

**The topologies of two-dimensional frustrated lattices of point magnetic dipoles
Shevchenko Yu.¹, Nefedev K.² (Russian Federation)**

**Топологии двумерных фрустрированных решеток точечных магнитных диполей
Шевченко Ю. А.¹, Нефедев К. В.² (Российская Федерация)**

¹Шевченко Юрий Андреевич / Shevchenko Yuriy – ассистент,

²Нефедев Константин Валентинович / Nefedev Konstantin – доктор физико-математических наук, профессор,
кафедра компьютерных систем,
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Аннотация: мы проводим анализ топологий двумерных решеток квадратного спинового льда как возможных кандидатов на появление фрустраций. Проводится сравнение с хорошо известной топологией квадратного спинового льда. Показано, что нечетное число соседей и псевдо-трехмерное расположение подрешеток в квадратном спиновом льду позитивно влияют на проявление эффекта фрустраций и появление неравновесных конфигураций в основном состоянии.

Abstract: we analyze the topologies of two-dimensional lattices of square spin ice as the possible candidates for the emergence of frustration. We compare it with the well-known topology of square spin ice. It is shown that an odd number of neighbors, and the pseudo-three-dimensional arrangement in a square sublattice spin ice positively influence the manifestation of frustration effect and the appearance of nonequilibrium configurations of the ground state.

Ключевые слова: магнетизм, решетки, спиновый лед.

Keywords: magnetism, lattices, spin ice.

Большой интерес исследователей к трехмерным решеткам пироклора обусловлен их необычной геометрией. Решетка пироклора состоит из равносторонних тетраэдров с общими вершинами. Такой атомной структурой обладают магнитные материалы $Dy_2Ti_2O_7$ и $Ho_2Ti_2O_7$. Интересным свойством пироклора является наличие большого числа конфигураций с минимально возможной энергией системы и как следствие проявление новых термодинамических фаз. Классические магнитные решетки (двумерная в модели Изинга, например) имеют всего два возможных минимальных энергетических состояния (так же называются основным состоянием). Одно из основных состояний является зеркальным отражением другого. Тогда остаточная энтропия (энтропия системы при $T \rightarrow 0$) такой системы будет $\ln(1)=0$ (поскольку реализуется только одно состояние), что соответствует третьему началу термодинамики. В случае пироклора степень вырождения основного состояния будет очень высокой.

Однако экспериментальное исследование магнитных свойств и фрустраций в решетке пироклора осложняется объемной формой образцов. Очень тяжело экспериментально измерить магнитный момент отдельно взятого атома, или, что еще сложнее, изменить его направление. Исследователями было предложено спроецировать трехмерную решетку на плоскость и моделировать поведение Изинг-подобных спинов при помощи ферромагнитных островков прямоугольной формы [1, 2]. Магнитные моменты таких макроспинов обладают сильной анизотропией формы, что удерживает магнитный момент в заданном направлении, а небольшие (нанометровые) размеры препятствуют проявлению многодоменности.

Трехмерная решетка Пироклора получила название «квадратный спиновый лед» (КСЛ), рис. 1а. На рисунке она показана в одном из двух возможных основных состояний. Эта решетка хорошо рассмотрена в работах [1, 3-5]. Исследования показали, что, несмотря на конкурирующие взаимодействия макроспинов в узлах, система не обладает каким-либо необычным термодинамическим поведением. В теплоемкости присутствует всего лишь один пик, свидетельствующий о переходе из ферромагнитной в парамагнитную фазу [6, 7].

Отсутствие «новой физики» в КСЛ решетке обусловлено четным числом соседей и отсутствием сильных конкурирующих взаимодействий даже не смотря на присутствие фрустраций в модели с дальнедействующим дипольным взаимодействием. Если рассматривать отдельно каждый диполь решетки, то он будет иметь 4 ближайших соседа. Взаимные направления магнитных моментов с каждым из них будут минимизировать суммарную энергию системы. В то же время более дальние соседи (их тоже 4) будут повышать энергию, но их вклады будут существенно ниже, чем вклады ближайших соседей.

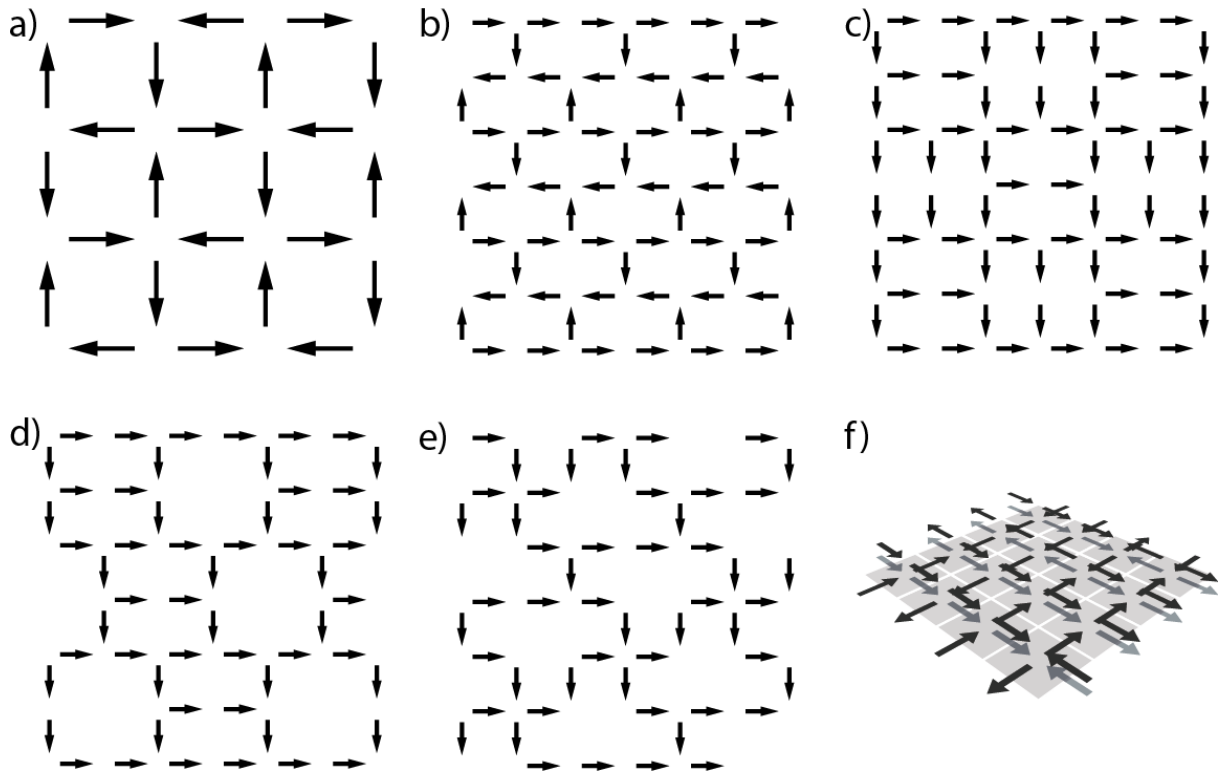


Рис. 1. а. Основное состояние решетки квадратного спинового льда (КСЛ), b-f. Возможные вариации решеток. Вставка f взята из [8]

Наиболее привлекательными будут производные КСЛ решетки, изображенные на Рис. 1b, 1c, 1d, 1e. В них каждый диполь имеет в среднем 3 ближайших соседа, что вносит неопределенность в упорядочение конфигурации основного состояния (см. классическое определение фрустраций). Благодаря этому факту суммарная энергия не может полностью минимизироваться, и проявляются дополнительные вырождения основного состояния.

Самым интересным вариантом является увеличение числа соседей каждого диполя. Структуру КСЛ можно представить в виде двух подрешеток: горизонтальных и вертикальных диполей. Если расстояние между двумя сонаправленными диполями обозначить как L , то расстояние между двумя перпендикулярными диполями будет $L \cdot 2^{-1/2}$. Следовательно, энергия взаимодействия (в случае дипольного взаимодействия) будет сильнее между перпендикулярно стоящими диполями. Увеличить расстояние можно приподняв одну из подрешеток над другой таким образом, чтобы расстояние между ближайшими перпендикулярными диполями тоже стало L . Пример показан на рисунке 1f. Таким образом, мы получим полностью фрустрированную решетку. В основном состоянии парные энергии взаимодействия между спинами одной подрешетки будут полностью компенсироваться парными взаимодействиями другой подрешетки.

Мы провели анализ топологий двумерных решеток и провели сравнение с топологией квадратного спинового льда, термодинамические свойства которой хорошо изучены. Показано, что хорошими кандидатами для дальнейших исследований будут решетки, построенные по типу «кирпичной кладки» и псевдотрехмерная решетка квадратного спинового льда.

Дальнейшие исследования авторов будут посвящены определению термодинамических фаз в решетках КСЛ, показанных на рисунке 1f.

Литература

1. Wang R. F. et al. Artificial ‘spin ice’ in a geometrically frustrated lattice of nanoscale ferromagnetic islands // Nature, 2006. Т. 439. № 7074. С. 303-306.
2. Mengotti E. et al. Building blocks of an artificial kagome spin ice: photoemission electron microscopy of arrays of ferromagnetic islands // Physical Review B., 2008. Т. 78. № 14. С. 144402.
3. Mól L. A. S., Moura-Melo W. A., Pereira A. R. Conditions for free magnetic monopoles in nanoscale square arrays of dipolar spin ice // Physical Review B, 2010. Т. 82. № 5. С. 054434.
4. Silva R. C. et al. Nambu monopoles interacting with lattice defects in a two-dimensional artificial square spin ice // Physical Review B., 2013. Т. 87. №. 1. С. 014414.

5. *Zhang S. et al.* Crystallites of magnetic charges in artificial spin ice // *Nature*, 2013. T. 500. № 7464. C. 553-557.
6. *Shevchenko Y., Nefedev K. V.* Magnetic states and frustrations of square spin ice in 2D XY point dipoles model // *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications, 2016. T. 247. C. 148-152.
7. *Shevchenko Y., Kapitan V., Nefedev K. V.* Specific Heat of Square Spin Ice in Finite Point Ising-like Dipoles Model // *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications, 2016. T. 245. C. 23-27.
8. *Perrin Y., Canals B., Rougemaille N.* Extensive degeneracy, Coulomb phase and magnetic monopoles in an artificial realization of the square ice model // arXiv preprint arXiv:1610.01316, 2016.