

1. Поиск безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$)

В ряде экспериментов выполнялся поиск гипотетического $0\nu\beta\beta$ -распада ядер различных элементов и были получены ограничения снизу на время полураспада $T_{1/2}$. Подобный распад мог бы иметь место при несохранении лептонного числа, например, за счёт механизма "качелей", когда масса нейтрино имеет майорановское происхождение. Такой вариант теории интересен тем, что он позволяет объяснить малость масс активных нейтрино. Лучшее на сегодняшний день ограничение получено для ядер ^{136}Xe в эксперименте KamLAND-Zen — $T_{1/2} > 3,8 \times 10^{26}$ лет. В подземном эксперименте AMoRE-I (Южная Корея), являющемся прототипом полномасштабного эксперимента AMoRE, получено новое улучшенное ограничение на $0\nu\beta\beta$ -распад ядер молибдена ^{100}Mo [1]. Установка включает 18 молибденосодержащих кристаллов с 3 кг ядер ^{100}Mo при температуре 12 мК. В случае $0\nu\beta\beta$ -распада суммарная энергия электронов, измеряемая калориметром, должна быть больше, чем при обычном распаде. Применялся метод антисовпадений для отсеивания фоновых событий, связанных с мюонами и альфа-частицами от распадов посторонних ядер. Регистрируемые в течение двух лет наблюдений распады являлись обычными бета-распадами, а $0\nu\beta\beta$ -распады зафиксированы не были. Из этих данных получено ограничение $T_{1/2} > 2,9 \times 10^{24}$ лет. Соответствующая эффективная майорановская масса $< 210\text{--}610$ мэВ, где верхнее и нижнее значение соответствуют разным моделям ядра. В эксперименте AMoRE-I принимают участие учёные из ряда российских научных организаций.

2. Сильное нарушение изоспиновой симметрии для К-мезонов

В эксперименте NA61/SHINE, выполняемом в ЦЕРНе, обнаружено неожиданно большое нарушение изоспиновой симметрии в процессах рождения адронов. Регистрировались нейтральные и заряженные каоны, образующиеся при столкновениях ядер аргона и скандия с энергией в системе центра масс $11,9$ ГэВ [2], и было установлено, что $K^\pm$ -мезоны появляются на $18,4 \pm 6,1$ % чаще, чем нейтральные К-мезоны. Массы u - и d -кварков много меньше энергетического масштаба квантовой хромодинамики Λ_{QCD} . Благодаря этому заряженные и нейтральные каоны связаны приближённой изоспиновой симметрией (замена u -кварка на d -кварк). Известные механизмы предсказывают нарушение изоспиновой симметрии на уровне лишь в несколько процентов — заметно меньше, чем получено в эксперименте. Причина данного расхождения, имеющего статистическую значимость $4,7\sigma$, пока не ясна.

3. Энтропийная теория гравитации

По одной из концепций, гравитационное поле имеет не фундаментальную природу, а связано с энтропией. Этот подход получил развитие в работах E. Verlinde и T. Padmanabhan. Он позволяет, в частности, вывести уравнения Эйнштейна из статистических исходных посылок. Новую красивую теорию

такого рода предложил G. Bianconi (Лондонский университет королевы Марии, Великобритания) [3]. В его теории метрика в каждой точке пространства–времени трактуется как матрица плотности или квантовый оператор. Функционал действия определяется квантовой относительной энтропией между метрикой многообразия и метрикой, индуцированной полем материи. Также применяется топологическое описание полей материи в соответствии с формализмом Дирака–Келера и вводится новое G-поле. В данном подходе в некотором пределе воспроизводятся уравнения Эйнштейна с нулевой или небольшой по величине космологической постоянной, зависящей от G-поля. Возможно, что в будущем теорию G. Bianconi удастся проверить в экспериментах на основе малых поправок, отличающих её от стандартной Общей теории относительности.

4. Высокотемпературная сверхпроводимость в соединении без меди

Высокотемпературная сверхпроводимость была обнаружена в 1986 г. в купратах — слоистых соединениях, содержащих медь. Исследователи из Национального университета Сингапура S.L.E. Chow, Z. Luo и A. Ariando впервые выявили высокотемпературную сверхпроводимость при атмосферном давлении в соединении, не являющемся купратом, но имеющем сходное с ним строение [4]. Сверхпроводящее состояние при температуре $\simeq 40$ К и атмосферном давлении наблюдалось в тонких плёнках $(\text{Sm-Eu-Ca-Sr})\text{NiO}_2$ с дырочным допированием. В.Л. Гинзбург (лауреат Нобелевской премии 2003 г., выпускник физического факультета МГУ 1938 г.) считал исследование высокотемпературной и комнатотемпературной сверхпроводимости одной из наиболее актуальных проблем в физике [5], а слоистые структуры — наиболее перспективными кандидатами на проявление этих свойств [6, 7].

5. Турбулентность в двумерном конденсате Бозе–Эйнштейна

Исследователи из Мэрилендского университета в Колледж-Парке и Национального института стандартов и технологий (США) M. Zhao, J. Tao и I.B. Spielman установили, что статистические свойства турбулентных пульсаций в 2D конденсате Бозе–Эйнштейна атомов рубидия соответствуют универсальному закону, открытому в 1941 г. А.Н. Колмогоровым (профессор МГУ с 1931 г.) [8]. Ранее турбулентность в бозе-эйнштейновских конденсатах уже наблюдалась, однако корреляционные функции скорости измерены не были. В новом эксперименте конденсат из 2×10^5 атомов находился изначально в состоянии $|F = 1, m_F = 1\rangle$ сверхтонкого расщепления. Для измерения скоростей в небольших областях конденсата с помощью лазерных импульсов создавались области состояния $|F = 1, m_F = 0\rangle$, и спустя 0,3 мс с помощью абсорбционных измерений отслеживались их смещения с точностью до мкм. Найденные структурные функции скорости $S_2(l) \propto l^{2/3}$ соответствуют спектру Колмогорова. Таким образом, в системе с существенно квантовыми свойствами реализуется закон турбулентности, характерный для классических (не квантовых) систем. Полученные результаты удалось успешно воспроизвести в моделировании турбулентности на основе уравнения Гросса–Питаевского.

6. Магнитный аналог соотношения Лиддана – Сакса – Теллера (ЛСТ)

В 1941 г. было обнаружено диэлектрическое соотношение ЛСТ, которое даёт связь между статической и динамической диэлектрической проницаемостью материала (резонансными частотами кристаллической решётки). V. Rindert (Лундский университет, Швеция) и соавторы предсказали теоретически и продемонстрировали в эксперименте магнитный аналог соотношения ЛСТ [9], связывающий частоты магнитного резонанса материала с его статической проницаемостью. Справедливость "магнитного соотношения ЛСТ" продемонстрирована для полупроводника — легированного железом кристалла нитрида галлия GaN — с помощью терагерцовой спектроскопии. Магнитный резонанс измерялся непрерывно в зависимости от частоты и с полной информацией о поляризации. Анализ функции проницаемости показал согласие с магнитным соотношением ЛСТ.

7. Соединение железа и гелия

При высоком давлении благородные газы перестают быть инертными, изменяя свою электроотрицательность и образуя различные соединения. Известны соединения ксенона с железом и другими веществами, но соединения гелия исследованы мало. Н. Takezawa (Токийский университет, Япония) и соавторы изучили реакции твёрдого железа с гелием в нагретой лазером до 2820 К алмазной наковальне при давлениях 5–54 ГПа [10]. Синхротронная рентгеновская дифракция показала появление гранецентрированных кубических (fcc) и искажённых гексагональных плотноупакованных (hcp) фаз, объёмы элементарных ячеек которых были значительно больше (до 48 %) по сравнению с чистым железом при том же давлении. Как показали расчёты методом функционала плотности, увеличение объёма объясняется внедрением атомов гелия в междоузлия и возможным образованием соединений FeHe_x с $x = 0,05–0,48$. При сбросе давления fcc- и hcp-фазы сохранились, но содержание гелия в первой из них понижалось. Метод вторичной ионной масс-спектрометрии в извлечённом образце Fe–He подтвердил результаты рентгеноструктурных измерений. Согласно данному исследованию, ядро Земли, состоящее в основном из железа, может быть резервуаром первичного гелия.

8. Новые наблюдения радиотелескопов ALMA

Пыль в далёком квазаре. Влияние излучения активных ядер галактик, содержащих сверхмассивные чёрные дыры (ЧД), на нагрев межзвёздной среды хозяйских галактик и на их наблюдаемые свойства представляет большой интерес. С помощью массива радиотелескопов ALMA удалось исследовать пространственное распределение пыли в хозяйской галактике квазара J2348-3054 на красном смещении $z = 6,9$, содержащем ЧД с массой $(0,6–2,0) \times 10^9 M_\odot$ [11]. В галактике наблюдается оптически толстый пылевой компонент на расстоянии менее 216 пк от центра с температурой 88 ± 2 К. Нагрев пыли, согласно расчётам, был вызван излучением активного ядра. Ранее предполагалось, что пылевая среда в этой галактике является оптически тонкой, что завышало оцениваемый темп звездообразования в $\approx 3,6$ раз. Данные наблюдения могут помочь в понимании свойств квазаров на больших z .

Слияния галактик. В иерархической картине формирования галактик их рост происходит в результате слияний с другими галактиками-соседями и за счёт аккреции. Слияния вызывают вспышки звездообразования и инициируют активность ядер галактик при падении газа на центральные ЧД. Особый интерес представляет эпоха красных смещений $z \sim 3–4$, когда эти процессы происходили наиболее эффективно. W. Wang (Центр астрономии Гейдельбергского университета, Германия и Калифорнийский технологический институт, США) и соавторы, используя данные наблюдений космического телескопа им. Дж. Уэбба и массива наземных радиотелескопов ALMA, по наблюдениям линий кислорода и углерода выявили в четырёх радиогалактиках на $z \approx 3,5$ от двух до пяти

объектов-компаньонов на расстоянии до 18 кпк от их центров, которые, вероятно являются поглощёнными малыми галактиками [12]. Измерение градиентов скоростей в двух из них показало наличие вращения, т.е. сливающиеся галактики-компаньоны могли быть дисковыми.

9. Радиопульсар с периодом 41 с

В последние годы было обнаружено несколько источников космических радиоимпульсов с периодами от нескольких минут до нескольких часов, называемых "долгопериодическими транзиентами". Они обладают некоторыми общими свойствами с обычными пульсарами, имеющими периоды от миллисекунд до секунд, но из-за малости периода их излучение не может объясняться вращением. С помощью австралийского радиотелескопа ASKAP впервые обнаружен объект с промежуточными свойствами — радиопульсар PSR J0311+1402, который производит импульсы длительностью 0,5 с периодом 41 с. [13]. Пульсар находится в нашей Галактике на расстоянии 0,8–1,1 кпк от Земли и имеет характерную для пульсаров поляризацию излучения и спектральный индекс. В то же время этот пульсар находится ниже "линии смерти" — кривой на диаграмме $P-\dot{P}$ (периода и скорости уменьшения периода), где, как ожидается, прекращается образование пар e^+e^- и генерация радиоизлучения. Открытие PSR J0311+1402 предполагает существование ранее неизвестной популяции в пределах такого промежуточного периода, пропущенной при традиционных методах поиска пульсаров. Возможность нахождения пульсаров значительно ниже линии смерти, в так называемой "долине смерти", было теоретически обосновано в работах [14, 15], где, в частности, были уточнены критерии каскадной генерации частиц. Формирование нейтронных звёзд в различных условиях рассматривалось также в работах исследователей из Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга (ГАИШ) МГУ в рамках популяционного синтеза [16]. Выявление промежуточных радиотранзиентов поможет в понимании процессов образования нейтронных звёзд и их эволюции.

Список литературы

1. Agrawal A et al. (AMoRE Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **134** 082501 (2025) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.082501>
2. Adhikary H et al. (NA61/SHINE Collab.), arXiv:2312.06572, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.06572>; CERN-EP-2023-283; The NA61/SHINE Collab., Giacosa F et al. *Nat. Commun.* **16** 2849 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57234-6>
3. Bianconi G *Phys. Rev. D* **111** 066001 (2025) <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.066001>
4. Chow S L E C, Luo Z, Ariando A *Nature* (2025) Published: 20 March 2025, early access, <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08893-4>
5. Гинзбург В Л *УФН* **169** 419 (1999); Ginzburg V L *Phys. Usp.* **42** 353 (1999)
6. Гинзбург В Л *УФН* **175** 187 (2005); Ginzburg V L *Phys. Usp.* **48** 173 (2005)
7. Гинзбург В Л, Киржниц Д А (Ред.) *Проблема высокотемпературной сверхпроводимости* (М.: Наука, 1977); Пер. на англ. яз.: Ginzburg V L, Kirzhnits D A (Eds) *High-Temperature Superconductivity* (New York: Consultants Bureau, 1982)
8. Zhao M, Tao J, Spielman I B *Phys. Rev. Lett.* **134** 083402 (2025) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.083402>
9. Rindert V et al. *Phys. Rev. Lett.* **134** 086703 (2025) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.086703>
10. Takezawa H et al. *Phys. Rev. Lett.* **134** 084101 (2025) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.084101>
11. Meyer R A et al., arXiv:2502.14539, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.14539>; *Astron. Astrophys.* **695** L18 (2025)
12. Wang W et al., arXiv:2502.20444, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.20444>
13. Wang Y et al., arXiv:2503.07936, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.07936>
14. Beskin V S, Litvinov P E *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **510** 2572 (2022)
15. Beskin V S, Istomin A Yu *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **516** 5084 (2022)
16. Попов С Б, Прохоров М Е *УФН* **177** 1179 (2007); Popov S B, Prokhorov M E *Phys. Usp.* **50** 1123 (2007)