

УДК 535.015

СВЕРХИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В КОМПЛЕКСНЫХ СЕТЕВЫХ СТРУКТУРАХ

Баженов А.Ю. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Алоджанц А.П.
(Университет ИТМО)

В работе рассматривается сверхизлучательный фазовый переход в модели Изинга-Дике, для комплексных сетей, предполагающих спин-спиновое взаимодействие. Исследуются регулярные, случайные и безмасштабные сетевые структуры. Работа нацелена на выявление новых особенностей сверхизлучательного (СИ) состояния системы вызванных спиновым взаимодействием и эффекта конечного размера в сетях, при наличии парамагнитного (ПМ) – ферромагнитного (ФМ) фазового перехода. Обсуждаются фундаментальные особенности возникновения сверхизлучательной фазы в этом пределе, связанные с критическими значениями классических и квантовых параметров поля.

Введение. В настоящее время комплексные сети вызывают чрезвычайно возрастающий интерес среди научного сообщества, занимающегося продвинутыми исследованиями на стыке физики и прикладной математики. Несмотря на то, что исследования комплексных сетевых структур в значительной степени являются междисциплинарными, во многих случаях они основаны на моделях и подходах статистической физики, которые позволяют получить достаточно четкие зависимости для нетривиальных процессов в различных сетевых структурах. Модель Изинга хорошо зарекомендовала себя в таких работах. Случайная поперечная модель Изинга в комплексной сети с безмасштабным распределением степени узлов была исследована в рамках фазовых переходов сверхпроводник-изолятор. Важно подчеркнуть, что модель Изинга позволяет получить в комплексной (безмасштабной) сетевой структуре фазовый переход второго рода и явление конденсации Бозе-Эйнштейна (БЭК).

Примечательно, что критическое поведение модели Изинга проявляется из-за спин-спинового взаимодействия. Взаимодействие спинов с классическим (постоянным поперечным) внешним полем обычно изучается в рамках так называемой поперечной модели Изинга. В этой работе мы фокусируемся на проблеме, когда поперечное поле представляет некоторую переменную, которая допускает процедуру вторичного квантования. В этом случае спиновые системы могут быть представлены в виде двухуровневых осцилляторов типа естественных или искусственных двухуровневых атомов, квантовых точек и др., которые взаимодействуют с квантованным полем в рамках модели Дике. Эта модель предполагает так называемый сверхизлучательный (СИ) фазовый переход второго рода, который давно известен в области квантовой оптики.

Удивительно, но проблема фазовых переходов для модели Дике-Изинга в комплексных сетевых структурах не исследована; эта работа направлена на ее исследование. Мы собираемся выяснить роль конкретных характеристик сети, таких как степень узла, показатель степени (для безмасштабных сетей) в СИ фазовом переходе, который активирует структуру сети. В частности, важной задачей данной работы является показать, как установление сверхизлучательного поперечного квантового поля влияет на спиновое упорядочение в ортогональном z направлении.

Основная часть. Рассматриваемые сетевые структуры состоят из ансамбля N спинов (или двухуровневых систем, ДУС), которые случайным образом занимают N узлов комплексной сети, которая представляется в виде графа с нетривиальными (специфическими) свойствами, вытекающими из топологии, распределения степени узлов и других характеристик. Спины, (или ДУС) взаимодействуют с классическим (локальным магнитным) полем h_i и

квантованным полем (мы его называем сокращенно поперечным, т.к. оно связано с компонентой спина σ_i^x), которое описывается с помощью операторов уничтожения (a) и рождения (a^\dagger) фотонов. В работе нас интересуют главным образом случайные и безмасштабные сети (графы), свойства которых характеризуются функцией распределения $p(k)$. Мы рассматриваем регулярную сетевую структуру, для которой распределение степени узлов определяется дельта-функцией, случайную сетевую структуру, характеризующуюся Пуассоновским распределением и безмасштабную сеть со степенным распределением степени узлов. Рассматривая базис когерентных состояний квантового поля, используя вариационный (термодинамический) подход, были получены основные уравнения на коллективный взвешенный спин вдоль оси z и на нормированную амплитуду поля в качестве характеристик нормального-СИ и ПМ - ФМ фазовых переходов.

Выводы. Разработана статистическая модель Изинга-Дике учитывающая комплексные сетевые структуры для которых показано, что спины взаимодействуют с внешними классическим (магнитным) и квантованным (поперечным) полями, и при определенных условиях в системе могут возникать фазовые переходы по типу ПМ - ФМ, а также нормальное - СИ. Показано, что в пределе конечного (ненулевого) классического магнитного поля $H \neq 0$ сверхизлучение возникает в ферромагнитной спиновой системе в результате непрерывного фазового перехода второго рода. В этом случае переход в СИ состояние сопровождается установлением спонтанной намагниченности с квантовым поперечным полем в x направлении. Выявлены физические условия реализации рассматриваемых фазовых переходов в зависимости от эффектов конечного размера сетевой структуры (конечного числа узлов), ее статистических свойств, степени связности, т.д.