

1. Распределение массы внутри протона. За распределение электрического заряда и спина внутри протона ответственны в основном кварки. Напротив, распределение массы внутри протона определяется главным образом глюонами — их цветовым взаимодействием, поскольку сумма масс одних только кварков значительно меньше массы протона. Характер распределения массы внутри протона называют также гравитационным формфактором, так как масса определяет гравитационное взаимодействие. Глюоны не несут заряда и поэтому не могут быть изучены непосредственно по рассеянию электронов. Однако недавно был предложен метод [1], позволяющий найти распределение массы путём измерения дифференциального сечения фоторождения мезонов J/ψ вблизи порога. Данный способ можно образно представить как зондирование протона цветовым диполем. С его помощью в Лаборатории им. Т. Джефферсона впервые определён гравитационный формфактор протона [2]. Жидкий водород освещался пучком тормозного излучения, при рассеянии фотонов на протонах рождались короткоживущие мезоны J/ψ , измерялся энергетический спектр e^+e^- -пар, рождавшихся при их распадах. Найденный массовый радиус протона оказался значительно меньше его зарядового радиуса [3]. Кроме того, в эксперименте определена следовая аномалия тензора энергии-импульса протона, которая несёт ценную информацию о кварк-глюонных взаимодействиях.

2. Поиск когерентного рассеяния частиц тёмной материи на ядрах. Природа тёмной материи (ТМ) во Вселенной пока не выяснена. Часто предполагается, что она состоит из новых элементарных частиц. Поскольку поиск слабовзаимодействующих массивных частиц ТМ (вимпов) пока не дал результата, актуальным становится поиск более лёгких частиц с массами менее ГэВ, которые не могли быть зарегистрированы на детекторах, предназначенных для поиска вимпов. Для лёгких частиц появляется возможность их когерентного рассеяния на атомных ядрах, когда частица взаимодействует сразу со всем ядром, а не с отдельными нуклонами внутри ядра. Ранее в эксперименте COHERENT в Ок-Риджской национальной лаборатории (США) уже было зарегистрировано когерентное взаимодействие нейтрино с ядрами. В новом эксперименте коллаборации COHERENT [4] выполнен поиск когерентного взаимодействия частиц ТМ с массами 1–220 МэВ, предположительно рождающихся на ускорителе, с атомными ядрами детектора. Использовался детектор из сцинтиллятора CsI[Na] весом 14,6 кг, чувствительный к энергии отдачи ядер ≥ 9 кэВ. Поиск когерентных взаимодействий частиц ТМ пока не дал результата, но получены новые ограничения на свойства частиц. В интервале масс 20–33 МэВ эти ограничения уже перекрываются с ограничениями, следующим из космологии.

3. Дифракция на временных щелях. В знаменитом опыте Юнга свет испытывал дифракцию при прохождении через две щели и на экране за щелями наблюдалась пространственная интерференционная картина. Однако М. Moshinsky ещё в 1952 г. указал на то, что интерференция возможна и в фурье-пространстве. Если сигнал, занимающий некоторую полосу частот, пройдёт через два временных "окна", разделённых интервалом времени,

то в его частотном спектре должны появиться осцилляции. R. Tirole (Имперский колледж Лондона, Великобритания) и соавторы впервые продемонстрировали этот эффект для электромагнитного излучения оптического диапазона [5]. Для создания временных щелей применялся тонкий слой оксида индия и олова (ITO) на стеклянной подложке. На него с интервалом 225 фс воздействовали два световых импульса накачки с частотой вблизи нуля диэлектрической проницаемости (227 ТГц). Под их воздействием коэффициент отражения слоя изменялся от обычного значения 0,08 до величины 0,6. Исследовалось отражение света с частотой 230,2 ТГц, шириной полосы 1 ТГц и длительностью 794 фс, перекрывающей две временные щели. В частотном спектре отражённого света, игравшем роль экрана, появлялись до шести осцилляций, соответствующих интерференции. Также обнаружено, что оптические свойства слоя ITO могут изменяться значительно быстрее, чем считалось ранее, всего за 1–10 фс. Это открывает новые возможности для сверхбыстрой обработки оптических сигналов.

4. Нелокальная квантовая интерференция без квантовой запутанности. Обычно считается, что для нелокальной квантовой интерференции между пространственно разнесёнными системами требуется квантовая запутанность этих систем. K. Qian с коллегами (Нанкинский университет, Китай) впервые продемонстрировали, что это условие не является необходимым [6]. В основе их эксперимента лежит использование фотонов, которые в эксперименте не детектируются, но в принципе детектироваться могут. Эксперимент был выполнен с помощью источника фотонов, нелинейных кристаллов, фотоделителя, детекторов и ряда вспомогательных элементов. Получена нелокальная интерференция трёх фотонов с помощью подстройки фазы четвёртого нерегистрируемого фотона, представляющего собой часть полной квантовой системы. Данное явление может найти применение в фотонных квантовых компьютерах [7].

5. Сегнетоэлектричество в простом веществе. Как правило, явление сегнетоэлектричества (спонтанной поляризации в отсутствие внешнего электрического поля) имеет место в веществах, состоящих из двух и более различных элементов. Оно обусловлено относительным смещением зарядов в различных атомах. J. Gou (Национальный университет Сингапура) и соавторы впервые обнаружили сегнетоэлектричество у простого вещества, состоящего из атомов лишь одного элемента [8]. Тонкий слой висмута на графитовой подложке по своим свойствам напоминал чёрный фосфор в анизотропной α -фазе. Атомы висмута в решётке могли находиться в одном из двух состояний с разной конфигурацией химических связей. При сдвиге атомов, находящихся в одном состоянии, относительно атомов в другом состоянии происходило перераспределение заряда и в плоскости образца возникала поляризация. Тем самым два состояния одинаковых атомов имитировали наличие двух элементов. С помощью иглы сканирующего туннельного микроскопа в плоскости образца создавалось электрическое поле, которое вызывало переключение сегнетоэлектрических свойств. При этом наблюдалось движение доменных стенок между областями с разной поляризацией.

6. Вихри в сверхпроводящем диодном эффекте. Недавно у некоторых веществ был обнаружен сверхпроводящий диодный эффект, когда критический ток зависит от направления, определяемого внешним магнитным полем, но надёжное теоретиче-

ское объяснение данного эффекта отсутствовало. В новом эксперименте А. Gutfreund (Еврейский университет в Иерусалиме) и соавторов в бислое Nb/EuS (сверхпроводник/ферромагнетик) в магнитном поле наблюдалась асимметричная динамика сверхпроводящих вихрей, ответственная, по-видимому, за диодную асимметрию [9]. Измерения проводились с помощью сверхпроводящего контакта (СКВИДа), закреплённого на игле микроскопа, а бислой Nb/EuS представлял собой брусок в конфигурации, обычно используемой для наблюдения эффекта Холла. Поток вихрей в бруске наблюдался как с помощью прямых локальных измерений, так и по макроскопическим характеристикам образца. На основе этих измерений была построена модель сверхпроводящего диодного эффекта, дающая его объяснение посредством динамики вихрей и не требующая возникновения состояний Фульде–Феррелла–Ларкина–Овчинникова, как это предполагалось в некоторых моделях.

7. Обобщение теории Монина–Обухова. Автомодельная (самоподобная) теория атмосферной турбулентности, предложенная Мониним и Обуховым в 1954 г. [10], широко используется в расчётах разнообразных атмосферных явлений. Применением теории, особенно в горных районах, ограничена предположением об однородности атмосферы в горизонтальном направлении. I. Stiperski (Инсбрукский университет, Австрия) и M. Calaf (Университет Юты, США), основываясь на большом объёме эмпирических данных, предложили обобщение теории Монина–Обухова [11], добавив в неё анизотропные члены, учитывающие неоднородности местности. Фитирование по данным 13 массивов наблюдений атмосферной турбулентности, проведённых в регионах с различным рельефом, позволило определить параметры модели и представить удобные для расчётов итоговые соотношения. С их помощью можно рассчитать перенос импульса, тепла и примесей в атмосфере при различном рельефе местности. О влиянии атмосферной турбулентности на оптические наблюдения см. [12].

8. Турбулентность в бозе–эйнштейновском конденсате. Турбулентность, имеющая место во множестве процессов, может возникать и в конденсате Бозе–Эйнштейна, если вывести его из состояния равновесия. В отличие от гидродинамической турбулентности, в данном случае имеет место волновая турбулентность, связанная с взаимодействием хаотического набора волн в разных масштабах. Y. Zhu (Университет Лазурного берега, Франция) и соавторы из Франции и России исследовали турбулентность в конденсате Бозе–Эйнштейна теоретически и с помощью численных экспериментов [13]. Их модель основана на волновом кинетическом уравнении, которое было выведено в работе [14] и применялось для описания бозе-звёзд и аксионных миникластеров. Необычным свойством турбулентности в бозе–эйнштейновском конденсате оказалось наличие не только прямого потока энергии от больших масштабов к малым масштабам, но и потока в обратном направлении. Для численного моделирования с высоким разрешением применялась модель Гросса–Питаевского и получено хорошее согласие с теорией. Созданная модель турбулентности успешно описывает имеющиеся экспериментальные данные, в том числе объясняет наблюдаемый показатель степени спектра $k^{-3,5}$ посредством логарифмических поправок.

9. Пики плотности тёмной материи вокруг чёрных дыр? Согласно теоретическим расчётам, вокруг чёрных дыр (ЧД) могут возникать сгущения и пики плотности тёмной материи (ТМ). Структура пика зависит от истории образования ЧД и окружающих её условий. Исследователи из Образовательного университета Гонконга (Китай) М.Н. Chan и С.М. Lee, проанализировав данные о движении двух двойных рентгеновских систем A0620-00 и XTE J1118+480, получили косвенные свидетельства наличия пиков ТМ [15]. Каждая система представляет собой связанную пару из ЧД звёздной массы и маломассивной звезды. Орбитальный период этих систем аномально быстро замедляется ($\dot{P} \sim -1$ мс год⁻¹) — на два порядка больше, чем от потерь на гравитационное излучение. Обсуждалось взаимодействие звёздного ветра и магнитного поля и приливное взаимодействие с протяжённым газовым диском, однако в рамках этих

механизмов не удаётся объяснить большую скорость замедления. М.Н. Chan и С.М. Lee в качестве нового объяснения рассмотрели гипотезу взаимодействия звезды с пиком плотности ТМ вокруг ЧД посредством динамического трения и показали, что этот механизм может объяснить данные наблюдений. Наилучшее согласие теории и наблюдений получается в том случае, если степенной профиль плотности ТМ имеет показатель степени 1,7–1,85, который мог возникнуть под влиянием процесса, аналогичного звёздному нагреву [16]. Таким образом, замедление орбитального движения в двойных системах может являться новым косвенным методом наблюдения ТМ.

10. Касп тёмной материи в Малом Магеллановом Облаке. Одной из нерешённых проблем космологии остаётся проблема "касп–кор". В центре многих карликовых галактик наблюдается протяжённая область с постоянной плотностью ТМ (кор или ядро), тогда как численное моделирование процесса формирования галактик предсказывает степенной рост к центру (касп). Возможным решением этого противоречия является разрушение каспов взрывами сверхновых или другими барионными процессами. М. De Leo (Католический университет Чили, Институт астрофизики тысячелетия, Чили, и Университет Суррея, Великобритания) и соавторы предположили, что в центре Малого Магелланова Облака (ММО) — карликового спутника нашей Галактики — мог сохраниться касп ТМ [17]. Для его поиска исследователи разработали алгоритм, который позволил очистить изображение от вещества, выброшенного приливными силами и не связанного гравитационно с ММО. Использовались спектроскопические данные по ~ 6000 звёздам, позволяющие найти лучевые скорости, вместе с данными об их собственных движениях, полученными телескопом Gaia. Как показало динамическое моделирование на основе уравнений Джинса, распределение плотности в центре ММО действительно согласуется с наличием каспа до расстояний 400 пк от центра, причём плотность ТМ в пределах 150 пк составляет $3 \times 10^8 M_\odot \text{ кпк}^{-3}$. Столь большая плотность ТМ говорит о том, что в данном случае касп не успел трансформироваться в кор. Это делает ММО перспективным объектом для поиска аннигиляции ТМ.

Список литературы

1. Kharzeev D E *Phys. Rev. D* **104** 054015 (2021) <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.054015>
2. Duran B et al. *Nature* **615** 813 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05730-4>
3. Хабарова К Ю, Колачевский Н Н *УФН* **191** 1095 (2021); Khabarova K Yu, Kolachevsky N N *Phys. Usp.* **64** 1038 (2021)
4. Akimov D et al. *Phys. Rev. Lett.* **130** 051803 (2023) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.051803>
5. Tirole R et al. "Double-slit time diffraction at optical frequencies" *Nat. Phys.* (2023) <https://doi.org/10.1038/s41567-023-01993-w>, published 03 April 2023
6. Qian K et al. *Nat. Commun.* **14** 1480 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37228-y>
7. Валиев К А *УФН* **175** 3 (2005); Valiev K A *Phys. Usp.* **48** 1 (2005)
8. Gou J et al. *Nature* **617** 67 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05848-5>
9. Gutfreund A et al. *Nat. Commun.* **14** 1630 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37294-2>
10. Монин А С *УФН* **67** 119 (1959); Monin A S *Sov. Phys. Usp.* **2** 50 (1959)
11. Stiperski I, Calaf M *Phys. Rev. Lett.* **130** 124001 (2023) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.124001>
12. Лукин В П *УФН* **191** 292 (2021); Lukin V P *Phys. Usp.* **64** 280 (2021)
13. Zhu Y, Semisalov B, Krstulovic G, Nazarenko S *Phys. Rev. Lett.* **130** 133001 (2023) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.133001>
14. Semikoz D V, Tkachev I I *Phys. Rev. Lett.* **74** 3093 (1995)
15. Chan M H, Lee C M *Astrophys. J. Lett.* **943** L11 (2023) <https://doi.org/10.3847/2041-8213/acaafa>
16. Gnedin O Y, Primack J R *Phys. Rev. Lett.* **93** 061302 (2004)
17. De Leo M et al., arXiv:2303.08838, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.08838>, submitted to *Mon. Not. R. Astron. Soc.*