

## ПРОЕКТ

### **МНОГОЧАСТИЧНАЯ КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ – «ПРОРЫВНОЕ» НАПРАВЛЕНИЕ В НАУКЕ.**

Кузнецов В.В., И.В. Кузнецов

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.

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.

### Многочастичная квантовая запутанность (МКЗ)

[http://issp.ras.ru/Control/Inform/perst/2006/6\\_01\\_02/perst.htm](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 и  $N = 5$  фотонов. 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 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  $\approx 1$  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  $\approx 1$  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  $\approx 10$  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.

Сотрудники Национального института стандартов и технологии (Боулдер, США) сообщили о создании состояний  $|\text{Cat}\rangle$  из  $N \leq 6$  атомных кубитов с базисом из сверхтонких уровней ионов  ${}^9\text{Be}^+$  в магнитной ловушке. 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 этих работ 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 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 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, то в биологии - ситуация не столь однозначна. 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.

### **Что известно о МКЗ, теория и эксперименты**

Группой академика Валиева К.А. 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.

В этой 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. Выполнен теоретический анализ двух экспериментов по МКЗ состояний 3 (4) частиц. Обсуждается проблема активизации запутанности. 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.

### **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. 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: «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. 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.

М. Зак 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.

### **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.

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):

- 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 хотелось бы сослаться на мнение на одного из ведущих специалистов по квантовой запутанности Влатко Ведрала, 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.

Материал, представленный в этом проекте, более подробно, с ссылками и рисунками, - изложен в одноименной статье на сайте одного из авторов:

<http://www.vvkuz.ru> на страничке «Статьи» под № 64.