

**1. Процесс Брейта–Уилера.** В 1934 г. — вскоре после создания квантовой электродинамики — Г. Брейт и Дж.А. Уилер рассмотрели теоретически процесс рождения электрон-позитронных пар  $e^+e^-$  при столкновении двух реальных (не виртуальных) фотонов. Они отметили, что условия для рождения  $e^+e^-$  могли бы достигаться при столкновении высокозаряженных релятивистских ионов. В этом случае поле ионов, кулоновское в системе покоя, можно представить состоящим из реальных фотонов. Процесс Брейта–Уилера зарегистрировать не удалось из-за сложности с фокусировкой ионов. В эксперименте STAR, проводимом на релятивистском коллайдере тяжёлых ионов RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории (США), впервые выполнено наблюдение процесса Брейта–Уилера при столкновениях ядер золота (Au+Au) с энергией в системе центра масс 200 ГэВ [1]. Удалось выделить почти касательные (ультрапериферические) столкновения ядер [2], при которых сильно взаимодействие не вовлекается в процесс рассеяния. В эксперименте зарегистрировано 6085 родившихся пар  $e^+e^-$ , измерено сечение процесса  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$  и наблюдалась характерная угловая модуляция, предсказываемая для процесса Брейта–Уилера. Она подтверждает, что сталкиваются реальные фотоны с поперечной линейной поляризацией. Есть надежда, что в похожем эксперименте можно будет наблюдать также эффект двойного лучепреломления в магнитном поле для фотонов в вакууме.

**2. Высокочастотные сигналы в гравитационно-волновой антенне.** Гравитационные волны от столкновения двух чёрных дыр были зарегистрированы впервые в 2015 г. детектором LIGO. Нельзя исключать, что гравитационные волны генерируются и в других процессах во Вселенной на других частотах. В австралийском городе Перт приступил к работе новый детектор высокочастотных гравитационных волн [3]. Его основой служит кварцевая пластина толщиной 1 мм и диаметром 30 мм, различные моды объёмных акустических колебаний которой регистрируются сверхпроводящим квантовым интерферометром (СКВИДом). Детектор тщательно изолирован от источников акустических и других внешних шумов — его чувствительность ограничена внутренними тепловыми шумами и шумом считывания СКВИДа. Два усилителя, настроенные на обертоны различных мод колебаний, могут одновременно производить мониторинг на двух частотах. М. Goryachev (Университет Западной Австралии) и его соавторы в течение первых 153 дней наблюдений зарегистрировали два статистически значимых события. Первое событие отмечено 12 мая 2019 г. на частоте 5,506 МГц, при этом на второй исследуемой частоте 8,392 МГц сигнала не было. Второе событие зарегистрировано 27 ноября 2019 г. на частотах 5,506 МГц и 4,993 МГц. Колебания длились 1–2 секунды, что, ввиду известной добротности пластины, согласуется со временем затухания от короткого воздействия. По оценке, в детекторе выделилась энергия порядка сотых долей эВ. Пока неизвестно, что могло вызвать данные события. Во время событий не было грозových разрядов, землетрясений, а LIGO/Virgo не регистрировали в это время гравитационно-волновых всплесков. Также не наблюдалось метеоров и быстрых радиовсплесков. Возможными причинами может быть сброс напряжения и релаксация в кварцевой пластине, воздействие радиоактивности или космических лучей. Также это может быть высокочастотный гравитационно-волновой сигнал неизвестной природы с характерной амплитудой  $h \approx 2,5 \times 10^{-16}$ . Другие возможные объяснения включают доменные стенки или взаимодействие частиц тёмной материи с кристаллической решёткой. Природа зарегистрированных сигналов, возможно, прояснится по мере повышения чувствительности детектора и накопления статистики.

**3. Диссипативный временной кристалл.** Временные кристаллы, предсказанные теоретически Ф. Wilczek в 2012 г., характеризуются тем, что их свойства повторяются во времени, подобно периодическому располо-

жению атомов в кристалле твёрдого тела. Временные кристаллы ранее уже наблюдались в экспериментах. Н. Keßler (Гамбургский университет, Германия) и соавторы впервые реализовали временной кристалл, стабилизированный процессом диссипации [4]. Эксперимент проводился с бозе-эйнштейновским конденсатом атомов  $^{87}\text{Rb}$  в оптическом резонаторе, в который перпендикулярно оптической оси направлялось лазерное излучение накачки. При повышении интенсивности накачки сверх некоторого порогового значения в резонаторе возникала фаза волн плотности, описываемая моделью Дике. Колебания временного кристалла происходили между чётными и нечётными состояниями волн плотности. Стабилизация кристалла достигалась в результате баланса между периодической вынуждающей силой, взаимодействиями, передаваемыми через резонатор, и управляемой диссипацией в резонаторе.

**4. Прямое измерение многочастичной волновой функции.** В отличие от косвенного измерения квантовой волновой функции, реализованного в методе квантовой томографии, в прямых методах измерения с помощью только одной наблюдаемой находится действительная или мнимая часть волновой функции. Прямой метод ранее удавалось применять для измерения волновой функции лишь одной частицы. М.-С. Chen (Научно-технический университет Китая) и соавторы предложили теоретически и впервые реализовали в эксперименте новый метод прямого измерения многочастичной квантовой волновой функции [5]. Его основой является квантовая телепортация индивидуального элемента многочастичной матрицы плотности в единичный логический кубит, где путём квантового считывания измеряется действительная или мнимая часть элемента, в зависимости от выбираемого измерительного базиса. Эксперимент с фотонами, запутанными по состояниям поляризации, подтвердил успешность данного метода в случае двухфотонной волновой функции. Новый метод во многих случаях может оказаться значительно эффективнее обычной квантовой томографии. О квантовых эффектах см. [6–10].

**5. Периодичность в профиле быстрых радиовсплесков.** С помощью радиотелескопа-интерферометра, расположенного в Канаде, выполняется программа CHIME/FRB по наблюдению быстрых радиовсплесков (БР) на частотах 400–800 МГц. У некоторых БР, наблюдавшихся в рамках CHIME/FRB, в профиле видны несколько пиков. При этом у трёх БР пики разделены примерно одинаковыми временными интервалами, что свидетельствует о периодичности процесса генерации БР. Периодичность с периодом 216,8 мс и статистической значимостью 6,5σ зарегистрирована у всплеска FRB 20191221A, имеющего девять пиков. Некоторые указания (1,3σ и 2,4σ) на периодичность с периодами 2,8 и 10,7 мс имеются у ещё двух БР [11]. Эти наблюдения свидетельствуют в пользу моделей происхождения БР на нейтронных звёздах: на магнетарах или взаимодействующих нейтронных звёздах в двойных системах. Причём ввиду обнаруженной миллисекундной периодичности область излучения должна находиться в магнитосфере нейтронной звезды, а не на удалении от неё, как это предполагалось в некоторых моделях. О БР см. [12].

#### Список литературы

1. Adam J et al. (STAR Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **127** 052302 (2021)
2. Дрёмин И М *УФН* **190** 811 (2020); Dremim I M *Phys. Usp.* **63** 758 (2020)
3. Goryachev M et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 071102 (2021)
4. Keßler H et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 043602 (2021)
5. Chen M-C et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 030402 (2021); arXiv:2107.11754
6. Чукбар К В *УФН* **188** 446 (2018); Chukbar K V *Phys. Usp.* **61** 389 (2018)
7. Белинский А В *УФН* **189** 1352 (2019); Belinsky A V *Phys. Usp.* **62** 1268 (2019)
8. Желтиков А М, Скалли М О *УФН* **190** 749 (2020); Zheltikov A M, Scully M O *Phys. Usp.* **63** 698 (2020)
9. Белинский А В *УФН* **190** 1335 (2020); Belinsky A V *Phys. Usp.* **63** 1256 (2020)
10. Арбеков И М, Молотков С Н *УФН* **191** 651 (2021); Arbekov I M, Molotkov S N *Phys. Usp.* **64** 617 (2021)
11. Andersen B C et al. (The CHIME/FRB Collab.), arXiv:2107.08463
12. Попов С Б, Постнов К А, Пширков М С *УФН* **188** 1063 (2018); Popov S B, Postnov K A, Pshirkov M S *Phys. Usp.* **61** 965 (2018)