

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Пширкова Максима Сергеевича
“Радиоастрономические ограничения на модели фундаментальной физики и
астрофизики”

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальностям 01.04.02 — теоретическая физика и 01.03.02 - астрофизика и
звездная астрономия

В XXI веке, благодаря проведенным уникальным наблюдательным экспериментам, космология стала одним наиболее развиваемых направлений современной физики и астрофизики. С высокой точностью, превышающей 5%, были установлены величины основных космологических параметров, описывающих сценарий расширения Вселенной от Большого Взрыва до наших дней. Ведущую роль в этих исследованиях сыграли радиоастрономические наблюдения, проведенные как на Земле, так и в космосе. Особенно значительные среди них — космические миссии WMAP NASA и Planck ESA, в результате которых получены не только новые точные данные по распределению различных фоновых компонент на полном небе, но также разработано уникальное оборудование, развит новый математический аппарат и созданы новые мощные программные комплексы для анализа данных. Важным этапом в понимании физики Вселенной стали играть гравитационные эксперименты. В сентябре 2015 г. зафиксирован сигнал на интерферометрическом гравитационном телескопе LIGO, соответствующий всплеску гравитационных волн, возникающих при слиянии черных дыр. Событие подтвердило наши представления о гравитации, описываемые общей теорией относительности А.Эйнштейна, и активизировало работы по поиску и исследованию проявления гравитационных волн в разных астрофизических экспериментах. Поэтому предлагаемая диссертация Максима Сергеевича Пширкова, посвященная исследованию возможности измерения физических и космологических параметров астрофизическими методами, а также установлению новых пределов на их значения, несомненно актуальна.

Целями диссертационной работы М.С. Пширкова являются поиск гравитационных волн в новых частотных диапазонах с использованием метода пульсарного хронометрирования, установление ограничений на модели темной материи по данным наблюдений пульсаров, построение модели регулярного галактического магнитного поля, ограничение амплитуды его случайной компоненты, а также внегалактического магнитного поля, и оценка уровня влияния этих полей на распространение космических лучей сверхвысоких энергий.

Диссертация содержит семь глав, включая Введение и Заключение, список сокращений и обозначений, список литературы, а также два Приложения.

Во **Введении** дается описание преимуществ применения физических характеристик пульсаров, включающих остаточные уклонения моментов прихода импульсов, для поиска и исследования гравитационных волн, а также эффектов взаимодействия с массивными объектами. Обосновывается важность радиоастрономических наблюдений как при измерении параметров пульсарного тайминга, так и при исследовании галактических и внегалактических магнитных полей. Рассматривается применение астрономических методов, включая моделирование магнитных полей Галактики, в гравитационной физике и физике космических лучей сверхвысоких энергий. Кроме того, во Введении обосновывается актуальность темы исследования, ставятся цели и задачи диссертационной работы, показываются ее научная новизна и теоретическая и практическая значимость. Также во Введении приводятся выносимые на защиту положения работы, список основных публикаций и выступлений с апробацией результатов, указан личный вклад автора.

В **Главе 1** диссертации исследуются остаточные уклонения момента прихода импульсов пульсаров как инструмента анализа прохождения гравитационных волн и делается

оценка ограничения на альтернативные теории гравитации из пульсарных наблюдений. В первом разделе было показано, что по данным современных пульсарных наблюдений удается ограничить различие в скорости распространения гравитационных и электромагнитных волн на относительном уровне $< 4 \times 10^{-3}$. Во втором разделе исследуется возможное влияние массивного гравитона, которое он мог бы оказать как один из кандидатов на роль темной материи, на высокочастотные наблюдения и показывается, что существующая чувствительность эксперимента позволяет исключить его как кандидата.

Глава 2 посвящена построению методики наблюдений гравитационных волн. Анализ вращательных параметров пульсаров может быть использован для поиска волн в диапазоне сверхнизких частот $10^{-12} - 10^{-8}$ Гц. По данным измерения второй производной частоты вращения пульсаров получены ограничения на плотность энергии в гравитационно-волновом фоне в этом диапазоне частот: $\Omega_{\text{gw}} < 2 \times 10^{-6}$. Рассмотрены эффекты взаимодействия гравитационно-волнового фона в диапазоне высоких частот с крупномасштабным магнитным полем и приложения гравитон-фотонной конверсии (эффекта Герценштейна) к задаче поиска гравитационных волн. Показано, как наличие значительного стохастического фона на высоких частотах (> 100 МГц) может вызвать искажения в наблюдаемом спектре реликтового излучения. Получено ограничение на плотность высокочастотного гравитационно-волнового фона на уровне $\Omega_{\text{GW}} \lesssim 1$. Исследованы гравитационно-волновые всплески с памятью от слияний сверхмассивных черных дыр в методе пульсарного хронометрирования и показано, что будущие пульсарные наблюдения будут в состоянии обнаружить индивидуальные всплески гравитационных волн, которые сопровождают слияния сверхмассивных черных дыр. Предложен метод оценивания числа детектирований всплесков с памятью для ансамбля пульсаров. Метод может быть реализован на радиотелескопе SKA. Также рассмотрен результат слияния нейтронных звезд, приводящего к появлению быстро вращающегося и сильно замагниченного объекта, который может наблюдаться как радиотранзиент на радиотелескопе LOFAR.

Глава 3 посвящена исследованию распределения масс в Галактике с помощью метода пульсарного хронометрирования. По данным остаточных уклонений моментов прихода импульсов из центральной области Млечного Пути можно изучать распределение масс в центре Галактики. Кроме того, наблюдения пульсаров позволяют ограничить распространенность легких космических струн в Галактике. Получена оценка ограничения плотности легких струн в Млечном Пути в единицах критической плотности на уровне $\Omega_s \sim 10^{-3}$ для струн с натяжением $G\mu/c^2 = 10^{-14}$, которую предлагается улучшить после запуска радиотелескопа SKA. В этой же главе развит формализм расчета ограничения космологической плотности струн по данным переменности внегалактических источников.

В **Главе 4** устанавливаются ограничения на распространенность во Вселенной первичных черных дыр из данных астрономических наблюдений. Для этой цели исследуются сценарии эволюции объектов при захвате первичной черной дыры нейтронной звездой, а также звездами главной последовательности. Кроме того, в этой главе рассматривается распространенность первичных черных дыр как компонентов темной материи и проводится численное моделирование с участием ~ 30 миллионов пробных частиц для изучения эволюции темной материи в эпоху звездообразования в ядрах малометаллических шаровых скоплений или карликовых сфероидальных галактиках. В результате чего устанавливаются новые ограничения на распространенность первичных черных дыр.

В **Главе 5** исследуются галактические и внегалактические магнитные поля с ис-

пользованием данных по мерам вращений радиоисточников подвыборки каталога NVSS, содержащей ~ 37.5 тыс. объектов, а также данных для ~ 1500 радиоисточников из обзоров Canadian Galactic Plane Survey и Southern Galactic Plane Survey. Рассматривается двухкомпонентная модель галактического поля, состоящая из поля диска и гало, с независимой параметризацией каждой компоненты. Для случайной компоненты магнитного поля Галактики исследуется распространение космических лучей сверхвысоких энергий; в частности, для протонов энергии $E \gtrsim 4^{19}$ эВ построена карта отклонений. Кроме того, в Главе 5 на основе данных каталога по мерам вращения исследуются внегалактические магнитные поля. В частности, из-за отсутствия эволюции собственных мер вращения слабых источников, удалось ограничить силу космологических магнитных полей.

В Заключение сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Одним из основных результатов диссертации, на мой взгляд, является теоретический прогноз величин оцениваемых параметров, оформленный в виде ожидаемых значений измеряемых параметров на современных (как LOFAR) или строящихся (как SKA) радиотелескопах. В этом плане особенно выделяются Главы 2, 3 и 5.

Научная новизна работы определяется тем, что

- 1) получены ограничения на плотность высокочастотных гравитационных волн ($> 10^{10}$ Гц) из наблюдений реликтового излучения;
- 2) предложен новый метод поиска гравитационных волн в диапазоне $10^{-12} - 10^{-8}$ Гц путем анализа параметров вращения пульсаров;
- 3) по данным хронометрирования пульсаров установлено ограничение на альтернативные теории гравитации, в которых скорость распространения грав. волн не совпадает со скоростью света;
- 4) получены ограничения, исключающие заметный вклад в плотность темной материи таких кандидатов, как массивные гравитоны и петли космических струн;
- 5) предложен новый способ детектирования гравитационно-волнового всплеска от слияния сверхмассивных черных дыр с использованием метода пульсарного хронометрирования;
- 6) по данным о мерах вращения радиоисточников каталога NVSS построена детальная модель регулярного галактического магнитного поля и получены ограничения на свойства случайной компоненты галактического поля;
- 7) по данным наблюдений пульсаров в шаровых скоплениях были получены ограничения на распространенность первичных черных дыр в широком диапазоне их масс, которые позволяют исключить их как заметный компонент темной материи Вселенной.

Практическая значимость состоит в том, что

- 1) предложен метод поиска всплесков гравитационных волн в диапазоне частот $10^{-12} - 10^{-8}$ Гц путем анализа вращательных параметров пульсара;
- 2) построенная модель магнитного поля Галактики;
- 3) получены ограничения на распространенность первичных черных дыр в гало Млечного Пути.

Диссертация нашла полное отражение в 24 публикациях, включая журналы “Physical Review Letters” “Physical Review D”, “Astrophysical Journal” “Monthly Notices of the Royal Astronomical Society” “Астрономический журнал” “Письма в АЖ” и ряд других, удовлетворяющих списку и требованиям ВАК.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов не вызывают сомнения, поскольку они основаны на адекватном применении математического аппарата, подтверждаются в ряде случаев результатами численного моделирования, а также результатами исследований других авторов.

Диссертация написана хорошим языком с малым числом опечаток и пунктуационных ошибок.

Имеется ряд мелких *замечаний*:

В диссертации для оценок величин используются слегка устаревшие значения космологических параметров эксперимента WMAP7, в то время как имеются результаты их измерений по данным миссии Planck (2015).

Среди опечаток можно отметить следующие: на странице 42, строка 7, снизу опечатка в слове “материи” (“роль темной матери”); на странице 53, строка 5, несогласование множественного числа (“магнитные поле”); на странице 53, строка 14, образована новая форма слова — множественное число для существительного “анизотропия” (“анизотропий”), на странице 229 в ссылке 100 не указан год; в Главе 2 в обозначении единиц частоты “ГГц” (“ГигаГерц”) вторая буква записывается как прописная (например, на стр.59), что неверно, в то время как в других главах обозначение корректное; в автореферате на странице 23 в середину слова “внегалактических” впечатано число ‘22’; имеется и ряд других опечаток.

На странице 60 диссертации (строка 6 снизу) говорится об “анизотропной вероятности”, по-видимому, имеется ввиду анизотропное распределение вероятности.

Список используемых сокращений в конце диссертации не полный: например, отсутствуют ‘КА’ (космический аппарат), ‘ПМП’ (первичные магнитные поля) и другие.

Необходимо отметить, что предложенный в диссертации метод восстановления магнитного поля Галактики по мерам Фарадеевского вращения не является единственным. Так, в работе (Orpermann et al., 2012, A&A, 542, A93O, arXiv:1111.6186) предложен метод восстановления карты распределения меры Фарадеевского вращения в нашей Галактике с разрешением до $15'$ ($l_{\max}=383$) по данным 41330 радиисточников каталога NVSS с использованием расширенного критического фильтра (extended critical filter) в процедуре разделения компонент. Отметим, что карта магнитного поля, полученная диссертантом, содержащая низкие гармоники, топологически близка аналогичной карте в методе Orpermann et al. на низких гармониках. Кроме того, карты магнитного поля были представлены и в данных эксперимента Planck 2016 г. (Planck Collaboration: R. Adam, et al. Planck intermediate results. XLII. Large-scale Galactic magnetic fields. arXiv:1601.00546), где используются другие модели магнитного поля. Имело бы смысл добавить несколько слов о сравнении соответствующих моделей.

Перечисленные замечания носят, скорее, редакционный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение. Считаю, что представленная диссертационная работа является исследованием, имеющим большое научное и практическое значение в задачах поиска и изучения гравитационных волн, пульсарного хронометрирования, изучения темной материи, физики крупномасштабных магнитных полей и космических лучей сверхвысоких энергий. Диссертант показал свою высокую квалификацию в решении теоретических астрофизических задач, в интерпретации наблюдательных данных и сделал теоретические оценки значений параметров, которые могут быть проверены экспериментально в наблюдениях на современных радиотелескопах. Диссертация удовлетворяет всем требованиям “Положения о порядке присуждения ученых степеней” ВАК РФ, предъявляе-

мым к докторским диссертациям, а диссертант Пширков Максим Сергеевич *несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук* по специальностям 01.04.02 — “Теоретическая физика” и 01.03.02 — “Астрофизика и звездная астрономия”.

Официальный оппонент

докт.физ.-мат.н., вед.н.с. Верходанов Олег Васильевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН)

пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская респ., 369167

т. 8-87878-46329, адрес эл.почты: vo@sao.ru

Подпись Верходанова О.В. удостоверяю

Ученый секретарь САО РАН, к.ф.-м.н.

/ Е. И. Кайсина /

12.04.2016 г.

Верходанов Олег Васильевич

Ведущий научный сотрудник Специальной астрофизической
обсерватории Российской академии наук (САО РАН),

доктор физико-математических наук (01.03.02)

Основные публикации по теме защиты:

1. A.G.Doroshkevich, O.V.Verkhodanov, 2011, CMB component separation in the pixel domain. *Physical Review D*, V.83, No.4, 3002, arxiv:1008.4094.
2. М.Л.Хабибуллина, О.В.Верходанов, 2011, К вопросу о возможности оценки масс черных дыр далеких радиогалактик. *Астрон. Ж.*, т.88, No 4, с. 333-341, arXiv:1108.4506.
3. A.G.Doroshkevich, O.V.Verkhodanov, P.D.Naselsky, Ja.Kim, D.I.Novikov, V.I.Turchaninov, I.D.Novikov, L.-Y. Chiang, M.Hansen. 2011, The Gauss-Legendre Sky Pixelization for the CMB polarization (GLESP-pol). Errors due to pixelization of the CMB sky. *Int. J. Mod. Phys. D*, v.20., Iss.6, p.1053-1078, arXiv: 0904.2517.
4. O.V.Verkhodanov, M.L.Khabibullina. 2011. Statistics of WMAP ILC map temperature fluctuations towards distant radio galaxies. *Astrophys. Bull.*, 2011, V.66, No.2, p.183-189, arXiv:1108.4377.
5. Ya.V. Naiden, O.V. Verkhodanov. 2011. Determination of microwave background map inhomogeneity from angular power spectrum. *Astrophys. Bull.*, 2011, V.66, No.3, p.345-354.
6. O.V. Verkhodanov and A.A.Basova. Non-Gaussianity of Peak Statistics in Contrasting Spots of WMAP ILC. *Astrophys. Bull.*, V.66, No.4, p.407-415 (2011).
7. P.Naselsky, C.H.Christensen, P.R.Christensen, P.H.Damgaard, A.Frejsel, J.J.Gaardhoje, A.Hansen, M.Hansen, J.Kim, O.Verkhodanov, U.A.Wiedemann, Morphology of high-multiplicity events in heavy ion collisions. *Phys. Rev. C*, V.86, 024916, arXiv:1204.0387 (2012)
8. M. Hansen, W.Zhao, A.M.Frejsel, P.D.Naselsky, J.Kim, O.V.Verkhodanov., 2012, Faraday rotation as a diagnostic of Galactic foreground contamination of cosmic microwave background maps. *MNRAS*, V.426, Iss.1, P.57-69 (2012), arXiv:1202.1711

9. О.В. Верходанов. 2012. Поиск негауссовости в наблюдательных данных по реликтовому микроволновому фону, УФН, т.182, No 11, 1177-1193 (2012).
10. Ya.V.Naiden, O.V.Verkhodanov. 2013. Power spectrum distortions in CMB map one-dimensional cross-sections depending on the cosmological model. *Astrophys. Bull.*, 2013, V.68, No.2, p.226-235.
11. Ya. V. Naiden, O. V. Verkhodanov. Correlation properties of the WMAP CMB and 2MRS and SDSS catalogs at different redshifts. *Astrophys. Bull.*, 2013, V.68, No.4, p.471-480.
12. Yu.N.Parijskij, P.Thomasson, A.I.Kopylov, O.P.Zhelenkova, T.W.B.Muxlow, R.Beswick, N.S.Soboleva, A.V.Temirova, O.V.Verkhodanov. Observations of the $z = 4.514$ radio galaxy RC J0311+0507. *MNRAS* 439, 2314-2322 (2014).
13. Д.И. Соловьев, О.В. Верходанов. Поиск и исследование слабых радиогалактик большого углового размера по данным обзора NVSS. *Астрон. Ж.*, т.91, No8, с.592-602 (2014).
14. O.V.Verkhodanov. Comparison of Low-Harmonics Spectra and Maps According to the WMAP and Planck Space Missions. *Astrophys. Bull.* V.69, Iss.3, 330-338 (2014)
15. О.В. Верходанов. Космологические результаты космической миссии "Планк". Сравнение с данными экспериментов WMAP и ВІСЕР2. УФН 186, No1, с.3-46 (2016)