

Приложение 1.

Квантовые эффекты в физике Земли.

Показано, что использование идеи многочастичной квантовой запутанности в науках, далеких от квантовой механики, в, частности в физике Земли, позволит решить некоторые актуальные проблемы, которые в настоящее время решения не имеют.

1. 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.

2. 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. Работая в области физики Земли около 30 лет и занимаясь практически всеми её разделами, я столкнулся с ситуацией, как мне показалось, неразрешимой. Она возникла довольно давно, когда я начал решать проблему физики землетрясения. Именно в последнем случае у меня возник тот самый «зуд». Я довольно быстро сообразил, что механизмом, вызывающим на земле наблюдаемые свойства землетрясений (разрывы, колебания почвы, и т.п.) может быть только ударная волна (УВ). С физикой УВ я был знаком, и мне не представляло труда сопоставить явления, происходящие в эпицентре землетрясения с теми, которые соответствовали описанию физики выхода УВ на свободную поверхность твердого тела (Зельдович и Райзер, 1966, 11 глава). Однако возникала некоторая, неприятная для меня «нестыковка» при формировании ударной волны в литосфере.

Дело в том, что землетрясение обладает удивительным свойством. С одной стороны, землетрясение, по наблюдениям многих сейсмостанций, - ведет себя как движущийся снизу вверх «точечный» источник сейсмических волн. С другой стороны, область разрушений поверхности Земли, объём генерации сейсмических волн и возникновения афтершоков землетрясения говорят - об обратном. Именно о том, что очаг землетрясения занимает подчас огромное пространство. Например, размер очага землетрясения на Суматре (2004) составляет в поперечнике 1000 км. Характерное время фронта землетрясения порядка одной секунды и меньше. Как можно синхронизовать этот процесс, оставаясь в рамках механики сплошной среды, согласно которой скорость происходящих процессов не должна превышать скорость звука, которая для среды генерации землетрясения не превышает 10 км/с? В нашем случае она должна быть больше в 100 раз. Эта оценка совсем не открытие. Обратимся к самой серьезной книге по сейсмологии (Аки и Ричардс, Количественная сейсмология: теория и методы, 1983). Там написано, что источник землетрясения (его очаг) имеет двойное толкование: как точка и как объём, причем совсем не малый. Однако прежде чем приступать к конкретным примерам МКЗ в Природе, стоит обратить внимание на основные базовые источники этого подхода

3. Квантовомеханическая запутанность и телепортация.

Квантовая запутанность. Quantum entanglement - одно из названий, среди таких как: соотношение неопределённости, связанность, нелокальность и суперпозиция - квантовомеханическое явление, при котором квантовое состояние двух или большего количества объектов должно описываться во взаимосвязи друг с другом, даже если отдельные объекты разнесены в пространстве.

Связность - это одно из тех свойств квантовой теории, которое не признавал А. Эйнштейн и некоторые другие учёные. В 1935 Эйнштейн, Подольский и Розен сформулировали знаменитый ЭПР-парадокс, который показал, что из-за связности квантовая механика становится нелокальной теорией. Известно, как Эйнштейн высмеивал связность, называя его «кошмарным дальнедействием». Это было вполне естественно, т.к. нелокальная связность опровергала постулат теории относительности о предельной скорости света (передаче сигнала).

Парадокс Эйнштейна, Подольского и Розена (ЭПР). Суть ЭПР парадокса состоит в том, что, согласно соотношению неопределенностей, - мы не можем измерить одновременно координату частицы и её импульс. Причиной неопределённости является тот факт, что, производя измерение одной величины, - мы вносим принципиально неустранимые возмущения в её движение и искажаем значение другой величины. Однако можно было бы предложить гипотетический способ, которым соотношение неопределённостей можно обойти.

Допустим, две одинаковые частицы *A* и *B* образовались в результате распада третьей частицы *C*. В этом случае, по закону сохранения импульса, их суммарный импульс должен быть равен исходному импульсу третьей частицы, то есть, импульсы двух частиц должны быть связаны. Это даёт нам возможность измерить импульс одной частицы и по закону сохранения импульса рассчитать импульс второй, не внося в её движение никаких возмущений. Поэтому, измерив координату второй частицы, мы сумеем получить для этой частицы значения двух неизмеримых одновременно величин, что по законам квантовой механики невозможно. Таким образом, получается, что соотношение неопределённостей не является абсолютным, а законы квантовой механики являются неполными и должны быть в будущем уточнены.

Другой вариант парадокса связан с трактовкой «внезапного изменения» состояния частицы *B* как результата её взаимодействия с изменённой измерением частицей *A*, для чего при определённых условиях может потребоваться противоречащая основным принципам теории относительности передача сигнала со сверхсветовой скоростью.

Кот Шрёдингера. В статье Шрёдингера «Противоречивая ситуация в квантовой механике» (Schrödinger, 1935) обсуждался ЭПР парадокс. В закрытый ящик помещён кот. В ящике имеется механизм, содержащий радиоактивное ядро и ёмкость с ядовитым газом. Параметры эксперимента подобраны так, что вероятность того, что ядро распадется за 1 час, составляет 50 %. Если ядро распадается, оно приводит механизм в действие, он открывает ёмкость с газом, и кот умирает. Согласно квантовой механике, если над ядром не производится наблюдения, то его состояние описывается суперпозицией (смешением) двух состояний - распавшегося ядра и не распавшегося ядра. Следовательно, кот, сидящий в ящике, и жив, и мёртв одновременно. Если же ящик открыть, то экспериментатор обязан увидеть только какое-нибудь одно конкретное состояние — «ядро распалось, кот мёртв» или «ядро не распалось, кот жив». Заметим, что Шрёдингер в этой статье ввёл термин «запутанность» (entanglement).

Вопрос стоит так: *когда система перестаёт существовать как смешение двух состояний и выбирает одно конкретное?* Цель эксперимента — показать, что квантовая механика неполна без некоторых правил, которые указывают, при каких условиях происходит коллапс волновой функции и кот либо становится мёртвым, либо остаётся живым, но перестаёт быть смешением того и другого.

Вопреки расхожим представлениям, - сам Шрёдингер придумал этот опыт вовсе не потому, что он верил, будто «мёртво-живые» коты существуют; наоборот, он считал *квантовую механику неполной* и не до конца описывающей реальность в данном случае. Поскольку ясно, что кот обязательно должен быть либо живым, либо мёртвым (не

минуса. Через N обозначим число объектов, которые имеют соответствующий набор значений для нашей тройки свойств. То есть $N(A^+B^-C)$ обозначает число объектов в ансамбле, у которых A равно плюсу, а B и C – минусу. Соответственно, $N(A^+B^-)$ – число частиц, у которых A равно плюсу, B – минусу, C же произвольно (или плюс, или минус).

Очевидно, что:
$$N(A^+B^-) = N(A^+B^-C^+) + N(A^+B^-C^-)$$

Аналогично:
$$N(B^-C^+) = N(B^-C^+A^+) + N(B^-C^+A^-)$$

$$N(A^+C^-) = N(A^+C^-B^+) + N(A^+C^-B^-)$$

Сложив, получаем:

$$N(B^-C^+) + N(A^+C^-) = [N(B^-C^+A^+) + N(A^+C^-B^-)] + N(B^-C^+A^-) + N(A^+C^-B^+)$$

Ясно, что выражение в квадратных скобках равно $N(A^+B^-)$, таким образом, получаем:

$$N(A^+B^-) \leq N(B^-C^+) + N(A^+C^-)$$

Это и есть одно из неравенств Белла.

Опыт, предлагаемый Беллом, оказался простым только на бумаге и поначалу казался практически невыполнимым. Эксперимент должен был выглядеть так: под внешним воздействием атом должен был синхронно испустить две частицы, например два фотона, причем в противоположных направлениях. После этого нужно было уловить эти частицы и инструментально определить направление спина каждой и сделать это тысячекратно, чтобы накопить достаточную статистику для подтверждения или опровержения существования скрытого параметра по теореме Белла (выражаясь языком математической статистики, нужно было рассчитать *коэффициенты корреляции*).

Самым неприятным сюрпризом для всех после публикации теоремы Белла как раз и стала необходимость проведения колоссальной серии опытов, которые в ту пору казались практически невыполнимыми, для получения статистически достоверной картины. Однако не прошло и десятилетия, как ученые-экспериментаторы не только разработали и построили необходимое оборудование, но и накопили достаточный массив данных для статистической обработки. Когда в начале 1970-х годов результаты экспериментов были обобщены, всё стало предельно ясно. Волновая функция распределения вероятностей совершенно безошибочно описывает движение частиц от источника к датчику. Следовательно, уравнения волновой квантовой механики не содержат скрытых переменных. Это единственный известный случай в истории науки, когда теоретик доказал *возможность* экспериментальной проверки гипотезы и дал обоснование *метода* такой проверки. Экспериментаторы титаническими усилиями провели сложный, дорогостоящий и затяжной эксперимент, который в итоге лишь подтвердил и без того господствующую теорию и даже не внес в нее ничего нового, в результате чего все почувствовали себя жестоко обманутыми в ожиданиях!

Однако не все труды пропали даром. Совсем недавно ученые и инженеры к немалому собственному удивлению нашли теореме Белла весьма достойное практическое применение. Две частицы, испускаемые источником на установке Белла, являются *когерентными* (имеют одинаковую волновую фазу), поскольку испускаются синхронно. И это их свойство теперь собираются использовать в криптографии для шифровки особо секретных сообщений, направляемых по двум отдельным каналам. При перехвате и попытке дешифровки сообщения по одному из каналов когерентность мгновенно нарушается (опять же в силу принципа неопределенности), и сообщение неизбежно и мгновенно самоуничтожается в момент нарушения связи между частицами.

А Эйнштейн, похоже, был неправ: Бог все-таки играет в кости со Вселенной. Возможно, Эйнштейну все-таки следовало прислушаться к совету своего старого друга и коллеги Нильса Бора, который, в очередной раз, услышав старый припев про «игру в кости», воскликнул: «Альберт, перестань же ты, наконец, указывать Богу, что ему делать!».

Телепортация. С квантовой нелокальностью и мгновенной передачей информации тесно связаны вопросы телепортации и обращения времени. В статье, опубликованной Ч. Беннеттом с соавторами (Bennett, et al), в самом заголовке употреблялся непривычный для физиков термин «телепортация» - «Телепортация неизвестных квантовых состояний через двойной, классический и ЭПР-канал». Эта работа считается отправной точкой современного прикладного этапа в развитии квантовой механики, в частности, теории запутанных состояний и квантовой теории информации.

К настоящему времени проведено очень много экспериментов по квантовой телепортации. Из последних работ в этой области можно упомянуть эксперимент группы А. Цайлингера (Ursin, et al., 2004) по реализации квантовой телепортации через Дунай, то есть на довольно большом расстоянии (600 м). Суть экспериментов по телепортации несложная. Если описать ее упрощенно, она будет выглядеть так: допустим, у нас есть частица 1 и запутанная пара частиц 2–3 (типа ЭПР-пары). Объединяя частицы 1 и 2 (измеряя в белловском базисе), то есть, переводя пару 1–2 в максимально запутанное состояние типа того, которое было раньше у пары 2–3, состояние 3 становится таким, каким было раньше состояние 1, поскольку общее состояние трех частиц не меняется. Таким образом, частица 1 как бы телепортируется на место частицы 3, другими словами, частица 3 приобретает свойства частицы 1.

Сейчас проводятся все более сложные эксперименты по телепортации (Pan et al, 2000). Используется метод, который называется «телепортация запутанности», или «обмен запутанностью». Суть его в том, что две некоррелированные системы можно связать квантовым каналом связи (запутать между собой) при помощи дополнительной вспомогательной системы (ancilla), состоящей из запутанной пары. Когда эти коррелированные части анциллы передаются каждой из двух независимых систем, то последние становятся тоже запутанными, хотя раньше классически не взаимодействовали друг с другом.

Такой обмен квантовой запутанностью предполагается использовать при ее пересылке в определенное место. Если доступный канал передачи имеет ограниченное качество («зашумленность»), то при прохождении через него запутанных состояний корреляции нарушаются из-за декогеренции. В такой ситуации метод квантового повторителя позволяет разделить квантовый канал на короткие участки, которые очищаются известными методами дистилляции запутанности, а затем объединяются методами обмена запутанностью.

Обмен запутанностью может быть использован и для ряда других практических целей: для построения квантового коммутатора, для увеличения скорости распределения запутанных пар между удаленными пользователями, для построения запутанных состояний, охватывающих большое число частиц, и т. д. Сейчас предложено уже довольно большое количество различных схем применения этого метода.

4. Декогеренция.

Процесс квантовой декогеренции, возвращает объект (рис. 1) из квантового мира в мир классический. Воспользуемся подходом к декогеренции, развитым Войцехом Зуреком из Лос-Аламосской национальной лаборатории (Zurek, 2002). Он показывает, что специфический пример декогеренции - частица в точке x , взаимодействующая со скалярным полем ϕ (которое может рассматриваться как набор гармонических осцилляторов), что описывается Гамильтонианом

$$H_{int} = \epsilon x d\phi/dt.$$

В этом случае матрица плотности $\rho(x, x')$ частицы в заданной точке эволюционирует согласно основному уравнению:

$$\dot{\rho} = \underbrace{-\frac{i}{\hbar}[H, \rho]}_{\dot{p} = -\text{FORCE} = \nabla V} - \underbrace{\gamma(x-x')\left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x'}\right)\rho}_{\dot{p} = -\gamma p} - \underbrace{\frac{2m\gamma k_B T}{\hbar^2}(x-x')^2 \rho}_{\text{Classical Phase Space}},$$

где H - Гамильтониан частицы (независимый от потенциала $V(x)$, который учитывается членом $Hint$), γ - коэффициент релаксации, k_B - постоянная Больцмана, а T - температура поля. Это уравнение в первом приближении точно соответствует уравнению Шредингера для частицы в поле и поэтому отображает степени свободы поля.

Уравнение естественным образом разделяется на три слагаемых, каждое из которых отвечает за различный аспект эффективного поведения в классическом случае. Первое слагаемое - уравнение фон Неймана (которое может быть выведено из уравнения Шредингера) - порождает классическую обратимую эволюцию ожидаемого значения некоторой наблюдаемой, что имеет классический аналог для ρ (теорема Эренфеста). Второе слагаемое приводит к диссипации. Коэффициент релаксации $\gamma = \eta/2m$ пропорционален вязкости $\eta = \varepsilon^2/2$, вызванной взаимодействием со скалярным полем. Это взаимодействие уменьшает средний импульс и ведет к потере энергии. Последнее слагаемое также имеет классический аналог: оно ответственно за флуктуации, или случайные "толчки", приводящие к броуновскому движению.

Для наших целей влияние последнего слагаемого на квантовую суперпозицию представляет наибольший интерес. Оно разрушает квантовую когеренцию, удаляя недиагональные члены, отвечающие за квантовые корреляции между пространственно разделенными частями волнового пакета. Следовательно, оно ответственно за классическую структуру фазового пространства, поскольку оно преобразует суперпозиции в смеси локализованных волновых пакетов и, в классическом пределе - в хорошо знакомые точки фазового пространства.

Привычные представления о квантовых процессах в веществе обязывают его находиться при нулевых Кельвинах. Сегодня доказано теоретически (Богданов и др., 2007) и подтверждено экспериментально (Dür, Cirac, 2001), что квантовые процессы, в частности и квантовая запутанность, происходят при комнатной и более высокой температуре.

Физика возникновения в среде многочастичной квантовой запутанности (МКЗ) сегодня практически не известна. В ряде экспериментов эффект достигается, например, при облучении вещества излучением лазера, в других случаях использовался ускоритель заряженных частиц, облучение электромагнитными волнами и т.п.

Корни МКЗ исходят из известного уравнения Гейзенберга и принципа нелокальности, парадокса Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР), «кота Шредингера», неравенств Белла и экспериментов Аспекта. Наиболее известный «продукт» МКЗ - это лазер, менее известны пучок квантовозапутанных атомов водорода в мазере и, вообще, квантовая оптика. Сформировалась как наука квантовая химия. В последние годы идеи МКЗ усиленно развивались в биологии, в частности, удалось показать, что устойчивость ДНК обязана квантовым процессам. В стадии становления находится квантовая биология. На очереди внедрение МКЗ в физику Земли. В этой науке очень много явлений, необъяснимых с точки зрения классической физики. Перечислим такие явления как землетрясения (Leibfried et al., 2005), вулканы, торнадо, алмазные трубки взрыва и т.п. В их числе находится, естественно, и шаровая молния. Вполне возможно, что решение этих проблем позволит придать особый статус такой науке как «квантовая физика Земли». Вероятнее всего, теорию этих явлений удастся создать лишь после того, как будет сформулирована теория МКЗ, квантовой телепортации и декогеренции. Ситуация не

безнадёжна, т.к. без решения этих проблем, невозможно создание квантового компьютера, а научное сообщество решит эту проблему непременно.

5. Эксперименты с квантовой запутанностью. Состояние квантовой запутанности, предсказанное в 1964 году Беллом (Aspect, 2002), долгое время считалось базисом, на котором были построены все последующие эксперименты квантовой физики. Классической физической системе из двух и более объектов не свойственно полное разрушение связей – сумма сил взаимодействия между элементами системы всегда стремится к нулю, но никогда его не достигает. Разрушение (рекомбинация) запутанности (квантовая смерть) не подчиняется этим правилам – она моментально прекращает взаимодействие сил запутанности, бесповоротно разрушая связь между квантами. В квантовой механике подобное явление описывается т.н. редукцией волновой функции.

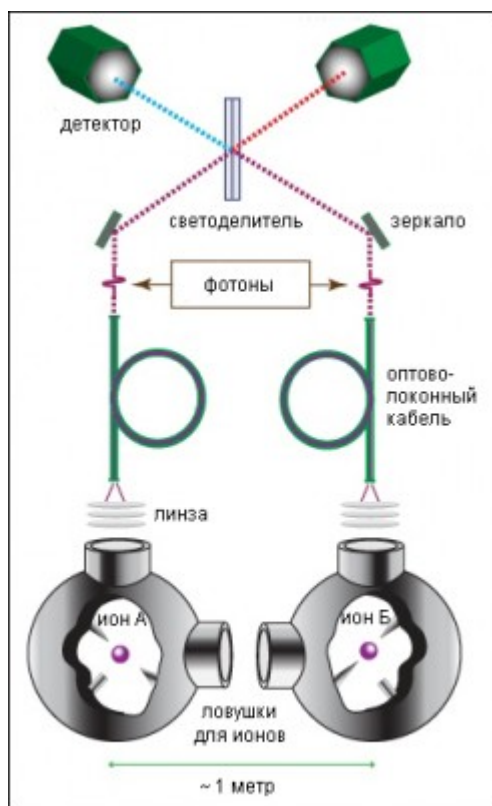


Рис. П1-2. Эксперимент по телепортации фотонов (Moehring, et al., 2007).

На практике эффект внезапной смерти квантовой запутанности возникает при взаимодействии как минимум двух источников «электромагнитного шума» в окружающей среде. Каждый из источников по отдельности вызывает возмущения в запутанности квантов, но два сразу могут привести к незамедлительному запуску «квантовой смерти». В настоящее время, не известно – какие сочетания «шумов» могут оказывать подобное влияние. Так как не существует способов нейтрализовать влияние «шумов», поскольку даже в абсолютном вакууме существуют энергетические вибрации. Подробное изучение «квантовой смерти» позволит находить способы борьбы с ней и, например, создавать столь сложные системы, как квантовый компьютер.

Ученым из Университета Мэриленда (США) удалось осуществить перемещение квантовой информации между двумя атомами, расположенными в метре друг от друга, причем показатель надежности доставки превысил 90 процентов (Moehring, et al., 2007).

Физическую реализуемость квантовой телепортации обеспечивает свойство квантовой запутанности, выражающееся в том, что состояния (а следовательно, и некоторые физические свойства) двух связанных объектов - даже разнесенных в пространстве - оказываются взаимозависимыми. В эксперименте американских ученых связанными оказались два иона иттербия, помещенные в вакуумные ловушки и окруженные металлическими электродами (см. рис. П1-2). Непосредственно перед проведением опыта исследователи определили два основных состояния ионов, которые использовались в качестве элементов хранения квантовой информации – кубитов.

В начале эксперимента ионы (назовем их А и Б) находились в одном из основных состояний. Затем на ион А направлялось микроволновое излучение, испускаемое одним из электродов, в результате кубит оказывался в некоторой суперпозиции своих собственных состояний (происходила запись информации для передачи). Сразу после этого оба иона возбуждались лазерным импульсом пикосекундной длительности. Возврат в одно из основных состояний — «значений» кубита - проходил с испусканием фотонов, «цвет» которых (красный или синий), соответствовавший разным длинам волн, однозначно определял конкретное значение. Затем фотоны с помощью линз направлялись по оптоволоконному кабелю к светоделительному элементу. При попадании на него каждая частица могла либо отразиться, либо пройти напрямую (вероятности этих событий одинаковы). По обеим сторонам светоделителя располагались детекторы.

До попадания на светоделитель каждый из фотонов находился в неизвестной суперпозиции состояний, однако в детекторе могли быть зарегистрированы уже только четыре различных вида частиц, соответствующих цветовым комбинациям «синий-синий», «синий-красный», «красный-синий» и «красный-красный», и лишь в одном из указанных вариантов фотоны одновременно достигают обоих детекторов. В этом случае определить, какому иону «принадлежит» данный квант света, становится невозможно (не хватает информации о том, отразился фотон от светоделителя или прошел насквозь). Такая неопределенность и сигнализирует о том, что квантовые состояния ионов оказались связаны.

Достигнув этого результата, ученые определили состояние иона А. В полном соответствии с законами квантовой механики, измерение вывело его из суперпозиции в некоторое определенное состояние, причем ион Б при этом принял противоположное «значение». Зная выходное состояние кубита А, исследователи установили параметры микроволнового импульса, при воздействии которым на кубит Б из него извлекалась информация, записанная на первой стадии эксперимента. На этом процесс телепортации завершился.

Заметим, что исходное состояние иона А в процессе передачи разрушается; именно это отличает данный процесс от копирования («клонирования») и позволяет применять термин «телепортация».

Приведем ещё пример. Датским ученым удалось связать частицы газов, расположенные на значительном расстоянии друг от друга, передавая информацию от одной к другой при помощи лазера. Между двумя облаками газа была достигнута так называемая "квантовая связь": удалось связать около миллиона атомов цезия, а предыдущим рекордом были всего четыре. По завершении исследований, когда будет получен определенный набор элементарных частиц, станет возможным воспроизводить набор таких же на расстоянии.

В декабре 1997 "Nature" опубликовал информацию о том, что двум группам физиков из Австрии и Италии, независимо друг от друга (и по разным методикам),

удалось экспериментально подтвердить существование явления квантовой телепортации. Группа австрийских физиков под руководством А. Цайлингера наблюдала телепортацию квантового состояния на примере фотонов света. Позже появились сообщения об эксперименте по телепортации фотонов в Италии. Результаты ещё одного эксперимента, показывающие наличие связи между состояниями фотонов на гигантских (в масштабах микромира) расстояниях - более 10 км - опубликованы швейцарскими учёными летом 2001 этого года в журнале "Physical Review A". Эффект квантовой телепортации сейчас в центре внимания физиков, он регулярно затрагивается в специальных журналах - "Nature", "Scientific American". Телепортация была включена в темы докладов на прошедшей в Москве XVI международной конференции "Когерентная и нелинейная оптика".

Следует отметить, что термин "телепортация" применительно к описанным экспериментам не совсем правилен. По существу, речь идёт о мгновенной передаче информации о состоянии частиц без посредства материального носителя. При этом никакой материальный объект, естественно, не переносится мгновенно. Вместе с тем, в квантовом мире устроено так, что если две частицы обладают одинаковыми свойствами, то это действительно абсолютно тождественные частицы и если параметры одной частицы были переданы другой, то она становится точной копией первой, именно такой, какая получилась бы при "настоящей" телепортации. Если чисто гипотетически на основе явления квантовой телепортации нужно было бы осуществлять телепортацию макрообъектов, то выглядело бы это следующим образом: в месте "нуль-передачи" сканируются характеристики всех микрочастиц объекта, информация передаётся в пункт "нуль-приёмника", передаваемый объект разрушается (становится грудой атомов), а принятый объект становится точной копией исходного объекта. Достаточное количество атомов, естественно, должно быть приготовлено заранее в пункте приёма. Эта схема очень хорошо описана в романе писателя-фантаста Клиффорда Саймака "Пересадочная станция".

Опыты, проведённые учёными Орхусского Университета (Дания) в конце сентября 2001 года, доказали практическую возможность такой телепортации. Экспериментаторы добились квантовой связи между двумя облаками охлаждённых почти до абсолютного нуля паров цезия, расположенными на значительном расстоянии друг от друга. Датчанам удалось связать около миллиона атомов цезия, правда, на очень короткое время, на доли миллисекунды. Связь должна приводить к взаимному влиянию облаков пара. По версии экспериментаторов, воздействие на оригинал влечёт аналогичное изменение параметров копии. Исследователи планируют изучение свойств полученного канала с целью реализации в будущем возможности передачи копий структур из атомов. Удачный эксперимент, поставленный в марте 2009 в Калифорнийском университете, показал, что квантовые состояния можно передать на расстояние до 1000 километров за 7,2 микросекунды (!).

6. 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 (Sackett et al., 2000) и $N = 5$ фотонов (Zhao et al., 2004). 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 (Häffner et al., 2005) австрийской группы сообщается об успешном конструировании W-состояний из $N = 4, 5, 6, 7$ и 8 ионов $^{40}\text{Ca}^+$ 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 (Häffner et al., 2005) 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 $^9\text{Be}^+$ в магнитной ловушке ((Leibfried et al., 2005). 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 $|Cat\rangle$ гораздо сильнее подвержены декогеренции, чем W-состояния. Основной причиной декогеренции является спонтанная эмиссия. Зато состояния $|Cat\rangle$ могут быть использованы для приготовления белловских состояний любой пары кубитов, что делает их незаменимыми в квантовой криптографии.

Авторы работ (Häffner et al., 2005; Leibfried et al., 2005) 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 (Чернявский, 2009) 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 Н, ковалентно связанным с атомом А группы А-Н молекулы RA-Н и электроотрицательным атомом В 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 °С. 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 действия 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 (Kandrashkin, 1998) , то в биологии - ситуация не столь однозначна (Wiseman, Eisert , ArXiv) . 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 милikelвинов) представляется совершенно нереалистичной.

7. Что известно о МКЗ, теория и эксперименты

В работе (Богданов и др., 2007) 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: $\theta = -\hbar\omega/\ln(f^2)$.

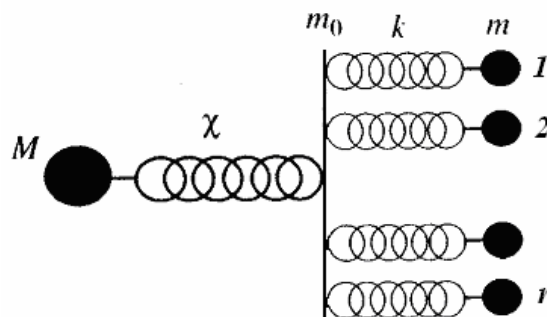


Рис. П1-3. Система осцилляторов, связанных друг с другом посредством перегородки; k, m – жесткость и масса осцилляторов с номерами $j = 1, 2, \dots, r$, χ, M – жесткость и масса $(r + 1)$ -го осциллятора, m_0 – масса перегородки (Богданов и др., 2007).

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 (Dür; Cîgas, 2001) выполнен теоретический анализ двух экспериментов по МКЗ состояний 3 (4) частиц. Обсуждается проблема активизации запутанности. В работе (Neumann., et al., 2008) 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 бóльшую устойчивость, до сих пор ни у кого не получалось.

По-видимому, самым удивительным результатом, в плане изучения эффектов МКЗ можно считать эксперимент (Desbrandes, Van Gent, 2006), 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. П1-4). Этот эксперимент выходит за рамки обычных представлений. Авторы ((Desbrandes, Van Gent, 2006) осознавая это, предлагают повторить его в других условиях.

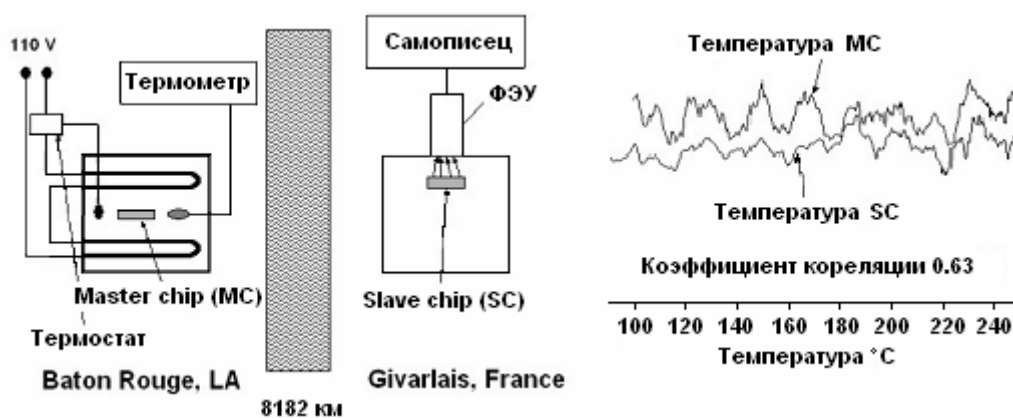


Рис. П1- 4. Слева: трансконтинентальный эксперимент между Батон-Руж, Луизиана (США) и Живарлэ (Франция). Справа: Вверху – температура чипа H1, LiF100 подогреваемого в Батон-Руж. Внизу – сигнал от вспомогательного образца в Живарлэ (Desbrandes, Van Gent, 2006).

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.

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 (Souza, et al., 2008; Souza, et al., 2009). 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 исследовалась магнитная восприимчивость. Двухчастичная запутанность наблюдалась при температуре ниже 200 К., трехчастичная запутанность наблюдалась при температуре ниже 240 К. Авторы (Souza, et al., 2008) изучали теорию эволюции запутанности как функции поля и температуры. В работе (Souza, et al., 2009) 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 (Souza, et al., 2009) 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 (Алдошин и др., 2008) 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 Вуттерса (Wootters, Zurek, 1982):

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

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: $T_e \approx 80\text{-}90$ К, а для комплекса II: $T_e \approx 110\text{-}120$ 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 (Wieśniak, et al., 2005).

8. 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 (Денисова, 2001). 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 (Хакен, 1980): «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 (Денисова, 2001). 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 (Денисова, 2001): «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 (Денисова, 2001) 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 (Zak, 2002) 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 (Матизен и др, 2009) 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).

В работе (Матизен и др, 2009) 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.

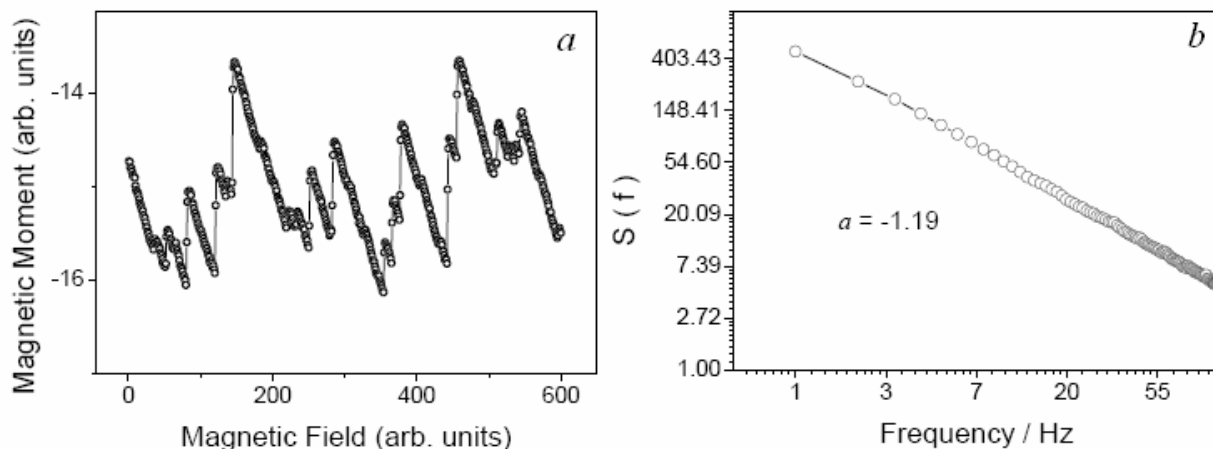


Рис. П1-5. Часть кривой магнитного гистерезиса – *a*. Фурье-спектр лавин магнитного потока - *b* (Матизен и др, 2009).

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 (Валиев, Кокин, 2001.; Paladino et al., 2002; Vacciagaluppi, 2007), о чем в статье не говорится. Мне представляется, что если полученные авторами результаты интерпретировать в терминах МКЗ и спиновых волн (Plastina et al., 2004), 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.

9. 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 (Wootters, Zurek, 1982; Dieks, 1982) 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 (Tsallis et al., 2001; Kim, Sanders, 2009; Kim, Tsallis, 2010), совсем другая ситуация, возникает при т.н. полигамии, когда, используя формализм энтропии Тцаллиса, авторам удается доказать, что МКЗ может существовать.

Тцаллис показал (Tsallis, 1988), 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 бoльцмановской 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 *дальнодействующим взаимодействием*, в пределе – взаимодействия между частицами «каждая с каждой». Существуют и другие системы, которые не могут быть описаны бoльцмановской 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 небoльцмановская. Это значит, что выражение для энтропии могло бы описать неэкстенсивные системы и переходить в стандартную формулу в пределе слабой связи. Тцаллис 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 бoльцмановскую энтропию.

В работах (Tsallis et al., 2001; Kim, Sanders, 2009; Kim, Tsallis, 2010), 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 $2 \leq q \leq 3$ (Plastina et al., 2004). В (Башкиров, 2007) убедительно показано, что информация Тцаллиса есть вырожденная форма энтропии Реньи. Для описания сложных систем в книге (Встовский, 2002) 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 (Встовский, 2002).

10. 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 (Allan , et al., 2007; Fillaux et al., 2008), в том числе у пара-воды (у орто-воды - таких способностей нет), - спиновые степени свободы (Neumann et. al., 2008); - нитрозильные комплексы железа; - магнитная восприимчивость; - джозефсоновские переходы (Матизен и др., 2009); - гидратированные ионы; - спиновая поляризация квантовых состояний в тонких слоях немагнитного металла при температуре Ферми 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].

11. МКЗ и самосинхронизация

Обратимся к мнению ведущего в России специалиста по физике нелинейных колебательных систем и воздействию вибрации на различные среды И.И. Блехмана. Недавно вышла обобщающая его опыт статья (Блехман , 2008), посвященная, в частности, явлению синхронизации элементов многоэлементной колебательной системы. Представим себе, что несколько объектов (например, волчков), вращаются с различными частотами. Объединим их в единую систему путем установки на общую массивную плиту (см. рис.3). В этом случае волчки начинают вращаться с одинаковой, или кратными частотами. В этом состоит явление синхронизации. Тенденция к синхронизации, даже при слабой связи между объектами, оказывается во многих случаях столь сильной. Самосинхронизация маятниковых часов была обнаружена ещё Х. Гюйгенсом. Известна самосинхронизация планет и спутников солнечной системы (закон Боде). Принято считать, что речь идет о т.н. «притяжении ритмов», характерном для взаимодействующих объектов как живой, так и неживой природы – неуравновешенных роторов, турбинных лопаток, электрических генераторов, небесных тел, птиц, насекомых, сообществ клеток и даже сообществ людей (в том числе и массовый психоз).

Самосинхронизация – фундаментальное явление, происходящее как в микро-, так и в макромире: например, синхронизация орбит и ядерный магнитный резонанс. Самосинхронизация, несомненно, играет важную роль в биологических и физиологических процессах. Однако природа самосинхронизации остается неясной, несмотря на фундаментальные работы А.М. Ляпунова, В.И. Арнольда, Н. Винера и др. Остается выяснить, не является ли МКЗ возможным решением проблемы самосинхронизации.

12. Что следовало бы сделать и чего можно ожидать

Рассмотрим несколько предложений в плане проведения исследований, имеющих конечную цель – выяснить природу многочастичной квантовой запутанности. В этом разделе мы не будем касаться теоретических исследований, т.к. я считаю себя, по всему предыдущему опыту, – экспериментатором. Так как мой основной интерес сосредоточен на физике Земли, предложения в значительной мере касаются этой области знания. Перечислим эти предложения:

- Повторить исследования, начатые в экспериментах по дальнодействию МКЗ на термолюминисцентных кристаллах (рис. 4) (Desbrandes, Van Gent, 2006). В этих экспериментах можно было бы попытаться разобраться в таких вопросах, как условия приведения системы в состояние запутанности, оценка степени запутанности и характерное время её спада и т.д.
- Выяснить, можно ли считать, что эксперименты по аномальному увеличению АЭ нагруженных образцов горной породы (Журков и др., 1980; Kusunose et al., 1991) имеют в основе МКЗ. Если причина этого явления действительно МКЗ, то имеет смысл провести эксперимент идентичных образцов на двух различных прессах и выяснить насколько коррелируют результаты наблюдений. Можно также выяснить, зависит ли предполагаемый эффект от расстояния между образцами, аналогично тому, как это было получено в предыдущем опыте.
- Разобраться в физике появления в АЭ режима акустического молчания (Купцов, 2006). Выяснить, является ли причиной этого эффекта возможный механизм нарушения квантовой запутанности объекта, области пространства, принимающего участие в формировании УВ, - со средой. Поняв физику квантовой запутанности, можно попытаться строить научно обоснованные системы прогноза землетрясений. Предположим, что причина декогеренции и образование при этом ударной волны, т.е., собственно, землетрясения, состоит в квантовой запутанности протонов водородных связей. Предположим далее, что запутываются не только протоны, входящие в состав минералов в районе гипоцентра. Будем полагать, что в этот процесс включены протоны водородных связей воды, атмосферных водных аэрозолей и т.п. В этом случае открывается путь к пониманию таких предвестников, как изменение атмосферного электричества, свечение воды, явления в ионосфере, генерация частиц высокой энергии и пр.
- Провести лабораторное моделирование возникновения магматического очага в среде за счет разрушения водородных связей и изменения уравнения состояния среды. Облучая лед синхротронным излучением с энергией квантов, равной энергии водородных связей и разрушая их при этом, получить, по возможности, эффект плавления льда без его внешнего нагрева.
- Анализ данных по акустической эмиссии возникающей при плавлении льда дает основание предположить, что газогидраты также могут быть источниками акустических сигналов. Эта идея, с одной стороны, открывает возможность обнаруживать природные залежи газогидратов по регистрации уровня акустической эмиссии. С другой - оценить, может ли возникнуть в такой среде МКЗ. Если действительно это явление может происходить, то при декогеренции и редукции волновой функции - должны образовываться огромные пузыри метана, всплывающие во время декогеренции, характеризующейся предшествующим ей резким усилением акустической эмиссии.
- МКЗ в момент декогеренции ведёт к выделению в «запутанной» системе скрытой теплоты структурного фазового перехода. Этот факт оставляет надежду на то, что, поняв физику явления МКЗ и научившись управлять квантовой запутанностью, можно рассчитывать на освоение принципиально новых источников энергии из окружающей среды.
- Выяснение многих проблем МКЗ возможно, по моему мнению, при проведении исследований на установке, описанной в работе (Матизен и др., 2009), в частности: в чем состоит физика запутывания (почему СОК возникает в случае SIS, и отсутствует в случае SNS); можно ли считать лавины потока спиновыми волнами; имеет ли место запутывание со средой и декогеренция; и т.п.

13. Заключение

По-видимому, МКЗ можно рассматривать как инструмент, позволяющий связать квантовую физику с физикой классической. Раздел науки, в котором предпринимаются

аналогичные попытки понять как эфемерный квантовый мир «перетекает» в привычную, воспринимаемую нашими органами чувств реальность получил название квантовый дарвинизм. Квантовый дарвинизм – теория возникновения классического описания мира из квантовых законов, согласно которой - классические параметры наиболее устойчивы к т.н. квантовой декогеренции, быстрее размывающей описания, основанные на других параметрах. Декогеренция квантовой системы (появление у нее классических черт) возникает в процессе взаимодействия системы с окружающей средой и хорошо описывается в рамках теории непрерывных квантовых измерений (Blume-Kohout, Zurek, 2006; Ananthaswamy, 2008).

Теория декогеренции (иногда называемой «динамической» декогеренцией) изучает конкретные спонтанные взаимодействия, которые приводят к подавлению интерференции. Концепция декогеренции описывает процесс «коллапса» многих квантовых состояний при взаимодействии с окружающей средой.

В моделях таких взаимодействий проявляются некоторые интересные свойства (это не означает, что все такие свойства являются общими для всех моделей) (Vaccigaluppi, 2007):

- Подавление интерференции может быть исключительно быстрым процессом, в зависимости от самой рассматриваемой системы и ее окружения.
- 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 на одного из ведущих специалистов по квантовой запутанности Влатко Ведрала (Verdal, 2008), 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 надежно 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...

Литература

- Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры; надежды и реальность. 2001. Ижевск: РХД. 352 с.
- Встовский Г.В. Элементы информационной физики. М.: МГИУ. 2002. 260 с.
- Денисова Н.А. Проблема самоорганизации вещества и физика // Докл. XII Межд. симп. "Перестройка естествознания в третьем тысячелетии" 2001.
- Дроздов А.В. Гидратация биологических молекул и орто- пара-молекулы H₂O // VIII Международная Крымская конференция «Космос и Биосфера». Судак. 2009.
http://cb.science-center.net/conf/Files/Drozdvov3_Session_4_Ru.htm
- 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.
- Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения. Кандидатская диссертация. ИКИР ДВО РАН. 2006.
- Матизен Э.В., Мартынец В. Г., Безверхий П. П. Состояние самоорганизованной критичности в джозефсоновской решётке // Вестник СибГУТИ. 2009. № 3 С. 137-144.
- Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с
- Чернявский А.Ю. Неэквивалентность двухчастичной и многочастичной квантовой запутанности // Микроэлектроника. 2009. Т. 38. №. 6. С. 449-451.
- Шишкин А.М., Радер О. Квантовые состояния как посредники в магнитном взаимодействии // Природа. 2010. № 5. С. 18-26.
- Ananthaswamy A. Quantum Darwinism // Foundation Questions Institute. 2008, November. P 1-3.
- Aspect A. Bell's theorem: the naïve view of an experimentalist // Quantum [Un] speakables – From Bell to Quantum information. Ed. R.A. Bertlmann & A. Zeilinger, Springer. 2002.
- Bacciagaluppi G. The role of decoherence in quantum mechanics // Stanford Encyclopedia of Philosophy. 2007. <http://plato.stanford.edu/entries/qm-decoherence/>
- 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.
- Desbrandes R., Van Gent D.L. Intercontinental liaisons between entangled electrons in ion traps of thermoluminescent crystals // arXiv:quant-ph/0611109 2006.
- Dieks D. Communication by EPR devices // Physics Letters A. 1982. V. 92(6). P. 271-272.
- Dür W., Cirac J. I. Multiparticle entanglement and its experimental detection // J. Phys. A: Math. Gen. 2001. V. 34. P. 6837-6850.
- Fillaux F., Cousson A., Gutmann M.J. A neutron diffraction study of macroscopically entangled proton states in the high temperature phase of the KHCO₃ crystal at 340 K // J. Phys.: Condens. Matter 2008 20 015225
- Häffner H., Hänsel W., Roos C. F. et al. Scalable multiparticle entanglement of trapped ions // Nature. 2005. V. 438. P. 643-646.
- 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.
- Kim J. S., Sanders B.C. Monogamy and polygamy for multi-qubit entanglement using Renyi entropy // arXiv:0911.5180v1 [quant-ph] 2009
- 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]).
- 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.

Leibfried D., Knill E., Seidelin S. et al. Creation of a six-atom ‘Schrödinger cat’ state // *Nature*. 2005. V. 438, 639-642.

Moehring D.L, Maunz P., Olmschenk S., et al. Entanglement of Single Atom Quantum Bits at a Distance. *Nature*, 2007, V. 449, P.41.

Neumann P., Mizuochi N., Rempp F., et al. Multiparticle entanglement among single spins in diamond // *Science*. 2008. V. 320. P. 1326-1328.

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.

Pan J.-W., [Gasparoni S](#), [Ursin R](#), et al., Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. *Nature*. 2000. V. 403. P. 515–519.

Sackett C. A., Kielpinski D., King B. E. et al. Experimental entanglement of four particles // *Nature*. 2000. V. 404. P. 256-259.

Schrödinger E. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik // *Naturwissenschaften*, 1935, **48**, 807, **49**, 823, **50**, 844

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.

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.

Tielrooij K.J., Garsia-Araez N., Bonn M., Bakker H.J. Cooperativity in ion hydration // *Science*. 2010. V. 328. P.1006-1009.

Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics // *J. Stat. Phys.* 1988. V. 52. P. 479-487.

Tsallis C., Lambert P.W., Prato D. A non extensive critical phenomenon scenario for quantum entanglement // *Physica A*. 2001. V. 295. P. 158-171.

Ursin, R. *et al.* Quantum teleportation link across the Danube. *Nature* **430**, 849 (2004)

Vedral V. Progress Article Quantifying entanglement in macroscopic systems // *Nature*. 2008. V. 453. P. 1004-1007.

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

Wiseman H.M., Eisert J. Nontrivial quantum effects in biology: A skeptical physicists’ view // ArXiv: 0705.1232

Wootters W.K., Zurek W.H. A Single Quantum Cannot be Cloned // *Nature*. 1982. V. 299. P. 802-803.

Wootters W.R. Entanglement of formation of an arbitrary state of two qubits // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 80. N. 10. P. 2245-2248.

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.

Zurek W.H. Decoherence and the transition from quantum to classical - Revisited // *Los Alamos Science*, Number 27 2002