

**1. Кластерное состояние  $0_2^+$  в ядре  $^8\text{He}$ .** Ядра с избытком или дефицитом нейтронов начали привлекать большой интерес учёных ещё десятки лет назад (см., например, [1, 2]). Нейтроно-избыточное ядро  $^8\text{He}$  можно представить как альфа-частицу (ядро  $^4\text{He}$ ), окружённую четырьмя дополнительными нейтронами. Теоретически предсказывалось, что дополнительные нейтроны могут формировать две пары (динейтроны) и создавать конденсат. В этом  $0_2^+$ -состоянии ядро  $^8\text{He}$  имеет нулевой спин, положительную чётность и похоже на ядро  $^{12}\text{C}$  в кластерном  $3\alpha$ -состоянии Хойла. З.Н. Yang (Пекинский университет, КНР и Центр RIKEN Nishina, Япония) и соавторы [3] впервые выявили состояния  $0_2^+$  ядер  $^8\text{He}$ , подтвердив теоретическое предсказание. Эксперимент выполнен в ускорительном центре RIKEN Nishina, где интенсивный пучок  $^8\text{He}$  с энергиями 82,3 МэВ на нуклон сталкивался с мишенями из полиэтилена  $(\text{CH}_2)_n$  и углерода. Регистрация продуктов неупругого взаимодействия выполнялась с помощью дрейфовой камеры и нейтронных детекторов. Наблюдался вылет сильно коррелированных пар нейтронов, что вместе с высокой интенсивностью изоскалярного монополюсного перехода свидетельствовало о  $0_2^+$ -состоянии ядер со статистической достоверностью более 5 $\sigma$ .

**2. Мультиэкситоны при комнатной температуре.** У некоторых молекулярных кубитов наблюдается процесс расщепления синглетного состояния на два триплета в процессе фотовозбуждения, когда связь триплетов посредством обменного взаимодействия приводит к формированию мультиэкситона — квинтета с четырьмя запутанными спинами, обозначаемого как  $^5\text{TT}$ . Квантовые переходы между  $^5\text{TT}$  и триплетными состояниями интересны для применения в квантовой информации, однако до последнего времени  $^5\text{TT}$  удавалось реализовать лишь при криогенных температурах ниже 75 К. А. Yamauchi (Университет Кюсю, Япония) и соавторы впервые сумели получить  $^5\text{TT}$  при комнатной температуре со временем квантовой когерентности более 100 нс [4]. Этого удалось достичь путём заключения молекулярных кубитов на основе хромфора (соединение пентацена) в пористый металлоорганический каркас, состоящий из ионов металла и органических лигандов. Каркас подавлял движения молекул, увеличивая время когерентности. Манипуляции состояниями  $^5\text{TT}$  выполнялись с помощью микроволновых импульсов, а их считывание — спектроскопией ядерного магнитного резонанса. Переход к комнатным температурам значительно повышает перспективу использования  $^5\text{TT}$  в устройствах квантовой информации. Об экситонах см. [5, 6].

**3. Электролюминесценция в жидком аргоне.** Электролюминесценцией называется излучение света веществом в ответ на воздействие электрических полей. В благородных газах может иметь место эксимерный механизм электролюминесценции в сильных полях (переходы между состояниями электронного возбуждения в атомах) и тормозное излучение дрейфующих электронов, рассеянных на нейтральных атомах. В последнем случае излучение в видимом и ближнем ИК-диапазонах возможно при слабом поле ниже порога возбуждения. Электролюминесценция хорошо изучена в газовой фазе, тогда как в сжиженном благородном газе (ксеноне) она надёжно наблюда-

лась лишь в одном эксперименте при напряжённости электрического поля более 400 кВ см $^{-1}$ . Исследователи из Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и Новосибирского государственного университета впервые зарегистрировали электролюминесценцию в жидком аргоне в однофазной жидкостной время-проекционной камере и показали, что она имеет тормозной механизм [7]. Ионизация в камере создавалась с помощью рентгеновского излучения, и дрейфующие электроны вызывали электролюминесценцию при попадании в область сильного электрического поля. Фотоны регистрировались после их выхода из жидкого аргона с помощью кремниевого фотоумножителя. О механизме тормозного излучения на нейтральных атомах свидетельствовало относительно низкое электрическое поле 30–90 кВ см $^{-1}$ , при котором возникало излучение. Кроме того, отсутствие зависимости от давления исключало электролюминесценцию в пузырьках газа как основной механизм. Описываемый эксперимент, поддержанный грантом Российского научного фонда № 20-12-00008, показал хорошее согласие с теорией при использовании в расчётах сечения для переноса импульса (в отличие от сечения для переноса энергии). Электролюминесценция в жидком инертном газе важна, в частности, для проектирования высокочувствительных детекторов тёмной материи и нейтрино низких энергий.

**4. Негауссова статистика в лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии.** Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия (ЛИЭС) основана на испарении частиц с поверхности образца под действием мощных лазерных импульсов и измерении спектра образующейся плазмы оптического пробоя. По сравнению с лабораторной спектроскопией этот метод имеет меньшую точность, но он широко применяется благодаря возможности дистанционного сверхбыстрого анализа. В ЛИЭС происходит непрерывный сбор данных и их усреднение. Чаще всего распределение результатов измерений имеет гауссов нормальный вид, но в некоторых случаях распределение негауссово, что может сказаться на результатах обработки данных. Хотя негауссовость в ЛИЭС обсуждалась теоретически и была отмечена в предшествующих экспериментах, её влияние на результаты ЛИЭС ранее не исследовалось. В.Н. Леднёв (ИОФ РАН) и соавторы впервые систематически изучили влияние статистики сигналов на качество ЛИЭС [8]. В их эксперименте излучение импульсов Nd:YAG лазера с длиной волны 1064 нм фокусировалось с помощью кварцевой линзы на поверхность образца. Свечение факела плазмы собиралось сбоку и переносилось в спектрограф, оснащённый ПЗС-камерой с усилением. Измерения показали, что только излучение плазмы имело гауссово распределение, в то время как другие сигналы (распределение импульсов лазера по энергии, интенсивность атомных линий, фоновое излучение плазмы) ему не следовали. Указанное обстоятельство влияет на оценку чувствительности метода ЛИЭС и может оказаться важным в его практическом применении, особенно в критических технологиях (прокат на блюминге, в плавильной печи), когда повторные измерения исключены или затруднены.

**5. Подводный лидар.** Лидарами называются лазерные локаторы, способные (подобно радиолокаторам) зондировать рассеивающие объекты, как массивные, так и рыхлые (облака, шлейфы, сетки) и определять расстояние до них. Важными применениями лидаров являются измерение концентрации аэрозоля в воздухе и дистанционное зондирование в сельском хозяйстве [9]. Однако лидар может действовать и в жидкости, хотя из-за сильного рассеивания его работа в таких условиях

имеет существенные ограничения. В то же время лидар может обнаруживать в жидкости объекты, недоступные для обычных гидролокаторов, и обеспечивать высокоточную подводную навигацию. Группой сотрудников Института общей физики им. А.М. Прохорова, Института космических исследований РАН и Московского технического университета связи и информатики впервые продемонстрирована работа лидара на двойном проходе сквозь слой воды толщиной 9 м [10]. В лидаре использовался импульсный лазер Nd<sup>3+</sup>:YAG с диодной накачкой, излучающий на волне 532 нм, с частотой следования импульсов 4 кГц и, впервые, с безопасной для глаз плотностью энергии излучения  $\sim 1$  мкДж см<sup>-2</sup>. Ранее лидары превышали этот порог и их применение было запрещено. Авторы открыли новую эру [11] зондирования среды обитания без защиты глаз от поражения с использованием стробируемого приёмника. Здесь сигнал обратного рассеяния лидара регистрировался детектором на однофотонном лавинном фотодиоде (SPAD) с коэффициентом усиления  $\sim 10^6$ . Благодаря столь большому усилению детектора и подавлению шумов с помощью стробирования удалось достичь отношения сигнал/шум  $\sim 35$  в описанном эксперименте. В новом исследовании той же группы, поддержанном грантом Российского научного фонда № 23-42-10019, впервые достигнуто подводное обнаружение объектов сквозь слой воды толщиной 18 м, причём пройденный фотонами путь составил 36 м в воде и 14 м в воздушной среде [12].

**6. Влияние электрического поля на ветвящиеся потоки света.** В неупорядоченной среде возможно ветвящееся распространение волн за счёт комбинации дифракции и образования каустик. Такое распространение было обнаружено в различных волновых системах, например, для электронных волн в полупроводниках. В оптическом диапазоне оно было открыто А.В. Старцевым и Ю.Ю. Стойловым в 2002 г. [13]. S. Chang (Сямьньский университет, КНР) и соавторы продемонстрировали ветвящийся поток света в жидком кристалле и метод управления им с помощью электрического поля [14]. Тонкая пластина жидкого кристалла была помещена между двумя стеклянными пластинами, допированными оксидом индия и олова. В жидком кристалле имеется множество неоднородностей и дефектов различного масштаба, обуславливающих ветвящееся распространение света вдоль его плоскости. Если приложить к внешним пластинам электрическое напряжение, то электрическое поле между ними вызывает реструктуризацию жидкого кристалла, что приводит к сдвигам ветвящихся траекторий и даже к отклонению ветвления. Причём данный процесс оказался обратимым — ветвление возвращалось к прежнему виду при выключении электрического поля. Возможно, данный метод найдёт применение в фундаментальных исследованиях, а также в технической оптике и фотонике.

**7. Кластеры Kг и Хе между слоями графена.** При нормальных условиях в свободных благородных газах не возникает стабильных структур из-за их химической инертности. Двумерные атомные кристаллы благородных газов с ван-дер-ваальсовым взаимодействием ранее были реализованы при криогенных температурах на поверхности металлов, а при более высоких температурах — между слоями графена и подложкой. Однако в таких условиях трудно наблюдать пространственное распределение атомов. M. Langle (Венский университет, Австрия) и соавторы смогли поместить атомы криптона и ксенона между двумя слоями графена, что позволило выполнить подобное наблюдение [15]. Атомы проникали в бислой при облучении его ионами Kг и Хе с низкой энергией. Как показало исследование с помощью просвечивающей электронной микроскопии, при комнатной температуре и давлении 0,3 ГПа атомы внутри бислоя образуют кластеры. Кластеры с числом атомов  $N < 9$  хорошо описываются ван-дер-ваальсовым взаимодействием, а более крупные кластеры демонстрируют некоторые отклонения, возможно, вызванные деформациями в графеновой решётке. Все наблюдавшиеся кластеры Хе с  $N \approx 100$  оставались твёрдыми, тогда как кластеры Kг с  $N \approx 16$  по своим свойствам были близки к жидкости.

**8. Звёздные скопления в ранней Вселенной.** С помощью космического телескопа им. Дж. Уэбба выполнены наблюдения галактики SPT0615-JD1, находящейся на красном смещении  $z \sim 10,2 \pm 0,2$ , когда Вселенная имела возраст  $\sim 460$  млн лет [16].

Интересные детали в её структуре удалось рассмотреть благодаря тому, что свет галактики испытал гравитационное линзирование на скоплении галактик, находящемся на  $z = 0,972$  на луче зрения. Телескоп выявил в галактике 5 отдельных звёздных скоплений с размерами  $\approx 1$  пк, расположенных в области с масштабом менее 70 пк. Эти скопления излучают  $\approx 60\%$  дальнего УФ-излучения хозяйской галактики и имеют  $\approx 5\%$  солнечной металличности. Массы скоплений  $\approx 10^6 M_\odot$ , а их возраст менее 35 млн лет. Поверхностная плотность звёзд в скоплениях на три порядка выше, чем у типичных звёздных скоплений в локальной Вселенной. Возможно, обнаруженные скопления могли быть предшественниками современных шаровых скоплений. Ранее уже было отмечено неожиданно много крупных галактик в ранней Вселенной, однако их звёздные компоненты оставались неразрешёнными из-за их удалённости. Наблюдение звёздных скоплений является существенным шагом в данном направлении. Подобные скопления могли влиять на процесс реионизации Вселенной.

**9. Предельно далёкие галактики.** На телескопе им. Дж. Уэбба реализуется программа "JADES Origin Field" по выделению излома Ly- $\alpha$  при красных смещениях  $z \sim 12$  и фильтрации источников на меньших  $z$ , которые могут имитировать свет далёких галактик. В рамках этой программы выполнено наблюдение восьми галактик-кандидатов (пока без фотометрического подтверждения) на  $z = 11,5 - 15$  и оценена их функция светимости [17]. Данные значения  $z$  простираются в те эпохи, когда Вселенная имела возраст всего около 300 млн лет. Обнаруженные галактики имеют радиусы 50–200 пк, звёздные массы  $\sim 10^7 - 10^8 M_\odot$  и скорость звездообразования  $10^5 - 10^6 M_\odot \text{ год}^{-1}$ . В то же время не удалось найти галактики на  $15 < z < 20$ , что устанавливает верхние пределы для раннего образования галактик. Плотность числа галактик во Вселенной уменьшается примерно в 2,5 раза от  $z = 12$  до  $z = 14$ . Пока неизвестно, в чём причина неожиданно большого количества галактик на больших  $z$ . Объяснением может являться нестандартный спектр космологических возмущений плотности с некоторым избытком на малых масштабах [18].

## Список литературы

1. Базь А И, Гольдманский В И, Зельдович Я Б *УФН* **72** 211 (1960); Baz' A I, Gol'danskii V I, Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. Usp.* **3** 729 (1961)
2. Власов Н А *УФН* **89** 511 (1966); Vlasov N A *Sov. Phys. Usp.* **9** 624 (1967)
3. Yang Z H et al. *Phys. Rev. Lett.* **131** 242501 (2023) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.242501>
4. Yamauchi A et al. *Sci. Adv.* **10** eadi3147 (2024) <https://doi.org/10.1126/sciadv.adi3147>
5. Глазов М М, Сурис Р А *УФН* **190** 1121 (2020); Glazov M M, Suris R A *Phys. Usp.* **63** 1051 (2020)
6. Семина М А, Сурис Р А *УФН* **192** 121 (2022); Semina M A, Suris R A *Phys. Usp.* **65** 111 (2022)
7. Bondar A et al. *Phys. Rev. Lett.* **131** 241001 (2023) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.241001>
8. Lednev V N et al. *Photonics* **11** 23 (2024) <https://doi.org/10.3390/photonics11010023>
9. Гудков С В и др. *УФН* **194** (2) 208 (2024); Gudkov S V et al. *Phys. Usp.* **67** (2) (2024) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.09.039577>
10. Pershin S M et al., in *2022 Intern. Conf. Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022*, p. 01, <https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839859>
11. Pershin S et al., in *Conf. on Lasers and Electro-Optics (OSA Technical Digest, Vol. 10, Eds J Bufton et al.) (Washington, DC: Optica Publ. Group, 1991) paper CF11*, <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=CLEO-1991-CF11>
12. Pershin S M et al., доклад на 21-й Международной конф. "Оптика лазеров", С.-Петербург, 1–5 июля 2024 г.
13. Стойлов Ю Ю *УФН* **174** 1359 (2004); Stoilov Yu Yu *Phys. Usp.* **47** 1261 (2004)
14. Chang S et al. *Nat. Commun.* **15** 197 (2024) <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44500-8>
15. Langle M et al. *Nat. Mater.*, Published: 11 January 2024, <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01780-1>
16. Adamo A et al., arXiv:2401.03224, <https://arxiv.org/abs/2401.03224>
17. Robertson B et al., arXiv:2312.10033, <https://arxiv.org/abs/2312.10033>
18. Tkachev M V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **527** 1381 (2024)