

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ П.К. ШТЕРНБЕРГА

На правах рукописи

ПОПОВ Сергей Борисович

# **Магнито-вращательная эволюция и популяционный синтез одиночных нейтронных звезд**

Специальность: *01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия*

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

Москва 2011

Работа выполнена в отделе релятивистской астрофизики Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

### **Официальные оппоненты**

доктор физико-математических наук,

(Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН)

Бескин В.С.

доктор физико-математических наук

(Физико-технический Институт им. А. Ф. Иоффе РАН)

Каминкер А.Д.

доктор физико-математических наук

(Институт Космических Исследований РАН)

Ревнивцев М.Г.

### **Ведущая организация**

Институт Астрономии

Российской Академии Наук

Защита состоится 22 сентября 2011 года в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д501.001.86 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991 Москва В-234, Университетский проспект д.13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга при МГУ (Москва, Университетский проспект д. 13).

Автореферат разослан 18 августа 2011 года

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

С.О.Алексеев

# 1 Общая характеристика диссертации

Диссертация посвящена исследованию эволюции одиночных нейтронных звезд и связанным с этой проблематикой вопросам (в основном, это эволюция тесных двойных систем, приводящая к формированию нейтронных звезд, в первую очередь – одиночных). Представлены результаты, полученные разными методами: аналитические расчеты, полуаналитические вычисления, качественные гипотезы и детальное компьютерное моделирование.

Главные результаты, представленные в диссертации, связаны с разработкой модели и созданием первого в мире комплекса программ для популяционного синтеза близких остывающих молодых нейтронных звезд. Развитие использованного нами оригинального подхода позволило создать подробную модель, описывающую локальную (вплоть до нескольких килопарсек) популяцию молодых нейтронных звезд. На основе комплексного подхода, включающего несколько разных популяций молодых компактных объектов, удалось получить непротиворечивое описание эволюции и наблюдательных проявлений радиопульсаров, магнитаров и остывающих нейтронных звезд в рамках единой модели с гладкими начальными распределениями.

Некоторые из полученных результатов представляют интерес не только для астрофизиков, но и для физиков, занимающихся вопросами поведения вещества при больших плотностях или в сильных магнитных полях. Первое связано с изучением популяций остывающих нейтронных звезд, чья тепловая эволюция зависит от свойств сверхплотного вещества в недрах нейтронных звезд. Второе – с исследованиями магнитаров, которым посвящена одна из глав диссертации.

Там, где это сейчас возможно, мы сравнивали результаты теоретических расчетов с данными наблюдений в разных диапазонах спектра, в первую очередь в рентгеновском. Кроме этого, в работе представлены модели, интерпретирующие данные наблюдений, а также сделаны предсказания для будущих наблюдательных проектов, в том числе, разрабатываемых в России.

В диссертацию включены результаты, опубликованные в 2000-2010 гг. Большая часть результатов, представленных в диссертации, описана в двух больших обзорах автора (в соавторстве с М.Е. Прохоровым) на русском языке, опубликованных в 2003 и 2007 годах.

## 1.1 Цель диссертации

*Цели настоящей диссертации* таковы:

- а) Исследование плохо изученных аспектов магнито-вращательной эволюции нейтронных звезд и проведение расчетов на основе созданных моделей.
- б) Разработка популяционных моделей для одиночных нейтронных звезд разных возрастов.
- в) Применение построенных моделей для численного моделирования различных популяций нейтронных звезд и сравнение результатов расчетов с наблюдениями.
- г) Изучение особенностей эволюции двойных систем, порождающих нейтронные звезды, и рассмотрение влияния эволюции в двойных на параметры популяций одиночных нейтронных звезд.
- д) Исследование популяции магнитаров и определение ее связей с другими типами нейтронных звезд.

## 1.2 Актуальность диссертации

Перечисленные задачи являются *актуальными* в свете бурного развития астрофизики нейтронных звезд и техники наблюдений.

Новые наземные установки и космические обсерватории дают большой поток информации по нейтронным звездам. Растет количество известных объектов всех типов, для все большего числа источников определяются разнообразные параметры со все возрастающей точностью, обнаруживаются новые проявления нейтронных звезд и новые типы объектов.

Существенный прогресс имеется в радионаблюдениях. Растет число известных радиопульсаров, приближаясь к 2000 (см. каталог ATNF [1]). Обнаруживаются пекулярные свойства отдельных источников этого типа, накапливается статистика по популяции в целом и по ее подгруппам. При этом существует целый ряд нерешенных принципиальных вопросов, касающихся самой большой и первой из идентифицированных популяций нейтронных звезд [2, 3].

Совершенствование техники регистрации и обработки данных в радиоастрономии привели к обнаружению нового типа активности (а, возможно, и нового типа объектов) – вращающихся радиотранзиентов (RRATs) [9]. Это источники, испускающие миллисекундные радиоимпульсы с периодичностью, соответствующей периоду вращения, но с

огромной долей “пропущенных” импульсов.

Для многих типов нейтронных звезд ключевыми оказались наблюдения в рентгеновском диапазоне [4]. Это относится к остывающим нейтронным звездам – т.н. “Великолепной семерке” [5, 6] и центральным объектам в остатках сверхновых [7], – а также к магнитарам [8]. Как обзорные (ROSAT, RXTE и др.), так и детальные (Chandra, XMM-Newton и др.) наблюдения в последние годы существенно расширили и углубили наши знания о нейтронных звездах.

Кроме этого одиночные нейтронные звезды наблюдаются и в оптическом, и в ИК диапазонах. Большой прогресс имеет место в гамма-наблюдениях. На орбите работает обсерватория имени Ферми, а на Земле работает несколько телескопов в ТЭВном диапазоне. Эти инструменты дают важнейшую новую информацию по нейтронным звездам.

Анализ свойств перечисленных выше типов источников, все из которых являются молодыми нейтронными звездами, показывает, что они занимают широкие диапазоны практически по всем типам основных параметров. Так, например, магнитные поля некоторых центральных источников в остатках сверхновых имеют величину менее  $10^{10}$  Гс, а поля магнитаров могут превосходить  $10^{14}$  Гс. Т.о., и наблюдательные проявления молодых нейтронных звезд чрезвычайно разнообразны [10, 11].

Объяснение наблюдаемого многообразия объектов, выяснение особенностей эволюции, приводящих к появлению наблюдаемых популяций источников является важной современной задачей, над которой работают исследовательские группы во всем мире, в том числе в России. Планирование новых экспериментов (например, таких как российский спутник Спектр-РГ [12] – [15]) требует предсказаний потенциально наблюдаемых популяций, расчетов их свойств. Для этого наиболее целесообразно применять метод популяционного синтеза [16], развиваемый для ряда типов объектов в данной работе. Также необходимо определять и уточнять распределения по начальным параметрам для нейтронных звезд.

Кроме перечисленных астрофизических задач важно отметить, что нейтронные звезды представляют собой чрезвычайно интересный тип объектов с точки зрения физики [17]. Так например, вещество в недрах нейтронных звезд находится в экстремальном состоянии, недоступном для исследования в наземных лабораториях, но представляющем чрезвычайно большой интерес для ядерной физики [18]. Для проверок физических теорий можно применять астрофизические данные. Это, например, относится к исследованию тепловой эволюции нейтронных звезд,

которая с одной стороны, связана с деталями внутреннего строения этих объектов [19, 20], а с другой – находит выражение в наблюдаемых проявлениях компактных объектов [21]. На этапе сравнения результатов расчетов с наблюдениями эффективно применение популяционного синтеза. Разработанный в данной диссертации метод тестирования моделей тепловой эволюции нейтронных звезд представляет собой *актуальную* методику, применимую на стыке ядерной физики и астрофизики [22].

### 1.3 Научная новизна и практическая значимость

*Научная новизна* состоит в создании новых популяционных моделей и воплощении их в виде компьютерных программ. Также впервые рассчитаны параметры старых аккрецирующих нейтронных звезд с учетом турбулентности межзвездной среды. Впервые с помощью оригинального комплекса программ проведен популяционный синтез остывающих одиночных нейтронных звезд. Впервые изучена связь близкой популяции нейтронных звезд с OB-ассоциациями в окрестности Солнца. Впервые по данным каталога BATSE получены оценки темпа гигантских вспышек магнитаров. Важным пунктом является первый комплексный популяционный синтез молодых нейтронных звезд разных типов (радиопульсары, магнитары, остывающие нейтронные звезды) с учетом затухания магнитного поля. Впервые получено распределение по начальным магнитным полям нейтронных звезд, удовлетворяющее данным наблюдений сразу для трех разных популяций. Впервые в рамках количественной модели прослежены эволюционные связи между разными типами нейтронных звезд с сильным магнитным полем.

*Практическая значимость* полученных результатов, во-первых, связана с тем, что популяционные модели могут быть использованы для предсказания числа и свойств источников, которые могут быть обнаружены в планирующихся или начинающихся обзорных наблюдательных программах (например, на борту российского спутника Спектр-Рентген-Гамма), а также в архивных данных. Во-вторых, предложенный в диссертации тест тепловой эволюции компактных объектов может быть использован для эффективной селекции моделей остывания нейтронных звезд, а также для выбора параметров в выбранных моделях на основе сравнения численных расчетов и данных наблюдений. В-третьих, полученные результаты могут быть использованы при создании новых популяционных моделей и расчетах эволюции нейтронных звезд.

## 1.4 Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Разработана оригинальная модель, описывающая популяцию близких молодых нейтронных звезд. На ее основе создан комплекс программ для популяционных расчетов эволюции близких одиночных остывающих нейтронных звезд и произведены расчеты.
  - а) Определено происхождение большинства близких молодых остывающих нейтронных звезд. Сравнением результатов расчетов с данными наблюдений продемонстрировано, что основная часть этих объектов появилась в Поясе Гулда.
  - б) Предложен новый тест моделей тепловой эволюции нейтронных звезд, основанный на расчете распределения  $\text{Log } N - \text{Log } S$  этих объектов в окрестности Солнца и сравнении с данными наблюдений. С помощью численного моделирования продемонстрирована эффективность нового метода. Показано, что он компенсирует недостатки традиционного подхода проверки моделей тепловой эволюции. Для ряда моделей рассчитаны диапазоны параметров, позволяющие описать наблюдаемую популяцию.
  - в) Сделаны предсказания для поиска одиночных остывающих нейтронных звезд с помощью будущих рентгеновских обзоров. Новые источники на более низких потоках будут иметь более высокие температуры, чем объекты “Великолепной семерки” – порядка 200 эВ, и будут располагаться за Поясом Гулда в направлении на богатые ОВ-ассоциации.
2. Проведен комплексный популяционный синтез молодых одиночных нейтронных звезд в модели с затуханием магнитного поля. Исследована эволюционная связь между популяциями одиночных нейтронных звезд. Исследовано начальное распределение по магнитным полям. Доля магнитаров ограничена величиной порядка 10%. Выделено лог-нормальное распределение по начальным магнитным полям, удовлетворительно описывающее одновременно популяции близких остывающих нейтронных звезд, магнитаров и радиопульсаров. В этой модели среднее поле составляет  $10^{13.25}$  Гс, дисперсия  $\sigma = 0.6$ .

3. Исследованы особенности магнито-вращательной эволюции старых одиночных нейтронных звезд и получены следующие результаты.
  - а) Рассчитаны модели эволюции одиночных нейтронных звезд с затуханием магнитного поля на большом масштабе времени для разных моделей затухания. Для разных моделей затухания выделены диапазоны параметров, при которых нейтронные звезды выходят на стадию аккреции из межзвездной среды за время, меньшее времени жизни Галактики. При экспоненциальном распаде, начальных полях порядка  $10^{12}$  Гс, характерном времени распада  $10^7$ - $10^8$  лет и нижней границе поля порядка  $10^{9.5}$ - $10^{11}$  Гс нейтронные звезды не успевают выйти на стадию аккреции за время меньшее нескольких миллиардов лет.
  - б) Рассчитано распределение по периодам вращения старых одиночных аккрецирующих нейтронных звезд при постоянном магнитном поле с учетом турбулентности межзвездной среды. Характерные периоды составляют несколько месяцев для реалистичных распределений по магнитным полям и скоростям. Для самых ярких низкоскоростных звезд периоды составляют порядка нескольких суток.
4. Исследована роль двойных систем в формировании параметров одиночных компактных объектов и получены следующие результаты.
  - а) Изучены каналы образования быстро вращающихся ядер звезд, которые могут быть прародителями магнитаров в тесных двойных системах. Показано, что при сохранении ядром звезды-прародителя значительной части приобретенного углового момента удастся объяснить как количество магнитаров, так и факт их одиночности. В рамках сценария с заметной потерей углового момента в процессе эволюции необходимо сделать дополнительные предположения о параметрах дополнительной скорости (кике) при рождении нейтронной звезды. Необходим кик перпендикулярно плоскости орбиты с величиной  $\gtrsim 400$  км с $^{-1}$ .
  - б) Рассмотрено влияние двойственности звезд-прародителей на распределение углов между осью вращения и направлением пространственной скорости для разных параметров кика. Рассчитано, в каких областях на плоскости угол-скорость доминируют одиночные пульсары, родившиеся в двойных системах. Такие источники чаще имеют углы  $\gtrsim 15 - 20^\circ$ , а также преобладают среди объектов со



скоростями  $\lesssim 30 \text{ км с}^{-1}$ .

5. Исследованы некоторые аспекты эволюции массивных двойных систем и получены следующие результаты.
  - а) Предложена методика поиска близких молодых черных дыр, образовавшихся в распавшихся после взрыва сверхновой двойных системах, по убегающим звездам. Рассчитаны области локализации для четырех объектов.
  - б) Построен и проанализирован спектр масс массивных нейтронных звезд в двойных системах, выделены типы систем, в которых наиболее вероятно их появление. Галактический темп формирования нейтронных звезд с барионной массой  $\gtrsim 1.8 M_{\odot}$  составляет примерно  $(6 - 7) 10^{-7}$  в год.
6. Даны оценки темпа гигантских вспышек магнитаров. По результатам обработки каталога BATSE темп вспышек с энерговыделением в начальном импульсе  $\gtrsim 0.5 10^{44}$  эрг составляет  $\lesssim 1/10 - 1/30$  в год на галактику. Темп вспышек с энерговыделением в начальном импульсе  $\gtrsim 10^{46}$  эрг составляет  $\lesssim 1/1000$  в год на галактику.

## 1.5 Личный вклад автора

Постановка задач в подавляющем большинстве работ, представленных в диссертации, принадлежит автору. Анализ полученных результатов проводился совместно с соавторами. Основная часть программного кода для популяционного моделирования одиночных нейтронных звезд (кроме моделирования радиопульсаров в работе по комплексному популяционному синтезу) была написана автором. Также автором были проведены все расчеты для одиночных нейтронных звезд (кроме радиопульсаров в работе по комплексному популяционному синтезу). Расчеты по популяционному синтезу двойных систем проводились в основном соавторами. Автор принимал участие в работе над некоторыми узлами комплекса программ по расчету эволюции тесных двойных систем.

Выделим некоторые пункты отдельно:

- Автором была написана основная часть программы популяционного синтеза одиночных остывающих нейтронных звезд.
- Автором было предложено учесть роль Пояса Гулда и продемонстрировано ее большое значение.

- Автором было предложено использовать популяционные расчеты распределения  $\text{Log } N - \text{Log } S$  для близких остывающих нейтронных звезд в качестве теста моделей остывания и проведены все соответствующие расчеты.
- Автором была предложена идея комплексного популяционного синтеза остывающих нейтронных звезд, магнитаров и радиопульсаров; выполнены расчеты для остывающих нейтронных звезд (программы создавались при участии П.А.Болдина и Б. Посселт); написана программа и выполнены расчеты для магнитаров.
- Автором была высказана идея о возможности определения областей локализации молодых одиночных черных дыр в окрестности Солнца по изучению свойств массивных убегающих звезд. Расчеты областей локализации были выполнены совместно с М.Е. Прохоровым.
- В наблюдательных работах автор участвовал в постановке задачи и обсуждении и интерпретации результатов.
- Использование именно объектов “Великолепной семерки” в качестве наилучших источников для поиска сигналов от конверсии аксионов в сильном магнитном поле было предложено автором. Оценки для этих объектов проведены совместно с М.С. Пширковым.
- Автором была предложена идея о поиске гипервспышек и гигантских вспышек магнитаров в данных BATSE в направлении областей с высоким звездообразованием. Работа с каталогом проводилась совместно с Б.Е. Штерном.

Часть работ выполнена без соавторов, они выше не упомянуты. В остальных неупомянутых выше работах вклад автора равный.

## 1.6 Апробация результатов

Основные результаты, представленные в диссертации, были многократно представлены в виде устных докладов лично автором на многочисленных конференциях и семинарах. В их числе на:

1. Конференциях НЕА в Москве в 2001 - 2010 гг.
2. Конференциях по физике нейтронных звезд в Петербурге в 1999, 2001, 2005, 2008 гг.

3. Конференции “Superdense QCD Matter and Compact Stars”, Ереван, Армения (2003).
4. Конференциях “Astrophysics of Neutron Stars” в Турции в 2007, 2008, 2010 гг.
5. Конференции “Third International Sakharov Conference on Physics”, Москва (2002).
6. Конференции “Texas in Florence”, Флоренция, Италия (2003).
7. Конференции “4th AGILE workshop: X-ray and gamma-ray astrophysics of galactic sources”, Рим, Италия (2003).
8. Конференции “Isolated neutron stars: from the surface to the interior”, Лондон, Великобритания (2006).
9. Конференции “ВАК-2004”, Москва (2004).
10. Конференции “VA100 Evolution of Cosmic Objects Through Their Physical Activity”, Ереван, Армения (2008).
11. Конференции “КВАРКИ-2006”, Репино (2006).
12. Конференции “Hot points in astrophysics and cosmology”, Дубна (2004).
13. Конференции “Astrophysical sources of high energy particles and radiation”, Торунь, Польша (2005).
14. Конференции “Supernovae as cosmological lighthouses”, Падуя, Италия (2004).
15. Конференции “Neutron Stars at the Crossroads of Fundamental Physics”, Ванкувер, Канада (2005).

Семинары с докладами автора по различным работам, представленным в диссертации, проходили в ГАИШ, ОИЯИ (Дубна), ФИАН, ИКИ, ФТИ им. Иоффе, ИТЭФ, ун-те Аликанте (Испания), обсерватории Кальяри (Италия), ун-те Комо (Италия), ун-те и обсерватории Падуи (Италия), ун-тах Милана (Италия), Институте Астрономии в Кембридже (Великобритания), обсерватории Йены (Германия), ун-те Ростока (Германия), SISSA (Италия), ун-те Льежа (Бельгия), Институте Радиоастрономии в Бонне (Германия), в GSI (Германия) и др.

Серии лекций по актуальным вопросам астрофизики нейтронных звезд, в рамках которых, в частности, представлялись и результаты диссертации, были прочитаны автором в ГАИШ МГУ, ун-те Кальяри (Италия), ин-те Эйнштейна в Гольме (Германия), на летних школах в Дубне, Эриче (Италия), Тренто (Италия), Пушино.

Также результаты представлялись в виде различных докладов соавторами статей.

## 1.7 Публикации по теме диссертации

Результаты по теме диссертации были опубликованы в 5 обзорах, 30 статьях в рецензируемых журналах и 12 материалах конференций.

### *Обзоры*

1. S.B. Popov

“The Zoo of Neutron Stars”

**Physics of Particles and Nuclei** vol. 39, pp. 1136-1142 (2008)

2. С.Б. Попов, М.Е. Прохоров

“Популяционный синтез в астрофизике”

**Успехи Физических наук** т. 177, N11, стр. 1179-1206 (2007)

3. С.Б. Попов, М.Е. Прохоров

“Астрофизика одиночных нейтронных звезд: радиотихие нейтронные звезды и магнитары”

**Труды ГАИШ** т. 72, стр. 1-80 (2003)

4. S.B. Popov, R. Turolla

“Isolated neutron stars: An astrophysical perspective”

in: *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop On Superdense QCD Matter and Compact Stars* (NATO Science Series. II. Mathematics, Physics and Chemistry. Eds. D. Blaschke and D. Sedrakian. Vol. 197) (2006) pp. 53-72

5. M. Colpi, A. Possenti, S.B. Popov, F. Pizzolato

“Spin and magnetism in old neutron stars”

in: *“Physics of Neutron Star Interiors”* (Eds. D. Blaschke, N.K. Glendenning and A. Sedrakian, Lecture Notes in Physics, Vol. 578) (Springer, 2001) pp.440-467

### *Публикации в рецензируемых журналах*

1. S.B. Popov, J.A. Pons, J.A. Miralles, P.A. Boldin, B. Posselt

“Population synthesis studies of isolated neutron stars with magnetic field decay”

**MNRAS** vol. 401, pp. 2675-2686 (2010)

2. A.G. Kuranov, S.B. Popov, K.A. Postnov

“Pulsar spin-velocity alignment from single and binary neutron star progenitors”

**MNRAS** vol. 395, pp. 2087-2094 (2009)

3. V.I. Kondratiev, M.A., McLaughlin, D.R. Lorimer, M. Burgay, A. Possenti, R. Turolla, S.B. Popov, S. Zane

- “New limits on radio emission from X-ray dim isolated neutron stars”  
**ApJ** vol. 702, pp. 692-706 (2009)
4. A.M. Pires, C. Motch, R. Turolla, A. Treves, S.B. Popov  
 “The isolated neutron star candidate 2XMM J104608.7-594306”  
**A&A** vol. 498, pp. 233-240 (2009)
5. M.S. Pshirkov, S.B. Popov  
 “Conversion of Dark matter axions to photons in manetospheres of neutron stars”  
**ЖЭТФ** т. 108 стр. 384-388 (2009)
6. А.И. Богомазов, С.Б. Попов  
 “Магнитары, гамма-всплески и экстремально тесные двойные системы”  
**АЖ** т. 86, стр. 361-369 (2009)
7. S.B. Popov  
 “Tkachenko waves, glitches and precession in neutron stars”  
**Ap&SS** vol. 317, pp. 175-179 (2008)
8. B. Posselt, S.B. Popov, F. Haberl, J. Trumper, R. Turolla, R. Neuhauser  
 “The needle in the haystack - Where to look for more isolated cooling neutron stars”  
**A&A** vol. 482, pp. 617-630 (2008)
9. S.B. Popov  
 “Soft gamma repeaters activity in time”  
**Astronom. Nachr.** vol. 329, pp. 15-19 (2008)
10. B. Posselt, S.B. Popov, F. Haberl, R. Turolla, R. Neuhauser  
 “The Magnificent Seven in the dusty prairie”  
**Ap&SS** vol. 308, pp. 171-176 (2007)
11. S.B. Popov, D. Blaschke, H. Grigorian, M.E. Prokhorov “Neutron star masses: dwarfs, giants and neighbors”  
**Ap&SS** vol. 308, pp. 381-384 (2007)
12. S.B. Popov, H. Grigorian, D. Blaschke  
 “Neutron star cooling constraints for color superconductivity in hybrid stars”  
**Phys. Rev. C.** vol. 74, 025803 (2006)
13. S.B. Popov, R. Turolla, A. Possenti  
 “A tale of two populations: Rotating Radio Transients and X-ray Dim Isolated Neutron Stars”  
**MNRAS** vol. 369, pp. L23-L27 (2006)
14. S.B. Popov, M.E. Prokhorov  
 “Magnetars origin and progenitors with enhanced rotation”  
**MNRAS** vol. 367, pp. 732-736 (2006)

15. S.B. Popov, H. Grigorian, R. Turolla, D. Blaschke  
 “Population synthesis as a probe of neutron star thermal evolution”  
**A&A** Vol. 448, pp.327-334 (2006)
16. S.B. Popov, B.E. Stern  
 “Soft gamma repeaters outside the Local group”  
**MNRAS** vol. 365, pp. 885-890 (2006)
17. S.B. Popov, M.E. Prokhorov  
 “Trans-sonic propeller stage”  
**Astr. Astroph. Trans.** vol. 24, pp. 17-23 (2005)
18. S.B. Popov, M.E. Prokhorov  
 “Formation of massive skyrmion stars”  
**A&A** vol. 434, pp. 649-655 (2005)
19. S.B. Popov, R. Turolla, M.E. Prokhorov, M. Colpi, A. Treves  
 “Young close-by neutron stars: the Gould Belt vs. the Galactic disc”  
**Ap&SS** vol. 299, pp. 117-127 (2005)
20. I. Bombaci, S.B. Popov  
 “On the nature of bimodal initial velocity distribution of neutron stars”  
**A&A** vol. 424, pp. 627-633 (2004)
21. S.B. Popov  
 “On the evolutionary states of neutron stars in pre-low-mass X-ray binaries”  
**A&A** vol. 418, pp. 699-703 (2004)
22. S.B. Popov, M. Colpi, M.E. Prokhorov, A. Treves, Turolla  
 “Young isolated neutron stars from the Gould Belt”  
**A&A** vol. 406, pp. 111-117 (2003)
23. С.Б. Попов, М.Е. Прохоров  
 “Магнитные поля нейтронных звезд: указания на распад”  
**Изв. РАН (Серия физическая)** т. 67 стр. 317-321 (2003)
24. S.B. Popov, M.E. Prokhorov  
 “Evolution of isolated neutron stars in globular clusters: number of Accretors”  
**Astr. Astroph. Trans.** vol. 21, 217-221 (2002)
25. М.Е. Прохоров, С.Б. Попов  
 “Ближние молодые одиночные черные дыры”  
**ПАЖ** т. 28, стр. 609-615 (2002)
26. М.Е. Prokhorov, S.B. Popov, A.V. Khoperskov  
 “Period distribution of old accreting isolated neutron stars”  
**A&A** vol. 381, pp. 1000-1006 (2002)
27. S.B. Popov, M.E. Prokhorov  
 “Restrictions on parameters of power-law magnetic field decay for accreting

isolated neutron stars”

**Astr. Astroph. Trans.** vol. 20, pp. 635-642 (2001)

28. S.B. Popov, M.E. Prokhorov

“ROSAT X-ray sources and exponential field decay in isolated neutron stars”

**A&A** vol.357, pp. 164-168 (2000)

29. S.B. Popov, M. Colpi, M.E. Prokhorov, A. Treves, R. Turolla

“Log N – Log S distributions of accreting and cooling isolated neutron stars”

**ApJ** vol. 544, L53-L56 (2000)

30. S.B. Popov

“Nature of the compact X-ray source in supernova remnant RCW103 and related problems”

**Ap&SS** vol. 274, pp. 285-290 (2000)

*Материалы конференций*

1. S.B. Popov, K.A. Postnov

“Hyperflares of SGRs as an engine for millisecond extragalactic radio bursts”

in: “*Evolution of Cosmic Objects through their Physical Activity*” *Proc. of the Conference dedicated to Viktor Ambartsumian’s 100th anniversary* (Eds. H A Harutyunian, A M Mickaelian, Y. Terzian) (Yerevan, Gitutyun Publishing House of NAS RA, 2010) p. 129

2. S.B. Popov

“Scenarios for GCRT J1745-3009”

in: “*Evolution of Cosmic Objects through their Physical Activity*” *Proc. of the Conference dedicated to Viktor Ambartsumian’s 100th anniversary* (Eds. H A Harutyunian, A M Mickaelian, Y. Terzian) (Yerevan, Gitutyun Publishing House of NAS RA, 2010) p. 105

3. S.B. Popov, B. Posselt, F. Haberl, J. Trumper, R. Turolla, R. Neuhauser

“Space cowboys odyssey: beyond the Gould Belt”

in: *Proc. of the conference “40 Years of Pulsars” AIP Conf. Proc. vol. 983* (Eds. C.G. Bassa, Z. Wang, A. Cumming, V.M. Kaspi) (2008) p. 357

4. M.E. Prokhorov, S.B. Popov

“Trans-sonic propeller stage”

in: *Proc. “Astrophysics and Cosmology After Gamow”* (Eds. G.S. Bisnovaty-Kogan, S. Silich, E. Terlevich, R. Terlevich, A. Zhuk) (Cambridge Scientific Publishers, Cambridge, UK, 2007) p.343

5. S.B. Popov, D. Blaschke, H. Grigorian, B. Posselt

“Astronomy meets QCD: cooling constraints for the theories of internal structure of compact objects”

- in: *Proc. of the conference QUARKS-2006* (Eds. S V Demidov et al.) (INR, Moscow, 2007) p. 280
6. S.B. Popov  
 “Close by Compact Objects and Recent Supernovae in the Solar Vicinity”  
 in: *“Neutrinos and Explosive Events in the Universe” Proc. of the International School of Cosmic Ray Astrophysics, 14th Course* (Eds. M.M. Shapiro, T. Stanev, J.P. Wefel) (NATO Science Series, II. Mathematics, Physics and Chemistry Vol. 209, 2005) p.119
7. S.B. Popov, H. Grigorian, R. Turolla, D. Blaschke  
 “Log N – Log S distribution as a new test for cooling curves of neutron stars”  
 in: *Astrophysical sources of high energy particles and radiation* (Eds. T. Bulik, B. Rudak, G. Madejski) (AIP Conf. Proc., vol 801, 2005) p. 316
8. I. Bombaci, S.B. Popov  
 “On the bimodality of the kick velocity distribution of radio pulsars”  
 in: *“Supernovae as cosmological lighthouses”* (Turatto M., Benetti S., Zampieri L., Shea W.) (ASP Conf. Ser. vol. 342, 2005) p. 433
9. S.B. Popov, A. Treves, R. Turolla  
 “Radioquiet isolated neutron stars: old and young, nearby and far away, dim and very dim”  
 in: *Proc. of the 4th AGILE workshop* (Eds. M. Tavani, A. Pellizzoni, S. Vercellone) (Aracne Editrice, 2004) p.183
10. S.B. Popov, M.E. Prokhorov, M. Colpi, A. Treves, R. Turolla  
 “Young compact objects in the solar vicinity”  
 in: *“Relativistic Astrophysics and Cosmology” Proc. of the 13th Course of the International School of Cosmic Ray Astrophysics* (Eds. M.M. Shapiro, T. Stanev, J.P. Wefel) (New Jersey, NJ: World Scientific Publishing, 2004) p. 101
11. S.B. Popov, M.E. Prokhorov, M. Colpi, A. Treves, R. Turolla  
 “Young compact objects in the solar vicinity”  
 in: *Proc. of the “Third International Sakharov Conference on Physics”* (Eds. A Semikhatov et al.) (Scientific World, Moscow, Russia, 2002) p. 420
12. S.B. Popov  
 “Evolution of isolated neutron stars”  
 in: *“Astrophysical sources of high energy particles and radiation” Proc. of the NATO Advanced Study Institute and 12th Course of the International School of Cosmic Ray Astrophysics* (Eds. M.M. Shapiro, T. Stanev, J.P. Wefel) (NATO ASI series. II. Mathematics, Physics and Chemistry, vol 44) (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001) p.101



## 2 Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, семи глав, Заключения, и библиографии. Общий объем диссертации — 340 страниц, включая 88 рисунков, 20 таблиц и 647 ссылок.

### 2.1 Содержание работы по главам

Во **Введении** дается краткая общая характеристика диссертации, формулируются основные цели работы, обосновывается ее актуальность, описывается личный вклад автора и приводятся списки публикаций по теме диссертации.

**Глава I** является обзорной. В ней описаны основные данные по наблюдениям одиночных нейтронных звезд. Больше внимание уделено молодым объектам, не являющимся стандартными радиопульсарами (раздел 1.1). Это магнитары (аномальные рентгеновские пульсары и источники мягких повторяющихся гамма-всплесков), вращающиеся радиотранзиенты (RRATs), близкие остывающие нейтронные звезды (“Великолепная семерка”) и центральные компактные объекты в остатках сверхновых. Приведены основные свойства каждого типа объектов и даны ссылки на обзоры и оригинальные публикации.

Также в этой главе кратко описывается магнито-вращательная и тепловая эволюция нейтронных звезд (раздел 1.2). Приведены данные по основным процессам, приводящим к ускорению или замедлению вращения нейтронных звезд. Обсуждается сценарий с уменьшающимся магнитным полем. Описываются основные процессы остывания компактных объектов. Приводятся результаты моделирования охлаждения нейтронных звезд и проводится сравнение с данными наблюдений.

В заключение главы (раздел 1.3) дано описание метода популяционного синтеза, который активно используется в данной диссертации. Обсуждаются основные характеристики и особенности этого метода. Кратко описываются различные подходы. Несколько детальнее рассматривается моделирование методом Монте-Карло, применяющееся в данной диссертации. Отдельно обсуждаются трудности в использовании этого метода.

В **Главе II** мы приводим оригинальные результаты по исследованию различных аспектов магнито-вращательной эволюции нейтронных звезд. Исследована эволюция одиночных нейтронных звезд на большом мас-

штабе времени с затуханием магнитного поля. Изучено распределение по периодам вращения одиночных аккрецирующих нейтронных звезд с учетом турбулентности в межзвездной среде. Рассмотрен режим пропеллера. Исследовано влияние двойственности прародителей одиночных нейтронных звезд на ряд параметров.

В разделе 2.1 рассмотрена эволюция нейтронных звезд с учетом затухания магнитного поля. Используются две аналитические модели: экспоненциальный и степенной распад. Основной задачей является исследование длительности эволюции до стадии аккреции и выделение диапазона параметров, при которых нейтронная звезда не может начать аккрецировать вещество межзвездной среды.

При экспоненциальном распаде, начальных полях  $\sim 10^{12}$  Гс, характерном времени распада  $10^7$ - $10^8$  лет и нижней границе поля  $\sim 10^{9.5}$ - $10^{11}$  Гс нейтронные звезды не успевают выйти на стадию аккреции за время меньшее нескольких миллиардов лет. С уменьшением величины начального поля область параметров, при которых не происходит выход на стадию аккреции, увеличивается. Звезды с более сильными начальными полями, наоборот, быстрее достигают стадии аккреции.

Для моделей из работы [23] можно показать, что нейтронные звезды со скоростями менее  $200 \text{ км с}^{-1}$  покидают стадию эжектора за время, меньшее времени жизни Галактики. В случае степенного закона затухания магнитного поля также можно выделить области параметров, при которых нейтронная звезда не уходит со стадии сверхзвукового пропеллера.

Раздел 2.2 посвящен поведению одиночных нейтронных звезд, аккрецирующих вещество турбулизованной межзвездной среды. Исследуется распределение по периодам вращения таких объектов.

Новизна рассмотрения состоит в том, что нами впервые был учтен ускоряющий момент при аккреции из межзвездной среды. В итоге появляется некий аналог равновесного периода, хорошо известного в двойных системах. Только в случае одиночных нейтронных звезд и турбулизованной межзвездной среды этот период будет флуктуировать. Можно выделить важный характерный масштаб – радиус гравитационного захвата (или радиус Бонди),  $R_G$ . Он определит величину характерного углового момента, приносимого аккрецируемым веществом:  $j_t = v_t(R_G) \cdot R_G$ .

Важность турбулентности можно продемонстрировать таким образом. Внесем в турбулизованную среду невращающуюся нейтронную звезду. Из-за того, что аккрецируемое вещество обладает угловым моментом,

связанным с турбулентностью, звезда начнет вращаться. Вектор угловой скорости будет постоянно изменяться, в среднем его значение занулится, но в каждый данный момент модуль скорости будет не равен нулю, и эту эволюцию можно описать.

Нами численно была исследована эволюция периода одиночной нейтронной звезды после начала аккреции. Пока тормозящий момент много больше турбулентного, период монотонно растет:  $p \propto t$ . Когда период приближается к характерной величине  $p_{cr} = 2\pi\mu/GM\dot{M}j_t$ , становится существенным влияние турбулентности.

Характерные периоды вращения одиночных нейтронных звезд после установления равновесия получаются очень большими – порядка дней или даже месяцев. Можно ожидать флуктуацию периодов на масштабе несколько месяцев (время пересечения турбулентной ячейки масштаба  $R_G$ ).

Разделы 2.3 и 2.4 посвящены стадии пропеллера. Вначале (раздел 2.3) мы рассматриваем короткую переходную стадию между сверхзвуковым и дозвуковым пропеллером. На этой стадии происходит перестройка оболочки вокруг магнитосферы нейтронной звезды. В нижней ее части условия уже таковы, как на стадии дозвукового пропеллера, а во внешней – такие, как на стадии сверхзвукового пропеллера. Перестройка происходит быстро, в динамической шкале.

В следующем разделе (2.4) рассмотрена эволюция нейтронной звезды в маломассивной двойной системе до начала сильной аккреции. В работе [24] обсуждались наблюдательные проявления и эволюция рентгеновских двойных систем на стадии, предшествующей классическим маломассивным рентгеновским двойным (LMXB). Авторы назвали такие источники “до-маломассивные-рентгеновские-двойные” (pre-LMXB). Это разделенные системы, в которых источником вещества является слабый звездный ветер еще непроэволюционировавших компонентов. Несмотря на низкий темп переноса вещества такие системы потенциально могут регистрироваться с помощью мощных рентгеновских детекторов.

Виллемс и Колб [24] в своей работе выявили два максимума в распределении pre-LMXB по светимости. Первый соответствует  $\sim 10^{31}$ , а второй –  $\sim 10^{28}$  эрг  $s^{-1}$  (это, кстати, соответствует ожидаемым светимостям при аккреции Бонди на одиночные нейтронные звезды из МЗС). Может возникнуть вопрос: а не могут ли объекты вообще избежать перехода на стадию аккреции при столь низком темпе переноса массы? Авторы [24] не обсуждают этот вопрос, принимая наличие режима аккреции как

данность. В рамках простой стандартной модели мы рассматриваем, как протекала эволюция pre-LMXB, и могут ли эти системы находиться на стадии аккреции при низком темпе звездного ветра, или же они остаются на стадии пропеллера или даже эжектора. Мы приходим к выводу, что большинство нейтронных звезд в pre-LMXBs (по крайней мере, пока нормальная звезда находится на стадии главной последовательности) не находятся на стадии аккреции из ветра. Аккреция возможна только для сильно замагниченных нейтронных звезд или в очень тесных системах.

В последнем разделе главы (раздел 2.5) мы изучаем влияние двойственности прародителей одиночных нейтронных звезд на свойства наблюдаемой популяции радиопульсаров. Основной задачей является исследование свойств распределения по углам между осью вращения и вектором пространственной скорости,  $\delta$ . Наблюдения одиночных пульсаров [25, 26] говорят о том, что углы распределены не случайно: основная часть исследованных объектов имеет небольшие углы  $\delta$ .

Тенденция к малым углам  $\delta$  может быть связана с тем, что направление вектора дополнительной скорости (кика) нейтронной звезды, получаемой при взрыве сверхновой, коррелировано с направлением оси вращения. Мы исследуем различные возможности, позволяющие описать наблюдаемые данные. Показано, что при стандартной величине кика без учета нейтронных звезд, родившихся в тесных двойных системах, трудно описать наблюдаемое распределение по углам  $\delta$ . Нами выделяется область параметров, соответствующая доминированию нейтронных звезд, имеющих, соответственно, одиночных или двойных прародителей. Пульсары, возникшие в распавшихся двойных, чаще имеют углы  $\gtrsim 15 - 20^\circ$ , а также преобладают среди объектов со скоростями  $\lesssim 30 \text{ км с}^{-1}$ .

В **Главе III** рассматриваются близкие молодые компактные объекты. Мы описываем первые версии наших популяционных моделей для близких остывающих нейтронных звезд, обсуждаем роль начального распределения звезд-прародителей. В заключении главы рассмотрены близкие молодые черные дыры, возникшие в распавшихся массивных двойных системах, вторые компоненты которых мы наблюдаем как очень массивные убегающие звезды.

В разделе 3.1 мы приводим результаты расчетов пространственной плотности одиночных нейтронных звезд в Галактике (Рис. 1). Для окрестности Солнца получены значения  $\sim 3 \cdot 10^{-4} \text{ пк}^{-3}$  для двух вариантов начального распределения звезд-прародителей.

В разделе 3.2 суммированы результаты ранних расчетов распределе-

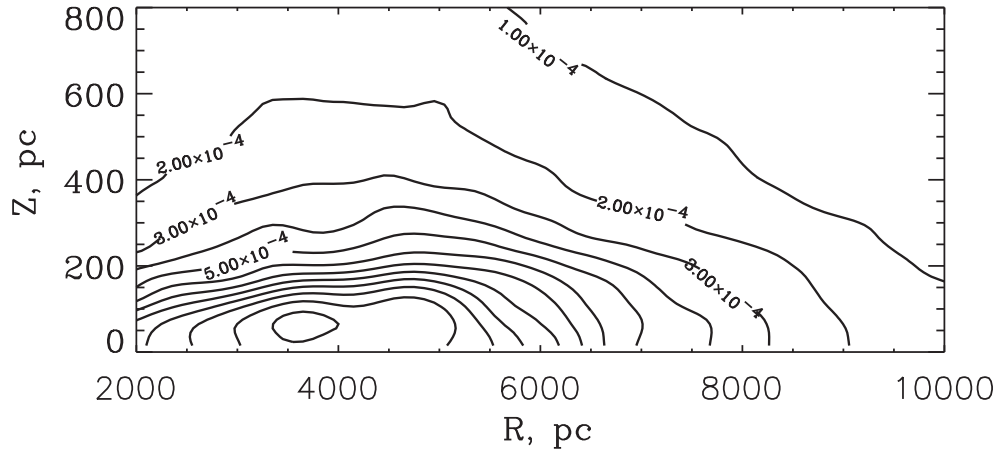


Рис. 1: На рисунке показано распределение нейтронных звезд всех возрастов в плоскости, перпендикулярной плоскости Галактики и проходящей через ее центр. Контуры проведены через  $0.0001 \text{ пк}^{-3}$ . Темп рождения нейтронных звезд был принят пропорциональным квадрату локальной плотности МЗС. Рассматривались только нейтронные звезды, родившиеся на расстояниях от 2 до 16 кпк от центра Галактики. Распределение скоростей отдачи (kick) было взято из работы [27]. Результаты были нормированы на  $5 \cdot 10^8$  нейтронных звезд, родившихся в данной области. На солнечном расстоянии (порядка 8 кпк) вблизи плоскости Галактики плотность составляет примерно  $2.8 \cdot 10^{-4}$  НЗ на кубический парсек. Рисунок из работы [28].

ния  $\text{Log } N - \text{Log } S$  для одиночных нейтронных звезд. В ранних работах (в том числе в статьях автора) было показано, что типичной галактической плотности радиопульсаров недостаточно для описания данных по близким остывающим нейтронным звездам. Раздел 3.3 посвящен решению этой проблемы.

Мы впервые построили детальную популяционную модель для одиночных молодых нейтронных звезд в окрестности Солнца. Существенным моментом, не учитывавшимся в ранних работах, является присутствие Пояса Гулда – локальной (300-500 пк) структуры, сформированной ОВ-ассоциациями.

Результаты расчетов представлены на рисунке 2. Нижняя кривая соответствует расчету без учета вклада Пояса Гулда. Верхняя учитывает вклад Пояса. Также показано наблюдаемое распределение  $\text{Log } N - \text{Log } S$ . Видно, что основной вклад в наблюдаемую популяцию источников вносят именно объекты из Пояса Гулда.

Последний раздел главы III посвящен другому типу молодых компактных объектов в окрестности Солнца – черным дырам. Как и в случае нейтронных звезд, часть одиночных черных дыр формируется в двойных системах, распадающихся после взрыва сверхновой. Если это была

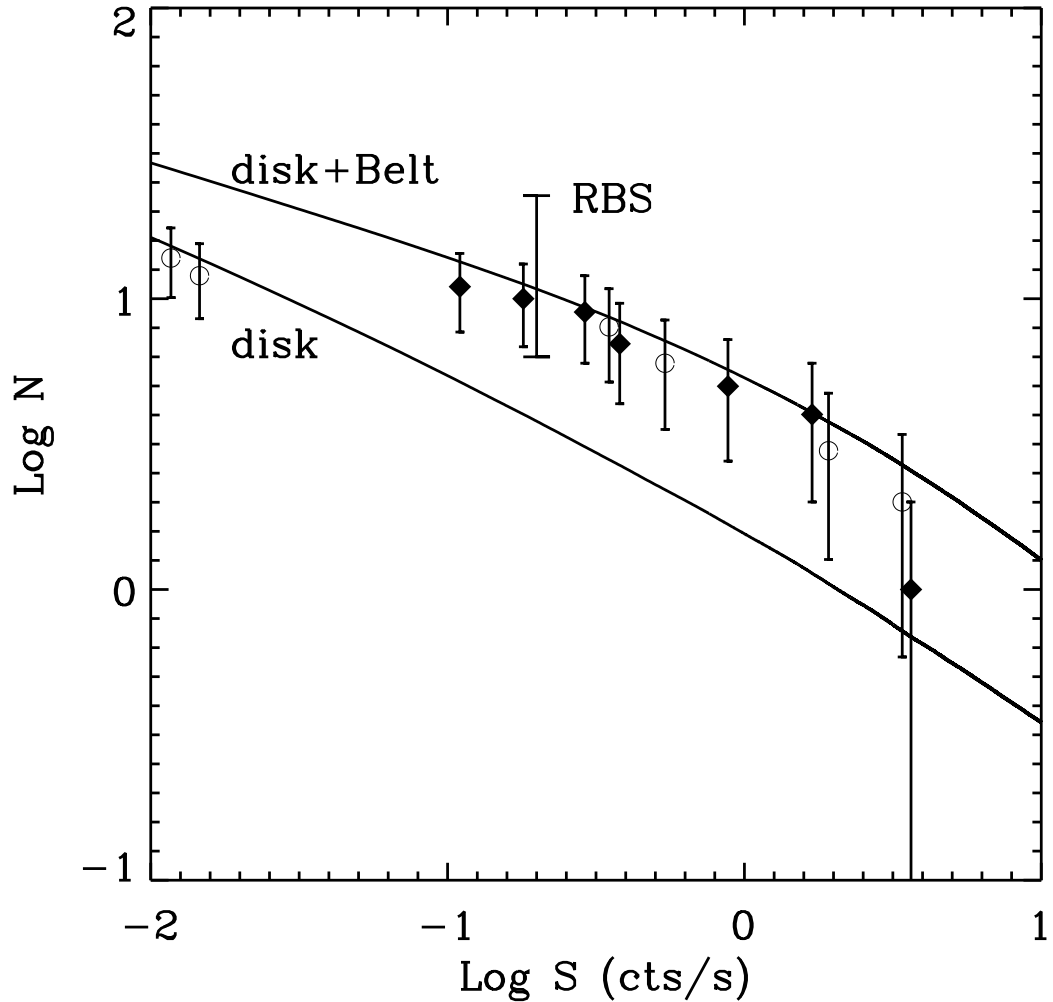


Рис. 2: Распределение  $\text{Log } N - \text{Log } S$  для обзора всего неба с равномерным покрытием. Символами показаны наблюдательные данные. Вид символа отражает тип последней добавленной в распределение нейтронной звезды. Черными ромбами показаны объекты Великолепной семерки. Пустыми кружками – Геминга, “Три мушкетера” (три близких пульсара, для которых измерен тепловой поток от поверхности), PSR 1929+10 и т.н. “Вторая Геминга” (источник 3EG J1835+5918). Также показан предел, соответствующий каталогу ярких источников ROSAT (RBS) [29]. Верхняя кривая: результаты модельных расчетов с учетом Пояса Гулда. Полный темп рождения равен 270 нейтронных звезд за миллион лет в рассматриваемой области (до 3 кпк). Нижняя кривая: результаты расчетов без учета вклада Пояса Гулда. Темп рождения нейтронных звезд – 250 за миллион лет. Рисунок из работы [30].

массивная система, то второй компонент может наблюдаться как т.н. “убегающая звезда”. Зная положение убегающей звезды и ее собственное движение, можно промоделировать возможные траектории движения компактного объекта и определить его местоположение в настоящее время.

Мы используем данные по самым массивным убегающим звездам [31]. Моделируя распад двойной в предположении нулевого кика черной дыры, мы рассчитываем пучок вероятных траекторий. Это позволяет получить область возможной локализации объекта. Поскольку мы имеем дело с близкими источниками, области локализации велики. Однако в двух случаях получены достаточно компактные области локализации близких молодых черных дыр размером несколько десятков квадратных градусов.

В **Главе IV** обсуждается применение популяционного моделирования близких остывающих нейтронных звезд для тестирования теоретических моделей тепловой эволюции компактных объектов. Обсуждается роль различных параметров, в первую очередь – спектра масс. Приводится ряд вычислений с помощью нашего эволюционного сценария для различных вариантов внутреннего строения компактных объектов и для разного набора параметров, описывающих тепловую эволюцию.

Первый раздел главы посвящен использованию популяционных расчетов распределения  $\text{Log } N - \text{Log } S$  для близких остывающих нейтронных звезд как независимого теста тепловой эволюции компактных объектов.

Среди ряда ингредиентов, составляющих популяционную модель, именно кривые остывания являются хуже всего определенными. Соответственно, сравнение результатов расчетов с данными наблюдений может служить тестом этих кривых. Мы обосновываем идею такого теста и приводим два примера его применения.

В разделе 4.1 приведены результаты расчетов для ряда моделей нейтронных звезд. Из 11 моделей, успешно прошедших стандартный тест Возраст-Температура, лишь три удовлетворяют данным по  $\text{Log } N - \text{Log } S$ . Это демонстрирует высокую эффективность нового теста. Нами обсуждается, к каким параметрам тест наиболее чувствителен (в первую очередь, это параметры сверхтекучих щелей).

В разделе 4.2 проведены расчеты для нескольких моделей гибридных звезд. Это компактные объекты, в которых во внутреннем ядре произошел деконфайнмент, и вещество перешло в новую – кварковую – фазу. Мы рассматривали двухцветовую сверхпроводящую фазу (2SC) с добав-

лением дополнительной щели.

Мы моделируем распределения  $\text{Log } N - \text{Log } S$  для гибридных звезд и сравниваем полученные результаты с наблюдениями с целью выяснения вопроса о том, выполняется ли тест для рассмотренных наборов параметров. Кроме этого нами специально сконструированы примеры, когда модель тепловой эволюции проходит тест  $\text{Log } N - \text{Log } S$ , но не удовлетворяет данным на плоскости Возраст-Температура. Т.о., показано, что тесты взаимно дополняют друг друга. Также обсуждаются другие подходы для тестирования кривых остывания компактных объектов. Продемонстрирована необходимость комплексного подхода к тестированию моделей тепловой эволюции компактных объектов.

В разделе 4.3 мы обсуждаем роль спектра масс нейтронных звезд. Кривые остывания сильно зависят от массы объекта. Наблюдения и данные расчетов позволяют исключить спектры масс с большой долей звезд массивнее  $\sim 1.5$  масс Солнца. Соответственно, модель остывания должна объяснять совокупность наблюдательных данных с использованием реалистичных распределений по массам. Мы называем это “ограничением по массе” на модели тепловой эволюции и предлагаем использовать в качестве дополнительного соображения, позволяющего выбраковывать модели тепловой эволюции.

Раздел 4.4 посвящен описанию модернизированной модели популяционного синтеза близких нейтронных звезд. Нами было сделано несколько существенных изменений в модели. В частности, было использовано новое, более детальное, распределение прародителей, а также уточнено трехмерное распределение плотности межзвездной среды. Для прародителей мы отказались от упрощенной модели плоского кольцеобразного Пояса Гулда. Вместо этого вплоть до расстояний 500 парсек от Солнца мы используем данные спутника Гиппаркос о распределении массивных звезд, а далее мы используем данные по ОВ-ассоциациям, считая, что большая часть нейтронных звезд рождается именно в них.

Новые расчеты демонстрируют эффекты от каждого из этих изменений. С помощью новой, более детальной, модели мы провели расчеты, позволяющие не только объяснить наблюдаемое распределение близких остывающих нейтронных звезд на небе (Рис. 3), но и сделать предсказания для поиска более слабых источников (Рис. 4). Кроме этого мы приводим распределения по возрастам и по расстоянию от Солнца для компактных объектов, потенциально наблюдаемых на разных потоках (мы нормируем наши расчеты на данные обзора на спутнике ROSAT).



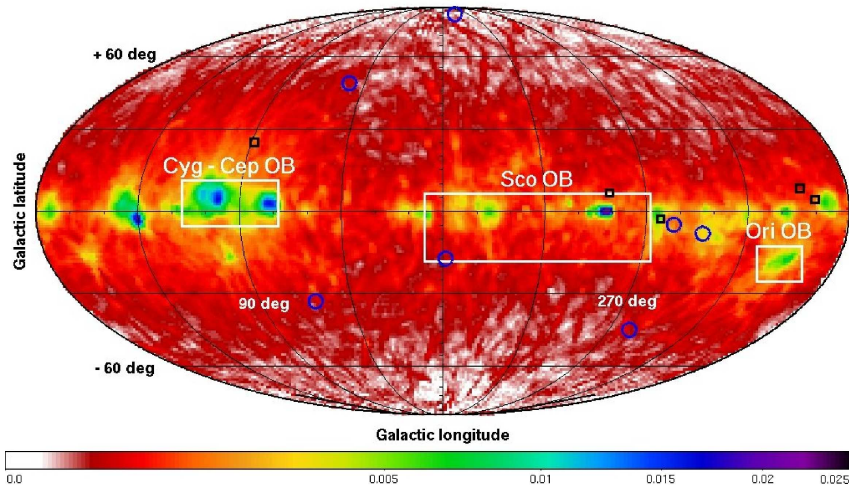


Рис. 3: Ожидаемая плотность наблюдаемых остывающих одиночных нейтронных звезд (число звезд на квадратный градус). Показаны источники с ожидаемым РОСАТовским потоком выше 0.05 отсчетов в секунду. Расчеты производились для нового пространственного распределения прародителей, нового обилия элементов, старого спектра масс и новой аналитической модели МЗС. Показаны наблюдаемые положения “Великолепной семерки” и пульсаров с тепловым излучением. Рисунок из работы [32].

Предсказание состоит в том, что новые (пока неотожествленные) источники типа “Великолепной семерки” будут обнаруживаться за Поясом Гулда в направлении богатых ОБ-ассоциаций. В среднем это будут более молодые и горячие источники, чем уже известные.

В **Главе V** мы рассматриваем взаимосвязи между различными наблюдающимися типами молодых нейтронных звезд. Основное содержание главы связано с комплексным популяционным синтезом, где в рамках единого сценария с учетом реалистичной модели затухания магнитного поля, мы изучаем остывающие нейтронные звезды, радиопульсары и магнитары. Описывается полученное нами начальное распределение по магнитным полям, удовлетворительно описывающее все упомянутые типы источников.

В разделе 5.1 анализируются возможные связи между объектами типа “Великолепной семерки” и RRATs. Получены оценки для темпа рождения источников разных типов. Для объектов типа “Великолепной семерки” темп рождения в Галактике составляет примерно  $0.01 \text{ год}^{-1}$ . Для RRATs темп рождения также близок к этой величине. Это может служить косвенным указанием на эволюционную связь части источников типа RRATs и источников типа “Великолепной семерки”

Основная часть главы (раздел 5.2) посвящена комплексному попу-

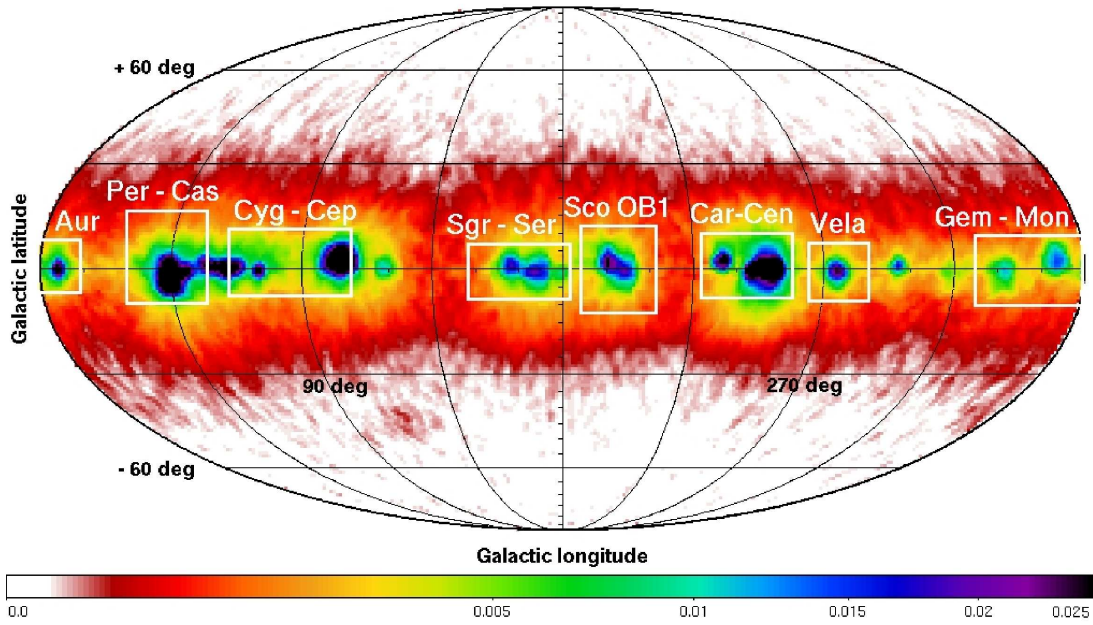


Рис. 4: То же, что на рисунке 3, но для слабых источников с потоками от 0.001 до 0.01 отсчета в секунду. Отмечены области, соответствующие ОБ ассоциациям на расстояниях 1-2 кпк. Рисунок из работы [32].

ляционному синтезу молодых нейтронных звезд. В рамках сценария с затухающим магнитным полем мы исследуем популяцию близких остывающих нейтронных звезд, магнитары и радиопульсары. На рисунке 5 показаны эволюционные треки в нашей модели. Видно, что в использованном сценарии изначально большие магнитные поля быстро затухают, а стандартные ( $10^{12}$  Гс) поля затухают слабо.

Моделируя близкие остывающие нейтронные звезды, мы сравнивали результаты расчетов с наблюдаемым распределением  $\text{Log } N - \text{Log } S$ . Для магнитаров нами строилось распределение  $\text{Log } N - \text{Log } L$ , и кроме данных по известным магнитарам мы использовали пределы на число магнитаров из работы [34]. Для радиопульсаров рассчитывалось несколько распределений ( $P - \dot{P}$ , распределение по периодам, по магнитным полям и т.д.), которые сравнивались с данными наблюдений.

Нам удалось найти единое гладкое (лог-нормальное) распределение по начальным магнитным полям, которое позволяет удовлетворительно описать наблюдаемые свойства всех трех популяций в рамках одного сценария. В этой модели среднее начальное поле составляет  $\sim 10^{13.25}$  Гс, дисперсия  $\sigma = 0.6$ . Нами получено ограничение на долю магнитаров среди нейтронных звезд. Число объектов этого типа не может превышать 10-20 процентов от всей популяции.

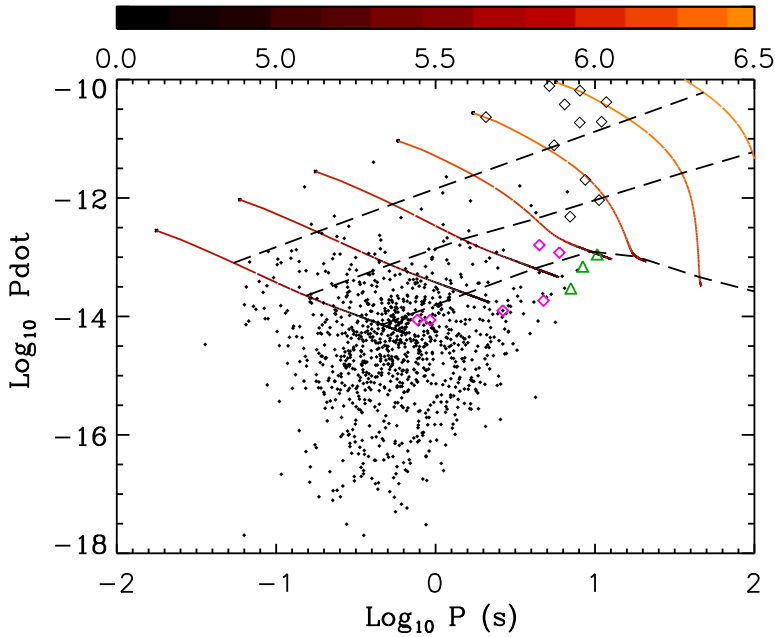


Рис. 5: Распределение  $P - \dot{P}$  для 977 наблюдаемых радиопульсаров, использованных в нашем анализе. Показано несколько эволюционных треков для разных начальных магнитных полей. Для сравнения также показаны МПГ и АРП (пустые ромбы с тонкой границей), три из “Великолепной семерки” (треугольники), RRATs (пустые ромбы с более жирной границей). Штриховые линии соответствуют возрастам  $10^4$ ,  $10^5$  и  $10^6$  лет. Рисунок из работы [33].

**Глава VI** посвящена магнитарам. Во-первых, в разделе 6.1, рассмотрены данные по внегалактическим источникам мягких повторяющихся гамма-всплесков, демонстрирующих гигантские и гипер-вспышки. Для гипервспышек по анализу данных о коротких всплесках в направлении скопления в Деве получена оценка темпа  $\sim 1/1000$  лет $^{-1}$  на галактику. Для гигантских вспышек по анализу данных о близких галактиках с сильным звездообразованием получены оценки темпа  $1/10 - 1/30$  лет $^{-1}$  на галактику.

Во-вторых, в разделе 6.2, рассмотрены различные каналы образования быстровращающихся звезд в тесных двойных системах, которые могут быть прародителями магнитаров. В стандартной модели формирования магнитара требуется, чтобы коллапсирующее ядро быстро вращалось, т.к. магнитное поле будет усилено динамо-механизмом. В стандартных моделях звездной эволюции одиночные массивные звезды эффективно теряют угловой момент. Поэтому разумно предположить, что прародители магнитаров были раскручены в ходе эволюции в тесных

двойных системах. Однако нужно принять во внимание, что все известные кандидаты в магнитары (а их уже около двух десятков) являются одиночными объектами. Т.е., надо не только получить достаточный темп формирования нейтронных звезд из звезд, которые были раскручены аккрецией или синхронизацией в двойных системах, но и получить высокую долю одиночности у сформировавшихся магнитаров.

Нами показано, что при разумных дополнительных предположениях магнитары могут иметь происхождение в тесных двойных системах, где их прародители были раскручены синхронизацией или аккрецией. Мы рассматриваем несколько эволюционных сценариев. В некоторых из них для объяснения высокой доли одиночных магнитаров необходимо сделать дополнительные предположения об особенностях кика для быстро-вращающихся нейтронных звезд.

Затем, в разделе 6.3, рассмотрена эволюция темпа вспышек магнитаров и обсуждается гипотеза о связи этой эволюции с темпом глитчей.

Наконец, в завершение главы, мы описываем гипотезу, объясняющую внегалактический миллисекундный радиовсплеск, связывая его с гипервспышкой магнитара. Оценки темпа гипервспышек хорошо согласуются с оценками вспышек mERB. Временной масштаб всплеска и отсутствие одновременных всплесков в других диапазонах, также как и отсутствие хозяйской галактики до 18 звездной величины хорошо укладываются в рамки предложенной гипотезы.

В **Главе VII** после описания каналов эволюции двойных систем, приводящих к возникновению очень массивных ( $\gtrsim 1.8 M_{\odot}$ ) нейтронных звезд и расчета их спектра масс и темпа образования, мы переходим к рассмотрению ряда дискуссионных вопросов. Мы обсуждаем одиночные аккрецирующие нейтронные звезды, очень маломассивные ( $0.5 \gtrsim M \gtrsim 1 M_{\odot}$ ) нейтронные звезды, дихотомию свойств кварковых и адронных компактных объектов, транзиентные и экзотические источники, а также связь наблюдающихся квазипериодических вариаций периодов одиночных нейтронных звезд с волнами Ткаченко. Глава завершается обсуждением возможных корреляций параметров нейтронных звезд, обычно неучитываемых в популяционных моделях.

Расчеты показывают, что нейтронные звезды крайне редко могут рождаться с массами более 1.8 солнечных. Однако наблюдения указывают на то, что в двойных системах есть объекты с большими массами. Т.о., можно заключить, что увеличение массы идет за счет аккреции. В разделе 7.1 мы используем комплекс программ по моделированию эво-

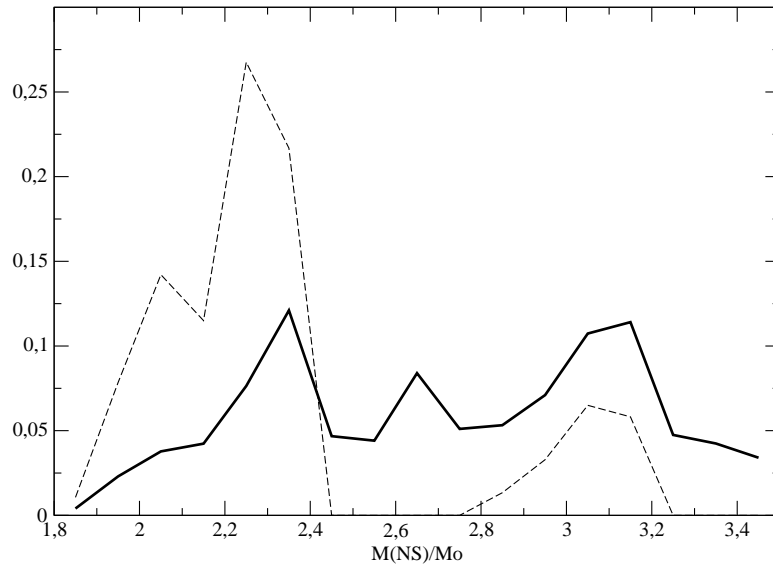


Рис. 6: Распределение барионных масс нейтронных звезд для тяжелых объектов. Показаны только объекты массивнее 1.8 масс Солнца. Верхний предел массы условен, выше примерно 2-2.5 солнечных масс можно ожидать, что объекты являются черными дырами. Штриховая линия соответствует сценарию с нулевым киком. Сплошная — ненулевому кикку. Левый пик для обоих распределений соответствует объектам, прошедшим один эпизод аккреции. Правые пики образованы объектами, имевшими также в качестве донора белые карлики. Распределения нормированы на единицу (площадь под каждой кривой равна единице). Рисунок из работы [35].

люции двойных систем — “Машина сценариев” — для построения спектра барионных масс и определения других параметров массивных нейтронных звезд. Спектр барионных масс показан на рисунке 6.

Раздел 7.2 посвящен одиночным аккрецирующим нейтронным звездам. Эти объекты до сих пор не обнаружены, но во-первых, нет больших сомнений, что рано или поздно низкоскоростные нейтронные звезды с не слишком слабым начальным магнитным полем выходят на стадию аккреции, а во-вторых, открытие таких источников чрезвычайно важно для астрофизики нейтронных звезд.

После описания базовых формул и процессов, определяющих свойства одиночных аккрецирующих нейтронных звезд, мы приводим результаты расчетов в рамках стандартной консервативной картины (аккреция Бонди, постоянное магнитное поле). Одиночные аккректоры имеют светимости  $\sim 10^{29} - 10^{30}$  эрг  $s^{-1}$  и температуры порядка сотен эВ. Показано, что в рамках этой картины на потоках  $10^{-13} - 10^{-14}$  эрг  $s^{-1}$  одиночные аккре-

торы становятся более многочисленными, чем остывающие нейтронные звезды.

В разделе 7.3 рассматриваются различные экзотические объекты и процессы. Во-первых, обсуждается поиск сигнала от конвертации аксионов в радиоизлучение (процесс Примакова) в магнитосферах нейтронных звезд. Показано, что наилучшими кандидатами для поиска такого сигнала являются объекты “Великолепной семерки”, и сделаны оценки параметров сигнала для разных масс аксионов.

Затем обсуждаются очень маломассивные нейтронные звезды (менее 1 солнечной массы), которые могут формироваться в результате фрагментации быстровращающихся протонейтронных звезд. Показано, что такие объекты обладают пекулярными свойствами (высокая скорость, ориентация скорости перпендикулярно оси вращения, высокие температуры и светимости для данного возраста).

В параграфе 7.3.3 обсуждаются кварковые звезды и возможная дихотомия свойств компактных объектов, возникающая из-за сосуществования двух существенно различных типов компактных объектов (кварковые и адронные звезды).

Параграф 7.3.4 посвящен транзиентным и необычным объектам. Во-первых, рассматриваются модели, объясняющие свойства компактного источника в остатке сверхновой RCW103. В частности, предлагается модель, аналогичная т.н. “магнеторам”, когда звезда-донор в двойной системе оказывается внутри магнитосферы компактного объекта. Такие системы известны в случае белых карликов, однако могут возникать и в системах с магнитарами. В таком случае можно объяснить и наблюдаемый у данного источника период 6.7 часов, и колебания рентгеновской светимости.

Затем рассматривается ряд моделей транзиентного радиоисточника GCRT J1745-3009. Это модель одиночного магнитара на стадии транзиентного пропеллера, суперэжектор в двойной системе, а также модели пульсирующей и “уплывающей” каверны вокруг нейтронной звезды на стадии эжектора в двойной системе.

В заключении параграфа 7.3.4 рассмотрена прецессия нейтронных звезд и волны Ткаченко в их недрах. Для многих нейтронных звезд квазипериодические колебания, наблюдаемые в тайминге, совпадают по длительности с ожидаемыми периодами для волн Ткаченко. Предлагается модель, в которой резонанс между волной Ткаченко и прецессией приводит к прецессионному движению даже при наличии не слишком

эффективного подавления прецессии.

Последний параграф главы – 7.3.5 – посвящен обсуждению различных корреляций между ключевыми параметрами нейтронных звезд, которые пока не учитываются (или используются крайне редко) при популяционном синтезе. Корреляции возникают или из-за особенностей механизма формирования (например, в случае магнитаров), или из-за особенностей образовавшихся объектов (например, в случае кварковых звезд), или из-за процессов, следующих за взрывом сверхновой (возвратная аккреция – fall-back).

В **Заключении** кратко суммированы представленные в диссертации исследования и приведены выводы, выносящиеся на защиту, а также выражены благодарности коллегам.

## Список литературы

- [1] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, Hobbs M, The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue, *Astron. J.* **129** 1993 (2005)
- [2] Бескин В С, Радиопульсары *Успехи Физ. Наук* **1869** 1169 (1999)
- [3] Бескин В С, Магнитогидродинамические модели астрофизических струйных выбросов, *Успехи Физ. Наук* **180** 1241 (2010)
- [4] Mereghetti S, X-ray emission from isolated neutron stars, in: *High-Energy Emission from Pulsars and their Systems* (Astrophysics and Space Science Proc.) (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011) p. 345
- [5] Treves A, Popov S B, Colpi M, Prokhorov M E, Turolla R, The Magnificent Seven: Close-by Cooling Neutron Stars?, in: *Proc. of "X-ray astronomy 2000"* (Eds. R Giacconi, L Stella, S Serio, ASP Conf. Series vol. 234) (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2001) p.225
- [6] Kaplan D L, Nearby, Thermally Emitting Neutron Stars, in: *"40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More"* (ASP Conf. Series Vol. 983, Eds C Bassa, Z Wang, A Cumming, V M Kaspi) (2008) p. 331
- [7] Halpern J P, Gotthelf E V, Spin-Down Measurement of PSR J1852+0040 in Kesteven 79: Central Compact Objects as Anti-Magnetars, *Astrophys. J.* **709** 436 (2010)
- [8] Mereghetti S, The strongest cosmic magnets: soft gamma-ray repeaters and anomalous X-ray pulsars, *Astron. Astrophys. Rev.* **15** 225 (2008)
- [9] McLaughlin M A et al., Transient radio bursts from rotating neutron stars, *Nature* **439** 817 (2006)
- [10] Popov S B, Turolla R, Isolated neutron stars: An astrophysical perspective, in: *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop On Superdense QCD Matter and Compact Stars* (NATO Science Series. II. Mathematics, Physics and Chemistry. Eds. D. Blaschke and D. Sedrakian. Vol. 197) (2006) p. 53
- [11] Popov S B, The zoo of neutron stars, *Phys. Part. Nuc.* **39** 1136 (2008)
- [12] Predehl P et al., eROSITA on SRG, in: *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray* (Eds. M Arnaud, S S Murray, T Takahashi) (Proc. of the SPIE vol. 7732, 2010) p. 77320U



- [13] Cappelluti N et al., eROSITA on SRG: a X-ray all-sky survey mission, *arXiv: 1004.5219* (2010)
- [14] Pavlinsky M et al., Spectrum-Roentgen-Gamma astrophysical mission, in: *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray* (Eds. M J L Turner, K A Flannagan) (Proc. of the SPIE vol. 7011, 2008) p. 70110H
- [15] Arefiev V et al., Hard x-ray concentrator experiment for Spectrum-X-Gamma mission, in: *Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray* (Eds. M J L Turner, G Hasinger) (Proc. of the SPIE vol. 6266, 2006) p. 62663L
- [16] Попов С Б, Прохоров М Е, Популяционный синтез в астрофизике *Успехи Физ. Наук* **177** 1179 (2007)
- [17] Потехин А Ю, Физика нейтронных звезд, *Успехи Физ. Наук* **180** 1279 (2010)
- [18] Lattimer J, Prakash M, What a Two Solar Mass Neutron Star Really Means *arXiv: 1012.3208* (2010)
- [19] Яковлев Д Г, Левенфиш К П, Шибанов Ю А, Остывание нейтронных звезд и сверхтекучесть в их недрах, *Успехи Физ. Наук* **169** 825 (1999)
- [20] Yakovlev D G, Gnedin O Y, Kaminker A D, Potekhin A Y, Cooling of superfluid neutron stars in: *WE-Heraeus seminar on neutron stars, pulsars, and supernova remnants* (MPE Report 278, Eds W Becker, H Lesch, J Trumper) (Garching bei Munchen: Max-Planck-Institut fur extraterrestrische Physik, 2002) p.287
- [21] Kaminker A D, Yakovlev D G, Gnedin O Yu, Three types of cooling superfluid neutron stars: theory and observations *Astron. Astrophys.* **383** 1076 (2002)
- [22] Popov S B, Grigorian H, Turolla R, Blaschke D, Population synthesis as a probe of neutron star thermal evolution, *Astron. Astrophys.* **448** 327 (2006)
- [23] Colpi M, Geppert U, Page D, Period clustering of the anomalous X-ray pulsars and magnetic field decay in magnetars *Astrophys. J.* **529** L29 (2000)

- [24] Willems B, Kolb U, On the detection of pre-low-mass X-ray binaries, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **343** 949 (2003)
- [25] Ng C Y, Romani R W, Birth Kick Distributions and the Spin-Kick Correlation of Young Pulsars, *Astrophys. J.* **660** 1357 (2007)
- [26] Rankin J, Further Evidence for Alignment of the Rotation and Velocity Vectors in Pulsars, *Astrophys. J.* **664** 443 (2007)
- [27] Arzoumanian Z, Chernoff D F, Cordes J M, The Velocity Distribution of Isolated Radio Pulsars *Astrophys. J.* **568** 289 (2002)
- [28] Popov S B, Colpi M, Prokhorov M E, Treves A, Turolla R, Young close-by neutron stars: the Gould Belt vs. the Galactic disc, *Astrophys. Space Sci.* **299** 117 (2005)
- [29] Schwobe A D, Hasinger G, Schwarz R, Haberl F, Schmidt M, The isolated neutron star candidate RBS1223 (1RXS J130848.6+212708), *Astron. Astrophys.* **341** L51 (1999)
- [30] Popov S B, Prokhorov M E, Colpi M, Treves A, Turolla R, Young isolated neutron stars from the Gould Belt, *Astron. Astrophys.* **406** 111 (2003)
- [31] Hoogerwerf R, de Bruijne J H J, de Zeeuw P T, On the origin of the O and B-type stars with high velocities. II. Runaway stars and pulsars ejected from the nearby young stellar groups, *Astron. Astrophys.* **365** 49 (2001)
- [32] Posselt B, Popov S B, Haberl F, Trümper J, Turolla R, Neuhäuser R, Boldin P A, The needle in the haystack: where to look for more isolated cooling neutron stars (Corrigendum), *Astron. Astrophys.* **512** id.C2 (2010)
- [33] Popov S B, Pons J A, Miralles J A, Boldin P, Posselt B, Population synthesis studies of isolated neutron stars with magnetic field decay *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **401** 2675 (2010)
- [34] Munro M P, Gaensler B M, Nechita A, Miller J M, Slane P O, A Search for New Galactic Magnetars in Archival Chandra and XMM-Newton Observations *Astrophys. J.* **680** 639 (2008)
- [35] Popov S B, Prokhorov M E, Formation of massive skyrmion stars, *Astron. Astrophys.* **434** 649 (2005)