

ОТЗЫВ

официального оппонента - Быкова Андрея Михайловича, доктора физико-математических наук, профессора федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-Технического Института им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук на диссертацию Калашева Олега Евгеньевича

«Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий. Сопутствующие нейтринные и фотонные излучения»,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Исследования космических лучей высоких и ультравысоких энергий дают уникальную информацию о космических объектах с экстремальным энерговыделением. Из-за сложности прямых наблюдений в области энергий свыше 10^{18} эВ ввиду крайне малых потоков космических лучей экспериментальные исследования частиц ультравысоких энергий ведутся косвенными методами по измерениям характеристик широких атмосферных ливней. Анализ массового состава и восстановление энергетического спектра космических лучей дают ценную информацию о свойствах их источников и межзвёздной среды. Помимо непосредственных экспериментальных измерений характеристик космических лучей необходима разработка новых и совершенствование существующих теоретических моделей и численных методов, направленных на интерпретацию и планирование наблюдений, объяснение выявленных свойств источников и межгалактической среды, проведение компьютерного моделирования физических процессов.

В представленной диссертации Калашева О.Е. выполнены важные оригинальные исследования, посвящённые проблеме происхождения космических лучей ультравысоких энергий, изучению массового состава первичных космических лучей, а также эволюции их источников. В основе полученных в работе результатов лежит подход, основанный на подсчете сопутствующих потоков фотонов и нейтрино, произведенных при распространении космических лучей в межгалактическом пространстве и в непосредственной близости к источникам.

Заметный интерес научного сообщества к исследованию происхождения нейтрино с энергиями выше 10^{14} эВ, зарегистрированных детекторами комплекса IceCube Neutrino Observatory, продолжающиеся экспериментальные проекты в области космических лучей сверхвысоких энергий, такие как Telescope Array, Pierre Auger Observatory, а также большое количество теоретических работ, посвящённых исследованию ультрарелятивистских частиц и сопутствующего диффузного излучения в ГэВ диапазоне энергий подтверждают, что диссертация посвящена разработке **фундаментальной и актуальной проблемы современной теоретической физики и астрофизики**. Ряд предложенных автором методов и подходов к исследованию электромагнитных каскадов, инициированных космическими лучами сверхвысоких энергий, могут успешно применяться на практике для описания распространения ультрарелятивистских космических лучей в межзвёздной среде. Проведённое сравнение модельных предсказаний диффузионного потока нейтрино в диапазоне выше 10 ПэВ с данными обсерватории IceCube и диффузного фона гамма-излучения на энергиях несколько ГэВ с

наблюдениями орбитального телескопа Fermi позволили получить ограничения на эволюцию источников и спектр первичных космических лучей.

Автором получен ряд **новых** результатов. Предложен механизм объяснения аномальной прозрачности Вселенной для гамма-излучения от далёких блазаров с энергией свыше сотен ГэВ за счёт дополнительного вклада каскадного излучения и сделана оценка наблюдаемого числа блазаров в планируемых атмосферных черенковских гамма-телескопах следующего поколения. Разработанный автором диссертации **оригинальный** программный код, описывающий взаимодействие космических лучей ультравысоких энергий со средой и развитие электромагнитного каскада, опубликован в сети интернет и доступен для свободного использования. Результаты, полученные на его основе, неоднократно проверялись и сравнивались с вычислениями независимых авторов. На его основе получено универсальное модельно-независимое ограничение на максимальную плотность энергии каскадного излучения. Автором предложена согласованная модель, одновременно объясняющая как наблюдаемый в орбитальном эксперименте Fermi внегалактический поток гамма-излучения при энергиях свыше ГэВ, так и предсказанную в независимом анализе данных экспериментов Pierre Auger Observatory, KASCADE и KASCADE-Grande протонную часть потока космических лучей ультравысоких энергий. Эти результаты, безусловно, вносят существенный вклад в понимание физики космических лучей высоких энергий и определяют большую **практическую значимость** работы.

Диссертация объёмом 187 страниц, включая четыре главы основного текста, введение, заключение, 43 рисунка, 8 таблиц и список литературы (234 наименования), представляет собой законченное оригинальное научное исследование, посвящённое источникам космических лучей ультравысоких энергий и изучению процесса их распространения.

Во *Введении* автор даёт обзор современных экспериментальных и теоретических исследований космических лучей ультравысоких энергий, а также сопутствующего излучения и их распространения в межгалактическом пространстве, обосновывает актуальность поставленной задачи и приводит обзор основных наблюдательных данных.

В *Главе 1* рассматриваются свойства электромагнитных каскадов, порождаемых частицами сверхвысоких энергий, вычисляется предельная плотность энергии в электромагнитных каскадах, соответствующая экспериментальным ограничениям. Подробно рассматривается оригинальный аналитический подход к описанию электромагнитного каскада, и обсуждаются границы его применимости. С помощью анализа данных орбитального эксперимента Fermi получено универсальное модельно-независимое ограничение на максимальную плотность энергии каскадного излучения.

В *Главе 2* анализируются диффузные потоки космогенных фотонов и нейтрино, производимых космическими лучами ультравысоких энергий при их распространении в межгалактическом пространстве, а также каскадное гамма-излучение. Путём анализа данных наблюдений орбитального телескопа Fermi и нейтринной обсерватории IceCube сделаны ограничения на долю протонов в первичных космических лучах, а также спектр и эволюцию источников. Автором показано, что экзотические сценарии происхождения космических лучей ультравысоких энергий, а именно, модели распада частиц тёмной

материи (“Top-down”), а также астрофизические сценарии с экстремально высокой максимальной энергией ускорения входят в противоречие с экспериментальными ограничениями на долю фотонов ультравысоких энергий.

В *Главе 3* автором рассматривается возможность наблюдения сопутствующих сигналов в виде гамма-излучения и нейтрино высоких энергий, а также каскадного гамма-излучения от одиночных источников космических лучей. Автором произведена оценка возможного вклада продуктов взаимодействий космических лучей со средой в поток астрофизических нейтрино, а также получены предсказания наблюдаемого числа блазаров в диапазоне энергий от 30 ГэВ до нескольких десятков ТэВ в планируемых атмосферных черенковских гамма-телескопах следующего поколения на примере СТА. Показано, что сигнал от далёких блазаров в диапазоне энергий порядка ТэВ можно объяснить вторичным сигналом от взаимодействия космических лучей ультравысоких и сверхвысоких энергий, от тех же источников, в предположении малости межгалактического магнитного поля ($B < 10^{-15}$ Гс).

В *Главе 4* рассмотрены два механизма генерации астрофизических нейтрино и диффузного гамма-излучения через $p-p$ и $p-\gamma$ взаимодействия вблизи источников космических лучей на примере активных ядер галактик. Показано, что популяция источников типа ФР I/Лацертиды за счёт взаимодействия космических лучей с газом, при условии ускорения вблизи чёрной дыры, может одновременно объяснить детектирование потока первичных космических лучей и наблюдаемые потоки гамма-излучения и нейтрино в экспериментах Fermi и IceCube. Автором продемонстрировано, что разница в наклоне спектров протонов и нейтрино высоких энергий может быть объяснена диффузией первичных протонов в турбулентном магнитном поле источников космических лучей. В частности, в случае колмогоровской турбулентности показатель спектра вторичных нейтрино увеличивается на $1/3$, что может объяснить спектр нейтрино с $\alpha_\nu \approx 2.5$, наблюдаемый в эксперименте IceCube.

В *Заключении* автором сформулированы основные результаты диссертации, а в *Приложении* описана феноменологическая модель источников космических лучей ультравысоких энергий.

Достоверность и надёжность результатов диссертационной работы подтверждаются использованием адекватных математических методов, а также согласованностью полученных данных с результатами других научных групп. Численный код для моделирования электромагнитных каскадов от взаимодействия космических лучей ультравысоких энергий со средой, разработанный автором, опубликован в свободном доступе в сети интернет и пользуется заметным интересом со стороны научного сообщества. Результаты диссертации прошли проверку на многочисленных международных и всероссийских конференциях и были опубликованы в 23 статьях, 16 из которых находятся в Перечне ВАК ведущих рецензируемых журналов и изданий.

Диссертация не лишена отдельных недостатков. В качестве замечаний и пожеланий можно выделить следующие:

1. Ввиду большого интереса к интерпретации данных наблюдений обсерватории IceCube, было бы уместно обсудить как согласуются результаты диссертации с выводами работы K. Murase et al. [Phys. Rev. Letters, Volume 116, Issue 7, id.071101, 2016] о сильных ограничениях на прозрачность источников

высокоэнергичного гамма-излучения и нейтрино, и видимых противоречиях данных IceCube с диффузным фоном гамма излучения на энергиях до 100 ГэВ, наблюдаемым телескопом Fermi.

2. Моделирование каскадов и их влияния на распространение излучения нуждается в оценках возможного влияния эффектов плазменной релаксации пучков вторичных электрон-позитронных пар (см., например, *Astrophysical Journal* v. 770, 59, 2013). Оценки вклада данного эффекта повысят надежность выводов автора.
3. По мнению оппонента чтение диссертационной работы несколько осложняется обилием аббревиатур, которые в некоторых случаях затрудняют понимание текста (МГМП, КЛСВЭ, МФС, ОРК, ФСГ и т.д), а также использованием жаргонных выражений: "потери электронов на синхротрон", "сравнительная похожесть", "сдвигка шкалы" и др. В тексте диссертации встречаются опечатки (например, на стр. 5, 41, 52, 56, 105 и др.), а также ошибки в пунктуации. В подписи к рисункам 2.5 и 2.18 даётся ссылка на левые и правые панели, тогда как на самих рисунках присутствуют только верхние и нижние. В уравнении 1.40 на странице 53 из-за вероятной опечатки не согласованы левая и правая части соотношения.

Следует подчеркнуть, что вышеперечисленные недостатки не имеют принципиального характера и не снижают высокой общей оценки результатов автора диссертации.

Диссертация представляет собой законченное оригинальное научное исследование, вносящее существенный вклад в решение фундаментальной физической проблемы происхождения и процессов взаимодействия космических лучей ультравысоких энергий. Результаты, полученные в диссертационной работе Калашева О.Е., могут быть использованы в научных учреждениях, в которых ведутся работы по астрофизике высоких энергий: ИКИ РАН, ИЯИ, ФТИ им. Иоффе РАН, ФИАН им П.Н.Лебедева, ИЗМИРАН, ИТЭФ, МГУ им. М.В.Ломоносова, АКЦ ФИАН, СПбГУ и др.

Основное содержание диссертации опубликовано в ведущих отечественных и зарубежных журналах и широко цитируется в научных изданиях. Автореферат полностью отвечает содержанию диссертации.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а Олег Евгеньевич Калашев, **безусловно, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук** по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент

Руководитель отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе,
доктор физ.-мат. наук, профессор

Быков А.М.

Подпись Быкова А.М. заверяю,
ученый секретарь ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе
доктор физ.-мат. наук, профессор

Шергин А.П.

24.01.2017

Быков Андрей Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор

специальность: 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия

Основные публикации по теме диссертации за последние 5 лет

1. **“Particle spectra and efficiency in nonlinear relativistic shock acceleration – survey of scattering models”**
D. C. Ellison, D. C. Warren and A. M. Bykov.
arXiv:1512.02901 [astro-ph.HE]
DOI:10.1093/mnras/stv2912
Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **456**, no. 3, 3090 (2016)
2. **“Ultrahard spectra of PeV neutrinos from supernovae in compact star clusters”**
A. M. Bykov, D. C. Ellison, P. E. Gladilin and S. M. Osipov.
arXiv:1507.04018 [astro-ph.HE]
DOI:10.1093/mnras/stv1606
Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **453**, no. 1, 113 (2015)
3. **“Electron and Ion Acceleration in Relativistic Shocks with Applications to GRB Afterglows”**
D. C. Warren, D. C. Ellison, A. M. Bykov and S. H. Lee.
arXiv:1506.03087 [astro-ph.HE]
DOI:10.1093/mnras/stv1304
Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **452**, no. 1, 431 (2015)
4. **“Nonthermal particles and photons in starburst regions and superbubbles”**
A. M. Bykov.
arXiv:1511.04608 [astro-ph.HE]
DOI:10.1007/s00159-014-0077-8
Astron. Astrophys. Rev. **22**, no. 1, 77 (2014)
5. **“On the electron-ion temperature ratio established by collisionless shocks”**
J. Vink, S. Broersen, A. Bykov and S. Gabici.
arXiv:1407.4499 [astro-ph.HE]
DOI:10.1051/0004-6361/201424612
Astron. Astrophys. **579**, A13 (2015)
6. **“Supernova Remnants Interacting with Molecular Clouds: X-ray and Gamma-ray Signatures”**
P. Slane, A. Bykov, D. C. Ellison, G. Dubner and D. Castro.
arXiv:1406.4364 [astro-ph.HE]
DOI:10.1007/s11214-014-0062-6
Space Sci. Rev. **188**, no. 1-4, 187 (2015)
7. **“Magnetic field amplification in nonlinear diffusive shock acceleration including resonant and non-resonant cosmic-ray driven instabilities”**
A. M. Bykov, D. C. Ellison, S. M. Osipov and A. E. Vladimirov.
arXiv:1406.0084 [astro-ph.HE]
DOI:10.1088/0004-637X/789/2/137
Astrophys. J. **789**, 137 (2014)

8. **“Monte Carlo Simulations of Nonlinear Particle Acceleration in Parallel Trans-relativistic Shocks”**
D. C. Ellison, D. C. Warren and A. M. Bykov.
arXiv:1308.5114 [physics.space-ph]
DOI:10.1088/0004-637X/776/1/46
Astrophys. J. **776**, 46 (2013)
9. **“Collisionless shocks in partly ionized plasma with cosmic rays: microphysics of non-thermal components”**
A. M. Bykov, M. A. Malkov, J. C. Raymond, A. M. Krassilchtchikov and A. E. Vladimirov.
arXiv:1304.0998 [astro-ph.HE]
DOI:10.1007/s11214-013-9984-7
Space Sci. Rev. **178**, 599 (2013)
10. **“Non-linear model of particle acceleration at colliding shock flows”**
A. M. Bykov, P. E. Gladilin and S. M. Osipov.
arXiv:1212.1556 [astro-ph.HE]
DOI:10.1093/mnras/sts553
Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **429**, 2755 (2013)
11. **“Observational signatures of particle acceleration in supernova remnants”**
E. A. Helder, J. Vink, A. M. Bykov, Y. Ohira, J. C. Raymond and R. Terrier.
arXiv:1206.1593 [astro-ph.HE]
DOI:10.1007/s11214-012-9919-8
Space Sci. Rev. **173**, 369 (2012)
12. **“Particle acceleration in relativistic outflows”**
A. Bykov, N. Gehrels, H. Krawczynski, M. Lemoine, G. Pelletier and M. Pohl.
arXiv:1205.2208 [astro-ph.HE]
DOI:10.1007/s11214-012-9896-y
Space Sci. Rev. **173**, 309 (2012)
13. **“Diffusive shock acceleration and magnetic field amplification”**
K. M. Schure, A. R. Bell, L. O. Drury and A. M. Bykov.
arXiv:1203.1637 [astro-ph.HE]
DOI:10.1007/s11214-012-9871-7
Space Sci. Rev. **173**, 491 (2012)
14. **“Core-collapse model of broadband emission from SNR RX J1713.7-3946 with thermal X-rays and Gamma-rays from escaping cosmic rays”**
D. C. Ellison, P. Slane, D. J. Patnaude and A. M. Bykov.
arXiv:1109.0874 [astro-ph.HE]
DOI:10.1088/0004-637X/744/1/39
Astrophys. J. **744**, 39 (2012)
15. **“Magnetic fields in cosmic particle acceleration sources”**
A. M. Bykov, D. C. Ellison and M. Renaud.
arXiv:1105.0130 [astro-ph.HE]
DOI:10.1007/s11214-011-9761-4
Space Sci. Rev. **166**, 71 (2012)