

1. Дважды очарованный барион

В эксперименте LHCb на Большом адронном коллайдере впервые зарегистрирован барион Ξ_{cc}^{++} , в состав которого входят два с-кварка и u-кварк. Существование этого бариона предсказывалось кварковой моделью. Он рождался в pp-столкновениях с энергией 13 ТэВ и распадался за счёт слабых взаимодействий по каналу $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$, $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$. Бариону Ξ_{cc}^{++} соответствовал пик в распределении числа событий по инвариантной массе, причём статистическая значимость регистрации Ξ_{cc}^{++} превышает 12σ . Измеренная масса бариона ≈ 3621 МэВ/ c^2 находится в хорошем согласии с теоретическими расчётами, а пик при той же массе подтверждается также данными LHCb при энергии 8 ТэВ. Ранее другая коллаборация SELEX уже сообщала о регистрации бариона с двумя тяжёлыми кварками Ξ_{cc}^+ (кварковый состав ccd), однако этот результат не нашёл подтверждения в независимых экспериментах. Надёжная регистрация коллаборацией LHCb бариона Ξ_{cc}^{++} важна для проверки сложных вычислений, проводимых в рамках квантовой хромодинамики. Согласно теории, барион Ξ_{cc}^{++} имеет планетарную структуру: лёгкий кварк и обращается на некотором удалении от компактной пары тяжёлых с-кварков (дикварка). В коллаборации LHCb принимают участие российские исследователи из нескольких научных организаций. О барионах с двумя тяжёлыми кварками см. в обзоре В.В. Киселёва и А.К. Лиходеда в *УФН* 172 497 (2002).

Источник: <https://arxiv.org/abs/1707.01621>

2. Передача квантово запутанных фотонов через спутник

J.-W. Pan (Научно-технический университет Китая) и его коллеги выполнили передачу пар фотонов в квантово запутанном состоянии с китайского космического спутника Micius на три наземные станции. Фотоны распределялись между получателями на Земле, находящимися на расстоянии 1203 км друг от друга, при этом с учётом расстояний от спутника до наземных станций фотоны суммарно проходили расстояния от 1600 до 2400 км. Ранее из-за потерь в оптоволоконных и воздушных линиях связи удавалось передавать квантово запутанные фотоны лишь на расстояния до ≈ 100 км. На борту спутника фотоны от лазерного диода расщеплялись на пары в нелинейном кристалле, и в результате получались фотоны в запутанном по поляризации состоянии, причём производился случайный выбор между несколькими направлениями поляризации. Для передачи и приёма фотонов на спутнике и на наземных станциях имелись телескопы. После приёма фотонов выполнялся тест Белла, который показал, что квантовая точность запутанности фотонов составляет $f \geq 0,87 \pm 0,09$. В другом эксперименте J.-W. Pan и др. осуществили квантовую телепортацию состояний частиц на расстояние 1400 км от высокогорной станции в Тибете на тот же спутник Micius. А японские исследователи под руководством М. Sasaki (Национальный институт информации и телекоммуникационных технологий, Япония) выполнили квантовую коммуникацию — сигнал с протоколом квантового распределения ключей передавался с микроспутника SOCRATES весом 48 кг на Землю. Данные эксперименты важны для практических применений в области квантовой коммуникации и квантовой криптографии.

Источники: *Science* 356 1140 (2017)
<https://doi.org/10.1126/science.aan3211>
<https://arxiv.org/abs/1707.00934>
<https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.107>

3. Ретропричинность и временная симметрия

M.S. Leifer (Университет Чепмена, США) и M.F. Pusey (Институт теоретической физики Периметр, Канада) в своей теоретической работе прояснили взаимосвязь между симметрией физических

процессов относительно обращения времени и концепцией ретропричинности (retrocausality), которая обсуждается как альтернатива действию на расстоянии в квантовой механике. Идея ретропричинности тесно связана с вопросом о реальности квантовых состояний. В рамках этой концепции имеет место определённое влияние будущих событий на прошлые. Например, выбор условий проведения эксперимента в будущем влияет на состояние измеряемой системы в прошлом. Однако передача сигналов из будущего в прошлое таким способом невозможна. M.S. Leifer и M.F. Pusey несколько модифицировали и обобщили аргументы Н. Price, согласно которым условия реальности квантового состояния и симметрии во времени допускают ретропричинное влияние. В их работе в рамках концепции ретропричинности были сформулированы времениподобные аналоги теста Белла и найдены условия, при которых квантовые процессы симметричны относительно обращения времени. О необратимости в квантовой механике см. в статье Б.Б. Кадомцева в *УФН* 173 1221 (2003).

Источник: *Proc. R. Soc. of London A* 473 20160607 (2017)
<https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0607>

4. Квантовый демон Максвелла на основе кубита

N. Cottet (Университет Сорбонна, Франция) и др. впервые реализовали в своём эксперименте концепцию демона Максвелла, работающего в квантовом режиме — оперирующего квантовыми суперпозициями микроволновых фотонов, и по измерениям его состояния проследили преобразование информации в работу. Роль демона выполнял микроволновый резонатор, который отслеживал состояние связанного с ним сверхпроводящего кубита. Микроволновые импульсы проходили через резонатор, и он мог совершать работу (передавал энергию фотонам при стимулированном излучении) лишь в том случае, если кубит находился в низшем энергетическом состоянии. Напротив, в случае возбуждения кубита происходил сдвиг частоты резонатора и резонатор блокировал импульсы. Таким образом демон Максвелла выборочно пропускал импульсы. При этом изменялись числа заполнения фоковых состояний самого резонатора. Методом квантовой томографии была реконструирована матрица плотности резонатора по числам заполнения фотонов, и тем самым была получена информация о памяти демона, имеющая энергетическую цену. Как и ожидалось теоретически, увеличение энтропии, соответствующей памяти демона, компенсировало уменьшение энтропии системы. О квантовой информации см. в книге Б.Б. Кадомцева *Динамика и информация* и в обзоре *УФН* 164 449 (1994).

Источник: *Proc. Nat. Ac. Sci.* 114 7561 (2017)
<https://doi.org/10.1073/pnas.1704827114>

5. Отрицательная эффективная масса и квантовые измерения

Если определять координаты и импульсы некоторой системы с положительной эффективной массой m_{eff} относительно соответствующих переменных другой системы, имеющей $m_{\text{eff}} < 0$, то разности этих величин будут являться коммутирующими квантовыми переменными. Их можно измерять одновременно, в отличие от абсолютных координат и импульсов, точность измерения которых ограничена принципом неопределённости Гейзенберга. Исследователи из Института им. Н. Бора Копенгагенского университета под руководством Е. Polzik выполнили эксперимент, в котором этот метод измерения впервые был продемонстрирован. Использовались два оптически связанных осциллятора: диэлектрическая мембрана размером 0,5 мм с

большой механической добротностью и заключённый в оптическую ячейку ансамбль из $\sim 10^9$ атомов цезия в магнитном поле, служивший спиновым осциллятором. Ансамбль мог переводиться в состояние со спинами, направленными противоположно магнитному полю, и в этом случае спиновый осциллятор имел $m_{\text{eff}} < 0$. Луч лазера последовательно проходил через ансамбль атомов и освещал мембрану, что создавало между ними оптомеханическую связь. А по отражению импульсов другого лазера производились измерения спектра колебаний мембраны. Обратное влияние, которое оказывает процесс измерения, в случае $m_{\text{eff}} < 0$ частично компенсировалось, что увеличивало точность измерения на величину 1,8 дБ. Данная методика может найти применение в измерительных устройствах, работающих вблизи стандартного квантового предела.

Источник: *Nature* **547** 191 (2017)
<https://doi.org/10.1038/nature22980>

6. Квантовые эффекты Зенона и анти-Зенона

Исследователи из Университета Вашингтона в Сент-Луисе Р.М. Harrington, J.T. Monroe и К.В. Murch продемонстрировали в едином эксперименте со сверхпроводящим кубитом как квантовый эффект Зенона, замедляющий квантовый переход между уровнями кубита за счёт последовательности частых измерений, так и эффект анти-Зенона, ускоряющий переход. Причём эффект анти-Зенона в эксперименте с единичным кубитом наблюдается впервые. Сверхпроводящий кубит был помещён в электромагнитный резонатор, и по сдвигам фаз пробных импульсов в резонаторе определялись состояния кубита и измерялось время до их распада. В соответствии с теорией, при этом наблюдался квантовый эффект Зенона. Затем условия эксперимента были изменены: кубит подвергался воздействию электромагнитного шума со специально структурированным спектром. Наличие шума изменяет число конечных состояний, доступных для квантового перехода. Уменьшение числа состояний ведёт к замедлению времени перехода, а увеличение — к ускорению. В зависимости от разности собственной частоты резонатора и средней частоты шума в эксперименте наблюдался либо эффект Зенона, либо эффект анти-Зенона. Эксперимент был повторён в случае, когда выполнялись "квазиизмерения", которые посредством рандомизации фазы Берри вносили в состояние системы расфазировку, но при этом информация о результатах измерений во внешний мир не передавалась. В этом случае также наблюдались эффекты Зенона и анти-Зенона.

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **118** 240401 (2017)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.240401>

7. Хиггсова мода в двумерном антиферромагнетике

Вблизи квантовой критической точки в кристаллах возникают неустойчивости (флуктуации параметра порядка), которые по своим свойствам похожи на поле Хиггса в Стандартной модели элементарных частиц. Хиггсовы моды возбуждений вблизи квантовой критической точки уже наблюдались в трёхмерных кристаллах. Однако в 2D-системах они обычно сильно неустойчивы и быстро распадаются на пары нанбу-голдстоуновских мод, из-за чего выделить их не удавалось. Т. Нонг (Национальная лаборатория Ок-Ридж, США) и др. методом нейтронного рассеяния впервые наблюдали хиггсову моду вблизи квантовой критической точки в двумерном антиферромагнетике $\text{Cu}_2\text{N}_2\text{CuV}_4$, в котором эта мода является стабильной. С точки зрения теории, структура антиферромагнетика может быть описана набором решёток, в узлах которых расположены спины $S = 1/2$. Эксперимент показал хорошее согласие свойств хиггсовой моды с этой моделью, и были измерены численные значения параметров гамльтониана системы.

Источник: *Nature Physics* **13** 638 (2017)
<https://doi.org/10.1038/nphys4182>

8. Наблюдение диффузии единичных атомов

А. Widera (Университет Кайзерслаутерн и Высшая школа материаловедения в Майнце, Германия) и его коллеги выполнили наблюдение диффузии единичных атомов ^{133}Cs в разреженном ультрахолодном газе атомов ^{87}Rb в оптической ловушке. Атомы ^{133}Cs направлялись в ловушку, где они сталкивались с атомами

^{87}Rb и, постепенно замедляясь, приходили с ними в тепловое равновесие. Путём лазерного возбуждения атомов ^{133}Cs и регистрации излучаемого ими флуоресцентного света определялись пространственные смещения атомов спустя различное время после начала движения, что позволило найти статистическое распределение атомов. Оно имело бимодальный вид, так как часть атомов ^{133}Cs до момента наблюдения не успевала испытать столкновения. Газ ^{87}Rb в ловушке был неоднороден, что позволило исследовать одновременно много реализаций с различными числами Кнудсена от $K_n \approx 1$ в центре ловушки до больших значений K_n на краю. Оказалось, что в широком диапазоне K_n всего лишь после нескольких столкновений с атомами ^{87}Rb ансамбль атомов ^{133}Cs начинает хорошо описываться уравнением Ланжевена, в котором коэффициент трения зависит от скорости.

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **118** 263401 (2017)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.263401>

9. Токамак с литиевым покрытием стенок

D.P. Boyle (Лаборатория физики плазмы Принстонского университета, США) и др. выполнили эксперимент по принципу токамака, в котором внутренние поверхности стенок камеры были покрыты слоем лития. Это позволило увеличить температуру плазмы у стенок по сравнению с обычными токамаками, в которых для удаления внешних слоёв плазменного шнура применяются диверторы. В новом эксперименте на внутренние стенки сферического токамака был напылён слой лития толщиной $\sim 75 - 100$ нм. Диагностика плазмы — измерение её температурного профиля — производилась по методу томсоновского рассеяния оптических фотонов на ионах во время электрического разряда в плазме. По результатам измерений впервые было показано, что температурный профиль вдоль сечения камеры при наличии лития становится более плоским, т.е. имеет место выравнивание температуры в центральном ядре и у стенок. Данный эффект, предсказанный в 2003 г. в работе С.И. Крашенинникова, Л.Е. Захарова и Г.В. Переверзева, обусловлен тем, что литий связывает атомы водорода в гидрид лития. Это понижает их обратный поток и уменьшает градиент температуры и турбулентность плазмы. В будущем данный эффект может привести к повышению выхода энергии в токамаках. О развитии токамаков см. в статье Б.Б. Кадомцева в *УФН* **166** 449 (1996).

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **119** 015001 (2017)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.015001>

10. Двойная сверхмассивная чёрная дыра

С помощью радиотелескопов VLBA Национальной радиоастрономической обсерватории NRAO выполнены наблюдения радиогалактики 0402+379, которая содержит две сверхмассивные чёрные дыры (СМЧД), обращающиеся вокруг друг друга. Двойная СМЧД могла образоваться при слиянии двух галактик. Подобные слияния являются типичными эпизодами эволюции большинства галактик, особенно в плотных скоплениях, но к настоящему моменту известно лишь несколько галактик с двойными СМЧД. Две СМЧД, находящиеся вблизи максимумов яркости излучения (ядер), удалены друг от друга на расстояние около 7,3 пк. Их орбита является наиболее тесной среди орбит тех двойных СМЧД, которые удалось пространственно разрешить. Галактика 0402+379 наблюдалась на частотах 5, 8, 15 и 22 ГГц, и была выявлена зависимость видимого расстояния между ядрами от частоты, а также, возможно, были получены свидетельства собственного движения ядер. Первый из этих эффектов, предсказанный в работах А. Königl и А.П. Лобанова, связан со структурой джетов и магнитных полей у их оснований. Второй эффект говорит о том, что в данном исследовании, возможно, впервые наблюдалось собственное орбитальное движение СМЧД в двойной системе. По скорости движения оценен период их обращения — 30 тыс. лет, при этом сумма масс СМЧД составляет $\sim 15 \times 10^9 M_\odot$.

Источник: *The Astrophysical Journal* **843** 14 (2017)
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa74e1>

Подготовил Ю.Н. Ерошенко
 (e-mail: erosh@ufn.ru)