

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ

На правах рукописи

КРАСИЛЬЩИКОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

**ЖЕСТКИЕ СИЛЬНО ПОГЛОЩЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АККРЕЦИИ И
НАБЛЮДЕНИЯ НА КОСМИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЯХ
CHANDRA, INTEGRAL, SWIFT**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2006

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
профессор Быков А.М.

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук
Птускин В.С.
кандидат физико-математических наук
Пальшин В.Д.

Ведущая организация ГАО РАН

Защита состоится «___» _____ 2006 г. в _____ на заседании Диссертационного совета Д 002.205.03 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук _____ Орбели А.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Жёсткие сильно поглощенные рентгеновские источники – это важный класс источников, наблюдательное изучение которых стало возможно только сейчас, с появлением телескопов, способных строить изображения в диапазоне энергий выше 10–15 кэВ. Характерной чертой этих источников является мощное энерговыделение при падении (аккреции) вещества на гравитирующий компактный объект: белый карлик, нейтронную звезду или чёрную дыру (включая сверхмассивные чёрные дыры в ядрах галактик).

Изучение физических процессов в аккреционных источниках представляет важную проблему, поскольку по эффективности выделения энергии они намного превосходят иные известные источники энерговыделения и, в частности, термоядерные источники энергии в звёздах. Аккреционные источники являются яркими объектами во всех наблюдаемых диапазонах спектра. Наблюдение таких источников в различных спектральных диапазонах (прежде всего, в рентгеновском и гамма-диапазонах), а также их теоретическое моделирование, является исключительно важным, поскольку позволяет судить о свойствах вещества и физических процессах внутри и в окрестности компактных объектов. Физические процессы в этих источниках происходят в экстремальных условиях, недостижимых в земных лабораториях: в сильных гравитационных полях, сильных (до $10^{10} - 10^{13}$ Гс) магнитных полях, при высоких температурах и плотностях.

Изучение аккреционных источников в галактических компактных объектах позволяет делать выводы об эволюции звездного населения Галактики, а изучение внегалактических аккреционных источников в ядрах галактик позволяет накладывать существенные ограничения на параметры современных космологических моделей.

Цели работы.

Целью диссертации является изучение аккреционных источников излучения посредством теоретического и численного моделирования и с помощью наблюдений на современных орбитальных и наземных телескопах в различных диапазонах электромагнитного спектра.

Конкретно, целями диссертации являются:

1. Исследование источников жесткого нетеплового рентгеновского излучения в полях остатков сверхновых γ -Cygni и IC 443 (которые ассоциируются с гамма-источниками, обнаруженными камерой *CGRO EGRET*) путем их наблюдения в рентгеновском диапазоне и анализа многоволновых архивных данных.
2. Исследование источника жесткого нетеплового рентгеновского излучения, возможно, связанного с ускорением частиц при взаимодействии мощных ветров массивных молодых звезд в активной области звездообразования NGC 6334, путем наблюдения в рентгеновском диапазоне и анализа многоволновых архивных данных.
3. Исследование физических процессов в аккреционной колонке вблизи поверхности замагниченной нейтронной звезды. Построение численной модели аккреционной колонки и изучение динамики аккреционного потока

и формирования ударного фронта в аккреционной колонке над поверхностью звезды. Поиск режимов аккреции, позволяющих ядрам С, N, O достигать поверхности нейтронной звезды без разрушения в реакциях скалывания.

Новизна работы.

1. Впервые построены изображения поля остатка сверхновой γ -Cygni в жёстких диапазонах от 20 до 80 кэВ и изучена его пространственная структура. В северо-западной части γ -Cygni обнаружен и локализован с точностью до 4'' новый точечный источник рентгеновского излучения IGR J2018+4043, вероятно, являющийся активным ядром ранее неизвестной галактики, проецирующейся на поле γ -Cygni. Этот источник может быть ассоциирован с мощным неотожествлённым гамма-источником 3EG J2020+4017.
2. В активной области звездообразования NGC 6334 в диапазоне до 80 кэВ обнаружен новый жёсткий рентгеновский источник, вероятно, являющийся активным ядром ранее неизвестной галактики, проецирующейся на поле NGC 6334.
3. Впервые построена численная модель нестационарной суб-эддингтоновской колонковой аккреции на замагниченную нейтронную звезду. В рамках этой модели впервые изучена динамика формирования и эволюция бесстолкновительной ударной волны в аккреционной колонке вблизи поверхности звезды. Найдены режимы аккреции, при которых ядра С, N, O в падающем потоке могут достигать поверхности звезды без разрушения в реакциях скалывания.

Достоверность научных результатов.

Достоверность результатов, полученных путём обработки и анализа данных наблюдений космических и наземных телескопов, подтверждается использованием методов обработки наблюдательных данных, разработанных и применяемых в ведущих обсерваториях мира, кросс-калибровками между различными приборами, а также сотрудничеством с разработчиками и создателями использованных телескопов.

Достоверность результатов, полученных аналитически и численным моделированием, подтверждается использованием общепризнанных математических и численных методов в рамках физических приближений, применимость которых ограничена четко сформулированными критериями. Метод Годунова, использованный при моделировании аккреционного потока, имеет надёжное математическое обоснование и применяется в газодинамических расчётах уже более сорока лет. Скорости основных физических процессов в аккреционном потоке вычислены на основе сечений этих процессов, рассчитанных методами квантовой электродинамики. Там, где это возможно, результаты численных расчетов сверены с теоретическими формулами, полученными в различных предельных случаях.

Практическая значимость работы.

Результаты работы, связанные с наблюдениями аккрецирующих объектов, важны для понимания природы конкретных жёстких поглощённых источников и, в частности, для идентификации самого яркого из неотожествлённых

гамма-источников 3EG J2020+4017, а также в целом для проверки современных представлений о строении и эволюции активных ядер галактик.

В рамках современных моделей взаимодействия остатков сверхновых и мощных ветров массивных звёзд ранних спектральных классов полученные результаты позволяют дать ограничения на параметры межзвёздной среды в исследованных объектах.

Результаты работы, относящиеся к моделированию аккреции на замагниченную нейтронную звезду, важны для теории аккреции на компактные объекты и представляют интерес для интерпретации наблюдаемых спектров излучения рентгеновских двойных систем с нейтронной звездой. Кроме того, эти результаты важны для моделирования рентгеновских вспышек первого типа и интерпретации наблюдений таких вспышек.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Построение нестационарной модели суб-эддингтоновской аккреции на замагниченную нейтронную звезду. Изучение динамики формирования и эволюции ударной волны в аккреционной колонке вблизи поверхности звезды. Демонстрация возможности эффективной трансформации кинетической энергии аккреционного потока в циклотронное излучение. Определение режимов аккреции, при которых значительная доля падающего вещества может достигать поверхности звезды без разрушения в реакциях скалывания.
2. Получение изображений поля остатка сверхновой γ -Cygni в жестких рентгеновских диапазонах от 20 до 80 кэВ и построение мозаичных карт остатка с размером ячейки около $5'$. Обнаружение и локализация с точностью до $4''$ жёсткого источника IGR J2018+4043, возможно, связанного с неотожествлённым гамма-источником 3EG J2020+4017. Интерпретация источника IGR J2018+4043 как аккрецирующего активного ядра галактики с космологическим красным смещением $z < 0.1$. Обнаружение протяженного источника нетеплового оптического и радиоизлучения в области взаимодействия остатка γ -Cygni с ветром массивной молодой звезды HD 193322.
3. Обнаружение и исследование структуры жёсткого рентгеновского излучения активной области звездообразования NGC 6334 в диапазоне от 0.5 до 80 кэВ. Вывод о том, что вероятными источниками наблюдаемого жесткого излучения являются а) сильно поглощенный внегалактический радиоисточник NGC 6334B, ассоциируемый с аккрецирующим активным ядром галактики, и б) диффузный источник NGC 6334A, связанный с излучением энергичных электронов в области столкновения ветров массивных звёзд ранних спектральных классов.

Апробация работы и публикации.

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 1998 по 2006 г. и изложены в 11 печатных работах (включая 6 статей в реферируемых журналах). Результаты диссертационной работы были представлены на международных конференциях: The 3rd INTEGRAL Workshop "The Extreme Universe" (Taormina, Italy, 1998), Joint European and National Astronomy Meeting (JENAM-2000; Москва, 2000), Committee on Space Research Scientific Assembly (COSPAR-2006; Beijing, China, 2006); на всероссийских конференциях: Физика нейтронных звёзд (NS-2001; Санкт-Петербург, 2001), Астро-

физика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2001, HEA-2002; Москва, 2001, 2002), а также на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, 1998-2006), на семинаре теоретического отдела Института теоретической и экспериментальной физики (Москва, 2001), на семинаре Центра обработки данных обсерватории *INTEGRAL* (Geneva, Switzerland, 2001), на семинаре Астрофизического института университета г. Тюбинген (Tübingen, Germany, 2002).

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения, содержит 100 страниц печатного текста, в том числе 35 рисунков, 6 таблиц и список литературы, включающий 145 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы цели и задачи диссертации, обоснована актуальность работы и её новизна, а также достоверность полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена описанию орбитальной гамма-обсерватории *INTEGRAL*.

В **разделе 1.1** дан обзор характеристик телескопов, установленных на обсерватории *INTEGRAL*, и программы наблюдений, проводимых на ней.

Гамма-обсерватория *INTEGRAL* [23] введена в строй в октябре 2002 года. Она состоит из трёх приборов, наблюдающих небо в жестких рентгеновских и гамма-лучах: спектрометра *SPI* (20 кэВ – 8 МэВ), камеры *IBIS*, имеющей низкоэнергичный (*ISGRI*, 15 – 250 кэВ [12]) и высокоэнергичный (*PICsIT*, 0.2 – 10 МэВ) детекторы, и рентгеновского монитора *JEM-X* (3 – 35 кэВ) [14].

Особенность телескопов обсерватории *INTEGRAL* состоит в использовании кодирующих масок, что позволяет строить изображения наблюдаемых объектов в диапазоне выше 10 кэВ, но приводит к существенным трудностям при обработке и интерпретации данных.

Программа наблюдений на обсерватории *INTEGRAL* состоит из наблюдений, проводимых научным советом обсерватории (Core Program), и наблюдений, проводимых в рамках открытого конкурса (Announcements of Opportunity), в котором могут участвовать все заинтересованные лица.

В **разделе 1.2** на примере наблюдений камерой *ISGRI* и монитором *JEM-X* поля галактического остатка сверхновой IC 443 продемонстрированы некоторые особенности и трудности, возникающие при интерпретации данных наблюдений телескопом с кодирующей маской.

Глава 2 посвящена наблюдениям жёсткого источника в поле остатка сверхновой γ -Cygni. В этой главе дан краткий обзор современных представлений о структуре γ -Cygni, проанализированы наблюдательные данные о γ -Cygni, полученные в различных спектральных диапазонах, и сделаны выводы о структуре и природе жёстких источников в поле этого остатка.

Остаток сверхновой γ -Cygni (G78.2+2.1) – это протяженный источник размером около градуса, наблюдаемый в широком диапазоне энергий от радио до гамма-излучения. Этот остаток расположен в богатой источниками области Лебеда, содержащей массивные газо-пылевые комплексы, поблизости от мощной звёздной ассоциации Cygnus OB2. Остаток γ -Cygni был открыт в 1977 году как радиооболочка [2, 9].

Остатки сверхновых являются наиболее вероятными источниками космических лучей. Взаимодействие нуклонной составляющей космических лучей с межзвёздной средой может приводить к рождению π^0 -мезонов, распад которых сопровождается гамма-излучением [1]. В поле γ -Сугни присутствует источник жесткого гамма-излучения 2CG 078+2 (2EG J2020+4026 / 3EG J2020+4017 / GEV J2020+4043) – самый яркий из неотожествлённых источников, наблюдаемых камерой *CGRO-EGRET*. Поэтому, наряду с остатком сверхновой IC 443, остаток γ -Сугни считается вероятным источником гамма-излучения от взаимодействия нуклонной составляющей галактических космических лучей [21] с межзвёздным газом. Поток излучения источника 3EG J2020+4017 в диапазоне выше 100 МэВ составляет около $1.2 \cdot 10^{-6}$ фот см⁻² с⁻¹ [7, 21]. Пространственное разрешение гамма-телескопов недостаточно для надёжной идентификации источников, находящихся в плоскости Галактики, поэтому нельзя исключить интерпретацию 3EG J2020+4017 как точечного источника, например, аккрецирующего активного ядра галактики (подавляющее большинство идентифицированных источников *EGRET* является активными ядрами галактик). Несмотря на интенсивные поиски в окрестности номинальной позиции 3EG J2020+4017 (в том числе, направленные наблюдения в нескольких радиодиапазонах и в рентгеновском диапазоне до 8 кэВ), источник так и не был обнаружен [4, 22]. В представленной диссертации предложена новая идентификация гамма-источника 3EG J2020+4017.

В период с 2003 по 2005 год поле γ -Сугни многократно наблюдалось камерой *INTEGRAL ISGRI*. Суммарная экспозиция γ -Сугни в полностью кодированном поле зрения *ISGRI* составила около 1.5 млн. секунд. По этим данным были впервые построены изображения остатка в жёстких спектральных диапазонах 20–40 кэВ и 40–80 кэВ с разрешением около 6'. Рентгеновская карта γ -Сугни содержит несколько ярких локализованных излучающих сгустков, имеющих размер 10'–20'. Самый яркий сгусток (далее – источник IGR J2018+4043) находится в северо-западной части остатка, неподалёку от яркой звезды HD 193322, относящейся к классу O9V. Расстояния до γ -Сугни и до HD 193322 [16] совпадают в пределах ошибок, что позволяет рассматривать взаимодействие ветра этой звезды с остатком как потенциальный источник наблюдаемого жёсткого излучения. На эту же возможность указывает и наличие яркого протяженного источника излучения в линии [OIII] (5010 Å), также находящегося в северо-западной части остатка [15]. Анализ архивных данных, полученных телескопом *ASCA* в поле γ -Сугни, указывает на наличие жёсткого источника, положение которого совпадает с положением источника IGR J2018+4043. Следует, однако, заметить, что источник, обнаруженный *ASCA*, находился на краю поля зрения камеры *GIS*, что внесло дополнительную неопределённость в его параметры (в том числе, в положение, угловой размер и форму). Дополнительный анализ архивных данных о γ -Сугни, полученных камерой *RXTE PCA*, позволяет построить совместный спектр всего остатка (камера *PCA* не имеет пространственного разрешения и собирает сигнал из круглой апертуры диаметром около градуса). Такой комбинированный спектр может быть описан степенным законом с изломом на энергии 11.1 ± 1.2 кэВ. При меньших энергиях показатель спектра равен 2.0 ± 0.4 , а при больших энергиях он равен 1.2 ± 0.4 . Модель также содержит лоренцевскую линию с энергией 6.2 ± 0.04 кэВ и шириной 1.0 ± 0.2 кэВ, которая

может указывать на наличие в поле зрения *РСА* неотожествлённого аккрецирующего источника (например, активного ядра галактики), излучающего в смещённой линии железа. Экстраполяция такого спектра в диапазон *ISGRI* не противоречит суммарному потоку, наблюдаемому *ISGRI* от трёх наиболее ярких источников в поле γ -Cygni.

С 26 по 30 марта 2006 года окрестность источника IGR J2018+4043 была наблюдаема телескопом *Swift XRT*. В поле *XRT* обнаружен жёсткий точечный источник с координатами 20:18:38.55 +40:41:00.4 (J2000, ошибка локализации – 4".2). Спектр этого источника может быть описан степенным законом с показателем $\Gamma = 1.1_{-0.8}^{+0.9}$, а наблюдаемый поток излучения в диапазоне 0.5–10.0 кэВ составляет $3.4_{-0.8}^{+0.7} \times 10^{-12}$ эрг см⁻² с⁻¹. Таким образом, найденный источник может быть отождествлён с источником IGR J2018+4043, поскольку их свойства и положения согласуются в пределах погрешностей. Карта окрестности источника IGR J2018+4043 в мягком и жёстком рентгеновских диапазонах приведена на рис. 1. Экстраполяция рентгеновского спектра IGR J2018+4043 в гамма-диапазон камеры *EGRET* даёт поток излучения, совместимый с наблюдаемым потоком от гамма-источника GEV J2020+4043. Поскольку в рассматриваемом поле имеются вариации гамма-фона и присутствуют ещё два гамма-источника на расстоянии менее 3° от IGR J2018+4043, точность локализации *EGRET* может быть существенно хуже номинальной. Указанные факторы позволяют говорить о вероятном совпадении этих источников, несмотря на расстояние 0°.31, разделяющее их номинальные позиции.

В силу того, что по данным обсерватории *Swift* положение IGR J2018+4043 определено с высокой точностью, был произведён поиск этого источника в архивных данных в радио-, инфракрасных и оптических диапазонах. По данным телескопа *VLA*, полученным на частоте 1.4 ГГц, обнаружен радиоисточник, состоящий из точечной и протяжённой составляющих, положение которых не противоречит положению IGR J2018+4043. Суммарная плотность потока излучения от этого источника составляет около 480 мЯн при среднем уровне шума около 5 мЯн. Разрешение телескопа *VLA* в конфигурации "D" недостаточно для надёжного разделения точечного источника и протяжённой структуры, которая сама по себе может быть интерпретирована как область взаимодействия остатка сверхновой γ -Cygni с ветром массивной звезды HD 193322. В каталоге источников инфракрасного излучения, наблюдаемых обсерваторией MSX [6] на длине волны 8.28 мкм, обнаружен источник с плотностью потока излучения 88 ± 9 мЯн, совпадающий по положению с IGR J2018+4043. При анализе данных инфракрасного обзора 2MASS [20] и оптического обзора POSS-II [18] обнаружен сильно поглощенный источник, совпадающий по положению с IGR J2018+4043 и имеющий протяженность около 10". Величина этого источника в стандартных инфракрасных фильтрах, определённая с учётом его протяженности, составляет J = 13.0, H = 11.5, K_s = 10.7. Плотность потока излучения IGR J2018+4043 в красном фильтре POSS-II (6500–7000 Å) составляет около 0.27 мЯн, а в инфракрасном фильтре POSS-II (7350–8750 Å) – около 0.76 мЯн. В голубом фильтре POSS-II (3750–5500 Å) источник не обнаружен из-за сильного галактического поглощения.

На основе полученных данных об IGR J2018+4043 было построено спектральное распределение энергии этого источника от радио- до гамма-диапазо-

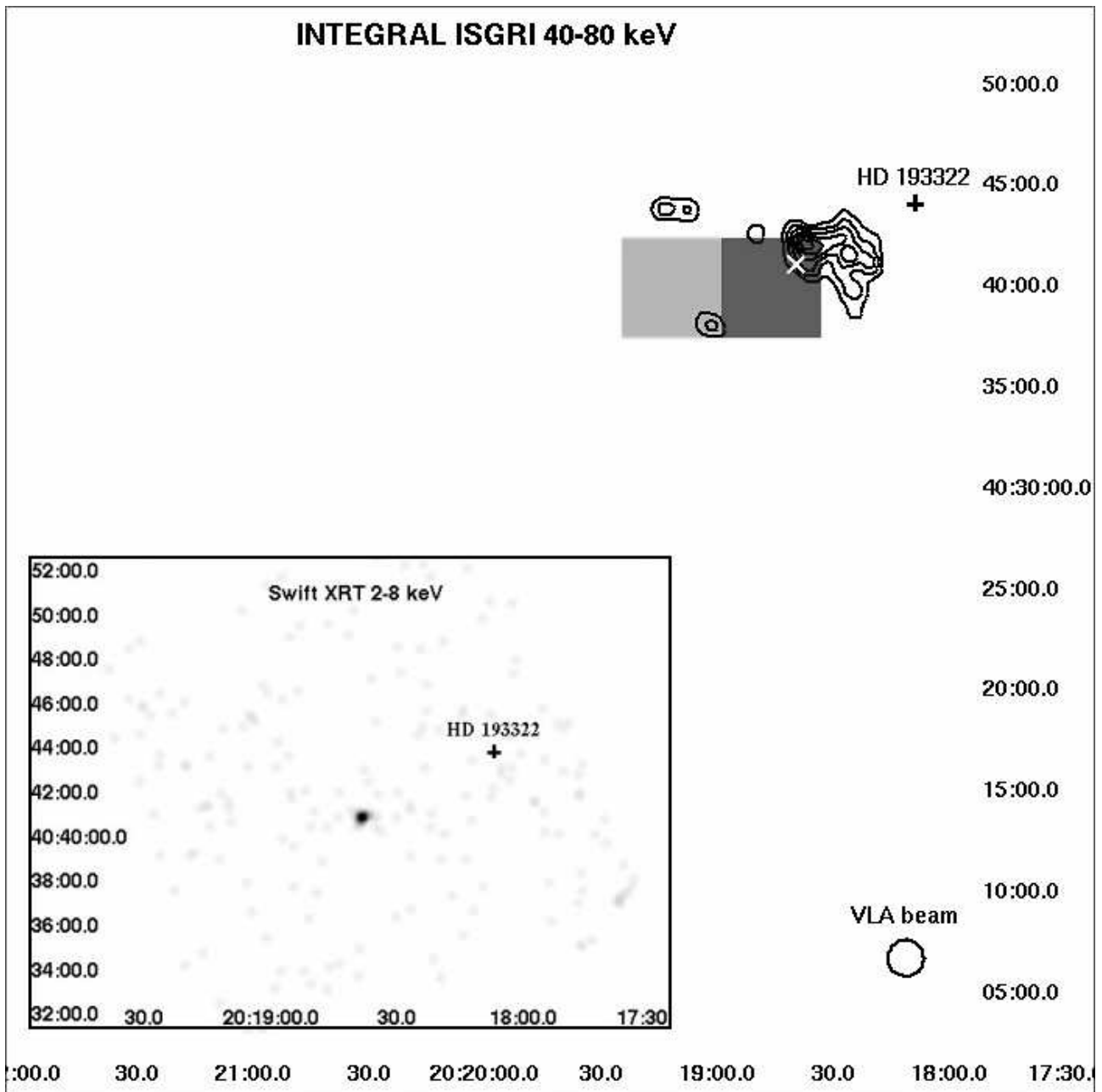


Рис. 1: Изображение окрестности источника IGR J2018+4043 в диапазоне 40–80 кэВ, построенное по данным камеры *INTEGRAL ISGRI*, с наложенными контурами плотности радиопотока на частоте 1.4 ГГц, наблюдаемого на телескопе *VLA*. Светлый и тёмный пиксели *ISGRI* соответствуют значимости детектирования 3.6σ и 3.8σ . Контуры радиопотока соответствуют линейной шкале от 9 до 73 мЯн на пучок. Белым крестиком отмечено положение источника IGR J2018+4043, определённое по данным обсерватории *Swift*. На врезке дана карта интенсивности излучения, полученная по данным телескопа *Swift XRT* в диапазоне 2–8 кэВ.

на, учитывающее сильное галактическое поглощение ($A_V \approx 9.8$) в направлении на IGR J2018+4043.

Оцененная по данным обсерватории *Swift* лучевая концентрация водорода в направлении на IGR J2018+4043 составляет $N_H = 5.2_{-2.4}^{+3.3} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, что в 2–3 раза превышает значения N_H , типичные для поля остатка γ -Cygni. Таким образом, вероятнее всего, источник IGR J2018+4043 находится дальше, чем остаток сверхновой γ -Cygni, и не связан с этим остатком. Спектральное распределение энергии, излучаемой IGR J2018+4043, имеет вид, типичный для активного ядра сейфертовской галактики, которое конвертирует энергию аккреции в нетепловое излучение релятивистских электронов. Более конкретно, двухпиковая структура спектра IGR J2018+4043 весьма схожа со спектрами блазаров, которые обычно интерпретируются в рамках синхротронно-комптоновской модели [8]. В таком случае протяженную составляющую источника, наблюдаемую в оптических и инфракрасных диапазонах, можно интерпретировать как родительскую галактику, содержащую активное ядро. Её наличие позволяет дать ограничение $z < 0.1$ на космологическое красное смещение IGR J2018+4043.

Глава 3 посвящена наблюдениям жёсткого источника в поле активной области звездообразования NGC 6334. В этой главе дан краткий обзор современных представлений о структуре NGC 6334, проанализированы данные об NGC 6334, полученные в различных спектральных диапазонах, и сделаны выводы о структуре и природе жёсткого рентгеновского источника в поле этой активной области звездообразования.

NGC 6334 имеет болометрическую светимость $L_{bol} \sim 1.9 \cdot 10^6 L_\odot$ и ассоциируется с гигантским молекулярным облаком, масса которого составляет $M_{cloud} \sim 1.6 \cdot 10^5 M_\odot$. Многочисленные наблюдения в радио- и инфракрасном диапазонах позволили установить наличие сложной структуры NGC 6334, состоящей из нескольких хорошо локализованных звездообразующих ядер. Массивные звездообразующие ядра расположены вдоль одной оси и образуют хребет размером около $20' \times 3'$, вероятно, связанный с аналогичной структурой молекулярного облака [13].

В период с 2003 по 2004 год поле NGC 6334 неоднократно наблюдалось камерой *INTEGRAL ISGRI*. Суммарная экспозиция в полностью кодируемом поле *ISGRI* составила около 420 тыс. секунд. По этим данным впервые были построены карты поля NGC 6334 в жёстких диапазонах до 80 кэВ и обнаружен жёсткий источник с потоком излучения $(1.8 \pm 0.37) \times 10^{-11} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в диапазоне 20–60 кэВ, спектр которого может быть описан степенным законом с показателем $\gamma = 0.9 \pm 0.3$.

Неопределённость положения жёсткого источника, обнаруженного *ISGRI*, составляет несколько минут. Поэтому для отождествления источника данные *ISGRI* были проанализированы совместно с архивными данными высокого разрешения, полученными камерой *Chandra ACIS* в диапазоне 0.2–8.0 кэВ, а также архивными радиоданными на частоте 1.4 ГГц и оптическими данными в фильтре R. Анализ данных обсерватории *Chandra* позволил установить, что поле NGC 6334 состоит из множества излучающих сгустков, в основном расположенных вдоль хребта NGC 6334. Спектральный анализ наиболее мощных сгустков, положение которых совместимо с положением источника *ISGRI*, выявил два из них — NGC 6334B и NGC 6334A — в качестве канди-

датов в источники жёсткого рентгеновского излучения.

Точечный источник NGC 6334B имеет внегалактическую природу. Согласно радиоданным, полученным при наблюдениях этого источника в линии HI, расстояние до него составляет по меньшей мере 6 кпк [17]. Согласно спектральным данным обсерватории *Chandra*, лучевая концентрация водорода в направлении на NGC 6334B приблизительно равна 10^{23} см^{-2} , что существенно выше значений $N_H \lesssim 3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, типичных для поля NGC 6334, и также указывает на внегалактическую природу этого источника. Спектральные характеристики NGC 6334B в широком диапазоне энергий согласуются с параметрами, типичными для сильно поглощенных аккрецирующих внегалактических источников, которые ассоциируются с активными ядрами галактик. Кроме того, NGC 6334B демонстрирует радиопеременность на масштабах около года [17], что также весьма характерно для активных ядер галактик.

Протяжённая III-область NGC 6334A является частью активной области звездообразования NGC 6334. Согласно данным инфракрасных и радионаблюдений, в области NGC 6334A имеется мощный (болومترическая светимость $\sim 2.5 \cdot 10^5 L_\odot$) высокоскоростной биполярный источник излучения в дальнем инфракрасном диапазоне и мощный H_2O -мазер, а также ряд объектов Хербига-Аро и четко очерченная радиоболочка размером около $15''$, которую можно интерпретировать как ударный фронт, созданный либо молодым остатком сверхновой, либо мощным ветром молодой звезды класса O7V5. Для проверки гипотезы о наличии молодого остатка сверхновой в облаке NGC 6334 в спектре рентгеновского излучения, полученном камерой *ISGRI*, был произведён поиск линий нестабильного ^{44}Ti на энергиях 67.9 кэВ и 78.4 кэВ. Результатом этого поиска явился верхний предел на уровне 3σ , составляющий $2.1 \cdot 10^{-5} \text{ фот см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в обеих линиях. Полученный предел соответствует верхнему пределу массы ^{44}Ti , произведённого сверхновой, равному $2.3 \cdot 10^{-6} M_\odot$. Это намного меньше типичных теоретических значений для сверхновых моложе 100 лет [10, 24]. Таким образом, существование в поле NGC 6334A молодой сверхновой с высокой вероятностью исключено.

Глава 4 посвящена моделированию аккреции на замагниченную нейтронную звезду. Краткий обзор существующих моделей аккреции дан в **разделе 4.1**. В **разделе 4.2** представлена численная модель суб-эддингтоновской колонковой аккреции на замагниченную нейтронную звезду.

Нейтронные звезды представляют собой распространенный класс астрофизических объектов: их доля в звёздном населении Галактики оценивается как 10^{-3} . Согласно современным теоретическим представлениям и интерпретации результатов наблюдений молодых радиопульсаров (с возрастом меньше нескольких миллионов лет), значительная часть нейтронных звёзд обладает сильным ($B \sim 10^{10} - 10^{12} \text{ Гс}$) магнитным полем.

Источником вещества, аккрецированного на нейтронную звезду, может быть как межзвёздная среда, сквозь которую движется аккрецирующая звезда, так и звезда-компаньон (если аккрецирующая нейтронная звезда находится в двойной системе). Если звезда-компаньон испускает сильный ветер, аккреция может происходить непосредственно из этого ветра; в противном случае вещество звезды-донора переполняет полость Роша этой звезды, пе-

ретекает через точку Лагранжа и формирует аккреционный диск вокруг нейтронной звезды.

Аналитические и численные модели аккреции на компактные объекты строятся с середины 60-х годов XX века (см. пионерские работы [3] и [19]). Основными вопросами теории аккреции на нейтронную звезду являются вопросы о механизмах энерговыделения и переноса излучения в аккреционной колонке и в частности, вопрос о наличии в колонке ударной волны. Аронс и др. (см. [11] и ссылки в этой работе) построили детальные модели существенно сверхэддингтоновской радиационно-доминированной аккреции и в рамках этих моделей изучили динамику аккреционного потока и возникающих в нем ударных волн.

В представленной диссертации построена и изучена одномерная модель нестационарной суб-эддингтоновской аккреции, имеющей скорость $\dot{M} = 10^{15} - 10^{16}$ г с⁻¹, на нейтронную звезду с магнитным полем $B_\star = 5 \times 10^{10} - 10^{13}$ Гс. В отличие от большинства предшествовавших работ, наличие ударных волн в колонке изначально не постулируется, а является результатом эволюции рассматриваемой системы. Особенность работы состоит в построении гидродинамического кода, основанного на методе Годунова, который позволяет исследовать разрывные течения и, в частности, описывать динамику ударных волн. Модель последовательно учитывает кинетику электронно-ионных потоков в сильном магнитном поле. Магнитное поле в колонке считается заданным; связанные с ним процессы взаимодействия вещества и излучения играют важнейшую роль в эволюции аккреционного потока.

Основными параметрами модели являются масса нейтронной звезды M_\star и её радиус r_\star , а также величина магнитного поля B_\star на её магнитном полюсе и скорость аккреции на единицу площади основания аккреционной колонки \dot{M}/A_0 .

Эволюция потока, движущегося вдоль силовых линий дипольного магнитного поля нейтронной звезды, описывается системой газодинамических уравнений:

$$r^3 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(r^3 \rho u) = 0, \quad (1)$$

$$r^3 \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}[r^3(p + \rho u^2)] = r^3 \mathcal{F} + 3r^2 p, \quad (2)$$

$$r^3 \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_s \left(E_s + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left(r^3 \left[\rho_s u \left(E_s + \frac{u^2}{2} \right) + p_s u \right] \right) = r^3 \mathcal{Q}_s, \quad (3)$$

где массовая плотность $\rho = \rho_e + \rho_i$, давление $p = p_i + p_e$, \mathcal{F} и \mathcal{Q}_s обозначают объемные плотности силы и скорости энерговыделения, а $s = i, e$ обозначает сорт частиц.

Слагаемые \mathcal{F} и \mathcal{Q}_s описывают физические процессы в аккреционной колонке, обусловленные гравитацией, обменом энергии между электронами и ионами в кулоновских столкновениях с возбуждением электронных уровней Ландау и при рассеянии на малые углы, тормозное излучение электронов на ионах и электронах, однократные комптоновские процессы и перенос излучения в широкой циклотронной линии. В качестве граничных условий рассмотрено втекание в колонку холодного свободно падающего вещества и наличие

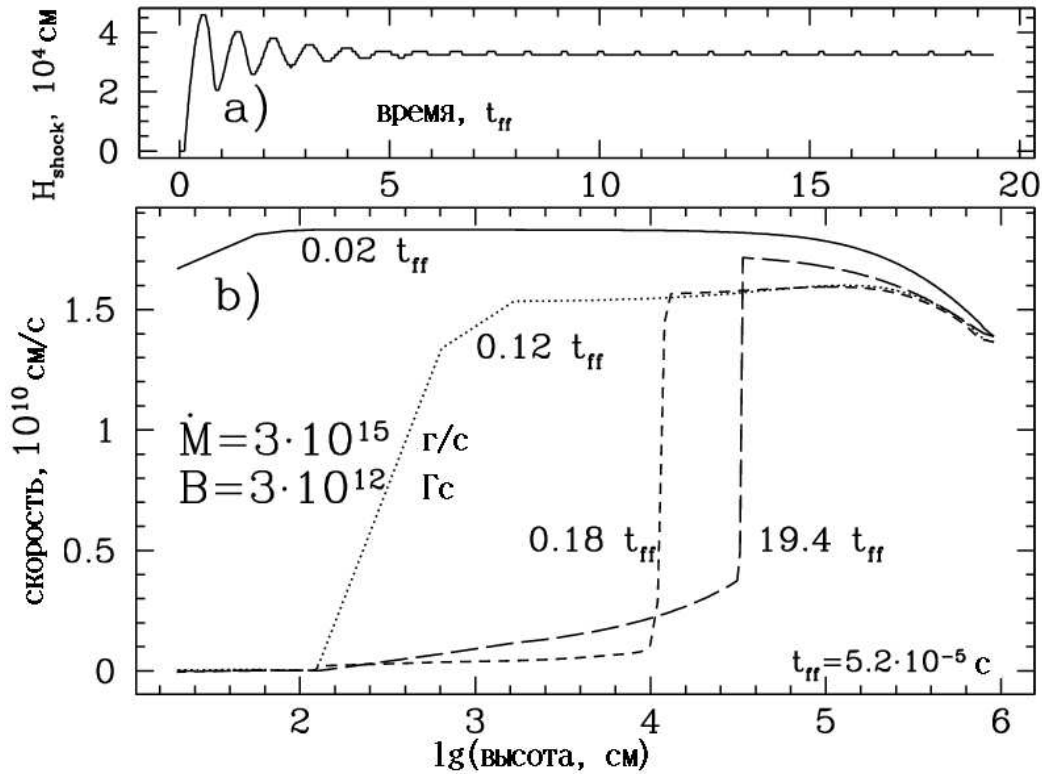


Рис. 2: Эволюция аккреционного потока для случая $B_* = 3 \cdot 10^{12}$ Гс, $\dot{M} = 3 \cdot 10^{15}$ г с $^{-1}$: а) зависимость высоты ударной волны от времени; б) эволюция профиля скорости потока.

плотной и тонкой атмосферы нейтронной звезды, в которой скорость аккреционного потока падает до нуля. Считалось, что в начальный момент времени аккреционная колонка заполнена холодным газом и не содержит ударных волн.

Для численного интегрирования системы (1)–(3) использован модифицированный метод годуновского типа (ёмкостная схема по типу Ле Века с расщеплением), позволяющий изучать динамику ударных волн с одновременным аккуратным учётом микроскопических процессов обмена энергией между компонентами потока на различных масштабах времени.

Численные расчёты, проведённые в рамках построенной модели, показали, что на временах порядка 10^{-5} с в колонке развиваются сильные ударные волны. Эти волны совершают устойчивые колебания около своих положений равновесия с периодами порядка 10^{-5} с, затухающие за время порядка 10^{-3} с. Рассчитанные профили течения демонстрируют устойчивые и сильные ударные волны, которые тормозят и нагревают аккреционный поток. На таких волнах ионы нагреваются намного сильнее, чем электроны, поскольку в ионах содержится основная часть кинетической энергии потока. Однако при дальнейшем движении к поверхности нагретые ионы отдают значительную часть своей энергии электронам, которые, в свою очередь, выделяют её в виде циклотронных и тормозных фотонов и отдают нерезонансным фотонам при комптоновском рассеянии. В большинстве случаев степень сжатия на фронтах несколько превосходит 4 (максимальное значение для нерелятивистских одножидкостных ударных волн) из-за слабoreлятивистских изменений адиа-

батического индекса ионов, нагретых до температуры в несколько десятков МэВ.

Пример эволюции положения ударной волны в аккреционной колонке и профиля скорости аккреционного потока приведён на рис. 2 для случая $V_* = 3 \cdot 10^{12}$ Гс, $\dot{M} = 3 \cdot 10^{15}$ г с⁻¹, $A_0 = 10^{10}$ см².

Важным свойством модели является трансформация значительной доли потока энергии вещества в энергию фотонов оптически толстой электронной циклотронной линии. Давление запертого циклотронного излучения существенно влияет на динамику аккреционного потока. Сильное торможение и эффективное охлаждение потока в оптически тонком режиме в колонке приводит к тому, что до поверхности звезды доходит лишь около половины энергии аккреционного потока.

В теории рентгеновских вспышек первого типа, происходящих на поверхности нейтронных звёзд, важным является вопрос о наличии во вспышечной области ядер С, N, O как катализаторов термоядерного горения водорода. В случае, когда аккреционный поток тормозится в атмосфере нейтронной звезды, ядра С, N, O разрушаются, не достигая поверхности звезды [5]. Для построенных моделей суб-эддингтоновского аккреционного потока найдены такие режимы аккреции, когда значительная часть ядер С, N, O может достичь поверхности нейтронной звезды без разрушения в реакциях скалывания, и таким образом, катализировать рентгеновские вспышки первого типа на поверхности нейтронной звезды.

В **приложении** дан список использованных сокращений, описана методика вычисления скорости обмена энергией в электронно-ионных столкновениях с возбуждением электронных уровней Ландау в сильном магнитном поле, а также приведены списки проанализированных экспозиций полей γ -Cygni, IC 443 и NGC 6334 в поле телескопов *INTEGRAL ISGRI* и *INTEGRAL JEM-X*.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы, приведён список публикаций, содержащих описание основных результатов, и список цитированной литературы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате наблюдений поля остатка сверхновой γ -Cygni гамма-обсерваторией *INTEGRAL* впервые получены изображения остатка сверхновой в жёстких рентгеновских диапазонах от 20 кэВ до 80 кэВ. В северо-западной части γ -Cygni в диапазоне до 80 кэВ обнаружен источник жёсткого излучения IGR J2018+4043.
2. В результате наблюдений северо-западной части γ -Cygni обсерваторией *Swift* обнаружен и локализован с точностью до 4'' жёсткий рентгеновский источник, имеющий координаты 20:18:38.55 +40:41:00.4 (J2000). Он может быть отождествлён с источником IGR J2018+4043.
3. Источник IGR J2018+4043 имеет аккреционную природу. Вероятнее всего, он является активным ядром близкой ($z < 0.1$) галактики, которое проецируется на поле γ -Cygni (с меньшей вероятностью этот источник может быть галактическим микроквazarом). Однако область взаимодействия остатка с ветром массивной молодой звезды HD 193322 также может вносить вклад в жёсткое излучение γ -Cygni, зарегистрированное камерой

- ISGRI*, и в радиоизлучение, обнаруженное телескопом *VLA*.
4. По результатам наблюдений поля остатка сверхновой IC 443 монитором *INTEGRAL JEM-X* обнаружены избытки излучения в диапазонах 6–10 кэВ и 10–20 кэВ. Эти избытки пространственно коррелируют с источниками, наблюдаемыми обсерваториями *ВерроSAX* и *XMM-Newton* в диапазоне до 10 кэВ.
 5. В результате наблюдений галактической активной области звездообразования NGC 6334 гамма-обсерваторией *INTEGRAL* обнаружен источник жёсткого рентгеновского излучения с нетепловым спектром, который тянется по крайней мере до 100 кэВ.
 6. Проведённый многоволновой анализ области NGC 6334 позволил заключить, что обнаруженный жёсткий источник можно отождествить как с фоновым внегалактическим радиоисточником NGC 6334B, проецирующимся на область NGC 6334, так и с протяженной III-областью NGC 6334A, ассоциирующейся с ярким инфракрасным источником и радиооболочкой.
 7. Построена одномерная численная модель нестационарной аккреции вещества в колонке над полярной областью замагниченной нейтронной звезды. В рамках этой модели установлено наличие ударных волн в аккреционном потоке и исследована их временная эволюция.
 8. Часть энергии аккреционного потока трансформируется в циклотронное излучение в оптически толстой линии, давление которого существенно влияет на торможение потоков плазмы. При этом значительная часть кинетической энергии потока выделяется в виде излучения, не достигая дна колонки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Bykov A.M., Bloemen H., Ivanchik A.V., Konstantinov A.N., Krassilchtchikov A.M., Lazarev V.E. Can we observe nuclear gamma-ray lines from accreting objects with INTEGRAL? // *Astrophysical Letters and Communications* — 1999. — V. **38**. — P. 285–289.
2. Быков А.М., Красильщиков А.М. Об аккреции на замагниченную нейтронную звезду // *Научно-технические ведомости СПбГПУ* — 2003. — Вып. **4**. — С. 139–142.
3. Быков А.М., Красильщиков А.М. О динамике потоков, аккрецирующих на замагниченную нейтронную звезду // *Письма в астрономический журнал* — 2004. — Т. **30**. — С. 351–361.
4. Bykov A.M., Krassilchtchikov A.M., Uvarov Yu.A., Bloemen H., Chevalier R.A., Gustov M.Yu., Hermsen W., Lebrun F., Lozinskaya T.A., Rauw G., Smirnova T.V., Sturmer S.J., Swings J.-P., Terrier R., Toptygin I.N. Hard X-ray Emission Clumps in the γ -Cygni Supernova Remnant: an INTEGRAL-ISGRI View // *Astronomy and Astrophysics* — 2004. — V. **427**. — P. L21–L24.
5. Bykov A.M., Krassilchtchikov A.M., Uvarov Yu.A., Lebrun F., Renaud M., Terrier R., Bloemen H., McBreen B., Courvoisier T.J.-L., Gustov M.Yu., Hermsen W., Leyder J.-C., Lozinskaya T.A., Rauw G., Swings J.-P. INTEGRAL detection of hard X-rays from NGC 6334: Nonthermal emission from colliding winds or an AGN? // *Astronomy and Astrophysics* — 2006. — V. **449**. — P. 917–923.
6. Bykov A.M., Krassilchtchikov A.M., Uvarov Yu.A., Kennea J., Pavlov G.G.,

Dubner G.M., Giacani E.B., Bloemen H., Hermsen W., Kaastra J., Lebrun F., Renaud M., Terrier R., DeBecker M., Rauw G., Swings J.-P. On the nature of the hard X-ray source IGR J2018+4043 // *Astrophysical Journal* — 2006. — V. **649**. — P. L21-L24.

7. Быков А.М., Красильщиков А.М. О суб-эддингтоновской аккреции на замагниченную нейтронную звезду // Тезисы докладов международной конференции европейских астрономических союзов (JENAM-2000). — Москва, 2000. — С. 63.
8. Красильщиков А.М., Быков А.М. Модель суб-эддингтоновской аккреции на замагниченную нейтронную звезду // Тезисы докладов международной конференции "Физика нейтронных звёзд". — Санкт-Петербург, 2001. — С. 27.
9. Быков А.М., Красильщиков А.М. Модель суб-эддингтоновской аккреции на замагниченную нейтронную звезду // Тезисы докладов всероссийской конференции "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2001)". — Москва, 2001. — С. 10.
10. Быков А.М., Красильщиков А.М. О динамике потоков, аккрецирующих на замагниченную нейтронную звезду // Тезисы докладов всероссийской конференции "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2002)". — Москва, 2002, — С. 6.
11. Kennea J., Pavlov G.G., Bykov A.M., Krassilchtchikov A.M., Uvarov Yu.A., Lebrun F., Bloemen H., Hermsen W., Kaastra J. Swift XRT detection of the INTEGRAL ISGRI source IGR J2018+4043 // *Astronomer's Telegram*. — 2006. — Atel #788.

ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- [1] Березинский В.С., Буланов С.В., Гинзбург В.Л., Догель В.А., Птушкин В.С. Астрофизика космических лучей // М., "Наука". — 1990.
- [2] Лозинская Т.А. // Письма в астрономический журнал. — 1977. — Т. **3**. — С. 306–309.
- [3] Зельдович Я.Б. // Доклады АН СССР. — 1964. — Т. **155**. — С. 67–70.
- [4] Becker W., Weisskopf M.C., Arzoumanian Z., et al. // *Astrophys. J.* — 2004. — V. **615**. — P. 897–907.
- [5] Bildsten L., Salpeter E.E., Wasserman I. // *Astrophys. J.* — 1992. — V. **384**. — P. 143–176.
- [6] Egan M.P., Price S.D., Kraemer K.E. // *Bull. Amer. Astron. Soc.* — 2003. — V. **203**. — M. 58.07.
- [7] Esposito J.A., Hunter S.D., Kanbach G., et al. // *Astrophys. J.* — 1996. — V. **461**. — P. 820–827.
- [8] Ghisellini G. // *Nucl. Phys. B.* — 2004. — V. **132**. — P. 76–85.
- [9] Higgs L., Landecker T., Roger R. // *Astron. J.* — 1977. — V. **82**. — P. 718–724.
- [10] Iwamoto K., Brachwitz F., Nomoto, K., et al. // *Astrophys. J. Suppl.* — 1999. — V. **125**. — P. 439–462.
- [11] Klein R.I., Arons J., Garrett J., Hsu J.J.-L. // *Astrophys. J.* — 1996. — V. **457**. — P. L85–L88.

- [12] Lebrun F., Leray J.P., Lavocat P., et al. // *Astron. Astrophys.* — 2003. — V. **411**. — P. L141-148.
- [13] Loughran L., McBreen B., Fazio G.G., et al. // *Astrophys. J.* — 1986. — V. **303**. — P. 629–637.
- [14] Lund N., Budtz-Joergensen C., Westergaard N.J., et al. // *Astron. Astrophys.* — 2003. — V. **411**. — P. L231-L238.
- [15] Mavromatakis F. // *Astron. Astrophys.* — 2003. — V. **408**. — P. 237–243.
- [16] McKibben W.P., Bagnuolo W.G., Jr., Gies D.R., et al., // *Proc. Astron. Soc. Pacif.* — 1998. — V. **110**. — P. 900–905.
- [17] Moran J.M., Rodriguez L.F., Greene B., et al. // *Astrophys. J.* — 1990. — V. **348**. — P. 147–152.
- [18] Reid I.N., Brewer C., Brucato R.J., et al. // *Proc. Astron. Soc. Pacif.* — 1991. — V. **103**. — P. 661–674.
- [19] Salpeter E.E. // *Astrophys. J.* — 1964. — V. **140**. — P. 796–800.
- [20] Skrutskie M.F., Cutri R.M., Stiening R., et al. // *Astron. J.* — 2006. — V. **131**. — P. 1163–1183.
- [21] Sturmer S.J., Dermer C.D. // *Astron. Astrophys.* — 1995. — V. **293**. — P. L17–L20.
- [22] Weisskopf M.C., Swartz D.A., Carramiñana A., et al. // *ArXiv*. — 2006. — astro-ph/0606596.
- [23] Winkler C., Courvoisier T., Di Cocco G., et al. // *Astron. Astrophys.* — 2003. — V. **411**. — P. L1–L6.
- [24] Woosley S.E., Weaver T.A. // *Astrophys. J. Suppl.* — 1995. — V. **101**. — P. 181–235.