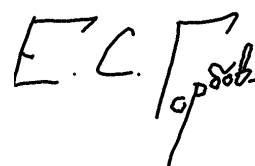


Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова  
Физический факультет  
Кафедра астрофизики и звездной астрономии

На правах рукописи  
УДК 524.354

ГОРБОВСКОЙ Евгений Сергеевич



# Исследования собственного излучения гамма-всплесков при помощи сети телескопов-роботов МАСТЕР

Специальность: *01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия*

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

Москва 2012

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова и в лаборатории космического мониторинга Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова

### **Научный руководитель**

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

### **Официальные оппоненты**

доктор физико-математических наук, Блинников Сергей Иванович  
(Институт Теоретической и  
Экспериментальной Физики)

кандидат физико-математических наук Бескин Григорий Меерович  
(Специальная Астрофизическая  
Обсерватория РАН)

### **Ведущая организация**

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 14 июня 2012 года в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д501.001.86 МГУ имени М.В.Ломоносова (119234, Москва, Университетский пр. д. 13, ГАИШ МГУ)

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга МГУ (119234, Москва, Университетский пр. д. 13, ГАИШ МГУ)

Автореферат разослан "14" мая 2012 года

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук



С.О.Алексеев

После 1997 года, когда впервые было обнаружено оптическое излучение гамма-всплесков, мы узнали, что имеем дело с самыми мощными взрывами во Вселенной. Это излучение, наблюдавшееся через несколько часов после всплеска, фактически является послесвечением, которое генерируется уже после гигантского взрыва в ударной волне (bow shock), проходящей по межзвездной среде, окружающей центральную машину. Послесвечение слабо зависит от характера взрыва и в основном определяется энергией взрыва и свойствами окружающего вещества. Именно поэтому природа всплесков до сих пор является загадкой. Хотя многие исследователи сходятся в том, что гамма-всплески — это результат образования (коллапса) особенных быстровращающихся черных дыр. Чтобы понять детали этого процесса, а по деталям доказать наши теоретические представления, необходимо регистрировать сам процесс, то есть проводить наблюдения во всех диапазонах спектра в момент, когда гамма-всплеск еще не закончился. Впервые в мире собственное оптическое излучение от гамма-всплеска GRB990123 наблюдалось в 1999 году обсерваторией ROTSE-I (Акерлоф и др [1]).

Однако наблюдать синхронное излучение гораздо труднее, чем послесвечение, потому что сам гамма-всплеск, как правило, длится не более нескольких десятков секунд. Следовательно, можно поступить двумя способами:

- либо постоянно снимать большие участки неба, ожидая, что гамма-всплеск попадет в поле зрения случайно ( Блестящим примером здесь служат наблюдения аппаратом TORTORA ярчайшего всплеска GRB080319B[6] )
- либо использовать специальные роботизированные телескопы, готовые в любой момент с рекордной скоростью навестись в любую точку неба по сигналу с космической гамма-обсерватории – алертный способ .

Российский роботизированный телескоп МАСТЕР II [2], [3], [4] использует оба метода. В данной работе более подробно мы будем говорить об алертных оптических наблюдениях, особенно обратив внимание на наблюдения 4-х гамма-всплесков из Сибири, хотя в конце коснемся и синхронных наблюдений со сверхширокопольных камер.

С момента открытия синхронного оптического излучения гамма-всплесков в 1998 группой Акерлофа [1], удачные регистрации собственного оптического из-

лучения <sup>1</sup>, практически можно пересчитать по пальцам. Алертные наблюдения оптического излучения гамма-всплесков представляют собой новый глобальный физический эксперимент, основанный на трех научно-технических революциях, состоявшихся перед началом XXI века: появление глобальной сети Интернет, появление мощных персональных компьютеров и быстрых ПЗС-приемников оптического излучения. Вся сложность состоит в том, чтобы быстро сделать 4 шага, пока гамма-всплеск еще “жив”.

1. Гамма-всплески регистрируются космическими гамма-телескопами (*Swift*, *Fermi*, *INTEGRAL*, и др.)
2. После обработки принятого гамма-излучения на борту, координаты всплеска направляются в Центр Международной сети изучения гамма-всплесков, расположенном на сайте НАСА (GCN). Первых два шага занимают примерно от 10 до 40 сек.
3. Полученные координаты рассылаются по сети Интернет по всем наземным телескопам-роботам (0.5 сек)
4. Телескопы роботы наводятся по полученным координатам (на это тратится от 7 до 40 секунд у небольших телескопов (до полуметра) и от нескольких минут до часов у двухметровых и более телескопов) и получают изображения в оптическом или инфракрасном свете.

Первый робот-телескоп МАСТЕР (Мобильная Астрономическая Система Телескопов Роботов) заработал в Подмосковье в 2002 [2], [5], благодаря поддержке частного предприятия - Московского Объединения "Оптика". А начиная с 2008 года началось строительство общероссийской сети МАСТЕР. Теперь – телескопы сети МАСТЕР располагаются в обсерваториях Московского (под Кисловодском), Уральского (Коуровка), Иркутского (Тунка), Благовещенского Педагогического (под Благовещенском) университетов. Во всех пунктах устанавливаются полностью идентичные комплексы МАСТЕР II, позволяющие одновременно получать 2 изображения в широкополосных фильтрах или двух поляризациях [4].

Экспериментальному и теоретическому изучению собственного оптического излучения гамма-всплесков при помощи сети робот-телескопов МАСТЕР и посвящена данная диссертация.

---

<sup>1</sup>Имеется ввиду получение хоть сколько-нибудь детализированной кривой блеска, а не одной точки

# Общая характеристика работы

## Цели и задачи работы

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое изучение собственного оптического излучения гамма-всплесков при помощи сети робот-телескопов МАСТЕР. Для ее реализации были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка программного обеспечения для осуществления и планирования наблюдений на телескопах сети МАСТЕР. Реализация абсолютно автономной работы без участия человека. Реализация наблюдений в обзорном и алертном режимах.
2. Развитие и унификация программного обеспечения для обработки потока астрономических изображений с ПЗС-камер сети робот-телескопов МАСТЕР в режиме реального времени на удаленных серверах. Автоматический поиск кандидатов в сверхновые звезды, транзиенты (в том числе быстрые), астероиды. Существенная модернизация базы данных, содержащей все полученные с помощью робот-телескопа изображения, а также информацию о всех астрономических объектах, которые хоть раз попали в кадр. Адаптация базы для быстрой работы в режиме реального времени и пополнения по мере поступления новой информации.
3. Создание пользовательского web-интерфейса для анализа данных и удаленного контроля работы телескопов сети МАСТЕР через Интернет, позволяющего, совместно с автоматической системой астрофизической классификации объектов, обнаруживать оптические транзиенты: сверхновые звезды, катаклизмические переменные, астероиды, всплески-сироты и другие астрономические объекты, координаты и/или блеск которых сильно меняются с течением времени.
4. Создание программ для реализации съемки, хранения, анализа и отображения данных со сверхширокопольных камер МАСТЕР VWF.
5. Изучение собственного оптического излучения гамма-всплесков по алертным наблюдениям на телескопах МАСТЕР-II и синхронным наблюдениям с камер сверхширокого поля МАСТЕР-VWF.

6. Создание псевдоньютоновской нестационарной численной модели коллапса ядра массивной звезды для объяснения сопутствующих длинным гамма-всплескам явлений (ранних рентгеновских вспышек и прекурсоров). Объяснение в рамках данной модели реальных наблюдений с телескопов МАСТЕР и феномена длинного рентгеновского плато у некоторых гамма-всплесков.

## **Актуальность работы**

Изучение природы гамма-всплесков, подтверждение существования и выявление природы т.н. всплесков-сирот, а также накопление информации о параметрах большого количества сверхновых звезд типа Ia («стандартные свечи») – проблемы, которые являются одними из самых актуальных в современной астрофизике, и их решение невозможно без использования робот-телескопов. Вместе с тем, автоматические системы с широким полем зрения могут помочь в решении многих других астрономических задач: слежение за уже известными астероидами и поиск новых астероидов и комет, в том числе потенциально опасных для Земли, массовое изучение переменности блеска звезд, обусловленное их нестационарностью либо прохождением по их диску экзопланет или микролинзированием.

## **Новизна работы**

Сеть телескопов МАСТЕР не имеет аналогов в России на сегодняшний день. Весь созданный комплекс управляющих программ был создан впервые и позволяет осуществлять полностью автономные (т.е. вообще без участия человека) наблюдения. Максимальное время работы без человеческого технического обслуживания сейчас — более месяца.

Сеть телескопов МАСТЕР предназначена для изучения широкого круга явлений и объектов: от астероидов до собственного оптического излучения гамма-всплесков. С учетом этой специфики нами впервые создан пакет программ обработки астрономических данных, позволяющий в реальном времени решать следующий комплекс задач:

- определять абсолютные координаты и блеск всех объектов, попавших в кадр размером 4 кв. градусов (и до 1000 кв. градусов в случае камер сверх-

широкого поля);

- классифицировать объекты по типам (звезды, галактики, астероиды и т.д.);
- обнаруживать транзиентные объекты;
- проводить первичную классификацию транзиентных объектов.

Для изучения любых типов объектов создана и поддерживается база данных, в которой собраны результаты всех наблюдений.

Результатами работы комплекса управляющих и обрабатывающих программ стали наблюдения собственного излучения и послесвечений гамма-всплесков, открытия большого числа оптических транзиентов, сверхновых звезд, астероидов и т.д.

В ходе регулярного обзора каждой из обсерваторий сети все северное небо было осмотрено несколько раз. По запросу, астрономам предоставляется доступ к архивным данным. Архив постоянно пополняется.

Для объяснения оригинальных (и не только) результатов была создана численная модель магнито-гравитационного коллапса ядра массивной быстровращающейся звезды, описывающая длительную работу “центральной машины” гамма-всплесков. До настоящего же времени, главным образом, рассматривались модели точечного мгновенного взрыва и последующего взаимодействия системы прямых и отраженных ударных волн. На примере наблюдений длинных рентгеновских плато показаны преимущества созданной модели. В рамках созданной модели и авторских наблюдений выдвинуты предположения о природе и параметрах “центральной машины” у гамма-всплесков GRB060926 и GRB100901A.

### **Достоверность научных результатов.**

Результаты диссертации опубликованы в 22 статьях в ведущих мировых и российских рецензируемых журналах, неоднократно докладывались на международных и российских симпозиумах. Некоторые наблюдательные данные подтверждены независимыми наблюдениями других обсерваторий.

## **Практическая значимость работы.**

Описанный в диссертации комплекс программ управления и обработки данных позволил практически решать задачи, для которых была создана сеть робот-телескопов МАСТЕР: обнаружение и оперативное исследование транзитных объектов. С помощью разработанных программ сеть МАСТЕР способна решать проблемы астероидной опасности и непрерывно осуществлять контроль околоземного пространства. Созданная и постоянно пополняемая текущими наблюдениями база данных содержит информацию, которая может быть использована любым астрономом для изучения самых разных астрономических объектов. Рассматриваемый комплекс программ предполагается использовать в новых пунктах глобальной сети МАСТЕР, которые планируется установить в Аргентине, на Канарских островах и др. местах.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Создание универсального программного обеспечения сети робот-телескопов МАСТЕР, которое обеспечило ранние наблюдения гамма-всплесков и открытие более 50-ти оптических транзиентов (сверхновых звезд, новых звезд, карликовых новых и транзиентов неизвестной природы).
2. Наблюдение собственного излучения гамма-всплесков GRB110521A, 110411A, 110407A, 110207A, 101020A, 101008A, 100906A, 100902A и 100901A.
3. Подтверждение существования разных механизмов формирования собственного оптического излучения гамма-всплесков.
4. Создание качественной модели магнито-гравитационного коллапса ядра массивной быстро вращающейся звезды.

## **Личный вклад автора**

Для обеспечения работы сети МАСТЕР необходимо программное обеспечение, которое условно можно разделить на три части: комплекс программ, обеспечивающих управление процессом наблюдений, система обработки получаемых телескопом изображений, и, наконец, система выделения неотожествлен-



ных объектов и их астрономическая классификация. В создание всего комплекса программ, автор внес решающий вклад: ему принадлежит развитие поставленных задач и программная реализация соответствующих алгоритмов. Что касается открытия транзиентных источников, результаты которых вынесены на защиту, то здесь вклад автора состоит в создании комплекса автоматической обработки изображений и их (кандидатов в транзиенты) астрофизической идентификации и в равноправном (с соавторами соответствующих публикаций) участии в интерпретации полученных результатов.

Автор непосредственно участвовал в запуске всех без исключения пунктов сети МАСТЕР; производил настройку и юстировку аппаратуры на обсерваториях. Автор участвует в поддержании функциональности всех пунктов сети, а также координирует ремонтные работы в случае их необходимости.

Теоретическая численная модель магнито-гравитационного коллапса ядра массивной быстровращающейся звезды была разработана автором совместно с его научным руководителем. Дальнейшее развитие модель получила с использованием результатов популяционного синтеза для генерации начальных условий коллапса, однако в этой части работы автор принимал консультативное участие и полученные результаты в диссертации не рассматриваются и не выносятся на защиту.

## Апробация работы и публикации

Результаты работы изложены в 22 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах:

1. Gorbovskoy, E. S.; Lipunova, G. V.; Lipunov, V. M.; Kornilov, V. G.; Belinski, et. al. "Prompt, early and afterglow optical observations of five  $\gamma$ -ray bursts: GRB 100901A, GRB 100902A, GRB 100905A, GRB 100906A and GRB 101020A" **MNRAS**, V. p. 2580, 2012
2. Kornilov, V. G.; Lipunov, V. M.; Gorbovskoy, E. S.; Belinski, A. A. et al "Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms" **Experimental Astronomy**, Volume 33, Issue 1, pp.173-196, 2012
3. Lipunov, V.; Gorbovskoy, E. "An Extra Long X-Ray Plateau in a Gamma-Ray Burst and the Spinar Paradigm" **Astrophysical Journal Letters** 2007, 665L..97L
4. Е.С. Горбовской, В.М. Липунов, В.Г. Корнилов А.А. Белинский "Глобальная сеть роботизированных оптических телескопов МАСТЕР II. Часть II. Первые результаты" "**Астрономический журнал**" в печати.

5. Gorbovskoy E, Ivanov K, Lipunov V, et al “Transient detections and other real-time data processing from wide-field cameras MASTER-VWF”, **Advances in Astronomy**, vol. 2010, Article ID 917584, 17 pages, 2010. doi:10.1155/2010/917584
6. Pruzhinskaya, M. V.; Gorbovskoy, E. S.; Lipunov, V. M. “‘Чистые’ сверхновые и ускоренное расширение вселенной.” **Письма в астрономический журнал** Т. 37, №10 стр. 723-729, 2011
7. В.М.Липунов, В.Г.Корнилов, Е.С.Горбовской, и др. “Открытие оптической вспышки гамма-всплеска GRB060926 телескопом-роботом МАСТЕР: возможное образование предельно-вращающейся черной дыры.” **Письма в Астрономический журнал**, 2008, 34(3), 167
8. Lipunov, V. M.; Gorbovskoy, E. S. “Spinar paradigm and the central engine of gamma-ray bursts” **MNRAS**, 2008, V.383(4), 1397.
9. Lipunova G.V., Gorbovskoy E.S., Bogomazov A.I., Lipunov V.M., “Population synthesis of gamma-ray bursts with precursor activity and the spinar paradigm”, **MNRAS** 2009, 397, 1695-1704
10. В.М.Липунов, В.Г.Корнилов, Е.С.Горбовской, и др. “Оптические наблюдения гамма-всплесков, открытие сверхновых звезд 2005bv, 2005ee, 2006ak и поиск транзиентов на телескопе-роботе МАСТЕР” **Астрономический журнал**, 2007, т.84, N12
11. Lipunov, V. M.; Krylov, A. V.; Kornilov, V. G.; Borisov, G. V.; Kuvshinov, D. A.; Belinsky, A. A.; Kuznetsov, M. V.; Potanin, S. A.; Antipov, G. A.; Tyurina, N. V.; Gorbovskoy, E. “MASTER: The Mobile Astronomical System of Telescope-Robots” **Astronomische Nachrichten**, Vol.325, Issue 6, p.580-582
12. N. Tyurina, V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskoy et. al. “MASTER prompt and follow-up GRB observations”, **Advances in Astronomy**, vol. 2010, Article ID 763629, 6 pages, 2010. doi:10.1155/2010/763629
13. Lipunov, V.; Kornilov, V.; Gorbovskoy, E.; Shatskij, N.; et al “Master Robotic Net”, **Advances in Astronomy**, vol. 2010, Article ID 349171, 6 pages, 2010. doi:10.1155/2010/349171
14. V. M. Lipunov; V. G. Kornilov; A. V. Krylov; D. A. Kuvshinov; E. S. Gorbovskoy; et al. “Observations of gamma-ray bursts and a supernovae search at the robotic telescope MASTER” **Astronomical and Astrophysical Transactions**, 2007, V.26, P.79
15. Цветков Д.Ю., Балануца П.В., Липунов В.М., Волков И.М., Тучин О.А., Куделина И.П., Пружинская М.В., Горбовской Е.С., “Фотометрические наблюдения сверхновой 2009NR” **Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика**. 2011. Т. 37. № 11. С. 837-845.

16. D. Yu. Tsvetkov, P. Balanutsa, E.S. Gorbovskoy, et. al “The light curves of type Ia Supernova 2008gy” **Peremennye Zvezdy** (Variable Stars) 30, No. 3, 2010
17. Lipunov, V. M.; Kornilov, V. G.; Krylov, A. V.; Borisov, G. V.; Kuvshinov, D. A.; Belinski, A. A.; Gorbovskoy, E. S.; et al. “The Master Mobile Astronomical System. Optical Observations of Gamma-Ray Bursts” **Astrophysics**, Volume 48, Issue 3, pp.389-399
18. Lipunov, V.; Krylov, A.; Kornilov, V.; Borisov, G.; Kuvshinov, D.; Belinski, A.; Antipov, G.; Gorbovskoy, E.; “Supernova 2005bv” **Central Bureau Electronic Telegrams**, 146, 1 (2005). Edited by Green, D. W. E.
19. Balanutsa P., Gorbovskoy E. “Supernova 2010db” **Central Bureau Electronic Telegrams**, 2290, 1 (2010).
20. Shumkov, V.; Balanutsa, P.; Gorbovskoy, E. “Supernova 2010ea” **Central Bureau Electronic Telegrams**, 2320, 1 (2010).
21. Tyurina, N.; Lipunov, V.; Kornilov, V.; Krylov, A.; Borisov, G.; Belinski, A.; Kuvshinov, D.; Gorbovskoy, E.; Gritsyk, P.; Sinitsyn, M.; “Supernovae 2006ak and 2006a” **IAUC**, 8677, 1 (2006).
22. Tyurina, N.; Lipunov, V.; Kornilov, V.; Krylov, A.; Borisov, G.; Belinski, A.; Kuvshinov, D.; Gorbovskoy, E.; Gritsyk, P.; Sinitsyn, M.; “Supernova 2006ak” **Central Bureau Electronic Telegrams**, 408, 1 (2006).
23. Lipunov, V.; Krylov, A.; Kornilov, V.; Borisov, G.; Kuvshinov, D.; Belinski, A.; Antipov, G.; Gorbovskoy, E.; et al. “Supernovae 2005bv and 2005bw” **IAU Circ.**, 8520, 1 (2005). Edited by Green, D. W. E.
24. Lipunov, V. M.; Kornilov, V. G.; Krylov, A. V.; Tyurina, N. V.; Belinski, A. A.; Gorbovskoy, E. S. et al. “Brightness of SN 2006X” **VizieR On-line Data Catalog**: J/AZh/84/1110.

Кроме того, автор диссертации является соавтором свыше 200 электронных публикаций в циркулярах GCN (The Gamma ray bursts Coordinates Network Circulars, [http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3\\_archive.html](http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html)) и Atel (The Astronomers Telegram <http://www.astronomerstelegam.org/>).

Результаты работы были доложены на многочисленных международных и российских конференциях:

1. доклад «Наблюдения собственного излучения гамма-всплесков на робот-телескопах МАСТЕР» Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» 11-15 апреля, МГУ (диплом за лучший доклад в секции астрофизика)
2. доклад «Открытие и исследование оптических транзиентов с помощью роботизированной сети МАСТЕР» Научная конференция "ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ" 14-20 ноября 2011, МГУ

3. доклад «Роботизированная сеть МАСТЕР и ее возможности в части наблюдения объектов солнечной системы.» Europlanet JRA1-NA1 Workshop Moscow State University of Geodesy and Cartography MIIGAiK, Moscow, Russia, on 2011, November 14-16
4. Доклад «Наблюдения оптических компонентов гамма-всплесков с помощью сети телескопов-роботов МАСТЕР» Young Scientists Conference “50 Years of Cosmic Era: Real and Virtual Studies of the Sky”, 21-25 November 2011, Yerevan, Armenia.
5. стендовый доклад «Наблюдение собственного излучения гамма-всплесков при помощи робот-телескопов МАСТЕР» АСТРОФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА — 2011, Москва, ИКИ РАН, 13-16 декабря 2011 г.
6. доклад “MASTER Global Robotic Net” Second Workshop on Robotic Autonomous Observatories, Málaga, Spain, 5-10 June 2011
7. доклад "Измерение поляризации GRB091020 И GRB091127 по наблюдениям телескопа "МАСТЕР II" науч. конференции "Физика Космоса" 01 - 05 февраля 2010 г. Кауровка, Россия
8. доклад «Гамма-всплески и сопутствующие явления («предшественники» и «последыши») - модель растянутого коллапса (спинар-парадигма)» Научная сессия МИФИ-2008 МИФИ, 2008г
9. доклад “Transient detections and other real-time data processing from wide-field cameras” Workshop on Robotic Autonomous Observatories, Málaga, Spain, 18-21 May 2009
10. доклад ‘Master Robotic Net” Workshop on Robotic Autonomous Observatories, Málaga, Spain, 18-21 May 2009
11. доклад “Follow up Optical Observations of GRB by MASTER Robotic Telescope” Neutron Stars and Black Holes in Star Clusters, 26th meeting of the IAU, Joint Discussion 6, 17-18 August 2006, Prague, Czech Republic
12. доклад «Наблюдения собственного оптического излучения гамма-всплесков» Научная сессия МИФИ-2008 МИФИ, 2008г
13. доклад "On-Line обработка изображений на телескопе-роботе МАСТЕР" конференции "Физика Космоса" 31.01 - 04.01 2005 г. Кауровка, Россия
14. доклад «Исследование гамма-всплесков при помощи робот-телескопа МАСТЕР» науч.-практ. конф. «Небо и Земля» г.Иркутск 21-23 ноября 2006 г.

и других.

## Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, благодарностей и приложений. Общий объем диссертации 182 страницы, включая 69 рисунков и 38 таблиц.

В первой части Введения описано, для каких целей создаются робот-телескопы и рассмотрены основные характеристики существующих телескопов этого типа. Объясняется, в чем состоит специфика программного обеспечения, определяющего функционирование робот-телескопа МАСТЕР. Во второй части Введения сформулированы цели и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту, обоснована актуальность темы диссертации, указано, в чем состоит новизна работы и пояснено, что позволяет считать полученные результаты достоверными.

В Главе 1 подробно рассмотрена сеть телескопов-роботов МАСТЕР. В первом разделе главы описывается история создания сети, а также основные цели и задачи, которые она способна решать. Во второй части проанализированы географические особенности расположения пунктов сети, производится анализ метеорологических условий по данным, полученным со специальных метеостанций, входящих в состав комплекса, а также мест для расположения новых пунктов сети. Все пункты сети МАСТЕР, представлены в таблице 1. В третьей ча-

**Таблица 1:** Координаты существующих и планируемых обсерваторий сети МАСТЕР и количество полученных кадров в обзорном и алертных режимах на март 2011 года.

Пункт сети	Долгота $\lambda$	Широта $\phi$	$h$	Обзор	Алерт	Примечание
МАСТЕР-УРАЛ	03 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> .2	+57°02'13"	290	30561	1944	Коуровская АО УрГУ
МАСТЕР-ТУНКА	06 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> .1	+51°48'34"	700	27688	1124	Тункинская долина
МАСТЕР-АМУР	08 <sup>h</sup> 29 <sup>m</sup> 56 <sup>s</sup> .0	+50°19'07"	215	53088	3696	бывш. Благовещенская ШС
МАСТЕР-КИСЛ.	02 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> 04 <sup>s</sup> .0	+43°45'00"	2067	63214	6131	Территория ГАС ГАО

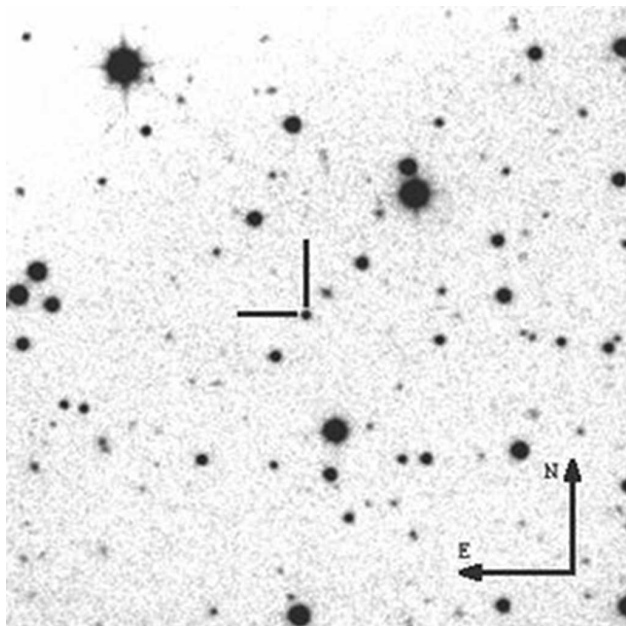
сти подробно описывается аппаратура, установленная на каждой обсерватории. Приводятся характеристики основных узлов телескопа-робота. В четвертой части речь идет о информационно-аппаратной структуре комплекса, в частности, о конкретном наборе компьютеров, вспомогательных устройств, устройств контроля и программного обеспечения, необходимого для нормального функционирования системы. В пятом параграфе описывается программное обеспечение, созданное нами для реализации процесса наблюдений (т.н. информационно-программная структура комплекса). Подробно описаны цели и задачи, которые

должен решать телескоп, алгоритмы решения этих задач, а также конкретная реализация в нашей системе. В шестом разделе описан процесс проведения наблюдений телескопом-роботом. Описаны основные режимы наблюдения, критерии выбора площадок для наблюдений в режиме обзора, стратегии ведения наблюдений в алертном и обзорном режимах. Далее рассмотрена стратегия созданной нами обработки изображений в режиме реального времени. Вкратце описана система выделения источников с кадра, система астрометрической и фотометрической привязки звезд к каталогам, система нахождения, классификации и фильтрации найденных в результате работы оптических транзиентов (кандидатов в сверхновые звезды, оптические транзиенты неизвестной природы, быстрые транзиенты, астероиды и др). Указаны особенности хранения результатов обработки в базе данных. В заключительной, девятой части оценены принципиальные возможности телескопов МАСТЕР по прониканию и скорости ведения обзора, расположенных в различных пунктах.

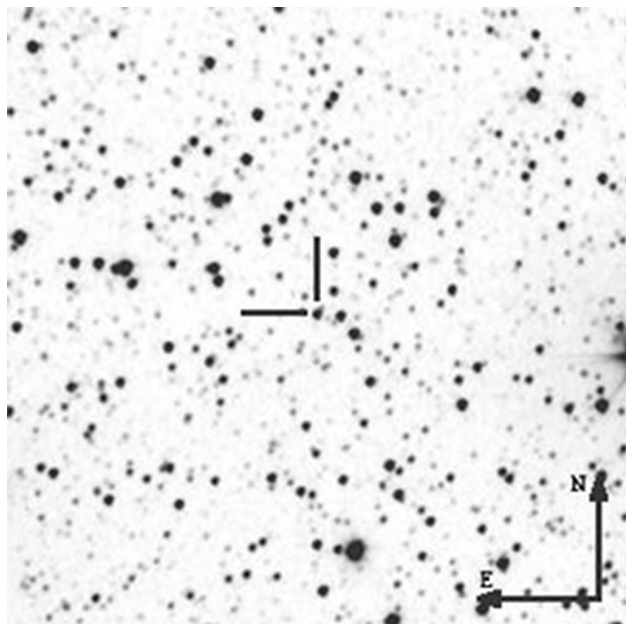
Вторая глава диссертации полностью посвящена наблюдению гамма-всплесков. Глава начинается с определения фотометрической точности, которую можно получить при наблюдениях с помощью системы МАСТЕР-II. Затем подробно описаны наблюдения послесвечений 7 гамма-всплесков полученных на различных пунктах сети.

В начале сентября 2010 года сеть телескопов МАСТЕР провела очень успешные наблюдения пяти гамма-всплесков, зарегистрированных обсерваторией *Swift*: это всплески 100901A, 100902A, 100905A и 100906A. В этой части мы более подробно остановимся на этих наблюдениях и проведем анализ двух длинных всплесков, для которых были получены успешные наблюдения собственного оптического излучения. Для GRB100906A также будут рассмотрены данные, полученные с помощью 1.5-m телескопов Sierra-Nevada Observatory (OSN) и 2.56-m Nordic Optical Telescope (NOT).

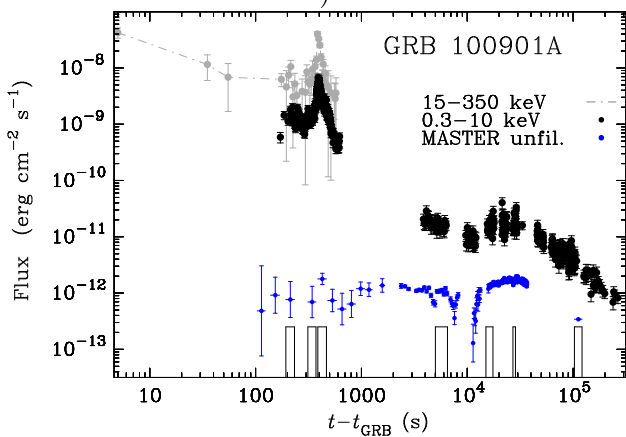
Сперва мы описываем проведенные наблюдения. В следующем пункте рассмотрена обработка и анализ данных, полученных с телескопами МАСТЕР. Затем представлены спектры GRB100901A и GRB100906A до  $T_{90}$ , более поздние спектры и определение оптического поглощения в родительских галактиках для этих всплесков, а также определение времени излома джета на кривой блеска GRB100906A после 10000 секунды. Далее мы высказываем аргументы в пользу различного происхождения собственного оптического излучения



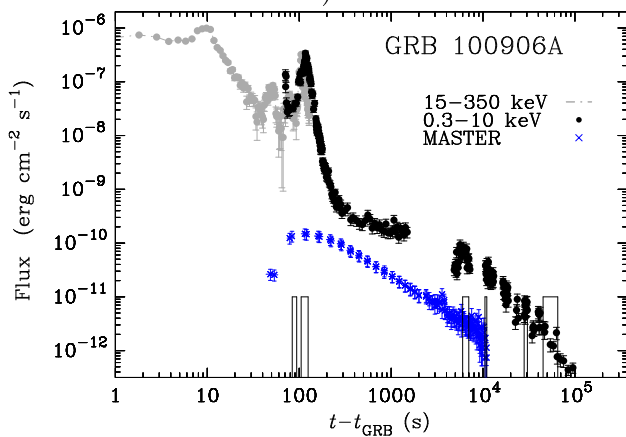
a)



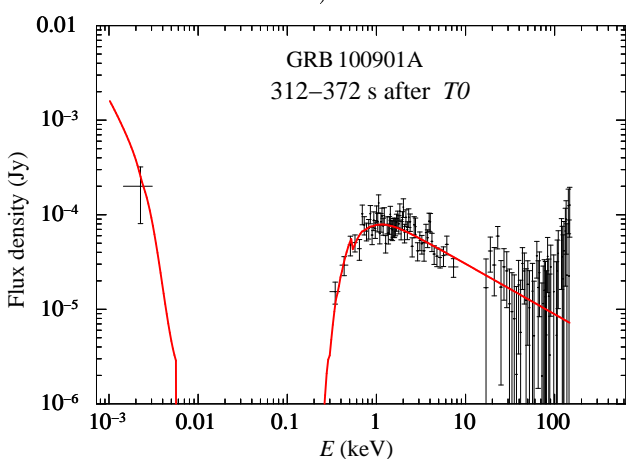
b)



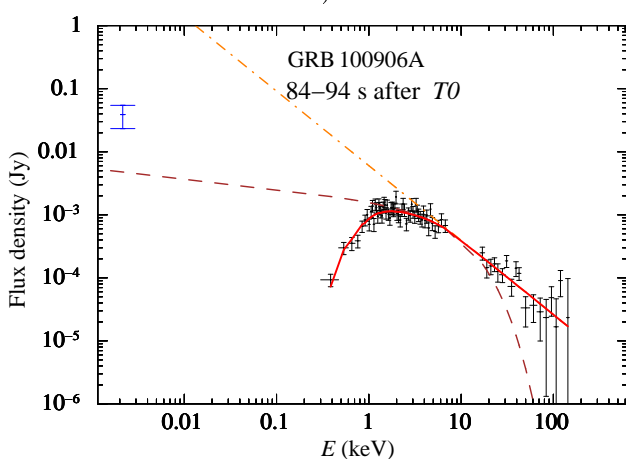
c)



d)



e)



e)

**Рис. 1:** a) Изображение GRB100901A b) Изображение GRB100906A c,d) Кривые блеска, в  $\gamma$  (серый цвет), рентгеновском (черный) и оптическом (синий) диапазоне для GRB100901A и GRB100906A (в двух поляризациях) соответственно. e,f) Спектры GRB100901A и GRB100906A соответственно в широком диапазоне от оптики до гамма.

у GRB 100901A и 100906A. Мы также обсуждаем их спектральную эволюцию и спектральные характеристики других гамма-всплесков, для которых оптическое излучение не было зарегистрировано. В ходе работы проверена применимость соотношений Амати для GRBs 100901A и 100906A. Также, с использованием разработанной нами и описанной в следующей главе модели двухступенчатого коллапса для длительной работы центральной машины, мы описываем вспышку на рентгеновской и оптической кривой блеска GRB 100901A.

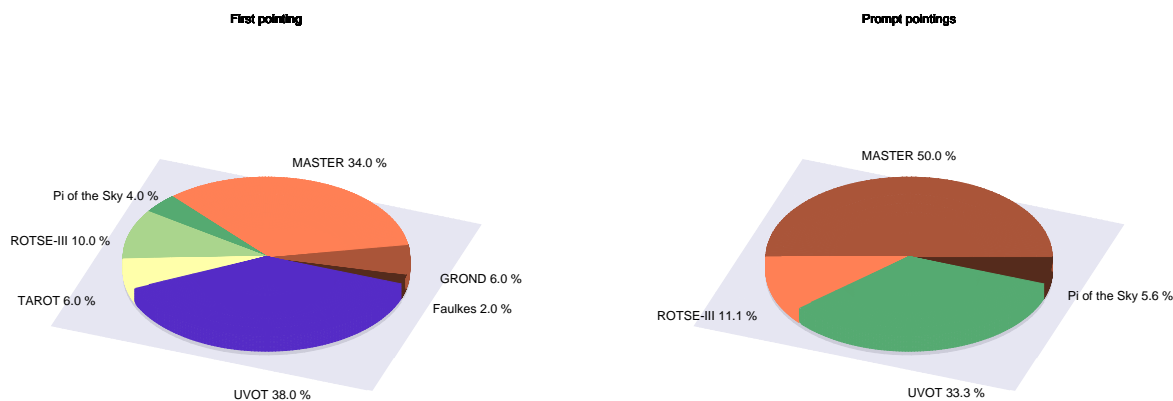
Анализ кривых блеска и спектров всплесков GRB 100901 A и 100906 A (см. рис. 1 ) указывает на различную природу собственного оптического излучения. Корреляция между оптическими и высокоэнергетическими кривыми блеска GRB 100901 A, а также результаты спектральных фитирований свидетельствуют в пользу гипотезы общего источника для оптического и высокоэнергетического спектра. Во время  $\gamma$ -вспышки, начавшейся приблизительно на 300 сек после триггера, наклон спектрального распределения от оптического до 150 keV близок к  $-1/2$ , что ожидаемо для синхротронного излучения на частотах выше характерной частоты охлаждения, и ниже характерной синхротронной частоты в режиме “быстрого охлаждения”, см. например [7]. Итоговые величины оптического поглощения в родительской галактике непротиворечивы для фитирований во время собственного излучения и похожи на значения, полученные при фитировании поздних спектров степенным законом с поглощением. Все это означает, что оптические точки во время собственного излучения описываются тем же спектральным распределением, что и  $\gamma$  с рентгеном, поддерживая тем самым гипотезу об их общем месте и механизме происхождения.

Большое внимание уделяется оценке поглощения в родительских галактиках этих гамма-всплесков. Оцененное отношение плотности атомов водорода на луче зрения в родительской галактике всплеска  $N_{\text{H}}^{\text{int}}$  к полному оптическому поглощению  $A_{\text{V}}^{\text{int}}$  предполагает, что родительская галактика GRB 100901 A обладает отношением металла к пыли, сопоставимым с уровнем, измеренным для Млечного пути или Магеллановых Облаков.

У GRB 100906 A не было замечено никакой очевидной корреляции между оптическими и 15 – 150 keV кривыми блеска. Мы предполагаем, что у GRB 100906 A собственное оптическое излучение рождается в области, отличной от области происхождения  $\gamma$  - лучей, вероятно, во фронтальной ударной волне.

Спектральный анализ GRB 100906 A показывает, что компонент эмиссии,





**Рис. 2:** На левом рисунке представлен относительный вклад обсерваторий в первые наведения на гамма-всплески. Анализировался временной промежуток длиной в год после введения в строй всех телескопов сети МАСТЕР с сентября 2010 по июнь 2011 года по данным GCN циркуляров. На правом рисунке представлен относительный вклад обсерваторий в первые наведения на гамма-всплески в момент собственного излучения (*prompt*).

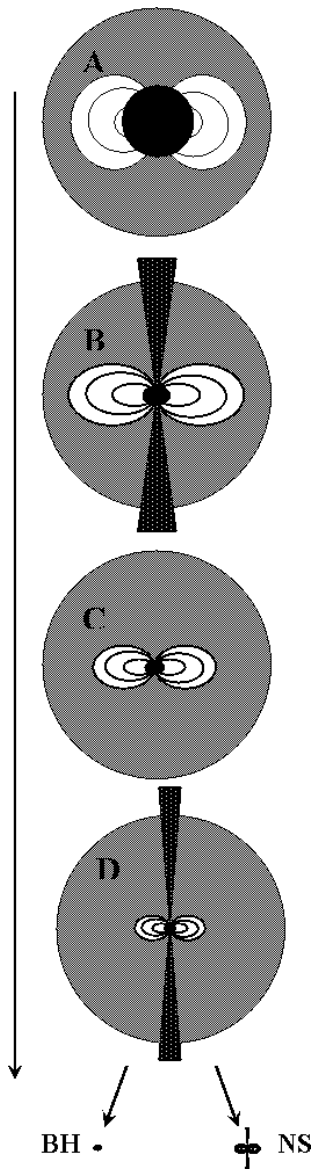
ответственный за  $\gamma$  вспышку на  $\sim 100$  сек после триггера и постепенно ослабевающий до рентгеновского пика в спектральном распределении, не коррелирует с оптическим излучением в этом временном интервале.

Сигналы в двух ортогональных поляризациях, измеренные телескопом МАСТЕР Тунка, от GRB 100906 A равны в пределах 0.5 процентов. Мы вычислили распределение вероятностей для дробной линейной оптической поляризации GRB 100906 A. Мы надеемся, что будущие наблюдения гамма-всплесков телескопами сети МАСТЕР приведут к более точно определенной поляризации.

У рентгеновской (0.3 - 10 keV) кривой блеска GRB 100906 A есть излом через приблизительно 14 часов после триггера. Рентгеновский спектральный индекс (неизменный во время излома) и закон падения блеска могут быть согласованы с отношениями замыкания для релятивистского джета в режиме “медленного охлаждения” до излома и расширением обычного джета после излома. Оценка на угол раскрытия джета  $3.31 \pm 0.08$  град и скорректированная за коллимацию энергия  $E_\gamma \sim (3.7 \pm 0.7) \times 10^{50}$  erg подчиняются соотношениям Amati и не противоречат отношению Ghirlanda. А анализ поздних спектральных данных позволяет определить верхний предел на оптическое поглощение в родительской галактике.

Поведение оптической кривой блеска и спектры кардинально отличаются друг от друга и мы полагаем, что эти два всплеска должны принадлежать к различным классам. Наличие двух классов также находит подтверждение и при анализе кривых блеска других всплесков. В заключение главы мы рассматри-

ваем синхронные наблюдения 5 гамма-всплесков с камер сверхширокого поля и “темные” наблюдения собственного излучения гамма-всплесков с телескопов МАСТЕР-II. Полученные данные очередной раз подтверждают отсутствие единого спектра в диапазоне от оптики до гамма для разных всплесков. В главе также показывается, что сейчас сеть МАСТЕР является мировым лидером по числу первых наведений на гамма-всплески (см. Рис. 2).



**Рис. 3:** Схематическое представление коллапса быстро вращающегося замагниченного ядра массивной звезды. Серые и черные заштрихованные области показывают оболочку и ядро звезды соответственно.

В третьей главе мы предпринимаем попытку теоретически описать интересные особенности на оптических и рентгеновских кривых блеска гамма-всплесков. Наблюдение ранней оптической вспышки у GRB 060926 послужило толчком к началу теоретического анализа и понимания явлений связанных со вспышками. Интерес к магниторотационному коллапсу заметно усилился в последние годы, в связи с проблемой космических гамма-всплесков. Сейчас представляется весьма вероятным, что длинные гамма-всплески связаны с коллапсом быстро вращающегося ядра массивной звезды, а короткие скорее всего являются результатом слияния нейтронных звезд [8], которое тоже можно рассматривать как коллапс быстро вращающегося объекта. Как отмечалось ранее, слияние двух нейтронных звезд и нейтронных звезд и черных дыр представляет собой многовариантную картину, которая может породить разнообразное временное поведение гамма-всплеска.

Это, возможно, и подтверждается отмеченной недавно усложненной классификацией гамма-всплесков [9].

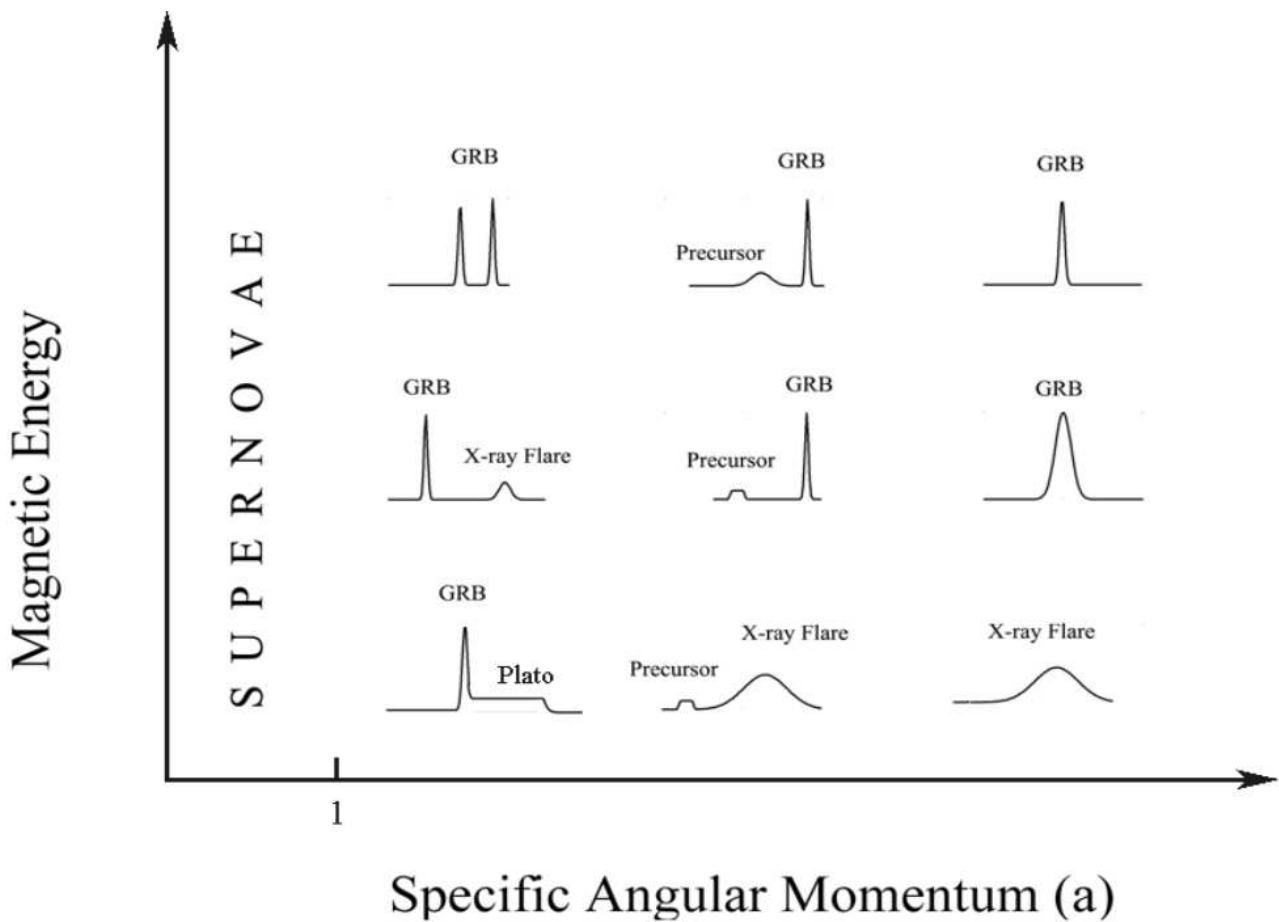
Кроме того, наблюдения прекурсоров и рентгеновских вспышек наверняка свидетельствуют о сложном характере работы “центральной машины” ([11], [12]). В ряде случаев оптическими телескопами, в том числе и МАСТЕРОм, наблюдались ранние оптические вспышки.

Все это инициирует теоретическое (в основном численное) исследование коллапса с превалирующей ролью вращения. Имеются многократные попытки учесть эффекты вращения и магнитных полей в численных расчетах, которые очень сложны для интуитивного понимания и при том являются крайне приближенными в силу сложности задачи (см. например работы [10], [9] и др.).

Нами же предложена простая трехпараметрическая модель коллапса с определяющей ролью вращения и магнитного поля. Входными параметрами теории являются — масса, момент вращения (который мы измеряем в параметрах Керра  $a_0 \equiv \frac{I\omega_0 c}{GM_{core}^2}$ ) и магнитное поле коллапсара (измеряемое отношением магнитной энергии ядра к гравитационной  $\alpha_m \equiv \frac{U_m}{GM_{core}^2/R_A}$ ). Модель включает приближенное описание следующих эффектов: центробежную силу, релятивистские эффекты метрики Керра, давления ядерной материи, диссипацию вращательного момента из-за присутствия магнитных полей, уменьшение дипольного магнитного момента вследствие эффектов сжатия и эффектов ОТО (черная дыра не имеет волос), нейтринное охлаждение, замедление времени и эффекты гравитационного красного смещения. Модель позволяет описать временное поведение “центральной машины” и демонстрирует качественное разнообразие типов такого поведения в природе.

Развитая теория прилагается к объяснению наблюдаемых особенностей гамма-всплесков всех типов. В частности, модель позволяет унифицировать явление прекурсоров, ранних рентгеновских и оптических вспышек и появление экстраординарно-длинных рентгеновских плато на временах в несколько тысяч секунд.

Наша цель — построить псевдоньютоновскую теорию такого коллапса на примере простой нестационарной аналитической модели, позволяющей включить максимальное число физических эффектов. В отличие от сложных трехмерных расчетов, в таком простом представлении удастся продемонстрировать влияние на коллапс каждого конкретного физического параметра модели в отдельности, что на наш взгляд, является большим достоинством этой модели. С помощью предложенной модели мы интерпретируем данные о наблюдении



**Рис. 4:** На диаграмме магнитное поле — параметр Керра показано качественное изменение характеристик гамма-всплеска и сопутствующих явлений.

ях прекурсоров [11] и ранних рентгеновских вспышек [12], а также некоторых интересных гамма-всплесков.

Краткое представление о модели можно получить из Рис. и 4.

Перед коллапсом звезда имеет размер в несколько солнечных радиусов и железное ядро в сто раз меньше (стадия А на Рис. ). Во время коллапса центробежные силы увеличиваются быстрее всех, что в результате приводит к формированию спинара (стадия В). Его формирование сопровождается анизотропным выделением энергии. Из-за диссипации вращательного момента спинар замедляется, и сжимается (стадия С). Его светимость увеличивается и формируются новый джет, энерговыделение которого достигает своего максимума около гравитационного радиуса. В зависимости от массы ядра процесс приводит к формированию нейтронной звезды или предельно вращающейся (Керровской) черной дыры.

На диаграмме магнитное поле — параметр Керра (Рис. 4) показано качественное изменение характеристик гамма-всплеска и сопутствующих явлений.

Предложенный сценарий позволяет свести наблюдаемое разнообразие гамма-всплесков, прекурсоров и вспышек к двум параметрам: магнитное поле и начальный вращательный момент. При слабом магнитном поле и большом вращательном моменте (правый нижний угол) первая вспышка будет слабой (т.к. велик центробежный барьер, следовательно, радиус остановки большой, а выделившаяся при этом потенциальная энергия сравнительно мала) и образующийся джет не пробивает оболочку звезды, следовательно прекурсора нет. Затем следует медленный коллапс (т.к. магнитное поле слабо), приводящий к слабому рентгеновски-богатому всплеску. При уменьшении начального вращательного момента (двигаемся по диаграмме налево) энергия, выделяемая на центробежном барьере растет и джет способен “пробить” оболочку звезды. Первая вспышка будет проявлять себя как прекурсор. Прекурсор будет удален от гамма-всплеска, так как при малом поле велико время диссипации вращательного момента. При уменьшении вращательного момента (еще левее по горизонтали) растет энергия прекурсора и при  $a > \sim 1$  энергия прекурсора превышает  $10^{51-52} \text{erg}$  и он будет проявлять себя как гамма-всплеск, а последующий коллапс спинара приведет к явлению длинного рентгеновского плато (левый нижний угол). Если далее двигаться в сторону увеличения магнитного поля (вверх), то последующий коллапс спинара приведет к явлению ранней рентгеновской вспышки. Далее, при еще большем магнитном поле, вспышка приближается к гамма-всплеску, растет ее энергия и она становится сама частью гамма-всплеска (левый верхний угол). При движении вправо возрастает момент и первый всплеск теряет энергию становится прекурсором близким ко второму, фактически гамма-всплеску. При очень большом вращательном моменте (правый верхний угол) энергии прекурсора недостаточно для “пробива” оболочки и остается всплеск без сопутствующих явлений. Продолжительность энерговыделения растет при уменьшении магнитного поля, а сам всплеск становится мягче (и мы т.о. возвращаемся обратно в правый нижний угол).

В заключительной четвертой главе собраны открытые системой МАСТЕР оптические транзиенты различной природы. Фактически эта глава демонстрирует результаты работы тех идей и алгоритмов, которые закладывались при построении сети. В главе представлены открытые системой МАСТЕР 69 транзиентов, среди которых множество сверхновых звезд, в том числе типа Ia, открытия новых переменных звезд и астероидов. Некоторые особо интересные

транзиенты рассмотрены более подробно. Стоит отметить, что практически для всех транзиентов, найденных телескопами сети МАСТЕР, в последствии снимаются спектры. Этот очень важный момент говорит о правильном выборе параметров системы, потому что у более крупных обзорных телескопов, например Каталина (Catalina Sky Survey), проблема спектрального подтверждения транзиентов стоит очень остро.

В Заключении подводятся итог выполненным исследованиям и намечены перспективы дальнейшего развития программно-аппаратного комплекса робот-телескопов типа МАСТЕР.

## Основные выводы

- Создано программное обеспечение сети роботов-телескопов МАСТЕР. С его помощью осуществляется непрерывная автономная работа всех пунктов сети в алертном и обзорном режимах. Постоянно пополняется баз данных изображений. Используя результаты автоматической обработки и средства отображения пользователи сети практически ежедневно находят новые астрофизические транзиентные явления.
- Под управлением созданного комплекса ПО были произведены наблюдения собственного излучения гамма-всплесков GRB110521A, 110411A, 110407A, 110207A, 101020A, 101008A, 100906A, 100902A и 100901A.
- По результатам подробного анализа всплесков GRB100906A и 100901A было подтверждено существования разных механизмов формирования собственного оптического излучения гамма-всплесков.
- Для объяснения интересных сопутствующих гамма-всплескам явлений (в том числе и из авторских наблюдений), была создана качественная модель магнито-гравитационного коллапса ядра массивной быстровращающейся звезды. Модель позволила просто, основываясь только на основных физических принципах, объяснять такие явления как: сверхдлинные рентгеновские плато, ранние рентгеновские вспышки и прекурсоры у гамма-всплесков.
- В режиме обзора, созданное программное обеспечение, позволило открыть более 50-ти оптических транзиентов (сверхновых звезд, новых звезд, кар-

ликовых новых и транзиентов неизвестной природы) до начала 2012 года. Программное обеспечение постоянно совершенствуется. Так после последних изменений эффективность поиска сверхновых звезд многократно выросла, что позволило с октября 2011 по январь 2012 открыть более 10 сверхновых, например: SN2011ha, 2011gg, 2011hh, 2011iq, 2011ib, 2011il, 2011io, 2011ju, 2012K и др.

## Список литературы

- [1] Akerlof, C.; Balsano, R.; Barthelmy, S.; et al., *Nature*, Volume 398, Issue 6726, pp. 400-402 (1999).
- [2] Lipunov, V. M.; Krylov, A. V.; Kornilov, V. G.; Borisov, G. V.; Kuvshinov, D. A.; Belinsky, A. A.; Kuznetsov, M. V.; Potanin, S. A.; Antipov, G. A.; Tyurina, N. V.; Gorbovskey, E. "MASTER: The Mobile Astronomical System of Telescope-Robots" *Astronomische Nachrichten*, Vol.325, Issue 6, p.580-582, 2004
- [3] V.Lipunov, V.Kornilov, E.Gorbovskey et al, *Master Robotic Net*, *Advances in Astronomy*, 2010, article id. 349171
- [4] Kornilov, V. G.; Lipunov, V. M.; Gorbovskey, E. S. , et al, *Experimental Astronomy* V. 33, Issue 1 , P. 173 ,2012
- [5] В.М. Липунов, В.Г. Корнилов, А.В. Крылов, et al, *Астрон. Ж.*, т. 84, вып.12, сс. 1110-1134, 2007
- [6] Beskin, G., Karpov, S., Bondar, S., et al. *American Institute of Physics Conference Series*, V. 1065, p. 251, 2008
- [7] Sari & Piran, 1999, *ApJ*, 520, 641
- [8] Blinnikov S.I., Novikov I.D., Perevodchikova T.V., Polnarev A.G. *Soviet Astronomy Letters*. 1984. V. 10. P. 177.
- [9] Gehrels, N., Norris, J.P., Barthelmy, S.D. et al., 2006, *Nat*, 444, 1044
- [10] Moiseenko, S.G.; Bisnovatyi-Kogan, G.S.; Ardeljan, N.V, 2006 *MNRAS*. 370, 31, 501
- [11] Lazzati, D. 2005, *MNRAS*, 357, 722
- [12] Chincarini, G., Moretti, A., Romano, P. et al., 2007, [astro-ph/0702371v1](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0702371)