

УТВЕРЖДАЮ:  
Заместитель директора Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки  
Физико-технического института  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии  
наук,  
\_\_\_\_\_/ д.ф.-м.н. П.Н. Брунков/  
« 6 » июня 2022 г.

### Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Корочкина Александра Алексеевича **«Новая модель межгалактического фонового излучения и ее приложения к аксионоподобным частицам и внегалактическим магнитным полям»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертационная работа А.А.Корочкина посвящена нескольким тесно связанным фундаментальным вопросам современной астрофизики: 1) Изучению межгалактического фонового излучения (МФИ), в частности, возможного вклада от распада гипотетических аксионоподобных частиц в МФИ; 2) Проблеме "аномальной прозрачности" Вселенной для гамма-квантов сверхвысоких энергий; 3) Исследованиям внегалактических магнитных полей, которые, как предполагается, могут иметь реликтовую природу и, по некоторым гипотезам, вести свое происхождение с эпохи инфляции. Отдельным, но весьма важным вопросом, рассмотренным в диссертации является сравнение и корректировка публичных вычислительных Монте-Карло кодов для моделирования распространения и взаимодействия заряженных частиц и гамма-квантов в магнитных полях при наличии мягкого фонового излучения (реликтового излучения и МФИ). Все затронутые в диссертации вопросы, безусловно, являются **актуальными** и находятся на переднем крае современных астрофизических исследований.

Адаптивная модель МФИ дает возможность наложить ограничения на различные астрофизические параметры: параметры начальной функции масс (индекс спектра масс при  $m > M_{\text{Sun}}$ , "средний логарифм" масс и дисперсия логарифмов масс при  $m \leq M_{\text{Sun}}$ , а также максимальная масса звезд), параметры молекулярных облаков (размер и время жизни), параметры распределения пылевых частиц (минимальный и максимальный размеры пылевых частиц, наклон распределения) и параметры скорости звездообразования (эпоха начала звездообразования и нормировка скорости звездообразования). Все перечисленные параметры являются важными для понимания хода как общей эволюции Вселенной так и локальных астрофизических структур

(скоплений галактик, галактик, областей звездообразования и т.п.).

Обнаружение аксионов и/или аксионоподобных частиц стало бы настоящим прорывом в физике элементарных частиц и могло бы способствовать решению таких проблем фундаментальной физики как CP-проблема и установление природы темной материи. Поэтому исследования аксионов и аксионоподобных частиц, приближающие нас к окончательному выводу о возможности существования таких частиц сами по себе являются очень важными. Возможное существование аксионоподобных частиц также важно для правильного описания распространения гамма-излучения во Вселенной, как ввиду того, что мягкие фотоны, рождающиеся при распаде аксионоподобных частиц, приводят к росту непрозрачности Вселенной по фотонно-фотонному взаимодействию, так и ввиду того, что в магнитных полях (как в относительно слабых ( $\sim 1$  мкГс) полях протяженных астрофизических сред, так и в сильных ( $> 10^{10}$  Гс) полях компактных источников) могут происходить аксионно-фотонные осцилляции, что может снять или ослабить проблему "аномальной прозрачности" для гамма-квантов высоких энергий. В свою очередь, гамма-излучение позволяет исследовать наиболее высокоэнергичные явления, происходящие в Галактике и за ее пределами, связанные с коллапсом звезд на поздних стадиях эволюции, слиянием звезд, распространением ударных волн, мощными высокоскоростными истечениями, формирующиеся в окрестности сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик. Изучение процессов, происходящих в этих физических системах, важно для создания целостных моделей этих объектов и явлений и проверки адекватности теоретических моделей физики элементарных частиц в диапазоне высоких и сверхвысоких энергий. Актуальность таких исследований подтверждается тем, насколько значительные усилия научного сообщества направлены на организацию масштабных, дорогостоящих и ресурсоемких экспериментов по наблюдению космического гамма-излучения, среди которых есть как космические (Fermi LAT), так и наземные (H.E.S.S., VERITAS, MAGIC, ARGO-YBJ, TAIGA и др.). Постоянный поток новых экспериментальных данных требует усилий по разработке и совершенствованию моделей не только астрофизических объектов - источников космического гамма-излучения, но и по совершенствованию моделей среды, в которой происходит распространение излучения. Только при условии максимальной корректности всех составляющих модели генерации и распространения космического гамма-излучения можно надеяться на адекватность проверки моделей физики элементарных частиц в диапазоне высоких энергий. Это обусловило **практическую значимость** исследований, представленных в диссертации.

В соответствии с современными данными магнитные поля в космологических пустотах (cosmic voids) имеют напряженность не менее  $10^{-17}$  Гс и не более 1 нГс. Происхождение данных полей в настоящее время неясно. Согласно некоторым гипотезам эти поля являются первичными (т.е. были сгенерированы на очень ранних [догалактических, возможно даже, вплоть до эпохи инфляции] этапах эволюции Вселенной), согласно другим гипотезам эти магнитные поля образовывались в галактиках, а затем были вынесены в межгалактическую среду. Как можно более точное определение значений напряженности этих полей (т.е. наложение как можно более жестких верхних и нижних ограничений) позволит осуществить выбор между этими гипотезами и, возможно, ограничить круг возможных механизмов генерации магнитного поля в пустотах. Как ожидается, наблюдения внегалактических источников гамма-излучения на черенковских гамма-телескопах нового поколения СТА, TAIGA и др.

(после их введения в строй) позволят зарегистрировать внегалактическое магнитное поле в случае если его напряженность лежит в интервале  $\sim 10^{-12}$  -  $\sim 10^{-11}$  Гс.

Все вышесказанное делает диссертацию Корочкина А. А. безусловно актуальным и практически важным научным исследованием, идущим в ногу со временем.

Диссертация Корочкина А.А. состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 127 страниц текста с 34 рисунками и 7 таблицами. Список литературы включает 207 наименований.

Во *Введении* обоснована актуальность работы и дан краткий обзор состояния исследуемых вопросов, определены цели и задачи диссертационной работы, описана научная новизна и приведены положения, выносимые на защиту. Также во Введении описаны теоретическая и практическая значимость работы, дана информация об апробации результатов, приведен список публикаций по теме диссертации и представлен личный вклад автора в работу.

*Первая глава* диссертации посвящена описанию новой модели межгалактического фонового излучения, постановке ограничений на астрофизические параметры, лежащие в ее основе, вопросу согласования прямых измерений МФИ с ограничениями из наблюдений блазаров и постановке ограничений на параметры возможной дополнительной компоненты в спектре МФИ.

*Вторая глава* посвящена поиску проявлений аксионоподобных частиц в спектрах блазаров, ограничениям на параметры аксионоподобных частиц (массу и константу связи) и вопросу "аномальной" прозрачности Вселенной для гамма-квантов высоких энергий.

*Третья глава* посвящена подробному сравнению электромагнитных модулей публично доступных вычислительных Монте Карло кодов CRbeam, CRProa и ELMAG в части распространения электронов и позитронов в магнитном поле, поглощения гамма-квантов высоких энергий при взаимодействии с МФИ и процесса обратного комптоновского рассеяния.

*Четвертая глава* посвящена исследованию внегалактических магнитных полей и оценке возможностей черенковского телескопа IV-го поколения СТА по наблюдению вторичного гамма-излучения в окрестности точечных внегалактических источников, возникающего при обратном комптоновском рассеянии мягких фотонов на вторичных электронах и позитронах, порожденных первичным гамма-излучением источника и рассеянных магнитным полем.

В *Заключении* суммированы выводы диссертационной работы в целом.

**Научная новизна** данной работы заключается в следующем:

(i) Впервые построена модель межгалактического фонового излучения (МФИ) с изменяемыми (подстраиваемыми) параметрами.

(ii) Получена оценка значимости эффекта "аномальной прозрачности" Вселенной на основе наиболее полной выборки блазаров с точно измеренными красными

смещениями.

(iii) Впервые установлены ограничения на параметры возможной добавки на фоне теоретически рассчитанного спектра МФИ.

(iv) Впервые получены ограничения на константу взаимодействия аксионоподобных частиц с массой  $\sim 1$  эВ с фотонами на основе наблюдений блазаров в области высоких энергий.

(v) Впервые оценены возможности черенковского гамма-телескопа нового поколения СТА по регистрации внегалактических магнитных полей при наблюдении внегалактических гамма-источников.

(vi) Впервые установлено, что типичные пузыри магнитного поля вокруг галактик и скоплений галактик вызывают подавление потока вторичных гамма-квантов в среднем на уровне 10%.

(vii) Впервые проведено полное сравнение электромагнитных модулей публично доступных Монте-Карло программ CRbeam, CRPropa и ELMAG.

**Положения** диссертационной работы состоят в следующем:

1) Разработана новая модель межгалактического фонового излучения, позволяющая модифицировать параметры астрофизических процессов, лежащих в ее основе. На основе данной модели установлены ограничения на скорость звездообразования во Вселенной.

2) Показано, что эффект "аномальной прозрачности" Вселенной для гамма-излучения высоких энергий слабее, чем считалось ранее и его значимость составляет  $1.3\sigma$  для наиболее консервативной модели поглощения.

3) Установлены ограничения на положение, ширину и интенсивность небольшой, локализованной в области длин волн порядка микронов, добавки на фоне теоретически предсказанного спектра межгалактического фонового излучения.

4) На основе наблюдений высокоэнергичного излучения блазаров установлены ограничения на константу взаимодействия с фотонами  $g$  гипотетических аксионоподобных частиц с массой в области 1 эВ при условии, что они составляют большую часть темной материи.

5) Рассчитана чувствительность гамма-телескопа нового поколения СТА к внегалактическим магнитным полям. Показано, что метод измерения гамма-излучения позволяет детектировать сильные первичные магнитные поля с напряженностью в области  $10^{-12}$  -  $10^{-11}$  Гс.

6) Установлено, что типичные пузыри магнитного поля вокруг галактик и скоплений галактик, соответствующие модели IllustrisTNG, вызывают энергонезависимое подавление потока вторичных гамма-квантов на уровне около 10%.

**Достоверность** и **обоснованность** полученных результатов обеспечена использованием адекватных аналитических и численных методов в рамках разумных физических приближений, сравнения результатов с результатами, полученными другими авторами, апробацией на международных и российских конференциях, на семинарах и в статьях. По теме диссертации автором опубликовано 7 печатных работ в рецензируемых международных журналах (A&A, MNRAS, ApJ, JCAP), входящих в первый и второй квартили цитирования и рекомендованных ВАК, еще одна работа на момент завершения написания диссертации принята к публикации в журнале

рекомендованном ВАК. Во всех этих работах личный вклад автора является значительным либо определяющим. Работы автора широко цитируются как отечественными, так и иностранными специалистами.

Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных и российских конференциях.

Полученные результаты имеют **безусловную теоретическую и практическую значимость.**

Выводы и положения диссертации полностью соответствуют представленным результатам.

Существенных недостатков представленная диссертация не содержит. Тем не менее, по диссертации имеются замечания, в основном технического характера и некоторые пожелания:

1) Приведенный в Главе 1 обзор существующих моделей МФИ весьма сжатый. Практически не приведены существенные детали моделей, основанных на численном моделировании. Это значительно затрудняет выявление отличий новой модели МФИ, представленной в диссертации, от уже существующих, что вынуждает обращаться к первоисточникам. Тут следует отметить, что сама по себе возможность изменения значений исходных параметров модели не может считаться качественным отличием от предыдущих моделей. При полном прочтении Главы 1 (вплоть до параграфа 1.3 включительно) становится ясно, что ключевое отличие заключается, по всей видимости в том, что исходные параметры меняются не произвольным образом, а исходя из максимизации выбранной функции правдоподобия, что, фактически позволяет решить обратную задачу и определить по экспериментальным данным допустимые значения исходных параметров. Было бы значительно более удобно для читателя, если бы это отличие было указано с самого начала Главы 1, на этапе обзора существующих моделей МФИ и в максимально явной форме (в частности, было бы подчеркнуто, что в других моделях именно такой возможности нет).

2) Представляется существенным дать обсуждение возможной роли плазменных неустойчивостей в кинетике электрон-позитронных пучков в модели распространения и конверсии гамма-излучения.

3) Имеются небольшие технические погрешности:

Формула (5) прокомментирована недостаточно. Указано, что "B" - это спектр, размерность не приведена, поэтому приходится догадываться о точном смысле конкретной физической величины.

Аббревиатура "EBL" используется в тексте без предварительной расшифровки. Также расшифровка отсутствует в списке сокращений на стр. 103.

На стр. 103 в русском пояснении к сокращению FSQR имеется опечатка.

В правой части формулы (18) отсутствует дифференциал величины, по которой проводится интегрирование.

Высказанные замечания не являются принципиальными и ни в какой мере не умаляют высокого уровня работы и полученных результатов.

Диссертация А. А. Корочкина является законченным научным исследованием. Полученные автором результаты имеют существенное значение для астрофизики,

физики элементарных частиц и фундаментальной физики. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.**

Диссертационная работа была доложена и обсуждена на Объединённом астрофизическом семинаре ФТИ им. А.Ф. Иоффе 24 мая 2022 года, по результатам которого был составлен данный отзыв.

Диссертация А. А. Корочкина на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор А. А. Корочкин **безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук** по специальности по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв подготовили:

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории  
астрофизики высоких энергий ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Ю.А. Уваров

телефон: (812) 292-7160

электронный адрес: [uv@astro.ioffe.ru](mailto:uv@astro.ioffe.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, телефон: (812) 297-2245, факс: (812) 297-1017, [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

руководитель отделения физики плазмы, атомной  
физики и астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе, доктор  
физико-математических наук, профессор, член-корр.  
РАН

А.М. Быков

**Список основных публикаций сотрудников института по теме диссертации за последние 5 лет**

Bykov A.M., Marcowith, A.; Amato, E.; Kalyashova, M.E.; Kruijssen, J. M.D.; Waxman, E.  
High-Energy Particles and Radiation in Star-Forming Regions  
Space Science Reviews, \ v.\ 216, 42, 2020

Bykov A.M., Uvarov, Y.A.; Slane, P.; Ellison, D.C.  
Uncovering Magnetic Turbulence in Young Supernova Remnants with Polarized X-Ray Imaging  
The Astrophysical Journal, \ v.\ 899, 142, 2020

Ridnaia, A.; Svinkin, D.; Frederiks, D., Bykov A.M., et al  
A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst  
Nature Astronomy, \v.\ 5, pp.372-377, 2021 }

Falanga, M.; Bykov A.M., Li, Z. ; Krassilchtchikov, A. M.; Petrov, A. E. ; Bozzo  
Phase-resolved hard X-ray emission of the high-mass binary LS 5039: a spectral hardening above 50 keV detected with INTEGRAL  
Astronomy & Astrophysics \ v.\ 654, A127, 2021

Bykov A.M., Petrov, A. E., Kalyashova, M. E. Troitsky, S. V.  
PeV Photon and Neutrino Flares from Galactic Gamma-Ray Binaries  
The Astrophysical Journal Letters, \ v.\ 921, L10, 2021

Bykov, A. M. ; Uvarov, Y. A. ; Churazov, E. M. ; Gilfanov, M. R. ; Medvedev, P. S.  
Spatially resolved X-ray spectra of the galactic SNR G18.95-1.1: SRG/eROSITA view  
Astronomy & Astrophysics v.661, id.A19, 2022