

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВОСТИ ФИЗИКИ В СЕТИ INTERNET (по материалам электронных препринтов)

Ю.Н. Ерошенко

PACS number: 01.10.-m, 01.30.-y, 01.90.+g

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.05.038763>

1. Пионный гелий

В 1947 г. были открыты заряженные пи-мезоны (пионы), которые, как сейчас известно, состоят из кварка и антикварка, связанных сильным взаимодействием. В том же году Э. Ферми и Э. Теллер предположили, что могут формироваться экзотические атомы, в которых один или больше орбитальных электронов замещены мезонами [1]. В большинстве случаев атомное ядро должно быстро поглощать мезон и распадаться. Однако расчёты показали, что в пионном гелии $\pi^4\text{He}^+$ реализуется редкая ситуация, при которой время его жизни в 1000 раз больше, чем у других пионных атомов. Атом $\pi^4\text{He}^+$ состоит из ядра гелия-4, электрона и π^- -мезона. Ранее были получены лишь косвенные свидетельства образования $\pi^4\text{He}^+$ в столкновительных процессах. М. Hori (Институт квантовой оптики общества им. М. Планка, Германия) и соавторы выполнили эксперимент [2], в котором впервые удалось получить в достаточном количестве и выполнить лазерную спектроскопию атомов $\pi^4\text{He}^+$. Пучок π^- , получаемый на циклотроне в Институте Пауля Шеррера (Швейцария), направлялся в сверхтекущий ^4He . Примерно 3,2 % всех π^- , затормозившихся в гелии, образовывали атомы $\pi^4\text{He}^+$, живущие несколько нс. Эта же мишень освещалась наносекундными лазерными импульсами. Они вызывали в $\pi^4\text{He}^+$ каскадные процессы, которые в итоге вели к поглощению пиона и распаду ядра. Темп появления нейтронов, протонов и дейtronов, образующихся в результате распадов, имел максимум при определённой частоте лазерных импульсов. Этому резонансу, имеющему статистическую значимость более 7σ , соответствовали внутриддерные переходы $(n, l) = (17, 16) \rightarrow (17, 15)$. Резонансная частота оказалась несколько выше, чем давали вычисления. Возможно, это вызвано влиянием атомных столкновений, которые возмущают уровни энергии, как ранее это уже было отмечено при спектроскопии $\bar{\rho}^4\text{He}^+$. Таким образом, в данном эксперименте продемонстрирована возможность лазерной спектроскопии экзотических атомов, содержащих мезоны. Об экзотических атомах см. в обзоре [3].

2. Сильная квантовая связь на расстоянии 1 метр

Для квантовых технологий важна связь между системами, осуществляемая с квантовой точностью без потери когерентности. Между близкими объектами такую связь легко осуществить напрямую либо через поле в резонаторе. Однако для далёких систем создание квантовой связи представляет значительные трудности из-за ослабления сигналов и рассеяния квантовой информации. Р. Treutlein (Базельский университет, Швейцария) и его коллеги реализовали в своём эксперименте [4] дальнюю связь через луч лазера в петлевой конфигурации с несколькими проходами в двух направлениях. Петля связи позволяет компенсировать некоторые виды потерь за счёт деструктивной интерференции квантового шума. Эта методика была применена для связи общего спинового состояния 10^7 атомов ^{87}Rb в магнитном поле в оптической дипольной ловушке и расположенного на расстоянии 1 метра механического осциллятора, представляющего собой квадратную мембрану из нитрида кремния в оптической полости. Спины возмущались с помощью небольшого соленоида, и возмущение коллективного спина приводило к вращению поляризации света, которое конвертировалось в возмущение амплитуды световой волны и в итоге оказывало силовое воздействие на осциллятор. И наоборот, смещения мембранны в обратном

порядке влияли на спин. Квантовая связь при комнатной температуре была продемонстрирована в различных режимах с положительной и отрицательной эффективной массой ансамбля спинов.

3. Начальная стадия фотовозбуждения молекул

В ускорительной лаборатории SLAC исследован процесс перераспределения электронной плотности в молекуле на начальном этапе её возбуждения лазерными импульсами. Р.М. Weber (Брауновский университет, США) и его коллеги изучали относительно небольшие органические молекулы 1,3-циклогексадиена C_6H_8 в разреженном газе при комнатной температуре [5]. Сразу после воздействия оптических лазерных импульсов молекулы освещались сверхкороткими рентгеновскими импульсами от лазера на свободных электронах LCLS. По их рассеянию была найдена разность электронных плотностей до и после начала воздействия лазерных импульсов. Эти прямые измерения показали, что на малом расстоянии $< 3 \text{ \AA}$ от центра молекулы плотность электронного облака уменьшается, тогда как на большем расстоянии $4\text{--}9 \text{ \AA}$ она повышается. Такой характер фотовозбуждения воспроизводится в теоретических расчётах как переход в диффузное электронное 3р-состояние. Подобные исследования могут помочь в понимании механизмов различных фотохимических процессов.

4. Лазерное излучение

с большим орбитальным угловым моментом

Н. Sroog (Университет Витс, ЮАР) и соавторы создали лазер [6], генерирующий излучение с большой величиной орбитального углового момента — с квантовыми числами до $l = 100$. В предшествующих работах с помощью жидких кристаллов были получены лишь на порядок меньшие l . В новом устройстве применяется метаповерхность, интегрированная в лазерную генерирующую среду с ИК-накачкой на нелинейном кристалле в оптическом резонаторе. Метаповерхность состояла из массива стержней прямоугольного сечения, изготовленных из аморфного оксида титана TiO_2 на подложке из кварца. Стержни ориентированы своими длинными сторонами перпендикулярно поверхности (вдоль направления луча лазера). Они имеют различную длину и специальным образом расположены по поверхности так, что проходящая через метаповерхность волна получает в каждом стержне определенный сдвиг фазы и в итоге большой суммарный угловой момент. Данный метод создания метаповерхности позволяет получать структурированный свет с различными характеристиками в достаточно компактном устройстве с небольшим числом оптических элементов. Свет с большим орбитальным угловым моментом может найти полезные применения в различных областях, в том числе в квантовой связи и в метрологии.

5. Микроволновый квантовый радар

Зондирование небольших объектов с помощью маломощных электромагнитных импульсов находит ряд важных практических применений. Наиболее интересен случай, когда исследуются объекты с малой отражающей способностью в среде с большими тепловыми шумами. В оптической области для этих целей уже применялись пары фотонов в запутанном квантовом состоянии [7]. Данная методика была названа

квантовым освещением (quantum illumination). Квантовая запутанность позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум для отражённого сигнала. Перенесение этой методики в терагерцовую и микроволновую области встречает ряд сложностей, так как здесь слабее развиты квантовые технологии и обычно требуется охлаждение до криогенных температур. Но, в то же время, эта область частот очень важна, например, для неинвазивной биомедицинской диагностики [8]. S. Barzanjeh (Институт науки и технологий Австрии) и соавторы выполнили эксперимент [9], в котором демонстрируется квантовое зондирование фотонами микроволнового излучения объекта, находящегося при комнатной температуре. С помощью джозефсоновского параметрического преобразователя генерировались пары микроволновых фотонов в квантово-запутанном состоянии. Один из фотонов пары отражался от исследуемого объекта на расстоянии около 1 метра и затем в приёмнике сравнивался по фазе со вторым фотоном. Важным элементом этих измерений по сравнению с предшествующими экспериментами стало аналого-цифровое преобразование сигнала уже на ранней стадии измерений, что позволило за счёт более удобного метода обработки информации повысить качество сигнала на выходе. По итогам измерений было показано, что использование фотонов в запутанных состояниях позволяет значительно улучшить результаты зондирования — выделить сигнал над уровнем шумов — по сравнению с классическими (не квантовыми) методами.

6. Промежуточная квантовая статистика для энионов

В трёхмерной системе элементарные возбуждения — квазичастицы могут быть только бозонами или фермионами, в зависимости от изменения фазы общей волновой функции при перестановке двух частиц (соответственно, $\phi = 0$ или $\phi = \pi$). Однако теоретически предсказывалось, что в двумерных системах может реализоваться статистика промежуточного типа с другими ϕ . Удовлетворяющие этой статистике квазичастицы были названы энионами. До настоящего времени были получены лишь косвенные экспериментальные свидетельства того, что квазичастицы могут иметь промежуточную статистику. H. Bartolomei (Высшая нормальная школа, Париж, Франция) и соавторы впервые в прямом столкновительном эксперименте показали [10], что сталкивающиеся энионы действительно удовлетворяют промежуточной статистике. Для этого в гетероструктуре GaAs/AlGaAs, удерживающей двумерный электронный газ, были созданы два источника энионов — квантовые точечные контакты (quantum point contact). Третий подобный контакт служил сплиттером, в котором взаимодействовали энионы, испускаемые первыми двумя контактами. Измерялись корреляции электрических токов, создаваемых анионами, которые прошли через сплиттер. По этим корреляциям можно было определить статистические свойства энионов. Было показано, что для энионов в этой системе реализуется промежуточная статистика с $\phi = \pi/3$. О двумерных системах см. в [11].

7. Поиск солнечных аксионов

В Институте физики общества им. М. Планка (Германия) выполнен новый эксперимент [12] по поиску солнечных аксионов, который продолжает серию экспериментов, проводившихся в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова (ПИЯФ). Гипотетические частицы аксионы были предложены теоретически для объяснения проблемы сохранения CP -симметрии в сильных взаимодействиях. Аксионы и аксионоподобные частицы рассматриваются в качестве одного из главных кандидатов на роль тёмной материи (скрытой массы) во Вселенной. Предсказывается, что аксионы должны эффективно рождаться на Солнце в различных процессах, и были выполнены эксперименты по поиску потока солнечных аксионов на Земле. В новом криогенном эксперименте проводился поиск резонансного поглощения аксионов ядрами ^{169}Tm с помощью усовершенствованного низкофонового болометра на основе кристалла $\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ весом 8 г. Отличительной особенностью эксперимента стало использование нового фононного сенсора. Он

представляет собой напылённую на кристалл плёнку вольфрама между двумя плёнками алюминия, которые служили коллекторами фононов. Эта конструкция позволила преодолеть энергетический порог, необходимый для детектирования аксионов. Также на кристалл был напылён нагреватель, предназначенный для создания требуемой рабочей температуры и для калибровки. Новый детектор имеет значительно лучшую чувствительность по сравнению с предыдущими детекторами, использующими ядра ^{169}Tm . Измерения производились в течение нескольких дней. Хотя резонансного поглощения аксионов пока зарегистрировано не было, были получены новые ограничения на константы связи аксионов с фотонами и электронами. В эксперименте принимали участие российские учёные из Курчатовского института, ПИЯФа и Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФАНа).

8. Прецессия орбиты звезды вокруг сверхмассивной чёрной дыры

Коллaborацией GRAVITY впервые зарегистрирована шварцшильдовская прецессия орбиты звезды S2, вращающейся вокруг сверхмассивной чёрной дыры (ЧД) в центре нашей Галактики [13]. Объяснение аналогичной прецессии орбиты Меркурия — дополнительного смещения перигелия — явилось в начале XX века одной из важнейших проверок Общей теории относительности. S2 — близкая к ЧД звезда, имеющая вытянутую орбиту с периодом 15,6 лет. В течение 27 лет с помощью ряда телескопов ведётся мониторинг этой звезды. Для фиксации системы отсчёта, относительно которой изменяется положение звезды и ЧД, в частности, использовались вспышки около ЧД. Ранее уже был зарегистрирован релятивистский доплер-эффект, связанный с движением звезды S2, а также гравитационное красное смещение, обусловленное полем ЧД. Полученная совокупность данных с достоверностью $(5-6)\sigma$ свидетельствует также о прецессии орбиты — в точном соответствии с предсказаниями Общей теории относительности. Таким образом, Общая теория относительности прошла ещё одну успешную проверку в новых условиях. На движение звезды могло, в принципе, оказывать влияние гравитационное поле непрерывно распределённой невидимой материи или компактных объектов. Новые данные накладывают ограничение на эти источники возмущения орбиты. В частности, масса дополнительного компактного объекта (второй ЧД) внутри области размером в одну угловую секунду вокруг центра Галактики не может превышать $10^3 M_\odot$. Об экспериментальной проверке Общей теории относительности см. в [14, 15].

Список литературы

1. Fermi E, Teller E *Phys. Rev.* **72** 399 (1947)
2. Hori M et al. *Nature* **581** 37 (2020); <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2240-x>
3. Меньшиков Л И, Есеев М К *УФН* **171** 149 (2001); Men'shikov L I, Eseev M K *Phys. Usp.* **44** 135 (2001)
4. Karg T M et al. *Science*, онлайн-публикация от 7 мая 2020 г.; <https://doi.org/10.1126/science.abb0328>
5. Yong H et al. *Nature Commun.* **11** 2157 (2020); <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15680-4>
6. Sroor H et al. *Nature Photon.*, онлайн-публикация от 27 апреля 2020 г.; <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0623-z>
7. Жёлтиков А М, Скали М О *УФН* **190** 749 (2020); Zheltikov A M, Scully M O *Phys. Usp.* **63** (7) (2020)
8. Доронина-Амитонова Л В и др. *УФН* **185** 371 (2015); Doronina-Amitonova L V et al. *Phys. Usp.* **58** 345 (2015)
9. Barzanjeh S et al. *Sci. Adv.* **6** eabb0451 (2020); <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb0451>
10. Bartolomei H et al. *Science* **368** 173 (2020); <https://doi.org/10.1126/science.aaaz5601>
11. Штёрмер Х *УФН* **170** 304 (2000)
12. Abdelhameed A H et al., <https://arxiv.org/abs/2004.08121>
13. Abuter R et al. *Astron. Astrophys.* **636** L5 (2020); <https://arxiv.org/abs/2004.07187>
14. Руденко В Н *УФН* **126** 361 (1978); Rudenko V N *Sov. Phys. Usp.* **21** 893 (1978)
15. Турышев С Г *УФН* **179** 3 (2009); Turyshev S G *Phys. Usp.* **52** 1 (2009)