

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Физический факультет  
Кафедра астрофизики и звёздной астрономии

На правах рукописи  
УДК 524.352; УДК 524.354

Пружинская Мария Викторовна



# Сверхновые звёзды, гамма-всплески и ускоренное расширение Вселенной

Специальность: *01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия*

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2014

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звёздной астрономии Физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

### **Научный руководитель**

доктор физико-математических наук, Липунов Владимир Михайлович  
профессор (Физический факультет МГУ)

### **Официальные оппоненты**

доктор физико-математических наук, Гнедин Юрий Николаевич  
профессор (Главная астрономическая  
обсерватория РАН)

доктор физико-математических наук, Тутуков Александр Васильевич  
профессор (Институт астрономии РАН)

### **Ведущая организация**

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН (г. Москва)

Защита состоится 19 июня 2014 года в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте имени П.К. Штернберга МГУ, расположенном по адресу: 119991, г. Москва, Университетский пр-т, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (119192, г. Москва, Ломоносовский пр-т., д. 27, Фундаментальная библиотека) и на сайте:

<http://sai.msu.ru/dissovet/2014.html>

Автореферат разослан 15 апреля 2014 года.

Учёный секретарь диссертационного совета



доктор физ.-мат. наук

С.О. Алексеев

# Общая характеристика работы

## Актуальность работы

Сверхновые звёзды и гамма-всплески — самые мощные взрывы во Вселенной. Благодаря высокой светимости эти объекты можно наблюдать на космологических расстояниях и поэтому использовать их для изучения свойств и структуры Вселенной. В последние десятилетия объём наблюдательного материала возрос в десятки раз, но некоторые ключевые моменты, связанные с природой и механизмами взрывов сверхновых звёзд и гамма-всплесков, так и остались загадкой.

Считается, что блеск сверхновых звёзд типа Ia (СН Ia) в максимуме постоянен, вследствие чего они прекрасно подходят на роль индикаторов расстояний во Вселенной. Однако существуют сомнения в верности гипотезы стандартной свечи. Основные причины этих сомнений связаны с поглощением света в нашей галактике и родительских галактиках сверхновых, химическим составом звёзд-прародителей, эволюцией суммарной массы сливающихся белых карликов с хаббловским временем, возможным существованием нескольких механизмов взрыва, эффектами селекции [1]. И действительно, для СН Ia наблюдается довольно большая дисперсия абсолютной звёздной величины в максимуме блеска. Существующие процедуры «стандартизации» СН Ia позволяют учесть только часть из перечисленных выше факторов. Поэтому усовершенствование методов «стандартизации» и выделение различных однородных подклассов СН Ia будут актуальны ещё долгое время.

Выявить механизм взрыва СН Ia и ответить на вопрос о структуре магнитных полей в джетах гамма-всплесков могут измерения поляризации. К сожалению, поляризационных наблюдений СН Ia, особенно на ранних стадиях расширения оболочки, и собственного и раннего оптического излучения гамма-всплесков мало [2]. Поляризация собственного оптического излучения гамма-всплесков ещё не была зарегистрирована; существует лишь несколько измерений поляризации послесвечений.

Другим способом приблизиться к пониманию природы сверхновых и гамма-всплесков является популяционный синтез двойных звёзд. Сравнивая результа-

ты моделирования и наблюдений, можно наложить некоторые ограничения на механизмы взрыва и предсказать/объяснить новые астрофизические явления (например, быстрые радиовспышки).

## Цели работы

Целью данной работы является изучение сверхновых звёзд типа Ia как индикаторов расстояний во Вселенной и гамма-всплесков с помощью популяционного синтеза и поляризационных наблюдений, выполненных на телескопах роботизированной сети МАСТЕР<sup>1</sup> [3, 4]. Для её реализации были поставлены и решены следующие задачи:

- Исследование влияния серого поглощения на ослабление блеска СН Ia.
- Выделение наиболее однородного подкласса «чистых» СН Ia, не требующего дополнительной «стандартизации»; составление выборки, удовлетворяющей принятым критериям отбора.
- Изучение современных методов «стандартизации» СН Ia и выбор наиболее подходящего из них для обработки «чистой» сверхновой СН 2009nr.
- Исследование механизмов взрыва СН Ia в эллиптических галактиках.
- Калибровка поляроидов роботизированной сети МАСТЕР в Кисловодске, Тунке и Благовещенске.
- Поляризационные наблюдения сверхновых звёзд и гамма-всплесков с помощью роботизированной сети МАСТЕР.
- Расчёт частоты слияния нейтронных звёзд, основанный на результатах популяционного синтеза [5], с учётом реалистичной функции звёздообразования во Вселенной. Сравнение результатов расчёта с наблюдаемой частотой быстрых радиовспышек.

---

<sup>1</sup>Мобильная Астрономическая Система Телескопов-Роботов.

## Новизна работы

- В работе впервые предложен способ исключить влияние серого поглощения, различий в химическом составе и механизмах взрыва СН Ia на построение шкалы расстояний во Вселенной.
- Впервые показано, что наблюдаемая эволюция частоты СН Ia в эллиптических галактиках хорошо согласуется с частотой слияния белых карликов, предсказанной популяционным синтезом двойных звёзд с помощью Машины Сценариев [6, 7].
- Впервые проведена калибровка поляроидов роботизированной сети МАСТЕР и исследованы её поляризационные возможности на примере блазаров, сверхновой и гамма-всплеска.
- Поскольку МАСТЕР — это единственный в мире широкопольный инструмент, способный измерять поляризацию, то поляризационные измерения гамма-всплеска GRB 121011A являются уникальными.
- В ходе исследования впервые представлена эволюция частоты слияний нейтронных звёзд как функция красного смещения в рамках реалистичной функции звёздообразования во Вселенной.

## Практическая значимость работы

- Предложенный подкласс «чистых» сверхновых может быть использован при планировании будущих миссий по поиску сверхновых звёзд и изучению свойств ускоренного расширения Вселенной.
- Подтверждение ускоренного расширения Вселенной по «чистым» сверхновым опровергает работы, в которых серое поглощение вводится как альтернатива ускоренному расширению Вселенной для объяснения ослабления блеска далёких СН Ia.
- Полученные параметры кривой блеска и физические характеристики СН 2009nr могут использоваться другими авторами для исследования зависимости «абсолютная звёздная величина–форма кривой блеска».

СН 2009nr интересна тем, что взорвалась практически в межгалактическом пространстве, следовательно, полученные данные (в частности по поглощению) могут быть использованы для анализа межзвёздной среды вокруг сверхновой и изучения подобных сверхновых на основании более широкой выборки.

- Была проведена калибровка поляроидов роботизированной сети МАСТЕР в Кисловодске, Тунке и Благовещенске. Полученные в результате данные о степени и угле поляризации для четырёх блазаров могут быть полезны для групп, занимающихся мониторингом подобных объектов.
- Найдена ожидаемая частота слияний нейтронных звёзд для горизонта детектирования будущих версий проекта LIGO<sup>2</sup> [8].

### Положения, выносимые на защиту

1. Проведено сравнение результатов Машины Сценариев с наблюдательными данными по эволюции темпа сверхновых типа Ia. Подтверждена гипотеза, что преобладающим механизмом взрыва СН Ia в эллиптических галактиках является слияние двух белых карликов [9].
2. Предложен подкласс «чистых» сверхновых, который не подвержен серому поглощению, химической эволюции и возможному различию в механизмах взрыва. Показано, что «чистые» сверхновые подтверждают ускоренное расширение Вселенной [10].
3. Исследованы поляризационные возможности роботизированной сети МАСТЕР. Проведены поляризационные измерения СН Ia 2012bh на ранней стадии расширения оболочки и раннего оптического излучения длинного гамма-всплеска GRB 121011A [2].
4. Показано, что современные сценарии эволюции двойных нейтронных звёзд не противоречат наблюдаемой частоте быстрых радиовспышек [11, 12].

---

<sup>2</sup>Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory.

## Публикации

Результаты работы изложены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах:

1. Lipunov V.M., Pruzhinskaya M.V., «Scenario Machine: Fast Radio Bursts, Short GRB, Dark Energy and LIGO silence», принята к печати в **MNRAS** (2014), arXiv: 1312.3143.
2. Pruzhinskaya M.V., Krushinsky V.V., Lipunova G.V., et al., «Optical polarization observations with the MASTER robotic net», **New Astronomy**, 29, p. 65 (2014).
3. Lipunov V.M., Panchenko I.E., Pruzhinskaya M.V., «The mechanism of Supernova Ia explosion in elliptical galaxies», **New Astronomy**, 16, p. 250 (2011).
4. Пружинская М.В., Горбовской Е.С., Липунов В.М., «Чистые» сверхновые и ускоренное расширение Вселенной», **Письма в Астрономический журнал**, том 37, №9, стр. 1 (2011).
5. Цветков Д.Ю., Балануца П.В., Липунов В.М., Волков И.М., Тучин О.А., Куделина И.П., Пружинская М.В., и др., «Фотометрические наблюдения сверхновой 2009nr», **Письма в Астрономический журнал**, том 37, №11, стр. 837 (2011).
6. Горбовской Е.С., Липунов В.М., Корнилов В.Г., ..., Пружинская М.В., и др., «Сеть роботизированных оптических телескопов МАСТЕР-II. Первые результаты», **Астрономический журнал**, том 90, №4, с. 267 (2013).

Кроме того, автор диссертации является соавтором 10 электронных публикаций в циркулярах GCN (The Gamma-ray Coordinates Network, [http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3\\_archive.html](http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html)) и Atel (The Astronomers Telegram <http://www.astronomerstelegam.org>) и имеет четыре публикации в трудах конференций.

## Апробация работы

Результаты работы были доложены на следующих российских и международных конференциях:

1. 281-й симпозиум МАС «Binary Paths to type Ia Supernovae explosions» (Падую, Италия, 2011): устный доклад «Pure supernovae Ia and dark energy».
2. Международная конференция «50 лет космической эре: реальные и виртуальные исследования неба» (Ереван, Армения, 2011): устный доклад «Pure supernovae Ia and dark energy».
3. Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, ИКИ РАН, 2011): устный доклад «Чистые сверхновые и ускоренное расширение Вселенной».
4. XVIII международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, МГУ, 2011): устный доклад «Чистые сверхновые и тёмная энергия».
5. Международная школа по астрофизике (Терамо, Италия, 2012): устный доклад «Pure supernovae Ia and dark energy».
6. Международная конференция «Глобальная роботизированная сеть MASTER» (Москва, ГАИШ МГУ, 2012): устный доклад «Pure supernovae Ia and dark energy».
7. Конференция «Молодые учёные России» (Москва, 2013): стендовый доклад «Сверхновые звёзды Ia».
8. Вторая международная конференция лаборатории экстремальной Вселенной «Gamma Ray Bursts, New Missions to New Science» (Москва, НИИЯФ МГУ, 2014): устный доклад «Polarization observations with the MASTER Global Robotic Net».
9. Научная сессия НИЯУ МИФИ (Москва, МИФИ, 2014): устный доклад «Космологические радиовспышки и слияния нейтронных звёзд».

10. Научная конференция «Физика Космоса» (Екатеринбург, Коуровская обсерватория, 2014): устный доклад «Поляризационные наблюдения с помощью роботизированной Глобальной сети МАСТЕР».

Результаты, представленные в диссертации, также докладывались и обсуждались на Общественном семинаре астрофизиков имени Я.Б. Зельдовича (Москва, ГАИШ МГУ, 2011–2013 года).

### **Личный вклад автора**

Автором совместно с его научным руководителем был предложен подкласс «чистых» сверхновых звёзд типа Ia, свободных от поглощения серой пылью, различий в химической эволюции и механизмах взрыва. Автором был самостоятельно произведён отбор кандидатов в «чистые» сверхновые с последующим построением диаграммы Хаббла и определением вклада тёмной энергии в общую плотность Вселенной. В работе [13], посвящённой сверхновой SN 2009nr, автору принадлежит обработка кривых блеска сверхновой в пакете программ SNooPy [14] и определение её основных физических параметров, таких как абсолютная звёздная величина в нескольких спектральных диапазонах и поглощение в родительской галактике. Используя результаты популяционного синтеза двойных звёзд и последние наблюдательные данные по частоте SN Ia в эллиптических галактиках, диссертант совместно с соавторами показал, что уже через миллиард лет после образования эллиптической галактики до 99% SN Ia в этих галактиках — результат слияния белых карликов. Автор продемонстрировал, что изменение частоты вспышек сверхновых в механизме сливающихся белых карликов не зависит от закона сближения, а определяется начальным распределением по большим полуосям орбит. Для калибровки поляроидов роботизированной сети МАСТЕР в Кисловодске, Тунке и Благовещенске автором самостоятельно был произведён отбор и наблюдение ярких сильнополяризованных блазаров в момент их активности. Совместно с В.В. Крушинским (УрФУ) и Г.В. Липуновой (ГАИШ МГУ) проведены фотометрия и поляриметрия блазаров, сверхновой и гамма-всплесков. Совместно с научным руководителем было показано, что причиной быстрых радиовспышек могут быть слияния нейтрон-

ных звёзд. Используя результаты Машины Сценариев с учётом современных данных о скорости звездообразования во Вселенной, автор рассчитал частоту слияний нейтронных звёзд в единице сопутствующего объёма и интегральную частоту слияний для красных смещений до  $z = 1$ . Совместно с научным руководителем было показано, что нет никаких противоречий между частотой слияния нейтронных звёзд и количеством быстрых радиовспышек, а отсутствие положительных детектирований в LIGO от слияния двух нейтронных звёзд согласуется с нашими астрономическими предсказаниями, хотя слияния нейтронных звёзд с чёрными дырами уже могли бы быть зарегистрированы.

## Структура и обзор диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей три главы, и заключения, а также двух приложений. В диссертации 149 страниц, включая 25 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 337 ссылок.

Во **введении** описана важность катастрофических взрывов (сверхновых звёзд и гамма-всплесков) для изучения свойств Вселенной на космологических масштабах и их влияние на химическую эволюцию и звездообразование в галактиках. Обсуждаются актуальность диссертационной работы, её цель и новизна, практическая значимость. Также формулируются положения, выносимые на защиту, приводится список работ, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации, описывается личный вклад автора в проделанную работу.

**Первая глава** посвящена сверхновым звёздам типа Ia и вопросам, связанным с их использованием в качестве индикаторов расстояний во Вселенной. В первом разделе главы обсуждается важность СН Ia в наблюдательной космологии. Следующий раздел посвящён истории «стандартизации» СН Ia и современным методам определения их основных физических параметров по форме кривых блеска. В частности, описан пакет программ SNooPy, с помощью которого была проведена «стандартизация» СН 2009nr. Полученные в результате физические параметры СН 2009nr позволили включить эту сверхновую в выборку «чистых» сверхновых и использовать её при дальнейших исследованиях.

Поскольку для задач наблюдательной космологии важны далёкие сверхновые, то в этом разделе также обсуждаются вопросы, связанные с поглощением света и искажением спектра (*K*-поправка) на больших красных смещениях.

Одной из проблем гипотезы стандартной свечи является возможное различие в механизмах взрыва СН Ia. В следующем разделе первой главы показано, что уже через миллиард лет после образования эллиптической галактики основным механизмом, отвечающим за взрыв СН Ia в этих галактиках, является слияние двух белых карликов. Приводится дополнительный аргумент в пользу модели сливающихся белых карликов, связанный с соответствием между предсказываемым и наблюдаемым законами уменьшения частоты взрывов СН Ia в эллиптической галактике.

В заключительном разделе главы рассматривается вопрос о нарушении стандартности блеска СН Ia из-за поглощения излучения серой пылью в родительских галактиках. Серое поглощение может приводить к такому же видимому эффекту ослабления блеска далёких сверхновых, как и ускоренное расширение Вселенной. Для исключения влияния серого поглощения, возможного различия в механизмах взрыва и химическом составе звёзд-прародителей сверхновых вводится подкласс «чистых» сверхновых. Идея подхода состоит в том, чтобы использовать только те сверхновые, которые взорвались далеко от центра родительских спиральных галактик или в эллиптических галактиках. Во-первых, на больших расстояниях от ядра (или высоко над плоскостью диска, если мы имеем дело со спиральной родительской галактикой, видимой с ребра) располагаются наиболее старые, бедные металлами звёзды с возрастом, сравнимым с возрастом Вселенной. Это приводит к более однородному химическому составу звёзд-прародителей. Во-вторых, «чистые» СН Ia скорее всего имеют общий механизм взрыва, а именно – слияние двух белых карликов. Это связано с тем, что в гало галактик нет звёзд средней массы, которые могли бы обеспечить набор вещества белыми карликами в двойных системах. В эллиптических же галактиках механизм слияния белых карликов обеспечивает до 99% взрывов сверхновых Ia уже через миллиард лет после образования эллиптической галактики [9]. В-третьих, в гало галактик пыли практически нет. Например, в нашей галактике толщина пылевого слоя не превышает нескольких килопарсек даже

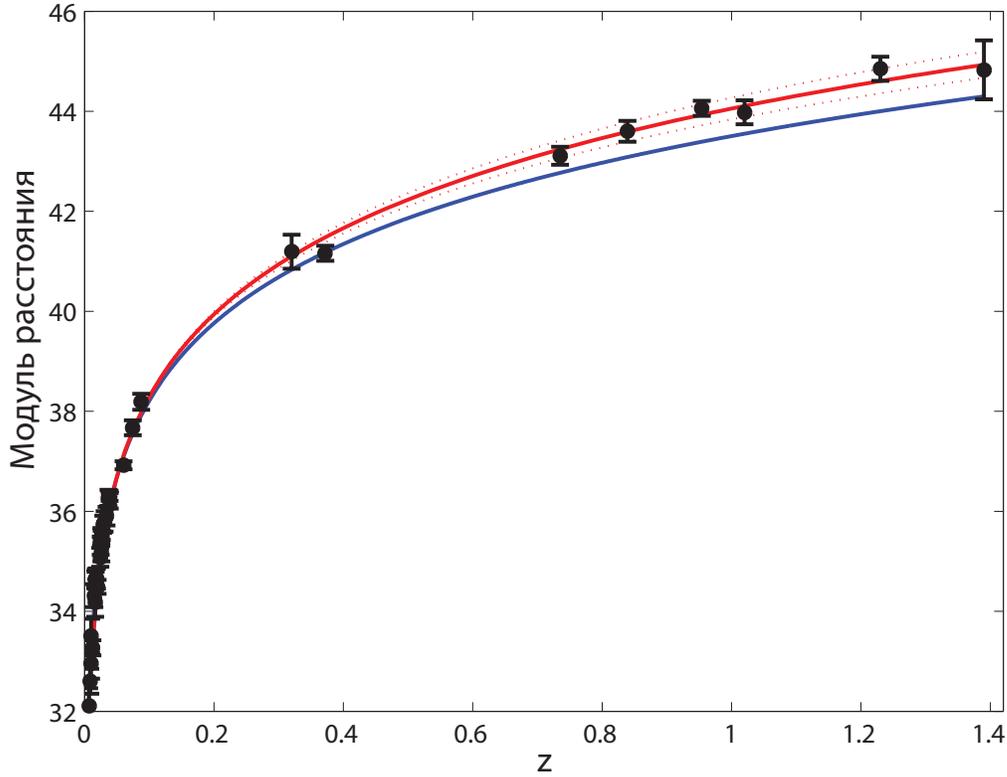
на краю (15–20 кпк). В эллиптических галактиках пыль отсутствует и глубоко внутри галактики; возраст, и, следовательно, химический состав эллиптических галактик вполне соответствуют бедным металлами звёздам первого поколения.

На первом шаге были выбраны СН Ia, которые находятся далеко за пределами родительской галактики. После просмотра получившегося списка были отсеяны сомнительные случаи спиральных и взаимодействующих галактик, где затруднительно провести границу родительской галактики. Кроме сверхновых, далёких от центра галактики, были отобраны те сверхновые, чья родительская галактика уверенно классифицировалась как эллиптическая. Затем были просмотрены объекты, открытые космическим телескопом Хаббл на больших расстояниях ( $z > 0.2$ ). К ним были добавлены 2 сверхновые в гало: СН 2008gy и СН 2009nr, открытые в обзоре роботизированной сети МАСТЕР. СН 2008gy, СН 2009nr представляют собой наиболее подробно исследованные близкие сверхновые, которые практически находятся в межгалактическом пространстве. Таким образом, появился список «чистых» сверхновых, готовый для построения диаграмм Хаббла.

Анализ диаграмм Хаббла для «чистых» сверхновых показал ускоренное расширение Вселенной со значением плотности тёмной энергии  $\Omega_\Lambda = 0.66 \pm 0.18$  (см. Рис. 1).

Таким образом, главным результатом раздела является подтверждение ускоренного расширения Вселенной по сверхновым Ia безотносительно химической эволюции, серого поглощения и возможных различий в механизмах взрыва. Выделенный подкласс «чистых» сверхновых эффективен для исследования свойств ускоренного расширения Вселенной.

Во **второй главе** автор докладывает результаты исследования поляриметрической точности сети телескопов-роботов МАСТЕР и анализирует способности МАСТЕР измерять поляризацию различных типов астрофизических объектов: гамма-всплесков, сверхновых звёзд, блазаров. Первые два раздела главы посвящены описанию сети МАСТЕР и процессу обработки поляризационных наблюдений. Далее приводятся результаты поляризационных наблюдений блазаров, два из которых, ОС 457, ЗС 454.3, регистрировались в момент их активности и показали высокую степень поляризации  $P = (21 \pm 2)\%$  и  $P = (34 \pm 2)\%$



**Рис. 1:** Диаграмма Хаббла для «чистых» сверхновых типа Ia (чёрные точки). Красная кривая – кривая, наилучшим образом приближающая наблюдательные данные; синяя кривая – кривая, соответствующая Вселенной с  $\Omega_\Lambda = 0$ ; пунктирные линии – 95% доверительный интервал.

соответственно. Поляризационные наблюдения блазаров показывают, что поляроиды системы МАСТЕР могут быть успешно применены для измерения степени линейной поляризации больше 5–10% с точностью измерения угла поляризации 3–10 градусов, в зависимости от яркости объекта (см. таблицу 1). Наблюдения блазаров также позволяют производить калибровку степени поляризации и позиционного угла системы МАСТЕР.

В конце раздела приводятся наблюдения СН Ia 2012bh и гамма-всплеска GRB 121011A, обсуждается роль поляризационных измерений в изучении катастрофических взрывов во Вселенной.

Вспышка сверхновой звезды может наблюдаться в течение нескольких месяцев. Это позволяет получать длинные серии данных, включая поляриметрию. Открытие значительной поляризации ( $> 2\%$ ) в излучении СН Ia будет неза-

**Таблица 1:** Список наблюдений блазаров сетью МАСТЕР в 2012–2013 годах. К – Кисловодск, КБ – Кисловодск и Благовещенск.

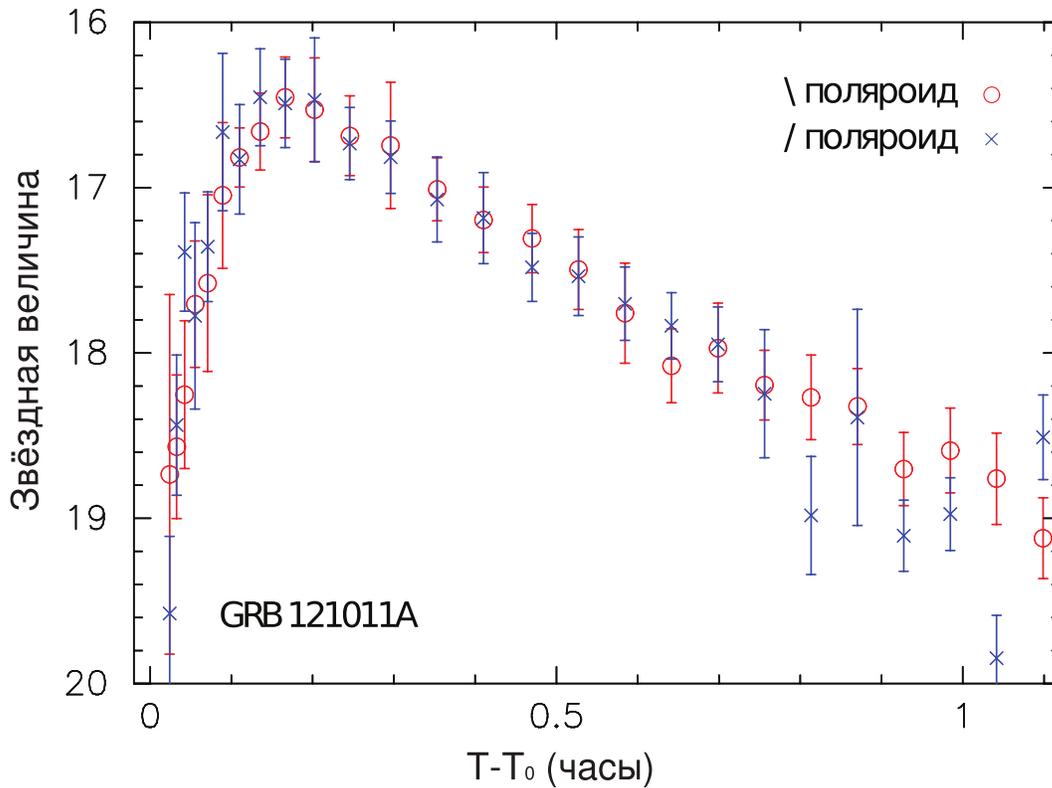
Объект	JD	Экват. коорд.	$P_{real}(\%)$	$\theta(^{\circ})$	$P_{ISP}(\%)$
87GB 165943.2+395846	2456046.5	$17^h01^m24^s.635$ $+39^{\circ}54'37''.09$	$8\pm7$	$137\pm10$	0.25
QSO B1215+303	2456047.5	$12^h17^m52^s.082$ $+30^{\circ}07'00''.64$	$4\pm2$	$160\pm13$	0.2
OC 457 (К)	2456331	$01^h36^m58^s.595$ $+47^{\circ}51'29''.10$	$21\pm2$	$87\pm5$	1.2
OC 457 (КБ)	2456331	$01^h36^m58^s.595$ $+47^{\circ}51'29''.10$	$22\pm2$	$92\pm4$	1.2
ЗС 454.3	2456561.5	$22^h53^m57^s.748$ $+16^{\circ}08'53''.56$	$34\pm2$	$13\pm3$	0.8

висимым аргументом в пользу модели слияния белых карликов как одного из эволюционных сценариев СН Ia. Кроме того, если взрыв некоторых СН Ia окажется асимметричным, встанет вопрос об их пригодности для задач наблюдательной космологии. Последние данные показывают умеренную поляризацию в континууме (меньше 1%) для СН Ia, но более сильную поляризацию в линиях ( $\sim 2\%$ ) [15]. Наблюдаемая поляризация может также оказаться неучтённой межзвёздной поляризацией в Галактике ( $P_{ISP}$ ) и в родительских галактиках сверхновых. К настоящему моменту поляризационных измерений СН Ia до максимума блеска недостаточно, чтобы делать уверенные выводы о геометрии взрыва.

СН 2012bh — хороший пример сверхновой, открытой до максимума блеска. В главе представлена фотометрия в поляроидах для СН Ia 2012bh на основе наблюдений сети МАСТЕР с 27 марта по 15 апреля. Кривая блеска этой сверхновой оказалась схожей с кривой блеска «нормальной» СН Ia 1994D. Анализ кривой блеска показал, что максимум блеска был достигнут 31 марта. За всё время наблюдений верхний  $1-\sigma$  предел на степень линейной поляризации СН 2012bh составил 3%.

Поляризационные измерения также необходимы для понимания физики джетов гамма-всплесков: их геометрии, магнитных полей, микрофизики и механизмов излучения. Спектральные исследования указывают на синхротронную природу излучения гамма-всплесков. Известно, что синхротронное излучение

в упорядоченном магнитном поле поляризовано. Таким образом, наблюдаемая поляризация зависит от степени когерентности магнитного поля и от геометрических характеристик излучающей области. В теоретических моделях с упорядоченным магнитным полем предсказывается поляризация в 20–30% [16]. Проверка этого предсказания является сложной и интересной задачей, так как гамма-всплески — быстропеременные объекты с характерными временами жизни десятки секунд.



**Рис. 2:** Кривая блеска GRB 121011A во взаимно перпендикулярных поляроидах, полученная телескопом МАСТЕР–Благовещенск.

Для гамма-всплеска GRB 121011A представлены поляризационные измерения раннего оптического излучения (Рис. 2). К сожалению, всплеск наблюдался только двумя взаимно перпендикулярными поляроидами в Благовещенске. Безразмерный параметр Стокса оказался меньше ошибки наблюдений 2%. Невозможно сделать вывод об отсутствии поляризации, если наблюдения были произведены только с двумя поляроидами, так как существует вероятность, что плоскость поляризации была ориентирована под углом 45 градусов к поляроидам. Обнаружено, что типичная дисперсия параметров Стокса для звёзд поля в

измерениях МАСТЕР составляет 5%. Таким образом, телескопы сети МАСТЕР могут надёжно регистрировать линейную поляризацию выше 10% и на пределе обнаруживать поляризацию больше 5%. Уровень в 10% для степени линейной поляризации предсказывается в некоторых теоретических моделях излучения гамма-всплесков.

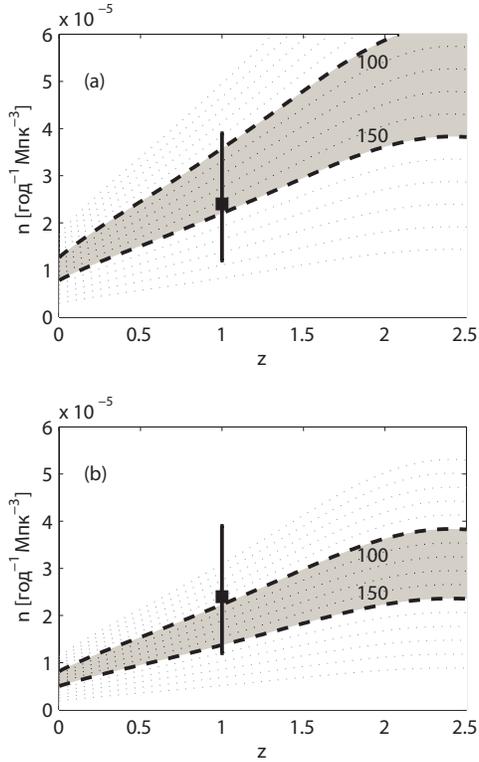
В **третьей главе** обсуждаются короткие гамма-всплески и связанные с ними явления.

Открытие четырёх миллисекундных радиовспышек [17] вместе с всплеском Лоримера [18] пробудило интерес к механизмам генерации нейтронными звёздами резко нестационарного радиоизлучения большой мощности. Существует несколько сценариев возникновения быстрых радиовспышек. В диссертации рассматривается сценарий сливающихся нейтронных звёзд как наиболее вероятный.

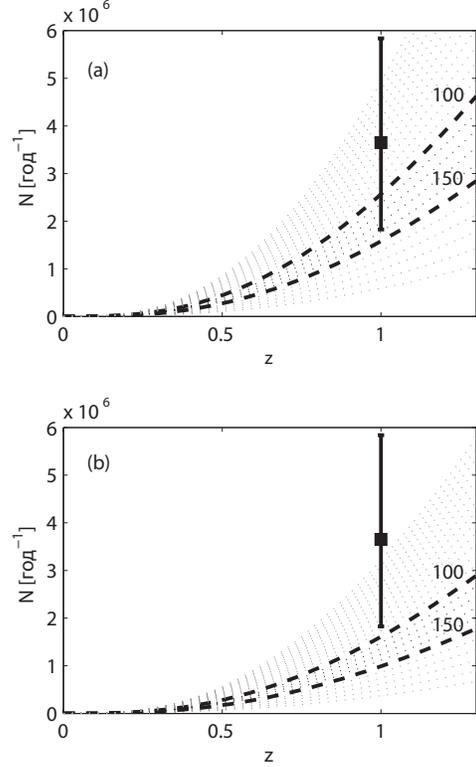
В этой главе впервые представлена эволюция частоты слияний нейтронных звёзд как функция красного смещения в рамках разумной функции звёздообразования во Вселенной. Для значения скорости отдачи 100–150 км/с эта функция даёт среднюю скорость слияний 1/500–1/2000 в год на галактику в сопутствующем объёме, соответствующем красным смещениям  $z = 0.5-1$ , что не противоречит наблюдаемой частоте быстрых радиовспышек [17]. Более того, предсказывается анизотропия излучения быстрых радиовспышек порядка 20%.

На Рис. 3 и Рис. 4 представлены рассчитанная частота слияний нейтронных звёзд,  $n$ , на единицу сопутствующего объёма и интегральная частота слияний,  $N$ , в зависимости от красного смещения  $z$ . Наблюдаемая частота быстрых радиовспышек была пересчитана на единицу сопутствующего объёма на  $z = 1$ , и получена следующая величина:  $2.4_{-1.2}^{+1.5} \times 10^{-5}$  в год на  $\text{Mpc}^3$ . Этот результат согласуется с теоретическими предсказаниями Машины Сценариев (Рис. 3). Наилучшее совпадение получается для функции звёздообразования, полученной в предположении Солпитеровской начальной функции масс (НФМ).

На основании результатов Машины Сценариев также рассматривается вопрос об отсутствии положительных детектирований в проекте по поиску гравитационных волн LIGO. Показано, что отсутствие событий от сливающихся нейтронных звёзд согласуется с нашими астрономическими предсказаниями,



**Рис. 3:** Число  $NZ+NZ$  слияний в год на  $Mpc^3$  для функции звёздообразования, основанной на модифицированной НФМ Солпитера [19] (a) и НФМ Болдри и Глазбрука [20] (b) для скоростей отдачи в интервале 100–150 км/с. Чёрные квадраты показывают наблюдаемую частоту быстрых радиовспышек, пересчитанную на единицу сопутствующего объёма на  $z = 1$ .



**Рис. 4:** Интегральное число  $NZ+NZ$  слияний в год внутри сферы с красным смещением  $z$  для функции звёздообразования, основанной на модифицированной НФМ Солпитера [19] (a) и НФМ Болдри и Глазбрука [20] (b) для скоростей отдачи в интервале 100–150 км/с. Чёрные квадраты показывают наблюдаемую частоту быстрых радиовспышек [17].

однако слияния нейтронных звёзд с чёрными дырами уже могли бы быть зарегистрированы.

**Заключение** посвящено основным результатам диссертации и дальнейшим перспективам исследования.

В **приложении А** приводится список сверхновых звёзд, открытых или впервые снятых с помощью роботизированной сети МАСТЕР. **Приложение В** содержит абсолютные калибровки МАСТЕР в поляроидах и  $BVRI$  фильтрах.

## Список литературы

- [1] Bogomazov A. I. and Tutukov A. V., «Type Ia supernovae: Non-standard candles of the Universe», *Astronomy Reports*, vol. 55, pp. 497–504, 2011.
- [2] Pruzhinskaya M. V., Krushinsky V. V., Lipunova G. V., et al., «Optical polarization observations with the MASTER robotic net», *New Astronomy*, vol. 29, pp. 65–74, 2014.
- [3] Lipunov V. M., Krylov A. V., Kornilov V. G., et al., «MASTER: The Mobile Astronomical System of Telescope-Robots», *Astronomische Nachrichten*, vol. 325, pp. 580–582, 2004.
- [4] Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E., et al., «Master Robotic Net», *Advances in Astronomy*, vol. 2010, pp. 1–6, 2010.
- [5] Lipunov V. M., Postnov K. A., Prokhorov M. E., et al., «Evolution of the Double Neutron Star Merging Rate and the Cosmological Origin of Gamma-Ray Burst Sources», *ApJ*, vol. 454, pp. 593–596, 1995.
- [6] Lipunov V. M., Postnov K. A., and Prokhorov M. E., «The scenario machine: Binary star population synthesis», *Amsterdam: Harwood Academic Publishers*, 1996.
- [7] Lipunov V. M., Postnov K. A., Prokhorov M. E., et al., «Description of the “Scenario Machine”», *Astronomy Reports*, vol. 53, pp. 915–940, 2009.
- [8] Abadie J., Abbott B. P., Abbott R., et al., «TOPICAL REVIEW: Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors», *Classical and Quantum Gravity*, vol. 27, no. 17, pp. 1–25, 2010.
- [9] Lipunov V. M., Panchenko I. E., and Pruzhinskaya M. V., «The mechanism of supernova Ia explosion in elliptical galaxies», *New Astronomy*, vol. 16, pp. 250–252, 2011.

- [10] Pruzhinskaya M. V., Gorbovskey E. S., and Lipunov V. M., «Pure supernovae and accelerated expansion of the Universe», *Astronomy Letters*, vol. 37, pp. 663–669, 2011.
- [11] Lipunov V. M. and Pruzhinskaya M. V., «Scenario Machine: fast radio bursts, short gamma-ray burst, dark energy and Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory silence», *MNRAS*, vol. 440, 2014.
- [12] Lipunov V. M. and Pruzhinskaya M. V., «Scenario Machine: Fast Radio Bursts, Short GRB, Dark Energy and LIGO silence», *ArXiv: 1312.3143*, 2013.
- [13] Tsvetkov D. Y., Balanutsa P. V., Lipunov V. M., et al., «Photometric observations of the supernova 2009nr», *Astronomy Letters*, vol. 37, pp. 775–782, 2011.
- [14] Burns C. R., Stritzinger M., Phillips M. M., et al., «The Carnegie Supernova Project: Light-curve Fitting with SNooPy», *AJ*, vol. 141, pp. 1–20, 2011.
- [15] Wang L. and Wheeler J. C., «Spectropolarimetry of Supernovae», *ARA&A*, vol. 46, pp. 433–474, 2008.
- [16] Granot J., «The Most Probable Cause for the High Gamma-Ray Polarization in GRB 021206», *ApJ*, vol. 596, pp. 17–21, 2003.
- [17] Thornton D., Stappers B., Bailes M., et al., «A Population of Fast Radio Bursts at Cosmological Distances», *Science*, vol. 341, pp. 53–56, 2013.
- [18] Lorimer D. R., Bailes M., McLaughlin M. A., et al., «A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin», *Science*, vol. 318, pp. 777–780, 2007.
- [19] Salpeter E. E., «The Luminosity Function and Stellar Evolution», *ApJ*, vol. 121, pp. 161–167, 1955.
- [20] Baldry I. K. and Glazebrook K., «Constraints on a Universal Stellar Initial Mass Function from Ultraviolet to Near-Infrared Galaxy Luminosity Densities», *ApJ*, vol. 593, pp. 258–271, 2003.