

**Межконтинентальные квантовые связи между запутанными электронами
в ионных ловушках термолюминисцентных кристаллов
(quant-ph/0611109)**

Роберт Дебранд, Дэниел Л. ван Гент (США)

Перевод М.Х.Шульмана

**Intercontinental quantum liaisons between entangled electrons
in ion traps of thermoluminescent crystals
(quant-ph/0611109)**

Robert Desbrandes (Louisiana State University) and
Daniel L. Van Gent (Oklahoma State University)

Endorser: Professor Robert O'Connell (Louisiana State University)

Ключевые слова: запутывание(entanglement); квантовые ловушки; дозиметрия
термоизлучения, удаленное переключение, вынужденная люминисценция;
тормозное излучение; переключение запутанного состояния (entanglement swapping);
ионные ловушки; декогеренция запутывания; квантовые коммуникации.

Рецензент: Профессор Роберт О'Коннелл

Аннотация

Эксперименты, описываемые в этой статье, были выполнены с пространственно-разделенными запутанными TLD-кристаллами (кристаллами для термолюминисцентной дозиметрии), находящимися в Батон-Руж, Луизиана (США) и Живарлэ (Франция) на расстоянии 8182 км. Образцы из легированного фторида лития, превосходного TLD-материала, используемого в промышленности, 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 затем 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 был достигнут максимум температуры TLD, точно соответствовал моменту максимума корреляции сигнала фотоэлектронного умножителя, записанного в Живарлэ.

1 - Введение

За последнее время были опубликованы многочисленные отчеты об экспериментах с запутанными фотонами. Такое запутывание предсказывалось квантовой механикой (КМ) начиная с 1920 г. В 1935 г. Эйнштейн, Подольский и Розен написали статью [1], в которой они поставили под сомнение истинность концепции запутывания, следующей из теории, и предположили существование “скрытых переменных” для объяснения запутывания. В 1962 г. Дж. С. Белл [2] математически показал, что эксперименты могли бы показать истинность предсказаний КМ. Далее в 1980 [3] А. Аспек, применив критерий Белла, экспериментально показал, что феномен запутывания фотонов подчиняется правилам КМ.

В период 1990-2000 г.г. некоторые экспериментаторы показали, что запутанные фотоны, генерируемые нелинейными кристаллами, могли оставаться запутанными на расстоянии до 10 км [4]. Мгновенное разрушение запутанного состояния, обусловленное измерением поляризации одного из фотонов, приводило к немедленной фиксации поляризации другого фотона в соответствии с КМ. Были также осуществлены эксперименты по телепортации, в которых один фотон мог быть воспроизведен при транспортировке с помощью пары запутанных фотонов [5]. Теоретически было изучено [6] и продемонстрировано экспериментально [7] переключение запутывания (entanglement swapping), состоящее в передаче запутывания от одной совокупности частиц к другой. Авторами была выполнена определенная работа с гамма-излучением, испускаемым кобальтом-60, и с тормозным гамма-излучением на линейном ускорителе. Эти эксперименты показывают, что такие гамма-частицы являются запутанными, поскольку они могут переключать свое запутывание в метастабильные ядра при их возбуждении. Это ядерное запутывание затем верифицируется с помощью более короткого начального времени полураспада возбужденного ядра в ходе его естественного перехода в невозбужденное состояние [8]. Авторы далее одновременно освещали два образца, разделенных пространственно, и проверяли, что выходы из возбужденного состояния под действием рентгеновского облучения в одном образце обуславливали аналогичные изменения состояний в другом образце [10] в соответствии с КМ. Некоторая работа в этом же направлении была также проделана с фотолюминисцентными образцами [11]. Настоящая работа содержит продолжение этих исследований с использованием ловушек в термолюминисцентных образцах для переключения запутывания в рентгеновских и гамма-лучах, испускаемых ранее упомянутыми источниками.

2 – Краткие сведения о запутанных состояниях

Квантовая механика учит нас, что когда две частицы одновременно или квази-одновременно испускаются одним и тем же объектом, они оказываются запутанными. Они обладают общей волновой функцией, которая может быть записана в виде:

$$|\Psi\rangle_{AB} = 1/\sqrt{2} [|0\rangle_A(x) |1\rangle_B - |1\rangle_A(x) |0\rangle_B]$$

где (x) означает тензорное произведение.

Мы, таким образом, видим, что когда частица А измерена в состоянии $|0\rangle_A$, то волновая функция коллапсирует, и частица В немедленно перейдет в состояние $|1\rangle_B$.

Эта теория была доказана вышеупомянутыми экспериментами. В настоящей работе состояние частицы А не измеряется, оно воспроизводится путем вынуждения перехода из состояния $|1\rangle_A$ в состояние $|0\rangle_A$, следовательно, частица В должна перейти в состояние $|0\rangle_B$, как объясняется экспериментами, описанными в статьях [8, 10], равно как и ниже описываемыми экспериментами.

Интересно отметить, что коллапс волновой функции никак не связан с пространственным положением частиц А и В, что свидетельствует, что этот феномен в случае пространственно разделенных частиц является мгновенным и не зависит от расстояния и среды, в которую погружены частицы.

3 – Краткие сведения о термолюминисценции

Термолюминисценция происходит в кристаллах, содержащих включения, или примеси других атомов, или атомы легирующих веществ. Такие кристаллы обладают свойством сохранять влияние, вызванное облучением рентгеновскими или гамма-лучами. Это влияние может сохраняться годами, и используется для геологической и археологической датировки материалов естественного происхождения или гончарных изделий. Искусственные кристаллы используются в термолюминисцентной дозиметрии (TLD) для измерения ионизирующих излучений. При нагревании кристаллов энергия высвобождается в виде света. В описываемом эксперименте были использованы кристаллы именно дозиметрического типа. Сама термолюминисценция описывается в терминах зонной теории, как сформулировано ниже [12]:

- Ионизация атомной решетки, обусловленная рентгеновским или гамма-излучением, высвобождает некоторые электроны из зоны валентности. Образуются дырки, а электроны переходят в энергетическую область зоны проводимости.

- Эти электроны затем улавливаются ловушками, образованными включениями, атомами примесей или атомами легирующего вещества в запрещенной зоне кристаллической решетки. Там они сохраняются в метастабильном состоянии.

- Такое метастабильное состояние, в зависимости от типа кристаллического материала, может сохраняться от очень короткого промежутка времени до тысяч лет.

- Тепловая или оптическая энергия, приложенная к кристаллу, позволяет электронам вырваться из ловушек. Тогда они возвращаются в зону валентности, излучая свет, в этом и состоит феномен термолюминисценции.

Ловушкам кристалла требуется различная тепловая или оптическая энергия для высвобождения электронов, в зависимости от их энергетической “глубины”. “Мелкие” ловушки окажутся пустыми при низких температурах, например, при 140°C, “глубокие” ловушки требуют более высоких температур, например, 240°C. Для запутанных электронов, как будет разъяснено ниже, процесс освобождения ловушек кажется гораздо более сложным.

4 – Запутывание в тормозном гамма-излучении

Тормозное излучение – это электромагнитное излучение, генерируемое при ускорении заряженной частицы, например, электрона, который отклоняется другой

заряженной частицей, такой, например, как атомное ядро. Его открыл в 1888 Николай Тесла. Эффект тормозного излучения сегодня больше всего используется в процессах излучения, вызванных замедлением заряженной частицы при отклонении ее другой заряженной частицы.

В представленных экспериментах излучение обусловлено лучом высокоэнергетических электронов, бомбардирующих мишень из вольфрама. Эффективность такого процесса дается выражением:

$$\eta = C U Z$$

Здесь C - коэффициент, U - напряжение, Z – атомный номер. Для компактного линейного ускорителя, использовавшегося в эксперименте, $U = 6 \text{ MeV}$, $Z = 184$ и

$$\eta = 40\%$$

Из-за большого количества выделяемого тепла такой ускоритель не может работать непрерывно, так что значительное облучение должно производиться порциями.

В тяжелых атомах – таких, как вольфрам – генерируется широкий спектр фотонов, поскольку один электрон порождает в среднем большое число фотонов. Этот спектр максимален примерно при 1.5 – 6 МэВ [13]. Фотоны формируются в виде конуса с угловым раствором, зависящим от энергии. Например: 5° при 35 МэВ, около 30° при 6 МэВ.

Поскольку один электрон создает несколько фотонов одновременно, эти фотоны, в соответствии с КМ, оказываются запутанными. Будучи статистически распределенными в конусе, запутанные фотоны могут сталкиваться с некоторыми частицами, переключать (swap) свое запутывание с ядрами или электронами атомов. Ускорители электронов, таким образом, оказываются эффективным средством для облучения термолюминисцентных материалов, в процессе которого могут сохраняться запутанные электроны.

5 – Переключение запутывания

За последние несколько лет было опубликовано много статей, посвященных переключению запутывания, особенно применительно к компьютерам. Общепринятая схема переключения запутывания показана на рис. 1.

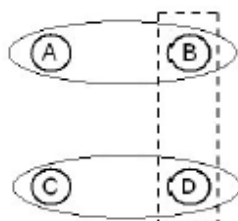


Рисунок 1 – Переключение запутывания между двумя запутанными парами частиц [7]

Теория говорит о том, что если измерение осуществляется одновременно над элементами (B) и (D) пар запутанных частиц (A) (B) и (C) (D), то запутанное состояние между частицами пар (A) (B) и (C) (D) разрушается, но элементы (A) и (C) становятся запутанными между собой, хотя перед этим они никогда не контактировали друг с другом.

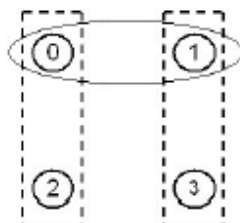


Рисунок 2 – Переключение запутывания между двумя запутанными гамма-квантами и двумя электронами.

В описываемом здесь случае на рис. 2 схематически показаны два запутанных гамма-кванта (0) и (1), одновременно взаимодействующими с двумя электронами (2) и (3) в кристалле. Это приводит к запутыванию электронов (2) и (3) и разрушению запутывания между гамма-квантами (0) и (1). Эти запутанные электроны затем захватываются в кристалле ловушками и могут оставаться там при подходящей температуре в течение месяцев и лет.

6 – Хранение запутанного состояния

Недавнее исследование с электронами в магнитных материалах показало, что при очень низких температурах движение электрона не прекращается [14]. Спины электронов попарно запутаны, и их исходная связь сохраняется вплоть до полного замораживания, вопреки предсказанию классической физики [12].

В упрощенной теории люминисценции вероятность освобождения захваченных ловушкой электронов дается уравнением Аррениуса:

$$p = A \exp(-E/kT)$$

где A – константа, p – вероятность освобождения захваченных электронов, E – энергетическая глубина ловушки, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Это уравнение говорит нам, что в случае незапутанных электронов в ловушках термолюминисцентных материалов, эти ловушки освобождаются настолько быстро, насколько под действием температуры возникают фононы с энергией, достаточной для переключения незаполненного состояния ловушек (to trigger the emptying of the traps). Например, эта энергия при 140°C равна $kT = 5.37 \times 10^{-21}$ Дж ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К). Ловушки сохраняют незаполненное состояние по мере нарастания температуры. Опустошение ловушек может быть медленным, и для полного их “выжигания” применяются специальные технологии, однако, поскольку при выжигании kT много больше, чем E , ловушки освобождаются достаточно быстро. Это явление подтверждено экспериментально при измерении интенсивности термически вынужденной термолюминисценции CLINAC облученных TLD-чипов.

Когда чипы подвергались повторному тепловому воздействию, их отклик составил только от 2 до 3% первоначальной вынужденной термолюминисценции, измеренной в ходе первого цикла теплового воздействия. Полное опустошение большинства ловушек для LiF200 TLD-кристаллов требует как минимум 10 минут при 250°C. Для LiF100 TLD-кристаллов [12] требуется температура 400°C в течение часа как минимум.

Запутанные электроны, как показывают эксперименты, покидают ловушки при нарастании температуры лишь в очень узкой и четко ограниченной ее полосе. Следовательно, полное опустошение мелких ловушек, например при 140°C, снова наблюдается при уменьшении температуры или “обратном ходе” в процессе охлаждения после начального нагрева до 250°C или более. Это явление может быть обнаружено, как показано в экспериментах, после нескольких циклов нагрева до 250°C или более.

Далее, запутанные электроны, как кажется, устойчивы по отношению к декогеренции, разрушающей связи между ними, поскольку образцы, совместно облученные за несколько месяцев до описываемых здесь экспериментов, еще генерируют интенсивный отклик. Очень большое число одиночных электронов одного кристалла запутаны с электронами другого кристалла и “хранятся” в относительно свободном от декогеренции пространстве примесных ловушек кристаллов. Выясняется, что ионные ловушки ведут себя очень сходно с резонансными полостями в квантовой электродинамике.

7 – Лабораторные эксперименты

В эксперименте были использованы два типа чипов из фторида лития: LiF100M и LiF 200A. Их характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики термолюминисцентных LiF – чипов (см. [12] и [15])

Наименование	Состав	Форма	Размер (мм)	Срок годности (Гига лет)	Пики интенсивности
LiF100M	LiF: Mg, Ti	Квадр.	3.2-3.2-0.9	От 50×10^{-6} до 500	137-170- -190-210
LiF200A	LiF:Mg,Cu, P	Цилиндр.	4.5 Диам 0.8	От 0.5×10^{-6} до 12	145-232

Фотография чипов показана на рис. 3.

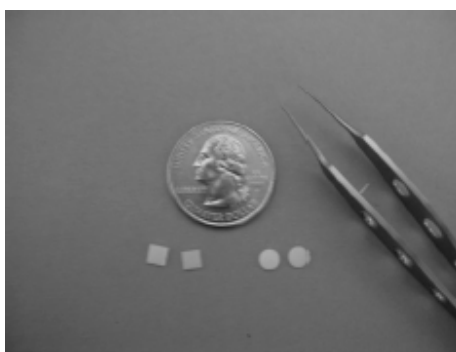


Рисунок 3: Чипы LiF 100 - слева, чипы LiF 200 - справа, на фоне 25-центовой монеты.

Экспериментальная лабораторная установка показана на рис. 4. Обычный духовой шкаф, оборудованный термометром с записывающим устройством и термостатом, обеспечивающим отключение при достижении заданного максимума (без последующего повторного включения). Основной чип расположен между двумя листами алюминиевой фольги. Справа в 4 м от установки в толстом стальном цилиндре смонтирован фотоумножитель, который соединен с компьютером, регистрирующим данные. Вспомогательный чип размещен на расстоянии 10 мм от фоточувствительного торца (диаметром 25 мм) фотоумножителя.

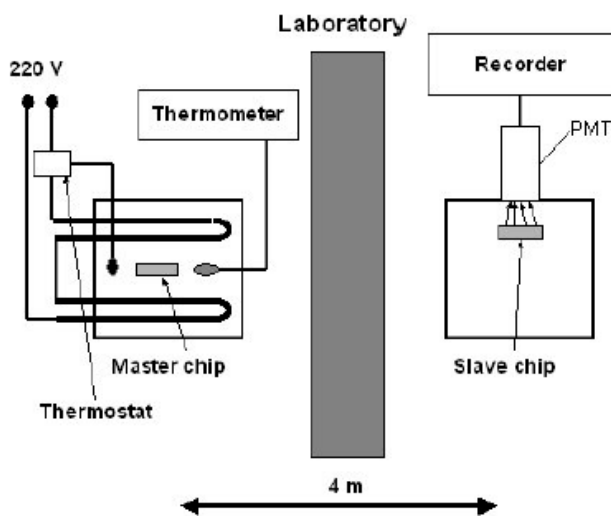


Рисунок 4 – Лабораторная установка
(Thermometer - термометр, Recorder - регистратор, Thermostat - термостат,
Master chip – основной чип, Slave chip – вспомогательный чип,
PMT - фотоумножитель)

По мере того, как температура духового шкафа сначала растет, а затем падает, запись ее значений изменяется так, как показано на рис. 5. На этой типичной осциллограмме можно видеть и участок кривой интенсивности по мере уменьшения температуры. Поскольку темп уменьшения температуры ниже, пики больше.

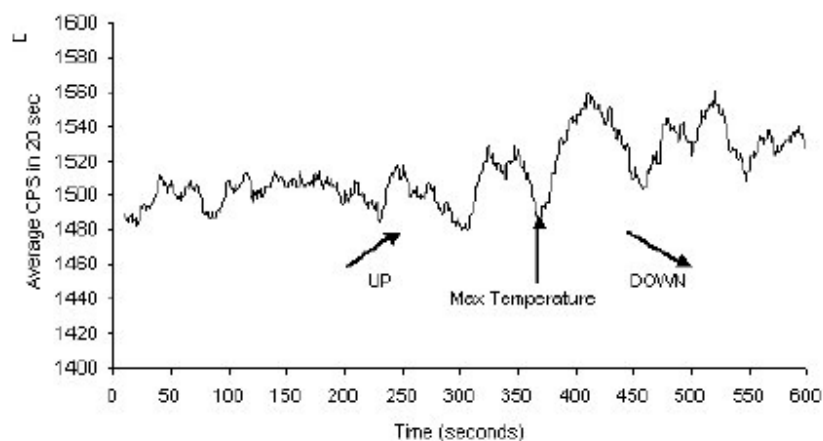


Рисунок 5 - Тест 2, LiF200, 2 гамма-лучи, фотоумножитель 2, с нагревом, 2006
 Сигнал вспомогательного чипа (не подогреваемый)
 (слева участок нарастания – UP,
 справа участок уменьшения температуры – DOWN)
 Нагреваемый основной чип находится на расстоянии 4 м

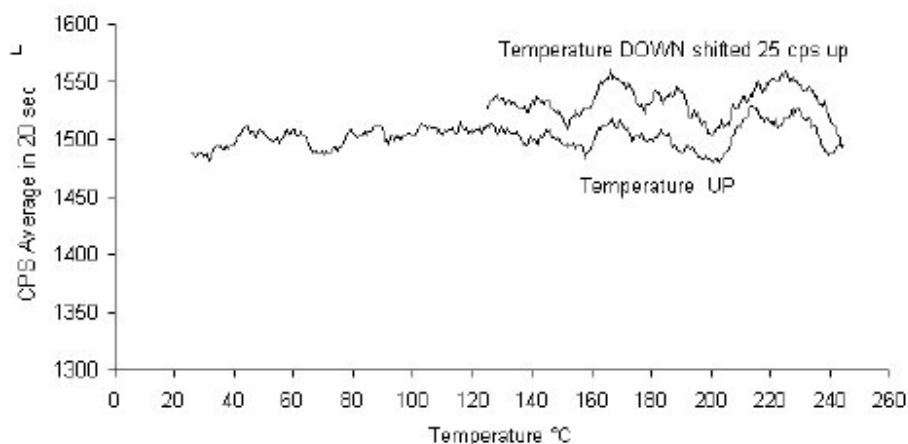


Рисунок 6 – Тест чипа 2, LiF200, 2 гамма-лучи, фотоумножитель 2, с подогревом,
 2006
 Сигнал вспомогательного чипа (не подогреваемый)
 Нагреваемый основной чип находится на расстоянии 4 м

Учитывая разницу темпа температурных вариаций, была вычислена и построена (рис. 6) кривая интенсивности на участке нарастания и падения температуры в функции значений температуры. Для большей ясности участок уменьшения температуры, после коррекции темпа температуры, был незначительно сдвинут вверх. Замечательное значение коэффициента корреляции (0.80) между кривыми интенсивности на участках нарастания (UP) и убывания (DOWN) показывает поведение запутанных электронов в ловушках.

8 – Трансатлантические эксперименты

Трансатлантические эксперименты были проведены с целью проверить независимость явления запутывания от расстояния. Из установки с двумя совместно облученными чипами основной чип был переправлен в Батон-Руж, Луизиана, США и подогревался в таком же бытовом духовом шкафу, какой использовался в лаборатории Живарлэ, Франция. Живарлэ расположен на расстоянии 8182 км от Батон-Руж по окружности земного шара, или 7630 км по прямой линии. Рис. 7 схематически воспроизводит экспериментальную установку. По телефону из Батон-Руж в Живарлэ инициировался запуск теплового цикла. Запись кривой интенсивности вспомогательного чипа делалась в Живарлэ, а запись компьютерных данных в функции температуры с учетом различного темпа нарастания и уменьшения температуры – в Батон-Руж. Затем данные были смещены для получения наилучшего коэффициента корреляции между участками нарастания и спада температуры. Небольшой сдвиг в общем случае требовался для того, чтобы установилась температура в окружающем помещении, где был установлен духовой шкаф с основным чипом. Время восстановления температуры, проверяемое в каждом опыте, различалось на одну секунду по отношению к времени, измеряемому в Батон-Руж.

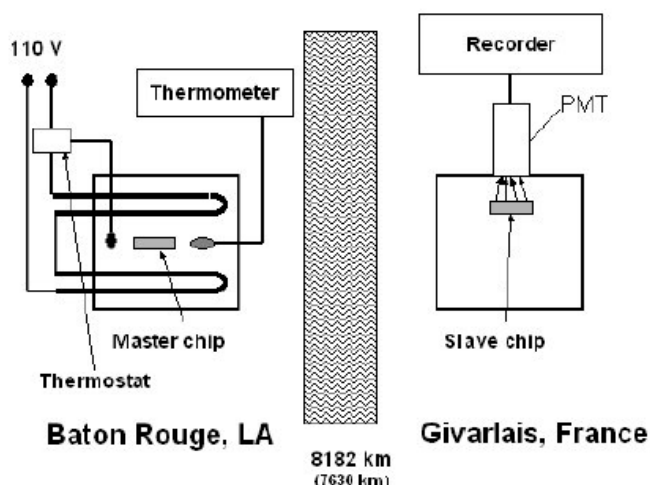


Рисунок 7 – Трансконтинентальный эксперимент между Батон-Руж, Луизиана (США) и Живарлэ (Франция) (Thermometer - термометр, Recorder - регистратор, Thermostat - термостат, Master chip – основной чип, Slave chip – вспомогательный чип, PMT - фотоумножитель)

Типичный пример показан на рис. 8. Для лучшей корреляции которая соответствует температуре восстановления при 483 с, такой же, что и измеренная в Батон-Руж, коэффициент корреляции составил 0.63 от 100 до 250°C 0.62 от 180 до 250°C.

Большинство пиков, зарегистрированных для кривой интенсивности вспомогательного чипа при нарастании и спаде температуры, соответствует пикам,

указанным в [15]. Это пики при 130, 145, 180, 205°C согласно упомянутой публикации и рис. 8.

Для чипа Н были выполнены еще два тепловых цикла, чтобы проверить, были ли удалены некоторые запутанные электроны после действия температуры. Тест Н2 еще имел приемлемый коэффициент корреляции 0.30 от 100 до 250°C и 0.44 от 180 до 250°C. Тест Н3 имел очень низкий коэффициент корреляции 0.23 от 100 до 250°C и 0.09 от 180 до 250°C.

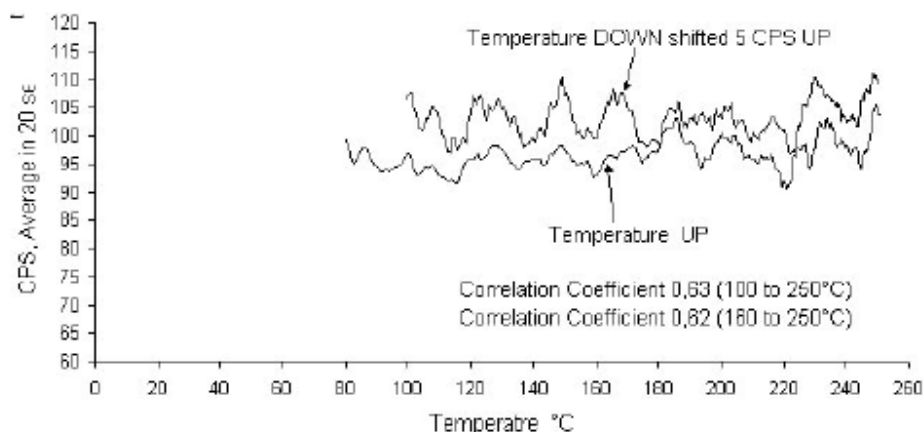


Рисунок 8 – Тесты для чипа Н1, LiF100, 20 гамма-лучи, фотоумножитель 2, 16 сентября, 2006, усреднение за 20 с, основной образец подогревался в Батон-Руж,, Луизиана (США), 8182 км. Сигнал от вспомогательного образца в Живарле (Франция). Время восстановления температуры 483 с после включения духового шкафа.

Некоторые опыты были проведены с чипами LiF200. На рис. 9 показана типичная запись для чипа D. Участки нарастания и спада температуры хорошо коррелируют и численно, и визуально. На этих кривых появляются многие пики, не отмечавшиеся ранее в литературе.

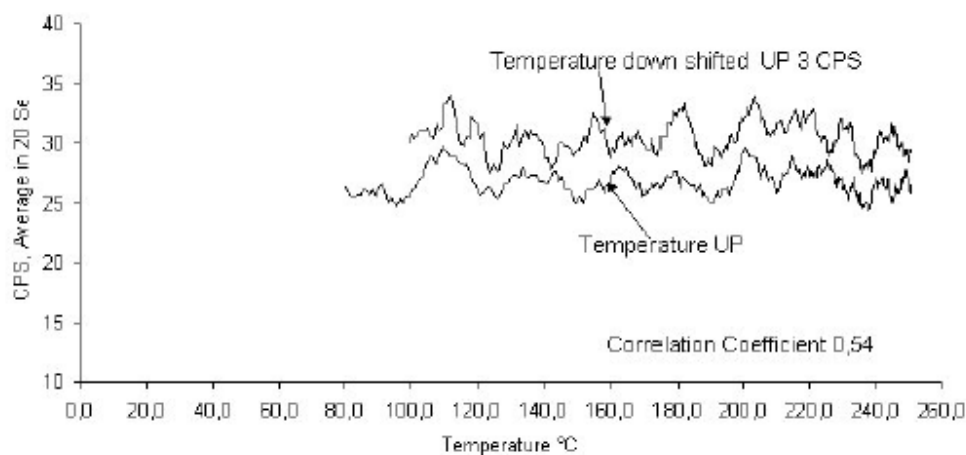


Рисунок 9 – Тест для чипа D, LiF200, 10 гамма-лучи, фотоумножитель 1, 2 сентября, 2006, усреднение за 20 с. Основной образец подогревался в Батон-Руж, Луизиана

(США), 8182 км. Сигнал от вспомогательного образца в Живарлэ (Франция). Время восстановления температуры 430 с после включения подогрева.

9 - Заключение

Описываемые эксперименты представляют собой практическое проявление феномена запутывания в КМ. Две частицы называют запутанными, когда они испущены одновременно и обладают общей волновой функцией, например: фотоны, испущенные ядром или электроном, причем фотоны временно интерферируют между собой. Такие частицы являются квантово *взаимосвязанными*, так что взаимодействие с измерительным устройством одной из них немедленно “чувствуется” запутанным партнером. Запутывание между двумя частицами может быть переключено на две другие частицы. Запутанные частицы, такие, как электроны, могут “сохраняться” в ионных или примесных ловушках термолюминисцентных кристаллических решеток и оставаться изолированными от влияния декогеренции со стороны окружения ловушек в течение значительных промежутков времени. Электроны могут вынуждаться покинуть эти ловушки и затем падать в свое соответствующее основное энергетическое состояние в кристаллической решетке в результате нагрева или вынужденной люминисценции. Запутанный электрон, покидающий свою электронную ловушку, испытывает спиновые переходы, которые влияют на их запутанные партнеры-электроны вследствие закона сохранения спина, так что в результате для их электрона-партнера становится предпочтительным также покинуть ловушку, испустив свет при переходе в основное состояние, на каком бы расстоянии одна от другой эти ловушки ни находились. Поскольку ловушки могут быть запутанными даже для различных кристаллических решеток, такие образцы могут быть разделены большими расстояниями, тогда как запутанные электроны все еще остаются *связанными* вплоть до теплового воздействия на кристаллическую решетку, содержащую одну из ловушек с электроном запутанной пары. Обнаружено, что захваченные запутанные электроны освобождаются из ловушек только при дискретных и характерных значениях температуры, порождая в виде отклика аналогичную кривую интенсивности (хотя эта интенсивность гораздо ниже интенсивности нагреваемого кристалла), которая и регистрируется для каждого ненагреваемого термолюминисцентного кристалла при нарастании и последующем спаде температуры нагреваемой кристаллической решетки. Этот эксперимент демонстрирует, что:

- Тормозное рентгеновское или гамма-излучение является запутанным
- Запутанные фотоны могут передавать свое запутанное состояние частицам (электронам)
- Переключение запутывания не только возможно, но и происходит в действительности
- Запутанные частицы могут “храниться” как волновые функции в ионных ловушках термолюминисцентных материалов, которые ведут себя подобно резонаторным полостям КЭД
- Декогеренция под действием окружения в ионных ловушках с запутанными электронами проявляется крайне слабо: нагрев и измерительные эксперименты проводились спустя месяц после совместного облучения различных TLD-чипов
- Запутанные электроны освобождаются из ловушек только при дискретных и характерных значениях температуры при нарастании температуры и не по закону

Аррениуса, который устанавливает для ловушек одиночных электронов непрерывное распределение в зависимости от температуры. Это важный результат настоящего эксперимента, который должен обеспечить количественные свидетельства механизмов взаимодействия между запутанными электронами в ионных ловушках

-Кривые интенсивности для вспомогательного чипа (не нагреваемого запутанного кристалла) коррелируют с нарастающей и спадающей (при последующем охлаждении) температурой кристаллической решетки очень симметричным и систематическим образом

- Квантовые связи могут реализовываться при расстояниях между кристаллами до 8182 км.

Учитывая значимость этих результатов, мы призываем других серьезных исследователей повторить эти эксперименты. Обращайтесь к обоим или кому-либо одному из авторов по электронной почте или другим способом, если для воспроизведения экспериментов вам потребуются CLINAC облученные TLD-чипы или что-то еще.

Благодарности : Авторы благодарят E-Quantic Communications SARL-ACV за поддержку этого исследования. Особая благодарность Центру лучевой терапии Joseph Bellot клиники Saint François clinic в Montluçon за содействие в облучении образцов.

References

- [1] Einstein A., Podolsky B., Rosen N., « Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? », *Phys. Rev.* 47, 777, (1935)
- [2] Bell J. S., «*Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*», New York, Cambridge University Press, 1993.
- [3] Aspect A., « Trois tests expérimentaux des inégalités de Bell par mesure de corrélation de polarisation de photons », Doctoral Dissertation, Université Paris-Orsay, 1er Février 1983.
- [4] Townsend P. D., Rarity J. G., Tapster P. R., «Single-Photon Interference in 10 km Long Optical-Fiber», *Electronics Letters*, V 29, p. 634, 1993.
- [5] Bennett C. H., et al., "Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and EPR Channels", *Phys. Rev. Lett.* vol. 70, pp 1895-1899 (1993).
- [6] Bouda J., and Buzek V., "Entanglement swapping between multi-qubit systems" *J. Phys. A: Math. Gen.* 34, 4301-4311, (2001).
- [7] de Riedmatten H., et al., "Long-distance entanglement swapping with photons from separated sources", *Phys. Rev.*, A71, 050302, 2005
- [8] Van Gent D. L., "Induced Quantum Entanglement of Nuclear Metastable States of ^{115}In ", arXiv, nucl-ex/0411047, Nov. 23, 2004.
- [9] Collins C.B., *Proceedings of the First International Induced Gamma Emission Workshop IGE '97*, edited by I.I. Popescu and C.A. Ur (IGE Foundation, Bucharest, Romania, 1999), pp. 1-17.Ch.
- [10] Van Gent D. L., "Remote Stimulated Triggering of Quantum Entangled Nuclear Metastable States of ^{115}In ", arXiv, nucl-ex/0411050, Nov. 24, 2004.
- [11] Van Gent D. L and Desbrandes R., "Remote Stimulated Triggering of Quantum Entangled Photoluminescent Molecules of Strontium Aluminate", arXiv, physics/0503052, March 7, 2005.

- [12] McKeever S. W. S., « *Thermoluminescence of solids* », Cambridge University Press, 1985.
- [13] Natto S.S.A, Journal of Australian Physical & Engineering Sciences in Medecine, 26, 3, pp 78-82,2003
- [14] Ghosh S., et al., "Entangled Quantum State of Magnetic Dipoles;" Nature, 425, 48, (2003).
- [15] Fairchild et al., « Thermoluminescence of LiF TLD-100 : Glow-curves kinetics », J. Appl. Phys., 49, issues 8, pp. 4523-4533, (1978).