

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВОСТИ ФИЗИКИ В СЕТИ INTERNET

(по материалам электронных препринтов)

PACS number: 01.90.+g

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.05.038337>**1. Ограничение на спин-массовые взаимодействия**

В некоторых теориях имеет место взаимодействие между массой и собственными моментами импульса (спинами) объектов, переносимое аксионами или аксиоподобными частицами. Гипотетическое аксионное поле изначально было предложено для объяснения отсутствия CP-нарушения в сильных взаимодействиях, а его кванты — аксионы могут являться частицами тёмной материи. Исследователи из Принстонского университета (США) J. Lee, A. Almasi и M. Romalis выполнили поиск взаимодействия между массой, представляющей собой 250 кг свинцовых кирпичей, и ансамблем спин-поляризованных нейтронов и электронов в расположенном рядом комагнитометре. Спины нейтронов в ядрах ^3He и спины электронов в ядрах калия приобретали определённую поляризацию посредством столкновений с атомами ^{87}Rb , которые были поляризованы светом лазера. Груз совершал колебательное движение, и выполнялся поиск соответствующего периодического сигнала во вращении плоскости поляризации света, пропускаемого через комагнитометр. Спин-массовые взаимодействия могли изменять спиновые состояния, что отразилось бы на сигнале. На достигнутом уровне точности такого взаимодействия не зафиксировано, и получены новые ограничения на константы связи в области масс аксиоподобных частиц $< 10^{-6}$ эВ. В случае нейтронов эти ограничения на порядок лучше предшествующих лабораторных ограничений.

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **120** 161801 (2018)<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.161801>**2. Ядерные реакции синтеза в массиве нанопроволок**

A. Curtis (Университет штата Колорадо, США) и др. исследовали ядерные реакции синтеза в горячей плазме, которая образуется при воздействии лазерных импульсов на массив нанопроволок. Титан-сапфировый лазер генерировал импульсы длительностью 60 фс с энергией до 1,65 Дж. Ими облучались дейтерированные полиэтиленовые (CD_2) нанопроволки длиной около 5 мкм и диаметром 0,2–0,4 мкм, собранные в пучок. Средняя плотность этой среды составляла 16–19 % от плотности вещества самих нанопроволок. Благодаря использованию такого массива лазерное излучение могло проникать в промежутки между нанопроволоками, и их нагрев происходил более эффективно, чем это возможно при воздействии импульсов на сплошную поверхность. Быстрый нагрев вызывал взрывы нанопроволок, в образующейся плазме дейтроны были ускорены до энергий в несколько МэВ и вступали в термоядерные реакции. С помощью нейтронных детекторов были зарегистрированы нейтроны с характерными для данных реакций энергиями 2,45 МэВ. Эффективность выхода нейтронов (2×10^6 на Дж) является рекордной для лазеров с энергией импульсов ~ 1 Дж. Она в 500 раз больше, чем при облучении плоской поверхности CD_2 , и на порядок выше, чем в экспериментах с дейтериевыми кластерами. В экспериментах с инерционным удержанием мишеней, целью которых является термоядерная энергетика, выход нейтронов на Дж намного выше, но в них требуется энергия лазерных импульсов $\sim$ МДж. А на основе нанопроволок могут быть созданы компактные источники нейтронов для исследования материалов.

Источник: *Nature Communications* **9** 1077 (2018)<https://doi.org/10.1038/s41467-018-03445-z>**3. Управление Эйнштейна – Подольского – Розена в бозе-эйнштейновском конденсате**

В 1935 г. Э. Шрёдингер ввёл концепцию управления Эйнштейна – Подольского – Розена (EPR steering), в которой результаты

измерения одной части квантово запутанной системы изменяют состояние другой пространственно удалённой части и влияют на результаты его измерения. Это управление ранее было продемонстрировано только для пар частиц, а для систем из большего числа частиц оно до сих пор не наблюдалось. Впервые это удалось осуществить группе исследователей из Базельского университета (Швейцария) под руководством P. Treutlein. Облако из ≈ 600 атомов ^{87}Rb удерживалось в магнитной ловушке и переводилось в состояние конденсата Бозе – Эйнштейна. После выключения потенциала ловушки облако атомов свободно падало и расширялось, и по резонансному поглощению света регистрировались коллективные спиновые состояния различных пространственных частей конденсата. Были проверены квантовые неравенства, которые подтвердили как квантовую запутанность частей конденсата, так и управление Эйнштейна – Подольского – Розена. Методика эксперимента и наблюдавшийся в нём эффект могут оказаться полезными для создания новых квантовых сенсоров.

Источник: *Science* **360** 409 (2018)<https://doi.org/10.1126/science.aao1850>**4. Тройные квантовые корреляции**

Можно предположить, что при квантовых измерениях с тремя и большим числом возможных исходов квантовый процесс измерения по своей внутренней сути всегда устроен так, что выбирается альтернатива только между двумя какими-то исходами, и таким путём перебираются все исходы. То есть в этой гипотезе предполагается, что существуют только двойные квантовые корреляции. X.-M. Hu (Научно-технический университет Китая) и др. представили первое прямое экспериментальное подтверждение существования более сильных корреляций, чем двойные. Создавались пары квантово запутанных фотонов, каждый из которых мог распространяться по двум различным путям, в одном из путей фотон мог иметь одно, а во втором пути два состояния поляризации, так что каждый из фотонов находился в суперпозиции трёх квантовых состояний и представлял собой кутрит (по аналогии с кубитом). Фотоны направлялись в две лаборатории, где выполнялись случайно выбранные измерения состояний фотонов с тремя возможными результатами. Методика измерений позволила проверить гипотезу о двойных корреляциях, которая формулировалась в виде неравенств, аналогичных неравенствам Белла. Эти неравенства были нарушены на уровне $9,3\sigma$, что исключает наличие лишь двойных корреляций и свидетельствует о тройных корреляциях в процессе измерений.

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **120** 180402 (2018)<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.180402>**5. Одиночные фотоны, излучаемые парой квантово запутанных атомов**

R. Blatt (Инсбрукский университет и Институт квантовой оптики и квантовой информации, Австрия) и его коллеги впервые продемонстрировали процесс излучения единичного фотона сразу двумя квантово запутанными атомами. Атомы были пространственно разделены, но при этом совместно излучали единичные фотоны в свободном пространстве. Это было возможно благодаря тому, что атомы имели связь с единой оптической модой, создаваемой плечами интерферометра. Два иона бария $^{138}\text{Ba}^+$ были захвачены в линейную ловушку Пауля и с помощью лазерных импульсов переводились в определённую суперпозицию возбуждённых состояний так, что атомы оказывались квантово запутанными. Регистрировалось их излучение при переходах на нижние уровни. Однофотонное

излучение было зарегистрировано по характерной картине интерференции, причём неразличимость излучателей достигала уровня $0,99 \pm 0,06$. Интерференционная картина очень чувствительна к степени запутанности и условиям вблизи атомов. По её искажениям в эксперименте был измерен градиент магнитного поля. Таким образом, данный эффект может оказаться полезным для создания чувствительных магнитометров.

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **120** 193603 (2018)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.193603>

6. Сверхпроводимость рения в многослойных структурах
D.P. Rappas (Национальный институт стандартов и технологий, США) и др. исследовали сверхпроводимость переходного металла рения (Re) в многослойных металлических структурах. Методом гальванопокрытия плёнки Re помещались внутрь многослойных структур из плёнок Cu, Au и Pd. Электрическое сопротивление и магнитная восприимчивость указывают на критическую температуру около $T_c = 6$ K, когда слой Re был с обеих сторон покрыт слоями Cu и Au. Аналогичные структуры со слоями Pd показали несколько меньшую T_c . Для сравнения, объёмный кристаллический Re демонстрирует максимальную $T_c = 3$ K. Также был обнаружен низкий уровень потерь на радиочастотах для мультислоёв с Re, осаждённых на резонаторы. Сверхпроводящие плёнки с Re и Cu или Au могут быть интегрированы в стандартные электронные компоненты и найти практическое применение.

Источник: *Appl. Phys. Lett.* **112** 182601 (2018)
<https://doi.org/10.1063/1.5027104>

7. Квантовый спиновый лёд в $\text{Pr}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$

В системах со взаимодействующими спинами возможны макроскопические коррелированные состояния, называемые квантовыми спиновыми жидкостями. В экспериментах уже были получены некоторые свидетельства их появления, но стабильных квантовых спиновых жидкостей в трёхмерных системах пока наблюдать не удавалось. R. Sibille (Институт Пауля Шеррера, Швейцария) и др. методом неупругого нейтронного рассеяния исследовали кристаллы $\text{Pr}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ и выявили наличие в них при температуре ниже 0,05 K спиновой квантовой жидкости в форме так называемого спинового льда. Малые дипольные моменты в $\text{Pr}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ исключают возможность того, что это состояние является классическим дипольным спиновым льдом. Интересной чертой квантового спинового льда, предсказанной теоретически, является появление в нём эффективной электродинамики (emergent electrodynamics), в которой роль потенциалов и полей, удовлетворяющих уравнениям Максвелла, играют спиновые корреляции и квазичастицы. В этой "электродинамике", в частности, возможны магнитные монополи. Эксперимент R. Sibille и др. показал, что в $\text{Pr}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ наблюдается континуум полечелых возбуждений, который свидетельствует о наличии эффективной электродинамики.

Источник: *Nature Physics*, онлайн-публикация от 30 апреля 2018 г.
<https://doi.org/10.1038/s41567-018-0116-x>

8. Распространение радиоволн во льду

Детектором IceCube, расположенным во льду Антарктиды на Южном полюсе, были зарегистрированы космические нейтрино с энергиями до ПэВ. Их регистрация выполнена по оптическому излучению Вавилова – Черенкова продуктов взаимодействий нейтрино. Предсказывается, что на более высоких энергиях лучшим по чувствительности методом регистрации нейтрино станет эффект Аскарьяна — когерентное излучение Вавилова – Черенкова в радиодиапазоне. В связи с этим ведутся исследования распространения радиоволн во льду Антарктиды. Были построены модели изменения диэлектрической проницаемости льда n с глубиной с учётом его сжатия и изменения плотности. Переменность n должна приводить к тому, что радиолуч, изначально распространяющийся на небольшой глубине вдоль поверхности льда, изгибается книзу, и появляется зона тени, или "запрещённая" зона, в которую луч не доходит. S.W. Barwick (Калифорнийский университет в Ирвайне, США) и др. выполнили измерения распространения радиоволн во льду Антарк-

тиды и получили неожиданный результат: сигнал регистрировался также и в "запрещённых" зонах. Механизм данного эффекта пока не выяснен. Возможно, он связан с неучтёнными микроскопическими рассеяниями радиоволн. Важность обнаруженного эффекта заключается в том, что расположение приёмников сигнала на относительно небольшой глубине в области тени может заметно увеличить эффективность регистрации радиоволн от нейтрино. Об излучении Вавилова – Черенкова и эффекте Аскарьяна см. в статье Б.М. Болотовского в *УФН* **179** 1161 (2009).

Источник: <https://arxiv.org/abs/1804.10430>

9. Гравитационные волны и уравнение состояния вещества нейтронной звезды

Регистрация 16 октября 2017 г. детекторами LIGO/Virgo всплеска гравитационных волн GW170817, возникшего в результате слияния нейтронных звёзд, дала новые ограничения на приливную деформируемость нейтронных звёзд, участвующих в столкновении. Приливная деформируемость влияет на то, как объекты сближаются на последних стадиях перед слиянием. В результате в случае слияния нейтронных звёзд форма гравитационно-волнового сигнала несколько иная, чем при слиянии двух чёрных дыр. Исследуя приливную деформируемость, можно получить данные об уравнении состояния вещества нейтронной звезды. E. Annala (Университет Хельсинки, Финляндия) и др. проанализировали сигнал GW170817 и вывели семейство уравнений состояния, согласующихся с формой сигнала GW170817 и с другими известными данными. Получено, что максимальный радиус R нейтронной звезды с массой $1,4M_\odot$ не превышает 13,6 км. Другая группа учёных из Индианского университета и университета шт. Флорида (США) выполнила похожее исследование и получила ограничение $R(1,4M_\odot) < 13,76$ км, что согласуется с результатами первой группы. Свойства ядерной материи в недрах нейтронной звезды пока не удаётся точно рассчитать теоретически, поэтому данные по слиянию нейтронных звёзд важны для их проявления. В частности, исследователи пытаются выяснить, имеется ли в недрах нейтронных звёзд так называемая кварковая материя.

Источники: *Phys. Rev. Lett.* **120** 172702, 172703 (2018)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.172702>
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.172703>

10. Смещение перигелия Меркурия

В 1915 г. А. Эйнштейн с помощью Общей теории относительности объяснил, почему эллиптическая орбита Меркурия вращается на 43 угловые секунды в столетие быстрее, чем предсказывает ньютоновская теория. К. Уилл (Флоридский университет, США и Университет Пьера и Марии Кюри, Франция) выполнил новые теоретические расчёты и показал наличие двух ранее не учтённых добавок, которые дают поправки в несколько миллионных долей от основного вклада 43" в столетие. Первая добавка происходит от релятивистского влияния других планет на ускорение Меркурия, а вторая добавка связана со взаимодействием скорости Меркурия и гравимагнитного потенциала, создаваемого далёкими планетами. Найденные дополнительные вклады, возможно, будут обнаружены европейско-японской миссией BepiColombo, в рамках которой планируется в конце 2018 г. запустить два спутника Меркурия. BepiColombo впервые сможет выявлять релятивистские эффекты, связанные с влиянием не только Солнца, но и других планет на движение Меркурия, что важно для проверки Общей теории относительности и других теорий гравитации. О вычислении малых поправок в Общей теории относительности см. в книге К. Уилла *Теория и эксперимент в гравитационной физике* (М.: Энергоатомиздат, 1985), а также в статье К. Уилла в *УФН* **164** 7653 (1994).

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **120** 191101 (2018)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.191101>

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