

1. Проверка СРТ-теоремы. Симметрия относительно замены частиц на античастицы, зеркального отражения и обращения времени — фундаментальная теорема квантовой теории поля. Она подтверждена для многих процессов, однако в системе заряженных лептонов точность её проверки оставалась мала. Для атомов позитрония эта теорема представляет особый интерес, ввиду того что для них недавно наблюдались некоторые аномалии в измерении постоянной тонкой структуры. Р. Moskal (Краковский университет, Польша) и соавторы выполнили новую проверку СРТ-теоремы в эксперименте с ортопозитронием [1]. Позитроны испускались радиоактивным ^{22}Na и в пористом кремнезёме образовывали ортопозитроний. Исследовалась аннигиляция ортопозитрония в три фотона и изучались угловые корреляции между исходным орбитальным угловым моментом ортопозитрония и плоскостью аннигиляции, определяемой импульсами фотонов (при сохранении СРТ-инвариантности корреляции отсутствуют с точностью до очень малых радиационных поправок). Для регистрации фотонов использовался детектор, состоящий из лент пластикового сцинтиллятора. Его высокое временное разрешение позволило наблюдать тройки фотонов по методу совпадений. На уровне 10^{-4} нарушения СРТ-симметрии не обнаружено, что в три раза улучшает точность проверки СРТ-теоремы для системы ортопозитрония.

2. Неравновесный оптический конденсат Бозе – Эйнштейна. Исследователи из Университета Твенте (Нидерланды) M. Vretnar, C. Toebes и J. Klaers изучили в своём эксперименте свойства бозе-эйнштейновского конденсата фотонов в неравновесных условиях [2]. Квазидвумерный конденсат был получен при комнатной температуре в водном растворе красителя между двумя зеркалами, разделёнными расстоянием 10 мкм. Фотоны могли поглощаться и переизлучаться в среде несколько раз до своего вылета из системы. Путём неравномерного нагрева в конденсате были созданы два оптических плеча интерферометра Маха – Цендера. Это позволило исследовать когерентность конденсата и охарактеризовать его свойства в зависимости от поглощающих свойств среды. Оказалось, что эволюция фотонного конденсата идёт по пути противодействия эффектам, нарушающим его когерентность, таким как потери частиц и деструктивная интерференция.

3. Микроскопический Фано-лазер. В 1985 г. A.L. Schawlow и C.N. Townes показали, что когерентность (ширина полосы излучения) лазера ограничена эффектом квантовых флуктуаций и уменьшается при уменьшении мощности лазера и добротности резонатора. Эффект квантовых флуктуаций особенно существен для микро- и нанолазеров из-за малого числа фотонов в резонаторе. Группа исследователей из Датского технического университета разработала метод [3], который позволяет повысить когерентность лазеров микронного размера путём использования связанных состояний в континууме, формируемых интерференцией Фано, так как эти состояния подавляют квантовые флуктуации. Исследователи создали микроскопический лазер с накачкой от лазерного диода, представляющий собой нанополость с активной средой, соединённую с волноводом. Деструктивная интерференция Фано в точке соединения создаёт почти идеальное отражение фотонов. Подобное "зеркало Фано" ранее уже демонстрировалось в экспериментах. Полоса излучения нового лазера более чем в 20 раз уже, чем у других микроскопических лазеров. Микро-

лазеры могут применяться в коммуникационных устройствах, медицинских сенсорах и др. О применении мощных лазеров см. [4].

4. Атомная оптика. В исследовании интерференции атомных пучков существует проблема электромагнитного взаимодействия между атомами, которое приводит к нежелательному распыливанию пучков и мешает охлаждать атомные газы. До настоящего времени удавалось снизить тепловые скорости атомов до 50 пК, но лишь в двух направлениях движения, а во всех трёх направлениях газ получалось охлаждать лишь до 350 пК. Е.М. Rasel (Ганноверский университет им. Лейбница, Германия) и его коллеги разработали новый подход к атомной оптике, в котором применяются коллективные возбуждения в вырожденном газе в комбинации с магнитными линзами [5]. Облачко бозе-эйнштейновского конденсата атомов ^{87}Rb принимало вытянутую форму, высвобождалось из ловушки, и в нём возбуждались квадрупольные моды колебаний. Эволюция конденсата наблюдалась абсорбционным методом в течение более чем трёх секунд свободного падения. Когда фокус магнитной линзы смещался на бесконечность, происходило охлаждение газа в трёх направлениях движения атомов до рекордно низкой температуры 38^{+6}_{-7} пК, и при этом поток атомов оставался хорошо коллимированным. Экстремальные состояния вещества находились в центре исследований В.Е. Фортова и его коллег [6]. Атомные интерферометры находят применение в фундаментальных исследованиях, а также в гравиметрии.

5. Ускоритель на фотонном чипе. Новой активно развиваемой областью стало создание компактных ускорителей электронов на чипах размером в несколько см или мм. Электроны в них ускоряются лазерными импульсами. Компактные ускорители могут применяться, в частности, в радиотерапии. Сложностью в реализации таких ускорителей является необходимость контроля распространения электронного пучка во время его ускорения. R. Shiloh (Университет Эрлангена – Нюрнберга, Германия) и соавторы разработали и продемонстрировали методику удержания пучка в узком канале шириной 225 нм в периодической кремниевой наноструктуре длиной 80 мкм [7]. В этой структуре происходила модуляция лазерного импульса, ускоряющего электроны, и с помощью чередующегося фазового воздействия излучения на электроны в различных направлениях осуществлялась фокусировка электронного пучка. При этом перенос электронов происходит с минимальными потерями, тогда как без лазерного импульса электроны быстро рассеивались на стенках полости. Подобная методика в недалёком будущем может позволить ускорять электронные пучки до МэВ-ных энергий.

6. "Сверхтекучесть" света. М. Wimmer (Йенский университет имени Фридриха Шиллера, Германия) и соавторы выполнили эксперимент [8], в котором свет в оптической сетчатой решётке имел свойства, напоминающие свойства сверхтекучей жидкости. Установка состояла из двух оптоволоконных колец длиной примерно по 4 км, соединённых через сплиттер и имеющих фазовые регуляторы, создающие нелинейность. Благодаря наличию небольшой разницы длин колец в системе возникал поток дискретных импульсов — световая "жидкость". С помощью дополнительного импульса (фазового дефекта) возбуждались звуковые волны в "жидкости" и измерялась их скорость. Движение фазового дефекта без трения подтверждало наличие "сверхтекучести". Нелинейные оптические сетчатые решётки, подобные используемой в эксперименте, могут найти применение в исследованиях топологических эффектов.

7. Квантовая телепортация в оптомеханической системе.

До настоящего времени были выполнены эксперименты по квантовой телепортации состояний фотонов, спиновых состояний атомов, а также состояний поляризации фотонов в колебательные состояния частиц алмаза. Однако в последнем случае используемый протокол позволял создать лишь короткоживущее итоговое состояние. N. Fiaschi (Делфтский технический университет, Нидерланды) и соавторы разработали и реализовали в эксперименте новый протокол квантовой телепортации для состояний оптомеханической системы, в котором получаются состояния с продолжительным временем жизни [9]. Два кремниевых микростержня, охлаждённые до низших уровней колебательного спектра, были помещены в два плеча интерферометра. Механические колебания стержней были связаны с оптическими и микроволновыми модами через давление излучения. Была продемонстрирована квантовая телепортация оптических состояний по оптоволокну с расстояния в десятки метров в совместное оптомеханическое состояние микростержней. Квантовая чистота (fidelity) телепортации составляла $(77 \pm 1)\%$. Длительное время жизни состояния означает, что устройство может рассматриваться как квантовая память, и на её основе можно создавать квантовые узлы-повторители в телекоммуникационных сетях.

8. Квазинизэнтропическое сжатие газов. В России проведён уникальный эксперимент по ударному сжатию дейтерия и гелия до рекордного давления 20 ТПа (200 млн атм.) и плотности $\rho \approx 14$ г/см³ [10]. Эксперимент выполнен группой учёных, представляющих Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (Саров), Объединённый институт высоких температур РАН (Москва), Институт проблем химической физики РАН (Черноголовка). Мишенью служили две концентрические стальные сферы, заполненные дейтерием или гелием и окружённые зарядом взрывчатого вещества с массой 85 кг в тротиловом эквиваленте. Мишень просвечивалась рентгеновским излучением от двух бетатронов, которые способны просвечивать объекты с массовой толщиной, эквивалентной 25 см свинца. Использовалась оптико-электронная система детектирования, синхронизированная с бетатронами. При взрыве заряда внутри газа распространяются ударные волны и сжимается сама оболочка, так что газ переходит в состояние сильнонеидеальной плазмы с вырождением электронов, причём после воздействия первой ударной волны сжатие происходит примерно квазинизэнтропически. После сжатия оболочка останавливается и затем разлетается. В эксперименте фиксировался радиус оболочки в зависимости от времени, включая момент остановки, когда достигалась максимальная плотность. В результате была измерена сжимаемость плазмы (в P – ρ -координатах). Детальные теоретические вычисления показали хорошее согласие с данными эксперимента. При этом параметры динамического сжатия дейтерия и гелия практически совпадают, хотя они имеют разные термодинамические свойства. В исследованной области параметров заметных разрывных аномалий типа фазовых переходов первого рода в дейтерий не обнаружено, в отличие от известной аномалии при 150–300 ГПа, и не было обнаружено никаких разрывных аномалий в гелии. В описываемом эксперименте были достигнуты термодинамические параметры, превышающие те, которые имеются в недрах Сатурна и Юпитера. Об уравнениях состояния вещества в экстремальных условиях см. [11].

9. Сверхбыстрое плавление меди. N. Jourdain (Университет Бордо, Франция) и соавторы исследовали процесс сверхбыстрого плавления меди под влиянием импульсов мощного лазера [12]. При взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса с ксенонной мишенью возникал рентгеновский импульс, который плавил слой меди толщиной 80 нм. Было выполнено более 2000 актов плавления. Сверхбыстрый переход из твёрдого в жидкое состояние является неравновесным процессом, при котором температуры электронов и ионов различаются. Данный процесс важен для понимания электронной динамики при экстремальном нагреве. Для измерений применялся метод рентгеновской абсорбционной спектроскопии с временным разрешением до фс. При мощности нагрева от 1 до 5 МДж кг^{–1} время плавления (разрушение периодичности кристаллической решётки) составило порядка пс. Это меньше, чем ранее удавалось измерить с помощью электронной дифракции. Измерялись свойства меди вблизи экстремумов диспер-

сионного соотношения $dE/dk = 0$, которым соответствуют пики в рентгеновском спектре поглощения. Теоретическое моделирование результатов эксперимента выполнялось с использованием уравнения состояния Бушмана – Ломоносова – Фортова (об уравнениях состояния вещества в экстремальных условиях см. [13]) и двухтемпературной модели (электронной и ионной), и было получено хорошее согласие с данными эксперимента.

10. Первичные гравитационные волны. Неоднородности реликтового излучения несут в себе информацию о процессах в ранней Вселенной [14]. В частности, в поляризации излучения могут содержаться данные о первичных гравитационных волнах, возникших, предположительно, на стадии космологической инфляции. P.A.R. Ade (Кардиффский университет, Великобритания) и соавторы выполнили новый анализ совокупности данных нескольких радиотелескопов, наблюдавших реликтовое излучение в последние годы: Planck, WMAP, BICEP2,3 и Keck Array [15]. В том числе были использованы новые данные Keck Array на частоте 220 ГГц и BICEP3 на частоте 95 ГГц. Наряду с гравитационным линзированием и рассеянием на пыли, гравитационные волны давали бы вклад в B -моду поляризации излучения. В новой работе [15] применялся матричный метод очистки данных, который позволил измерять B -моду на фоне гораздо более сильной E -моды. Гравитационные волны не обнаружены, но было получено новое, самое сильное на сегодняшний день ограничение на тензорную моду возмущений (гравитационные волны) $r_{0,05} < 0,036$ на уровне достоверности 95 %. Малая величина тензорной моды даёт, в свою очередь, ограничения на возможные теории инфляционной космологии. Сложность возникает с теорией хаотической инфляции, в которой предсказывается большая величина тензорной моды. Напротив, инфляция Старобинского и k -инфляция не затрагиваются новыми ограничениями.

11. Галактики в пылевых коконах в ранней Вселенной.

Y. Fudamoto (Женевский университет, Швейцария; Университет Васэда и Национальная астрономическая обсерватория Японии) и соавторы с помощью комплекса радиотелескопов ALMA, расположенного в Чили, обнаружили две экранированные пылью галактики на красных смещениях $z = 6,68$ и $z = 7,35$, т.е. в эпоху, когда происходила реионизация Вселенной — ионизация водорода под влиянием излучения первых галактик и квазаров [16]. Первоначально ALMA зафиксировал две галактики, испускающие мощное УФ-излучение. Рядом с ними были замечены дополнительные источники линий излучения углерода и излучения пыли в континууме. Эти источники оказались спутниковыми галактиками в пылевых коконах. Они интересны тем, что могут представлять новую, достаточно многочисленную, популяцию галактик в эпоху реионизации, которые дают 10–25 % всего темпа образования звёзд. Свойства пыли в составе пылевой плазмы исследовались в работах В.Е. Фортова и его коллег [17].

Список литературы

1. Moskal P et al. *Nat. Commun.* **12** 5658 (2021)
2. Vretenar M, Toebes C, Klaers J *Nat. Commun.* **12** 5749 (2021)
3. Yu Y et al. *Nat. Photon.* **15** 758 (2021)
4. Анисимов С И, Прохоров А М, Фортвов В Е *УФН* **142** 395 (1984); Anisimov S I, Prokhorov A M, Fortov V E *Sov. Phys. Usp.* **27** 181 (1984)
5. Deppner C et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 100401 (2021)
6. Фортвов В Е *УФН* **179** 653 (2009); Fortov V E *Phys. Usp.* **52** 615 (2009)
7. Shiloh R et al. *Nature* **597** 498 (2021)
8. Wimmer M et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 163901 (2021)
9. Fiaschi N et al. *Nat. Photon.* **15** 817 (2021)
10. Мочалов М А, Ильяев Р И, Фортвов В Е и др. *ЖЭТФ* **160** 735 (2021); Mochalov M A, Ilkaev R I, Fortov V E et al. *J. Exp. Theor. Phys.* **133** (5) (2021); <https://doi.org/10.31857/S0044451021110122>
11. Фортвов В Е *Уравнения состояния вещества: от идеального газа до кварк-глюонной плазмы* (М.: Физматлит, 2012)
12. Jourdain N et al. *Phys. Rev. Lett.* **126** 065001 (2021)
13. Бушман А В, Фортвов В Е *УФН* **140** 177 (1983); Bushman A V, Fortov V E *Sov. Phys. Usp.* **26** 465 (1983)
14. Верходанов О В *УФН* **186** 3 (2016); Verkhodanov O V *Phys. Usp.* **59** 3 (2016)
15. Ade P A R et al. (BICEP/Keck Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **127** 151301 (2021)
16. Fudamoto Y et al. *Nature* **597** 489 (2021); arXiv:2109.10378
17. Фортвов В Е и др. *УФН* **174** 495 (2004); Fortov V E et al. *Phys. Usp.* **47** 447 (2004)