

1. Ультрапериферийные столкновения ядер на Большом адронном коллайдере (БАК). Если при близком пролёте двух релятивистских ионов атомные ядра геометрически не перекрываются, то сильные взаимодействия между нуклонами невозможны, но ядра, тем не менее, могут возбуждаться взаимным электромагнитным полем и испытывать диссоциацию. В эксперименте ALICE на БАК исследованы ультрапериферийные столкновения ядер свинца ^{208}Pb – ^{208}Pb с энергией в системе центра масс 5,02 ТэВ и впервые в фотоядерных реакциях наблюдались превращения ядер свинца в ядра золота [1]. С помощью адронных калориметров измерены сечения реакций с вылетом из ядра ^{208}Pb до трёх протонов и до трёх нейтронов. При таких распадах образуются различные изотопы таллия, ртути, золота и свинца. Как оказалось, теоретические предсказания модели RELDIS в некоторых случаях расходятся с результатами эксперимента. Например, для процессов с вылетом одного и двух протонов модель даёт на ~ 17 –25 % меньшую величину сечения реакции. Возможно, полученные новые данные помогут улучшить теоретическое описание столкновения ядер. О фундаментальных проблемах ядерной физики см. [2].

2. Поиск частиц тёмной материи (ТМ). Хотя средняя плотность ТМ (скрытой массы Вселенной) в 5,6 раза больше, чем средняя плотность обычного барионного вещества, пока неизвестно, из чего состоит ТМ. Вероятными кандидатами являются новые элементарные частицы вне Стандартной модели, и в ряде экспериментов ведутся поиски эффектов взаимодействия частиц ТМ с веществом детекторов. Представлены первые результаты поиска лёгких (≤ 1 ГэВ) частиц ТМ в подземном эксперименте XENONnT (Гран-Сассо, Италия), где рабочей средой детектора служит жидкий ксенон [3]. Поскольку для случая лёгких частиц ТМ сигнал прямых сцинтилляционных фотонов мал, поиск был сосредоточен на наблюдении вторичного сцинтилляционного излучения электронов, которые могли вылетать при взаимодействии с частицами ТМ. Рассмотрены несколько моделей ТМ: частицы с массами от 10 до 10^6 кэВ, взаимодействующие с электронами посредством частиц-медиаторов, и бозоны (аксиоподобные частицы или тёмные фотоны). Частицы ТМ пока не зарегистрированы, но для указанных моделей получены ограничения на сечения взаимодействия и на константу связи с электронами. Установленные ограничения подтверждают, а в некоторых областях параметров улучшают ограничения, найденные в предшествующих экспериментах. О другом принципе детектирования аксиоподобной ТМ см. в [4].

3. Калибровочная теория гравитации. Построение теории квантовой гравитации было начато ещё в 1935 г. в работе М.П. Бронштейна [5]. С тех пор предложено несколько подходов к квантованию гравитационного поля и к объединению его с полями Стандартной модели (СМ) элементарных частиц, однако до сих пор данная задача полностью не решена. Исследователи из Университета Аалто (Финляндия) М. Partanen и J. Tulkki разработали расширение теории TEGR (телепараллельный эквивалент Общей теории относительности), позволяющее рассматривать гравитацию как калибровочное поле, и включающее все поля СМ [6]. В их работе используются компактные конечномерные калибровочные группы симметрии и восьмиспинорный формализм. Представлены диаграммы Фейнмана для взаимодействия гравитонов с обычными частицами, напоминающие взаимодействия частиц в СМ, и в однопетлевом приближении показана перенормируемость построенной теории. Если перенормируемость сохраняется во всех порядках теории возмущений (пока это не доказано), то с помощью новой теории можно будет описывать процессы при больших энергиях.

Ю.Н. Ерошенко. Институт ядерных исследований РАН, просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация
E-mail: erosh@ufn.ru

4. Гидраты при высоких давлениях. Известно, что при больших давлениях вода и водород образуют различные стехиометрические соединения. Молекулы-хозяева H_2O составляют подрешётку, напоминающую чистый лёд, в то время как молекулы H_2 занимают промежуточные положения или замещают H_2O . В предшествующих экспериментах с лазерным нагревом уже был зарегистрирован переход между фазами C2 (состав $(\text{H}_2\text{O})\text{H}_2$) и C3 (состав $(\text{H}_2\text{O})(\text{H}_2)_2$) в диапазоне 44–60 ГПа, однако структурная информация о C3 оставалась ограниченной. А.Ф. Goncharov (Институт Карнеги, США) и соавторы выполнили новый эксперимент в условиях избытка водорода, при этом наблюдался переход из C2 в C3 при комнатной температуре в диапазоне давлений 47–103 ГПа, причём после декомпрессии C3 оставалась метастабильной до 40 ГПа [7]. Измерения методами рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии проведены в алмазных ячейках с лазерным нагревом. Как оказалось, при давлении 69 ГПа структура фазы C3 является кубической с пространственной группой $Fd\bar{3}m$. Выполненные авторами расчёты "из первых принципов" предсказывают давления, при которых фазы C2 и C3 остаются стабильными или метастабильными.

5. Линия нейтрального водорода 21 см в эпоху реионизации. Реионизация водорода во Вселенной, произошедшая на красных смещениях $z \sim 6,4$ –15, была вызвана излучением первых звёзд и чёрных дыр, но детали этих процессов пока до конца не прояснены, особенно в связи с наблюдениями телескопом им. Дж. Уэбба неожиданно большого количества ранних галактик (см. обзор [8]). Одним из методов исследования эпохи реионизации является измерение поглощения реликтового излучения в линии 21 см нейтрального водорода. Из-за сильных фонов пока не удаётся достоверно зарегистрировать данное поглощение, но были получены некоторые ограничения на его величину. В двух программах наблюдений представлены новые ограничения такого рода. С помощью антенной решётки LOFAR впервые получено ограничение сверху на спектр мощности поглощения $(146,61 \text{ мК})^2$ при $z = 9,16$ и волновом числе $k = 0,05 \text{ Мпк}^{-1}$ с направления на источник 3C196, где в фоновом излучении имеется холодное пятно [9]. А с помощью широкоугольной решётки Мерчисона (MWA) получено наиболее сильное ограничение во всех направлениях — $(30\text{--}40 \text{ мК})^2$ при $z = 6\text{--}7$ и $k \approx 0,13 \text{ Мпк}^{-1}$ [10]. Приведённые данные свидетельствуют о наличии нагретой межгалактической среды при красных смещениях $z = 6,5\text{--}7,0$, что ограничивает предлагавшиеся модели "холодной реионизации".

Список литературы

1. Acharya S et al. (ALICE Collab.) *Phys. Rev. C* **111** 054906 (2025) <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.111.054906>
2. Матвеев В А *УФН* **194** 1250 (2024); Matveev V A *Phys. Usp.* **67** 1180 (2024)
3. Aprile E et al. (XENON Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **134** 161004 (2025) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.161004>
4. Вепрегелс С Н и др. *УФН* **193** 113 (2023); Vergeles S N et al. *Phys. Usp.* **66** 109 (2023)
5. Горелик Г Е *УФН* **175** 1093 (2005); Gorelik G E *Phys. Usp.* **48** 1039 (2005)
6. Partanen M, Tulkki J *Rep. Prog. Phys.* **88** 057802 (2025) <https://doi.org/10.1088/1361-6633/adc82e>
7. Goncharov A F et al., arXiv:2505.07091, <https://arxiv.org/abs/2505.07091>
8. Сильченко О К *УФН* **195** 188 (2025); Sil'chenko O K *Phys. Usp.* **68** 177 (2025)
9. Ceccotti E et al., arXiv:2504.18534, <https://arxiv.org/abs/2504.18534>; *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, submitted
10. Nunhokee C D et al., arXiv:2505.09097, <https://arxiv.org/abs/2505.09097>