

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

На правах рукописи  
УДК 524.82

САЖИНА Ольга Сергеевна

# Исследование тёмной энергии методами астрономии

Специальность: *01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия*

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

Москва – 2012

Работа выполнена в отделе астрометрии, гравиметрии и службы времени и в отделе релятивистской астрофизики Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

### **Научный консультант**

доктор физико-математических наук, Сажин М.В.  
профессор (Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ)

### **Официальные оппоненты**

доктор физико-математических наук, Гнедин Ю.Н.  
профессор (Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН)

доктор физико-математических наук Захаров А.Ф.  
(ГНЦ "Институт теоретической и экспериментальной физики" им. А.И.Алиханова)

доктор физико-математических наук, Зыбин К.П.  
член-корреспондент РАН (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН)

### **Ведущая организация**

Международный Университет природы,  
общества и человека "Дубна"

Защита состоится **"21 февраля" 2013 года в 14:00** на заседании диссертационного совета Д501.001.86 Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119992, г. Москва, Университетский пр-т, д.13, ГА-ИШ МГУ).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ломоносовский проспект, д.27, Фундаментальная библиотека).

Автореферат разослан **"21 января" 2013 года.**

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

С.О. Алексеев

## Общая характеристика диссертации

### Актуальность темы

Согласно современным наблюдательным данным по изучению расширения Вселенной с помощью сверхновых, а также по анизотропии реликтового излучения, современная Вселенная находится в стадии ускоренного расширения, которое успешно объясняется наличием тёмной энергии – особой формы энергии вакуумного типа [1] - [2]. Однако природа тёмной энергии до сих пор не выявлена, что является фундаментальной проблемой современной космологии, а также ключевой областью исследования на стыке таких дисциплин, как космология, астрономия и физика элементарных частиц.

Диссертация посвящена исследованию тёмной энергии современными методами наблюдательной астрономии.

Важно отметить, что тёмная энергия существовала и в ранней Вселенной – будем называть ее "реликтовая тёмная энергия". Проблема тёмной энергии с необходимостью должна включать в себя рассмотрение динамики и эволюции во времени этой формы энергии. В связи с этим большой интерес представляют ее реликтовые формы, которые могли бы "дожить" и до современной эпохи в виде топологических дефектов. Предсказание спектра флуктуаций плотности, близкого к масштабно инвариантному, а также вида анизотропии микроволнового реликтового излучения могут давать и модели, включающие топологические дефекты. Таким образом, особый интерес

представляет исследование тёмной энергии ранней Вселенной, а именно – возможных солитонных и солитоноподобных решений. Таким решением являются стабильные одномерные структуры – космические струны, которые возникают во всех наиболее реалистичных моделях физики элементарных частиц [3] - [4]. Исследования в современной физике элементарных частиц дают множество указаний на существование новой физики за рамками Стандартной модели. Космические струны возникают как в рамках моделей Великого объединения, так и в теории суперструн [5] - [6]. Обнаружение таких объектов позволило бы не только выявить природу и закономерности развития тёмной энергии ранней Вселенной, но и изучить масштабы энергий, не достижимых в современных ускорителях. Космические струны как возможные космологические объекты были впервые предсказаны Т. Кибблом в 1976 году [7] и активно изучались в последующих работах Я.Зельдовича [8], а также А. Виленкина, П. Шелларда и др. [9] – [17]. В работе [9] была показана роль космических струн как генераторов гравитационно-линзовых изображений. Существование космических струн не противоречит всем имеющимся на сегодняшний момент космологическим наблюдательным данным и, более того, находит широкую поддержку в теории, а также косвенную поддержку в наблюдениях.

Существует два основных метода поиска космических струн: по данным оптических обзоров (поиск гравитационно-линзовых изображений фоновых по отношению к струнам источников), а

также по радио обзорам (анализ карт анизотропии реликтового излучения). В диссертации представлена детальная разработка и углубление этих методов, включая предложение ряда новых моделей, а также впервые показано их применение к обработке реальных наблюдательных данных, полученных наземными и космическими телескопами в рамках выделенного на эти исследования времени.

Современная тёмная энергия может быть различных типов, в зависимости от своего уравнения состояния. Современные наблюдательные данные не противоречат тому, что плотность тёмной энергии не постоянная. Для удобства ее анализа принято вводить отношение давления к плотности [2]:  $p/\rho = w$ . Кроме случая постоянной плотности вакуумной энергии, когда  $w = -1$ , нет оснований полагать, что параметр  $w$  не зависит от времени [18] - [21]. Однако в наиболее широко используемых космологических моделях этот параметр полагается постоянным, но отличным от  $-1$ . Поскольку плотность тёмной энергии, а также плотность кривизны неотрицательны, то расширение Вселенной будет продолжаться, производная масштабного фактора по времени будет всегда положительной. Если параметр  $w$  отрицателен (что показывают данные по сверхновым), то плотность энергии излучения и вещества со временем станут пренебрежимо малы по сравнению с плотностью тёмной энергии. Для  $w < -1/3$  вклад кривизны также становится несущественным для эволюции Вселенной. Однако при  $w < -1$  — разновидность тёмной энергии, называемой фантомной энерги-

ей – масштабный фактор становится бесконечным на конечном промежутке времени. В диссертации рассмотрена эволюция основной характеристики расширяющейся Вселенной – масштабного фактора – для различных значений параметра  $w$ . Указаны также возможные наблюдательные следствия и астрономические тесты на наличие тёмной энергии именно фантомного типа. Плотность фантомной энергии растет с расширением. Если плотность тёмной энергии падает с расширением, то такая тёмная энергия называется квинтэссенцией. Несмотря на то, что природа тёмной энергии до сих пор не удалось выявить, можно с уверенностью утверждать, что свойства каждого типа тёмной энергии радикальным образом влияют на эволюцию Вселенной.

Масштабный фактор характеризует эволюцию Вселенной как целого, являясь ее глобальным параметром. Однако существует ряд локальных эффектов, оказывающих влияние на решение важных задач наблюдательной космологии, например, на построение опорной системы координат (ICRF, [22] - [23]). Для использования внегалактических источников для реализации такой системы необходимо учитывать два основных требования. Инерциальность – привязка системы координат к внегалактическим объектам. Стабильность – точность реализации опорной системы координат не должна меняться со временем. В реальности имеет место квазиинерциальность – происходит изменение направления прихода излучения на телескопы от далеких реперных источников. Это изменение траектории лучей

может быть обусловлено несколькими основными причинами: ошибками наблюдений, видимым движением центра яркости источника (механизм Блэндфорда-Риса), а также нестационарностью пространства-времени. Последняя характеризуется гравитационным полем космологических масштабов. Так, искривлять траекторию луча света могут не обладающие источником космологические гравитационные волны, а также и гравитационные поля скалярной и векторной природы. Одной из возможных причин видимого перемещения источников ICRF может быть также слабое микролинзирование этих источников звездами и тёмными телами нашей Галактики [24] - [25], однако полностью объяснить этим эффектом движение источников не удастся, что было показано в диссертации. Другая возможная причина – космологические скалярные возмущения. Видимая скорость источника представляет собой двумерный вектор на небесной сфере. Функции, заданные на сфере, можно анализировать, разлагая в ряд по сферическим гармоникам. Но в рассматриваемом случае величина, которая задана на сфере, является векторным полем. При разложении векторного поля в ряд по обычным сферическим функциям возникнет ”перемешивание”, то есть в различных системах координат, повернутых относительно друг друга, амплитуды спектра, возникающего при разложении в ряд по сферическим функциям, являются разными. Для того, чтобы такого ”перемешивание” не возникало, векторное поле надо раскладывать по векторным сферическим гармоникам. Один из возможных выборов – электрическая (E)

и магнитная ( $M$ ) моды. Векторные сферические дипольные гармоники  $E$ -типа ответственны за вековое ускорение Солнечной системы по направлению к центру нашей Галактики, а  $M$ -типа ответственны за вращение нашей Вселенной как целого (последняя величина не отличима от неравномерности вращения Земли и не может быть извлечена из наблюдений скоростей внегалактических объектов). Как показано в диссертации, космологические скалярные возмущения тёмной энергии генерируют только  $E$  моду, а векторные и тензорные – как  $E$ , так и  $M$  моды, а потому скалярные возмущения тёмной энергии могут быть выявлены по отсутствию  $M$  моды в спектре угловых скоростей исследуемых источников.

Другой эффект, обладающий гравитационной природой и влияющий на распространение фотонов от фонового источника – эффект Зельдовича (вторичное линзирование). Массивные тела во Вселенной могут влиять на ее глобальную кривизну, формируя участки слабой отрицательной и положительной кривизны. Такая неоднородная структура пространства-времени могла бы вызвать дополнительное искажение траекторий фотонов, помимо эффекта гравитационного линзирования, однако, как показано в диссертации, расстояние между сопряженными точками, пропорциональное отношению среднего расстояния между неоднородностями к величине угла отклонения, есть величина порядка горизонта современной Вселенной.

Всесторонний поиск наблюдательных проявлений реликтовой тёмной энергии, а также выявление наблюдательных тестов



для изучения современной тёмной энергии являются важнейшими задачами современной космологии.

### **Цель исследования и постановка задачи**

Диссертация посвящена поиску наблюдательных проявлений тёмной энергии, что является одной из наиболее актуальных задач современной космологии, а также ключевой областью исследования на стыке таких дисциплин, как астрофизика, физика элементарных частиц, теоретическая физика.

Целью исследования являлось всестороннее изучение проявлений тёмной энергии, как реликтовой, характерной для ранних эпох постинфляционной Вселенной, так и современной, отвечающей за ускоренное расширение Вселенной.

В первом случае реликтовая тёмная энергия представлялась в виде линейных структур – космических струн, состоящих из симметричного высокоэнергетического вакуума. Космические струны могли бы сформироваться в ранней Вселенной в результате фазовых переходов вакуума и существовать в современной Вселенной, а потому быть доступными наблюдениям. Для изучения космических струн было необходимо разработать полную теоретическую модель, которая была бы адекватна для охвата всех возможных наблюдательных проявлений этих объектов, как в оптическом, так и радио диапазонах. Модель должна была определять необходимые наблюдательные ресурсы и обладать всеми необходимыми для анализа наблюдательных данных количественными характеристиками.

Во втором случае современная тёмная энергия задавалась скалярным полем с наиболее общим уравнением состояния, определяющим динамику современной Вселенной. Для изучения современной тёмной энергии было необходимо дать количественные характеристики эффектов, также дающих вклад в динамику объектов на космологических масштабах. Было необходимо дать количественные характеристики, основанные на моделировании и обработке наблюдательных данных, наиболее значимым из них: гравитационному микролинзированию, эффекту Блэндфорда-Риса и эффекту Зельдовича. А также выявить отличительные особенности переменного гравитационного поля космологических масштабов, обусловленных флуктуациями тёмной энергии.

### **Научная новизна и практическая значимость**

Новизна работы состоит, во-первых, в создании нового научного направления по поиску наблюдательных проявлений реликтовой тёмной энергии (космических струн) в оптическом диапазоне и в радиодиапазоне. Была впервые разработана методика исследования оптически разрешенных кандидатов в гравитационно-линзовые события на космических струнах. Был впервые предложен, разработан и применен к обработке реальных данных метод анализа структуры анизотропии, генерируемый космической струной на фоне анизотропии адиабатических возмущений. В результате было получено высокоточное ограничение на возможные энергии реликтовой тёмной

энергии, в два с половиной раза улучшающее имевшиеся ранее, а также был сформирован список кандидатов в космические струны.

Во-вторых, впервые был предложен и разработан метод, позволяющий выявлять космологические скалярные возмущения современной тёмной энергии при анализе спектра угловых скоростей внегалактических источников. Выявление причин видимых движений источников особенно актуально для построения опорной системы небесных координат, необходимой для создания высокоточных астрономических каталогов, а также для практических задач спутниковой навигации.

#### Публикации по теме диссертации

1. M.V. Sazhin et al. (O.S. Khovanskaya and 9 co-authors) *CSL-1: chance projection effect or serendipitous discovery of a gravitational lens induced by a cosmic string?* **MNRAS** 343 2 353-359 (2003);
2. M.V. Sazhin, O.S. Khovanskaya et al. *Gravitational lensing by cosmic strings: What we learn from the CSL-1 case.* **MNRAS** 376: 1731-1739 (2007) e-Print: astro-ph/0611744 (2007);
3. M. Sazhin, M. Capaccioli, G. Longo, M. Paolillo, O. Khovanskaya *Further spectroscopic observations of the CSL-1 object.* **Astrophys.J.** 636:L5-L8 (2005) e-Print: astro-ph/0506400 (2005);
4. G. Covone, M. Paolillo et al. *Gauging the Dark Matter Fraction*

- in an  $L^* S0$  Galaxy at  $z = 0.47$  Through Gravitational Lensing from Deep Hubble Space Telescope/Advanced Camera for Surveys Imaging.* **Astrophys.J.** 691 1 531-536 (2009);
5. M.V. Libanov, V.A. Rubakov, O.S. Sazhina, M.V. Sazhin *CMB anisotropy induced by tachyonic perturbations of dark energy.* **Phys. Rev. D** 79 083521 (2009);
  6. M.V. Sazhin, O.S. Sazhina (Khovanskaya), M. Capaccioli, G. Longo, M. Paolillo, and G. Riccio *Gravitational Lens Images Generated by Cosmic Strings.* **The Open Astronomy Journal** 3 200-206 (2010);
  7. M.V. Sazhin, O.S. Khovanskaya, M. Capaccioli, G. Longo *Possible Observation of a Cosmic String.* **Gravitation & Cosmology** 11 3 223-225 (2005);
  8. М.В. Сажин, О.С. Хованская, М. Капаччиоли, Дж. Лонго, Х.М. Алкала, Р. Сильвотти, М. Павлов *Поиск гравитационных линз вблизи внегалактического двойного источника CSL-1.* **ПАЖ** 31 2 83-90 (2005); eprint arXiv:astro-ph/0406516;
  9. М.В. Сажин, О.С. Хованская *Объект CSL-1: эффект проекции.* **АЖ** 82 5 387-397 (2005);
  10. Е.В. Иванова, О.С. Хованская *Эффективная кривизна вселенной при наблюдении удаленных объектов.* **АЖ** 82 10 867-873 (2005);

11. М.В. Сажин, О.С. Сажина, М.С. Пширков *Видимые движения квазаров, вызванные микролинзированием. АЖ* 88 11 1036-1044 (2011);
12. М.В. Сажин, О.С. Сажина, А.О. Маракулин *Угловой спектр случайных скоростей источников ICRF. АЖ* 88 11 1027-1035 (2011);
13. О.С. Сажина, М.В. Сажин, В.Н. Семенцов *Анизотропия реликтового излучения, индуцированная движущейся прямой космической струной. ЖЭТФ* 133 5 1005–1016 (2008);
14. М.В. Либанов, В.А. Рубаков, О.С. Сажина, М.В. Сажин *Анизотропия реликтового излучения, индуцированная тахионными флуктуациями тёмной энергии. ЖЭТФ* 135 2 253-264 (2009);
15. О.С. Сажина, М.В. Сажин *Космические струны во Вселенной: достижения и перспективы исследования. ЖЭТФ* 140 5 918-928 (2011);
16. А. О. Маракулин, О. С. Сажина, М. В. Сажин *Вклад космологических скалярных возмущений в угловой спектр скоростей внегалактических источников. ЖЭТФ* 141 6-8 (2012);
17. Сажина О.С. *Вероятностные оценки числа космических струн во Вселенной. ЖЭТФ* 143 1 1-11 (2013);
18. О.С. Сажина *Применение функций Хаара с циклическим сдвигом для поиска космических струн. Вестник МГУ* 6

- 588-592 (2011);
19. О.С. Сажина, М.В. Сажин, М. Капаччиоли, Дж. Лонго *Поиск космических струн методами оптической астрономии и радиоастрономии. УФН* 181 10 1109-1114 (2011);
  20. M. Sazhin, M. Caraccioli, G. Longo, O. Khovanskaya *CSL-1: First Evidence for Lensing by a Cosmic String? Observing, Thinking and Mining the Universe, Proceedings of the International Conference Sorrento, Italy, 22-27 September 2003*. Edited by G. Miele and G. Longo. ISBN 981-238-688-2. Published by World Scientific Publishing & Mainland Press, Singapore, 265 (2004);
  21. О.С. Хованская и др. *Исследование объекта CSL-1 (2003 – 2006) Труды Института прикладной астрономии РАН* 18 247-253 (2008).

#### Апробация результатов

- Science and Ultimate Reality: Celebrating the Vision of John Archibald Wheeler, March, 15-18, Princeton NJ USA 2002; talk: *Dilatonic Black Holes in String Gravity and Their Relation with Parameters of [the] Early Universe*. Вторая премия им. Питера Грубера по космологии для молодых ученых. **Принстон** США; talk (15.03.2002);
- Wide field Imaging from Space Conference. **Berkeley** USA; poster (4.06.2004);

- The XXII Texas Symposium on Relativistic Astrophysics. **Stanford** USA; poster (11-17.12.2004);
- *Исследование объекта CSL-1 (2003 – 2006)* Хованская О.С. и др. Семинар по проблемам измеримости в квантовой гравитации и тёмной составляющей Вселенной (посвящается 100-летию со дня рождения М.П.Бронштейна), Санкт-Петербург, Россия **СПГУ**; пленарный доклад (30.11.2006-2.12.2006);
- First Meeting of the Astroparticle Physics Group of the IOP, (Institute of Physics **University of Sheffield** UK), *Simulations of gravitational lensing phenomena produced by a cosmic string*; poster (23-24.05.2006);
- UK COSMO Meeting, (Wilkinson Building at the **University of Oxford** UK), *Gravitational lensing by cosmic strings: what we learn from the CSL-1 case*; talk (8.06.2006);
- Classical Field Theory and Solitons **University of Cambridge** UK, *CSL-1 puzzle is solved*; poster (3-6.07.2006);
- *Gravitational Lensing and Modern Cosmology* Sazhin M., Sazhina O., Saracchioli M., Longo G. конференция Проблемы гравитационного линзирования, Москва, Россия **ГАИШ МГУ**; член локального оргкомитета; участник и соавтор доклада (10-12.04.2007);
- *Эффект слабого микролинзирования в приложении к астрометрии* Сажина О.С. и др. Ломоносовские чтения 2007,

секция астрономии и геофизики, Москва, Россия **ГАИШ МГУ**; доклад (19.04.2007);

- *Важнейшие релятивистские эффекты астрометрии* М.С.Пширков, М.В.Сажин, О.С.Сажина. Школа-конференция по астрометрии в рамках программы «год русского языка», Москва, Россия **ГАИШ МГУ**; зам. председателя локального оргкомитета; соавтор доклада (01.10.2007);
- Riccio G., D'Angelo G., Sazhin M.V., Sazhina O. S., Longo G. and Capaccioli M. *Simulations of cosmic strings signatures in the CMB*. FINAL WORKSHOP OF GRID PROJECTS, PON RICERCA 2000-2006, AVVISO 1575; poster (2009);
- Семинар по гравитации и космологии памяти А.Л. Зельманова (2005, 2010) **ГАИШ МГУ**; устные доклады;
- Сессия РАН **ФИ РАН** Москва *Поиск космических струн по анизотропии реликтового излучения*. Сажин М.В. и др.; соавтор доклада (26.01.2011);
- **QUARKS-2008** 15th International Seminar on High Energy Physics, Sergiev Posad, Russia, *CMB anisotropy induced by a moving straight cosmic string*; talk (23-29.05.2008); **QUARKS-2012** 17th International Seminar on High Energy Physics, Yaroslavl, Russia, *Cosmic strings in the Universe*; talk (4-10.06.2012);
- Семинар Отделения теоретической физики им. И.Е.Тамма



*Поиск космических струн методами оптической и радио-астрономии* **ФИ РАН**; доклад (16.10.2012).

Работа была поддержана следующими грантами:

- Грант ФЦП Интеграция 2004 г. (руководитель);
- Гранты РФФИ: 00-02-16350-а; 07-02-01034-а; 04-02-17288-а; 04-02-30034-д; 08-02-00971-а (исполнитель); 04-02-27137-з (руководитель);
- Гранты Президента Российской Федерации для поддержки молодых ученых, МК-1418.2005.2; МК-2503.2008.2; МК-473.2010.2 (руководитель);
- Молодежный грант INTAS, 05-109-4793, 2005-2006 (руководитель);
- Проект МИНОБРАЗОВАНИЯ №. 14.740.11.0085 (исполнитель).

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора диссертационной работы состоит, прежде всего, в анализе наблюдательных данных по объекту CSL-1, а также в моделировании эффекта проекции для этого объекта, результаты которого были подтверждены на телескопе HST. Соискателю также принадлежит обнаружение и исследование кандидатов в гравитационные линзы в поле объекта CSL-1; оценки количества космических струн; построение

(включая доказательства полноты и ортонормальности) и применение модифицированных функций Хаара для поиска кандидатов в космические струны по радио картам WMAP; теория анизотропии реликтового излучения, индуцируемой космической струной.

Моделирование и обработка данных по анизотропии проводилась совместно с М.В. Сажиным и В.Н. Семенцовым. Формирование заявок на телескоп Хаббла и ряд наземных телескопов, а также сбор и обработка данных осуществлялось соискателем совместно с российско-итальянской группой под руководством М.В. Сажина. Постановка задачи по исследованию углового спектра скоростей квазаров, эффекта микролинзирования и эффекта Зельдовича проводилась совместно с М.В. Сажиным.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит введения, пяти глав, заключения, трех приложений и списка литературы. Объем диссертации 336 страниц. Количество рисунков – 108. Список литературы содержит 237 ссылок.

### **Содержание работы**

**Глава 1** подразделяется на две части. Первая посвящена реликтовой тёмной энергии и содержит обзор по космическим струнам. Представлены свойства космических струн, механиз-

мы их образования (в том числе основной, механизм Киббля). Рассмотрены вопросы топологии вакуума. Приведена классификация струн в зависимости от соответствующего типа связанных с ними симметрий. Рассмотрен вопрос о сети струн и его современный статус. Введены основные характеристики струн (в том числе линейная плотность). Указаны возможности проверки современных многомерных теорий с помощью космических струн. Вторая часть главы посвящена вопросу о тёмной энергии в современную эпоху и дан обзор статуса ее исследования. Указаны особенности открытия тёмной энергии и методов ее исследования. Описаны современные теоретические модели тёмной энергии (включая  $\Lambda$ -член, квинтэссенцию, и тёмную энергию фантомного типа), а также возможные способы их наблюдательного исследования.

**Глава 2** посвящена обзору и развитию методов поиска космических струн. Рассматривается теория двух основных методов поиска космических струн: оптических и радио методов. Первый основан на исследовании эффектов гравитационного линзирования фоновых источников на космической струне. Рассмотрены вопросы о линзировании как точечных, так и протяженных источников (рис. 1, слева). Вторым методом – разработка поиска сигналов анизотропии, индуцированной струнами, на температурных картах анизотропии микроволнового реликтового излучения. Рассматривается движущаяся космическая струна как источник анизотропии; учитываются эффекты запаздывания сигнала. Приводятся оценки на количество

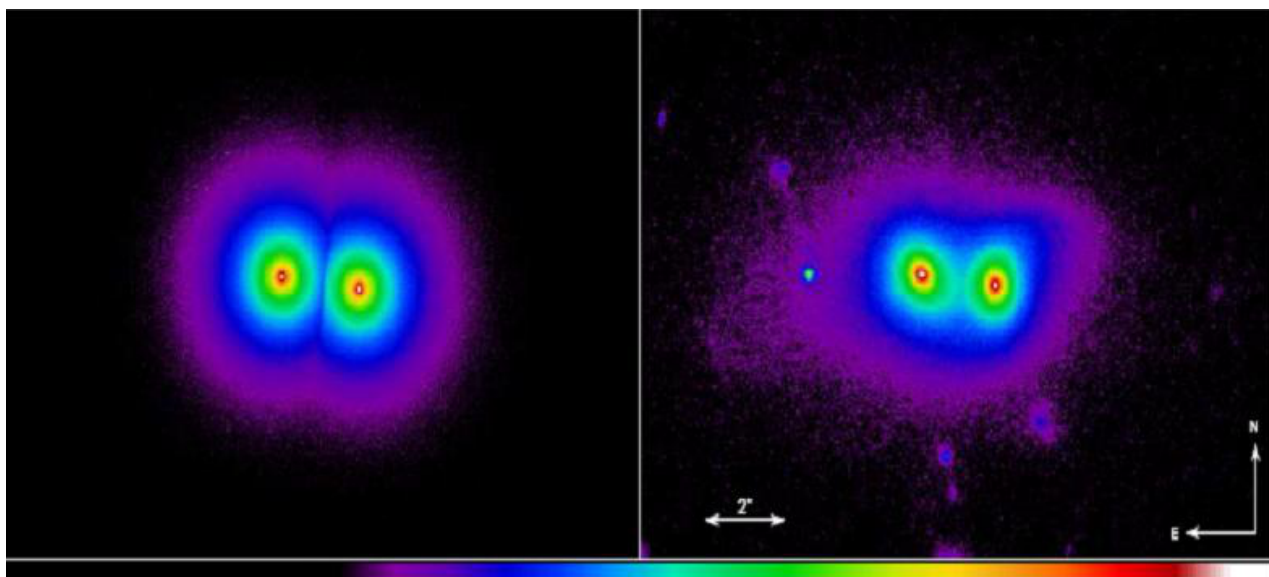


Рис. 1. Объект *CSL-1*. Слева: моделирование гравитационно-линзового изображения эллиптической галактики при характеристиках *HST*. Справа: реальный снимок телескопа *HST*, снятый по программе *Director's Discretionary time* (2006 г.); видны приливные искажения внешних изофот.

струн, полученные разными методами, в том числе, в зависимости от космологических параметров расширяющейся Вселенной, а также дан вероятностный подход к оценке их количества с учетом априорных данных глубоких оптических обзоров.

**Глава 3** посвящена исследованию двойного внегалактического объекта *CSL-1* (рис. 1), как кандидата в событие гравитационного линзирования на космической струне. Описано обнаружение объекта, даны его характеристики, разобрана стратегия его исследования на наземных и космических телескопах. Рассмотрен поиск кандидатов в гравитационные линзы вблизи этого объекта. Наблюдательными методами (в результате выделенного для этой задачи времени на телескопе Хаббла) доказано, что объект представляет собой пару взаимодействующих галактик.

**Глава 4** посвящена новейшим методам поиска космических струн на основе анализа реальных наблюдательных данных космического аппарата WMAP. Методы основаны на поиске анизотропии реликтового излучения, индуцированной космическими струнами (рис. 2), с помощью различных независимых алгоритмов обработки. Дано описание данных аппарата WMAP, способы их представления и обработки. Рассмотрен пороговый фильтр для поиска струн (моделирование, статистический анализ моделей). Рассмотрен метод поиска струн с помощью модифицированных ортонормальных функций Хаара (моделирование, статистический анализ, применение к реальным данным). Получено ограничение на допустимые энергии космических струн, в два с половиной раза превышающее имевшиеся ранее ограничения. Найдены кандидаты в космические струны, построена их карта (рис. 3). Рассмотрен вопрос независимой проверки найденных кандидатов по оптическим каталогам. Рассмотрен вопрос о современных хранилищах астрономических данных и способа их использования в контексте рассматриваемой задачи. Приведены рекомендации по наблюдению космических струн на наземных оптических телескопах.

В **Главе 5** представлен современный статус тёмной энергии и ее влияние на эволюцию Вселенной. Рассмотрена эволюция масштабного фактора во Вселенной с тёмной энергией, приведены точные решения для стандартной космологической модели, а также приближенные решения и оценка их точности. Рассмотрен общий случай параметра уравнения состояния. Прове-

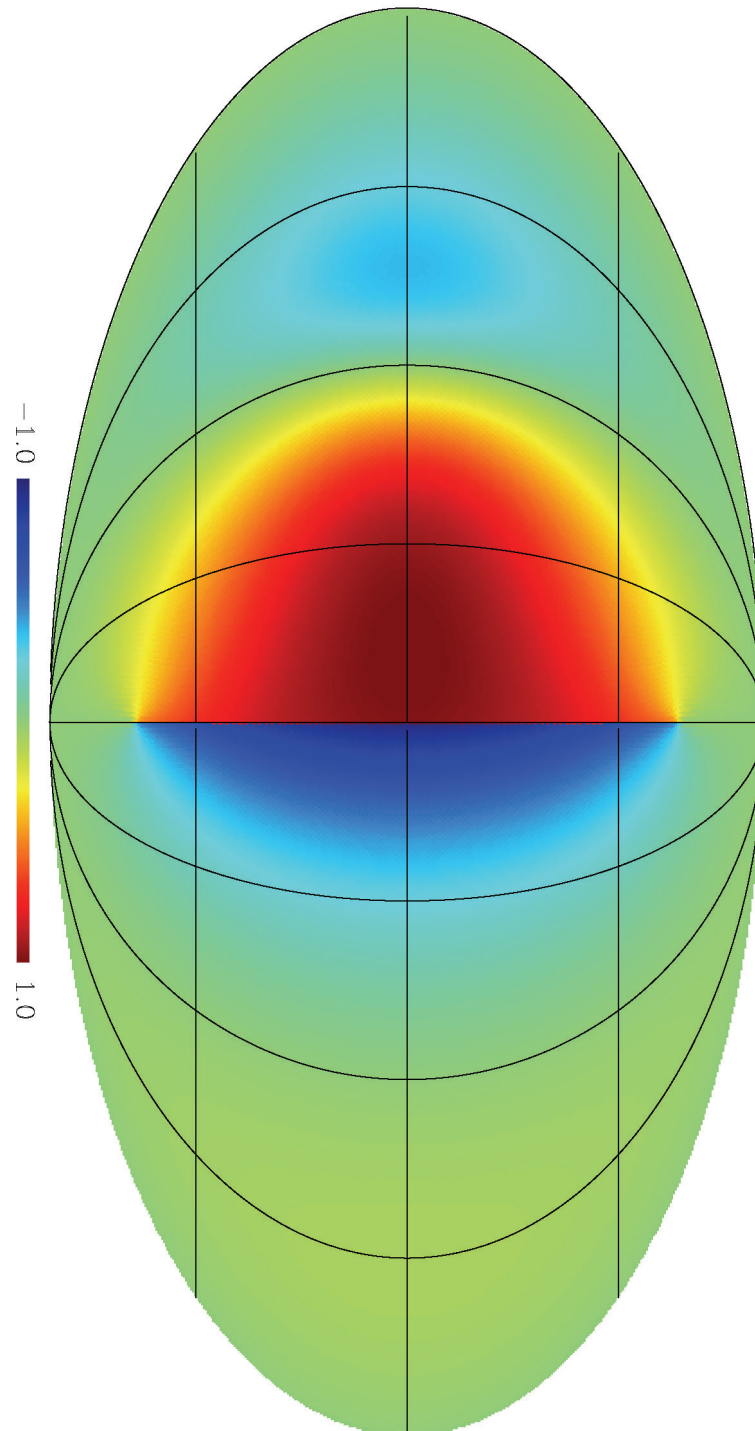


Рис. 2. Модельное распределение вариаций температуры созданное прямой движущейся космической струной. Струна расположена вдоль меридиана, имеет угловой размер больше  $100^\circ$  и движется слева направо. Перед фронтом струны – холодное пятно, которое сразу за фронтом сменяется горячим пятном, а затем следует небольшое кильватерное пятно пониженной температуры.

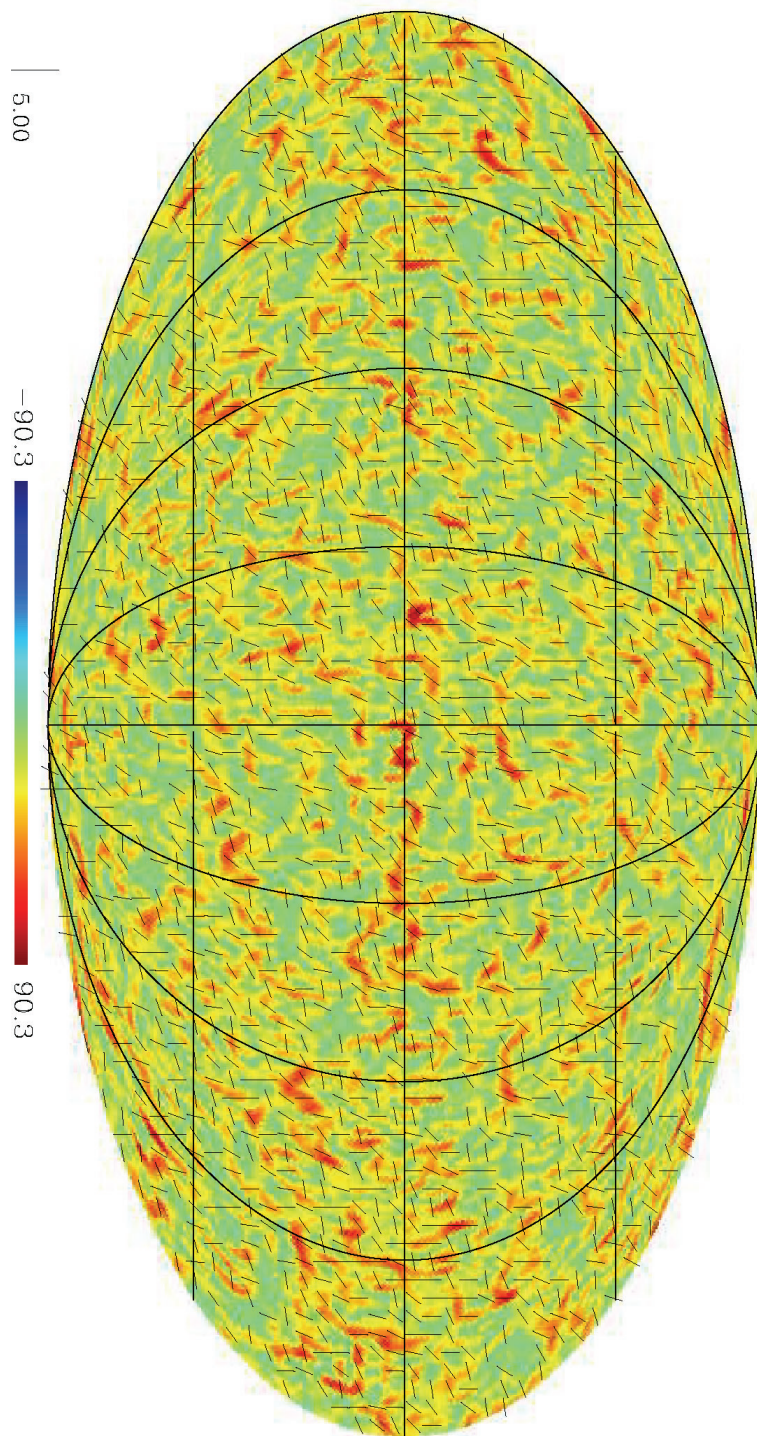


Рис. 3. Кандидаты в космические струны (темные протяженные области), выделяемые по уровню  $1\sigma$  ( $\sim 10\mu K$ ) при использовании метода поиска с помощью модифицированных функций Хаара. Штрихами указан дополнительный критерий поиска связанных протяженных структур – градиент перепада температуры.

дена количественная оценка эффектов, конкурирующих с влиянием тёмной энергии на космологические наблюдения: рассмотрены видимые движения внегалактических далеких источников (квазаров), вызванные микролинзированием; рассмотрен эффект Зельдовича (вторичного линзирования) и его вклад в возможные наблюдаемые характеристики далеких источников. Рассмотрен угловой спектр случайных скоростей таких источников; оценен вклад космологических скалярных возмущений в данный угловой спектр.

**В Заключении** дано резюме проведенных исследований.

**Приложения** содержат математическое обоснование применимости модифицированных функций Хаара для использования в обработке наблюдений (доказана ортонормальность и полнота системы таких функций); вычисление геометрической вероятности пересечения струной заданной площадки; элементы программирования в системе HEALPix, необходимой для обработки данных WMAP.



## Положения, выносимые на защиту

1. Создано новое научное направление по поиску космических струн современными методами астрономии.
  - (а) Разработаны методы поиска космических струн в оптическом диапазоне применительно к астрофизическим инструментам высокого углового разрешения (наземные телескопы Европейской южной обсерватории, космический телескоп HST). Получена структура изображений протяженных внегалактических источников, появляющихся в результате гравитационного линзирования этих источников на космической струне. Выявлены спектроскопические и фотометрические характеристики гравитационно-линзовых изображений. Разработана исчерпывающая методика наблюдательного поиска кандидатов в гравитационно-линзовые события на космических струнах и анализа их свойств (объект CSL-1).
  - (б) Разработаны методы поиска космических струн в радио диапазоне. Разработана теория генерации анизотропии фонового микроволнового реликтового излучения (СМВР) на космических струнах. Впервые получена структура и характерные амплитуды анизотропии СМВР, генерируемой космической струной. Предложен и успешно применен алгоритм свертки реальных температурных карт анизотропии СМВР (полученных в результате 7-и лет работы космического аппарата WMAP)

с модифицированными функциями Хаара с циклическим сдвигом для выделения слабого сигнала космической струны на фоне стандартного адиабатического шума CMBR на уровне от  $10\mu K$  (при уровне адиабатических возмущений в  $100\mu K$ ). По результатам обработки радио данных составлен список кандидатов в космические струны. Предложенный алгоритм в 8 – 10 раз чувствительнее к выявлению космических струн по сравнению с предложенными другими авторами. Он также дает жесткое ограничение на допустимую наблюдательными данными амплитуду анизотропии космических струн: не существует космических струн, генерирующих анизотропию выше  $38.5\mu K$  (в то время как предыдущие исследования, основанные на поисках негауссовости в данных анизотропии CMBR, давали ограничения на амплитуду анизотропии космических струн порядка  $100\mu K$ ).

2. Предложен космологический тест по поиску современной тёмной энергии.

(а) Количественно оценены возможные причины нестационарности пространства-времени, проявляющиеся в видимом движении внегалактических источников. Показано, что эффект гравитационного микролинзирования указанных источников на звездах Галактики и ее гало не могут объяснить массового субсветового и сверхсве-

тового наблюдаемого видимого движения данных источников. Показано, что расстояние между сопряженными точками траекторий лучей света при учете гравитационных неоднородностей на различных масштабах Вселенной больше размеров видимого горизонта Вселенной и, следовательно данный эффект "вторичного линзирования" (эффект Зельдовича), не значим.

- (b) Предложен и разработан метод, позволяющий выявить влияние флуктуаций тёмной энергии на угловой спектр скоростей внегалактических источников. Показано, что флуктуации тёмной энергии генерируют скалярные возмущения, которые, в отличие от всех прочих указанных эффектов, влияющих на движение источников, дают вклад только в Е моду и не дают вклада в М моду. Данные моды есть векторные сферические гармоники, по которым производится разложение векторного поля угловых скоростей.

# Литература

- [1] Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков, Введение в теорию ранней Вселенной. в 2-х томах. Москва УРСС (2008, 2010), с. 557, 543.
- [2] S. Weinberg, *Cosmology*. Oxford University Press 612 p. (2008).
- [3] A. Vilenkin, E.P.S. Shellard, *Cosmic strings and other topological defects*. Cambridge Univ.Press., Cambridge (1994), p. 517.
- [4] A. Hindmarsh, in: *The Formation and Evolution of Cosmic Strings*, ed. by G.Gibbons, S.W.Hawking, and T.Vachaspathi. Cambridge Univ.Press., Cambridge (1990).
- [5] A.-C. Davis and T.W.B. Kibble, *Fundamental cosmic strings*. *Contemporary Phys.* 46 5 313-322 (2005); E-print archives: hep-th 0505050.
- [6] E.J. Copeland, R.C. Myers, J. Polchinski, *Cosmic F- and D-strings*. *Journal of High Energy Phys.* 06 013 (2004); E-print archives: hep-th 0312067.
- [7] T.W.B. Kibble, *Topology of cosmic domains and strings*. *J. Phys. A: Math and Gen.* 9 1387 (1976).
- [8] Ya.B. Zeldovich, *Cosmological fluctuations produced near a singularity*. *MNRAS* 192 663 (1980).
- [9] A. Vilenkin, *Gravitational field of vacuum domain walls and strings*. *Phys. Rev. D* 23 852 (1981).
- [10] A. Vilenkin, *Cosmic strings as gravitational lenses*. *Ap. J.* 289 L51 (1984).

- [11] F. Bernardeau, J.-P. Uzan, Cosmic string lens phenomenology: Model of Poisson energy distribution. *Phys. Rev. D* 63 2 023005 (2001).
- [12] A.A. de Laix, T. Vachaspati, Gravitational lensing by cosmic string loops. *Phys.Rev. D* 54 4780 (1996).
- [13] D.P. Bennett, F.R. Bouchet, High Resolution Simulations of Cosmic String Evolution I: Network Evolution. *Phys. Rev. D* 41 2408 (1990).
- [14] B. Allen, E.P.S. Shellard, Cosmic String Evolution: A Numerical Simulation. *Phys. Rev. Lett.* 64 119 (1990).
- [15] C.J.A.P. Martins, E.P.S. Shellard, Fractal Properties and Small scale Structure of Cosmic String Networks. *Phys. Rev. D* 73 043515 (2005); E-print archives: astro-ph 0511792.
- [16] C. Ringeval, M. Sakellariadou, F.R. Bouchet, Cosmological Evolution of Cosmic String Loops. *JCAP* 0702 023 (2007); E-print archives: astro-ph 0511646.
- [17] A. Zakharov, Lensing by exotic objects. *Gen Relativ Gravit.* 42 2301 (2010).
- [18] E.Komatsu et al., Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Cosmological Interpretation. [WMAP Collaboration]. *The Astr.J.Suppl.* 180 2 330-376 (2009); E-print archives: astro-ph 0803.0547.
- [19] V.Sahni, A.Shafieloo and A.A.Starobinsky, Two new diagnostics of dark energy. *Phys.Rev.D* 78 10 103502 (2008); E-print archives: astro-ph 0807.3548.
- [20] J.Q.Xia, H.Li, G.B.Zhao and X.Zhang, Determining cosmological parameters with the latest observational data. *Phys.Rev.D* 78 8 083524 (2008); E-print archives: astro-ph 0807.3878.
- [21] R.R.Caldwell, A phantom menace? Cosmological consequences of a dark energy component with super-negative equation of state. *Phys. Lett. B* 545 23 (2002).

- [22] Ж. Ковалевский, Современная астрометрия. Век-2 Фрязино (2004).
- [23] В.Е. Жаров, Сферическая астрономия. Век-2 Фрязино (2006).
- [24] М.В. Сажин, Фундаментальный предел точности астрометрических измерений. ПАЖ 22 643 (1996).
- [25] M.V. Sazhin, V.E. Zharov, A.V. Volynkin, T.A. Kalinina, Microarcsecond instability of the celestial reference frame. MNRAS 300 287 (1998).