

УТВЕРЖДАЮ:
Заместитель директора Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки
Физико-технического института
им. А.Ф. Иоффе Российской академии
наук,

_____/С.В. Лебедев/

« 19 » мая 2016 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу **ПШИРКОВА Максима Сергеевича**
«Радиоастрономические ограничения на модели фундаментальной физики и астрофизики», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.02 – теоретическая физика и 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Диссертационная работа М.С. Пширкова посвящена изучению возможностей использования наблюдений в радиодиапазоне для исследования широкого круга задач фундаментальной физики и астрофизики. Наблюдения в этом диапазоне обладают наибольшей чувствительностью, временным и угловым разрешением в астрономии, что делает их особенно важными для исследований недоступных для изучения в лабораторных экспериментах явлений, проводимых на основе наблюдений астрономических объектов. Радиодиапазон также является одним из основных для наблюдения пульсаров – важного класса объектов, изучение которых актуально для широкого круга задач: от исследования сверхплотного состояния вещества до поиска гравитационных волн и уточнения теории гравитации.

Некоторые современные наблюдательные данные указывают на то, что многократно проверенные в лабораторных условиях физические теории – Стандартная модель физики элементарных частиц и Общая теория относительности – нуждаются в дополнительных проверках и, возможно, корректировках на астрономических масштабах. Сегодняшняя интерпретация ряда результатов астрономических наблюдений говорит о том, что видимое (барионное) вещество во вселенной составляет лишь порядка 5% от всей материи-энергии, требующихся, чтобы объяснить наблюдаемую космологическую эволюцию. Остающиеся 95% – так называемые тёмная материя и тёмная энергия – пока не имеют последовательного объяснения в рамках существующих стандартных представлений. Таким образом, роль высокоточных астрономических

наблюдений в построении и проверке фундаментальных физических теорий довольно велика. Выполненные автором диссертации исследования возможностей астрономических наблюдений в радиодиапазоне для целей проверки стандартных и новых подходов к физике частиц, гравитации и космологии делают диссертационную работу **актуальной**. Важность детальной разработки новых моделей радио источников сегодня особенно велика в связи с существенным прогрессом радиоастрономической техники (что продемонстрировано, например, в современных проектах *Радиоастрон* и *LOFAR*) и планируемым созданием в недалеком будущем радиотелескопа нового поколения *SKA*, чувствительная площадь которого составит около 1 кв. км.

Диссертация М.С. Пширкова состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Во Введении определены предмет и цели исследования, раскрыты актуальность, научная новизна и теоретическая и практическая значимость работы. Также в нём приведены положения, выносимые на защиту, дана информация об апробации диссертации и приведен список публикаций по теме диссертации.

Первая глава диссертации посвящена исследованию ограничений на различные альтернативные теории гравитации, которые возникают в ходе поиска гравитационных волн методом пульсарного хронометрирования. Поведение гравитационных волн в альтернативных теориях гравитации может отличаться от стандартного, что приводит к определенным наблюдательным последствиям. В диссертации показано, что современные пульсарные наблюдения позволяют ограничить разницу между скоростью распространения гравитационных волн и скоростью света на относительном уровне менее 0.5%, что на полтора порядка улучшает имевшиеся до этого ограничения. Также пульсарные наблюдения позволяют существенно ограничить возможный вклад массивных гравитонов в тёмную материю.

Вторая глава посвящена изучению различных подходов к поиску и исследованию гравитационных волн в широком диапазоне частот с использованием методов радиоастрономии. Наличие значительного гравитационно-волнового фона на сверхнизких частотах ($10^{-12} - 10^{-8}$ Гц) должно приводить к искажению собственных вращательных параметров пульсаров, особенно вторых производных частоты их вращения. Современные пульсарные наблюдения позволяют поставить на два порядка более жесткие ограничения на плотность сверхнизкочастотных гравитационных волн, чем существовавшие до этого. Высокочастотные гравитационные волны (с частотами выше ГГц) могут превращаться в электромагнитные волны соответствующих частот при распространении в космических магнитных полях. Эта конверсия должна приводить к искажению формы спектра реликтового излучения. Существующие высокоточные наблюдения позволяют получить ограничения на плотность фона высокочастотных гравитационных волн, которые более чем на 20 порядков улучшают имевшиеся до сих пор ограничения. Стандартный метод пульсарного хронометрирования нацелен на поиск гравитационных волн от ансамбля двойных сверхмассивных чёрных дыр, находящихся на близких орбитах, которые сольются через десятки и сотни тысяч лет. В работе был изучен отклик пульсарных сигналов на гравитационно-волновой сигнал, возникающий непосредственно при слиянии сверхмассивных чёрных дыр, получены оценки на чувствительность к нему современных радиотелескопов и радиотелескопов следующего

поколения, таких как *SKA*. Предложенный подход в будущем будет дополнять наблюдения с использованием космических лазерных интерферометров и уже применяется в обработке пульсарных наблюдений в таких экспериментах как *NANOGrav* (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves), *EPTA* (European Pulsar Timing Array) и *PPTA* (Parkes Pulsar Timing Array). В последнем разделе второй главы изучены характеристики радиосигнала, который может возникать при слиянии двух замагниченных нейтронных звёзд. Было показано, что наблюдения на низких частотах (100 МГц) на современных телескопах могут привести к детектированию такого сигнала.

В третьей главе диссертации рассмотрено применение метода пульсарного хронометрирования для исследования распределения масс в Галактике. Движущиеся массивные объекты создают нестационарную метрику пространства-времени, что влияет на распространение сигналов от пульсаров. Отклики, возникающие при наблюдениях пульсаров, расположенных за центром Галактики, могут быть значительными, и предложенный подход может быть использован для исследования распределения масс в этой области. Кроме рассмотрения эффектов, связанных с движущимися точечными массами, был исследован отклик метода пульсарного хронометрирования на пролёт лёгких космических струн – одномерных объектов, которые могли возникать в Ранней Вселенной. Были получены ограничения на распространённость этих объектов во Вселенной в широком диапазоне их параметров.

В четвёртой главе получены наблюдательные ограничения на распространённость первичных чёрных дыр. Для этого использованы наблюдения компактных звёздных остатков – нейтронных звёзд и белых карликов. В работе использованы наблюдения таких объектов в центральных областях старых шаровых скоплений с возрастными, близкими к возрасту Вселенной, а также в карликовых сфероидальных галактиках. Захват первичной черной дыры звездой должен приводить к её быстрому уничтожению, что позволяет говорить о редкости подобных событий. Полученные в работе ограничения на распространённость позволили исключить первичные чёрные дыры в диапазоне масс $10^{17} - 3 \times 10^{24}$ г как главный компонент тёмной материи.

В пятой главе изложены результаты исследования магнитного поля Галактики и внегалактических магнитных полей с использованием данных каталога фарадеевских мер вращений NRAO VLA Sky Survey (NVSS). По почти сорока тысячам значениям мер вращения внегалактических источников была построена модель регулярного галактического магнитного поля и проведена оценка возможных отклонений космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) в случайном магнитном поле. Было показано, что для протонов с энергиями выше 4×10^{19} эВ отклонения для большинства направлений не превосходят 1-2 градусов, что важно для анализа современных экспериментов в области КЛСВЭ, таких как обсерватории Pierre Auger и Telescope Array. Была исследована возможная эволюция собственных мер вращений источников с красным смещением z . В результате было показано, что наблюдающаяся видимая эволюция полного массива источников вызвана зависимостью собственных мер вращений от светимости источников. Отсутствие эволюции для класса «слабых» источников вплоть до $z \sim 5$ позволило получить строгие ограничения на силу внегалактических магнитных полей $B \sim 1.2$ нГс для длины когерентности 1 Мпк, что более чем в два раза превосходит новейшие ограничения, полученные из наблюдений

реликтового излучения телескопом Planck, и может быть применено и к магнитным полям астрофизического происхождения.

В приложениях изложены базовые сведения о наблюдениях пульсаров в радиоастрономии, методе пульсарного хронометрирования и его использовании для проверок теории гравитации и поиска гравитационных волн, приводятся детальные математические выкладки для ряда разделов основных глав диссертации.

Научная новизна данной работы заключается в следующем.

(i) С использованием метода хронометрирования пульсаров улучшены ограничения на класс альтернативных теорий гравитации, в которых скорость распространения гравитационных волн не совпадает со скоростью света.

(ii) Предложен новый метод поиска гравитационных волн в диапазоне 10^{-12} - 10^{-8} Гц по их влиянию на вращательные параметры пульсаров, использование которого позволяет улучшить предыдущие ограничения на низкочастотные гравитационные волны более чем на 2 порядка.

(iii) Предложен новый способ детектирования гравитационно-волновых всплесков непосредственно от процесса слияния сверхмассивных черных дыр с использованием метода пульсарного хронометрирования.

(iv) С использованием данных наиболее полного существующего набора фарадеевских мер вращений внегалактических источников построена новая модель галактического магнитного поля. Получены наиболее строгие, на сегодняшний день, ограничения на силу магнитных полей на космологических масштабах, применимые к объектам при $z < 3$.

(v) По данным наблюдений пульсаров в шаровых скоплениях и карликовых сфероидальных галактиках установлены ограничения на распространенность первичных черных дыр в широком диапазоне масс $10^{17} - 3 \times 10^{24}$ г, которые позволяют исключить такие объекты как заметный компонент темной материи во Вселенной. До работ автора диссертации этот диапазон оставался единственным, где такие оценки отсутствовали. Также получены ограничения, исключающие заметный вклад в плотность темной материи таких кандидатов, как массивные гравитоны и петли космических струн.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена использованием апробированных методов исследования, сравнения результатов с результатами, полученными другими авторами, апробацией на международных и российских конференциях, на семинарах и в статьях. По теме диссертации автором опубликовано 24 работы, из них 18 – в изданиях, входящих в перечень ВАК. Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных и российских конференциях, в том числе на Генеральных ассамблеях Международного астрономического союза и Международных конференциях по космическим лучам.

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

Предложенный в работе метод поиска всплесков гравитационных волн от процесса слияния сверхмассивных черных дыр применяется в крупных современных проектах, связанных с наблюдениями пульсаров (NANOGrav, PPTA, EPTA), а также

планируется к применению в наблюдениях на радиотелескопе следующего поколения SKA. В более отдалённом будущем этот метод может служить дополнением основного способа детектирования для космических лазерных интерферометров типа eLISA, которые планируется ввести в строй в середине 2030-х годов.

Разработанный автором метод поиска гравитационных волн в диапазоне сверхнизких частот путём анализа вращательных параметров пульсара увеличивает чувствительность к гравитационно-волновому фону в данном диапазоне на 2-3 порядка. Будущие наблюдения на радиотелескопе SKA, вероятно, позволят поставить ещё более строгие ограничения на величину этого фона.

Полученные автором ограничения на класс альтернативных теорий гравитации, которые предсказывают отличие скорости распространения гравитационных волн от скорости света, имеют фундаментальную значимость.

Построенная автором модель магнитного поля Галактики применяется для решения ряда научных задач: для изучения распространения космических лучей в Галактике и поисков анизотропии космических лучей сверхвысоких энергий, поисков темной материи, аксионов, аксионоподобных частиц и др.

Полученные автором по данным наблюдений нейтронных звёзд в шаровых скоплениях и карликовых сфероидальных галактиках ограничения на распространённость первичных черных дыр в Галактике исключают первичные чёрные дыры как возможный основной компонент тёмной материи, что важно для космологии ранней Вселенной.

Личный вклад соискателя в получение результатов, изложенных в диссертации, является определяющим.

К сожалению, представленная диссертация **не свободна от недостатков**, перечисленных ниже.

- В главе 1 рассмотрены ограничения на возможное слабое отклонение скорости гравитационных волн от скорости света. При этом подразумевается распространение электромагнитных (ЭМ) волн в вакууме. В реальности ЭМ волны распространяются в космической плазме и их фазовые и групповые скорости отличаются от c . Хотя это отличие для разреженной космической плазмы мало, его влияние на наблюдательные проявления слабого эффекта, связанного с возможным малым отличием скорости гравитационных волн от скорости света, может быть заметным, что следовало бы обсудить более подробно.
- В разделе 2.2 в формуле (2.32) допущена опечатка, во второй круглой скобке у дроби не приведен знаменатель. Также не хватает обсуждения частотных зависимостей и возможного относительного вклада конкурирующих процессов (эффект Зельдовича-Сюняева и др.) в анизотропию реликтового излучения, по сравнению с рассматриваемым автором эффектом.
- В разделе 2.4 рассмотрено возможное усиление магнитного поля при слиянии двух нейтронных звёзд до сверхвысоких значений порядка 10^{16} Гс. Последние результаты численного моделирования показывают, что этот процесс может останавливаться при достижении величины поля порядка 10^{15} Гс.
- В разделе 5.3 исследовано только распространение протонов космических лучей

сверхвысоких энергий. Рассмотрение распространения в магнитных полях и более тяжёлых ядер также было бы желательным.

- В работе используется много аббревиатур, некоторые из которых не определены в тексте явно и не описаны в списке сокращений. Например, не раскрыта аббревиатура ПМП - первичные магнитные поля.
- На многих графиках и рисунках встречаются подписи и обозначения на английском языке.

Высказанные замечания не умаляют высокого уровня работы и полученных результатов.

Диссертация М.С. Пширкова является законченным научным трудом. Полученные автором результаты имеют существенное значение для астрофизики, теории гравитации, физики элементарных частиц и космологии. 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 19 апреля 2016 года (протокол № 26 от 19.04.2016), по результатам которого был составлен данный отзыв.

Таким образом, диссертация Пширкова Максима Сергеевича на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.02 – теоретическая физика и 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, **а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.02 – теоретическая физика и 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.**

Отзыв составил:

секретарь астрофизического семинара,
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

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

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

А.М. Быков

Список основных публикаций работников ведущей организации по тематике
диссертации в рецензируемых журналах за последние 5 лет

1. D.G. Yakovlev, General relativity and neutron stars, *International Journal of Modern Physics A*, Volume 31, Issue 2n03, id. 1641017 (2016)
2. S. A. Balashev, E. E. Kholupenko, J. Chluba, A. V. Ivanchik, D. A. Varshalovich, Spectral Distortions of the CMB Dipole, *Astrophysical Journal*, Volume 810, Issue 2, article id. 131 (2015).
3. А. В. Иванчик, А. Балашев, Д. А. Варшалович, В.В. Клименко, Молекулярные облака H_2/HD в ранней Вселенной. Независимый способ оценки концентрации барионов во Вселенной, *Астрономический журнал*, т. 92. № 2. стр. 119 (2015).
4. A. M. Bykov, D. C. Ellison, P. E. Gladilin, S. M. Osipov, Ultrahard spectra of PeV neutrinos from supernovae in compact star clusters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 453, Issue 1, p.113-121 (2015)
5. А.М. Быков, Е.М. Чуразов, С. Ferrari, W.R. Forman, J.S. Kaastra, U. Klein, M. Markevitch, J. de Plaa, Structures and Components in Galaxy Clusters: Observations and Models, *Space Science Reviews*, Volume 188, Issue 1-4, pp. 141-185 (2015)
6. M.V. Beznogov, D.G. Yakovlev, Statistical theory of thermal evolution of neutron stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 447, Issue 2, p.1598-1609 (2015)
7. A.I. Chugunov, Differential rotation and r-modes in magnetized neutron stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 451, Issue 3, p.2772-2779 (2015)
8. O.A. Goglichidze, D.P. Barsukov, A.I. Tsygan, Magnetic field inertia and rotation dynamics of radio pulsars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 451, Issue 3, p.2564-2574 (2015)
9. A.M. Bykov, Nonthermal particles and photons in starburst regions and superbubbles, *Astronomy and Astrophysics Review*, Volume 22, article id.77 (2014)
10. A.D. Kaminker, A.A. Kaurov, A.Y. Potekhin, D.G. Yakovlev, Thermal emission of neutron stars with internal heaters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 442, Issue 4, p.3484-3494 (2014)
11. A. Bykov, N. Gehrels, H. Krawczynski, M. Lemoine, G. Pelletier, M. Pohl, Magnetic Fields in Cosmic Particle Acceleration Sources, *Space Science Reviews*, Volume 166, Issue 1-4, pp. 71-95 (2012)
12. F. Aharonian, A. Bykov, E. Parizot, V. Ptuskin, A. Watson, Cosmic Rays in Galactic and Extragalactic Magnetic Fields, *Space Science Reviews*, Volume 166, Issue 1-4, pp. 97-132 (2012)
13. M. Brüggén, A. Bykov, D. Ryu, H. Röttgering, Magnetic Fields, Relativistic Particles, and Shock Waves in Cluster Outskirts, *Space Science Reviews*, Volume 166, Issue 1-4, pp. 187-213 (2012)
14. A. M. Bykov, G.G. Pavlov, A.V. Artemyev, Yu.A. Uvarov, Twinkling pulsar wind nebulae in the synchrotron cut-off regime and the γ -ray flares in the Crab Nebula, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Volume 421, Issue 1, pp. L67-L71 (2012)
15. A.M. Bykov, D.C. Ellison, M. Renaud, Magnetic Fields in Cosmic Particle Acceleration Sources, *Space Science Reviews*, Volume 166, Issue 1-4, pp. 71-95 (2012)