

1. Аномальный магнитный момент мюона. В физике элементарных частиц с 2006 г. существует проблема аномального магнитного момента мюона: измеренная в Брукхейвенской национальной лаборатории величина $g-2$ заметно отличалась от рассчитанной теоретически [1]. Это отличие, если оно действительно имеет место, может указывать на вклад новой физики за пределами Стандартной модели. Коллаборацией Muon $g-2$, проводящей эксперимент в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США), представлены новые результаты измерения $g-2$, имеющие в два раза лучшую точность по сравнению с результатами 2021 г. [2]. Измерялась разность циклотронной частоты и частоты прецессии спинов антимюонов в магнитном поле в накопительном сверхпроводящем кольце. Точность повысилась, главным образом, путём снижения систематических погрешностей, а также за счёт роста объёма данных. Новый результат измерения $g-2$ расходитсся с предсказаниями Стандартной модели на уровне 5σ . В ближайшие годы ожидается ещё более существенное увеличение точности эксперимента и завершение новых теоретических расчётов, что может прояснить данную проблему.

2. Тетракварки. Тетракварками называют частицы — адроны, состоящие из четырёх кварков. Предыдущие сообщения о регистрации тетракварков, все кварки которых имеют разные ароматы, были или неполными (не обнаружен изоспиновый партнёр), или пока не подтверждены в независимых экспериментах. Коллаборация LHCb на Большом адронном коллайдере сообщила о достаточно надёжной регистрации двух новых тетракварков с составом $(c\bar{s}u\bar{d})$ и $(c\bar{s}\bar{u}d)$ [3] и массами $\approx 2,9$ ГэВ. Этот дважды заряженный тетракварк с открытым очарованием \bar{s} и его нейтральный партнёр, вероятно, принадлежат одному изоспиновому триплету. Изучались протон-протонные столкновения при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ. Тетракварки были идентифицированы как промежуточные резонансы в распадах $B^0 \rightarrow \bar{D}^0 D_s^+ \pi^-$ и $B^+ \rightarrow \bar{D}^- D_s^+ \pi^+$, связанных между собой изоспиновой симметрией.

3. Новые изомерные состояния в ядрах ^{136}Cs . Детекторы на основе ксенона используются для поиска частиц тёмной материи, безнейтринного двойного бета-распада и нейтрино малых энергий. Нейтрино посредством заряженных токов могут взаимодействовать с ядрами ^{136}Xe , а регистрация фотонов, излучаемых возбуждёнными ядрами $\text{Cs}^{(*)}$, позволяет измерить энергию нейтрино. S.J. Haselschwardt (Берклиевская национальная лаборатория им. Э. Лоуренса, США) и соавторы обнаружили новые низколежащие изомерные состояния в ядрах ^{136}Cs [4]. В эксперименте регистрировалось гамма-излучение, возникающее в реакции $^{136}\text{Xe}(p, n)^{136}\text{Cs}$. По этим данным найдено большое количество новых ядерных переходов и два уровня ядра ^{136}Cs со временем жизни порядка 100 нс. Наличие подобных состоя-

ний даёт уникальные возможности для регистрации редких событий на основе эффекта отложенных совпадений, позволяющего отделять фоновые события.

4. Редкий распад ядра калия-40. Ядра изотопа ^{40}K при своих распадах с вероятностью 10 % превращаются в ядра ^{40}Ar в процессе электронного захвата. Преобладающая часть таких распадов идёт в возбуждённое состояние ядер ^{40}Ar . Предсказывалось существование ещё одного редкого канала распада ^{40}K в основное состояние ядра ^{40}Ar с захватом электрона, но ранее этот канал наблюдать не удавалось. В отличие от распада в возбуждённые состояния, распад в основное состояние не сопровождается дальнейшим излучением γ -фотонов. Теория не позволяет пока надёжно вычислить вероятность такого распада, и в качестве грубой оценки вероятность чаще всего полагалась равной 2 %. Коллаборация KDK выполнила новый эксперимент и впервые надёжно зарегистрировала распады ^{40}K в основное состояние [5]. Применялись высокочувствительные детекторы гамма- и рентгеновских фотонов, работающих по методу совпадения и антисовпадения. В результате была измерена вероятность распадов ^{40}K в основное состояние, оказавшаяся в два раза меньше, чем обычно полагалось, а гипотеза об их отсутствии исключена на уровне 4σ . Фон от распадов ядер ^{40}K является важным фактором во многих экспериментах по поиску частиц тёмной материи и безнейтринного двойного бета-распада, и неизвестная вероятность вносила некоторую неопределённость в результаты экспериментов. Кроме того, указанная двукратная ошибка приводила к ошибкам в геологической датировке калий-аргонным методом в десятки миллионов лет.

5. Прямое наблюдение нелокального спаривания фермионов. Модель Ферми–Хаббарда успешно описывает переход типа кроссовер от локального спаривания фермионов в конденсатах Бозе–Эйнштейна к нелокальному (пространственно разнесённому) спариванию в механизме Бардина–Купера–Шриффера. Наиболее интересна область "псевдощели" вблизи кроссовера, где даже при температуре выше критической температуры сверхтекучести происходит образование пар. T. Hartke (Исследовательская лаборатория электроники Массачусетского технологического института, США) и соавторы впервые выполнили прямое наблюдение процесса нелокального спаривания фермионов в режиме "псевдощели" [6]. Они поместили взаимодействующие фермионные атомы калия при температуре порядка нК в оптическую решётку и использовали квантовый микроскоп для получения нескольких тысяч снимков, показывающих направления спинов в узлах решётки. Корреляционный анализ выявил формирование и пространственное упорядочение нелокальных фермионных пар в случае двумерного притягивающего газа Хаббарда.

6. Ловушка Капицы. Маятником Капицы называют механический маятник, колебания которого динамически стабилизируются путём быстрой вибрации точки подвеса [7]. Данный эффект стабилизации широко используется в различных областях физики. Эффект маятника Капицы уже применялся в ловушке Поля заряженных частиц и для удержания

света в диэлектрической структуре. J. Jiang (Кайзерслаутенский технический университет, Германия) и соавторы впервые создали на основе этого эффекта ловушку для ультрахолодных атомов, назвав её "ловушкой Капицы" [8]. Основу ловушки составляют два сфокусированных через объектив луча лазера, имеющих специальные сдвиги по частоте и промодулированных периодическими сигналами. В полученном гауссовом потенциале удерживался конденсат Бозе–Эйнштейна атомов ^{87}Rb . Абсорбционное изображение облачка атомов было получено через тот же объектив, и была видна характерная конфигурация, предсказываемая теоретически на основе теории Гросса–Питаевского для случая ловушки Капицы. При этом наблюдался не только сферический кольцеобразный слой, но и его асимметрия на уровне 1%, также предсказываемая теорией. Созданная ловушка Капицы может применяться для исследования квантовых туннельных эффектов, явлений хаоса в классическом и квантовом режиме, а также других фундаментальных процессов.

7. Статистика турбулентности. В 1941 г. Коломогоров выдвинул гипотезу о том, что турбулентность в так называемой инерционной области при больших числах Рейнольдса Re имеет универсальный вид, когда характерные скорости зависят степенным образом от масштаба турбулентных пульсаций. При этом своё начало турбулентность берёт на самых больших масштабах, затем энергия переносится в средние масштабы и наконец диссипирует в малых масштабах за счёт вязкости. С. Kuchler, G.P. Bewley и E. Bodenschatz выполнили в Институте динамики и самоорганизации Общества им. М. Планка (Германия) новый масштабный эксперимент по изучению турбулентности в воздухе [9]. В тоннеле объёмом 88 м^3 с помощью индивидуально управляемых лопастей возбуждалась турбулентность с различными начальными распределением по масштабам, и путём изменения давления воздуха Re варьировались в широком интервале. Эволюция турбулентных движений воздуха изучалась по воздействию его потоков на нанонити. Оказалось, что структурные функции 2-го порядка имеют эффективный показатель степени, отличающийся от закона Колмогорова $2/3$ и зависящий от масштаба даже в инерционном режиме, но при этом они не зависят от самих Re . Этот результат не имеет пока полного теоретического объяснения. О неверных предпосылках в выводе степенной формы структурных функций и о концепции растягивающихся вихревых нитей см. в [10]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что физика турбулентности в инерционном диапазоне является более сложной, чем ожидалось. Об атмосферной турбулентности см. [11].

8. Новая проверка принципа эквивалентности. V.V. Singh (Ганноверский университет им. Г.В. Лейбница, Германия) и соавторы выполнили новую проверку принципа эквивалентности, лежащего в основе Общей теории относительности, с использованием лазерной локации Луны [12]. В этом методе с высокой точностью измеряется расстояние от Луны до Земли с помощью зеркал, установленных на Луне в 1969 г. Отличие отношения пассивных и гравитационных масс для железа и алюминия проявилось бы в разном приливном воздействии Земли на мантию Луны, состоящей из базальтов с избытком железа, и кору, содержащую избыток алюминия (внутренняя структура Луны изучена по сейсмическим данным). Это вызвало бы дополнительную поправку к орбитальной скорости Луны и расстоянию до неё. V.V. Singh и др. сумели на два порядка (до $3,9 \times 10^{-14}$) снизить верхний предел на комбинацию величин, играющую роль параметра Этвеша, по сравнению с предыдущим результатом 1986 г. Недавняя проверка равенства инертной и пассивной гравитационных масс в других условиях — по данным космического эксперимента MICROSCOPE, выполнявшегося на микроспутниках, — достигает точности 10^{-15} .

9. Галактика с дефицитом тёмной материи. Почти все галактики содержат невидимую тёмную материю (ТМ), масса которой в несколько раз превосходит массу обычного барийного вещества (звёзд, газа и пыли). Однако некоторые галактики имеют аномальное соотношение видимой и невидимой компонент. S. Comerón (Университет Ла-Лагуна и Канарский институт астрофизики, Испания) и соавторы исследовали галактику NGC 1277, используя данные 2,7-метрового телескопа обсерватории Макдональда, и выполнили численное моделирование её динамики в рамках анизотропной модели Джинса [13]. Массивная галактика NGC 1277 относится к раннему хаббловскому типу и, вероятно, является так называемой реликтовой галактикой, избежавшей слияния с другими крупными галактиками. Неожиданным результатом стало то, что в пределах радиуса 6 кпк масса ТМ в NGC 1277 составляет $< 5\%$ от общей массы, тогда как в стандартной космологической модели она должна составлять 60%. Причина почти полного отсутствия ТМ в галактике пока точно не выяснена, и механизм рождения этой галактики неизвестен. По одной из гипотез, галактика могла потерять ТМ при столкновении с другой галактикой (как в случае скопления "Bullet").

10. Поиск космических источников нейтрино. В последние годы на детекторах IceCube и Baikal-GVD регистрируются астрофизические нейтрино высоких энергий. В данных IceCube недавно была выделена галактическая компонента потока нейтрино, но большая часть нейтрино имеет внегалактическое происхождение. Конкретные источники нейтрино пока остаются неидентифицированными, хотя имеются указания, что нейтрино могли рождаться в активных галактиках-блэзарах. В частности, об этом свидетельствует наблюдение корреляций нейтрино с радиоизлучением блазаров [14]. Коллаборация Baikal-GVD выполнила новый поиск корреляций нейтрино и известных астрофизических объектов [15]. Использование в Baikal-GVD воды Байкала как рабочего вещества детектора даёт возможность точнее измерять направление прихода нейтрино по сравнению с экспериментами во льду. В новом исследовании изучались каскадные события взаимодействия нейтрино с энергиями, превышающими 100 ТэВ. На данный момент объём статистических данных не позволяет сделать надёжные выводы, но было отмечено совпадение каскадов с несколькими яркими и вспыхивающими блазарами (2023 + 335, 2021 + 317, 2050 + 364, 0529 + 075, TXS 0506 + 056, 0258-184, 1935-179), наблюдавшимися телескопами VLBI, и с галактическими источниками LSI + 61 303 и Swift J0243.6 + 6124.

Список литературы

1. Логашенко И Б, Эйдельман С И *УФН* **188** 540 (2018); Logashenko I B, Eidel'man S I *Phys. Usp.* **61** 480 (2018)
2. Aguillard D P et al. (The Muon $g-2$ Collab.) "Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.20 ppm", <https://muon-g-2.fnal.gov/result2023.pdf>
3. Aaij R et al. (LHCb Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **131** 041902 (2023)
4. Haselschwardt S J et al. *Phys. Rev. Lett.* **131** 052502 (2023); arXiv:2301.11893, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.11893>
5. Stukel M et al. (KDK Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **131** 052503 (2023)
6. Hartke T et al. *Science* **381** 82 (2023)
7. Капица П Л *УФН* **44** 7 (1951)
8. Jiang J et al. *Phys. Rev. Lett.* **131** 033401 (2023)
9. Kuchler C, Bewley G P, Bodenschatz E *Phys. Rev. Lett.* **131** 024001 (2023)
10. Зыбин К П, Сирота В А *УФН* **185** 593 (2015); Zybin K P, Sirota V A *Phys. Usp.* **58** 556 (2015)
11. Лукин В П *УФН* **191** 292 (2021); Lukin V P *Phys. Usp.* **64** 280 (2021)
12. Singh V V et al. *Phys. Rev. Lett.* **131** 021401 (2023)
13. Comerón S et al. *Astron. Astrophys.* **675** A143 (2023)
14. Plavin A, Kovalev Yu Y, Kovalev Yu A, Troitsky S *Astrophys. J.* **894** 101 (2020)
15. Allakhverdyan V A et al., arXiv:2307.07327, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.07327>; *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, accepted for publication