

Многочастичная квантовая запутанность – «прорывное» направление в науке

В.В. Кузнецов

Институт нефтегеологии и геофизики СО РАН г. Новосибирск,

E-mail: ikir@academ.org

(Получена 9 ноября 2010; опубликована 15 января 2011)

В статье показано, что использование идеи многочастичной квантовой запутанности в науках, далеких от квантовой механики, в частности, в физике Земли и, конкретно, в физике землетрясения, - возможно позволит решить некоторые актуальные проблемы, которые в настоящее время решения не имеют.

"... важно сконцентрировать имеющиеся ресурсы на основных прорывных направлениях..."

В.В. Путин.

Введение

Мы живем в мире, о котором знаем ещё очень мало. В природной среде, живой и неживой природе, - происходят события, которые мы, с точки зрения классической физики, – объяснить не можем. Например, в чем состоит физика таких явлений как землетрясение, или шаровая молния? Какова физика вулканов, как они возникают, почему они встречаются на всех планетах и спутниках, почему на Ио (спутнике Юпитера) давно извергается супервулкан, и почему подобные вулканы были на Земле раньше, а сейчас - нет? Мы знаем, что многие процессы, происходящие в Природе, являются фликкер-шумом и подчиняются общим правилам самоорганизации, однако, физика этих явлений так и не известна. Здесь озвучена только ничтожная толика возникающих вопросов. Многие наблюдения природных, - да и социальных явлений – показывают, что они происходят, по не всегда понятной нам причине, – одновременно на огромных пространствах, или при громадном скоплении живых организмов, в том числе и людей. Такие явления, когда множество однотипных процессов происходят одновременно, - принято считать кооперативными. Природа кооперативности, несмотря на то, что это явление давно используется в науке, до сих пор так и не вскрыта.

Кооперативные явления в многочастичной системе связаны с когерентным (согласованным) взаимодействием большого числа частиц, иначе говоря, с развитыми многочастичными корреляциями. Простейший пример кооперативных явлений, это гидродинамические движения (звук, теплопроводность и т. п.). Причина таких движений состоит в локальных изменениях термодинамических характеристик (плотности, давления и т. д.), а также скорости и имеет достаточно большие пространственные и временные масштабы (необходимые для установления локального равновесия).

Кооперативные явления происходят как в равновесных физических системах, так и в системах различной природы (физических, химических, биологических и т. п.), находящихся вдали от термодинамического равновесия. Равновесные кооперативные явления можно разделить на две группы: критические явления, связанные с различными фазовыми переходами, и когерентные явления, связанные с установившейся макроскопической упорядоченностью. Вполне возможно, что в основе кооперативных явлений, явлений самоорганизации и физики фликкер-шума - положены принципы т.н. квантовой запутанности...

В современной физике в последние годы проблема квантовой запутанности стала широко обсуждаться в физических журналах в основном в связи с реализацией идеи построения квантового компьютера. Квантовая запутанность (нелокальность, сцепленность) основана на использовании принципа неопределенности Гейзенберга и неслучайности корреляций между двумя наблюдателями, производящими измерения над квантовыми состояниями, известной как парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР). Среда, при её запутанности (нелокальности) становится когерентной (кооперативной). Она может быть описана некой волновой функцией и, когда происходит редукция этой функции (декогеренция, смерть запутанности и т.п.), то этот процесс распространяется мгновенно независимо от величины объекта, вовлеченного в квантовую запутанность. (По мнению некоторых авторов, скорость редукции волновой функции не должна превышать скорость света, но для наших моделей из области физики Земли, о которых пойдет речь ниже, этот момент не столь принципиален). Приведем несколько примеров из этой области физики, которая в течение последних нескольких лет активно развивается как в плане постановки экспериментов, так и в теоретическом плане, однако прежде мне хотелось бы остановиться на причине, по которой у меня возник очень серьезный интерес к квантовой многочастичной запутанности. Причем, именно к многочастичной квантовой запутанности (МКЗ), т.к. парадокс ЭПР, неравенства Белла (запутывание по пространству) и Леггетта-Гарда (запутывание по времени) имеют отношение к двум - трем запутанным квантовым частицам. Следует отметить, что традиционный гильбертов формализм квантовой теории утверждает, что в Природе существует неограниченный запас запутанных состояний любой сложности, а существование запутанных состояний многих квантовых частиц является экспериментально установленным фактом. Есть свидетельства в пользу того, что их использование в процессе компьютерного моделирования сложных систем в некоторых случаях способно принести заметный эффект.

Исходные предпосылки

Станислав Лем в своей известной книге «Сумма технологии» написал (с. 113), что на вопрос о «первопричине» науки Эйнштейн ответил забавно и метко: «Никто не почешется, если у него не зудит». Подобный «зуд» вызвал мой интерес к проблеме МКЗ. Немного истории. Начну с того, что в 1980 году известный сибирский геолог академик Ю.А.Кузнецов предложил мне (физику, доктору наук) придумать физически непротиворечивую модель расширяющейся Земли. Юрий Алексеевич объяснил свое предложение тем, что он, будучи учеником и соратником академика М.А.Усова, разделял его взгляды на то, что Земля в течение своей эволюции расширяется. Однако ни он сам, ни М.А.Усов, понять причины этого явления были не в состоянии. Сделав элементарные оценки удельной гравитационной энергии Земли и температуры её вещества, модель расширяющейся Земли возникла у меня буквально в один вечер. Позже, после знакомства с литературой по физике Земли, оказалось, что правильнее назвать эту гипотезу - моделью «горячей» Земли. Дело в том, что расширение (и пульсации объема) Земли является обязательным следствием именно того, что в момент образования её вещество было нагрето до температуры, превышающей критическую температуру, и сжато до плотности, превышающей плотность конденсированного вещества. После того, как я рассказал Юрию Алексеевичу о пришедшей мне в голову идее, он рекомендовал мне распространить модель горячей Земли на другие планеты и спутники Солнечной системы. Он считал, что Солнце, планеты и их спутники должны подчиняться единым законам и модель может оказаться верной лишь тогда, когда все особенности этого «ансамбля» будут находить объяснение с единых позиций. С тех пор я неукоснительно следую его советам.

Многочастичная квантовая запутанность (МКЗ)

http://issp.ras.ru/Control/Inform/perst/2006/6_01_02/perst.htm

В настоящее время большое внимание уделяется разработке методов генерации запутанных состояний и манипуляции ими с целью практического использования запутанности. Даже если запутанные частицы “физически” не взаимодействуют друг с другом, они не являются независимыми друг от друга и описываются общей волновой функцией. Однако экспериментальная реализация запутанных состояний и исследования их свойств - становятся все более и более сложными по мере увеличения числа частиц N в системе. Основная трудность здесь заключается в манипулировании и регистрации состояний отдельных частиц в запутанном многочастичном ансамбле, а также в контроле межчастичных взаимодействий. Максимум, что удалось достичь к настоящему времени – это перепутать $N = 4$ иона [7] и $N = 5$ фотонов [8]. Среди различных типов запутанных многочастичных состояний два представляют особый интерес: так называемые “W-состояние” $|W\rangle$ и “состояние шредингеровского кота” $|Cat\rangle$. Если каждая частица может находиться в двух базисных состояниях, $|S\rangle$ и $|D\rangle$, то $|W\rangle = (|DD \dots DDS\rangle + |DD \dots DSD\rangle + \dots + |SD \dots DDD\rangle)/N^{1/2}$ и $|Cat\rangle = (|DD \dots DD\rangle + |SS \dots SS\rangle)/2^{1/2}$. W-состояния отличаются высокой устойчивостью и “выживают” даже при потере одной или нескольких частиц. Они рассматриваются в качестве основного ресурса для систем обработки квантовой информации и квантовой связи. Состояния $|Cat\rangle$ – суперпозиции двух “максимально различающихся” состояний системы – могут оказаться полезными не только при квантовых вычислениях, но и, например, в интерферометрии – для увеличения отношения сигнал/шум. Они также играют большую роль в различных тестах по проверке квантовой механики.

В работе [9] австрийской группы сообщается об успешном конструировании W-состояний из $N = 4, 5, 6, 7$ и 8 ионов $^{40}Ca^+$ в магнитной ловушке. Роль базисных состояний $|S\rangle$ и $|D\rangle$ играли основное ($S_{1/2}$) и метастабильное возбужденное ($D_{5,2}$, время жизни ≈ 1 с) состояния каждого иона. Индивидуальная адресация ионных кубитов осуществлялась путем индуцирования квадрупольных переходов $|S\rangle \leftrightarrow |D\rangle$ сфокусированным лазерным пучком с $\lambda = 729$ нм. После приготовления (за время ≈ 1 мс) W-состояния определение его характеристик проводилось с использованием селективной флюоресценции. При всех $N = 4 \div 8$ матрица плотности разлагалась по базису наблюдаемых, после чего измерялись соответствующие ожидаемые величины. Всего было использовано 3^N различных базисов, и для каждого из них выполнено не менее 100 измерений. После набора большой статистики (например, при $N = 8$ полное число измерений превысило 656 тысяч за время ≈ 10 часов) были реконструированы матрицы плотности W-состояний (см. рис.1). Точность их определения (fidelity) составила $F = 0.85, 0.76, 0.79, 0.76$ и 0.72 для $N = 4, 5, 6, 7$ и 8 соответственно. Запутанный характер приготовленных в [9] W-состояний подтверждается, в том числе, запутанностью всех возможных редуцированных двухчастичных матриц плотности. Существенно, что причины некоторого отклонения от “идеальной запутанности” не являются фундаментальными, а носят чисто технический характер и в принципе могут быть преодолены.

Практически одновременно с работой [9] сотрудники Национального института стандартов и технологии (Боулдер, США) сообщили о создании состояний $|Cat\rangle$ из $N \leq 6$ атомных кубитов с базисом из сверхтонких уровней ионов $^9Be^+$ в магнитной ловушке [10]. Для генерации этих состояний использовали соответствующие последовательности

лазерных импульсов, а для доказательства их когерентного характера – эффект флюоресценции после “декодировки” путем специальной операции, зависящей от фазы. Величина F оказалась достаточно низкой (0.76, 0.60 и 0.51 для $N = 4, 5$ и 6 соответственно). Это связано с тем, что состояния $|\text{Cat}\rangle$ гораздо сильнее подвержены декогеренции, чем W -состояния. Основной причиной декогеренции является спонтанная эмиссия. Зато состояния $|\text{Cat}\rangle$ могут быть использованы для приготовления белловских состояний любой пары кубитов, что делает их незаменимыми в квантовой криптографии. Авторы работ [9] и [10] подчеркивают, что использованные ими методики в принципе могут быть расширены на системы из гораздо большего числа кубитов.

Можно ли говорить о том, что, разобравшись в физике запутывания двух-трех атомов, можно считать, что мы понимаем физику МКЗ? На этот вопрос в [11] получен однозначный ответ. В этой работе рассматривается вопрос о невозможности полного описания квантовой запутанности системы многих частиц лишь при помощи двухчастичной запутанности ее подсистем. Приводится численный механизм подбора контрпримера и его результаты. Также показано, что мера запутанности чистых состояний, основанная на минимизации энтропии измерений, является существенно многочастичной, т.е. не может быть выражена через коэффициенты Шмидта.

Возможна ли МКЗ в Природе?

Как известно, сейсмически активные регионы, как правило, оказываются и зонами активного вулканизма. Очевидно, что причина этих «родственных» явление – одна. Это особенности геодинамики зон сейсмичности и вулканизма. Зададимся вопросом: существует ли взаимосвязь между ними, отражающая общность генезиса? Как мы отмечали, одной из возможных причин ударно-волнового механизма землетрясения является одномоментное изменение структуры, например, связанное с изменением длины водородных связей или их разрушением. Что произойдет, если этот процесс будет недостаточно быстрым для возникновения УВ? Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к физике водородных связей.

Водородная связь - особый вид связи, возникающий за счет того, что атом водорода, связанный с сильно электроотрицательным элементом (азотом, кислородом, фтором и др.), испытывает недостаток электронов и поэтому способен взаимодействовать с неподеленной парой электронов другого электроотрицательного атома этой же или другой молекулы. Водородная связь - разновидность не валентного взаимодействия между атомом водорода H , ковалентно связанным с атомом A группы $A-H$ молекулы $RA-H$ и электроотрицательным атомом B другой молекулы. Наличие водородных связей и их кооперативные свойства, в частности, в воде приводит к тому, что её свойства изменяются в зависимости от количества водородных связей. Так, например, во льду водородных связей много, их количество уменьшается по мере того, как лед тает. В талой воде водородных связей – меньше, ещё меньше их в нагретой воде и практически нет – в воде кипящей. Если бы вода полностью лишилась возможности образовывать водородные связи, то превратилась бы в пар, конденсирующийся в жидкость при $- 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Водородные связи присутствуют не только в воде, но и в литосфере, определяя её особые свойства. Если по какой-то причине водородные связи в литосфере начнут быстро и одновременно рваться, то возникнет ударная волна. Если этот процесс происходит так быстро не может, то это приведет к тому, что произойдет изменение термодинамических свойств литосферы – изменится её температура плавления. Она может оказаться ниже, чем местная температура литосферы и объем среды с МКЗ, в котором произошло разрушение водородных связей, - расплавится с образованием магматического очага, – образуется вулкан.

Примеров, когда правдоподобное объяснение в рамках классической физики найти невозможно, можно привести множество, причем, как в неживой, так и в живой природе. Обратим внимание, например, на поведение косяка мелких рыбешек или мелких птиц перед отлетом их на юг. Птицы и рыбы ведут себя как единый механизм с четкими границами. Действия их настолько синхронны, что любая оценка синхронизма за счет акустического, визуального или любого другого сенсорного канала оказывается неудовлетворительной. Ещё один пример, теперь из области социологии. Всем хорошо известно поведение толпы молодых людей на концерте популярного ансамбля или артиста. Участники такого действа неоднократно рассказывали, что каждый из них попадает «в раж» и перестает ощущать себя как индивид. На них действует какая-то сила, объяснения которой пока нет. Может быть, во всех этих случаях мы сталкиваемся с МКЗ?

В химии и биологии неоднократно предпринимались попытки применить методы квантовой механики для объяснения хорошо известных и изученных феноменов. Причем, если в химии эти попытки были убедительно обоснованы [12], то в биологии - ситуация не столь однозначна [13]. В этой работе авторы четко очерчивают предмет критики. Конечно, полагают они, квантовые эффекты в молекулярной биологии важны - это и динамика возбуждения биомолекул, туннелирование протонов и электронов и т.д. Однако авторы утверждают, что они не видят никаких предпосылок для *более нетривиальных квантовых проявлений* в живых системах.

Надо сказать, что в настоящее время среди специалистов по квантовой механике принято считать, что возможность существования квантовомеханических запутанных состояний объектов, разнесенных на макроскопические расстояния, - в принципе возможна. Однако такая макроскопическая когерентность может быть реализована лишь при тщательной экранировке этих объектов от внешних шумов, которые эту когерентность разрушают. Подобная экранировка в Природе (например, понижение температуры до милликельвинов) представляется совершенно нереалистичной.

Что известно о МКЗ, теория и эксперименты

В работе [14] рассмотрена физическая модель, в которой реализуются запутанные ЭПР состояния из r механических осцилляторов, прикрепленных к перегородке массой m_0 . В силу конечности этой массы, осцилляторы оказываются связанными между собой. К системе с внешней стороны прикреплен ещё один $(r + 1)$ -ый осциллятор, который служит измерителем для системы в целом. Когда измеряется выделенная $(r + 1)$ -я частица и она оказывается в основном состоянии, то, не проводя дальнейших измерений, можно сделать вывод, что и остальные частицы будут находиться в основном состоянии (рис. 3).

Авторы вводят r действительных параметров f_1, f_2, \dots, f_r . В каждой точке внутри системы в виде гипершара единичного радиуса ($f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_r^2 < 1$) - сопоставляется некоторое квантовое состояние. Пусть $(r + 1)$ -я частица оказалась в состоянии n . Вероятность этого события:

$$P_n = (1 - f^2)(f^2)^n.$$

Полученные вероятности P_n удовлетворяют условию нормировки: $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$.

Вероятности P_n образуют геометрическую прогрессию аналогичную состоянию теплового равновесия гармонического осциллятора. Соответствующая эффективная температура находится из условия: $\exp(-\hbar\omega/\theta) = f^2$. Из этого равенства получается выражение для температуры: $\theta = -\hbar\omega/\ln(f^2)$.

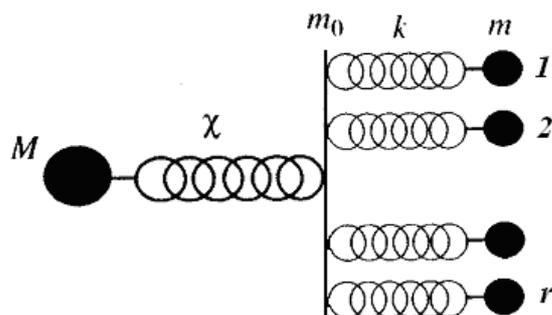


Рис. 3. Система осцилляторов, связанных друг с другом посредством перегородки; k, m – жесткость и масса осцилляторов с номерами $j = 1, 2, \dots, r$, χ, M – жесткость и масса $(r+1)$ -го осциллятора, m_0 – масса перегородки [14].

В работе показано, что термодинамическое равновесие может рассматриваться как следствие квантового запутывания системы. Авторы, для описания термодинамических распределений, - не вводят никакого другого статистического механизма, кроме механизма, изначально имеющегося в постулатах квантовой механики. Таким образом, была разработана и исследована физическая многочастичная квантовая модель, в которой запутанность возникает благодаря связи частиц-осцилляторов с единым посредником (перегородкой, стенкой и т.п.). Предложенная модель позволяет вскрыть природу и механизм возникновения равновесных квантовых распределений. Возникающая в системе температура определяется отношением массы системы частиц к массе связанной с ними перегородки. Таким образом, впервые температура вводится не как феноменологическое свойство, а как физический параметр системы, поддающийся явному расчету.

Приведем ещё несколько примеров. В работе [15] выполнен теоретический анализ двух экспериментов по МКЗ состояний 3 (4) частиц. Обсуждается проблема активизации запутанности. В работе [16] авторам впервые удалось добиться переноса квантовых состояний частиц в твердотельном материале (алмазе). Они показали, что возможно получить квантовую запутанность двух или трёх частиц в кристаллической решётке. По мнению многих специалистов, получение устойчивого эффекта "телепортации" позволит в будущем создать работоспособную модель квантового компьютера. Опыты по установлению и удержанию дистанционной корреляции между наблюдаемыми физическими свойствами объектов проводятся не первый год. Учёные уже "связывали" несколько отдельных атомов, например восемь ионов кальция, или группу фотонов. Спутать же частицы в твердотельных системах, которые теоретически обеспечат квантовому состоянию большую устойчивость, до сих пор ни у кого не получалось.

По-видимому, самым удивительным результатом, в плане изучения эффектов МКЗ можно считать эксперимент [17], выполненный с пространственно-разделенными запутанными TLD-кристаллами, предназначенными для термолюминисцентной дозиметрии, находящимися в Батон-Руж, Луизиана (США) и Живарлэ (Франция) на расстоянии 8182 км. Образцы из легированного фторида лития были облучены тормозным излучением одновременно и совместно (в одном месте) с целью создания запутанных ловушек в смежных TLD-чипах на медицинском ускорителе. Один из этих чипов был отправлен в Батон-Руж, а его запутанный партнер остался в Живарлэ. Подогрев образца, находящегося в Батон-Руж, производился в соответствии с температурой другого (запутанного с первым) образца, которая измерялась фотоумножителем в Живарлэ и была равна температуре окружающей среды. Были получены коррелированные сигналы при нарастании, а затем убывании (вследствие отключения подогревающего устройства в Батон-Руж) температуры. Момент, когда в Батон-Руж достигнут максимум температуры TLD, точно соответствовал моменту максимума корреляции сигнала фотоэлектронного умножителя, записанного в Живарлэ (рис. 4). Этот эксперимент выходит за рамки

обычных представлений. Авторы [17] осознавая это, предлагают повторить его в других условиях.

Полагаю, что такое повторение крайне необходимо для дальнейшего понимания физики дальнего действия многочастичного квантового запутывания. Получение подобных результатов другими исследователями и их осмысление, возможно, позволит приблизиться к решению этой важной в практическом плане проблемы.

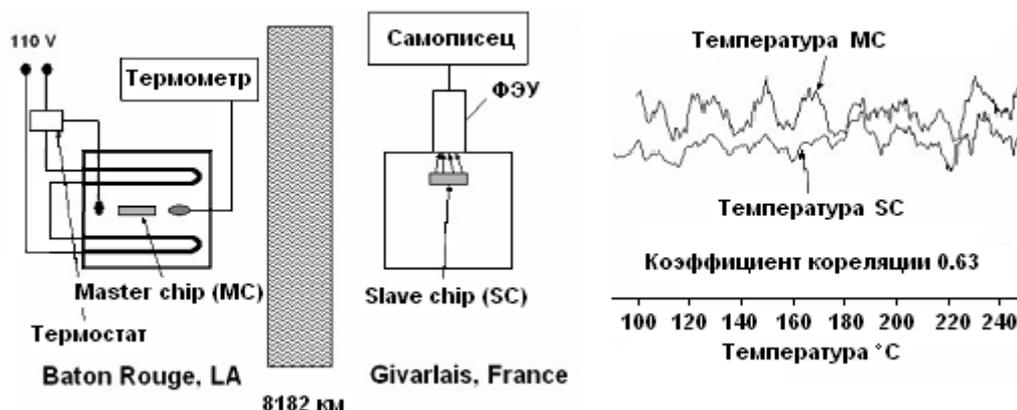


Рис. 4. Слева: трансконтинентальный эксперимент между Батон-Руж, Луизиана (США) и Живарлэ (Франция). Справа: Вверху – температура чипа H1, LiF100 подогреваемого в Батон-Руж. Внизу – сигнал от вспомогательного образца в Живарлэ [17].

Принято считать, что квантовая запутанность как двух-трех, так и многих, может проявляться только при температуре в доли Кельвина. Некоторые работы, выполненные в самые последние годы, опровергают это мнение [18, 19]. В этих работах приведены результаты измерений термальной запутанности в кластеризованной спиновой системе, сформировавшейся в компаунде $\text{Na}_2\text{Cu}_5\text{Si}_4\text{O}_{14}$. В качестве объекта запутанности исследовалось магнитная восприимчивость. Двухчастичная запутанность наблюдалась при температуре ниже 200 К., трехчастичная запутанность наблюдалась при температуре ниже 240 К. Авторы [18] изучали теорию эволюции запутанности как функции поля и температуры. В работе [19] предъявлены свидетельства, указывающие на возникновение квантовой запутанности в кристаллах $\text{Na}_2\text{Cu}_5\text{Si}_4\text{O}_{14}$. Наличие запутанности исследовалось по величине магнитной восприимчивости. Двухчастичная запутанность наблюдалась при температуре T_e ниже 200 К., трехчастичная запутанность - при температуре T_e ниже 240 К. В работе [19] квантовая запутанность в карбоксилате меди $[\text{Cu}_2(\text{O}_2\text{CH})_4][\text{Cu}(\text{O}_2\text{CH})_2(2\text{-methylpyridine})_2]$ была получена при $T_e \sim 630$ К.

В работе [20] показано, что измерения магнитной восприимчивости поликристаллических образцов биядерных нитрозильных комплексов железа (НКЖ) $[\text{Fe}_2(\text{C}_3\text{H}_3\text{N}_2\text{S})_2(\text{NO})_4]$ (I) и $[\text{Fe}_2(\text{SC}_3\text{H}_5\text{N}_2)_2(\text{NO})_4]$ (II) свидетельствуют о существовании в этих соединениях квантово-механической запутанности спиновых степеней свободы. НКЖ существуют в живых клетках и участвуют в метаболических и физиологических процессах, происходящих в биологических системах и организмах, включая человека.

Зависимость величины (меры) запутанности (E) от температуры (T) получена при использовании формулы Вутгерса [21]:

$$C = 2 \max \{ |w| - \sqrt{uv}, 0 \},$$

где $E \sim \sqrt{1-C^2}$, C – согласованность, а w , u , и v – элементы матрицы плотности ρ :

$$\rho = \begin{pmatrix} u & & & \\ & x_1 & w & \\ & w^* & x_2 & \\ & & & v \end{pmatrix}.$$

Согласованность $C(T) \sim T$ при $T < T_e$ и $C(T) = 0$ при $T \geq T_e$, где T_e – критическая температура запутанности. Для комплекса I: $T_e \approx 80-90$ К, а для комплекса II: $T_e \approx 110-120$ К

Высокая температура T_e парамагнитных материалов является их существенным преимуществом по сравнению с веществами с ядерными спинами, где запутанность может возникать лишь при десятых долях микрокельвина.

В подсистеме спиновых степеней свободы вещества используется понятие спиновая температура (T_s) – термодинамическая величина, характеризующая состояние внутреннего квазиравновесия. Величина T_s определяет вероятность W_i нахождения системы частиц, обладающих спином, в стационарном состоянии с энергией E_i :

$$W_i = Z^{-1} \exp(-E_i / kT_s),$$

где Z – статистическая сумма. Это соотношение аналогично обычному *каноническому распределению Гиббса*, однако E_i – лишь часть полной энергии системы, зависящая от спиновых переменных. Предполагается, что локальное внутреннее равновесие в спиновой подсистеме (квазиравновесие) устанавливается гораздо быстрее, чем равновесие между спиновой подсистемой и остальными степенями свободы (истинное равновесие с температурой T_0). Магнитная восприимчивость, как объект квантовой запутанности подтверждается и в работах других авторов [22].

Роль квантовой запутанности в самоорганизации, фликкер-шуме и декогерентности

Проблемой естествознания является понимание физики самоорганизации вещества в живой и неживой природе. Сегодня ни механизм, ни детальные параметры этого процесса – неизвестны [23]. В тоже время существует множество вопросов без ответов, например, чем объясняется свойство систем самоорганизовываться и регулировать отношения с внешним миром, как вообще возникают организованные структуры с их функциями? На все эти вопросы пытается ответить синергетика. В частности, определение, данное Г. Хакеном в 1980-е в рамках синергетики [24]: «Самоорганизация – процесс упорядочения (пространственного, временного или пространственно-временного) в открытой системе, за счёт согласованного взаимодействия множества элементов её составляющих».

Трудность этой проблемы состоит в том, что необходимо раскрыть физическую природу всех этих процессов [23]. И если речь зашла о физической природе самоорганизации, то эту проблему, прежде всего, должна решать физика, которая пока решить ее не может. Возьмем такой объект органической природы, как живая клетка. Это ярко выраженная самоорганизующаяся система, но физика бессильна объяснить загадку живой клетки. Возьмем кристалл – объект неживой природы. О кристалле физика знает почти всё, однако перед загадкой кристалла как самоорганизующейся системы она тоже бессильна.

Не могу не согласиться с выводом автора [23]: «Проблема самоорганизации вещества в природе является первостепенной и главной проблемой естествознания. И, прежде всего, ее должна решать физика, но, как мы видели, она не может этого делать. Поэтому можно сказать, что именно физика сегодня сдерживает развитие естествознания». Автор [23] предлагает свой механизм самоорганизации, в основе которого положено взаимодействие пары противоположностей: «вещество – поле», которая описывается парой: «механика – электродинамика». Отсюда следует появление фантастического «зародыша постоянного электромагнитного поля» и т.п. Назвать это физикой - не представляется возможным. Проблема физики самоорганизации остается неясной.

Автор [25] высказывает смелую идею относительно того, что самоорганизация базируется на квантовой запутанности. В статье обсуждаются несколько парадигм самоорганизации (например, обратной диффузии, передачи условных информации, децентрализованной координации совместных вычислений, конкурентоспособные игры, топологические эволюции в активных системах) на основе квантовой запутанности. Тем не менее, эта идея остается пока недостаточно проработанной.

Авторы работы [26] полагают, что проводимые ими эксперименты с матрицами (решетками), построенными на джозефсоновских переходах, показывают, что в основе взаимодействия элементов матриц между собой лежит самоорганизация, точнее, - самоорганизованная критичность (СОК).

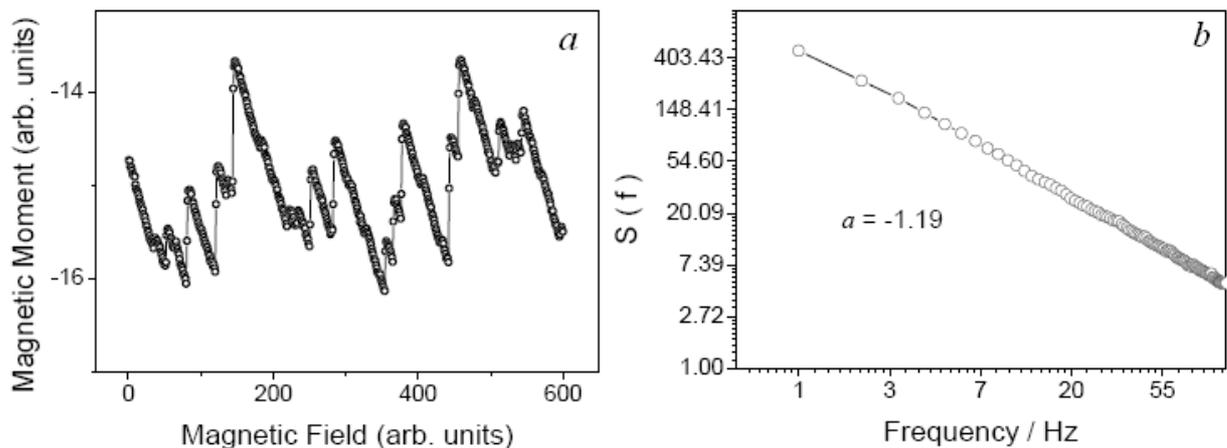


Рис. 5. Часть кривой магнитного гистерезиса – *a*. Фурье-спектр лавин магнитного потока – *b* [26].

В работе [26] обнаружены лавины магнитного потока в джозефсоновских решётках (J-решётки) с переходом сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (SIS) при её намагничивании при $T < \sim 5$ К. Лавины носят стохастический характер и возникают, когда глубина проникновения магнитного поля в решётку (λ) сравнивается с длиной ребра J-решётки (a) при понижении температуры. Представлены статистические свойства таких лавин. Распределение лавин по их величине носит степенной характер с отрицательным нецелым показателем порядка единицы, что свидетельствует о достижении состояния СОК. J-решётки с переходом из плохого металла (SNS) СОК не обнаруживают.

На небольшой части кривой магнитного гистерезиса (рис. 5-а) отчётливо видно, что при увеличении поля растёт отрицательный магнитный момент. В некоторый точке его абсолютная величина резко уменьшается до произвольного значения, после чего начинается его рост до нового срыва. Падение достаточно резкое. Специальные измерения выявили, что падение происходит менее чем за 0.01 сек. При этом в решётку входит до нескольких сотен квантов потока. Естественно, что при уменьшении поля на другой части

полной петли гистерезиса наблюдается зеркальная картина – при этом кванты потока выходят из решётки с уменьшением поля.

Отметим, что полученный авторами Фурье спектр лавин магнитного потока носит степенной характер. Спектр отсортированных по величине лавин представляет собой степенную функцию f^a со средним показателем $a = -1.193$ (см. рис.5-*b*). Это спектр фликкер-шума [27-29], о чем в статье не говорится. Мне представляется, что если полученные авторами результаты интерпретировать в терминах МКЗ и спиновых волн [30], то можно найти объяснение некоторым не объясненным результатам.

Несколько слов о декогеренции, которая показывает, что происходит разрыв связи спонтанных взаимодействий между системой и окружающей ее средой (окружением). В результате этого происходит подавление интерференции (запутанности). Объектом изучения явления моделирование взаимодействий между системой и средой, вывод ведущих (основных) уравнений (master equations) для редуцированного (reduced) состояния системы, обсуждение временных масштабов и т.д. Из определения следует, что декогеренция имеет непосредственную связь с редукцией волновой функции. Вполне вероятно, что эксперимент, показанный на рис 1-*б*, является декогеренцией: Нарастание акустического шума перед началом периода акустического молчания, по-видимому, связано с запутанностью между системой формирующей землетрясение и окружающей средой, генерирующий этот шум. Во время периода акустического молчания происходит декогеренция – разрыв запутанности между средой и системой.

МКЗ и энтропия Тцаллиса

Суть многочастичной квантовой запутанности заключается в том, что в единую систему соединяется некая совокупность одинаковых квантовых элементов. Принято считать, что такие элементы создаются путем квантового клонирования. Клонирование - это такая операция, в результате которой создается состояние, являющееся тензорным произведением идентичных состояний подсистем.

Теорема о запрете клонирования [31, 32] утверждает, что создание идеальной копии произвольного неизвестного квантового состояния невозможно. Эта теорема применима для случая, когда запутывание всей системы представляется как некая сумма двухчастичных запутанностей. Этот случай, который принято называть моногамией, – не реален. Как показано в работах [33-35], совсем другая ситуация, возникает при т.н. полигамии, когда, используя формализм энтропии Тцаллиса [31], авторам удается доказать, что МКЗ может существовать.

Тцаллис показал [36], что существуют системы, в которых есть сильные корреляции, сильное взаимодействие между всеми частями системы. Это приводит к нарушению термодинамической аддитивности системы, потому их не удастся описать больцмановской статистикой и термодинамикой. Значит, необходим иной подход, который каким-либо образом сумел бы справиться с режимом сильной связи между всеми частицами системы. В последние годы предложение Тцаллиса начало находить применение во многих физических и геофизических задачах, в задачах, которые касались термодинамически аномальных систем. Это, как правило, были системы с *дальнедействующим взаимодействием*, в пределе – взаимодействия между частицами «каждая с каждой». Существуют и другие системы, которые не могут быть описаны больцмановской термодинамикой. Только причина такого "неповиновения" может быть разной. Это могут быть, например, "эффекты памяти", когда система в некотором смысле «помнит» свое прошлое.

Тцаллис предложил, что статистика должна быть не больцмановская. Это значит, что выражение для энтропии могло бы описать неэкстенсивные системы и переходить в

стандартную формулу в пределе слабой связи. Тсаллис взял стандартное выражение для энтропии, и вместо логарифма ввел новую функцию - степенную:

$$\ln(x) \rightarrow \ln_q(x) = \frac{1}{(q-1)}(x^{1-q} - 1)$$

с неким числовым параметром q . При q , стремящемся к 1, $\ln_q(x)$ переходит в обычный логарифм, в чем можно убедиться простым дифференцированием. Новая формула для q -энтропии выглядит так:

$$S_q = -\sum_i (p_i^q \ln_q(p_i)) = \frac{1}{(q-1)}(1 - \sum_i p_i^q).$$

Если $q > 1$, то q -энтропия Тцаллиса переходит в стандартную больцмановскую энтропию.

В работах [33-35] q -энтропия Тцаллиса используется для оценки степени запутанности. Так, например, автор, используя q -энтропию Тцаллиса, установил, что запутывание двух частиц (двух кубитов) соответствует величине параметра q : $1 \leq q \leq 4$. Моногамное многочастичное (multi-qubit) запутывание выраженное q -параметром возможно в интервале $2 \leq q \leq 3$ [30]. В [37] убедительно показано, что информация Тцаллиса есть вырожденная форма энтропии Реньи. Для описания сложных систем в книге [38] также предлагается использовать энтропию Реньи, зависящую от параметра q и совпадающую с энтропией Гиббса–Шеннона при $q = 1$. Принцип максимума энтропии Реньи позволяет получить распределение Реньи, переходящее в каноническое распределение Гиббса при $q = 1$. Термодинамическая энтропия сложной системы определяется как энтропия Реньи для распределения Реньи. В отличие от обычной энтропии, основанной на энтропии Гиббса–Шеннона, эта энтропия возрастает с увеличением отклонения распределения от распределения Гиббса и достигает своего максимума. При этом распределение Реньи становится степенным распределением, что соответствует фазовому переходу в более упорядоченное состояние. В этом фазовом состоянии эволюция к дальнейшей упорядоченности системы сопровождается ростом энтропии, что, согласно второму закону термодинамики, означает предпочтительность естественной эволюции в направлении самоорганизации [38].

Запутанности: чего с чем

Квантовая запутанность обнаружена для различных частиц и комплексов. Изначально, ещё во времена публикации и обсуждения парадокса ЭПР и, затем, работ Белла, речь шла о фотонах. Далее, в «круг» объектов запутанности попали электроны, протоны, ионы различного сорта и т.п. Ниже перечислены различные компоненты, рассматриваемые как объекты квантовой запутанности:

- протоны водородных связей [6, 46], в том числе у пара-воды (у орто-воды - таких способностей нет) [39];
- спиновые степени свободы [16, 27];
- нитрозильные комплексы железа [20];
- магнитная восприимчивость [22];
- джозефсоновские переходы [26, 28]
- гидратированные ионы [40];
- спиновая поляризация квантовых состояний в тонких слоях немагнитного металла при температуре Ферми [41] и т.д.

[В некоторых упоминаемых выше ссылках нет упоминания о квантовой запутанности (нелокальности), но, по мнению автора, результаты этих работ можно объяснить в контексте МКЗ].

- Окружение стремится объединиться с системой и подавить интерференцию между выделенным множеством состояний, будь это дискретное множество или некоторое непрерывное множество.

- Эти выделенные состояния могут быть охарактеризованы в терминах их устойчивости по отношению к взаимодействию с окружением. Пока система запутана с окружением, состояния, между которыми интерференция подавляется, оказываются состояниями с *наименьшей степенью запутанности* с окружением в ходе последующего взаимодействия. Это приводит нас к различным дальнейшим (взаимосвязанным) аспектам декогеренции.

С точки зрения квантового дарвинизма, декогеренция является процессом «естественного отбора» тех квантовых состояний, которые не нарушаются при контакте со средой. Окончательное, стабильное состояние, «выжившее» в процессе декогеренции («pointer state») многократно копируется и может наблюдаться в макроскопическом масштабе.

В заключение хочу сослаться на мнение одного из ведущих специалистов по квантовой запутанности Влатко Вездраля [45], который полагает, что ещё недавно квантовое запутывание традиционно считалось принадлежностью только микроскопических объектов. Это явление бросало вызов объяснению, основанному, как считается, на здравом смысле. Теперь квантовое запутывание признано повсеместно и считается надёжно установленным фактом. С пониманием того, что квантовая запутанность может произойти и в макроскопических системах, а так же с развитием экспериментов, направленных на использование этого эффекта – возникают новые возможности, необходимые для определения степени запутанности макроструктур.

Хочется надеяться на то, что изучение проблемы многочастичной квантовой запутанности будет признано прорывным направлением науки и получит крайне необходимую моральную и финансовую поддержку. Уверен в том, что развитие этого направления принесет пользу и будет практически использовано во многих отраслях науки и техники. В частности, видны пути решения отмеченных нами во введении таких проблем как физика землетрясения, вулкана, шаровой молнии и т.п. В последнем случае решение может состоять в том, что Природа умеет запутывать водные кластеры и поэтому шаровая молния «живет» довольно долго, в то время как экспериментаторы этого делать пока не научились и получаемая ими шаровая молния угасает очень быстро...

Благодарю И.В.Кузнецова, к.ф.-м.н., научного сотрудника ИГиЛ СО РАН, за многолетние обсуждения проблем МКЗ, замечания и помощь в подборе литературы.

Литература

1. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель землетрясения (I). Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 6. С. 87-96.
2. Журков С.Н., Куксенко В. С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений: Сб. науч. тр. М.: Наука. 1980. С. 78-85.
3. Kusunose K, Lei X., Nishizawa O., Satoh T. Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenter distribution in granitic rock // PEPI 1991. V. 67. Iss. 1-2. P. 194-199.
4. Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 4. С. 184-189.

5. Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения. Кандидатская диссертация. ИКИР ДВО РАН. 2006.
6. Allan D.R., Marshall W.G., Pulham C.R. The high-pressure crystal structure of potassium hydrogen carbonate (KHCO_3) // *American Mineralogist*. 2007. V. 92. P.1018-1025.
7. Sackett C. A., Kielpinski D., King B. E. et al. Experimental entanglement of four particles // *Nature*. 2000. V. 404. P. 256-259.
8. Zhao Zhi, Chen Yu-Ao, Zhang An-Ning. Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation // *Nature*. 2004. V. 430. P. 54-58.
9. Häffner H., Hänsel W., Roos C. F. et al. Scalable multiparticle entanglement of trapped ions // *Nature*. 2005. V. 438. P. 643-646.
10. Leibfried D., Knill E., Seidelin S. et al. Creation of a six-atom ‘Schrödinger cat’ state // *Nature*. 2005. V. 438, 639-642.
11. Чернявский А.Ю. Неэквивалентность двухчастичной и многочастичной квантовой запутанности // *Микроэлектроника*. 2009. Т. 38. №. 6. С. 449-451.
12. Kandrashkin Yu.E., Salikhov K.M., van der Est A., Stehlik D. Electron spin polarization in consecutive spin-correlated radical pairs: application to short-lived and long-lived precursors in type 1 photosynthetic reaction centres // *Appl. Magn. Reson*. 1998. V. 15. P. 417-447.
13. Wiseman H.M., Eisert J. Nontrivial quantum effects in biology: A skeptical physicists’ view // *ArXiv*: 0705.1232
14. Богданов А.Ю., Богданов Ю.И., Валиев К.А. Многочастичные запутанные квантовые состояния и моделирование статистических распределений термодинамики // *Опт. Спектр*. 2007. Т. 103. №. 1. С. 36-43.
15. Dür W., Cirac J. I. Multiparticle entanglement and its experimental detection // *J. Phys. A: Math. Gen*. 2001. V. 34. P. 6837-6850.
16. Neumann P., Mizuochi N., Rempp F., et al. Multiparticle entanglement among single spins in diamond // *Science*. 2008. V. 320. P. 1326-1328.
17. Desbrandes R., Van Gent D.L. Intercontinental liaisons between entangled electrons in ion traps of thermoluminescent crystals // *arXiv:quant-ph/0611109* 2006.
18. Souza A.M., Reis M.S., Soares-Pinto D.O. et al. Experimental determination of thermal entanglement in spin clusters using magnetic susceptibility measurements // *Phys. Rev*. 2008. V. B 77. 104402.
19. Souza A.M., Soares-Pinto D.O., Sarthour R.S. et al. Entanglement and Bell’s inequality violation above room temperature in metal carboxylates // *Phys. Rev*. 2009. V. 79. 054408.
20. Алдошин С.М., Фельдман Э.Б., Юрищев М.А. Квантовая запутанность в нитрозильных комплексах железа // *ЖЭТФ*. 2008. Т. 134. Вып. 5 (11). С. 940-948.
21. Wootters W.R. Entanglement of formation of an arbitrary state of two qubits // *Phys. Rev. Lett*. 1998. V. 80. N. 10. P. 2245-2248.
22. Wieśniak M., Vedral V., Brukner C. Magnetic susceptibility as a macroscopic entanglement witness // *New J. Phys*. 2005. V. 7. P. 258. doi: 10.1088/1367-2630/7/1/258
23. Денисова Н.А. Проблема самоорганизации вещества и физика // Докл. XII Межд. симп. “Перестройка естествознания в третьем тысячелетии” 2001.
24. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.
25. Zak M. Entanglement-based self-organization // *Chaos, Solitons and Fractals*. 2002 V. 14. P. 745-758.
26. Матизен Э.В., Мартынец В. Г., Безверхий П. П. Состояние самоорганизованной критичности в джозефсоновской решётке // *Вестник СибГУТИ*. 2009. № 3 С. 137-144.

27. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры; надежды и реальность. 2001. Ижевск: РХД. 352 с.
28. B. Paladino E., Faoro L., Falci G., Fazio R. Decoherence and $1/f$ noise in Josephson qubits // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. N. 22. P. 228304.
29. Bacciagaluppi G. The role of decoherence in quantum mechanics // Stanford Encyclopedia of Philosophy. 2007. <http://plato.stanford.edu/entries/qm-decoherence/>
30. Plastina F., Amico L., Osterloh A., Fazio R. Spin wave contribution to entanglement in Heisenberg models // New J. Phys. 2004. V. 6. P. 124. doi:10.1088/1367-2630/6/1/124
31. Wootters W.K., Zurek W.H. A Single Quantum Cannot be Cloned // Nature. 1982. V. 299. P. 802-803.
32. Dieks D. Communication by EPR devices // Physics Letters A. 1982. V. 92(6). P. 271-272.
33. Tsallis C., Lambert P.W., Prato D. A non extensive critical phenomenon scenario for quantum entanglement // Physica A. 2001. V. 295. P. 158-171.
34. Kim J. S., Sanders B.C. Monogamy and polygamy for multi-qubit entanglement using Renyi entropy // arXiv:0911.5180v1 [quant-ph] 2009
35. Kim J. S. Tsallis entropy and entanglement constraints in multi-qubit systems // Phys. Rev. 2010. V. A 81. P. 062328 (arXiv:0911.5181v2 [quant-ph]).
36. Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics // J. Stat. Phys. 1988. V. 52. P. 479-487.
37. Башкиров А.Г. Самоорганизация и второе начало термодинамики. ИДГ РАН Челябинск. МРІ. 2007. 149 с.
38. Встовский Г.В. Элементы информационной физики. М.: МГИУ. 2002. 260 с.
39. Дроздов А.В. Гидратация биологических молекул и орто- пара-молекулы H_2O // VIII Международная Крымская конференция «Космос и Биосфера». Судак. 2009. http://cb.science-center.net/conf/Files/Drozdo3_Session_4_Ru.htm
40. Tielrooij K.J., Garsia-Araez N., Bonn M., Bakker H.J. Cooperativity in ion hydration // Science. 2010. V. 328. P.1006-1009.
41. Шишкин А.М., Радер О. Квантовые состояния как посредники в магнитном взаимодействии // Природа. 2010. № 5. С. 18-26.
42. Блехман И.И. Загадки теории динамических систем: на границе механики, философии и теологии // Вестник научно-технического развития. 2008. № 3 (7). С. 1-8.
43. Blume-Kohout R., Zurek W.H. Quantum Darwinism: entanglement, branches, and the emergent classicality of redundantly stored quantum information // Phys. Rev. 2006. V. A. 73. P. 062310 1-21.
44. Ananthaswamy A. Quantum Darwinism // Foundation Questions Institute. 2008, November. P 1-3.
45. Vedral V. Progress Article Quantifying entanglement in macroscopic systems // Nature. 2008. V. 453. P. 1004-1007.
46. Fillaux F., Cousson A., Gutmann M.J. A neutron diffraction study of macroscopically entangled proton states in the high temperature phase of the $KHCO_3$ crystal at 340 K // J. Phys.: Condens. Matter 2008 20 015225