

На правах рукописи



Барков Максим Владимирович

**Магнитогидродинамические течения в  
релятивистских объектах**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в *Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук.*

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н.,

*Бескин Василий Семенович*

профессор, ведущий научный сотрудник отделения теоретической физики ФГБУН Физического института имени П.Н.Лебедева РАН.,

д.ф.-м.н.,

*Колдоба Александр Васильевич*

с.н.с., заведующий лабораторией флюидодинамики и сейсмоакустики ФГАОУ ВО, «Московский физико-технический Институт (национальный исследовательский университет)»,

д.ф.-м.н.,

*Зиракашвили Владимир Николаевич*

главный научный сотрудник лаборатории астрофизических исследований ФГБУН Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН.

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится 24 сентября 2019 в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 на базе *Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук*, по адресу: *119017, г. Москва, ул. Пятницкая 48.*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *Института астрономии РАН* и на сайте <http://www.inasan.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.280.01, к.ф.-м.н.,

*Н.В. Чупина*

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы.

За последние 20 лет произошел прорыв в области численного моделирования релятивистских течений в магнитной гидродинамике (МГД). Это обусловлено как развитием численных методов, так и ростом вычислительных возможностей в целом. Представленные в диссертации результаты являются неотъемлемой частью этого прорыва.

Наблюдения струйных выбросов из активных ядер галактик (АЯГ) показывают не только наличие релятивистских движений с лоренц-фактором порядка 10 или более [23, 28], но и нарастание скорости с расстоянием от центральной черной дыры. В последние 20 лет появились аналитические работы объясняющие процесс ускорения магнитнодоменированного струйного выброса на линейной стадии ускорения; причем процесс ускорения занимает от 100 до  $10^6$  характерных размеров системы [16, 48].

После десятилетий интенсивных исследований, механизм взрыва сверхновых остается загадкой. Наиболее популярный механизм взрыва связан с нейтринным нагревом при коллапсе молодой нейтронной звезды [17], тем не менее, численное моделирование коллапса ядра выявило ряд проблем у этого механизма. Существует альтернативный магниторотационный механизм предложенный Бисноватым-Коганом [18] и Лебланк & Вильсоном [38], который при определенных условиях позволяет объяснить взрывы сверхновых [3, 19, 22, 37, 41–44, 46, 49, 51]. Объяснение механизма взрыва гиперновой [47] и длинных гамма-всплесков (ГВ) требуют детального моделирования.

Природа длинных гамма-всплесков на настоящее время еще не ясна. Одной из наиболее правдоподобных моделей является модель дисковой аккреции на черную дыру (ЧД) Вусли [39, 50]. В этой модели рассматривается неудавшаяся сверхновая, ядро которой коллапсирует в ЧД. В случае доста-

точно быстрого вращения звезды вокруг ЧД образуется массивный горячий диск. Нейтринный нагрев в полярных областях может запустить релятивистские струйные выбросы. К сожалению, подобная модель не может объяснить ГВ со временем вспышки более 100 секунд, вследствие чего необходимо привлечь иные механизмы для формирования ГВ, такие как механизм Бландфорда-Знаека [20].

### **Цель диссертационной работы:**

Построить единую модель формирования релятивистских МГД-выбросов как в случае ГВ, так и в случае АЯГ.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- Создать численную модель ускорения релятивистских МГД-струй до ультрарелятивистских скоростей с лоренц-фактором  $\Gamma > 300$ . Найти условия необходимые для эффективного ускорения струйных выбросов когда кинетическая энергия движения вещества может быть больше чем электромагнитная энергия в струе. Исследовать процесс самоколлимации в случае релятивистского магнитнодоминированного струйного выброса.
- Создать модель взаимодействия коллапсирующей массивной звезды с молодой замагниченной быстро вращающейся НЗ. Провести исследование условий в двойной системе, приводящих к образованию релятивистский струйный выбросов.
- Разработать модель коллапса замагниченного быстро вращающегося ядра очень массивной звезды с образованием вращающейся ЧД. Найти условия активации механизма Бландфорда-Знаека [20]. Найти реали-

стичные физические условия после коллапса массивного ядра. Объяснить образование фазы плато в рентгеновском послесвечении от ряда длинных ГВ.

### **Научная новизна.**

Большинство вошедших в диссертацию результатов обладают принципиальной новизной.

Впервые, в результате численного моделирования в рамках релятивистской МГД, было получено ускорение релятивистской струи до лоренц-фактора  $\Gamma > 300$  с эффективностью конверсии магнитной энергии в кинетическую более 50%. Показано, что ускорение происходит относительно медленно на шкалах  $R \propto \Gamma^2 r_{lc}$ , где  $r_{lc}$  это – радиус светового цилиндра.

Впервые в рамках ОТО МГД проведено моделирование формирования релятивистских струй от молодой, замагниченной, быстро вращающейся нейтронной звезды при взрыве сверхновой. Причем поток энергии в выбросе  $\sim 3 \times 10^{50}$  эрг/с и полная энергия взрыва  $\sim 10^{52}$  эрг оказываются достаточными для объяснения наблюдаемых свойств длинных ГВ и гиперновых.

Впервые проведено моделирование в рамках релятивистской МГД со стационарной метрикой в ОТО. При расчетах использовались реалистичное уравнение состояния и нейтринные потери. Получено самосогласованное формирование аккреционного диска с направленными релятивистскими струйными выбросами. Впервые сформулирован и получен критерий для активации механизма Блэндфорда-Знаека. Обнаружена возможность образования односторонних выбросов. Найдена оценка параметра вращения черной дыры и ее массы при коллапсе ядра массивной звезды. Найдено ограничение величины магнитного потока находящегося в звезде необходимого для образования ГВ.

### **Практическая значимость.**

Полученные в первой части диссертации результаты численного моделирования выявили природу процесса ускорения в релятивистских сильно замагниченных струях, что впервые позволило объединить и согласовать аналитические модели с численным экспериментом. Полученные результаты могут быть применены для объяснения и последующего анализа как в случае струйных выбросов из активных ядер галактик и микроквazarов, так и в случае гамма-всплесков.

Полученные результаты при моделировании молодой, быстро вращающейся, замагниченной нейтронной звезды могут быть использованы для объяснения наблюдательных свойств гамма-всплесков.

Результаты, полученные при моделировании аккреции замагниченного звездного ядра на вращающуюся черную дыру, позволяют определить момент активации механизма Бландфорда-Знаека. Полученный в диссертации критерий может быть использован при исследованиях гамма-всплесков с помощью популяционных методов. Возможность формирования односторонних струйных выбросов может послужить объяснением для больших скоростей собственного движения некоторых тесных двойных систем, одним из компонентов в которых является черная дыра.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. Впервые в результате численного моделирования в рамках релятивистской МГД получено ускорение релятивистской струи до лоренц-фактора  $\Gamma > 300$ ; причем эффективность конверсии магнитной энергии в кинетическую составила более 50%.

2. В результате численного моделирования показано, что ускорение происходит относительно медленно на шкалах  $R \propto \Gamma^2 r_{lc}$ , где  $r_{lc}$  это – радиус светового цилиндра, а лоренц-фактор пропорционален цилиндрическому радиусу  $\Gamma = \omega/r_{lc}$ . Такой результат является подтверждением более ранних результатов, полученных аналитически.
3. Показано, что коллапс ядра массивной звезды с образованием молодой протонейтронной звезды с сильным магнитным полем может привести к взрыву гиперновой и формированию мощного струйного выброса характерного для гамма-всплеска.
4. Показано, что коллапс ядра очень массивной звезды с образованием вращающейся черной дыры и последующей дисковой аккрецией замагниченной оболочки может привести к формированию релятивистского струйного выброса, который, в свою очередь, приводит к взрыву гиперновой и формированию гамма-всплеска.
5. Найден критерий для активации механизма Блэндфорда-Знаека. С его помощью были найдены значения для начального магнитного поля, необходимого для формирования гамма-всплеска.
6. Показано, что при проникновении компактного объекта (НЗ или ЧД) в оболочку звезды Вольфа-Райе, может образоваться долгоживущий аккреционный диск. Аккреция этого диска может объяснить длительное рентгеновское плато в послесвечении, наблюдаемое у ряда гамма-всплесков в течении  $\sim 10^4$  с.

Полученные в диссертации результаты имеют широкий спектр применения в области современной релятивистской астрофизики. Профили пространственно-растянутого ускорения необходимы для объяснения радио-данных,

полученных на телескопе Радиоастрон и других инструментах для радиогалактик типа M87. Возможность и условия запуска струйного выброса магнитным полем необходимы для интерпретации данных наблюдений длинных гамма-всплесков с прекурсорами или для объяснения очень длинных гамма-всплесков с длительностью более 100 сек. Полученные в диссертации результаты позволили связать мощность струйного выброса и аккреционный темп вещества, что позволяет делать аналитические оценки мощности струйного выброса не прибегая к сложным и дорогостоящим численным расчетам.

### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях

#### **Приглашенные доклады:**

- MG12 Meeting, Париж, Франция, 13-18 Июль 2009, “GRB Central Engines As Magnetically Driven Collapsar Model”;
- NP1A 2009, Волгоград, Россия, 08-12 Сентябрь 2009, “Close Binary Progenitors of GRB and Conditions for Launching of Relativistic Jets”;
- “Many faces of GRB phenomena - optics vs high energy”, САО, Россия, 12-16 Октябрь, 2009, “Supercollapsars and their X-ray bursts” and “Close Binary Progenitors of Long Gamma Ray Bursts”;
- “Variable Galactic Gamma-Ray Sources,” Гейдельберг, Германия, 30 Ноябрь - 3 Декабрь, 2010 “Accretion of Blandford-Znajek processes and jet formation”;
- “High Energy Phenomena in Relativistic Outflows III”, Барселона, Испания, 27 Июня - 1 Июля, 2011 “Close binary progenitors of gamma-ray bursts and hypernovae”;



**Устные доклады:**

- XIV-th International School “Particles And Cosmology” – 2007 (Баксанское Ущелье, Кабардино-Балкария, Россия);
- “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” – 2007 (Пушино, Московская Область, Россия);
- “Numerical Modeling of Space Plasma Flows: Astronum” – 2007 (Париж, Франция);
- “High Energy Phenomena in Relativistic Outflows” – 2007 (Дублин, Ирландия);
- “Астрофизика высоких энергий, сегодня и завтра” – 2007, 2008, 2010 (Москва, Россия);
- “Cool Discs, Hot Flows” – 2008 (Фюнасдален, Швеция);
- “4th Heidelberg International Symposium on High Energy Gamma Ray Astronomy” – 2008 (Гейдельберг, Германия);
- “Physics of relativistic flows” – 2009 (Стокгольм, Швеция);

**Стендовые доклады:**

- “Астрофизика высоких энергий, сегодня и завтра” – 2006 (Москва, Россия);

**Семинары:**

- ИКИ РАН (Москва, Россия, 2006, 2007, 2008а, 2008b, 2009, 2010);
- ВолГУ (Волгоград, Россия, 2011а, 2011b, 2011с);
- ГАИШ МГУ (Москва, Россия, 2007, 2008);

- ФИАН РАН (Москва, Россия, 2008, 2010);
- АКЦ ФИАН РАН (Москва, Россия, 2008);
- ИНАСАН (Москва, Россия, 2012);
- Departament d'Astronomia i Astrofísica Universitat de València (Валенсия, Испания, 2008а, 2008b);
- MPI-K (Гейдельберг, Германия, 2008, 2009);
- DAMTP (Кембридж, Великобритания, 2009);
- Institute of Astronomy (Кембридж, Великобритания, 2009);
- DIAS (Дублин, Ирландия, 2009);
- ARI of Liverpool JMU (Ливерпуль, Великобритания, 2009);
- Astronomy Unit, School of Mathematics, QMUL (Лондон, Великобритания, 2009);
- Nordita, (Стокгольм, Швеция, 2009);
- RIKEN (Вако, Япония, 2013а, 2013b),
- Kavli IPMU (Чиба, Япония, 2015а, 2015b);
- IPA Potsdam University (Потсдам, Германия, 2016);
- DESY (Цойтон, Германия, 2016а,b);
- Purdue University (Вест Лафайетт, Индиана, США, 2017).

### **Публикации по теме диссертации.**

Материалы диссертации опубликованы в 18 печатных работах, из них 11 статей в рецензируемых журналах [9, 12–15, 32–36, 40], 7 статей в сборниках трудов конференций [4–8, 10, 11].

### **Личный вклад автора.**

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 292 страницы, из них 252 страницы текста, включая 74 рисунка. Библиография включает 361 наименование на 37 страницах.

## **Содержание работы**

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

**В обзоре литературы** развернуто описывается современное состояние проблем, решаемых в диссертации: МГД-ускорение релятивистских струйных выбросов; Формирование и временная эволюция релятивистских струйных выбросов от молодых быстровращающихся нейтронных звезд; Работа меха-

низма Блэндфорда-Знаека и современное состояние МГД-моделирования в рамках ОТО.

**В первой главе** рассматривались вопросы ускорения МГД-струйных выбросов путем численного моделирования, специально предназначенного для исследования ключевых аспектов ускорения релятивистских выбросов в рамках идеальной МГД. В разделе 1.1 были описаны уравнения, решаемые в данной главе. В разделе 1.2 описываются детали численного моделирования. Основные особенности следующие: Во-первых, использовались численные схемы, основанные на линейном методе решения задачи Римана [30], который не требует большой искусственной вязкости для устойчивости численной схемы, что отличает его от большинства других методов для релятивистской МГД, в том числе тех, которые основаны на HLL, KT и аналогичных методах расчета потоков. Простые одномерные тесты показывают, что это должно привести к значительно большей точности в двумерных задачах, которые включают стационарные течения, которые, в свою очередь, согласуются с расчетной сеткой [31]. Во-вторых, вместо изучения струйных выбросов, распространяющихся через окружающую среду, мы рассматриваем случай потока в канале с твердыми стенками, что позволяет избежать ошибок, которые могут быть вызваны численной диффузией и вязкостью на границе. Наконец, использовались эллиптические (или сферические) координаты, адаптированные к выбранной параболоидальной (или конической) форме канала струйного выброса. Это позволило получить, во всем объеме, струйный выброс с хорошим разрешением (с использованием фиксированного числа узлов сетки поперек расчетной области). Дополнительно имеется выгода от того, что направление движения потока очень близко к расположению граней расчетной сетки. Такие специальные меры в сочетании с методом расширения расчетной области позволили, впервые, проследить процессы ускорения и коллимации струйных выбросов до фазы насыщения ускорения.

Одним из ключевых элементов данного подхода была реализация метода расширения сетки, что позволило проследить за потоком до шести порядков характерных размеров системы при одновременном сокращении времени вычисления до трех порядков величины. Фактически, была реализована статическая в пространстве, но адаптивная во времени расчетная сетка. В разделе 1.3 были представлены расчеты моделей холодных течений, в которых была достигнута 80% эффективность преобразования начальной магнитной энергии в кинетическую; причем лоренц-фактор достигал  $\Gamma_{\infty} \gtrsim 10$ . Кроме того, полученные результаты согласуются с имеющимися данными об ускорении релятивистских струйных выбросов в АЯГ. Было обнаружено, что численные решения принимают квазистатическую конфигурацию, находящуюся в качественном соответствии с автомодельными решениями для струйных выбросов из АЯГ [48]. Причем, моделирование оказалось в состоянии выявить различные аспекты течения, которые не могли быть изучены в рамках автомодельных решений (в том числе – структуру течения, в котором оба: прямой и возвратный электрические токи, находятся в струйном выбросе в зависимости от коллимации и формы границы струйного выброса). Это открывает новые возможности, такие как формирование цилиндрического ядра вокруг оси струйного выброса, которые, до данного исследования, не удавалось получить в автомодельных решениях.

Более того, в разделе 1.4 приведены расчеты течений свойственных ГВ, представлены моделирования течений в которых достигается лоренц-фактор  $\Gamma_{\infty} \gtrsim 10^2$ ; причем, течения прослеживаются до восьми порядков характерных длин. Кроме решения с холодными струйными выбросами, также рассматривался случай течения, в котором энтальпия потока составляет значительную часть от полного потока энергии. В связи с большим диапазоном в  $\Gamma$  по сравнению с решениями, представленными в [35] и разделе 1.3, магнитно-доминированные области ускорения теперь могут быть лучше выделены, что

позволяет более точно сравнивать их поведение с поведением, полученным в автомоделных решениях.

В разделе 1.5 анализируются свойства процесса релятивистского МГД-ускорения струйных выбросов. Исследуется сущность процесса ускорения. В частности, показана связь лоренц-фактора и степени самоколлимации течения струйного выброса. Чем сильнее степень самоколлимации струи, тем выше лоренц-фактор течения. Впервые обнаружена связь причинности и эффективности ускорения струи. При потере причинности сигнал от ядра струи не доходит до стенки и наоборот; самоколлимация течения оказывается ограниченной, что подавляет эффективность ускорения струи.

В разделе 1.6 обсуждается применимость полученных результатов как численных, так и аналитических к наблюдаемым астрофизическим струйным выбросам. Показано, что релятивистское МГД-ускорение струйных выбросов может объяснить наблюдаемый эффект замедленного ускорения в АЯГ. Также релятивистское МГД-ускорение на масштабе радиуса нормальной звезды может объяснить наблюдаемые лоренц-факторы  $\Gamma \sim 300$  в длинных ГВ. Также даются конкретные предсказания распределения энергии и лоренц-фактора поперек струйного выброса.

В разделе 1.7 подытоживаются полученные в предыдущих разделах главы результаты. Результаты первой главы опубликованы в работах [5, 11, 35, 36].

**Во второй главе** рассматривается моделирование магниторотационных взрывов гиперновых и гамма-всплесков. Магниторотационные взрывы вызываются молодыми быстровращающимися нейтронными звездами с сильным полоидальным магнитным полем.

В разделе 2.1 описываются начальные условия, использованные при численном моделировании. Оболочка коллапсирующей звезды задавалась моделью Бете с окружающей протонейтронную звезду горячей оболочкой/пузыр-

ем, имитирующей взрыв сверхновой. Использовалось реалистичное уравнение состояния вещества HELM, которое учитывает вклад излучения, лептонного газа, включая электрон-позитронную плазму и невырожденные ядра. Транспортировка нейтрино обрабатывается в оптически-тонком режиме. Охлаждение нейтрино вычисляется с использованием интерполяционных формул для Угса-процесса, аннигиляции электрон-позитронных пар, взаимодействия фотонов и плазменных волн. Скорости нагрева нейтрино вычисляются с использованием методик, учитывающих гравитационное красное смещение и изгиб геодезических. Фотодезинтеграция ядер включена путем изменения EOS. На внутренней границе использовалось приближение молодой нейтронной звезды с горячей атмосферой радиусом 15 км и периодом вращения 2 мс. Исходное магнитное поле задавалось только полоидальным с топологией радиально-ограниченного диполя, с напряженностью поля на поверхности  $B = 10^{15}$  Гс.

В разделе 2.2 представлены результаты численного эксперимента. Показана возможность формирования струйного выброса, прожигающего коллапсирующую оболочку. Скорость продвижения головной ударной волны достигла 0.17 с, скорость истечения вещества в струе – 0.5 с. Мощность струйного выброса не зависела напрямую от свойств аккрецируемой оболочки и параметров пузыря предсверхновой. В свою очередь, была показана невозможность запуска и поддержания струйного выброса при высоких темпах аккреции и малой энергии в пузыре предсверхновой. При таких условиях магнитное поле вбивается падающим веществом в протонейтронную звезду. В случае с успешным запуском струйного выброса было обнаружено квазипериодическое поведение магнитосферы нейтронной звезды, которое вызывает модулирование подачи энергии в струйный выброс с периодом около 20 мс, что, в принципе, может наблюдаться в реальных ГВ.

В разделе 2.3 обсуждаются полученные результаты. По мере того как

развивается термический взрыв, вызванный накоплением энергии в радиационном пузыре, в центре возникает разрежение и магнитосфера начинает расширяться преимущественно в экваториальном направлении. Во время этого начального расширения внутри магнитосферы появляется альфвенический горизонт и начинает развиваться магнитный ветер, который вводит азимутальный магнитный поток и энергию в окружающее пространство. Поскольку расширение медленное по сравнению с быстрой магнитозвуковой скоростью, быстрые волны быстро устанавливают приблизительное магнитостатическое равновесие внутри “магнитной полости”, а кольцевое напряжение азимутального магнитного поля гарантирует, что это равновесие характеризуется осевым сжатием. В результате этого нормальное напряжение на поверхности полости развивает свой максимум на полюсах, полость начинает расширяться преимущественно в полярном направлении и начинают формироваться полярные струи. Струйные выбросы остаются до быстромагнитозвуковыми вплоть до самого конца моделирования, и обратная ударная волна не развивается. Тем не менее, общее давление струи достаточно высоко для того, чтобы сформировать ударные волны в окружающей среде. Хотя полученные струйные выбросы не так быстры, как того требуют наблюдения ГВ, постепенное охлаждение ПНЗ приведет к снижению массовой нагрузки и, следовательно, к более высокой конечной скорости струйных выбросов в дальнейшем.

В разделе 2.4 подводятся итоги на основе полученных численных результатов. На самой ранней стадии взрыва магнетар может формировать высоко-коллимированные струйные выбросы, способные прожигать коллапсирующую звезду за считанные секунды. Время замедления прото-магнетара на порядок больше, поэтому можно предположить, что большая часть его энергии вращения,  $E \simeq 10^{52}$  эрг, будет переноситься струями в окружающее пространство. Это подтверждает идею, что, по крайней мере, некоторые длинные гамма-всплески могут иметь миллисекундные магнетары в качестве



центральной машины. Немагнитный, замедленный нейтринный взрыв с энергией, сравнимой со взрывом сверхновой с коллапсирующим ядром, необходим для включения магнитного механизма. В противном случае магнитосфера ПНЗ не сможет расширяться и развить суперальвовенский ветер. Идея о том, что неудавшийся взрыв сверхновой может быть восстановлен миллисекундным магнетаром, вероятно, не будет работать.

Результаты второй главы опубликованы в работах [14, 32].

**В третьей главе** рассматривается проблема гамма-всплесков, запускаемых магнитным полем при коллапсе звёздного ядра в черную дыру.

В разделе 3.1 описываются общие свойства механизма Блэндфорда-Знаека (БЗ), в частности, оценивается общая энергетика процесса БЗ и темп выделения энергии в случае сплит-монопольного решения, формулируется проблема влияния инерции аккрецируемой плазмы на процесс БЗ. Для функционирования механизма БЗ необходимо выполнить следующее условие: позволить альфовеновским волнам уходить на бесконечность из эргосферы керровской ЧД; т.е. скорость аккреции вещества должна быть меньше чем альфовеновская скорость. Из этого условия получаем:

$$\kappa = \frac{\Psi_h}{4\pi r_g \sqrt{\dot{M}c}} > \kappa_c, \quad (1)$$

и  $\kappa_c \approx 1$  при сферической аккреции. Здесь  $\Psi_h$  – магнитный поток, пронизывающий горизонт ЧД;  $\dot{M}$  – аккреционный темп;  $c$  – скорость света и  $r_g$  – керровский гравитационный радиус ЧД. Представленное соотношение позволяет связать необходимый магнитный поток для активации механизма БЗ при известном аккреционном темпе.

В разделе 3.2 представлены тестовые численные расчеты в случае со сферической аккрецией. Задавалось пылеобразное течение (холодная плазма) с нулевой скоростью на бесконечности и без вращения. Магнитное поле изначально принималось радиальным с монопольной топологией. Простран-

ство-время Керра описывается с использованием координат Керра-Шилда, что позволяет поставить граничные условия свободного течения под горизонтом. Моделирование действительно подтверждает ожидаемую бифуркацию и показывает, что для широкого спектра параметра  $a$  критическое значение  $\kappa$  действительно близко к единице. Например, модель с  $a = 0.9$  и  $\kappa = 1.2$  качественно отличается от модели с  $a = 0.9$  и  $\kappa = 1.6$ . Первая модель быстро устанавливает устойчивое состояние аккреции, на больших масштабах это решение практически неотлично от исходного решения. Напротив, модель с  $a = 0.9$  и  $\kappa = 1.6$  демонстрирует мощный биполярный отток, который направляет ударную волну в аккрецируемый поток. Эта ударная волна опрокидывает аккрецию как в полярном, так и в экваториальном направлении. Черная дыра развивает сильно разреженную магнитосферу, которая вращается примерно с половиной угловой скорости черной дыры.

В разделе 3.3 приведены результаты численного моделирования в случае дисковой аккреции. Для этого моделирования использовалось реалистичное уравнение состояния HELM. Охлаждение нейтрино рассчитывается в предположении оптически тонкого режима и учитывает URCA-процессы, аннигиляцию пар, фотопродукцию и эмиссию плазмы, а также эмиссию синхротронных нейтрино. Расчеты показывают, что URCA-процессы сильно доминируют над другими механизмами в этой проблеме. Коллапсирующая звезда задается с помощью простой модели свободного падения Бете. В этой модели предполагается, что непосредственно перед коллапсом, распределение массы в звезде удовлетворяет закону  $\rho r^3 = \text{const}$  и что аккреция вещества происходит со скоростью свободного падения в гравитационном поле центральной черной дыры. Начальное магнитное поле принималось полоидальным полем однородно-намагниченной сферы в вакууме с радиусом  $r_m = 4500$  км и напряженностью  $B_0 = 3 \times 10^9$ ,  $10^{10}$ , или  $3 \times 10^{10}$  Гс. В начале моделирования видно, что удельный угловой момент аккреционного газа меньше углового момента

на последней устойчивой орбите,  $l_{iso}$ . Соответственно, вещество падает прямо в ЧД, а диск не образуется. Однако магнитный поток, пронизывающий ЧД, постепенно увеличивается, как и магнитное давление. Позже, внешние слои с  $l > l_{iso}$  достигают ЧД, центробежная сила замедляет их падение и вокруг ЧД начинает формироваться вязкий аккреционный диск. При этом на его поверхности возникает ударная волна в аккрецируемом веществе, которая отделяется от его поверхности и принимает квазисферическую форму. В случае с промежуточными параметрами, в начале моделирования происходило сферическое свободное падение, позже происходит образование аккреционного диска и возникает сильная ударная волна вокруг диска. Если начальное магнитное поле сильно, то оно легко производит взрыв. В промежуточной модели магнитное поле недостаточно сильно и можно наблюдать пульсацию ударной волны, а механизм извлечения энергии БЗ в это время не работает. Только после нескольких пульсаций механизм БЗ Керровской ЧД активизируется. После этого можно наблюдать стандартный сценарий взрыва с формированием кокона и распространением ударной волны наружу. Средняя скорость распространения ударной волны в полярном направлении  $v \simeq 0.1 c$ . К примеру, в случае модели  $C_1 = 3, B_0 = 10^{10}$  Гс используя измеренное значение величины  $\Psi$  получаем аналитическую оценку:  $\dot{E}_{вз} \simeq 0.42 \times 10^{51}$  эрг  $s^{-1}$  в момент взрыва, что хорошо согласуется с мощностью струйных выбросов в численной модели  $\dot{E} \simeq 0.4 \times 10^{51}$  эрг  $s^{-1}$ .

В разделе 3.4 обсуждаются реалистичные начальные условия, характерные для ГВ, вызванных механизмом БЗ. При наличии сильного магнитного поля одиночные звезды имеют серьезные проблемы с сохранением быстрого вращения. Описанную проблему можно избежать в случае двойных звезд: во-первых, в тесных двойных системах сильное расширение оболочки одной из звезд ограничена гравитационным влиянием второй компоненты; во-вторых, даже в случае высокой металличности и/или сильного магнитного поля,

скорость вращения звезды может оставаться высокой из-за синхронизации вращения и орбитальных движений. При сильном магнитном поле вращение звезды становится твердотельным. Следовательно, при коллапсе временная шкала аккреции диска короче чем временная шкала свободного падения и, следовательно, скорость роста массы черной дыры определяется непосредственно скоростью свободной аккреции. Чтобы исследовать эволюцию скорости вращения черной дыры нужно интегрировать следующую систему динамических уравнений:

$$\frac{dM_h}{dR} = 4\pi R^2 \rho(R), \quad (2)$$

$$\frac{dJ_h}{dR} = 4\pi R^2 \rho(R) \int_0^{\pi/2} \tilde{l}(R, \theta) \sin \theta d\theta. \quad (3)$$

Здесь  $\rho(R)$  - плотность звездного вещества в оболочке до коллапса; а  $\tilde{l}(R, \theta)$  - удельный угловой момент, сохраняемый элементом вещества, первоначально находящимся в точке с координатами  $\{R, \theta\}$  к тому времени, когда он пересекает горизонт событий;  $R(t)$  - начальный радиус оболочки, поглощенной дырой в момент  $t$ . При коллапсе звезды WR в очень тесной двойной системе могут сложиться благоприятные условия для образования струйных выбросов длинных ГВ, либо посредством нагрева нейтрино, либо за счет механизма Блэндфорда-Знаека.

Начальные условия в предложенном сценарии в тесных двойных системах отличаются от тех, которые изучались до данной работы. К моменту образования аккреционного диска черная дыра становится гораздо более массивной ( $M_h \simeq 10M_\odot$ ) по сравнению с обычно предполагаемой ( $M_h \simeq 2M_\odot$ ). Его скорость вращения оказывается заметно ниже ( $a = 0.5$ ) по сравнению с ( $a = 0.9$ ) принятыми в прошлом. Наконец, вращение прародителя является не дифференциальным, а твердотельным.

В разделе 3.5 описываются численные расчеты формирования струйных

выбросов, основанных на реалистичных начальных условиях. Модель прародителя описывает компактную звезду WR радиуса  $R_s = 3 \times 10^{10}$  см с периодом вращения  $T_s = 1.4$  ч; соответствующий удельный угловой момент на звездном экваторе равен  $l_s = 1.13 \times 10^{18} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ . Предполагается, что магнитное поле прародителя является чисто полоидальным и однородным с напряженностью  $B_0 = 1.4 - 8.4 \times 10^7$  Гс. Моделирование такого типа вычислительно дорого даже в 2D. С другой стороны, ранние стадии коллапса очень просты и могут быть проанализированы аналитически с достаточной точностью. По этим причинам моделирование начиналось вскоре после ожидаемого времени формирования диска,  $t_s = 17$  с. Основываясь на анализе, приведенном в предыдущих разделах, масса черной дыры установлена в  $M_h = 10M_\odot$ , а скорость роста массы равна  $0.14M_\odot \text{ с}^{-1}$ . Радиальные распределения массы и радиальной скорости соответствуют распределению модели Бете. Начальные распределения углового момента и магнитного поля являются распределениями прародителя, искаженными коллапсом за время свободного падения. В целом, результаты этого моделирования согласуются с результатами полученными в предыдущих разделах. Из-за измененных начальных условий, которые соответствуют более поздним стадиям коллапса звезды, аккреционный диск формируется сразу. В то же время, ударная волна в аккрецируемом веществе отделяется от поверхности диска и, быстро расширяется до  $R \simeq 100 - 200R_g$ . В модели со слабым магнитным полем ударная волна начинает колебаться, и к концу моделирования ( $t = 19.5$  с) струйных выбросов, приводимых в движение черной дырой, не возникает. Напротив, обе модели с относительно сильным полем в конечном итоге формируют выбросы релятивистской плазмы в полярном направлении, которые приводятся в действие механизмом Блэндфорда-Знаека. Эти результаты соответствуют условию активации БЗ  $\kappa \geq 0.2$ .

В разделе 3.6 на основании полученных результатов выдвигается гипоте-

за для объяснения рентгеновского послесвечения гамма-всплесков как результат длительной активности центральной машины при слиянии нормальной звезды и компактного объекта. Выше был рассмотрен случай тесных двойных систем с приливной синхронизацией вращения компаньонов и с орбитальным разделением, очень близким к размеру полости Роша звезд WR. Можно пойти еще дальше и рассмотреть случай с еще меньшим разделением, который может привести к формированию стадии с общей оболочкой, что ведет к слиянию компаньонов двойной системы и взрыву ГВ. Такое слияние можно разделить на три этапа. На первом этапе компактный объект вращается по спирали внутри расширенной оболочки нормальной звезды и раскручивает ее благодаря перекачки в нее своего орбитального углового момента. Компактная звезда также увеличивает свою массу и вращение посредством аккреции типа Бонди. Второй этап начинается когда компактная звезда приближается к центру своего спутника WR и скорость аккреции увеличивается. В случае спутника  $16M_{\odot}$  механизм аннигиляции нейтрино может работать около 60 секунд и высвободить около  $10^{52}$  эрг. Третья фаза возникает если возможный взрыв во время второй фазы сильно несферический или полностью отсутствует и не удаляет вещество спутника в экваториальной зоне. Во время этой фазы компактный объект, уже черная дыра, накапливает эти слои, которые были раскручены во время первой фазы. В  $\alpha$ -модели шкала времени аккреционного диска с характерным для модели угловым моментом может быть оценена как:

$$t_d \simeq 8000 \left( \frac{\alpha \delta^2}{0.01} \right)^{-1} \left( \frac{R}{R_{\odot}} \right)^{3/2} \left( \frac{M_c}{2M_{\odot}} \right) \left( \frac{M_s}{10M_{\odot}} \right)^{-7/2} \text{ с.} \quad (4)$$

Это значительно больше, чем продолжительность звездного коллапса, определяемая временем свободного падения. Фактически, такой большой временной масштаб предполагает возможность объяснения фазы с замедленным ослаблением и поздних всплесков на рентгеновских кривых блеска длинных ГВ,

обнаруженных на спутнике *Swift*.

В разделе 3.7 обсуждаются полученные результаты. Как показали результаты представленного в диссертации численного моделирования, для успешного формирования взрыва ГВ требуется, чтобы черная дыра накапливала очень сильное упорядоченное магнитное поле, а также объяснить наблюдаемую мощность длинных ГВ и связанных с ним сверхновых и, даже, более сильное магнитное поле для его активации вскоре после образования аккреционного диска. Например, чтобы обеспечить мощность  $10^{50}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  для черной дыры с массой  $10M_{\odot}$  и  $a = 0.6$  необходимо накопить магнитный поток порядка  $\Psi = 8 \times 10^{27}$  Гс  $\text{см}^2$ . Для активации механизма БЗ необходим магнитный поток еще больше, который должен быть порядка нескольких  $\times 10^{28}$  Гс  $\text{см}^2$ . Возможно, скорость аккреции свободного падения, установленная в представленном моделировании, слишком высока и могла бы быть уменьшена в 10 раз, однако, это уменьшило бы критическое значение для магнитного потока только в 3 раза.

Дополнительным фактором, который может уменьшить ограничение на напряженность реликтового поля, причем последний полностью игнорируется в представленных моделях, является нагрев плазмы из-за аннигиляции нейтрино-антинейтрино. В наиболее экстремальном сценарии этот нагрев полностью подавляет аккрецию в полярном направлении и приводит в движение релятивистские струйные выбросы ГВ. Хотя сама по себе эта модель взрывов ГВ привлекательная, следует отметить, что создание в такой модели канала низкой плотности помогает активировать механизм БЗ вдоль линий магнитного поля, которые адвектируются внутри этого канала. Таким образом нейтринный нагрев и механизм БЗ могут работать рука об руку при формировании ГВ и гиперновых.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [4, 6–10, 12–15, 33, 34, 40].

**В Заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе и выносимые на защиту.

**В дополнительных материалах** приведены: описание эллиптических координат; аккреция пыли на вращающуюся черную дыру в координатах Керра-Шилда; начальные условия для магнитного поля в координатах Керра-Шилда; изменения углового момента и магнитного поля в модели Бете со временем.

## Цитируемая литература

1. Anderson M., Hirschmann E. W., Liebling S. L., Neilsen D. Relativistic MHD with adaptive mesh refinement // *Classical and Quantum Gravity*. 2006. — Nov. Vol. 23. Pp. 6503–6524. arXiv:gr-qc/0605102.
2. Antón L., Zanotti O., Miralles J. A. et al. Numerical 3+1 General Relativistic Magnetohydrodynamics: A Local Characteristic Approach // *ApJ*. 2006. — Jan. Vol. 637. Pp. 296–312. arXiv:astro-ph/0506063.
3. Ardeljan N. V., Bisnovatyi-Kogan G. S., Moiseenko S. G. Magnetorotational supernovae // *MNRAS*. 2005. — May. Vol. 359. Pp. 333–344. arXiv:astro-ph/0410234.
4. Barkov M. V. Hyper-accreting tori of Gamma Ray Bursters // *American Institute of Physics Conference Series* / Ed. by M. Axelsson. Vol. 1054 of *American Institute of Physics Conference Series*. 2008. — Sep. Pp. 79–85. 0805.0414.
5. Barkov M. V. Magnetic Acceleration of Relativistic Jets // *Numerical Modeling of Space Plasma Flows* / Ed. by N. V. Pogorelov, E. Audit, G. P. Zank. Vol. 385 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. 2008. — Apr. P. 79.
6. Barkov M. V. Hard X-Ray bursts in collapse of supermassive stars //



Astrophysical Bulletin. 2010. — Jul. Vol. 65. Pp. 217–222.  
arXiv:astro-ph.HE/1003.4379.

7. Barkov M. V. Close Binary Progenitors of Hypernovae // International Journal of Modern Physics Conference Series. Vol. 8 of International Journal of Modern Physics Conference Series. 2012. Pp. 209–219.
8. Barkov M. V. MHD Models of Central Engines of Gamma Ray Bursts: Angular Momentum Influence // Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity / Ed. by A. H. Chamseddine. 2012. Pp. 1098–1110.
9. Barkov M. V., Baushev A. N. Accretion of a massive magnetized torus on a rotating black hole // New Astronomy. 2011. — Jan. Vol. 16. Pp. 46–56. arXiv:astro-ph.HE/0905.4440.
10. Barkov M. V., Komissarov S. S. Central engines of Gamma Ray Bursts. Magnetic mechanism in the collapsar model. // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by F. A. Aharonian, W. Hofmann, F. Rieger. Vol. 1085 of American Institute of Physics Conference Series. 2008. — Dec. Pp. 608–611. 0809.1402.
11. Barkov M. V., Komissarov S. S. Magnetic Acceleration of Ultrarelativistic GRB and AGN Jets // International Journal of Modern Physics D. 2008. Vol. 17. Pp. 1669–1675. 0801.4861.
12. Barkov M. V., Komissarov S. S. Stellar explosions powered by the Blandford-Znajek mechanism // MNRAS. 2008. — Mar. Vol. 385. Pp. L28–L32. 0710.2654.
13. Barkov M. V., Komissarov S. S. Close binary progenitors of gamma-ray bursts // MNRAS. 2010. — Jan. Vol. 401. Pp. 1644–1656. 0908.0695.
14. Barkov M. V., Komissarov S. S. Recycling of neutron stars in common envelopes and hypernova explosions // MNRAS. 2011. — Jul. Vol. 415. Pp. 944–958. arXiv:astro-ph.HE/1012.4565.
15. Barkov M. V., Pozanenko A. S. Model of the extended emission of short

- gamma-ray bursts // MNRAS. 2011. — Nov. Vol. 417. Pp. 2161–2165. arXiv:astro-ph.HE/1103.4246.
16. Beskin V. S., Nokhrina E. E. The effective acceleration of plasma outflow in the paraboloidal magnetic field // MNRAS. 2006. — Mar. Vol. 367. Pp. 375–386.
  17. Bethe H. A. Supernova mechanisms // Reviews of Modern Physics. 1990. — Oct. Vol. 62. Pp. 801–866.
  18. Bisnovatyi-Kogan G. S. The Explosion of a Rotating Star As a Supernova Mechanism. // Sov. Astronomy. 1970. — Aug. Vol. 47. Pp. 813–+.
  19. Bisnovatyi-Kogan G. S., Moiseenko S. G., Ardelyan N. V. Different magneto-rotational supernovae // Astronomy Reports. 2008. — Dec. Vol. 52. Pp. 997–1008.
  20. Blandford R. D., Znajek R. L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes // MNRAS. 1977. — May. Vol. 179. Pp. 433–456.
  21. Bogovalov S. V. Acceleration of relativistic plasma in the magnetosphere of an axisymmetric rotator. // Astronomy & Astrophysics. 1997. — Nov. Vol. 327. Pp. 662–670.
  22. Burrows A., Dessart L., Livne E. et al. Simulations of Magnetically Driven Supernova and Hypernova Explosions in the Context of Rapid Rotation // ApJ. 2007. — Jul. Vol. 664. Pp. 416–434. arXiv:astro-ph/0702539.
  23. Cohen M. H., Lister M. L., Homan D. C. et al. Relativistic Beaming and the Intrinsic Properties of Extragalactic Radio Jets // ApJ. 2007. — Mar. Vol. 658. Pp. 232–244. arXiv:astro-ph/0611642.
  24. Del Zanna L., Bucciantini N., Londrillo P. An efficient shock-capturing central-type scheme for multidimensional relativistic flows. II. Magnetohydrodynamics // åp. 2003. — Mar. Vol. 400. Pp. 397–413. arXiv:astro-ph/0210618.
  25. Duez M. D., Liu Y. T., Shapiro S. L., Stephens B. C. Relativistic

- magnetohydrodynamics in dynamical spacetimes: Numerical methods and tests // *Phys. Rev. D.* 2005.—Jul. Vol. 72, no. 2. Pp. 024028–+. arXiv:astro-ph/0503420.
26. Gammie C. F., McKinney J. C., Tóth G. HARM: A Numerical Scheme for General Relativistic Magnetohydrodynamics // *ApJ.* 2003.—May. Vol. 589. Pp. 444–457. arXiv:astro-ph/0301509.
  27. Giannios D., Spruit H. C. The role of kink instability in Poynting-flux dominated jets // *åp.* 2006.—May. Vol. 450. Pp. 887–898. arXiv:astro-ph/0601172.
  28. Jorstad S. G., Marscher A. P., Lister M. L., et al. Polarimetric Observations of 15 Active Galactic Nuclei at High Frequencies: Jet Kinematics from Bimonthly Monitoring with the Very Long Baseline Array // *AJ.* 2005.—Oct. Vol. 130. Pp. 1418–1465. arXiv:astro-ph/0502501.
  29. Koide S., Shibata K., Kudoh T. Relativistic Jet Formation from Black Hole Magnetized Accretion Disks: Method, Tests, and Applications of a General Relativistic Magnetohydrodynamic Numerical Code // *ApJ.* 1999.—Sep. Vol. 522. Pp. 727–752.
  30. Komissarov S. S. A Godunov-type scheme for relativistic magnetohydrodynamics // *MNRAS.* 1999.—Feb. Vol. 303. Pp. 343–366.
  31. Komissarov S. S. Magnetized tori around Kerr black holes: analytic solutions with a toroidal magnetic field // *MNRAS.* 2006.—May. Vol. 368. Pp. 993–1000. arXiv:astro-ph/0601678.
  32. Komissarov S. S., Barkov M. V. Magnetar-energized supernova explosions and gamma-ray burst jets // *MNRAS.* 2007.—Dec. Vol. 382. Pp. 1029–1040. 0707.0264.
  33. Komissarov S. S., Barkov M. V. Activation of the Blandford-Znajek mechanism in collapsing stars // *MNRAS.* 2009.—Aug. Vol. 397. Pp. 1153–1168. 0902.2881.

34. Komissarov S. S., Barkov M. V. Supercollapsars and their X-ray bursts // MNRAS. 2010. — Feb. Vol. 402. Pp. L25–L29. 0909.0857.
35. Komissarov S. S., Barkov M. V., Vlahakis N., Königl A. Magnetic acceleration of relativistic active galactic nucleus jets // MNRAS. 2007. — Sep. Vol. 380. Pp. 51–70. arXiv:astro-ph/0703146.
36. Komissarov S. S., Vlahakis N., Königl A., Barkov M. V. Magnetic acceleration of ultrarelativistic jets in gamma-ray burst sources // MNRAS. 2009. — Apr. Vol. 394. Pp. 1182–1212. 0811.1467.
37. Kotake K., Sawai H., Yamada S., Sato K. Magnetorotational Effects on Anisotropic Neutrino Emission and Convection in Core-Collapse Supernovae // ApJ. 2004. — Jun. Vol. 608. Pp. 391–404.
38. LeBlanc J. M., Wilson J. R. A Numerical Example of the Collapse of a Rotating Magnetized Star // ApJ. 1970. — Aug. Vol. 161. Pp. 541–+.
39. MacFadyen A. I., Woosley S. E. Collapsars: Gamma-Ray Bursts and Explosions in “Failed Supernovae” // ApJ. 1999. — Oct. Vol. 524. Pp. 262–289. arXiv:astro-ph/9810274.
40. Maio U., Barkov M. V. Signatures of very massive stars: supercollapsars and their cosmological rate // MNRAS. 2014. — Apr. Vol. 439. Pp. 3520–3525. arXiv:astro-ph.HE/1401.7326.
41. Moiseenko S. G., Bisnovatyi-Kogan G. S., Ardeljan N. V. A magnetorotational core-collapse model with jets // MNRAS. 2006. — Jul. Vol. 370. Pp. 501–512.
42. Nagataki S., Takahashi R., Mizuta A., Takiwaki T. Numerical Study of Gamma-Ray Burst Jet Formation in Collapsars // ApJ. 2007. — Apr. Vol. 659. Pp. 512–529. arXiv:astro-ph/0608233.
43. Proga D. On Magnetohydrodynamic Jet Production in the Collapsing and Rotating Envelope // ApJ. 2005. — Aug. Vol. 629. Pp. 397–402. arXiv:astro-ph/0502509.
44. Shibata M., Liu Y. T., Shapiro S. L., Stephens B. C. Magnetorotational

- collapse of massive stellar cores to neutron stars: Simulations in full general relativity // *Phys. Rev. D.* 2006. — Nov. Vol. 74, no. 10. Pp. 104026–+. arXiv:astro-ph/0610840.
45. Shibata M., Sekiguchi Y. Magnetohydrodynamics in full general relativity: Formulation and tests // *Phys. Rev. D.* 2005. — Aug. Vol. 72, no. 4. Pp. 044014–+. arXiv:astro-ph/0507383.
46. Takiwaki T., Kotake K., Nagataki S., Sato K. Magneto-driven Shock Waves in Core-Collapse Supernovae // *ApJ.* 2004. — Dec. Vol. 616. Pp. 1086–1094. arXiv:astro-ph/0408388.
47. Usov V. V. Millisecond pulsars with extremely strong magnetic fields as a cosmological source of gamma-ray bursts // *Nature.* 1992. — Jun. Vol. 357. Pp. 472–474.
48. Vlahakis N., Königl A. Magnetic Driving of Relativistic Outflows in Active Galactic Nuclei. I. Interpretation of Parsec-Scale Accelerations // *ApJ.* 2004. — Apr. Vol. 605. Pp. 656–661. arXiv:astro-ph/0310747.
49. Wheeler J. C., Yi I., Höflich P., Wang L. Asymmetric Supernovae, Pulsars, Magnetars, and Gamma-Ray Bursts // *ApJ.* 2000. — Jul. Vol. 537. Pp. 810–823. arXiv:astro-ph/9909293.
50. Woosley S. E. Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes // *ApJ.* 1993. — Mar. Vol. 405. Pp. 273–277.
51. Yamada S., Sawai H. Numerical Study on the Rotational Collapse of Strongly Magnetized Cores of Massive Stars // *ApJ.* 2004. — Jun. Vol. 608. Pp. 907–924.