

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВОСТИ ФИЗИКИ В СЕТИ INTERNET

(по материалам электронных препринтов)

PACS number: 01.90.+g

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.07.038377>**1. Перенос тепла через квантовый клапан**

Исследователи из Университета Аалто (Финляндия) под руководством J. Pekola создали устройство, которое может стать платформой для изучения ряда квантово-термодинамических явлений. Устройство состоит из двух металлических резисторов (тепловых резервуаров), соединённых с двумя одинаковыми микроволновыми резонаторами. Между резонаторами находится сверхпроводящий трансмонный кубит, имеющий с ними ёмкостную связь. Возможность распространения фотонов от одного резистора к другому через кубит зависит от его квантового состояния, т.е. кубит выполняет роль квантового клапана. Так как фотоны переносят тепло, передача тепла между резисторами-резервуарами может исследоваться на квантовом уровне. Эффективность передачи зависит от соотношения частот резонаторов и набора собственных частот кубита, а также от величины связей между кубитом, резонаторами и резервуарами, и при различных режимах связи получаются качественно разные результаты. В эксперименте была исследована передаваемая мощность при различной температуре в зависимости от величины магнитного потока, которая влияет на частоту колебаний в трансмонном кубите. Было показано, что устройство функционирует в согласии с теоретическими расчётами. Такой клапан может быть полезен, в частности, для создания квантовых тепловых машин.

Источник: *Nature Physics*, онлайн-публикация от 09.07.2018
<https://www.nature.com/articles/s41567-018-0199-4>

2. Квантово запутанное состояние 18 кубитов

Создание квантовой запутанности всё большего числа частиц и когерентное управление их состояниями является одной из центральных тем исследований в квантовой информатике, так как позволяет реализовывать более мощные квантовые алгоритмы. В эксперименте X.-L. Wang (Научно-технический университет Китая) и др. впервые получено запутанное состояние 18 кубитов. Запутанность по нескольким степеням свободы, называемая гиперзапутанностью, была получена по траекториям, поляризации и орбитальному угловому моменту шести фотонов. Ранее удалось создать запутанное состояние из 14 ионов (по одной степени свободы на ион) и 10-кубитное запутанное состояние 5 фотонов (по две степени свободы). Сначала X.-L. Wang и др. методом параметрической вниз-конверсии в нелинейном кристалле создали три пары фотонов в запутанных состояниях. Фотоны проходили через сплиттеры и объединялись в едином одномодовом оптоволокне, становясь гиперзапутанными и имея в совокупности 262144 состояний. Измерение состояний отдельного кубита и проверка общей запутанности является не менее сложной задачей, чем создание запутанности. Эти измерения производились в три этапа: с применением интерферометров Маха–Цендера, измерений поляризации и измерений орбитального углового момента с помощью сплиттеров, призм и интерферометров. Таким путём осуществлялся индивидуальный контроль состояния каждого кубита. Всего в установке имелось 30 интерферометров и 48 однофотонных детекторов. Статистическая значимость запутанности 18 кубитов превышает 13σ .

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **120** 260502 (2018)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.260502>

3. Высокая теплопроводность кристаллов ВAs

Для охлаждения микрoeлектронных устройств требуются материалы с высокой теплопроводностью. Алмаз, обладающий

рекордной теплопроводностью, не подходит для этих целей, так как его коэффициент теплового расширения сильно отличается от соответствующего коэффициента элементов микроэлектроники. Теоретические расчёты, выполненные в 2003 г. L. Lindsay, D.A. Broido и T.L. Reinecke, указывали на то, что монокристаллы арсенида бора ВAs должны обладать высокой теплопроводностью за счёт определённых свойств их фононного спектра. L. Shi (Техасский университет в Остине, США) и его коллеги синтезировали высококачественные кристаллы ВAs с размерами $4 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$ и подтвердили их высокую теплопроводность — до $1000 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$, что значительно выше, например, теплопроводности меди ($400 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$). Измерения производились как путём импульсного локального нагрева лазером, так и путём контактного нагрева и измерения стационарного распределения температуры по поверхности. Расчёты показывают, что важную роль в теплопроводности ВAs играют четырёхфононные взаимодействия. Их учёт понижает теплопроводность по сравнению с трёхфононным приближением, но расчётная величина остаётся всё же несколько выше измеренной в эксперименте. В другом независимом эксперименте Y. Hu (Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе, США) и его коллеги также синтезировали высококачественные монокристаллы ВAs и измерили их теплопроводность при комнатной температуре, которая оказалась равной $1300 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$. Данные спектроскопии говорят о том, что в ВAs имеет место большая длина свободного пробега фононов и сильная ангармоничность высокого порядка в четырёхфононном процессе.

Источники: *Science*, онлайн-публикации от 5 июля 2018 г.
<https://doi.org/10.1126/science.aat7932>
<https://doi.org/10.1126/science.aat5522>

4. Коллективные спиновые моды в газе

Коллективные эффекты возникают в квантовых газах в результате взаимодействия между атомами. S. Leroutre (Университет Париж 13, Франция) и др. исследовали коллективное поведение атомов хрома в ловушке в состоянии бозе-эйнштейновского конденсата. Связь атомов через их спины и орбитальные угловые моменты достигалась с помощью градиента магнитного поля, создаваемого несколькими соленоидами. Были обнаружены ранее не наблюдавшиеся коллективные спиновые осцилляции спинового газа. Измерения состояний атомов выполнялось методом сепарации Штерна–Герлаха при выключении потенциала ловушки. Первоначально с помощью радиочастотного импульса все спины были повернуты перпендикулярно внешнему магнитному полю и начинали прецессировать. Если бы атомы не взаимодействовали, то в неоднородном магнитном поле в разных местах они прецессировали бы независимо на различных частотах вокруг непараллельных осей. Но в данном эксперименте ось прецессии сохраняла начальное положение, а от места зависела лишь амплитуда осцилляций, что свидетельствовало о коллективном эффекте, связанном со спонтанной генерацией захваченной магнитной моды. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическим исследованием, включающим решение гидродинамических уравнений и 3D-уравнения Гросса–Питаевского. Эксперимент показал, что спиновые газы, несмотря на их разреженность, могут иметь коллективные возбуждения, характерные для твердотельных ферромагнетиков и ферромагнитных жидкостей.

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **121** 013201 (2018)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.013201>

5. Микролазеры

При уменьшении размера лазера увеличиваются оптические потери, поэтому требуется относительно большая мощность накачки. А. Fernandez-Bravo (Берклиевская национальная лаборатория им. Лоуренса, США) и др. создали микролазеры размером в несколько мкм, которые имеют порог генерации при минимальной мощности накачки 14 кВт см^{-2} . Микролазер представляет собой полистирольную микросферу диаметром 5 мкм. Её поверхность покрыта наночастицами из тулия Tm^{3+} , электронные переходы в которых связаны с модами микросферы. Накачка осуществляется лазером с длиной волны 1064 нм, а в спектре излучения доминируют длины волн около 807 нм. Благодаря полному внутреннему отражению свет внутри микросферы может проходить по кругу тысячи раз, создавая узлы интенсивности, вблизи которых происходит лазерная генерация на переходах ${}^1\text{D}_2 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ и ${}^1\text{G}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ в тулии. Ранее созданные микролазеры требовали большую мощность накачки и поэтому работали лишь в импульсном режиме. Напротив, работа нового микролазера была продемонстрирована в непрерывном режиме в течение пяти часов. Важным для практических применений, таких как диагностика, свойством нового лазера является его способность работать в биологических средах. В описываемом эксперименте продемонстрирована работа лазера в сыворотке крови.

Источник: *Nature Nanotechnology* **13** 572 (2018)

<https://www.nature.com/articles/s41565-018-0161-8>

6. Стереоскопическая вигнеровская задержка при ионизации молекулы

Аттосекундная метрология позволяет исследовать ряд тонких свойств фотоэлектрического эффекта, в частности, измерить вигнеровскую задержку по времени между импульсом света и вылетом электрона. В отличие от атомов, у молекул более сложная электронная структура, что затрудняет интерпретацию результатов измерений при фотоэффекте на молекулах. В новом эксперименте, выполненном под руководством U. Keller (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха), исследован фотоэффект на молекуле CO и впервые измерена стереоскопическая временная задержка Вигнера, характеризующая время вылета в зависимости от положения электрона в молекуле. Пучок молекул освещался УФ-лазерными импульсами аттосекундной длительности. С помощью ИК-импульсов, синхронизованных с возбуждающими УФ-импульсами, измерялось направление и момент вылета. Отсюда путём реконструкции можно было получить информацию о волновой функции электрона. Электроны, вылетающие с большей энергией, в момент воздействия были расположены преимущественно ближе к атому кислорода, а электроны с меньшей энергией — ближе к углероду. Стереоскопическая вигнеровская задержка времени ионизации определяется как разность задержек в этих двух случаях. Результат сильно зависит от ориентации молекулы по отношению к плоскости поляризации лазерного импульса. В случае ортогональной ориентации измерения хорошо согласуются с теоретическими расчётами, а в случае параллельной ориентации, хотя качественный ход зависимости соответствует ожидаемому, при малых энергиях электронов наблюдается некоторое расхождение, которое связано, возможно, с неполным учётом высших электронных уровней молекулы.

Источник: *Science* **360** 1326 (2018)

<https://doi.org/10.1126/science.aao4731>

7. Универсальный микрорезонатор

Резонансное взаимодействие света и вещества в микрорезонаторах является перспективной областью исследований, так как в электромагнитном поле модифицируются излучательные свойства материалов, что даёт дополнительные возможности для их изучения. Резонатор обычно проектируется лишь под одно конкретное вещество. В Московском инженерно-физическом институте под руководством Ю.П. Раковича изготовлен универсальный перестраиваемый микрорезонатор, пригодный для изучения различных веществ в разных режимах. Резонатор образован плоским и выпуклым зеркалами, разделёнными несколькими сотнями нанометров. Одно из зеркал можно передвигать в трёх направлениях, выбирая для исследования наиболее удобный

приблизительно плоскопараллельный участок. При этом осуществляется точный контроль расстояний с помощью Z-пьезоэлемента с нанометровой точностью. Данный полуволновой резонатор Фабри–Перо может работать в ИК, видимом и УФ-диапазонах. Свет в резонатор поступает через конфокальную линзовую систему и регистрируется ПЗС-матрицей и спектрометром. Этот универсальный инструмент удобен для изучения химических и биологических свойств объектов, помещённых в поле волны как в режиме слабой связи (с малым воздействием излучения в резонаторе на вещество), так и в режиме сильной связи, когда свойства веществ и ход реакций сильно модифицируются излучением из-за связей с модами резонатора.

Источник: *Review of Scientific Instruments* **89** 053105 (2018)

<https://doi.org/10.1063/1.5021055>

8. Квантовый магнитометр

Исследователи из Швейцарии, России и Финляндии применили квантовые алгоритмы оценки фазы, лежащие в основе протоколов обработки квантовой информации, для измерения магнитного поля с помощью сверхпроводящего трансмонного кубита (СКВИД с дополнительной петлёй и резонатором). Использовались модифицированные версии алгоритма Китаева и алгоритма Фурье-определения фазы, с помощью которых можно преодолеть проблему 2π -периодичности фазы. Кубит можно рассматривать как "искусственный атом" с набором квантовых уровней. Он чувствителен к внешнему магнитному полю, так как имеет большой собственный магнитный момент, и поэтому может служить магнитометром. Магнитное поле определяется посредством измерения частоты осцилляций в кубите, которая пропорциональна величине поля. Оба алгоритма позволяют достичь чувствительности $19,3\text{--}29,3 \text{ пТ Гц}^{-1/2}$, превосходящей классический уровень дробового шума, и приблизиться к ограничению, налагаемому принципом неопределённости Гейзенберга, при этом точность была ограничена, в основном, декогеренцией. Также имеется возможность в будущем значительно улучшить чувствительность устройств такого типа. В исследовании принимают участие российские ученые из МФТИ и ИТФ им. Л.Д. Ландау.

Источник: *npj Quantum Information* **4** 29 (2018)

<https://www.nature.com/articles/s41534-018-0078-y>

9. Найдены "потерянные барионы"

Количество барионного газа во Вселенной достаточно надёжно предсказывается теорией первичного нуклеосинтеза и вычисляется из наблюдений флуктуаций реликтового излучения. Однако лишь 10 % всех барионов наблюдается в галактиках и 60 % — в пространстве между галактиками, а последние 30 % оставались невидимыми. Высказывались предположения, что недостающие барионы содержатся в невидимых структурах между галактиками, формируя так называемую теплогорячую межгалактическую среду с температурой газа $10^5\text{--}10^7 \text{ К}$, обогащённую тяжёлыми элементами, вытекающими из галактик. Эта картина была получена в работах R. Cen, J.P. Ostriker и др. и подтверждалась численным моделированием, выполненным J.M. Shull и др. "Потерянные барионы" трудно обнаружить, потому что они ионизованы. До сих пор в наблюдениях были получены лишь слабые и неоднозначные свидетельства их наличия. F. Nicastro (Национальный институт астрофизики, Италия и Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики, США) и его коллеги изучили линии поглощения кислорода (O VII) в спектре рентгеновского излучения квазара на красном смещении $z > 0,4$. Наблюдения велись спектрометром космического телескопа XMM-Newton. Из полученных данных следует, что в межгалактическом пространстве на луче зрения имеется большое количество горячего газа с примесью кислорода. Постоянство и форма спектра поглощения практически исключают возможность того, что газ связан с самим квазаром или с его хозяйской (host) галактикой. Таким образом, можно сделать вывод, что недостающие 30 % барионов Вселенной обнаружены.

Источник: *Nature* **558** 406 (2018)

<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0204-1>

Подготовил Ю.Н. Ерошенко

(e-mail: erosh@ufn.ru)