

*На правах рукописи*

**ПШИРКОВ**  
**Максим Сергеевич**

**Радиоастрономические ограничения  
на модели фундаментальной физики  
и астрофизики**

01.04.02 – теоретическая физика,  
01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в Государственном астрономическом институте имени П.К. Штернберга ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

**Официальные оппоненты:**

*Верходанов Олег Васильевич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, лаборатория радиоастрофизики, ведущий научный сотрудник.

*Сазонов Сергей Юрьевич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, отдел астрофизики высоких энергий, сектор научной поддержки обсерватории Спектр-РГ, заведующий сектором.

*Семикоз Виктор Борисович*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), теоретический отдел, заведующий отделом.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Защита состоится 09 июня 2016 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), расположенном по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте [www.inr.ru](http://www.inr.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

С.В. Троицкий

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы исследования.** Несмотря на то что базовые теории физики, а именно ОТО и Стандартная модель (СМ) физики частиц, проверены на очень высоком уровне точности, очевидно, что они не являются истинно фундаментальными теориями и, следовательно, эти теории должны быть в итоге расширены и улучшены. Так, для примера, в рамках СМ может быть объяснено менее 5% от общего состава Вселенной, пока необъясненные тёмная материя и тёмная энергия, составляющие более 95% [25], требуют какой-то “новой физики” за пределами СМ (или значительной модификации ОТО [26]). В связи с этим всё активнее развивается направление астрофизики частиц: использование астрономических наблюдений и объектов для изучения эффектов физики высоких энергий и, в частности, проверки расширений стандартных теорий. Такие исследования взаимодополняют эксперименты в лабораториях, так как большая часть пространства параметров вряд ли когда-то (или хотя бы в обозримом будущем) будет доступна для наземных экспериментов. Яркими примерами служат исследование поведения материи при плотностях выше ядерных путем изучения пульсаров [27] и наблюдения космических лучей сверхвысоких энергий [28]. Большинство ключевых для астрофизики частиц объектов наблюдается в радиодиапазоне и, учитывая очень высокую чувствительность, уже достигнутую радиотелескопами, наблюдения в этом диапазоне очень важны для развития этой новой отрасли и расширения нашего знания о фундаментальных теориях физики.

**Цели и задачи диссертационной работы.** Настоящая работа посвящена исследованию ряда важных вопросов фундаментальной физики и астрофизики высоких энергий различ-

ными методами наблюдательной радиоастрономии. Целями ее являются:

- Постановка ограничений на свойства широкого класса моделей темной материи и альтернативных теорий тяготения из наблюдений пульсаров.
- Поиск гравитационных волн в новых, ранее слабо исследованных частотных диапазонах и поиск всплесков гравитационных волн от слияния сверх массивных черных дыр.
- Построение модели регулярного галактического магнитного поля и получение ограничений на свойства случайной компоненты галактического и внегалактического поля и оценка влияния этих магнитных полей на распространение космических лучей сверхвысоких энергий.

**Научная новизна.** В ходе выполнения работы впервые было получено несколько важных результатов:

- Получены ограничения на плотность высокочастотных гравитационных волн ( $> 10^{10}$  Гц) из наблюдений реликтового излучения, которые более чем на 20 порядков улучшили существовавшие ограничения из прямых наблюдений.
- Предложен новый метод поиска гравитационных волн в диапазоне  $10^{-12}$ –  $10^{-8}$  Гц путем анализа параметров вращения пульсаров. Этот метод улучшает предыдущие ограничения более чем на 2 порядка.
- Из хронометрирования пульсаров поставлено ограничение на альтернативные теории гравитации, в которых скорость распространения ГВ не совпадает со скоростью света, также получены ограничения, исключаящие заметный вклад в плотность темной материи таких кандидатов, как массивные гравитоны и петли космических струн.

- Предложен новый способ детектирования гравитационно-волнового всплеска от слияния сверхмассивных черных дыр с использованием метода пульсарного хронометрирования, получены оценки для существующих и строящихся инструментов.
- На основе наиболее полного существующего набора фарадеевских мер вращений внегалактических источников была построена детальная модель регулярного галактического магнитного поля и получены ограничения на свойства случайной компоненты галактического поля. Были получены наиболее сильные на сегодняшний день ограничения на силу магнитных полей на космологических масштабах, применимые к полям на  $z \geq 3$ . Построенные модели полей были использованы для оценки отклонений наблюдаемых космических лучей сверхвысоких энергий.
- Из наблюдений пульсаров в шаровых скоплениях были получены ограничения на распространенность первичных черных дыр в широком диапазоне их масс ( $10^{17}$ –  $3 \times 10^{24}$  г), которые позволяют исключить их как заметный компонент темной материи Вселенной.

**Теоретическая и практическая значимость.** Предложенный в работе метод поиска всплесков гравитационных волн от слияния сверхмассивных черных дыр применяется в современных [29, 30] и планируемых пульсарных наблюдениях. В дальнейшем этот метод будет дополнять основной способ детектирования с помощью космического интерферометра типа eLISA, который может быть введен в строй в 2030-х.

Разработанный метод поиска ГВ в диапазоне частот  $10^{-12}$ – $10^{-8}$  Гц путем анализа вращательных параметров пульсара увеличивает чувствительность в данном диапазоне на 2–3 порядка.

В будущем, с наблюдениями на радиотелескопе SKA, эта чувствительность возрастет еще больше. Значимость этого заключается в том, что этот частотный диапазон не может быть исследован никакими другими методами, так как “интерферометрические” методы чувствительны к гораздо более высоким частотам, а наблюдения реликтового излучения к гораздо более низким.

Ограничения на теории гравитации, в которых скорость распространения гравитационных волн отличается от скорости света, являются общими; в дальнейшем эти ограничения будут усиливаться с увеличением чувствительности пульсарных наблюдений.

Построенная модель магнитного поля Галактики активно применяется во многих научных задачах, таких как изучение распространения космических лучей в Галактике, изучение синхротронного излучения Галактики, поиск темной материи и аксионов и аксионоподобных частиц и др.

Полученные ограничения на распространенность первичных черных дыр в гало Галактики, которые исключают ПЧД как основной компонент темной материи в диапазоне масс  $10^{17} - 3 \times 10^{24}$ , закрывают это последнее “окно”, не ограниченное ранее. Так как ПЧД могли образовываться на самых первых стадиях космологической эволюции, показанное отсутствие их доминирования в общем балансе темной материи важно для исследований ранней Вселенной.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Получены ограничения на плотность высокочастотных гравитационных волн ( $> 10^{10}$  Гц) из наблюдений реликтового излучения.
2. Предложен новый метод поиска гравитационных волн в ди-

апазоне  $10^{-12}$ – $10^{-8}$  Гц путем анализа параметров вращения пульсаров.

3. Из хронометрирования пульсаров поставлено ограничение на альтернативные теории гравитации, в которых скорость распространения ГВ не совпадает со скоростью света.
4. Получены ограничения, исключаящие 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, получены оценки для существующих и строящихся инструментов.
6. На основе наблюдательных данных каталога мер вращения NVSS построена детальная модель регулярного галактического магнитного поля и получены ограничения на свойства случайной компоненты галактического поля и отклонения космических лучей сверхвысоких энергий в ней.
7. Получены ограничения на эволюцию собственных мер вращения внегалактических источников с красным смещением и на силу космологических магнитных полей. Для корреляционной длины  $l_c = 1$  Мпк получено ограничение  $B < 1.2$  нГс ( $2\sigma$ ), что превосходит последние ограничения, полученные из наблюдений реликтового излучения телескопом “Планк”, и, в отличие от них, приложимо не только к первичным магнитным полям.
8. Получены ограничения на распространенность первичных черных дыр в широком диапазоне их масс ( $10^{17}$ – $3 \times 10^{24}$  г), исключаящие их как главный компонент темной материи Вселенной.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях:

1. Семинар ГАИШ МГУ по гравитации и космологии им. Зельманова.
2. Координационный совет по Астрофизике ГАИШ МГУ.
3. Семинар ОТФ ИЯИ РАН.
4. Отчетные научные сессии АКЦ ФИАН.
5. “JD 16: Nomenclature, Precession and New Models in Fundamental Astronomy” in XXVI International Astronomical Union General Assembly (IAU GA), 14-25 August 2006, Prague, Czech republic.
6. “Simulations for the Square Kilometre Array”, 30 July to 1 August, 2007 Pushchino, Russia.
7. XXXVII Young European Radio Astronomers Conference 4-7 September 2007, Bordeaux, France.
8. Школа “Проблемы современной астрометрии“, 22-26 октября 2007, Звенигород, Россия.
9. Symposium "Radio Universe at Ultimate Angular Resolution October 20-24, 2008, Moscow, Russia.
10. Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра“ (HEA-2008), 24-26 декабря 2008, Москва, Россия.
11. Всероссийская астрометрическая конференция “Пулково-2009“, 15-19 июня 2009, Пулково, Россия.
12. “JD 6: Time and astronomy” in XXVII International Astronomical Union General Assembly (IAU GA), 3-14 August 2009, Rio de Janeiro, Brazil.
13. Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра“ (HEA-2009), 21-24 декабря 2009, Мо-

- сква, Россия.
14. Scientific workshop "International pulsar timing array-2010", 21 June-2 July, 2010, Leiden, The Netherlands.
  15. 32nd International Cosmic Ray Conference, August 11-18, 2011, Beijing, China.
  16. VIII Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics, September 2–7, 2012, Lenzkirch-Saig, Germany.
  17. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра" (HEA-2012), 24-27 декабря 2012, Москва, Россия.
  18. XXX конференция "АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ" 8–10 апреля 2013 г, Пущино, Россия.
  19. International Workshop and School "Black and Dark Topics in Modern Cosmology and Astrophysics", 15-22 September 2013, Dubna, Russia.
  20. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра" (HEA-2014), 22-25 декабря 2014, Москва, Россия.
  21. XII съезд Международной общественной организации «Астрономическое общество» и приуроченная к нему научная конференция «Астрономия от ближнего космоса до космологических далей», 25 -30 мая 2015, ГАИШ, МГУ, Москва.
  22. 34th International Cosmic Ray Conference, July 30 -August 6, 2015, The Hague, The Netherlands.
  23. 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, 20-26 August 2015, Moscow, Russia.
  24. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра" (HEA-2015), 21-24 декабря 2015, Москва, Россия.

**Список публикаций по теме диссертации.** Материалы диссертации опубликованы в 24 печатных работах, из них 17 статей в рецензируемых журналах, 5 статей в сборниках трудов конференций и 2 тезиса докладов.

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. В работах, где диссертант выступает первым соавтором, ему, как правило, принадлежат постановка задачи и оформление статьи, а также равный со всеми соавторами вклад в работу. Во всех остальных публикациях диссертант, как правило, внес одинаковый со всеми соавторами вклад в выполнение исследования.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографии и приложений. Общий объем диссертации 314 страниц, из них 218 страницы основного текста и 60 страниц приложений, включая 49 рисунков. Библиография включает 370 наименований на 33 страницах.

## **Содержание работы**

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** исследуются ограничения на альтернативные теории гравитации, возникающие из высокоточных радионаблюдений.

**В разделе 1.1** "Ограничение на скорость распространения гравитационных волн из метода пульсарного хронометрирова-

ния“ было проанализировано к каким возможным наблюдаемым проявлениям в пульсарных наблюдениях может приводить предложенный в [31] ”сёрфинг-эффект“. Этот эффект из-за поперечного характера гравитационных волн (ГВ) может приводить к значительным наблюдательным последствиям только тогда, когда скорость распространения ГВ больше скорости света  $c$ . Был введён феноменологический параметр  $\epsilon$ , характеризующий отличие скорости ГВ от  $c$ . Вначале было получено выражение для остаточных уклонений моментов прихода импульсов (ОУ МПИ), возникающих при распространении сигнала в поле плоской монохроматической волны, которое затем было обобщено на случай произвольного гравитационно волнового поля. Было показано, что эффект присутствует при  $\epsilon \neq 0$ . Таким образом, пульсарные наблюдения позволяют значительно ограничить параметр  $\epsilon$ . Высокоточные пульсарные наблюдения с СКО ОУ МПИ  $R_{rms} = 0.1$  мкс позволяют ограничить этот параметр на уровне  $\epsilon \leq 0.4\%$ , если плотность ГВФ не слишком сильно отличается от предсказываемой различными сценариями эволюции популяции сверхмассивных чёрных дыр (СМЧД). Теоретически достижимый предел определяется параметром  $\epsilon_*$ , зависящим от расстояния до пульсара. Для пульсара на расстоянии  $D = 10$  кпк эта величина составляет  $\epsilon_* \approx 0.3\%$ . Этот предел потенциально может быть немного усилен при наблюдении пульсаров на больших расстояниях  $D$ .

Альтернативным объяснением наблюдаемых проявлений тёмной материи и тёмной энергии может стать модификация используемой для описания Вселенной теории тяготения, ОТО. Среди большого количества этих вариантов модели массивной гравитации с нарушенной лоренц-инвариантностью кажутся привлекательными с теоретической точки зрения и обладают

богатой феноменологией (см. обзор [26]). В [32] была построена модель, где ГВ — массивны, в то время как линеаризованные уравнения для скалярных и векторных возмущений метрики и пространственно плоские космологические решения совпадают с решениями ОТО. В этой теории возникает добавочный член в уравнениях Фридмана, который эффективно действует как тёмная энергия и может объяснять ускоренное расширение Вселенной. Массивные гравитоны могли образовываться на ранних стадиях эволюции Вселенной в настолько большом количестве, что теперь они могли бы составлять всю тёмную материю [32]. Отличительным признаком ГВ, соответствующих массивным гравитонам, служит практически монохроматический сигнал ( $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-6}$ ), ширина которого задаётся скоростями вириальных движений холодных гравитонов в галактическом гало. Такие ГВ могли бы в значительном количестве существовать в диапазоне  $\sim 10^{-8} \text{ Гц} < \nu < \sim 3 \times 10^{-5}$ , не вступая в противоречие с наблюдениями в Солнечной системе и на галактических масштабах.

**В разделе 1.2** ”Ограничения на долю массивных гравитонов в тёмной материи Вселенной“ показано, что наблюдения стабильных миллисекундных пульсаров позволяют поставить строгий верхний предел на узкополосный ГВ сигнал в диапазоне частот  $\nu \leq 10^{-5} \text{ Гц}$ . Этот предел серьёзно ограничивает плотность массивных холодных гравитонов, которые могли бы быть основным компонентом тёмной материи (ТМ) в Галактике [33]. Современные астрометрические ограничения несколько более слабые. В частотном диапазоне  $\nu > 10^{-6} \text{ Гц}$  наиболее строгие ограничения следуют из наблюдений доплеровского слежения за КА ”Кассини“ [34].

Результаты первой главы опубликованы в работах [1–3].

**Во второй главе** рассматриваются методы поиска гравитационных волн в широком диапазоне частот с использованием наблюдений в радиодиапазоне.

**В разделе 2.1** "Поиск сверхнизкочастотных гравитационных волн с помощью измерений параметров вращения пульсаров" было показано, что измерение вращательных параметров пульсара может дать важную информацию о процессах с характерными временными масштабами превосходящими общую продолжительность наблюдений. Одним из таких процессов является влияние сверхнизкочастотных гравитационных волн на сигналы приходящие от пульсара. Измерения второй производной частоты вращения, собственная величина которой невелика, могут быть использованы для постановки ограничений на плотность энергии в гравитационно-волновом фоне (ГВФ) в частотном диапазоне  $10^{-12}$ – $10^{-8}$  Гц:

$$\Omega_{GW} < 2 \times 10^{-6}.$$

Также временные ряды частоты вращения  $\nu$  от разных пульсаров в пульсарном ансамбле могут быть попарно коррелированы. Присутствие ГВФ может приводить к существованию корреляции известной формы, идентичной рассматриваемой в обычном методе пульсарного хронометрирования. Этот метод может быть использован для поиска ГВФ в этом диапазоне вплоть до плотностей  $\Omega_{GW} < 10^{-7}$ .

**В разделе 2.2** "Ограничения на гравитационно-волновой фон в области высоких частот из-за его взаимодействия с крупномасштабным магнитным полем" было исследовано возможное приложение гравитон-фотонной конверсии (эффекта Герценштейна) в магнитных полях крупномасштабной структуры Вселенной к задаче поиска гравитационных волн с частотами

выше  $\sim$  ГГц. Была оценена вероятность конверсии в первичных магнитных полях и магнитных полях, связанных с скоплениями галактик и филаментами. Наибольшая вероятность достигается в случае, если существуют первичные магнитные поля с амплитудами порядка нГс. Существование достаточно мощного высокочастотного гравитационно-волнового фона вызывало бы появление наблюдаемых эффектов в спектре реликтового микроволнового излучения. Эти эффекты могли бы быть отделены от других источников отклонений в спектре, таких как эффект Сюняева-Зельдовича и эффекты галактического переднего плана, с использованием соответствующих частотных зависимостей для последних. Современные наблюдения позволяют заметно ограничить ВЧГВФ ( $\Omega_{GW} \lesssim 1$ ). Эти ограничения на 25 порядков величины сильнее прямых ограничений, ранее полученных в этом частотном диапазоне. При условии проведения специализированного эксперимента, направленного на поиск ГВФ в этом диапазоне этим методом, эти ограничения могут быть усилены ещё на 3-4 порядка.

**В разделе 2.3** ”Особенности гравитационно-волновых всплесков с памятью от слияний сверхмассивных чёрных дыр в методе пульсарного хронометрирования“ было показано, что будущие пульсарные наблюдения будут в состоянии обнаружить индивидуальные всплески гравитационных волн, которые сопровождают слияния сверхмассивных чёрных дыр. Всплеск с памятью с амплитудой  $\sim (1.5-2) \times 10^{-15}$  оставляет характерный след с отношением сигнал-шум  $\sim 3$  в рядах остаточных отклонений длиной в  $\sim 10$  лет при настоящем уровне чувствительности. Ожидается, что такой всплеск будет порождаться слиянием двух СМЧД равных масс  $\sim 3 \times 10^8 M_{\odot}$  на расстоянии в 1 Гпк. Слияния, которые производят такой сигнал, ожидаются с частотой

несколько раз в сотню лет. Число детектирований ВСП ансамблем пульсаров даётся выражением

$$N \simeq 10^{-1} \left( \frac{N_t}{250} \right) \left( \frac{N_\alpha}{250} \right) \left( \frac{T_{obs}}{10_{\text{год}}} \right)^3 \left( \frac{100_{\text{нс}}}{\sigma_n} \right)^2 \left( \frac{3}{\rho} \right)^2 \quad (1)$$

из которого очевидна сильная зависимость ожидаемой частоты от общей продолжительности наблюдений и уровня шума. Будущие наблюдения на радиотелескопе следующего поколения SKA с значительно уменьшенным уровнем шума и общим увеличением количества наблюдаемых пульсаров, будут обладать гораздо более высокой чувствительностью, что сделает предложенный метод полезным дополнением к наблюдениям в эксперименте eLISA. Метод нацелен на поиск сигналов от слияния самых массивных СМЧД с массами  $> 10^8 M_\odot$ , чувствительность же космических интерферометров к таким слияниям падает.

**В разделе 2.4** "Радиовсплески от слияния нейтронных звёзд" рассматривался процесс слияния двойных нейтронных звёзд, который может приводить к образованию дифференциально вращающегося массивного объекта. Это объект в итоге может коллапсировать в чёрную дыру, окружённую замагниченным тором. Численные симуляции [35] показывают, что магнитное поле этого объекта может усиливаться вплоть до очень значительных величин  $10^{15}$ – $10^{16}$  Гс. Такой объект способен служить источником короткого гамма-всплеска. До коллапса (и гамма-всплеска) этот объект может порождать релятивистское истечение плазмы. Небольшая доля мощности этого истечения может быть излучена в радиодиапазоне. Эффективность задаётся коэффициентом  $\eta$ , который может зависеть от полного темпа потери энергии  $\eta \propto (\dot{E})^\gamma$  по аналогии с поведением миллисекундных пульсаров.

В наиболее оптимистичном сценарии заявленная чувствительность радиотелескопа LOFAR на частоте 120 МГц позволит осуществить детектирование с уровнем сигнал-шум  $> 10$  коротких всплесков (собственная продолжительность 10–100 мс, растянутая рассеянием в межгалактической среде до  $\sim 100$  с) ассоциированных с короткими гамма-всплесками с расстояниями до  $z < 1.3$  на уровне  $\sim 90$  событий/год. При мере дисперсии  $1000 \text{ см}^{-3} \text{ пк}$  и наблюдениях на низких частотах 120 МГц, импульс будет задержан на  $\sim 300$  с по отношению к гамма-сигналу. Такой значительный промежуток времени позволяет произвести перенаправление синтезированной диаграммы направленности LOFAR.

Обнаружение нетепловых радиовсплесков, связанных с короткими гамма-всплесками, будет указывать на существование сверхсильных магнитных полей в механизме гамма-всплеска. Полученная мера дисперсии может служить для непосредственной оценки расстояния до гамма-всплеска. Поиск таких сигналов также может осуществляться в обзорах неба, производимых телескопом LOFAR, транзиенты со схожими характеристиками могут быть связаны с "орфанными" гамма-всплесками. Также информация от LOFAR может быть использована в совместном анализе с современными гравитационно-волновыми телескопами.

Результаты второй главы опубликованы в работах [4–7].

**В третьей главе** показано, что наблюдения пульсаров могут быть использованы также для исследования нестационарной метрики, отличной от гравитационно-волновой, например, метрики, создаваемой движущимися массивными телами. Тела могут быть точечными (звёзды, чёрные дыры и т.д.) и протяжёнными (космические струны)

**В разделе 3.1** "Распределение массы в Галактике по данным пульсарного хронометрирования" исследуется отклик метода пульсарного хронометрирования на прохождение массивного тела (точечного) вблизи направления на пульсар. Были сделаны следующие выводы: средние отклонения МПИ из-за эффекта слабого гравитационного микролинзирования составят около 10 нс для пульсара B1937+21, если время наблюдений превысит 20 лет. Эти отклонения могут быть сведены к нулю при использовании в процедуре обработки данных хронометрирования производных порядка выше квадратичного (не для пульсаров в шаровых скоплениях или за балджем), так как регрессионный полином высокого порядка замаскирует проявления эффекта, если время взаимодействия с линзой значительно превышает продолжительность наблюдений. Таким образом, применение этого метода при наблюдениях обычных пульсаров не даст никакой новой информации. Интереснее всего будут наблюдения пульсаров из центральной области Галактики, для них ОУ МПИ могут достигать значения в несколько мкс, что можно будет уверенно детектировать. Это позволит изучить распределение масс в центре Галактики, где использование других методов приводит к большим неопределённостям. Если пульсар находится в шаровом скоплении, то эти отклонения могут достигать величины в несколько сотен наносекунд за 20 лет, но они вероятнее всего будут меньше, чем ОУ, вызванные криволинейностью траектории собственного движения пульсара в шаровом скоплении.

Если во Вселенной существуют космические струны — объекты, теоретически предсказанные в различных вариантах расширения Стандартной модели частиц, то численные симуляции показывают, что они образуют сложную сеть с пересечениями и отдельными петлями. Эти петли будут скапливаться

в гравитационном потенциале, таким образом их плотность в Галактике будет повышена по отношению к средней космологической плотности.

**В разделе 3.2** "Ограничение на концентрацию лёгких космических струн в Галактике из пульсарных наблюдений" рассматривается, как наблюдения пульсаров позволяют ограничить распространённость этих объектов в Галактике – пересечение петлёй луча зрения на пульсар приведёт к скачку наблюдаемой частоты пульсара, схожему со скачком, вызываемым прохождением гравитационно-волнового всплеска с памятью (см. раздел 2.3). Этот скачок проявится в ОУ МПИ и анализ данных, полученных при наблюдениях пульсарных ансамблей, позволяет значительно ограничить распространённость лёгких космических струн в Галактике на уровне  $\Omega_s \sim 10^{-3}$  (в единицах критической плотности) для струн с натяжением  $G\mu/c^2 = 10^{-14}$ . С вводом в строй радиотелескопа SKA ограничения будут значительно усилены. Ансамбль пульсаров на SKA будет состоять из  $\sim 100$  объектов, которые будут наблюдаться с точностью лучшей, чем 100 нс. Точные пределы зависят от расстояний до пульсаров, но очевидно, что ограничения будут улучшены на порядки величины.

**В разделе 3.3** "Ограничение на космологическую плотность струн из переменности внегалактических источников" показано, что близкие по силе ограничения могут быть получены даже без использования эффекта кластеризации; эти пределы применимы как к петлям так и к прямым сегментам струн.

Значимая оптическая толща в этом случае достигается не за счёт повышенной плотности струн в Галактике (эффект кластеризации), а за счёт космологических расстояний до источников — квазаров. Возможное линзирование этих источников

струнами могло бы вызвать избыток двухкратных скачков в потоках источников при рассмотрении нескольких различных эпох (см. раздел 3.2).

Предложенный метод является достаточно общим и может быть применён для обзоров в разных волновых диапазонах, при условии, что размеры источников в этих диапазонах малы. Для иллюстрации разработанный метод был применён к данным обзора SDSS (Sloan Digital Sky Survey) – полученные ограничения показаны на Рис. 1, они дополняют и расширяют ограничения из локальных наблюдений (раздел 3.2).

Результаты третьей главы опубликованы в работе [8–13].

**В четвертой главе** ограничивается распространённость первичных чёрных дыр во Вселенной. Сам факт наблюдения нейтронных звёзд может значительно ограничить некоторые классы моделей фундаментальной физики. В этой главе рассматривалось, как использование таких наблюдений позволяет сильно ограничить распространённость первичных чёрных дыр (ПЧД) в широком диапазоне масс. Эти объекты могли возникать на самых ранних стадиях эволюции Вселенной, их существование не требует расширения Стандартной модели частиц и по своим свойствам они идеально подходят на роль тёмной материи. Если ПЧД окажется внутри плотного компактного объекта, белого карлика или нейтронной звезды, то она быстро уничтожит его. Поэтому наблюдения таких объектов позволяют утверждать, что захваты ПЧД есть событие маловероятное и из этого утверждения уже можно наложить серьёзные ограничения на распространённость ПЧД.

**В разделе 4.1** “Ограничение на распространённость первичных чёрных дыр из захвата их нейтронными звёздами” рас-

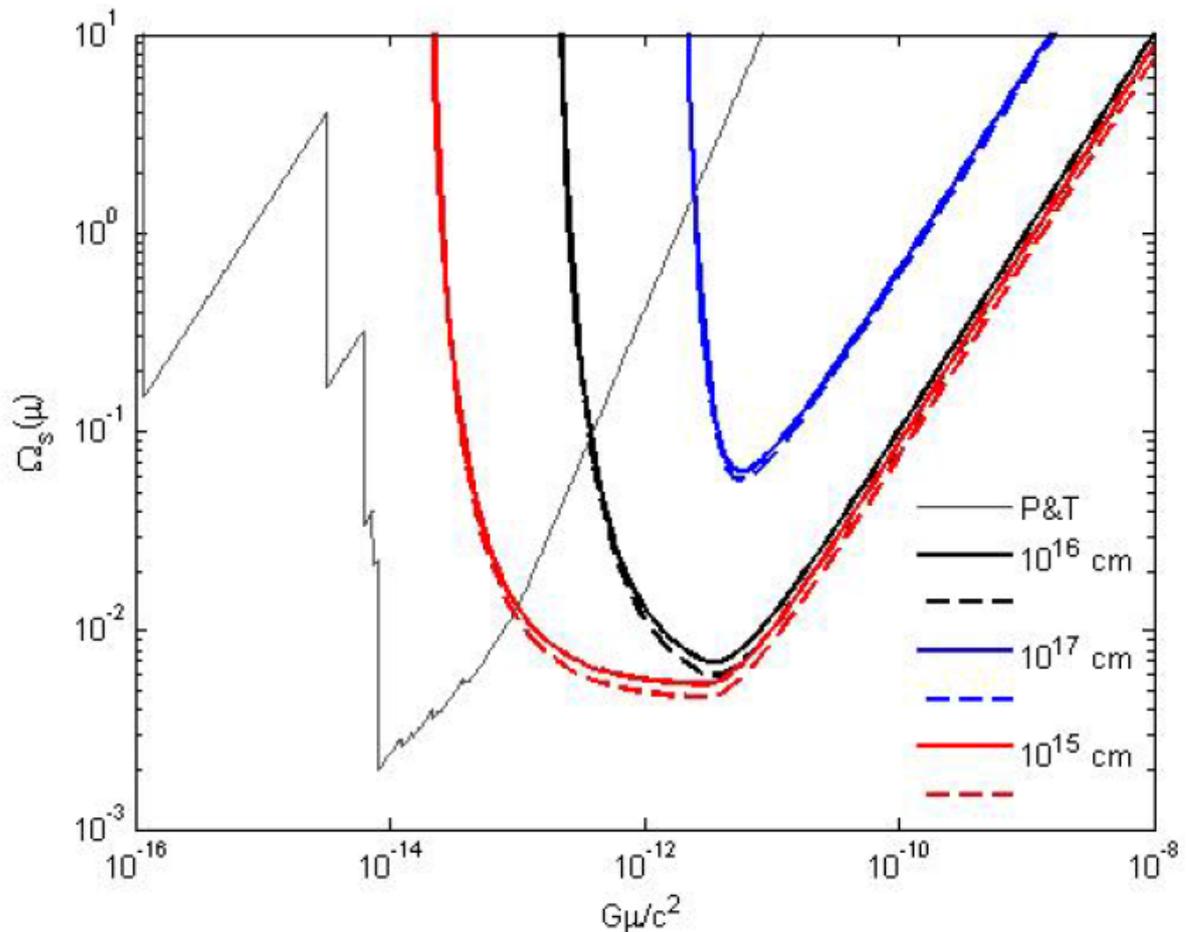


Рис. 1. Верхние пределы на среднюю современную космологическую плотность лёгких космических струн в зависимости от их натяжения  $\mu$  полученные из функции распределения переменности квазаров обзора SDSS. Три пары кривых показаны для различных характерных размеров источников  $2R_\perp$  of  $10^{16}$  см (чёрный),  $10^{17}$  см (синий, самые слабые ограничения) и  $10^{15}$  см (красный, самые сильные ограничения). Сплошные линии соответствуют “масштабируемой” эволюции плотности струн с красным смещением, штриховые — закону “пылевидной” материи; обе кривые достаточно близки. Тонкая серая линия показывает ограничения, полученные в предыдущем разделе из рассмотрения локальных эффектов

смотрен сценарий, когда первичные чёрные дыры прямо захватываются нейтронными звёздами.

В разделе были исследованы ограничения на долю ПЧД в ТМ, возникающие из-за того, что вероятность захвата звездой ЧД за время жизни должна быть много меньше единицы. Высокие плотности ТМ, превышающие несколько сотен  $\text{ГэВ см}^{-3}$ , а

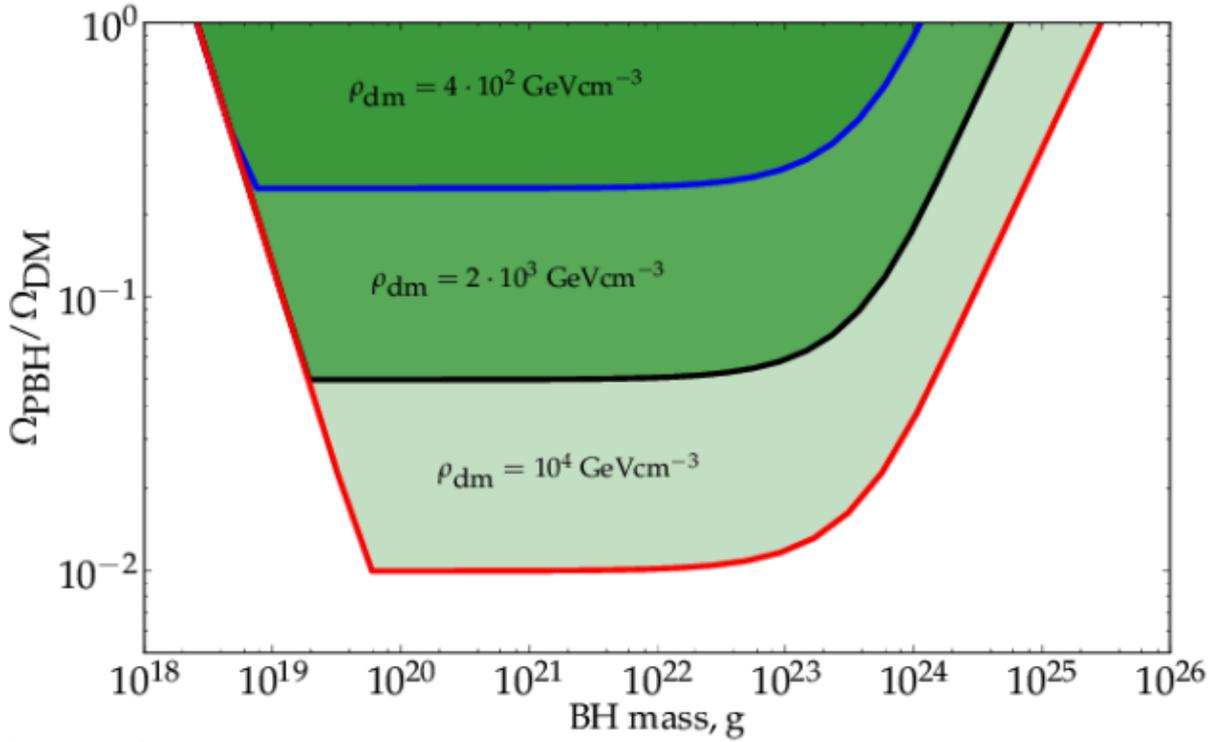


Рис. 2. Зависимость ограничений на долю  $\Omega_{\text{PBH}}/\Omega_{\text{DM}}$  от принятой плотности ТМ в ядре ШС. Показаны три случая:  $\rho_{\text{DM}} = 4 \times 10^2 \text{ ГэВ см}^{-3}$ ,  $\rho_{\text{DM}} = 2 \times 10^3 \text{ ГэВ см}^{-3}$ ,  $\rho_{\text{DM}} = 10^4 \text{ ГэВ см}^{-3}$

также низкие значения дисперсии скоростей необходимы, чтобы получить содержательные ограничения. Такие условия могут существовать в ядрах малометаллических шаровых скоплений, если они образовывались в маленьких гало ТМ на высоких красных смещениях  $z \sim 10-15$ . Тогда численные симуляции предсказывают, что плотность ТМ может достигать величины  $2 \times 10^3 \text{ ГэВ см}^{-3}$  [36]. При такой плотности полученные ограничения исключают первичные чёрные дыры, как основной компонент тёмной материи для всего диапазона масс  $3 \times 10^{18} \text{ г} \leq m_{\text{BH}} \leq 5 \times 10^{24} \text{ г}$  (Рис. 2).

**В разделе 4.2** “Ограничение на распространённость первичных чёрных дыр из захвата их звёздами главной последовательности” ПЧД могут захватываться НЗ прямо, а могут быть унаследованы ею от звезды-прародителя. Во втором случае захват осуществляется из мини-гало тёмной материи самой звез-

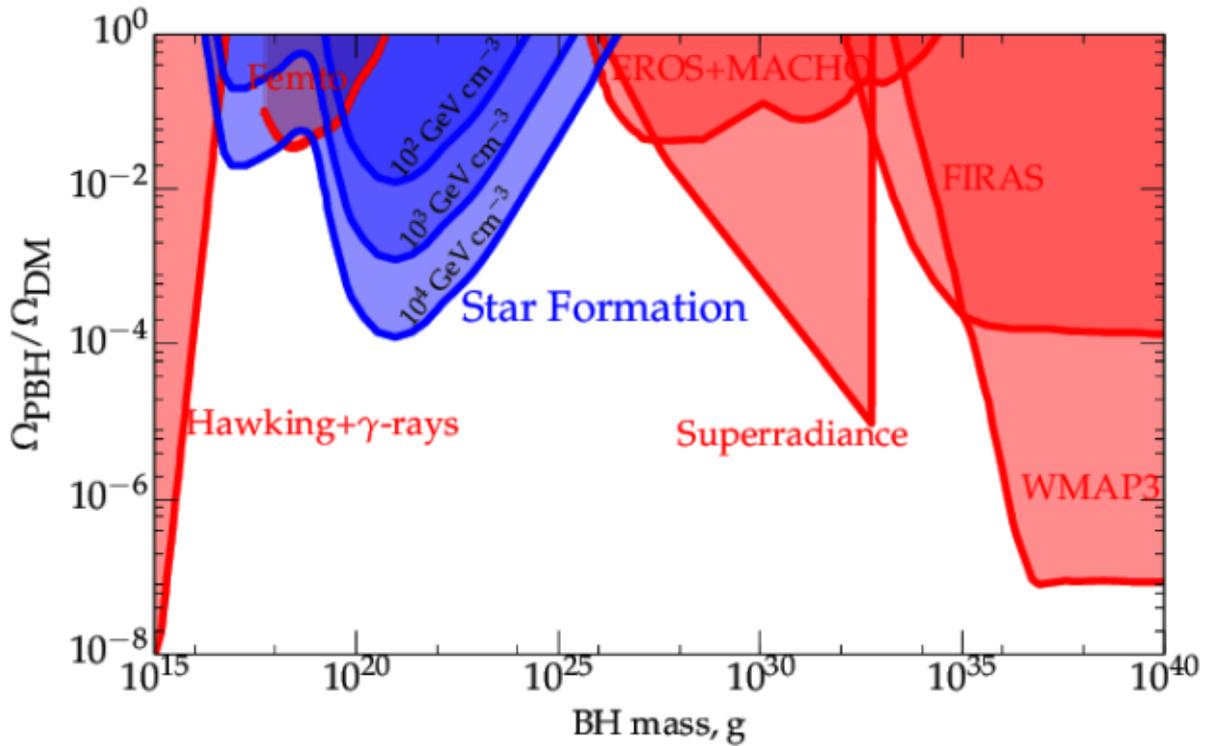


Рис. 3. Ограничения на долю ПЧД в ТМ — исключаются закрашенные области пространства параметров. Синим цветом выделены ограничения выведенные в этом разделе для трёх различных значений плотности ТМ ( $10^4$ ,  $10^3$ ,  $10^2$ ) ГэВ  $\text{см}^{-3}$  и дисперсии скоростей 7 км/с. Красным цветом выделены другие существующие на данный момент ограничения (см. начало этой главы)

дой до превращения её в компактный остаток. Это мини-гало образуется в процессе адиабатического сжатия вокруг звезды во время её формирования. Была проведена численная симуляция с участием  $\sim 30$  миллионов частиц. Частицы ТМ образуют мини-гало вокруг звезды с профилем плотности  $\rho(r) \propto r^{-1.5}$ . Орбиты частиц в этом гало очень вытянуты и частицы проводят лишь небольшую часть своего времени вблизи звезды, поэтому их вклад в общую плотность в центральной области сильно подавлен. Для примера, количество частиц иногда приближающихся к центру ближе, чем на  $r = R_\odot$ , превышает количество частиц в любой момент времени находящихся ближе  $R_\odot$  в  $1.8 \times 10^3$  раз. Был исследован конкретный пример тёмной материи — пер-

вичные чёрные дыры. Для каждой частицы было индивидуально вычислено время за которое произойдёт захват и получены ограничения на число захваченных ПЧД и, соответственно, на их распространённость.

Наиболее сильные ограничения получаются из наблюдений компактных объектов в областях с большой концентрацией ТМ. Примеры, соответствующие плотностям  $\rho = (10^4, 10^3, 10^2)$  ГэВ см<sup>-3</sup> и дисперсии скоростей  $\bar{v} = 7$  км с<sup>-1</sup> показаны на Рис. 3. Такие условия могли осуществляться в эпоху звездообразования в ядрах малометаллических шаровых скоплений или карликовых сфероидальных галактиках (с  $\rho_{\text{DM}} < 10^3$  ГэВ см<sup>-3</sup>) [36, 37].

Ограничения, получаемые в двух случаях, дополняют друг друга и позволяют исключить первичные чёрные дыры как основной компонент тёмной материи в диапазоне масс  $10^{17} - 3 \times 10^{24}$  г, эффективно закрывая последнее разрешённое “окно”. Результаты четвёртой главы опубликованы в работах [14–17].

**В пятой главе** галактические и внегалактические магнитные поля исследуются с использованием каталога мер вращений NVSS (NRAO VLA Sky Survey).

**В разделе 5.2** “Модель магнитного поля Галактики из мер вращения вне 22 галактических радиоисточников” строится модель регулярной части галактического поля по почти 40 тысячам мер вращений внегалактических источников (NVSS RM). Данные по фарадеевским мерам вращения внегалактических источников показывают когерентную картину — RM коррелированы по величине и знаку на самых больших угловых масштабах, свойства этой картины зависят от гал. координат. Это свидетельствует в пользу галактического происхождения этой когерентности и существования регулярного галактического

магнитного поля. Распределение  $RM$  относительно гал. плоскости во внутренней и внешней Галактике различается – оно симметрично снаружи и антисимметрично внутри. Такую картину невозможно объяснить одной компонентой поля, необходимо, по крайней мере, две – дисковая и гало. Показано, что комбинация симметричного дискового поля и антисимметричного гало с правильно подобранной амплитудой компонент может воспроизвести наблюдаемые данные.

Также можно сделать несколько замечаний

- i) Существует особенность в области антицентра, которая не может быть учтена в рамках использованных моделей (спадающие от центра поля, близкие к азимутальным). Эта особенность может вызываться пока неизвестной близкой структурой.
- ii) Результаты анализа свидетельствуют в пользу увеличенного вертикального масштаба распределения электронов, как было предложено в [38]. Не удалось воспроизвести данные, используя исходный вертикальный масштаб модели NE2001.

Процедура подгонки не может различить осесимметричную и бисимметричную модели, так как основной вклад в  $RM$  (особенно для  $|b| > 15^\circ$ ) даётся близкими окрестностями Солнечной системы ( $< kpk$ ), где обе модели ведут себя схожим образом. Углубленный анализ источников в области гал.плоскости может быть более чувствительным к отличиям между моделями.

**В разделе 5.3** “Распространение космических лучей сверхвысоких энергий в случайном галактическом магнитном поле” исследуется влияние, которое случайная компонента галактического поля оказывает на распространение космических лучей

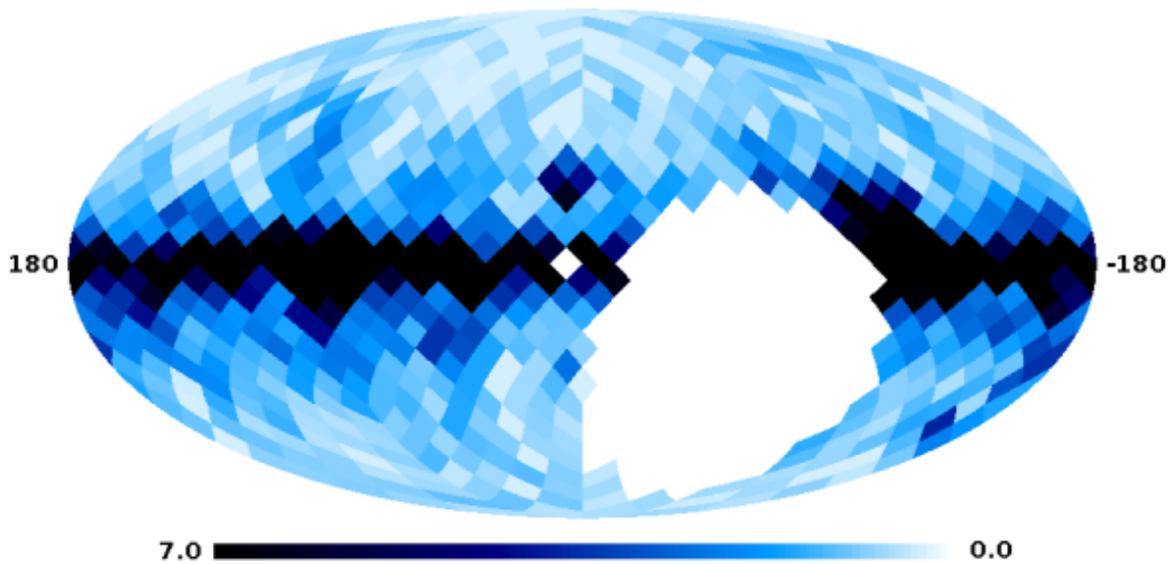


Рис. 4. Карта смещений протонов энергии  $E = 4 \times 10^{19}$  эВ из-за влияния случайного поля. Карта построена в галактических координатах, смещения указаны в градусах. Эта карта представляет верхние пределы

сверхвысоких энергий. Так как влияние этой компоненты полностью деструктивно и не может быть точно учтено, получение ограничений на величину отклонений крайне важно для перспектив астрономии космических лучей. Отклонения космических лучей в случайном поле могут быть связаны с величиной разброса мер вращений внегалактических источников относительно среднего значения. Используя данные NVSS, было получено, что для источников протонов энергии  $E \geq 4 \times 10^{19}$  эВ отклонения не превосходят  $5^\circ$ ; чаще всего они меньше, особенно на удалении от гал. плоскости (Рис. 4).

**В разделе 5.4 “Внегалактические магнитные поля: ограничения из NVSS”** данные каталога мер вращения используются для исследования внегалактических полей. Присутствие значительных внегалактических полей приводило бы к росту собственных мер вращения с расстоянием, что может быть проверено из наблюдений.

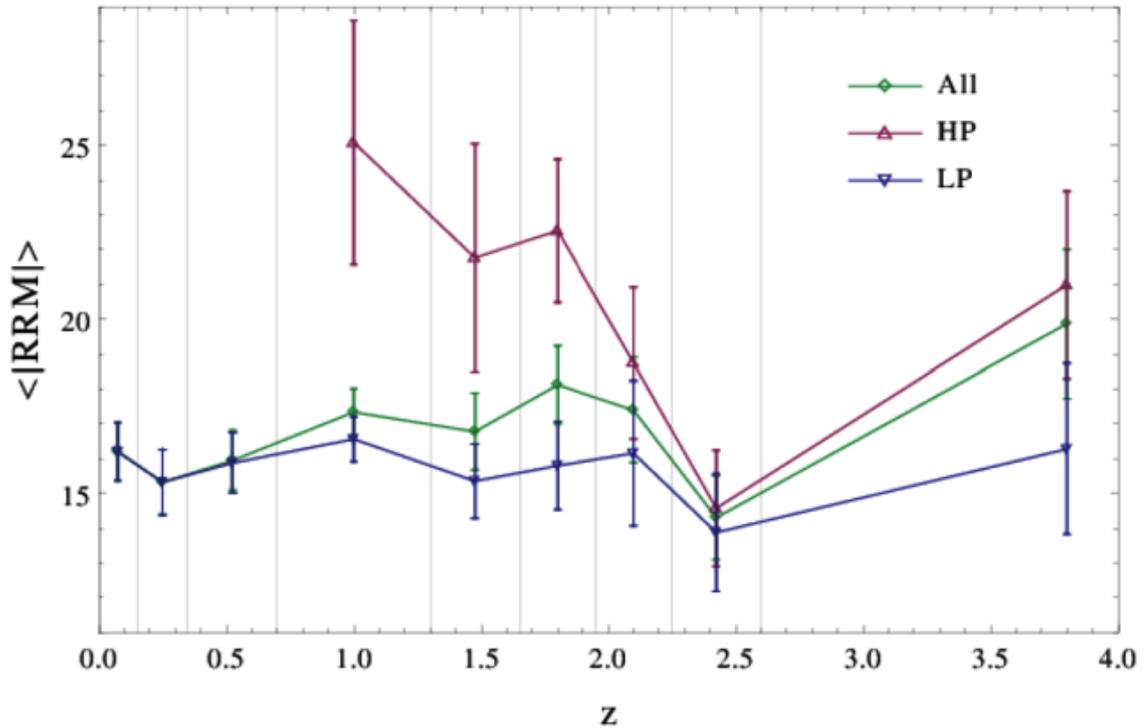


Рис. 5. Зависимость от красного смещения величины  $\langle |RRM| \rangle$  для всего массива, и отдельно для массивов источников высокой (high power, hp) и низкой (low power, lp) светимостей. Все величины выражаются в рад  $m^{-2}$

Анализ данных каталога 4 тысяч RM с известными расстояниями до источников позволил достаточно аккуратно изучить эволюцию RM и её зависимость от мощности источников. Основные результаты кратко изложены в следующих пунктах:

- Собственные  $|RRM|$  положительно коррелированы с радиосветимостью  $L_{1.4}$  ГГц, более мощные источники обладают большими собственными мерами вращения (Рис. 5).
- Для слабых источников  $|RRM|$  в основном вызываются ошибками измерений и влиянием случайного галактического поля. В случае мощных источников  $|RRM|$  систематически превышают вклады от этих эффектов.
- Если игнорировать зависимость от светимости и анализировать весь каталог, то появляется слабая зависимость от  $z$ , которая вызвана смещённостью выборки – с более далёких

расстояний наблюдается всё больше и больше сверхмощных источников.

Отсутствие эволюции собственных RM источников меньшей светимости позволяет ограничить силу космологических магнитных полей. Такие поля с длиной когерентности в 1 Мпк не могут быть сильнее 1.2 нГс (на уровне  $2\sigma$ ), если же длина сравнима с горизонтом, то поля ограничиваются сверху величиной 0.5 нГс. Эти пределы справедливы независимо от того, как были сгенерированы поля и применимы в очень широком классе моделей полей и приблизительно в пять раз сильнее полученных ранее ограничений. Они превосходят последние ограничения, получающиеся из наблюдений реликтового излучения, которые, однако, применимы лишь к первичным магнитным полям.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [18–24].

**В Заключении** приводится краткая сводка результатов работы.

### Список публикаций

1. Baskaran D., Polnarev A. G., Pshirkov M. S., Postnov K. A. Limits on the speed of gravitational waves from pulsar timing // *Phys. Rev. D*. 2008. Vol. 78, no. 4. P. 044018. 0805.3103.
2. Pshirkov M., Tuntsov A., Postnov K. A. Constraints on Massive-Graviton Dark Matter from Pulsar Timing and Precision Astrometry // *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 101, no. 26. P. 261101. 0805.1519.
3. Сергеева Н. Ю., Пширков М. С., Илясов Ю. П. Влияние радиометрического шума на точность хронометрирования пульсаров // *Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2013. Т. 2. С. 72–75.

4. Pshirkov M. S., Baskaran D. Limits on high-frequency gravitational wave back ground from its interplay with large scale magnetic fields // *Phys. Rev. D*. 2009. Vol. 80, no. 4. P. 042002. arXiv:gr-qc/0903.4160.
5. Pshirkov M. S. Investigating ultra-long gravitational waves with measurements of pulsar rotational parameters // *MNRAS*. 2009. Vol. 398. P. 1932–1935. arXiv:astro-ph.IM/0902.0598.
6. Pshirkov M. S., Baskaran D., Postnov K. A. Observing gravitational wave bursts in pulsar timing measurements // *MNRAS*. 2010. Vol. 402. P. 417–423. arXiv:astro-ph.CO/0909.0742.
7. Pshirkov M. S., Postnov K. A. Radio precursors to neutron star binary mergings // *Ap&SS*. 2010. Vol. 330. P. 13–18. arXiv:astro-ph.HE/1004.5115.
8. Калинина Т. А., Пширков М. С. Моделирование движения изображений внегалактических источников под влиянием эффекта слабого гравитационного микролинзирования // *Астрономический журнал*. 2006. Т. 83. С. 483–488.
9. Sazhin M. V., Pshirkov M. S. Stability of Pulsar Time Scale. // *IAU Joint Discussion*. Vol. 16 of IAU Joint Discussion. 2006.
10. Пширков М. С., Сажин М. В., Илясов Ю. П. Влияние эффекта слабого гравитационного микролинзирования на хронометрирование пульсаров // *Письма в Астрономический журнал*. 2008. Т. 34. С. 437–445.
11. Илясов Ю. П., Пширков М. С. Современные проблемы пульсарной астрометрии // *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове*. 2009. Т. 219. С. 125–131.
12. Tuntsov A. V., Pshirkov M. S. Quasar variability limits on cosmological density of cosmic strings // *Phys. Rev. D*. 2010. Vol. 81, no. 6. P. 063523. arXiv:astro-ph.CO/1001.4580.
13. Pshirkov M. S., Tuntsov A. V. Local constraints on cosmic string loops from photometry and pulsar timing // *Phys. Rev.*

- D. 2010. Vol. 81, no. 8. P. 083519. arXiv:astro-ph.CO/0911.4955.
14. Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from star formation // Phys. Rev. D. 2013. Vol. 87, no. 2. P. 023507. arXiv:astro-ph.CO/1209.6021.
  15. Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from capture by neutron stars // Phys. Rev. D. 2013. Vol. 87, no. 12. P. 123524. arXiv:astro-ph.CO/1301.4984.
  16. Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. Adiabatic contraction revisited: Implications for primordial black holes // Phys. Rev. D. 2014. Vol. 90, no. 8. P. 083507. 1403.7098.
  17. Pshirkov M., Tinyakov P., Capela F. Stellar evolution constrains primordial black holes as dark matter candidates // Proceedings of 34<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, The Hague, 2015. Proceedings of Science, 2015. P. 1186.18.
  18. Pshirkov M. S., Tinyakov P. G., Kronberg P. P., Newton-McGee K. J. Deriving the Global Structure of the Galactic Magnetic Field from Faraday Rotation Measures of Extragalactic Sources // ApJ. 2011. Vol. 738. P. 192. 1103.0814.
  19. Pshirkov M. Global Structure of the Galactic Magnetic Field from Rotation Measures of Extragalactic Sources // International Cosmic Ray Conference. 2011. Vol. 6. P. 232.
  20. Pshirkov M. S., Tinyakov P. G., Urban F. R. Mapping ultrahigh energy cosmic rays deflections through the turbulent galactic magnetic field with the latest rotation measure data // MNRAS. 2013. Vol. 436. P. 2326–2333. 1304.3217.
  21. Pshirkov M. S., Tinyakov P. G., Urban F. R. A map of UHECRs deflections through the turbulent GMF // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2014. Vol. 742. P. 271–272.

22. Pshirkov M. S., Tinyakov P. G., Urban F. R. The rotation measures of high-luminosity sources as seen from the NVSS // MNRAS. 2015. Vol. 452. P. 2851–2857. 1407.3909.
23. Pshirkov M. S., Tinyakov P. G., Urban F. R. Constraints on the extragalactic magnetic fields from the NVSS Faraday rotation measures // Proceedings of 34<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, The Hague, 2015. Proceedings of Science, 2015. P.544.
24. Abu-Zayyad T., Aida R., Allen M. et al. Search for Anisotropy of Ultrahigh Energy Cosmic Rays with the Telescope Array Experiment // ApJ. 2012. Vol. 757. P. 26. arXiv:astro-ph.HE/1205.5984.

#### **Цитированная литература**

25. Planck Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N. et al. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters // A&A. 2014. Vol. 571. P. A16. 1303.5076.
26. Rubakov V. A., Tinyakov P. G. Infrared-modified gravities and massive gravitons // Physics Uspekhi. 2008. Vol. 51. P. 759–792. arXiv:hep-th/0802.4379.
27. Lattimer J. M., Prakash M. The Physics of Neutron Stars // Science. 2004. Vol. 304. P. 536–542. astro-ph/0405262.
28. Abbasi R. U., Abe M., Abu-Zayyad T. et al. Measurement of the proton-air cross section with Telescope Array’s Middle Drum detector and surface array in hybrid mode // Phys. Rev. D. 2015. Vol. 92, no. 3. P. 032007. arXiv:astro-ph.HE/1505.01860.
29. Arzoumanian Z., Brazier A., Burke-Spolaor S. et al. NANOGrav Constraints on Gravitational Wave Bursts with Memory // ApJ. 2015. Vol. 810. P. 150. 1501.05343.

30. Wang J. B., Hobbs G., Coles W. et al. Searching for gravitational wave memory bursts with the Parkes Pulsar Timing Array // MNRAS. 2015. Vol. 446. P. 1657–1671. 1410.3323.
31. Polnarev A. G., Baskaran D. Surfing effect in the interaction of electromagnetic and gravitational waves: Limits on the speed of gravitational waves // Phys. Rev. D. 2008. Vol. 77, no. 12. P. 124013. arXiv:gr-qc/0802.3821.
32. Dubovsky S. L. Phases of massive gravity // Journal of High Energy Physics. 2004. Vol. 10. P. 076. hep-th/0409124.
33. Dubovsky S. L., Tinyakov P. G., Tkachev I. I. Massive Graviton as a Testable Cold-Dark-Matter Candidate // Physical Review Letters. 2005. Vol. 94, no. 18. P. 181102. hep-th/0411158.
34. Armstrong J. W., Iess L., Tortora P., Bertotti B. Stochastic Gravitational Wave Background: Upper Limits in the  $10^{-6}$  to  $10^{-3}$  Hz Band // ApJ. 2003. Vol. 599. P. 806–813.
35. Duez M. D., Liu Y. T., Shapiro S. L. et al. Evolution of magnetized, differentially rotating neutron stars: Simulations in full general relativity // Phys. Rev. D. 2006. Vol. 73, no. 10. P. 104015–+. arXiv:astro-ph/0605331.
36. Bertone G., Fairbairn M. Compact Stars as Dark Matter Probes // Phys.Rev. 2008. Vol. D77. P. 043515. arXiv:astro-ph/0709.1485.
37. Strigari L. E., Koushiappas S. M., Bullock J. S. et al. The Most Dark-Matter dominated Galaxies: Predicted Gamma-Ray Signals from the Faintest Milky Way Dwarfs // ApJ. 2008. Vol. 678. P. 614–620. 0709.1510.
38. Gaensler B. M., Madsen G. J., Chatterjee S., Mao S. A. The Vertical Structure of Warm Ionised Gas in the Milky Way // PASA. 2008. Vol. 25. P. 184–200. 0808.2550.

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,4 Зак. № 22380 Тираж 100 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований

Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а