

1. Космологические сценарии в теории Хорндески. В современной космологии господствует инфляционная парадигма, согласно которой стадии первичного разогрева предшествовало экспоненциальное расширение Вселенной. Тем не менее данный класс моделей пока нельзя считать окончательным, и Вселенная могла развиваться другими путями. Одним из допустимых и широко обсуждаемых вариантов остаётся модель циклической Вселенной, когда чередуются периоды сжатия и расширения. Циклическая эволюция реализуется в различных вариантах скалярно-тензорной теории гравитации Хорндески, включающей в себя эйнштейновскую Общую теорию относительности как частный случай. Однако в циклической Вселенной в рамках теории Хорндески имеются сложные проблемы, такие как духовые и другие неустойчивости, которые, вообще говоря, могут возникать на каком-то этапе эволюции Вселенной. Один из способов обойти упомянутые проблемы — рассмотреть вариант, когда эффективная планковская масса стремится к нулю в асимптотическом прошлом. Но при этом возникает проблема сильной связи (неприменимости классического описания) на ранних временах [1]. В 2021 г. Ю.А. Агеева, П.К. Петров и В.А. Рубаков предложили элегантное решение указанных проблем [2]. Рассмотренная ими модель с "сильной гравитацией в прошлом" ранее в космологических сценариях в теории Хорндески не применялась. Ю.А. Агеева, П.К. Петров и В.А. Рубаков впервые в рамках такого подхода построили несколько космологических моделей, как включающих инфляционную стадию, так и не содержащих её. Полученные модели стабильны, и в них возмущения над фоном не являются сверхсветовыми. В своей новой работе [3] Ю.А. Агеева, П.К. Петров и В.А. Рубаков значительно развили и обосновали данный класс моделей, показав, что в них могут генерироваться космологические первичные возмущения с тем спектром, который необходим для образования галактик и который наблюдается в возмущениях реликтового излучения. Интересно, что генерация возмущений в модели [3] происходит ещё на стадии предыдущего сжатия перед современным расширением. Тем самым было показано, что эволюция Вселенной могла идти нетривиальными путями, и с точки зрения соответствия наблюдаемым данным допустимым является новый широкий класс космологических моделей.

2. Состояние Фулде–Феррелла–Ларкина–Овчинникова в сверхпроводнике. В обычном БКШ-механизме куперовские пары электронов имеют нулевой полный импульс. Однако в 1964 г. в двух независимых работах (П. Фулде и Р.А. Феррелла; А.И. Ларкина и Ю.Н. Овчинникова) [4, 5] была предсказана возможность сверхпроводящего с ненулевым импульсом. Такие нестандартные сверхпроводники должны быть устойчивы к магнитному полю с величиной выше парамагнитного предела Паули. Возникающее состояние Фулде–Феррелла–Ларкина–Овчинникова характеризуется периодическим изменением в пространстве параметра порядка и анизотропией относительно направления импульса пары электронов. Хотя признаки состояния Фулде–Феррелла–Ларкина–Овчинникова уже отмечались в экспериментах, указанную анизотропию ранее наблюдать не удавалось. S. Imao (Институт физики твёрдого тела Токийского университета, Япония) и соавторы впервые с помощью разработанного ими нового ультразвукового метода

зарегистрировали анизотропию, соответствующую состоянию Фулде–Феррелла–Ларкина–Овчинникова в слоистом органическом сверхпроводнике d-волнового типа [6]. Анизотропия была видна в анизотропном акустическом отклике на ультразвуковые импульсы, и её впервые удалось надёжно подтвердить. О роли состояний Фулде–Феррелла–Ларкина–Овчинникова в сверхпроводящей спинтронике см. [7].

3. Исследование микрообразцов гелия-4. Свойства многих веществ в больших объёмах существенно отличаются от свойств тех же веществ в виде малых частиц или в микропостях. Эффект зависимости от масштаба, важный для технических применений, становится особенно заметен при фазовых переходах, в процессе которых увеличивается длина когерентности. В том числе это имеет место для ^4He вблизи точки сверхтекучего перехода. Исследователи из Альбертского университета в Канаде E. Varga, C. Undershute и J.P. Davis выполнили эксперимент, где наблюдалось уменьшение плотности сверхтекучей компоненты ^4He в каналах с толщиной 25 и 50 нм [8]. При различных температурах путём изменения давления осуществлялась перестройка объёмного спектра возбуждения с изменением длины когерентности и измерялась плотность сверхтекучей компоненты. При охлаждении от температуры сверхтекучего перехода до 0,6 К плотность уменьшалась. Авторы работы полагают, что это связано с появлением ротонподобных возбуждений (квазичастиц) с энергетической щелью величиной 5 К, локализующихся вблизи стенок каналов.

4. Нелинейное взаимодействие фотонов в волноводе. H. Le Jeannic (Университет Копенгагена, Дания) и соавторы выполнили эксперимент [9], в котором имело место нелинейное квантовое взаимодействие между двумя фотонами в нанопотонном волноводе (фотонном кристалле), осуществляемое посредством квантового излучателя — полупроводниковой квантовой точки. В этом устройстве возникал высокоэффективный квантово-когерентный интерфейс свет–вещество и появлялись определённые квантовые корреляции между фотонами. Были реализованы две различные экспериментальные возможности. В первом случае один фотон в волноводе мог управлять прохождением второго фотона. Во втором случае имело место двухфотонное взаимодействие со сложными корреляциями по времени. Квантовая нелинейная оптика имеет большие перспективы в области квантовой информации, например, для создания квантовых кубитов и квантовых повторителей, а также в фундаментальных исследованиях.

5. Механизм вторичной лазерной генерации в азоте. Мощные лазерные импульсы при распространении в воздухе могут испытывать нелинейные процессы самофокусировки, ведущие к ионизации и образованию плазменных нитей. В этих нитях наблюдается генерация вторичного лазерного излучения благодаря переходам между уровнями с инверсной населённостью (большим числом атомов на верхних уровнях, чем на нижних). Однако оставалось неизвестным, какие уровни получают инверсную заселённость. С. Kleine (Институт нелинейной оптики и короткоимпульсной спектроскопии имени М. Борна, Германия) и соавторы выполнили новый эксперимент [10], который прояснил состав уровней с инверсной заселённостью в азоте. Азот облучался лазерными импульсами с длиной волны 800 нм с пиковой интенсивностью $4,5 \times 10^{14}$ Вт см $^{-2}$, и для наблюдений результата ионизации применялась фемтосекундная мягкая рентгеновская спектроскопия. Полученные резуль-

таты говорят в пользу наличия инверсной заселённости между уровнями $B^2\Sigma_u^+$ и $A^2\Pi_u$. Ожидалось, что в туннельном режиме скорость ионизации экспоненциально уменьшается с увеличением энергии связи электронов, поэтому сам механизм появления инверсной заселённости пока остаётся неясным.

6. Неустойчивости в токамаках. Управляемый термоядерный синтез призван открыть новую эру в энергетике. Одним из направлений исследований является разработка токамаков — устройств, где горячая плазма удерживается магнитным полем в тороидальной конфигурации, и в скором будущем планируется запуск Интернационального термоядерного экспериментального реактора ИТЭР [11, 12]. Однако проблемой токамаков остаются неустойчивости [13], из-за чего происходит выброс плазмы на стенки камеры, что ведёт к их разрушению. Среди наиболее опасных неустойчивостей так называемые локализованные краевые моды, переносящие частицы плазмы и тепло на дивертор (участок камеры, предназначенный для удаления примесей в плазме) вдоль силовых линий магнитного поля. G.F. Nagler (Венский технологический университет, Австрия) и его коллеги исследовали механизм появления данных неустойчивостей и возможные методы их подавления [14]. Экспериментальная часть работы выполнена на токамаке ASDEX, расположенном в Институте физики плазмы имени М. Планка в Гархинге, Германия. Регистрировалось оптическое излучение, возникающее при взаимодействии плазмы с газом в диверторе, и данные наблюдений сравнивались с результатами математического моделирования. Оказалось, что неустойчивость ослабляется при увеличении плотности плазмы. Возможной причиной является уменьшение локального тока и снижение градиента давления на границе плазмы, являющегося доминирующим фактором неустойчивости. Обнаружено, что изменение топологии магнитного поля (изменение шага намотки силовых линий) также повышает порог неустойчивости.

7. Мюонная радиография атмосферных циклонов. Мюоны, генерируемые в атмосфере Земли потоками космических лучей, обладают высокой проникающей способностью и используются в целях радиографии — просвечивания различных объектов для исследования их внутренней структуры, что зачастую недоступно для других методов [15]. Мюонная радиография применялась на практике для исследования рудных шахт, пирамиды в Египте и вулканов. С её помощью можно изучать также структуру больших воздушных масс в атмосфере. Ранее уже выполнялись измерения временных вариаций атмосферного давления с помощью мюонов, летящих вертикально. Н.К.М. Tanaka (Токийский университет, Япония) и его коллеги впервые применили мюонную радиографию в исследовании атмосферных циклонов [16]. Для измерения их вертикального профиля использовались мюоны, летящие под малыми углами к поверхности Земли. За 2016–2021 гг. методом мюонной радиографии изучена 3D структура семи тайфунов (зрелых тропических циклонов) вблизи японского города Кагосима. Применялись трёхслойные сцинтилляционные детекторы мюонов, экранированные слоем свинца и стали. Полученные с помощью наземной сети таких детекторов последовательные изображения показали наличие в центрах циклонов тёплых ядер пониженной плотности, окружённых более холодными плотными слоями воздуха. Траектории движения этих ядер соответствовали траекториям циклонов и колебаниям атмосферного давления, регистрируемым на обычных метеорологических станциях. Атмосферная мюонная радиография может найти применения для предсказания зарождения циклонов и раннего предупреждения об опасных погодных явлениях.

8. Необычный гамма-всплеск. 9 октября 2022 г. космические телескопы Fermi и Swift зарегистрировали гамма-всплеск GRB 221009A с энергией фотонов до 99 ГэВ — максимальной энергией за всё время наблюдений данными телескопами. В первые секунды всплеск напоминал типичные длинные гамма-всплески, возникающие при взрывах некоторых сверхновых, но он продолжался более 400 секунд и имел необычную кривую блеска со множеством провалов. Через 33 минуты после начала гамма-вспышки из той же области неба детектором LHAASO, расположенным в Китае, были зарегистрированы гамма-фотоны с энергиями до 18 ТэВ. И затем ещё через час

детектором "Ковёр-2" Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН был зарегистрирован фотон с энергией 251 ТэВ — максимальной энергией за всю историю наблюдений гамма-всплесков [17]. Фотонная природа этого сигнала подтверждается тем, что он не сопровождался срабатыванием мюонного детектора. Данные наблюдения пока не нашли теоретического объяснения. Согласно оптическим наблюдениям послесвечения всплеска, он произошёл на космологическом расстоянии (красное смещение $z = 0,151$), поэтому излучение в ТэВ-ной области не могло достичь Земли из-за поглощения на космических фоновых излучениях. Выдвигалась гипотеза, что фотоны превращались в аксионоподобные частицы, которые проходили большую часть пути, а затем снова превращались в фотоны. Это позволило бы фотонам избежать поглощения. Также не исключено, что интерпретация данного события как гамма-всплеска неверна, а имел место какой-то катастрофический процесс в нашей Галактике на близком расстоянии. В пользу последней гипотезы говорит то, что сигнал пришёл из области, где много звёзд. Ещё одно возможное объяснение, предложенное в недавних работах, предполагает, что всплеск GRB 221009A космологический, но в его источнике генерировались космические лучи сверхвысоких энергий, а наблюдаемые гамма-фотоны высоких энергий могли быть результатом взаимодействия этих космических лучей с фоновыми излучениями относительно недалеко от нашей Галактики.

9. Наблюдение "горячих пятен" в радиодиапазоне. Вблизи сверхмассивной чёрной дыры в центре нашей Галактики наблюдаются вспышки излучения, вероятной причиной которых является пересоединение магнитных силовых линий в замагниченной плазме. В точке пересоединения выделяется энергия и возникают горячие пятна (нагретые участки газа), движущиеся вокруг чёрной дыры. M. Wielgus (Радиоастрономический институт Макса Планка, Германия, Астрономический центр имени Н. Коперника, Польша и Гарвардский университет, США) и соавторы исследовали движение горячего пятна, возникшего после сильной рентгеновской вспышки, в миллиметровом радиодиапазоне с помощью массива радиотелескопов ALMA [18]. Наблюдался поворот плоскости поляризации излучения пятна с характерным масштабом времени 70 минут. Это соответствует тому, что горячее пятно обращается по орбите с радиусом в пять шварцшильдовских радиусов. Также есть указания на вращение чёрной дыры, сонаправленное с орбитальным движением горячего пятна. Выявленная картина движения горячего пятна согласуется с результатами, полученными ранее в эксперименте GRAVITY для ИК-диапазона.

Список литературы

1. Ageeva Ю А, Петров П К *УФН* **193** (2023) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2022.11.039259>; Ageeva Yu A, Petrov P K *Phys. Usp.* **66** (2023) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2022.11.039259>
2. Ageeva Y, Petrov P, Rubakov V *Phys. Rev. D* **104** 063530 (2021)
3. Ageeva Y, Petrov P, Rubakov V, arXiv:2207.04071
4. Fulde P, Ferrell R A *Phys. Rev.* **135** A550 (1964)
5. Ларкин А И, Овчинников Ю Н *ЖЭТФ* **47** 1136 (1964); Larkin A I, Ovchinnikov Yu N *Sov. Phys. JETP* **20** 762 (1964)
6. Imajo S et al. *Nat. Commun.* **13** 5590 (2022)
7. Мельников А С, Миронов С В, Самохвалов А В, Буздин А И "Сверхпроводящая спинтроника: современное состояние и перспективы" *УФН* (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039020>, принята к публикации; Mel'nikov A S, Mironov S V, Samokhvalov A V, Buzdin A I "Superconducting spintronics: state of the art and perspectives" *Phys. Usp.* **65** (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039020>, accepted
8. Varga E, Undershute C, Davis J P *Phys. Rev. Lett.* **129** 145301 (2022)
9. Le Jeannic H et al. *Nat. Phys.* **18** 1191 (2022)
10. Kleine C et al. *Phys. Rev. Lett.* **129** 123002 (2022)
11. Кадомцев Б Б *УФН* **166** 449 (1996); Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **39** 419 (1996)
12. Мирнов С В *УФН* **179** 767 (2009); Mirnov S V *Phys. Usp.* **52** 725 (2009)
13. Веденов А А, Велихов Е П, Сагдеев Р З *УФН* **73** 701 (1961); Vedenov A A, Velikhov E P, Sagdeev R Z *Sov. Phys. Usp.* **4** 332 (1961)
14. Harrer G F et al. *Phys. Rev. Lett.* **129** 165001 (2022)
15. Александров А Б и др. *УФН* **187** 1375 (2017); Aleksandrov A B et al. *Phys. Usp.* **60** 1277 (2017)
16. Tanaka H K M et al. *Sci. Rep.* **12** 16710 (2022)
17. Dzhabpuev D D et al. *Astron. Telegram* (15669) (2022) <https://www.astronomerstelegram.org/?read=15669>
18. Wielgus M et al. *Astron. Astrophys.* **665** L6 (2022)