

Отзыв официального оппонента

на диссертацию 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 посвящена изучению влияния межгалактических магнитных полей и гипотетических аксионоподобных частиц на наблюдаемые свойства гамма-излучения от далеких внегалактических астрофизических объектов. В диссертации затрагиваются такие актуальные проблемы современной физики и космологии, как природа темной материи, происхождение и эволюция Вселенной. С помощью разработанных соискателем теоретических моделей по имеющимся данным наблюдений блазаров удалось получить ряд новых ограничений на спектр межгалактического фонового излучения, параметры межгалактических магнитных полей и свойства аксионоподобных частиц. Эти ограничения, как показано в диссертации, могут быть существенно улучшены с помощью данных черенковского телескопа нового поколения Cherenkov Telescope Array (СТА), который будет введен в эксплуатацию в ближайшее время.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 127 страниц с 34 рисунками и 7 таблицами. Список литературы содержит 207 наименований.

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, описан достигнутый в последнее время прогресс в рассматриваемой области исследований, сформулированы цели и задачи работы, продемонстрированы научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, представлены выносимые на защиту положения, описан личный вклад соискателя в полученные результаты.

Первая глава посвящена изучению влияния межгалактического фонового излучения (МФИ) – суммарного излучения внегалактических астрофизических объектов – на спектры гамма-излучения блазаров в результате взаимодействия гамма-квантов с мягким фоновым излучением (и производства электрон-позитронных пар) на пути между блазаром и наблюдателем. Эта тема активно развивается в последнее время благодаря появлению достаточно надежных измерений МФИ в оптическом-ИК диапазонах и достаточно точных измерений гамма-спектров блазаров. При этом есть указания, что эти два типа данных, возможно, не согласуются друг с другом. Однако измерение спектра МФИ является сложной наблюдательной задачей, поэтому остается значительный разброс в измеренных значениях интенсивности МФИ. Чтобы исследовать влияние этой неопределенности, соискатель впервые построил многопараметрическую физическую модель МФИ, основанную на современном понимании звездообразования в галактиках и эволюции галактик. На основе этой модели были получены области допустимых значений физических параметров звездного населения и межзвездной среды галактик, которые удовлетворяют имеющимся данным наблюдений. Кроме того показано, что проблема рассогласованности данных наблюдений МФИ и блазаров может быть смягчена, если в спектре МФИ присутствует узкая дополнительная компонента в районе 1 микрона. Это можно будет проверить с помощью телескопа СТА.

Вторая глава логически продолжает первую. Рассматривается возможность появления дополнительной узкой особенности в спектре МФИ из-за двухфотонного распада аксионоподобных частиц, которые могут составлять темную материю. Показано, что присутствие такого дополнительного излучения не только не противоречит имеющимся

наблюдательным данным, но даже, в случае блазара 1ES 1218+304, позволяет улучшить качество аппроксимации измеренного спектра гамма-излучения. Как следствие, удалось получить новые ограничения на константу взаимодействия аксионоподобных частиц с фотонами в области масс примерно от 1 до 10 эВ. В продолжение этой темы, далее в той же главе исследуется проблема «аномальной прозрачности» Вселенной для фотонов высоких энергий, которая может быть связана с преобразованием фотонов и аксионоподобных частиц друг в друга. Изучив статистику изломов в гамма-спектрах примерно 30 блазаров, соискателю удалось показать, что эта проблема не является настолько острой, как заявлялось ранее, а именно значимость расхождения не превышает 2 стандартных отклонений для моделей МФИ, рассмотренных в первой главе.

Третья глава носит более технический характер, но является важной не только для этой диссертации, но и для любых исследований, проводимых по этой теме в мире. В ней исследуется точность моделирования электромагнитных каскадов в межгалактической среде с помощью трех широко используемых программ CRProa, ELMAG и CRbeam. Соискатель провел целый ряд численных экспериментов с помощью этих программ, изучив такие процессы, как поглощение гамма-квантов в результате рождения электронно-позитронных пар, генерация вторичного гамма-излучения в результате обратного комптоновского рассеяния на электрон-позитронных парах, распространение электронов и позитронов в среде с магнитным полем. Выяснилось, что получаемые с помощью этих программ предсказания спектральных, временных и пространственных свойств гамма-излучения блазаров могут различаться вплоть до 50 процентов. Соискатель выявил ряд причин этих расхождений, что должно способствовать усовершенствованию этих программ и должно учитываться при интерпретации будущих результатов СТА.

Четвертая глава посвящена очень интересной проблеме влияния межгалактических магнитных полей на наблюдаемые свойства каскадного излучения от далеких источников гамма-излучения. С помощью расчетов методом Монте-Карло рассмотрены два основных класса первичных межгалактических магнитных полей, характеризующихся маленькой и большой корреляционной длиной соответственно, а также рассмотрено влияние магнитных пузырей, окружающих галактики и скопления. Подробно изучена зависимость наблюдаемых характеристик (спектр излучения, угловой размер источника) от параметров моделей. Основным вывод этой главы состоит в том, что хотя рассматриваемые эффекты малы, тем не менее телескоп СТА обладает достаточным потенциалом для их обнаружения и, как следствие, для получения уникальных ограничений на свойства внегалактических магнитных полей.

Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить высокую актуальность проведенных исследований, большой объем и тщательность проделанной работы, новизну и надежность полученных результатов. Выносимые на защиту научные заключения хорошо обоснованы, достоверны и весьма значимы для физики и космологии. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах и конференциях высокого уровня, опубликованы в высокорейтинговых научных журналах.

У оппонента есть несколько замечаний к диссертации:

- 1) В первой главе построена подробная модель МФИ. Ключевым предположением этой модели является то, что фон целиком состоит из излучения звезд и излучения межзвездной среды (переработанного на пыли излучения звезд). Однако известно, что дополнительный заметный вклад в МФИ могут давать активные ядра галактик, т.е. излучение, связанное с аккрецией вещества на сверхмассивные черные дыры. Особенно значительным (10-20 процентов) этот вклад может быть в районе 15 микрон – из-за переработки примерно половины ультрафиолетового излучения квазаров на горячей пыли, окружающей сверхмассивные черные

дыры, и локального минимума в спектре излучения галактик в этой области (см., например, Fig. 3 в статье Sazonov, Ostriker & Sunyaev 2004). Было бы интересно обсудить влияние этой дополнительной компоненты МФИ на результаты диссертационной работы.

2) В первой и второй главах спектры гамма-излучения блазаров описываются либо простым степенным законом, либо степенной моделью с изломом. Однако хорошо известно, что в действительности спектральные распределения энергий блазаров имеют «двугорбую» структуру (см., например, Fossati et al. 1998), и форма спектра в каждом из этих «горбов» отлична от степенной. Хотя степенная модель может являться удачным описанием спектров в достаточно узком диапазоне энергий, а также учитывая, что степенные спектры могут возникать естественным образом в случае релятивистских джетов, можно было бы тем не менее обсудить адекватность используемого в моделировании степенного приближения.

3) В представленном в параграфе 1.4.1 описании таблицы 5 не хватает указания того, в каком энергетическом диапазоне происходил отбор блазаров по потоку.

4) По ходу диссертации местами при описании свойств электромагнитного излучения используются терминология, которая не совсем соответствует устоявшейся в астрофизике практике. Так, в формулах (5), (6) буквой B обозначен поток чернотельного излучения, хотя обычно этой буквой обозначают интенсивность чернотельного излучения (будет то же самое, но без множителя «пи» в числителе). Аналогично, величина I , используемая в ур-нии (31) – это, очевидно, интенсивность излучения, хотя в тексте говорится, что это поток.

Эти замечания не являются существенными и никак не влияют на высокое научное значение диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.02 – «теоретическая астрофизика», а ее автор **Корочкин Александр Алексеевич** заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Заведующий лабораторией экспериментальной астрофизики
отдела астрофизики высоких энергий
ФГБУН Институт космических исследований
Российской академии наук,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН

С.Ю. Сазонов

Почтовый адрес: 117997 Москва,
ул. Профсоюзная 84/32,
ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук

Телефон: +7 495 3335357
Электронный адрес: sazonov@cosmos.ru

Подпись С.Ю. Сазонова заверяю:
Ученый секретарь ИКИ РАН,
кандидат физико-математических наук

А.М. Садовский

14 июня 2022 г.

Саонов Сергей Юрьевич

Доктор физико-математических наук

Специальность 01.03.02 – астрофизика и радиоастрометрия

Список основных публикаций по теме оппонируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Krivonos, R.A., **Sazonov, S.Y.**, Kuznetsova, E.A., Lutovinov, A.A., Mereminskiy, I.A., and Tsygankov, S.S. "INTEGRAL/IBIS 17-yr hard X-ray all-sky survey". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022, 510, 4796.

2. **Sazonov, S.**, Gilfanov, M., Medvedev, P., Yao, Y., Khorunzhev, G., Semena, A., Sunyaev, R., Burenin, R., Lyapin, A., Meshcheryakov, A., Uskov, G., Zaznobin, I., Postnov, K.A., Dodin, A.V., Belinski, A.A., Cherepashchuk, A.M., Eselevich, M., Dodonov, S.N., Grokhovskaya, A.A., Kotov, S.S., Bikmaev, I.F., Zhuchkov, R.Y., Gumerov, R.I., van Velzen, S., and Kulkarni, S. "First tidal disruption events discovered by SRG/eROSITA: X-ray/optical properties and X-ray luminosity function at $z < 0.6$ ". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 508, 3820.

3. Krivonos, R., Wik, D., Grefenstette, B., Madsen, K., Perez, K., Rosslund, S., **Sazonov, S.**, and Zoglauer, A. "NuSTAR measurement of the cosmic X-ray background in the 3-20 keV energy band". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 502, 3966.

4. Predehl, P., Sunyaev, R.A., Becker, W., Brunner, H., Burenin, R., Bykov, A., Cherepashchuk, A., Chugai, N., Churazov, E., Doroshenko, V., Eismont, N., Freyberg, M., Gilfanov, M., Haberl, F., Khabibullin, I., Krivonos, R., Maitra, C., Medvedev, P., Merloni, A., Nandra, K., Nazarov, V., Pavlinsky, M., Ponti, G., Sanders, J.S., Sasaki, M., **Sazonov, S.**, Strong, A.W., and Wilms, J. "Detection of large-scale X-ray bubbles in the Milky Way halo". Nature, 2020, 588, 227.

5. Churazov, E., Bouchet, L., Jean, P., Jourdain, E., Knoedlseder, J., Krivonos, R., Roques, J.-P., **Sazonov, S.**, Siegert, T., Strong, A., and Sunyaev, R. "INTEGRAL results on the electron-positron annihilation radiation and X-ray and Gamma-ray diffuse emission of the Milky Way". New Astronomy Reviews, 2020, 90, 101548.

6. Malizia, A., **Sazonov, S.**, Bassani, L., Pian, E., Beckmann, V., Molina, M., Mereminskiy, I., and Belanger, G. "INTEGRAL view of AGN". New Astronomy Reviews, 2020, 90, 101545.

7. Medvedev, P., **Sazonov, S.**, Gilfanov, M., Burenin, R., Khorunzhev, G., Meshcheryakov, A., Sunyaev, R., Bikmaev, I., and Irtuganov, E. "SRG/eROSITA uncovers the most X-ray luminous quasar at $z > 6$ ". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 497, 1842.

8. **Sazonov, S.** and Khabibullin, I. "A universal 21 cm signature of growing massive black holes in the early Universe". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 489, 1127.

9. Медведев П.С., **Саонов С.Ю.**, Гильфанов М.Р. "Диффузия элементов в межзвездной среде в галактиках раннего типа", Письма в Астрономический журнал, 2017, 43, 321.