состояния

**Тема работы** – Обобщенная модель Изинга на планарных решетках при учете декорирования

**Задача текущего года**

1. Произвести обобщение модели Изинга на две трансляции в решетке Вакса, Ларкина и Овчинникова со взаимодействиями между спинами ближайших соседей. Исследовать термодинамические и фрустрационные свойства модели. Рассмотреть частные случаи полученной обобщенной модели Изинга.

**Результаты, полученные в текущем году**

1. Выведены точные аналитические выражения для свободной энергии Гельмгольца и спонтанной намагниченности при учете ближайших и ближайших соседей (шесть параметров обменных взаимодействий). Выявлены существенные особенности поведения энтропии, теплоемкости и спонтанной намагниченности. Отмечены новые эффекты в частных случаях представленной обобщенной модели.

**Аспирант 2 года обучения Цуварев Егор Сергеевич  
лаборатории квантовой теории конденсированного состояния**

## Апробация работы

### Статьи

1. *Ordering and frustrations in generalized Ising chain* / E S Tsuvarev, F A Kassar-Ogly, A I Proshkin // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — V. 1389. — P. 12008—12014.
2. *Обобщенная модель Изинга в отсутствие магнитного поля* / Цуварев Е.С., Кассан-Оглы Ф.А., Прошкин А.И. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2020. — Т. 158. — С. 504—514.
3. *Декорированная изинговская цепочка в магнитном поле* / Цуварев Е.С., Кассан-Оглы Ф.А. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2020. — Т. 158. — С. 1125—1138.
4. *Обобщенная модель Изинга в магнитном поле* / Цуварев Е.С., Кассан-Оглы Ф.А. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2021. — Т. 160. — С. 232—248.
5. *Обобщенная модель Изинга при взаимодействии ближайших соседей* / Кассан-Оглы Ф.А., Цуварев Е.С. [направлена в печать]

**Аспирант 2 года обучения Цуварев Егор Сергеевич  
лаборатории квантовой теории конденсированного состояния**

## **Апробация работы**

### **Тезисы докладов на международных конференциях**

1. Ordering and frustrations in generalized Ising chain /Tsvarev E.S., Kassar-Ogly F.A., Proshkin A.I. // EASTMAG-2019. BOOK OF ABSTRACTS. – 2019. – Pp. 573-574.
2. Термодинамика и магнетизм обобщенной одномерной изинговской цепочки / Цуварев Е.С., Кассан-Оглы Ф.А., Прошкин А.И. // Магнитные фазовые переходы. Сборник трудов XIII Международного семинара. – 2019. – С. 59-62.
3. Thermodynamic and magnetic properties of one-dimensional decorated chain in Ising model / E.S. Tsvarev, F.A. Kassar-Ogly, A.I. Proshkin // Международная зимняя школа физиков-теоретиков «КОУРОВКА-XXXVIII» ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ. – 2020. – С. 91.
4. Thermodynamic and magnetic properties of one-dimensional decorated chain in Ising model / Tsvarev E.S., Kassar-Ogly F.A., Proshkin A.I // VII Международная молодежная научная конференция, посвященная 100-летию Уральского федерального университета «ФИЗИКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ ФТИ-2020» Тезисы докладов. – 2020. – С. 366.

**Аспирант 2 года обучения Цуварев Егор Сергеевич  
лаборатории квантовой теории конденсированного состояния**

## **Апробация работы**

### **Тезисы докладов на международных конференциях**

5. Точное решение модели Изинга на линейной декорированной цепочке в магнитном поле / Е. С. Цуварев, Ф. А. Кассан-Оглы, А. И. Прошкин // LIV Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния «Сборник тезисов и список участников». – 2020. – С. 175.

6. Обобщенная модель Изинга в магнитном поле / Цуварев Е.С., Кассан-Оглы Ф.А. // VIII Международная молодежная научная конференция «ФИЗИКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ ФТИ-2021» Тезисы докладов. – 2021. – С. 331.

7. Точное решение обобщенной модели Изинга на квадратной решетке комбинаторным методом Вдовиченко–Фейнмана / Е. С. Цуварев, Ф. А. Кассан-Оглы // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XV Международной конференции 27 сентября – 1 октября 2021. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2021. – 302 с. ил.

**Аспирант 2 года обучения Цуварев Егор Сергеевич  
лаборатории квантовой теории конденсированного состояния**

## **Экзамены**

**Экзамен по философии**

Сдан – «Хорошо»

**Экзамен по иностранному языку**

В процессе сдачи

**Экзамен по специальности 1.3.8.**

2024 год

**Аспирант 2 года обучения Цуварев Егор Сергеевич  
лаборатории квантовой теории конденсированного состояния**

**Таблица показателей**

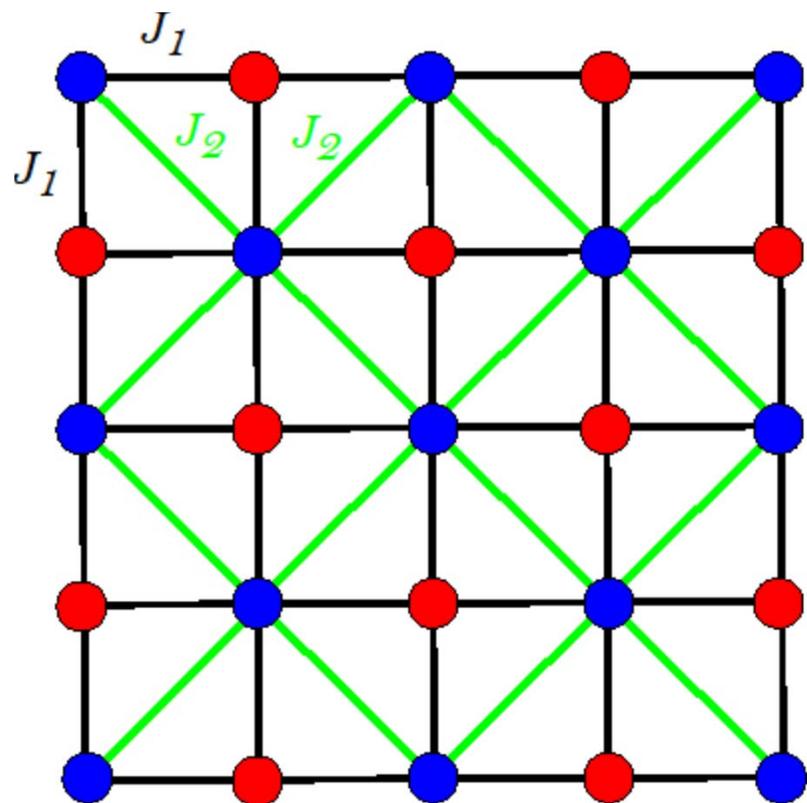
Показатель	Баллы	Кол-во	Сумма
публикации в изданиях ВАК (вышедшие из печати)	20	4	80
публикации в изданиях ВАК (принятые в печать)	5	0	0
свидетельство о программах для ЭВМ, зарегистрированных в установленном порядке	20	0	0
патент	20	0	0
соавторство в монографии	5	0	0
оформленное ноу-хау	5	0	0
публикации в других изданиях (не тезисы)	2	0	0
тезисы доклада на международной конференции	5	7	35
тезисы доклада на российской конференции	3	0	0
участие в конференции с устным докладом	2	0	0
участие в конференции со стендовым докладом	1	6	6
сданный на «отлично» кандидатский экзамен	20	0	0
сданный на «хорошо» кандидатский экзамен	15	1	15
сданный на «удовлетворительно» кандидатский экзамен	10	0	0
участие в грантах в качестве: исполнителя	5	0	0
участие в грантах в качестве: руководителя	10	0	0
Общая сумма			136

**Аспирант 2 года обучения Цуварев Егор Сергеевич  
лаборатории квантовой теории конденсированного состояния**

**ТЕПЕРЬ О НАУКЕ**

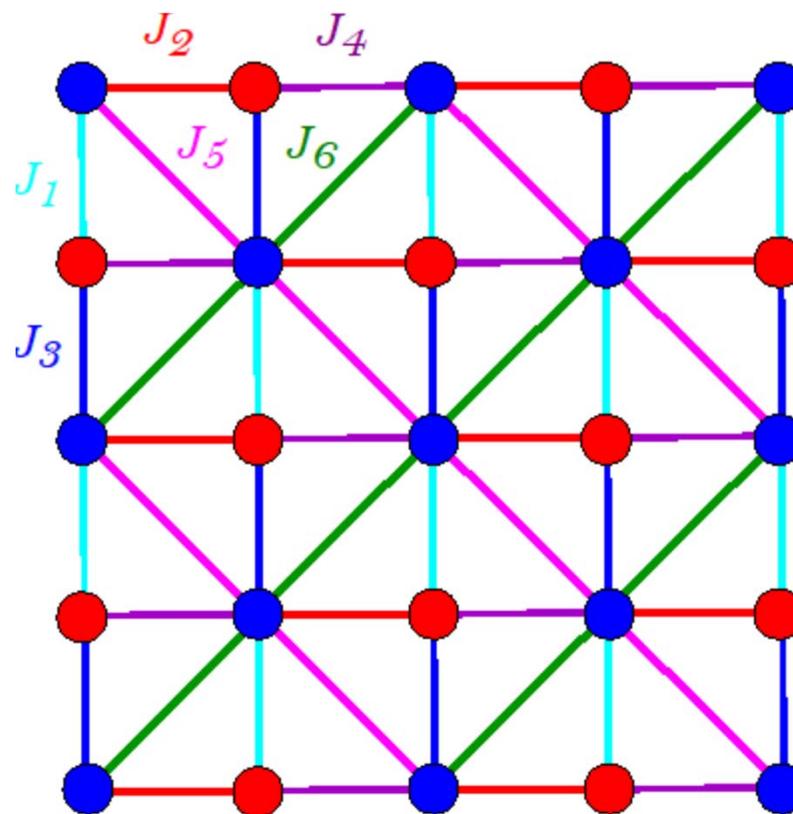
# Обобщение решетки ВЛО

Решетка ВЛО [1]  
(Вакс, Ларкин, Овчинников)



$$Z = Z(J_1, J_2, T)$$

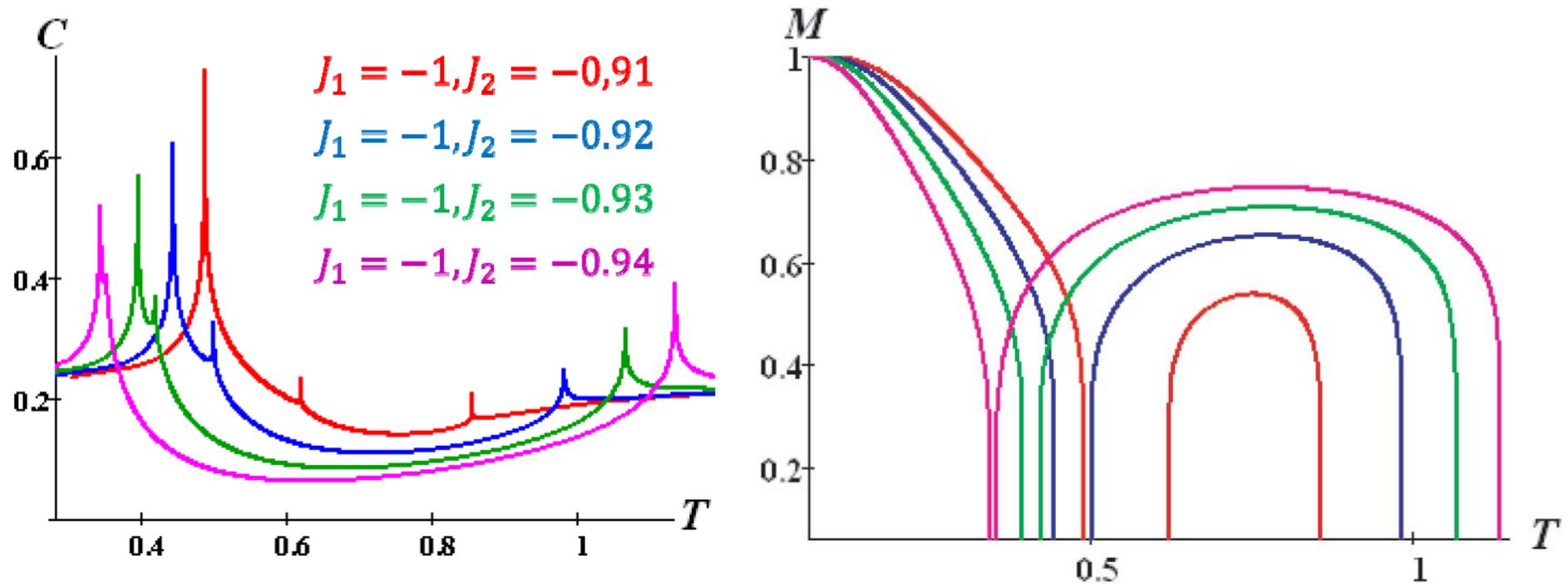
Обобщенная решетка ВЛО



$$Z = Z(J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6, T)$$

[1] В.Г. Вакс, А.И. Ларкин, Ю.Н. Овчинников, ЖЭТФ 49, 1180, (1965).

## Явление реентерабельности

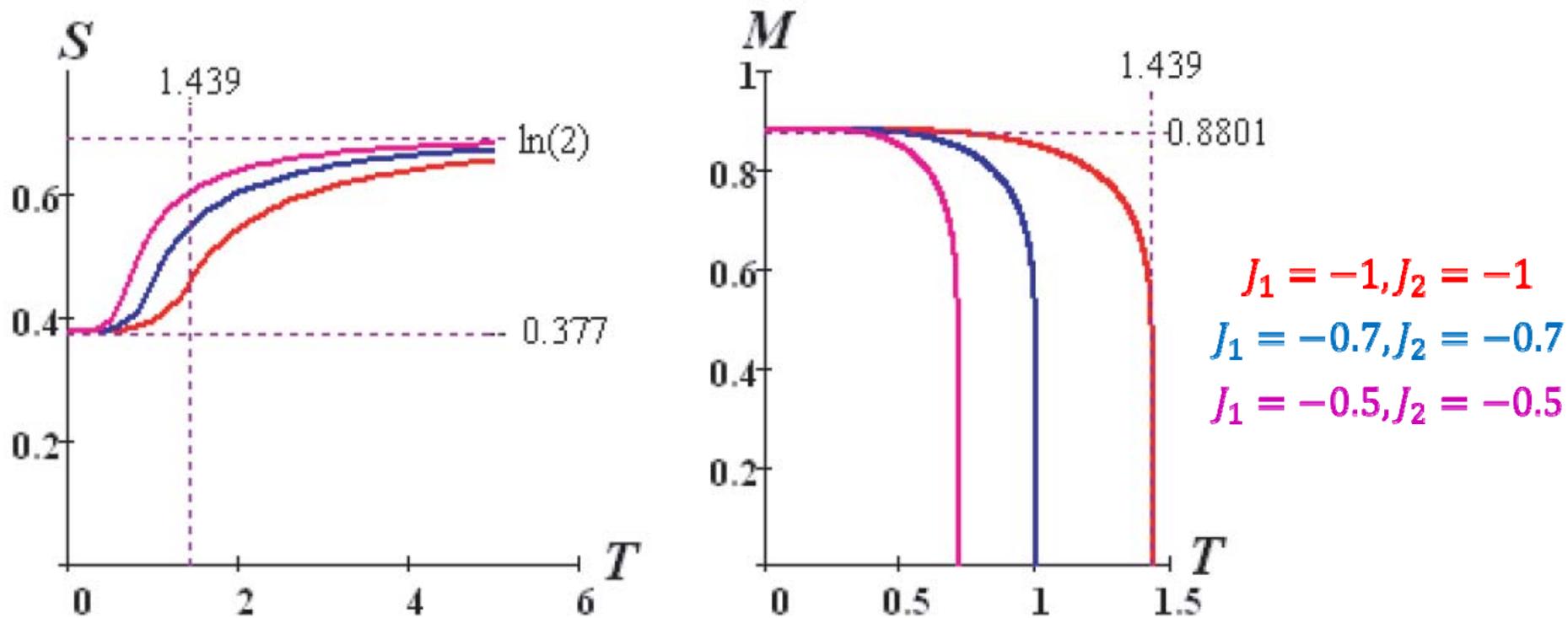


При понижении температуры достигается насыщение при нулевой температуре – полное упорядочение

При высоких температурах спонтанная намагниченность равна нулю – отсутствие упорядочения

**Не равенство нулю спонтанной намагниченности при некоторых температурах свидетельствует о наличии упорядоченных конфигурациях!**

# Открыт новый эффект - Остаточная спонтанная намагниченность (residual spontaneous magnetization)



$$T_N = \frac{2}{\ln \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2}-\sqrt{\sqrt{2}-1}}}} \approx 1.439$$

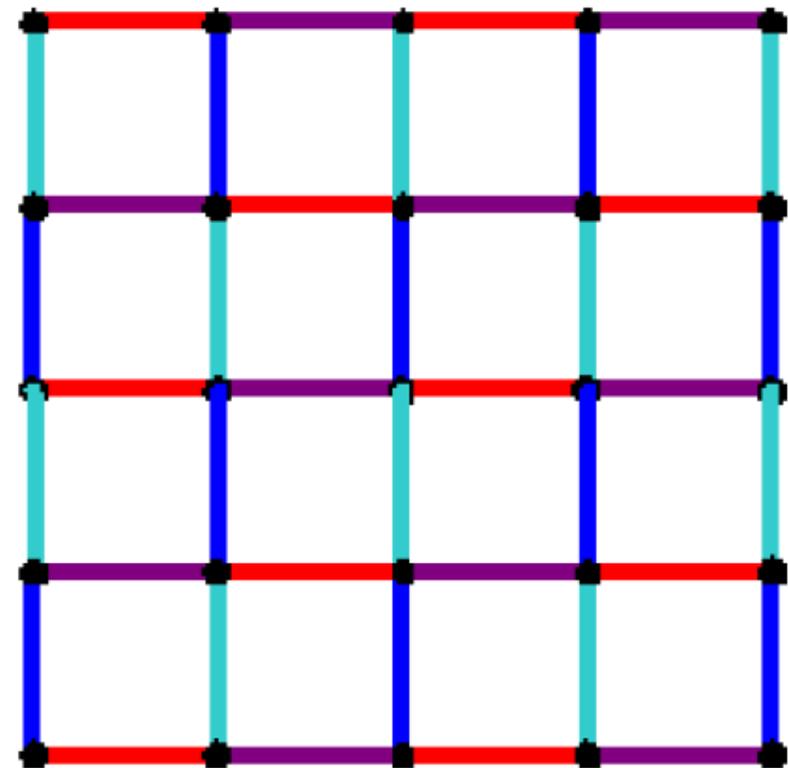
$$S_0 = \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \ln \left( \frac{5 + \sqrt{25 - 16 \cos^2 \alpha}}{2} \right) d\alpha \approx 0.377$$

$$\left(1 - \frac{16}{25}\right)^{\frac{1}{8}} \approx 0.8801$$

## Частный случай ВЛО (обобщенная квадратная решетка)

При занулении диагональных взаимодействий (неближайших соседей)  $J_5, J_6$  решетка ВЛО сводится к обобщенной квадратной решетке [2] (с двумя различными чередующимися значениями в горизонтальном и вертикальном направлениях)

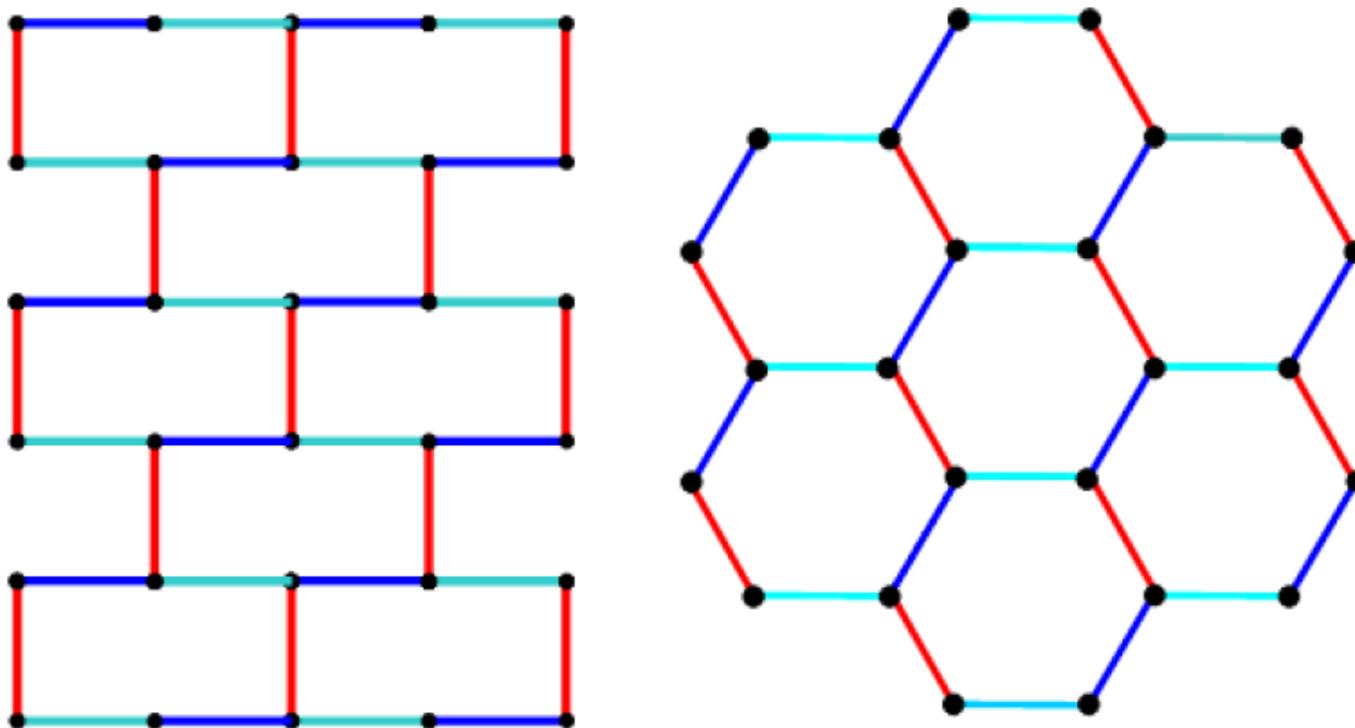
**В отличие от исходной квадратной решетки, обобщенная квадратная решетка допускает наличие фрустраций!**



ВЛО решетка при  $J_5 = J_6 = 0$

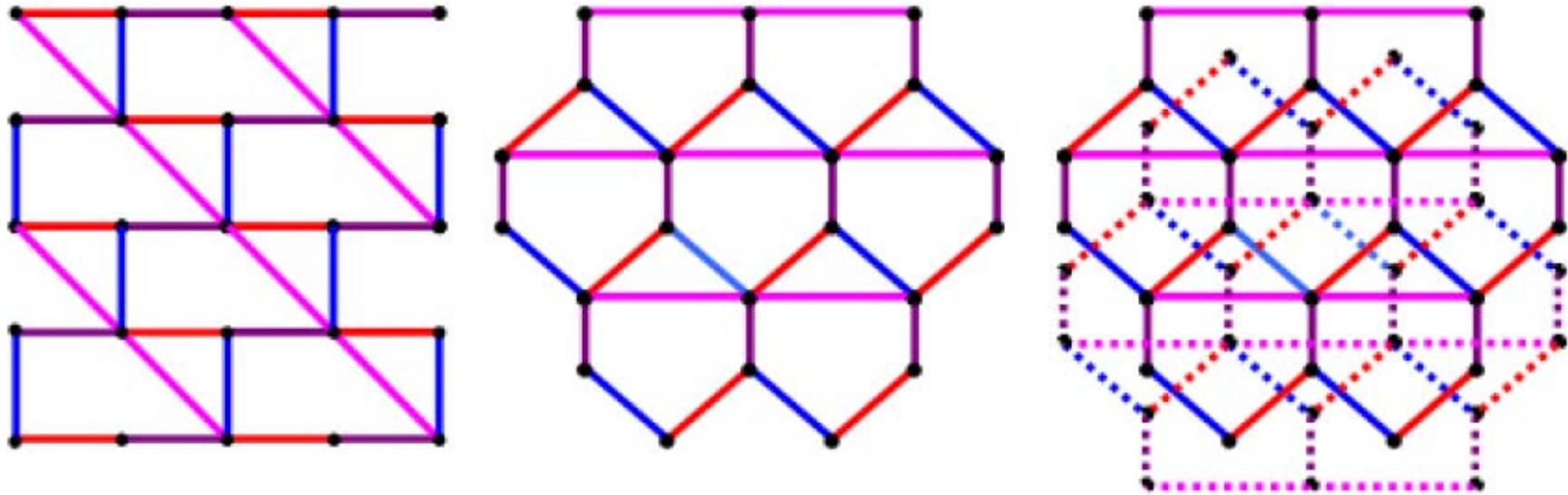
[2] Забабахинские научные чтения: сборник материалов XV Международной конференции 27 сентября – 1 октября 2021. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2021. – 302 с. ил.

*Частный случай ВЛО  
(гексагональная решетка [3])*



**ВЛО решетка при  $J_4 = J_5 = J_6 = 0$  (левый граф),  
топологический эквивалент (правый граф)**

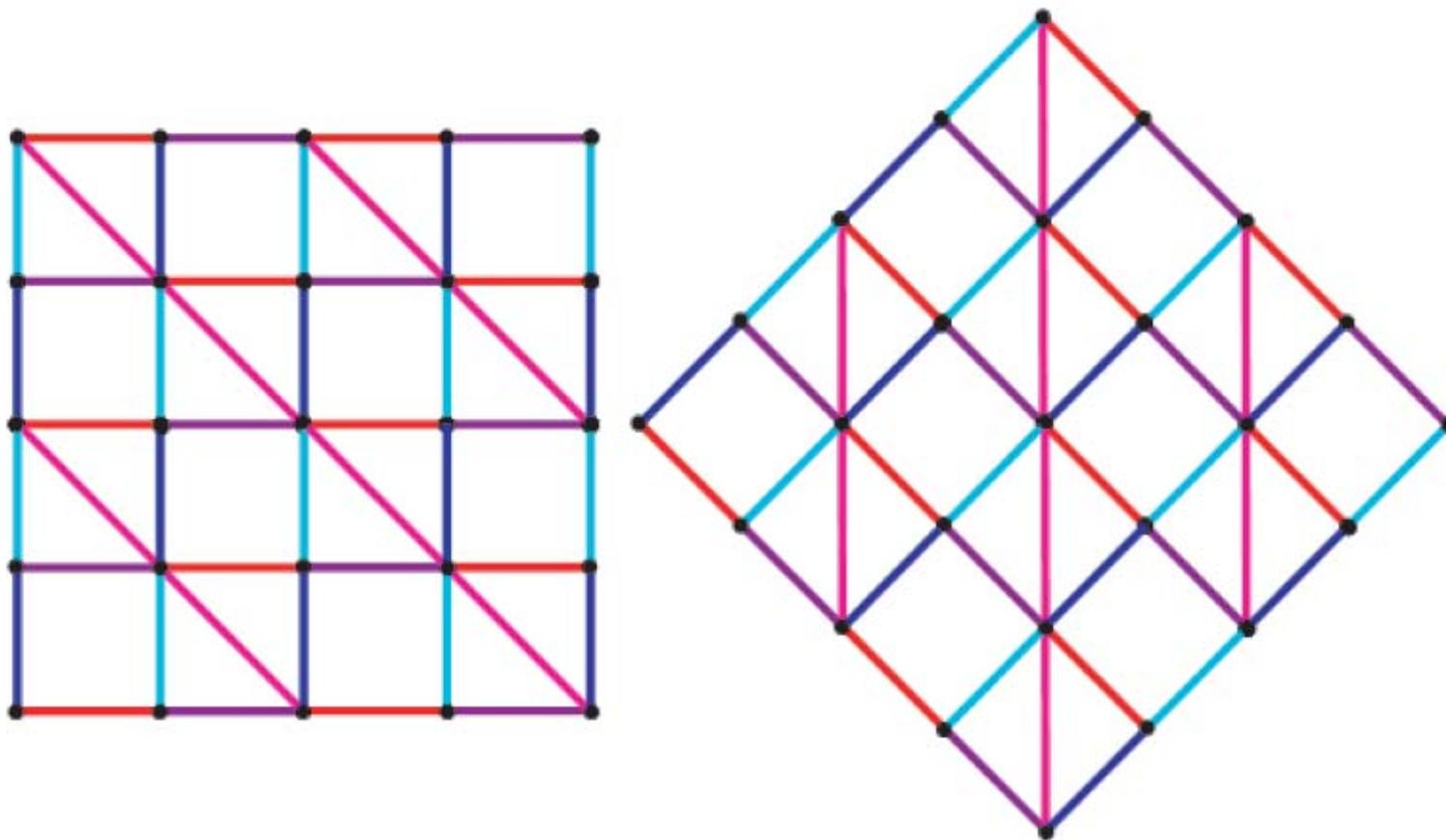
## Самодуальность



**Частный случай ВЛО модели при  $J_1 = J_6 = 0$  (левый граф), топологический эквивалент (средний граф), графическое доказательство самодуальности (правый граф)**

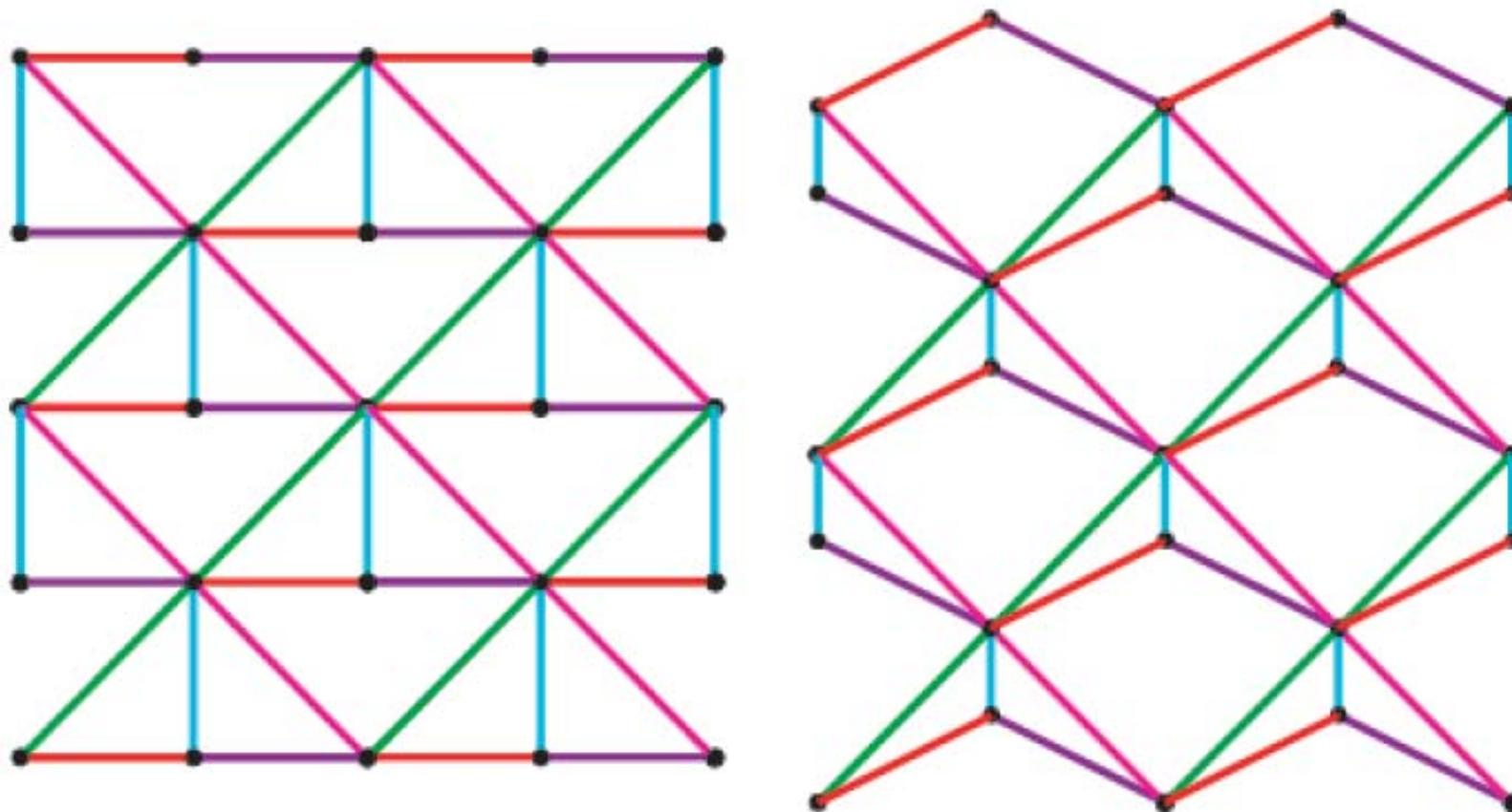
**Наряду с квадратной решеткой [4], полученная решетка так же самодуальна!**

## *Новые решетки из ВЛО модели...*



**Частный случай ВЛО модели при  $J_6 = 0$  (левый граф),  
топологический эквивалент (правый граф)**

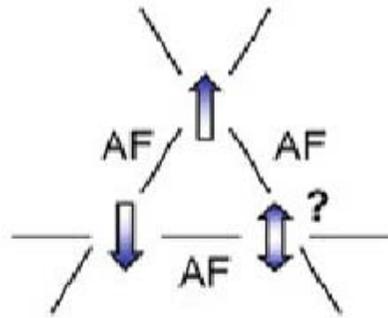
## *Новые решетки из ВЛО модели...*



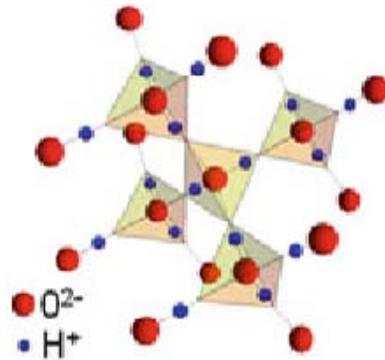
**Частный случай ВЛО модели при  $J_3 = 0$  (левый граф),  
топологический эквивалент (правый граф)**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

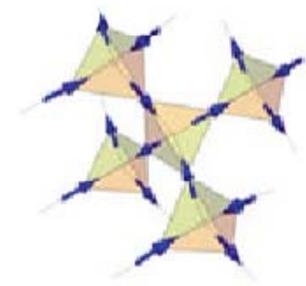
## *Явления фрустрации встречаются в решетках некоторых материалах*



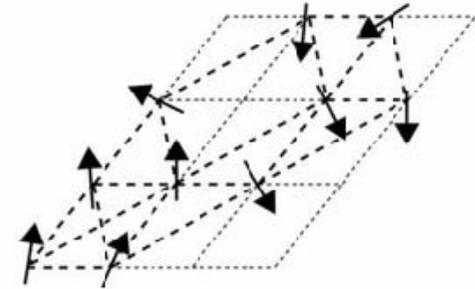
*Геометрическая фрустрация*



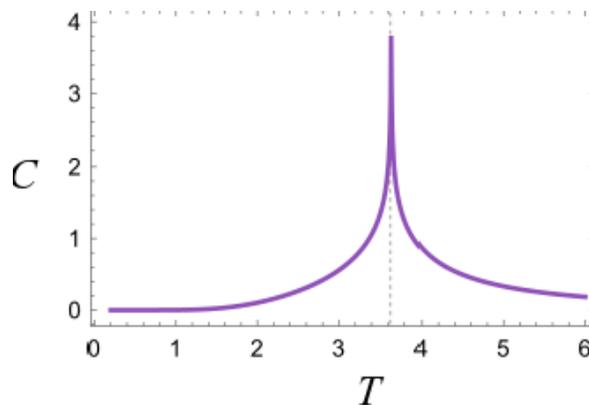
*Водяной лед*



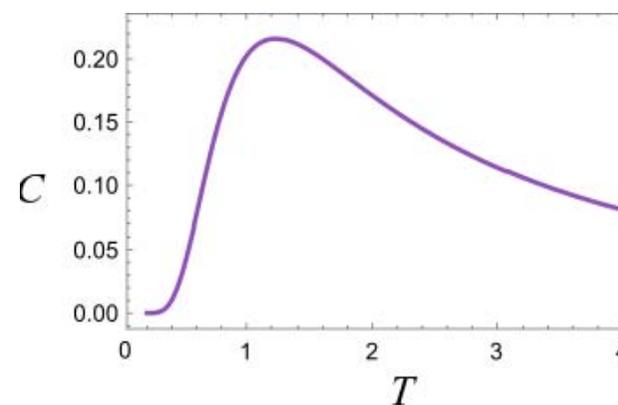
*Спиновый лед*



*Спиновое стекло*

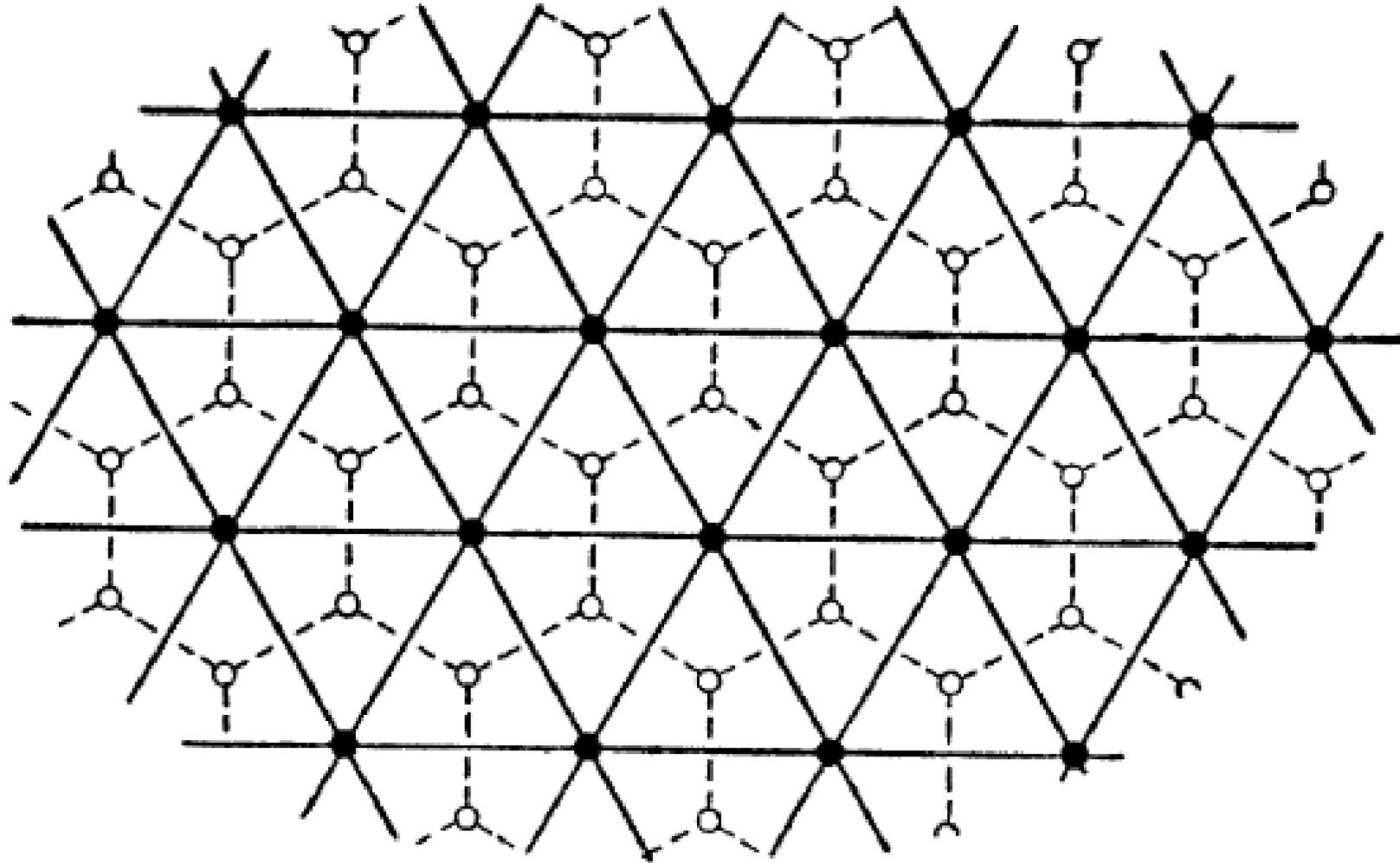


**Наличие фазового перехода –  
система не фрустрирована**

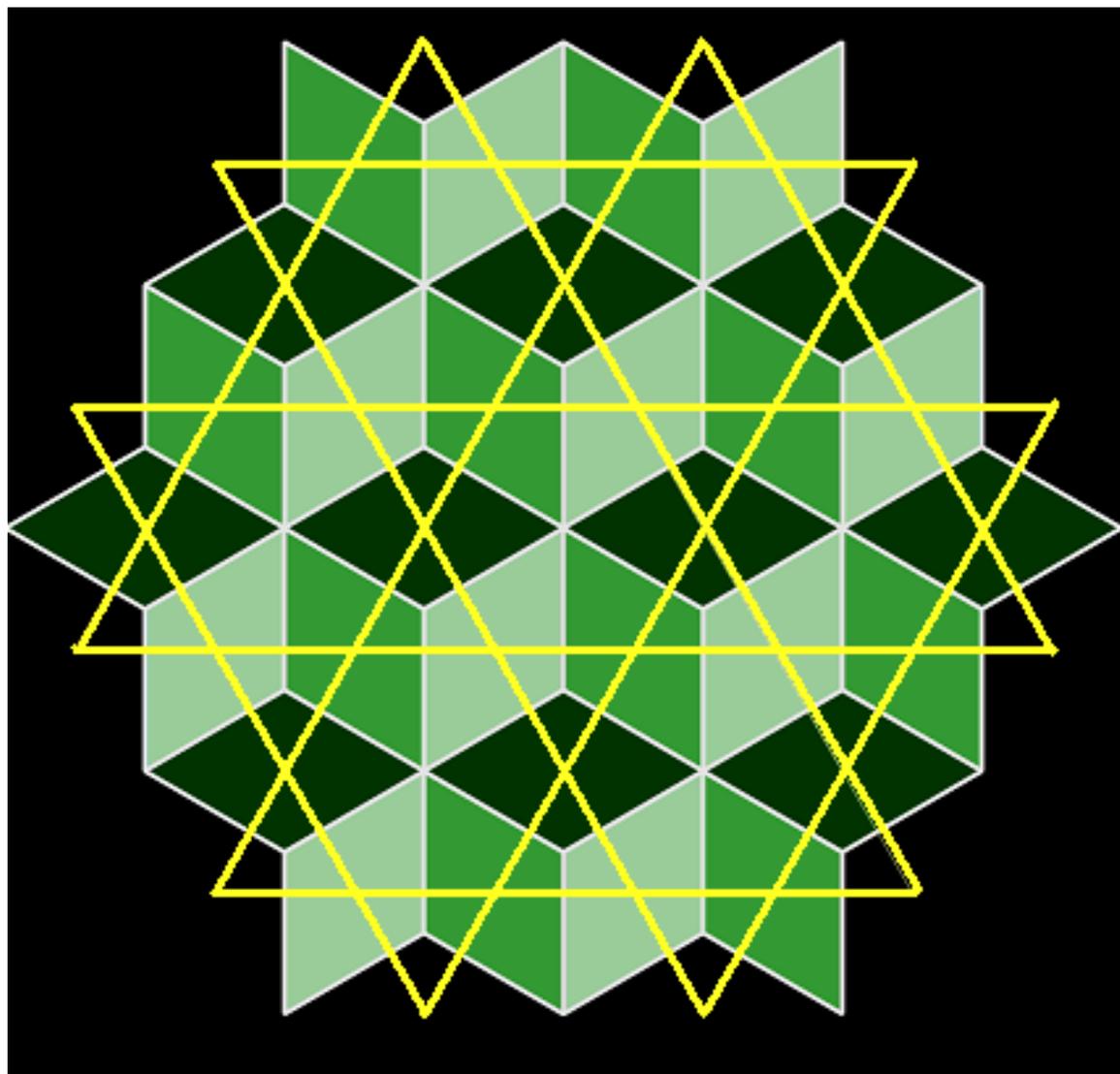
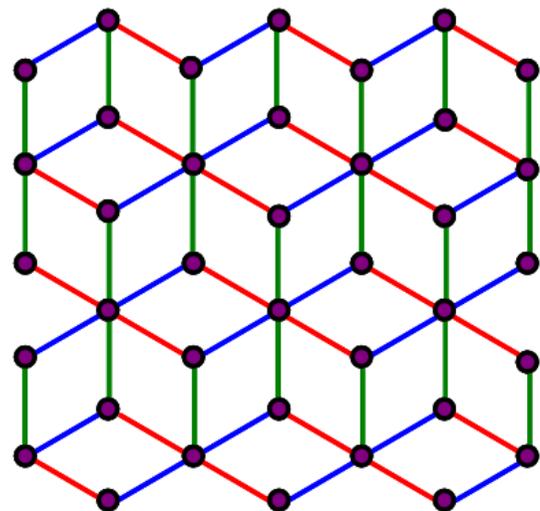
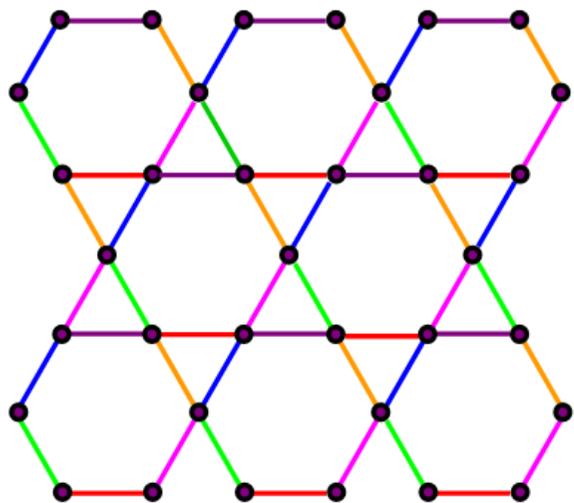


**Отсутствие фазового перехода –  
система фрустрирована**

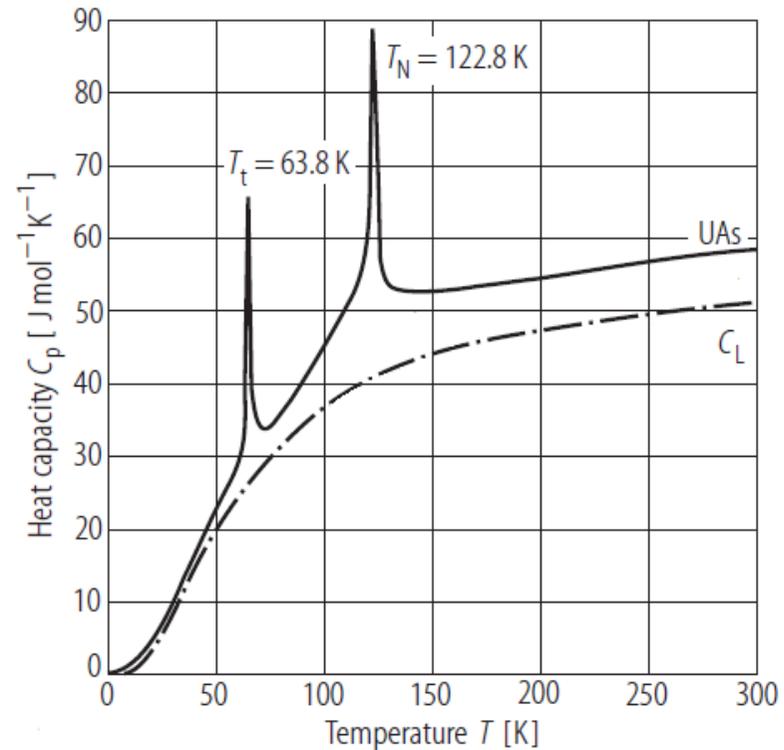
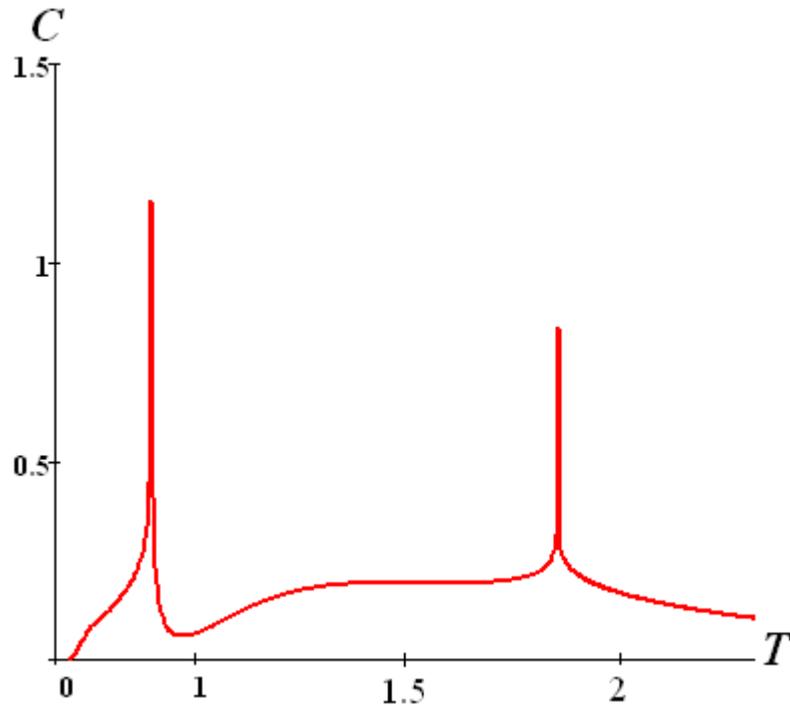
*Дуальность:  
треугольная в гексагональную или обратно*



*Дуальность:  
кагоме в diced или обратно*

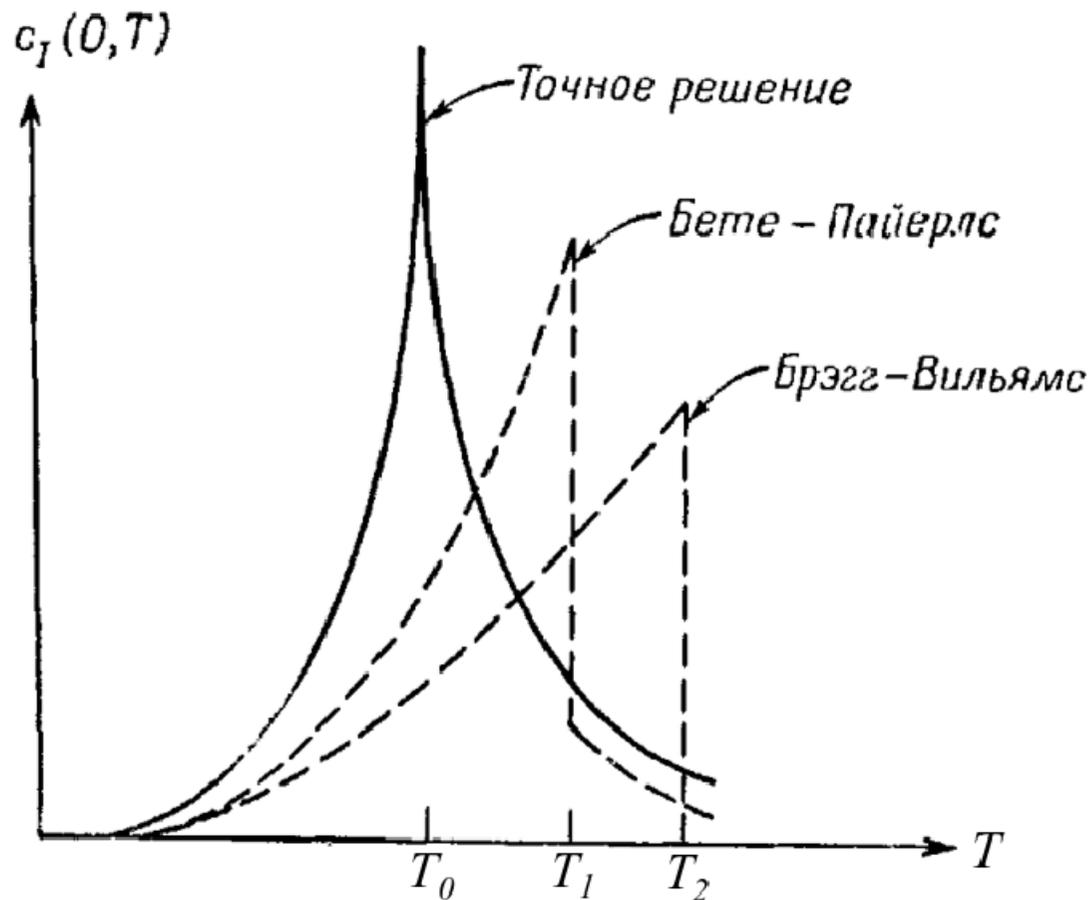


## Два фазовых перехода, сравнение с экспериментом



Теплоёмкость на декорированной треугольной решетке  $J_1 = J_2 = J_3 = -1.36$ ,  $J_1 = J_2 = J_3 = +1$ , Выбранные параметры близки к точке фрустраций ( $J_1 = J_2 = J_3 = -1.4$ ,  $J_1 = +1$ ,  $J_2 = +1$ ,  $J_3 = +1$ ). Слева экспериментальная теплоёмкость кристалла UAs. При вычитании решеточного вклада в теплоёмкость (штрих-пунктирная кривая) получим магнитную, весьма подобную расчетной, как по форме кривой, так и по отношению температур фазовых переходов  $\approx 2$ .

## Почему точные решения так важны?



Онзагер  
(1944)

$$T_0 = \frac{2}{\ln(1 + \sqrt{2})} \approx 2,27$$

Бете-Пайерлс  
(1939)

$$T_1 = \frac{2}{\ln 2} \approx 2,88$$

Брэгг-Вильямс  
(теория среднего  
поля) (1934)

$$T_2 = \frac{2}{\ln(e^{1/2})} = 4$$