

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Ալլախվերդյան Արմեն Էդուարդի

ՈՉԿԱԶՄԱՎՈՐՎԱԾ ԳԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՎԻՃԱԿԱԳՐԱԿԱՆ ՖԻԶԻԿԱՅԻ
ԵՎ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇ ՊՐՈԲԼԵՄԱՆԵՐ

Ա.04.02- «տեսական ֆիզիկա» ճառագիտության
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների
բնկանձուի գլխավոր առարկայի հայցման առնձախոսության

ՍԵՂԱԿԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ - 1998

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Аллахвердян Армен Эдуардович

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ СИСТЕМ И ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ.

АВТОРЕФЕРАТ

ДИССЕРТАЦИИ НА СОискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности А.04.02 - теоретическая физика

ЕРЕВАН-1998

Ատենախոսության բեման հաստատվել է Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում

- Գիտական ղեկավար. Ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր Ղ. Սահակյան
- Պաշտոնական ընդհմախոսներ. Ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր Յ. Ասատրյան / ԵրՖԻ /
Ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր Է. Զուբարյան / ԵՊՀ /
- Առաջատար կազմակերպություն՝ Սանկտ-Պետերբուրգի ֆիզիկատեխնիկական ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է "29" սեպտեմբերի 1998թ. ժամը 14.00 -ին Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտի 024 մասնագիտական խորհրդում (Երևան-36, Ալիխանյան եղբայրների փ 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵրՖԻ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է "28" օգոստոսի 1998թ.

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար *Ա.Թ. Սարգսյան* Ա.Թ. Սարգսյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, Саакян Д.Б.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, Асатрян Г.М. (ЕрФИ)
доктор физико-математических наук, Чубарян Э.В. (ЕГУ)

Ведущая организация: Санкт-Петербургский физико-технический институт

Защита состоится "29" сентября 1998 в 14.00 часов на заседании специализированного совета 024 Ереванского физического института (Ереван-36, ул. Братьев Алиханян 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "28" 08 1998г.

Ученый секретарь спец. совета *Ա.Թ. Սարգսյան* А.Т. Маргарян.

Важность Темы.

Давно известно, что статистическая физика и теория информации имеют тесные связи, позволяющие рассматривать эти две дисциплины как два направления единой науки. Причина этого лежит в том, что и теория информации, основы которой были заложены К. Шенноном в конце 40-х годов нашего века, и статистическая физика, фундамент которой был заложен в конце 19-го века Л. Больцманом, Дж. Гиббсом, Дж. Максвеллом и К. Калузиусом, подходят к изучению явлений (массивов данных и макроскопических систем соответственно) с помощью статистического метода. Большое количество степеней свободы этих явлений исключает возможность их точного описания, поэтому на передний план выходят именно статистические закономерности. Далее, как хорошо известно, ряд физических задач может быть решен только с привлечением теоретико-информационных представлений. Сюда относится известная проблема демона Максвелла, введенная этим автором в 1889 году. Другой пример: известнейшая в статистической физике Н-теорема или закон возрастания энтропии допускает следующую интерпретацию: (данную известным американским физиком Эдвином Джайнсом в конце 50-х годов нашего века) информация о микросостояниях макроскопической системы может только убывать в процессе стремления к равновесному состоянию. Тому же автору принадлежит весьма убедительная попытка обоснования статистической физики с помощью теоретико-информационных представлений. Коротко говоря, можно сказать, что в случае сложной системы (в частности открытая и (или) статистическая система) соседствуют друг с другом как чисто динамические так и информационные аспекты поведения системы. Как подчеркивается Б.Б. Кадомцевым, такая взаимосвязь совершенно необходима, в частности, для правильной интерпретации уже самых основных понятий квантовой механики и статистической теории - волновой функции и энтропии. В этом духе приведем лишь один пример. Как хорошо известно, сложным системам может быть свойственна динамическая неустойчивость, т.е. большая чувствительность к небольшому изменению начальных условий. В таком случае, изучая внешние воздействия на систему, должно интересоваться не только энергией внешнего сигнала, но и его "смысловым" содержанием (т.е. формой и т.д.). В действительности, именно этот случай реализуется в явлении демона Максвелла: для правильного описания явления надо учитывать именно количество

информации, которое появляется вместе с измерением и в дальнейшем может быть использовано для уменьшения энтропии системы. С таких позиций может быть объяснен также смысл волновой функции: явление коллапса волновой функции можно объяснить, придавая последней именно чисто информационный смысл.

Диссертация посвящена исследованию определенных вопросов статистической механики неупорядоченных систем, а также некоторым проблемам физической теории информации. Подчеркнем еще раз, что *статистическая механика* и *шенноновская (т.е. вероятностная, несемантическая) теория информации* являются по сути дела одинаковыми дисциплинами, традиционное различие которых объясняется в первую очередь разными намерениями, которые преследовали ученые, заложившие в свое время фундаменты этих дисциплин. Особенно убежденными проводниками этой идеи выступали Р.Л. Стратонович (СССР) и Габор (Англия).

Задачи, которые здесь предлагаются к рассмотрению, можно условно разделить на следующие категории:

- 1) рассмотрение чисто физических проблем в статистической механике спиновых стекол и упорядоченных сильно-фрустрированных систем;
- 2) применение развитой здесь методики к исследованию вероятности ошибки при передаче сообщений через зашумленный канал; это одна из наиболее важных проблем *классической* теории информации;
- 3) рассмотрение некоторых проблем квантовой теории информации; это наука основывается на необходимости учета физических, в частности квантовомеханических, закономерностей при передаче или обработке информации;
- 4) исследование возможностей обобщения закона возрастания энтропии, который может быть также интерпретирован как закон убывания информации в процессе релаксации системы к равновесию.

Спиновые стекла - это магнетики с конкурирующими (ферромагнитными и антиферромагнитными) и замороженными (т.е. фиксированными на фоне флуктуирующих магнитных моментов) обменными взаимодействиями. Эти два фактора приводят к тому, что низкотемпературные состояния подобных систем являются в высшей степени сложными образованиями, описание которых требует привлечения совершенно новых (по сравнению с

уже имеющимися в статистической физике) методов и представлений. Из этого также следует, что количество и качество приближений, делаемых при теоретическом расчете подобных систем существенно отличается от обычных. Это привело к необычайно широкому распространению качественных или полукачественных теоретических методов, однозначность интерпретации результатов которых подчас весьма сомнительна. Так в теории спиновых стекол существует весьма распространенный метод реплик, который содержит целый ряд довольно произвольных и плохо контролируемых предположений. С другой стороны, почти вся теория спиновых стекол самым существенным образом опирается на этот метод. Таким образом, приобретают особую важность случаи, когда предсказания метода реплик могут быть строго проверены на некоторых точно-решаемых моделях.

Следует специально указать на необычайную распространенность физических систем, которые могут быть отнесены к спиновым стеклам. Кроме собственно неупорядоченных магнетиков сюда относятся упорядоченные сильно-фрустрированные системы (в частности антиферромагнетики на т.н. ненасыщаемых решетках), модели броуновского движения в случайной среде, некоторые гетерополимеры, гомополимеры в случайной среде, определенные нейронные сети (они описывают проблемы запоминания и распознавания образов для моделей искусственного интеллекта), проблемы, связанные с оптимизацией сложных комбинаторных задач, и наконец - как обсуждается в диссертации - оптимальные модели теории информации. Во всех этих системах в той или иной форме и мере реализуется случайное и (или) конкурентное взаимодействие, а физические состояния обладают макроскопической вырожденностью и сложной иерархической структурой.

В частности, в диссертации рассмотрены мультиспиновые модели в пределе большого числа одновременно взаимодействующих спинов (иначе называемые моделями типа модели Случайных Энергий), которые дают возможность довольно подробно исследовать как частные, так и некоторые общие закономерности поведения спиновых стекол. Особого внимания заслуживает фазовый переход в состояние спинового стекла. Этот фазовый переход по нескольким своим параметрам существенно

отличается от обычных переходов. В первую очередь здесь важна сложная структура фазового пространства при низких температурах: оно состоит из макроскопически большого количества чистых состояний (или эргодических компонент) разделенных бесконечно большими (в термодинамическом пределе) барьерами. Причем надо специально подчеркнуть, что никакой специальной симметрией эти чистые состояния не связаны. Для примера напомним, что фазовая структура обычного ферромагнетика с дискретной группой симметрии (к примеру модели Изинга) состоит из небольшого числа чистых состояний, связанных друг с другом преобразованиями нарушенной симметрии.

Далее, в мультиспиновых моделях фазовый переход в спиновое стекло объединяет свойства переходов первого и второго родов. По параметру порядка эти переходы первого рода, т.е. параметр порядка меняется скачкообразно, а по другим термодинамическим величинам это переходы второго рода, т.е. разрывно изменяются только вторые производные термодинамического потенциала. Такие крайне необычные переходы связаны со специальными свойствами спинового стекла, в частности, с наличием макроскопически большого числа состояний ниже точки перехода.

Мы изучили фазовую структуру разбавленной p -спиновой стекольной модели. Надо специально подчеркнуть, что не делались никакие неконтролируемые приближения или предположения, а наоборот - термодинамические величины вычислялись математически совершенно строгим методом. Это стало возможным благодаря величине p (число одновременно взаимодействующих спинов), которая предполагалась значительно больше единицы.

Кроме того нами было проведено детальное исследование конкретного механизма термодинамического предела в подобных системах - исследовались термодинамические величины при очень большом, но тем не менее конечном числе степеней свободы. Это изучение дает возможность уловить некоторые эффекты, которые оказываются очень важными для правильного понимания мезоскопических явлений. Исследования модели преследуют тройную цель. В первую очередь, исследовать механизмы спин-стекольных фазовых переходов и структуру низкотемпературных состояний. Во-вторых, посредством строго метода

проверить предсказания полученные методом реплик. И наконец в третьих, спиновые стекла могут применяться в теории информации, в частности исследование поправок конечного объема в ферромагнитной фазе и условий существования этой фазы, позволяет рассматривать эту модель спинового стекла как некоторую оптимальную систему классической теории информации. В этом еще раз проявляется единство методов статистической физики и теории информации.

С другой стороны, должно подчеркнуть удивительно широкий спектр применений моделей Случайных Энергий в самых различных областях статистической физики. Так модели этого типа интенсивно применяются в теории сворачивания протеина, исследования вулканизационных свойств каучуковых материалов, броуновского движения в случайной среде, моделировании некоторых биофизических процессов, и т.д.

Заслуживает внимания также исследование систем, которые демонстрируют спин-стекольное поведение не будучи при этом аморфными магнитными материалами. Такое рассмотрение, очевидно, позволит установить потенциально универсальный характер закономерностей, которые первоначально наблюдались именно в традиционных спин-стекольных материалах, таких как NiMn, CuAu и т.д. Этот вопрос был поставлен на самой заре развития теории аморфных магнетиков, но свое удовлетворительное разрешение начал получать только совсем недавно. В частности, в нашей работе было впервые показано на примере трехчастичной модели Изинга на иерархической решетке Хусими (такие решетки не имеют никакого непосредственного физического смысла, а реализуют собой определенный приближенный метод для реальных решеток), что возможно существование сплошного спектра фазовых переходов в сильно-фрустрированной модели без замороженного беспорядка. Это свойство (сплошной критический режим на языке экспериментаторов) является одним из наиболее интригующих свойств обычных спиновых стекол, которое было весьма обстоятельно изучено на эксперименте.

Как известно статистическая механика изучает замкнутые макроскопические системы, или же (что почти эквивалентно) системы, достаточно слабо взаимодействующие с внешним термостатом (т.е. с внешним равновесным макроскопическим объектом). В этих случаях

система может быть описана распределением Гиббса или микроканоническим распределением. Как было бы не трудно потом рассчитывать конкретные эффекты на основе моделей подобных систем, исходное распределение всегда предполагается известным. Однако должно учесть, что равновесные (или стационарные) состояния могут также реализовываться в открытых системах, взаимодействие которых с окружением не может считаться малым. Равновесие в подобных случаях устанавливается при наличии неконсервативных сил, что исключает возможность лагранжева или гамильтонова описания (в переменных самой системы). Однако с другой стороны открытые системы очень важны на практике; кроме важности собственно в теоретической физике, они интенсивно изучаются в таких разнообразных областях как биология и биофизика (в частности статистическая теория нейронных сетей), теория магнитных и структурных фазовых переходов в облучаемых или сильно неравновесных образцах, статистической теории горения, и т.д. Надо также учесть, что сама по себе замкнутость (или очень слабое взаимодействие с окружением) являются свойствами приближенными, и всегда интересно знать насколько существенна для качественного поведения системы точность подобных приближений. Одна из основных проблем в области статистической теории открытых систем - это выяснить какие здесь существуют фазовые переходы (интересно в частности выяснить, насколько свойства подобных систем отличаются от соответствующих аналогов в теории фазовых переходов в замкнутых макроскопических системах). Очевидно, что т.к. стационарное распределение не известно а priori, то рассмотрение должно стартовать с микрокопических уравнений движения.

Нами рассматривалась спин-стекляная открытая система, где открытость реализуется посредством асимметричности обменных интегралов взаимодействия. Такое свойство характерно для облучаемой или неравномерно нагреваемой системы, а также для нейронных сетей, которые описываются соответствующими спин-стекляными моделями. Нами получено, что если правильно учитывать частично равновесный характер неупорядоченной системы, то возникает спин-стекляная фаза с весьма неожиданными свойствами. К числу этих последних относятся род

перехода и существование критического замедления флуктуаций при очень низкой температуре. Эти свойства были изучены на примере сферической модели Изинга. Нет никаких сомнений, что класс универсальности этого перехода совершенно нов и в этом направлении имеется еще широкое поле деятельности.

H-теорема или закон возрастания энтропии (или убывания свободной энергии) уже была упомянута в начале этого автореферата, как типичнейший пример физического закона, который допускает важную теоретико-информационную интерпретацию. Вопрос правильного понимания и исследования следствий этого закона является одной из наиболее важных проблем современной статистической физики; в этой связи достаточно упомянуть, что хорошо известный Второй Закон Термодинамики является лишь частным случаем вышеуказанной теоремы. Дело здесь в той переворотной роли в физике и в смежных областях (такой, к примеру, как философия естествознания), которую сыграли понятия необратимости, различения макроскопического и микрокопического аспектов поведения, статистического описания, сочетания динамического и информационного аспектов поведения. H-теорема была введена в работе Л.Больцмана, посвященной молекулярно-кинетическому обоснованию термодинамических положений выдвинутых Клаузиусом и Томсоном. После этого происходило интенсивное развитие как в направлении правильной и исчерпывающей интерпретации этого закона, так и в направлении по возможности полного понимания всех его следствий. Оба эти направления интенсивно развиваются и в наше время (как и положено любой действительно фундаментальной концепции). Мы коснемся здесь только второго направления: принимая H-теорему в ее более или менее традиционной формулировке, понять к каким следствиям она приводит. Как хорошо известно, корректное и свободное от противоречий определение энтропии может быть дано только в рамках квантовой теории, поэтому особенную важность приобретают исследования вопроса именно в рамках этой теории. В наиболее общем виде (предложенном Шлегелем и Линдбладом) H-теорема вводит некоторый совершенно четко определенный класс макроскопических систем и определяет функцию, которую уместно назвать потенциалом или

обобщенной энтропией (обычная энтропия получается в качестве частного случая). Эта функция обладает следующими свойствами: 1) является инвариантом унитарного преобразования; 2) возрастает при огрублении фазового пространства, т.е. при потере информации об определенных деталях поведения системы; 3) максимизируется в стационарном состоянии системы; 4) может только возрастать при релаксации системы к равновесию. В частности в случае замкнутой системы с фиксированной энергией получаем обычную энтропию, а стационарным состоянием здесь является микроканоническое распределение. Другой пример: минус свободная энергия, которая является потенциалом состояния макроскопической системы при фиксированных переменных объема и температуры. Имея ввиду возрастание потенциала (в частности энтропии), зададимся следующим вопросом: можно ли оценить, оставаясь в рамках общего случая, скорость возрастания потенциала? Очевидная важность вопроса не могла не привлечь к нему повышенного внимания. Однако несмотря на определенное продвижение, не были исследованы важные, модельно-независимые случаи поведения квантовых статистических систем. Этот пробел был заполнен в нашей работе, где впервые было указано на существование совершенно общей и модельно-независимой оценки скорости возрастания обобщенной энтропии.

Как уже было подчеркнуто выше, все материальные носители информации являются физическими системами, т.е. законы физики должны учитываться в любой реалистической теории передачи и переработки информации. Это проблема одна из аспектов общего соответствия теории информации и физики (в частности статистической) о которой говорилось выше. В частности, учет квантовомеханических закономерностей при передаче и обработке сообщений начал проводиться уже в начале 60-х годов нашего века (А.Н. Колмогоров, А.С. Холево, Л.Б. Левитин, В.В. Митюгов (СССР), Г. Гордон, Д. Габор, Л. Бриллюэн (США), К. Марко (Италия), У. Такахаси (Япония)). Приведем беглый перечень некоторых проблем, которые должны рассматриваться с точки зрения физики в любой реалистичной теории информации: наличие внешнего шума в канале; не полная ортогональность квантовых состояний, реализующих материальный носитель информации (это всегда приводит к дополнительным помехам, неучитывание которых может привести к совершенно парадоксальным

выводам, не согласующимся с практикой); необходимость квантовомеханического измерения в конце информационной цепи, именно таким образом в конце концов должна получаться информация, закодированная передатчиком в те или иные характеристики квантовомеханической системы. Интенсивное проникновение методов и понятий квантовой и статистической механики в теорию информации привело к созданию новых дисциплин: квантовой, а затем и физической теории информации, где объединяются воедино теория информации, квантовая механика и статистическая механика.

Однако кроме квантовых теоретико-информационных систем, где имеется только один посылатель информации и один ее получатель, заслуживают внимания и такие системы где несколько относительно независимых источников информации посылают свои сообщения одному адресату (т.н. каналы с множественным доступом). Среди многих других приведем только один пример, где может реализоваться подобная схема связи. В телесвязи телеизображение сначала "расщепляется" на отдельные сигналы передающие звук и изображение. Затем эти сигналы посылаются адресату на близких, но тем не менее разных частотах. Т.е. они могут отдельно и независимо подвергаться воздействию внешнего шума, перепутываться друг с другом из за наличия рассеянного излучения среды, и т.д. Адресату нужно восстановить два отдельных сигнала в единое осмысленное изображение, что в любом случае требует достаточно низкого уровня внешнего шума и рассеяния. Впервые приемлимые модели квантовых каналов с множественным доступом были введены в работе автора. Там же были обсуждены как общие закономерности, касающиеся пропускной способности подобных систем (максимальная информация, которую можно передать в единицу времени в режиме надежной связи) так и конкретные случаи, когда информация передается посредством состояний электромагнитного поля. Исследовалось также влияние внешнего шума. У предлагаемой диссертации следующие цели.

1) Продемонстрировать на примере точно-решаемых моделей некоторые основные особенности спиновых стекол. С этой целью рассматриваются р-спиновая стекольная модель в пределе больших r и некоторые ее обобщения.

- 2) Изучить закономерности поведения открытых спин-стекольных систем, в частности систем с асимметричными константами связи. Системы этого
- 3) типа очень важны как в приложениях, так и для понимания общетеоретических закономерностей поведения спиновых стекол.
- 4) Рассмотреть возможность существования спин-стекольной фазы у систем без замороженного беспорядка. Если окажется, что основные черты канонических спиновых стекол переносятся на этот случай, то это будет достаточно весомым аргументом в пользу сильной универсальности спин-стекольных явлений вообще.
- 5) Изучение многотерминальных систем в квантовой теории информации. Системы подобно весьма распространены на практике, в частности каналом с множественным доступом является телесвязь.
- 6) Рассмотреть возможность вычисления или оценки скорости возрастания энтропии или убывания свободной энергии в неравновесной квантовой статистической физике. Здесь существенно, что мы не ограничиваемся какими бы то ни было приближениями и стараемся рассмотреть проблему в общем случае.

Научная Новизна.

1. Изучена фазовая структура р-спиновой стекольной модели с учетом поправок конечного объема. Найдены важные применения этого результата в теории информации.
2. Впервые введена и исследована модель из двух взаимодействующих стекольных подсистем. В частности проведено исследование важного вопроса о возможности совместного для обеих подсистем спин-стекольного фазового перехода. Также подробно изучены поправки конечного объема.
3. Впервые введен механизм обеспечивающий фазовый переход в существенно открытой (с асимметричными константами связи) спин-стекольной системе. Изучены свойства фазового перехода в этой открытой системе.
4. На иерархической решетке Хусими была исследована сильно-фрустрированная модель без замороженного беспорядка. На примере этой системы получен сплошной спектр фазовых переходов - явление,

которое до сих пор было характерно исключительно для моделей с беспорядком.

5. Доказана обобщенная H-теорема в квантовой статистической механике. Она позволяет устанавливать нижнюю границу для скорости возрастания
6. энтропии (скорости убывания свободной энергии) в случае макроскопической динамики произвольной квантовой системы.
7. Впервые введена модель квантового канала с множественным доступом. Получен ряд общих соотношений для пропускной способности (максимальной скорости передачи информации) для подобной системы. Исследованы конкретные случаи передачи информации с помощью определенных состояний электромагнитного поля.

Прикладное Значение работы.

Спиновые Стекла имеют большое количество самых разнообразных применений. Кратко перечислим их: неупорядоченные магнетики и магнетики со сложными обменными взаимодействиями, магнетики на ненасыщаемых решетках; нейронные сети и модели искусственного интеллекта; модели, реализующие оптимальные конструкции теории информации; гетерополимеры и сложные белки. Такое разнообразие применений связано с определенной универсальностью поведения систем, где налицо конкурентное взаимодействие. То же, но с пожалуй большим упором на применения в теории нейронных сетей можно сказать об открытых стекольных системах. Они начали рассматриваться как раз в связи с применениями в этой области. При описании магнитных степеней свободы использован язык изинговских спинов, который также является достаточно реалистичным (описывает магнитный момент сильно анизотропного магнетика, компоненту бинарного сплава, конфигурационную степень свободы полимера, состояние одного нейрона). Приведенные исследования задач квантовой теории информации также охватывают достаточно широкую приложений в теории оптической связи и квантовой радиотехнике. В частности, подробно исследованные многотерминальные системы имеют самое непосредственное отношение к передаче информации по волноводам, многоканальным кабелям и другим многотерминальным системам.

На защиту представлены

1. Исследование фазовой структуры р-спиновой стекольной модели с учетом поправок конечного объема.
2. Исследование двух взаимодействующих стекольных подсистем. Возможность существования фазовых переходов в состоянии спинового стекла двух совершенно различных типов. Фазовая структура и поправки конечного объема для этой модели.
3. Доказательство существования сплошного спектра фазовых переходов для сильно-фрустрированной системы без замороженного беспорядка.
4. Физический механизм приводящий к появлению конечнотемпературного спин-стекольного перехода в существенно открытой неупорядоченной системе (с асимметричными константами связи). Свойства этого фазового перехода на примере сферической модели Изинга.
5. Обобщенная H-теорема в квантовой статистической физике, оценки скорости роста энтропии (убывания свободной энергии) некоторых физических систем.
6. Постановку задачи и детальное изучение на разных уровнях общности квантовых каналов с множественным доступом. Получение соотношений о максимальных пропускных способностях подобных каналов как в общем случае так и в случае, когда в качестве материальных носителей информации используются определенные состояния электромагнитного поля.

Апробация Работы

Основные результаты диссертации опубликованы в журналах *Physical Review E*, *Теоретическая и Математическая Физика*, *Журнал Теоретической и Экспериментальной Физики*. Представлялись на VIII-ой Международной Конференции по Математической Физике (Нор-Амберд Армения, 1997) и I-ой Международной Конференции по общим проблемам физической теории информации (Сан-Франциско, США, 1998), Международной конференции по общим проблемам статистической физики (Рутгерс, США, 1996).

Все представленные результаты были обсуждены на семинарах Ереванского Физического Института, а отдельные результаты и работы на следующих семинарах: семинар Института Проблем Передачи Информации (руководители: Р. Добрушин, Б. Бассальго, Москва, 1996), семинар

Парижской Нормальной Школы (руководитель: Б. Деррида, Париж, 1996, 1998), семинар Французского центра атомных исследований (руководители: Г. Бушо, Н. Сурлас, Жиф-Сюр-Ивет, 1996, 1998), семинар Римского университета Ла Сапиенца (руководитель Г. Париси, Рим, 1997). Семинар университета Рутгерса (руководитель Ж. Лейбовиц, Рутгерс, США, 1996).

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из 140 страниц включая 3 фигуры. Список литературы состоит из наименований.

Содержание работы.

Во введении дается общий обзор состояния темы, даются также постановки задач, исследуемых в диссертации, указываются все нетривиальные методологические моменты. В частности, введение начинается с подробного освещения общих связей между статистической физикой и теорией информации.

В первой главе исследуется р-спиновая стекольная модель. Исследуется фазовая структура с учетом поправок конечного объема. Находятся три основные фазы: парамагнитная, которая реализуется только при достаточно высоких температурах, спин-стекольная, реализующаяся при достаточно низких температурах, и ферромагнитная, для существования которой необходима достаточно большая величина ферромагнитной компоненты обменного взаимодействия. Находятся также поправки конечного объема и различные подфазы, которые могут быть обнаружены с помощью этих последних. Показывается, что некоторые поправки конечного объема приводят к реализации (посредством данной модели) определенных оптимальных конструкций классической теории информации.

Во второй главе исследуется модель состоящая из двух взаимодействующих стекольных подсистем. Здесь интересны в первую очередь сценарии фазовых переходов, которые могут реализовываться в рамках данной модели. Получено, что спин-стекольная фаза может возникать как одновременно в разных подсистемах, так и при разных температурах. При увеличении константы межподсистемного

взаимодействия один режим сменяет другого. И для данной модели исследуется структура поправок конечного объема.

В третьей главе вводится модель спинового стекла с асимметричными константами связи, которая описывает существенно открытые стекольные системы (скажем аморфный сплав под облучением) и имеет весьма солидные применения в теории нейронных сетей. Здесь доказывается существование фазового перехода при правильном учете неравновесного характера неупорядоченной системы. Оказывается, что свойства этого фазового перехода достаточно неожиданны.

В четвертой главе исследуется трехспиновая модель Изинга на иерархической решетке Хусими. Основной результат доказательство того, что в данной сильно-фрустрированной системе без замороженного беспорядка возможно существование сплошного спектра фазовых переходов. Это последнее явление до этого было исключительно характеристикой спиновых стекол, т.е. систем с замороженным беспорядком. В частности, полученный результат наводит мысль о широкой универсальности спин-стекольных закономерностей.

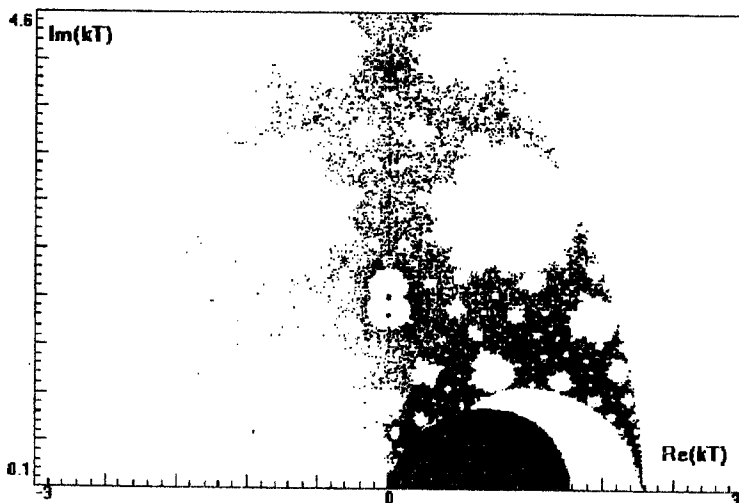


Рисунок: Точки фазовых переходов на комплексной температуры для модели Изинга на иерархической решетке Хусими. Комплексные

температуры являются здесь лишь методом, который позволяет устанавливать наличие неаналитичности при реальных температурах.

В пятой главе рассматривается модель многотерминального квантового канала (введенная автором диссертации и его научным руководителем). Здесь рассматриваются как общие ограничения на пропускные способности подобной системы, так и конкретные случаи передачи информации с помощью состояний электромагнитного поля. Рассчитывается влияние внешнего шума на вышеуказанные пропускные способности.

В шестой главе рассматривается возможность усиления Н-теоремы в неравновесной квантовой статистической теории. Полученный результат дает возможность оценить скорость возрастания энтропии (или убывания свободной энергии), причем в рамках статистической теории не делаются какие либо специфические предположения или аппроксимации.

В седьмой главе подводятся итоги работы.

Основные результаты диссертации.

- 1) Исследуется модель р-спинового стекла. Получены подробные результаты о возможных фазах модели с учетом поправок конечного объема, структура которых ответственна за появление некоторых новых фаз. Результаты исследования в ферромагнитной и спин-стекольных фазах применяются в исследовании оптимальных систем классической теории информации.
- 2) Исследуется модель состоящая из двух взаимодействующих стекольных подсистем. Здесь получены два разных сценария фазовых переходов: если взаимодействие достаточно слабо то возможен неожиданный режим поведения, где подсистемы переходят в состояние спинового стекла при разных температурах. При сильном же взаимодействии есть только одна температура подобного перехода. Получены поправки конечного объема во всех фазах модели.
- 3) На примере модели Изинга на иерархическом дереве Хусими доказывается, что в сильно-фрустрированной системе без замороженного беспорядка возможно существование сплошного множества фазовых переходов.

- 4) Доказывается, что неупорядоченные системы с асимметричными константами связи могут иметь фазу спинового стекла, если только правильно учитывать частично равновесный характер неупорядоченной системы. Этот факт имеет достаточно общий и модельно-независимый характер, а конкретные свойства фазового перехода изучаются на примере сферической модели Изинга.
- 5) Рассматривается квантовый канал с множественным доступом. Получаются общие соотношения о пропускных способностях целого класса подобных систем. Затем исследуются и точно вычисляются пропускные
- 6) способности в случае передачи информации с помощью когерентных и сжатых состояний электромагнитного поля. Вводится внешний шум и оценивается его влияние на пропускные способности.
- 7) Доказывается обобщенная H-теорема в неравновесной статистической теории. Она позволяет оценить скорость возрастания энтропии (убывания свободной энергии) в наиболее общем случае, без каких либо модельных или аппроксимационных предположений.

Список литературы.

- 1) E.T. Jaynes, *Probability Theory: The Logic of Science*. (будет опубликовано); *Phys.Rev., Information Theory and Statistical Mechanics*, **106**, 620, (1957); *Phys.Rev., Information Theory and Statistical Mechanics II*, **108**, 171, (1957);
- 2) E.T. Jaynes, "Papers on Probability, Statistics and Statistical Physics", edited by R.D. Rosenkrantz, (Riedel, Dordrecht, Holland, 1983);
- 3) Б. Б. Кадомцев, *Динамика и Информация*, Москва, Издательство УФН, 1998.
- 4) Б.Б. Кадомцев, *Динамика и Информация*, Успехи Физических Наук, **108**, 556, 1997.
- 5) G. Parisi, M. Mezard, M. Virasoro, *Spin-Glasses and Beyond*, World Scientific, 1987.
- 6) K. Binder, A.P. Young, *Spin-glasses: Expirmental facts, Theoretical Concepts, and Open Questions*, *Rev. Mod. Phys.*, **58**, 801, (1986).
- 7) В. В. Митюгов, *Физическая Теория Информации*, Москва, Советское Радио, 1978.

- 8) C.M. Caves, P.D. Drummond, *Quantum channels with bosonic communication communication rates*, *Rev. Mod. Phys.*, **66**, 481, (1994).
- 9) И. Чисар, Я. Кернер, *Теория Информации: Теоремы Кодирования для дискретных систем без памяти*, Москва, Мир, 1985.
- 10) Р. Л. Стратонович, *Теория Информации*, Москва, Наука, 1977.
- 11) F.Shlogl, *Stochastic Measures in Non-equilibrium Thermodynamics*, *Phys. Rep.*, **62**, 268, (1980).
- 12) Р. Л. Стратонович, *Нелинейная Неравновесная Термодинамика*, Москва, Наука, 1985.
- 13) Л. Бриллюэн, *Наука и Теория Информации*, Гостехиздат, 1960.
- 14) Р.П. Поплавский, *Термодинамика Информационных Процессов*, Москва, Наука, 1978.
- 15) Ю.Л. Климонтович, *Введение в Статистическую Теорию Открытых Систем*, Москва, Прогресс, 1997.

Список опубликованных работ по теме диссертации.

- 1) A.E.Allahverdyan, D.Saakian, *Finite size corrections in dilute Derrida's model* *Nucl. Phys.(B)*, **498**, 604, (1997).
- 2) А.Э. Аллахвердян, Д.Б. Саакян, *Модель из двух р-спиновых систем с фиксированной корреляцией между их спиновыми конфигурациями*, *ЖЭТФ* **84(4)**, 780, (1997).
- 3) А. Е. Allahverdyan, D. B. Saakian, *Multi-access channels in quantum information theory*, Published in *Proceedings of First NASA International Conference on Quantum Computation and Quantum Communication (Palm Springs, February 1998)* (appearing in a special issue of the journal *Chaos, Solitons and Fractals*, 1998). The enlarged version to be published also in the journal "Theoretical and Mathematical Physics"; e-print xxx.lanl.gov quant-ph/9712034.
- 4) А.Э. Аллахвердян, Д.Б. Саакян, *Поправки конечного объема к намагниченности в спин-стекольной фазе разбавленной модели Дерриды*, *Теоретическая и Математическая Физика*, **109**, 1574, (1996).
- 5) 8. А.Е. Allahverdyan, D.B. Saakian, *Strengthened Lindblad inequality: Applications in non equilibrium thermodynamics and quantum information theory*. *Phys.Rev. E*, **58**, 1148, (1998).

- 6) 9. A. E. Allahverdyan, N. S. Ananikian, and S. K. Daltakian, *Singularities at a dense set of temperature in the Husimi tree*, Phys. Rev. E, 57, 2452, (1998).
- 7) A.E. Allahverdyan, D.B. Saakian, *Spin-glass model with partially annealed asymmetric bonds*; to be published in Phys.Rev.E, October, 1998.
- 8) A.E. Allahverdyan, *Optimal coding with discrete spins*, Preprint YerPhi, 1515-(15), (1998).

Armen E. Allahverdyan

Some Problems From Statistical Physics of Disordered Systems and Physical Information Theory.

Resume

The corresponding thesis is devoted to some common problems of physical information theory and statistical physics. The connections between these two fields are well-known, particularly they include the justification of foundations of equilibrium statistical mechanics, the common interpretation of some problems in non-equilibrium statistical mechanics, investigation of general limitations that physics (and particularly statistical physics and quantum theory) imposes to communication and transformation of information.

In the thesis four types of problems are considered: investigation of statistical mechanics of some spin-glass models (the p-spin mean-field models in the limit of large p, and some its physically relevant modifications; strongly frustrated Ising model in the hierarchical tree and without quench disorder; the mean-field model of an open spin-glass system), the application a part of obtained results to several very important questions in classical information theory (the probability of error when information is transmitted by a noisy channel), investigation of multiaccess channels in quantum information theory, and proving a strengthened H-theorem in quantum non-equilibrium statistical theory (with an application of this result to quantum information theory).

We have investigated the p-spin dilute glassy model by the mean-field approximation. The statistical physics of the model is investigated by a mathematically rigorous method (connected with an assumption of large p) that allows to surmount all difficulties and ambiguities of the replica method. The phase structure is considered and finite-size effects are calculated. There are three different phases: spin-glass with one step of Replica Symmetry Breaking, ferromagnet and paramagnet. After this the results are applied to some fundamental problems in classical information theory: by investigating finite-size corrections in the ferromagnetic phase we compute the probability of an error in a procedure of decoding when classical information is transmitted by the corresponding channel.

We introduce the model of two coupled spin-glass subsystems and discuss the different possibilities of paramagnet-spin-glass, paramagnet-ferromagnet, and ferromagnet-spin-glass phase transitions in this case. It was shown that there are two different scenarios for spin-glass phase transition in this case: in the first scenario one subsystem can be in the spin-glass phase when the other is in the paramagnetic one, in the second case only one temperature of the spin-glass phase transition exists for both subsystems.

We have considered the spin-glass model with asymmetric coupling constants and have shown that in this case a finite-temperature spin-glass phase transition is possible if the coupling constants are partially annealed (this last property can be easily realized in practice). The properties of this phase transition is investigated also.

There are some physical hints that a fully-frustrated antiferromagnet can demonstrate some essential properties of the spin-glass physics. We have considered the fully-frustrated multi-spin Ising antiferromagnet in the hierarchical Husimi tree (hierarchical trees have not an independent physical meaning but represent some mean-field approximation of real lattices). Indeed, it was shown that at least two main ingredients of the spin-glass behavior - strong dependence from boundary conditions and a whole set of the phase transitions - take place in this case.

H-theorem is one of the most-known and fundamental relations in non-equilibrium statistical physics. We generalize this theorem, and our results allow to derive conclusions not only about increasing of entropy or decreasing of free energy but also about speeds of these processes.

It is well known that the laws of physics and particularly quantum mechanics should be taken into account in any reasonable theory of information transmission. In this spirit we introduce the physical models of multi-access quantum channels. We have described the theory of these models in different degrees of generality, compute the capacities of the corresponding channel, and discuss information transmission if an external noise (which is modeled as some quantum stochastic process) is added to a signal.

Արմեն Ալլահվերդյան

Ոչկազմավորված սիստեմների վիճակագրական ֆիզիկայի և ֆիզիկական ինֆորմացիայի տեսության որոշ պրոբլեմներ

Ամփոփում

Ներկայացվող թեզում դիտարկվում են որոշ հարցեր որոնք ընդհանուր են թե վիճակագրական ֆիզիկայի և քվանտային տեսության թե ինֆորմացիայի տեսության համար: Այս գիտությունների կապը հայտնի է վաղուց և ընդգրկում է հետևյալ ուղղություններ՝ ինֆորմացիայի տեսության կիրառումը վիճակագրական ֆիզիկայի ֆունդամենտալ հարցերի պարզաբանման մեջ, ոչհավասարակշիռ վիճակագրական ֆիզիկայի H-թեորեմի և ինֆորմացիայի տեղափոխման օրինաչափությունների կապը, ֆիզիկայի (մասնավորապես վիճակագրական ֆիզիկայի և քվանտային տեսության) օրենքների ազդեցությունը ինֆորմացիայի տեղափոխման և մշակման տեսության վրա:

Մասնավորապես, թեզում քննարկվում են հետևյալ չորսը տիպի պրոբլեմներ՝ ուսումնասիրվում է սպինային ապակյա տիպի մոդելների վիճակագրական ֆիզիկան (p-սպինային ապակու մոդելը բավականին մեծ p-ի դեպքում և նրա որոշ կարևոր տարբերակները, բաց սպինային ապակու սիստեմի մոդելը, Իզինգի մոդելը ուճել

Ֆրոստրացիաների դեպքում և առանց պատահական փոխազդեցության կոնստանտների); այս վերջին արդյունքների մի մասը կիրառում է դասական ինֆորմացիայի տեսության պրոբլեմներին (իետազոտվում է սխալի հավանականությունը երբ ինֆորմացիան տեղափոխվում է արտաքին աղմկի առկայության դեպքում): Զվանտային ինֆորմացիայի տեսության մի շարք սխտեմներ (որոնք պարունակում են մի քանի ինֆորմացիայի աղբյուրներ և մի ընդունիչ): և վերջապես ուսումնասիրվում է H-թեորեմի ուժեղացումը ոչհավասարակշիռ քվանտային վիճակագրական տեսությունում (այս վերջին արդյունքը նույնպես կիրառվում է քվանտային ինֆորմացիայի տեսությունում):

Մենք ուսումնասիրել ենք p-սպինային ապակու մոդելը մեծ p-երի դեպքում: Այս վերջին հանգամանքը թույլ է տալիս օգտագործել խիստ մեթոդ մոդելի լուծման համար: Գտնվել են երեք փուլ՝ սպինային ապակու (ռեպլիկաների սիմետրիայի սպոնտան խախտման առաջին աստիճանով), ֆերոմագնետիկ և պարամագնետիկ: Մանրամասնորեն ուսումնասիրվել են վերջավոր ժամալի էֆեկտները այս փուլերում: Այնուհետև ցույց է տրվել որ վերջավոր ժամալի էֆեկտները ֆերոմագնետիկ փուլում կարևոր կիրառություններ ունեն դասական ինֆորմացիայի տեսությունում:

Գիտարկվել է մի մոդել, որը կազմված է երկու փոխազդող սպինային ապակու համակարգերից: Այստեղ ցույց է տրվում, որ կարող են գոյություն ունենալ երկու տարբեր տիպի փուլային անցումներ սպինային ապակու փուլ: Ուսումնասիրվել է հակաֆերոմագնետիկ իզինգի մոդելը Գուսմիի ցանցի վրա: Այստեղ չկան պատահական փոխազդեցություններ ինչպես սպինային ապակու մոդելներում, բայց առկա է մի ուրիշ շատ կարևոր հանգամանք՝ ֆրոստրացիաներ: Մենք ցույց ենք տալիս, որ այս մոդելում կարող են տեղի ունենալ փուլային անցումներ սպինային ապակու փուլ անընդհատ օրենսդրականների տիրույթում:

Գետազոտվել է բաց սպինային համակարգ, որը կարևոր կիրառություններ ունի ինչպես ոչկազմավորված համակարգերի տեսական ֆիզիկայում այնպես էլ նեյրոնային ցանցերի տեսությունում: Ցույց է տրվում, որ այստեղ հնարավոր են բավականին անսպասելի փուլային անցումներ, ուսումնասիրվում է նրանց հատկությունների մի մասը:

Չայտնի է ինչպիսի կարևոր դեր է խաղում վիճակագրական տեսությունում H-թեորեմը: Մենք ապացուցում ենք այս թեորեմի ուժեղացված տարբերակը, որը թույլ է տալիս գնահատել ենտրոպիայի աճի (և ազատ էներգիայի նվազման) արագությունը:

Գետազոտվում է քվանտային ինֆորմացիայի տեսության մի համակարգ, որը կազմված է ինֆորմացիայի մի քանի աղբյուրներից և մեկ ընդունիչից: Այս դեպքը կարևոր կիրառություններ ունի: Գետազոտվում են մաքսիմալ ինֆորմացիայի տեղափոխման արագությունները: Ուսումնասիրվում է նաև դեպքը, երբ առկա է արտաքին աղմուկ:

Տպագրված է ՀՀ ԲՈՒՀ-ի պապրվերով

Համըմված է տպագրության 25.08.98 թ: Պատվեր 185: Տպաքանակ 60:

Տպագրված է «Դավիթ» կոոպերատիվի տպարանում:
Երևան, Տերյան 72: