

Ю.Н. Ерошенко

PACS numbers: 01.10. – m, 01.30. – y, 01.90. + g

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.07.039712>

**1. Поиск частиц скрытого сектора.** В физике элементарных частиц, возможно, имеется так называемый скрытый сектор, частицы которого пока не поддаются регистрации в экспериментах. О его существовании свидетельствует наличие во Вселенной тёмной материи (скрытой массы), вероятно, состоящей из частиц нового класса. Ю.М. Андреев и его коллеги в эксперименте NA64 в ЦЕРНе выполнили новый поиск векторных бозонов скрытого сектора  $Z'$ , способных объяснить проблему аномального магнитного момента мюона и рождение частиц тёмной материи [1]. Пучок мюонов от ускорителя сталкивался с ядерной мишенью, и измерялся сигнал в калориметре от рассеянных частиц. Недостаток энергии в калориметре свидетельствовал бы о рождении частиц скрытого сектора. После обработки данных о  $\sim 2 \times 10^{10}$  событиях на достигнутом уровне точности потерянной энергии не зарегистрировано. Это дало новые ограничения на характеристики  $Z'$ . Если  $Z'$  ответствен за мюонную аномалию, то его масса должна быть заключена в интервале между 6–40 МэВ, а константа связи  $g_{Z'}$   $< 6 \times 10^{-4}$ . Также получены новые ограничения на возможные параметры частиц тёмной материи — продуктов распада  $Z'$ .

**2. Галлиевая аномалия.** Измеренный темп взаимодействия нейтрино с ядрами  $^{71}\text{Ga}$  заметно меньше, чем ожидается. Эта "галлиевая аномалия" была впервые отмечена в экспериментах SAGE и GALLEX и недавно на большем статистическом материале подтверждена в российском эксперименте BEST, выполняемом в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. В качестве возможного объяснения предлагались осцилляции обычных нейтрино в стерильные нейтрино. Другим вариантом являются возможные ошибки при измерении времени полураспада  $T_{1/2}$  ядер  $^{71}\text{Ge}$ , в которые при взаимодействии с нейтрино превращаются в ядра  $^{71}\text{Ga}$ . С целью проверки данной гипотезы в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса выполнено новое измерение  $T_{1/2}$  ядер  $^{71}\text{Ge}$  [2]. Использовались три независимых образца, облученных в ядерных реакторах, и регистрировались рентгеновские фотоны, испускаемые при электронном захвате в распаде  $^{71}\text{Ge} \rightarrow ^{71}\text{Ga}$ . В результате было получено наиболее точное на сегодняшний день значение  $T_{1/2} = 11,468 \pm 0,008$  лет, согласующееся с прежними измерениями. Таким образом, установлено, что галлиевая аномалия не связана с ошибками в определении  $T_{1/2}$ .

**3. Сверхпроводимость  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7-\delta}$ .** Указание на нетрадиционную сверхпроводимость, не описываемую теорией Бардина–Куппера–Шриффера, недавно было получено для никелата  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  при температуре 80 К, но ключевое свойство сверхпроводимости — нулевое электрическое сопротивление — продемонстрировано не было. В новом эксперименте Y. Zhang (Чжэцзянский университет, Китай) и соавторов впервые зарегистрировано нулевое сопротивление  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7-\delta}$  и обнаружены другие интересные свойства этого соединения [3]. Эксперимент выполнялся двумя методами — в ячейке с алмазной наковальней и путём сжатия в

цилиндре с поршнем. Прямое измерение тока через образец показало, что при  $P = 20,5$  ГПа резкий скачок сопротивления начинается при  $T = 66$  К, а нулевое сопротивление достигается при 40 К. Отмечено также отсутствие перехода металл–изолятор вблизи области сверхпроводимости. Такое свойство называют странным металлическим поведением (strange-metal behavior). Остаётся надежда на получение в конечном итоге сверхпроводимости при комнатной температуре и нормальном давлении. В.Л. Гинзбург (Физический институт им. П.Н. Лебедева) рассматривал создание комнатнотемпературной сверхпроводимости как одну из наиболее актуальных физических проблем [4], и по его предложению в ФИАНе в 2004 г. был создан Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов.

**4. Сверхпроводимость  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ .** Исследователи из Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и МГУ Т.Е. Кузьмичёва, С.А. Кузьмичёв и А.С. Медведев синтезировали высококачественный образец немагнитного соединения  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$  и изучили многослоевую структуру его сверхпроводимости [5].  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$  относится к открытому недавно семейству 1144 сверхпроводящих пниктидов железа. Для исследования применялась методика создания при температуре 4,2 К планарных контактов на микротрещине, имеющих структуру  $S-n-I-n-S$  из сверхпроводника  $S$ , нормального металла  $n$  и изолятора  $I$ . При механической регулировке контактов происходило скольжение криогенных сколов с формированием стопочных структур. В сверхпроводящем состоянии в контакте  $S-n-I-n-S$  возможен эффект многократных андреевских отражений, и с помощью их спектроскопии определены амплитуды трёх объёмных сверхпроводящих параметров порядка и малой сверхпроводящей щели. В результате было показано сходство сверхпроводящих свойств пниктидов семейства 1144 и родственного семейства 122, объясняемое одинаковой топологией поверхности Ферми.

**5. Применение теории Келдыша для описания конденсации экситонов.** В некоторых слоистых соединениях могут возникнуть межслойные экситоны (связанные состояния электронов и дырок) за счёт взаимодействия электронов из одного слоя и дырок из другого слоя даже в том случае, когда эти слои разделены тонким слоем диэлектрика. Межслойные экситоны имеют большое время жизни, и ими можно управлять с помощью электрического поля. В квантовых бислоях Холла была экспериментально обнаружена равновесная бозе-эйнштейновская конденсация межслойных экситонов. Но под влиянием разности потенциалов между слоями должен возникнуть туннельный ток, выводящий экситоны из равновесного состояния. Для изучения такого неравновесного режима группа исследователей из США и Австрии Y. Zeng, V. Strepel и A.J. Millis разработали теорию конденсации экситонов на основе неравновесной теории поля Л.В. Келдыша (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН) [6]. В их новой теории [7], описывающей р-волновое туннелирование между слоями, получено, что при достаточно большом потенциале смещения уменьшается ширина запрещённой зоны и повышается эффективная температура экситонов. Разработанная теория применима как к слоистым материалам на основе дихалькогенидов переходных металлов, так к составным полупроводникам

InAs/GaSb, применяемым в электронике. О когерентном состоянии экситонов см. также [8].

**6. Детектор терагерцового излучения.** Электромагнитное излучение диапазона ТГц имеет важные практические применения, и ведётся активная работа по созданию источников и детекторов терагерцового излучения. Одной из наиболее актуальных проблем является усиление взаимодействия между устройствами и терагерцовыми сигналами. В оптическом диапазоне для этого хорошо зарекомендовали себя детекторы на основе резонаторов И.Е. Тамма (ФИАН с 1934 г.). Однако расширение их области применимости на терагерцовый диапазон затрудняется тем, что для длин волн 10–1000 мкм сложно создать необходимое покрытие поверхностей резонатора, которое в оптическом случае получается простым напылением. Тем не менее Х. Ту (Нанкинский университет и Хэфэйская национальная лаборатория, Китай) и соавторы смогли разработать и создать эффективный терагерцовый детектор в виде гибридного резонатора Тамма, образованный путём введения слоя диэлектрика в чистый резонатор Тамма [9]. В детекторе используется распределённый брэгговский рефлектор со слоями кремния и воздуха и микроболометрический детектор на кремниевой подложке. Резонансные режимы детектора можно настраивать, регулируя толщину подложки. Эксперимент показал, что детектор обладает высокой добротностью  $Q = 1017$  и узкополосной чувствительностью (ширина полосы 469 МГц). Об оптико-терагерцовых преобразователях см. [10].

**7. Наблюдение эффекта Зельдовича.** Я.Б. Зельдович в 1971 г. предсказал теоретически эффект усиления электромагнитной волны при её рассеянии на быстро вращающемся металлическом цилиндре. Во вращающейся системе отсчёта частота волны, сдвинутая эффектом Доплера, становится формально отрицательной и поглощение волны превращается в её усиление (коэффициент поглощения меняет знак). Данный эффект ранее наблюдался только для акустического аналога, когда скорость волны много меньше скорости света. М.С. Braidotti (Университет Глазго, Великобритания) и соавторы впервые наблюдали эффект усиления Зельдовича для реальной электромагнитной волны [11]. Конфигурация эксперимента близка к индукционному генератору, где вместо ротора находится сплошной алюминиевый цилиндр, а электромагнитная волна в зазоре статора формируется LC-контурами. Данный эффект рассеяния является классическим, однако, как предполагал сам Я.Б. Зельдович, тем же способом могут усиливаться и квантовые электромагнитные флуктуации, получая энергию из энергии вращения цилиндра.

**8. Исследование акустической турбулентности.** Для ансамбля акустических волн возможны режимы сильной и слабой турбулентности, в зависимости от величины нелинейных взаимодействий. Теоретическое описание акустической турбулентности в случае малой дисперсии волн встречается с определёнными сложностями, и имеются два подхода, приводящие к спектру турбулентности Захарова–Сагдеева с  $E(k) \propto k^{-3/2}$  и спектру Кадомцева–Петвиашвили с  $E(k) \propto k^{-2}$ . Е.А. Кочурин (ИЭФ УрО РАН и Сколтех) и Е.А. Кузнецов (Сколтех, ФИАН и ИТФ им. Л.Д. Ландау) выполнили численное моделирование 3D акустической турбулентности и впервые показали, что реализуются оба спектра, а переход между ними определяется уровнем нелинейности [12]. Моделирование выполнялось в фурье-пространстве на основе кинетических уравнений для парных корреляторов. Получено, что спектр Захарова–Сагдеева при слабой акустической турбулентности формируется в режиме слабой дисперсии и без дисперсии, а при увеличении мощности накачки появляется ансамбль случайных ударных волн, описываемых спектром Кадомцева–Петвиашвили. Общая теория турбулентности развивается также в работах К.П. Зыбина, В.А. Сироты и А.С. Ильина (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН) [13, 14].

**9. Можно ли создать чёрную дыру из света?** Длительное время обсуждается вопрос: может ли при фокусировке лучей света область с высокой концентрацией энергии коллапсировать в чёрную дыру (ЧД)? Вопрос пока чисто умозрительный, поскольку мощность существующих лазеров на 50 порядков величины меньше требуемой, и неизвестны астрофизические объекты с необходимой напряжённостью электромагнитных полей. А. Alvarez-Dominguez (Мадридский университет Комплутенсе, Испания) и соавторы в новом теоретическом исследовании показали невозможность образования ЧД при фокусировке света [15]. Этому будут препятствовать квантовые эффекты поляризации вакуума, связанные с рождением частиц, например, электрон-позитронных пар (эффект Швингера). Задолго до того как будет достигнута необходимая плотность энергии, начнётся интенсивное рождение частиц, уносящих энергию, что препятствует образованию ЧД. В расчёте применялись результаты теоретических исследований процесса образования пар частиц в сильном поле, выполненные сотрудниками ФИАНА А.И. Никишовым и В.И. Ритусом.

**10. Массовый состав космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ).** Происхождение КЛСВЭ пока окончательно не выяснено, хотя в качестве вероятного механизма их рождения рассматриваются процессы в активных ядрах галактик. Коллаборацией телескопа Pierre Auger выполнены новые исследования массового состава атомных ядер КЛСВЭ до энергий  $10^{20}$  эВ по новой методике [16]. Сначала были установлены корреляции в показаниях телескопов флуоресцентного света и поверхностных детекторов, затем из совместных данных с помощью алгоритмов машинного обучения был найден массовый состав КЛСВЭ. Исследование показало, что ядра КЛСВЭ становятся тяжелее при увеличении энергии в интервале  $5 \times 10^{19} - 10^{20}$  эВ, а их состав становится более однородным (меньше флуктуации состава от события к событию). Несколько отличающийся результат был получен на детекторе Telescope Array, где установлено, что при энергиях  $\sim 10^{19}$  эВ ядра достаточно тяжелые, затем до  $\sim 10^{20}$  эВ они в среднем становятся легче, а при энергиях  $> 10^{20}$  эВ снова происходит утяжеление спектра масс [17].

## Список литературы

1. Andreev Yu M et al. *Phys. Rev. Lett.* **132** 211803 (2024) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.211803>
2. Norman E B et al. *Phys. Rev. C* **109** 055501 (2024) <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.109.055501>
3. Zhang Y et al. *Nat. Phys.* (2024) онлайн-публикация от 6 июня 2024 г. <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02515-y>
4. Гинзбург В Л *УФН* **169** 419 (1999); Ginzburg V L *Phys. Usp.* **42** 353 (1999)
5. Кузьмичева Т Е, Кузьмичев С А, Медведев А С *Письма в ЖЭТФ* **119** 757 (2024) [http://jetpletters.ru/ps/2464/article\\_36199.shtml](http://jetpletters.ru/ps/2464/article_36199.shtml); Kuzmicheva T E, Kuzmichev S A, Medvedev A S *JETP Lett.* **119** 780 (2024) <https://doi.org/10.1134/S0021364024601313>
6. Келдыш Л В *ЖЭТФ* **47** 1515 (1965); Keldysh L V *Sov. Phys. JETP* **20** 1018 (1965)
7. Zeng Y, Crépeau V, Millis A J *Phys. Rev. Lett.* **132** 266001 (2024) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.266001>
8. Келдыш Л В *УФН* **187** 1273 (2017); Keldysh L V *Phys. Usp.* **60** 1180 (2017)
9. Tu X et al. *Nat. Commun.* **15** 5542 (2024) <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49759-z>
10. Пономарёв Д С и др. *УФН* **194** 2 (2024); Ponomarev D S et al. *Phys. Usp.* **67** 3 (2024)
11. Braidotti M C et al. *Nat. Commun.* **15** 5453 (2024) <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49689-w>
12. Kochurin E A, Kuznetsov E A, arXiv:2407.08352, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.08352>
13. Зыбин К П, Сирота В А *УФН* **185** 593 (2015); Zybin K P, Sirota V A *Phys. Usp.* **58** 556 (2015)
14. Зыбин К П, Ильин А С *УФН* **186** 1349 (2016); Zybin K P, Il'yn A S *Phys. Usp.* **59** 1241 (2016)
15. Alvarez-Dominguez A et al., arXiv:2405.02389, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.02389>
16. Halim A A et al. (The Pierre Auger Collab.), arXiv:2406.06315, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.06315>
17. Abbasi R U et al. (Telescope Array Collab.), arXiv:2406.19287, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.19287>