К 250–летию

Московского государственного

университета им. М. В. Ломоносова

ТРУДЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО АСТРОНОМИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА им. П. К. ШТЕРНБЕРГА

ISSN 0371-6791

Том LXXII

Серия научная

С. Б. Попов, М. Е. Прохоров

Астрофизика одиночных нейтронных звезд: радиотихие нейтронные звезды и магнитары

Москва
2003

УДК 524.35

Труды ГАИШ, том 72, серия научная. М. 2003 г. 84 с.

С. Б. Попов. М. Е. Прохоров. Астрофизика одиночных нейтронных звезд: радиотихие нейтронные звезды и магнитары.

В этой работе дается обзор современного состояния теории и наблюдений одиночных нейтронных звезд. В основном рассматриваются объекты, не проявляющие обычной пульсарной активности в радиодиапазоне. Мы отнесли к этому классу слабые рентгеновские источники, являющиеся кандидатами в одиночные нейтронные звезды, в диске Галактики и в шаровых скоплениях; компактные рентгеновские источники в остатках сверхновых; аномальные рентгеновские пульсары; источники мягких повторяющихся гамма-всплесков; объекты типа Геминги. Также мы рассматриваем родственные объекты (одиночные черные дыры и т.н. «странные», или кварковые, звезды) и кратко описываем современное состояние астрофизики сверхновых и связанные с этим проблемы.

Нами описываются основные процессы, связанные с эволюцией одиночных нейтронных звезд: охлаждение, затухание магнитного поля, эволюция периодов вращения, магнитосферные процессы, аккреция. Рассматривается популяционный синтез одиночных нейтронных звезд разных типов, кратко описываются «единые теории», объясняющие некоторые из перечисленных выше типов источников как последовательную эволюцию одиночных нейтронных звезд.

Приводится обширный список литературы по всем затронутым в обзоре вопросам. В связи с этим обзор может использоваться как библиографический справочник специалистами, работающими в области астрофизики нейтронных звезд, а также студентами и аспирантами соответствующих специальностей.

Astrophysics of isolated neutron stars: radioquiet neutron stars and magnetars

Sergei B. Popov; *polar@sai.msu.ru; popov@pd.infn.it*
Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia; University of Padova, Italy
Mikhail E. Prokhorov; *mike@sai.msu.ru*
Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

Here we review present state of theoretical and observational exploration of isolated neutron stars. We mainly discuss objects which do not show usual radiopulsar activity. We include into our review dim X-ray sources in the Galactic disk and in globular clusters; compact X-ray sources in supernova remnants; anomalous X-ray pulsars; soft gamma repeaters; Geminga and geminga-like objects. Also we briefly discuss related types of objects: isolated black holes, quark (or so-called strange) stars and supernovae.

We review basic physical processes connected with evolution of isolated neutron stars: cooling; magnetic field decay; period evolution; magnetospheric processes, accretion. We discuss evolution and population synthesis calculations of isolated neutron stars of different types.

We present a large set of references for all problems mentioned in the review.

Рецензенты:

д.ф.-м.н. В.С. Бескин (ФИАН)
д.ф.-м.н. С.И. Блинников (ИТЭФ, ГАИШ МГУ)

Редактор: Л.П. Грибко

Печатается по решению
редакционно-издательского совета ГАИШ.

ISSN 0371-6791

Содержание

1 Введение

Наблюдения нейтронных звезд (НЗ) имеют уже более чем 35-летнюю историю (Хьюиш, Белл и др. 1968). Основная доля известных НЗ — радиопульсары (см. данные о недавних наблюдениях в Д'Амико и др. 1999, Лоример и др. 2000, Моррис и др. 2002, а также каталог в Тейлор и др. 1993 и на сайте **http://wwwatnf.atnf.csiro.au/research/pulsar/**). В течение первых лет изучения НЗ установилась картина эволюции этих объектов, в которой роль своеобразного стандарта выполнял пульсар в Крабовидной туманности. Это НЗ, имеющая сейчас период вращения около 0.033 секунды, который увеличивается на $\dot{p} \sim 4.16 \cdot 10^{-13}$ с/с. Закон торможения НЗ грубо соответствует магнито-дипольной формуле. По этим свойствам магнитное поле НЗ оценивается $\sim 5.2 \cdot 10^{12}$ Гс (в обзоре мы, как правило, будем говорить о магнитном поле на поверхности НЗ). Начальный период пульсара был порядка 0.020 секунды. Возраст НЗ — около 1000 лет (сверхновая наблюдалась в 1054 году).

Новые данные наблюдений, в первую очередь полученные в рентгеновском диапазоне, существенно дополняют эту картину. Уже в середине 90-х годов (см. Каравео и др. 1996) начало формироваться мнение о радиотихих НЗ как о «новой астрономической реальности». Теперь пульсар в Крабовидной туманности потерял свою роль полномочного представителя всей популяции НЗ, устоялся термин *радиотихие* одиночные НЗ. Об этом и пойдет речь в данном обзоре.

Наблюдения в рентгеновском диапазоне, в первую очередь на спутнике ROSAT (см. например Мотч 2001), показали наличие популяции источников (а возможно и нескольких различных популяций, см. ниже), отождествляемых с одиночными радиотихими НЗ. Получены новые результаты со спутников Чандра и ХММ-Ньютон по спектроскопии одиночных НЗ (см. Хаберл 2003). Есть основания предполагать, что часть из этих объектов генетически связана с т.н. аномальными рентгеновскими пульсарами и источниками повторяющихся гамма-всплесков. Все это делает одиночные НЗ исключительно интересными объектами исследований.

Здесь мы исключаем из рассмотрения объекты, являющиеся обычными радиопульсарами (см. общий обзор в статье Бескина 1999, а обзор рентгеновских наблюдений радиопульсаров см. в работах Бекера 2000 и Поссенти и др. 2002).

Мы обсудим шесть типов источников, в которых с большей или меньшей степенью достоверности находятся одиночные НЗ: слабые рентгеновские источники в диске Галактики, аномальные рентгеновские пульсары (АРП), источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (МПГ), компактные рентгеновские источники в остатках сверхновых, слабые рентгеновские источники в шаровых скоплениях, объекты типа Геминги. Разумеется, некоторые источники могут входить сразу в две популяции (например, АРП в остатке сверхновой).

Мы описываем физические процессы, непосредственно связанные с эволюцией и природой одиночных НЗ: эволюция периодов НЗ, аккреция на одиночные НЗ, затухание магнитного поля НЗ, охлаждение НЗ, атмосферы НЗ и др. Также в данном обзоре мы кратко обсуждаем различные гипотезы, объясняющие происхождение и свойства одиночных НЗ, не являющихся классическими радиопульсарами.

Свежие обзоры теоретических моделей различных физических процессов, связанных с НЗ (особенно с внутренним строением НЗ), читатель может найти в материалах многочисленных недавних конференций, например, Тренто-2000 («Физика недр нейтронных звезд»), Бонн-1999 (Материалы колл. МАС 177), Токио-1997 («Нейтронные звезды и пульсары»), Эльба-1998 («Взаимосвязь между нейтронными звездами и остатками сверхновых»), книгах: Шапиро и Тьюколски (1985), Липунов (1987), Майкель (1991), Саакян (1995), а также в обзорах: Яковлев и др. (1999), Ланглуа (2000), Клужняк (2000), Яковлев, и др. (2001), Картер (2001).

Мы приводим обширную библиографию по всем упомянутым в тексте проблемам. Т.о., обзор может быть полезен как специалистам, работающим в области астрофизики нейтронных звезд, так и специалистам, работающим в смежных областях (в том числе студентам и аспирантам соответствующих специальностей), в качестве библиографического справочника по одиночным радиотихим нейтронным звездам. Обзор может использоваться в качестве дополнительной литературы для студентов при изучении спецкурсов по астрофизике нейтронных звезд, астрофизике высоких энергий, теоретической астрофизике.

Обновляемая версия обзора доступна на сайтах
http://xray.sai.msu.ru/~polar/ns_review/ (в формате PostScript) и
http://www.astronet.ru/db/msg/1177217 (в формате HTML). См. также astro-ph/0205298.

2 Актуальные проблемы астрофизики одиночных нейтронных звезд

Основной задачей изучения одиночных НЗ является *определение распределений начальных параметров и законов эволюции этих объектов*. Более глубокие исследования должны прояснить причины возникновения соответствующих распределений и такого хода эволюции.

Сегодня можно сформулировать следующие актуальные проблемы и направления исследований, существующие в этой области:

I. Наблюдения НЗ

- Наблюдения в рентгеновском диапазоне: наблюдения одиночных НЗ всех типов, поиск спектральных особенностей, исследования остатков сверхновых (поиск компактных объектов);
- Наблюдения в радиодиапазоне: поиск радиоизлучения от одиночных НЗ всех типов;
- Наблюдения в ИК-диапазоне: поиск слабых компаньонов и/или остаточных аккреционных дисков (аномальные рентгеновские пульсары, источники мягких повторяющихся гамма-всплесков);
- Наблюдения в оптическом диапазоне: регистрация теплового излучения НЗ; поиск слабых компаньонов и/или остаточных аккреционных дисков;

II. Физика НЗ

- Расчеты тепловой эволюции НЗ;
- Расчеты спектров НЗ с учетом атмосфер различного состава;
- Процессы в магнитосферах: электродинамика магнитосфер, перенос излучения;
- Расчеты затухания магнитного поля НЗ;
- Аккреция на одиночные НЗ из межзвездной среды и из околозвездных остаточных дисков: темп аккреции, перенос углового момента и т.д.;

- Расчеты эволюции периодов вращения НЗ и рассмотрение изменения взаимной ориентации магнитной и вращательной осей;

- Популяционный синтез НЗ, попытки построения «единых теорий» их образования и эволюции;

III. Другие близкие области исследований

- Механизмы взрывов сверхновых и возвратная аккреция (fall-back); определение начальных параметров НЗ;

- Расчеты микролинзирования на одиночных НЗ;

- Одиночные черные дыры: аккреция, возможные наблюдательные проявления;

- Странные звезды.

Среди наблюдательных задач (практически во всех диапазонах) можно особо выделить исследования переменности (особенно определение и мониторинг производной периода вращения), независимое определение магнитного поля и возраста (без использования данных о замедлении), исследования ассоциации НЗ с остатками сверхновых и поиск новых кандидатов. Большой интерес представляют также наблюдения в самых жестких диапазонах, т.к. относительно близкие радиопульсары, чья диаграмма излучения не направлена на Землю, могут наблюдаться как гамма-источники (Реймер и др. 2001, Гренье 2000, Гехрелс и др. 2000, Гренье и Перро 2001, Каравео 2002). Отметим также, что для многих из известных источников нет точных определений расстояний и, разумеется, скоростей (об определении параллаксов радиопульсаров см., например, Тоскано и др. 1999, Чаттерье и др. 2001, Брискен и др. 2002 и ссылки там).

Ниже мы рассматриваем эти задачи подробнее.

2.1 Наблюдения НЗ

Наиболее обширные и длительные наблюдения НЗ — наблюдения радиопульсаров в радиодиапазоне — не входят в данный обзор. Из прочих данных самыми подробными являются рентгеновские и гамма-наблюдения (см. обзоры в Бекер, Павлов 2002 и Бекер, Ашенбах 2002). В радио-, ИК- и оптическом диапазонах о НЗ, рассматриваемых в данном обзоре, получено заметно меньше сведений (хотя для решения некоторых проблем именно они могут иметь решающее значение). О некоторых источниках (например, о RX J0720.4-3125 см. Каплан и др. 2003б) есть информация от радио до рентгена!

2.1.1 Наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах

Для одиночных радиотихих НЗ наиболее важным оказался рентгеновский диапазон. В этом пункте мы рассмотрим близкие радиотихие НЗ, слабые рентгеновские источники в шаровых скоплениях, источники в остатках сверхновых, аномальные рентгеновские пульсары и источники мягких повторяющихся гамма-всплесков.

Спутником ROSAT открыто уже семь радиотихих нейтронных звезд (т.н. «великолепная семерка»). Еще один кандидат (MS 0317.7-6647) был открыт ранее на обсерватории «Эйнштейн», в последнее время стало очевидным, что он является внегалактическим объектом. Обсуждались и другие кандидаты (см., например, Бхатт

Таблица 1. Слабые рентгеновские источники в диске Галактики (из работы Тревес и др. 2000 с дополнениями)

Название источника	Поток[a)] ROSAT [отсч./с]	Эфф. темп. [эВ][b]	N_H [10^{20} см^2]	$\log f_X/f_V$ [c)]	Период (доля пульс. изл.)[с] (%)
RX J1856.5-3754	3.64	61	2	4.4	— (<4.5%)
RX J0720.4-3125	1.69	79	1.3	4.6	8.39 (9%)
RBS1223 (RX J1308.6+2127)	0.29	91	2.4	5.0	10.31 (20 ± 2%)
RBS1556 (RX J1605.3+3249)	0.88	92	1.1	4.4	—
RX J0806.4-4123	0.38	78	2.5	> 3.4	11.37 (6.2%)
RX J0420.0-5022	0.11	57	1.7	> 3.3	22.69 (34 ± 14%)
RBS1774 (RX J2143+0654)	0.18	90	4.6	> 3	—

[a)] Отсчеты для спутника ROSAT (также и в табл. 4). Доля пульсирующего излучения взята из работы (Хаберл, Завлин 2002).

[b)] Чернотельная температура.

[c)] f_X и f_V — потоки в рентгеновском (ROSAT) и оптическом диапазонах, соответственно.

1990). Это относительно яркие объекты ($>$ 0.1 отсчета ROSAT в секунду). Два (или, возможно, четыре, см. ниже) источника зарегистрированы в оптическом диапазоне. Для остальных существуют только верхние пределы (см. табл. 1). По отношению рентгеновского и оптического потоков можно считать доказанным, что эти источники являются одиночными нейтронными звездами.

В начале 90-х годов ожидалось, что спутник ROSAT увидит большое количество одиночных старых аккрецирующих НЗ (Тревес и Колпи 1991, Блаез и Раджагопал 1991, Блаез и Мадау 1993, Колпи и др. 1993). Последующие наблюдения на этом спутнике показали наличие лишь небольшой популяции слабых рентгеновских источников в диске Галактики, которые по-видимому являются одиночными НЗ (охлаждающимися или аккрецирующими) (см. Хаберл и др. 1998, Тревес и др. 2000, Нойхойзер, Трюмпер 1999; первый объект открыт Вольтером и др. 1996, последний кандидат описан в работе Зампьери и др. 2001). Основным аргументом в пользу такой интерпретации является аномально высокое отношение рентгеновской светимости к оптической ($\log f_X/f_V > 3$). Отсутствие радиоизлучения, а также тепловой спектр свидетельствуют о том, что объекты не являются классическими радиопульсарами.

У четырех объектов «великолепной семерки» наблюдаются пульсации рентгеновского потока с периодами порядка 10–20 секунд. Такие периоды типичны для АРП и МПГ. С другой стороны, длительные (450 000 сек) наблюдения наиболее изученного источника RX J1856.5-3754 (Рэнсом и др. 2001) показали отсутствие пульсаций вплоть до нескольких процентов.

Для двух источников измерены производные периода. В работе Дзане и др. (2002) получено значение $\dot{p} \sim 10^{-14}$ для источника RX J0720.4-3125 (см. также Каплан и др. 2002в). Хамбарян и др. (2001) приводят значение $(0.7-2.0)\cdot 10^{-11}$ для источника RBS1223 (этот результат нуждается в подтверждении, Хаберл 2002).

У RBS1223 Хаберл и др. (2003) обнаружили широкую спектральную деталь в поглощении, которую в принципе можно интерпретировать как протонную циклотронную линию. Если эта гипотеза верна, то поле соответствует $(2-6)10^{13}$ Гс.

Пфал и Раппопорт (2001) предположили, что некоторые из слабых источников в шаровых скоплениях могут быть старыми аккрецирующими одиночными НЗ. В настоящее время спутником Чандра открыто множество подобных источников, и их количество стремительно продолжает расти (см. также Вербунт 2001). Для них характерны светимости порядка $10^{31}-10^{34}$ эрг с$^{-1}$. Эти объекты концентрируются к центрам скоплений. Источники характеризуются относительно мягкими спектрами $kT \sim 0.1$–0.5 кэВ.

Популяционный синтез (см. ниже) показал, что гипотеза Пфала и Раппапорта не противоречит стандартной картине эволюции НЗ. Таким образом необходимы дальнейшие наблюдения (в первую очередь исследования переменности на разных масштабах) для определения природы этих объектов.

Для понимания ключевого вопроса о начальных параметрах НЗ крайне важным классом объектов являются источники в остатках сверхновых (обзор по механизмам вспышек см. в Янка и др. 2001). В последнее время открыто несколько компактных источников в остатках сверхновых (см. Павлов и др. 2001а). По всей видимости, это молодые НЗ, многие из которых не являются радиопульсарами (см. табл. 2). Количество радиотихих НЗ в остатках сверхновых уже сравнимо с количеством радиопульсаров в остатках. По этой теме существует обширная библиография (см. табл. 2).

Можно выделить три основные гипотезы, объясняющие появление компактных рентгеновских источников в остатках сверхновых: тепловое излучение поверхности молодой горячей НЗ (Павлов и др. 2001а), нетепловое излучение молодого пульсара (в этом случае следует ожидать если не регистрации самого пульсара, то хотя бы возникновения плериона, см. Лоример и др. 1998), возвратная аккреция на НЗ (или черную дыру) вещества остатка сверхновой (fall-back) (Шевалье 1989, Попов 1998).

Важными наблюдательными фактами для интерпретации природы источников являются наличие периодов и переменность рентгеновского потока. Периоды АРП и МПГ лежат в диапазоне 5–12 секунд (см. табл. 2). Другие источники обладают короткими периодами (например, p=0.325 с и производная периода $\dot{p} \sim 7.1\cdot 10^{-12}$ у источника в Kes 75 (Мерегетти и др. 2002а), p=0.424 с у источника в G296.5+10, для этого объекта также измерена производная периода $\dot{p} \sim (0.7-3)\cdot 10^{-14}$ (Павлов и др. 2002)). Источники в RCW 103 и G29.6+0.1 показывают существенную переменность рентгеновского излучения на больших временах, поток при этом может изменяться на порядок.

Рассмотрим трудности в интерпретации радиотихих источников на конкретном примере. Остаток сверхновой Cas A является хорошо известным объектом, но природа компактного рентгеновского источника в его центре в настоящее время неясна.

Расстояние до остатка порядка 3.4 кпк. Его радиус около 2 пк. Возраст остатка оценивается примерно в триста лет (есть указания, что вспышка сверхновой наблюдалась Флемстидом в 1680 г.). Это самый молодой из известных остатков сверхновых в нашей Галактике.

Наблюдения на спутнике Чандра дали много новых данных. Собственно компактный источник был открыт во время первых наблюдений на этом спутнике в

Таблица 2. Компактные рентгеновские источники в остатках сверхновых (из работ Чакрабарти и др. 2000, Хелфанд 1998 с дополнениями)

Название источника и остатка	Тип остатка	Период, с	Ссылки
CXO J2323+5848(Cas A)	Оболоч.	—	Чакрабарти и др. (2000)
1E 1613-5055 (RCW 103)	Оболоч.	—	Каспи и др. (1998)
1E 0820-4300 (Pup A)	Оболоч.	—	Петре и др. (1996)
1E 1207.4-5209 (G296.5+10)	Оболоч.	0.424	Мерегетти и др. (1996)
			Павлов и др. (2000)
AX J0851.9-4617.4 (G266.2-1.2)	Оболоч.	—	Слейн и др. (2001)
			Мерегетти (2000)
1E 1438.7-6215 (RCW 86)	Оболоч.	—	Винк и др. (2000)
RX J0002+6246 (G117.7+0.6)	Оболоч.	0.242	Бразиер, Джонстон (1999)
RX J2020.2+4026 (G78.2+2.1)	Оболоч.	—	Бразиер, Джонстон (1999)
CXO J1852.6+0040 1 (Kes 79)	Оболоч.	—	Сьювард и др. (2002)
PSR J1846-0258 (Kes 75)	Композ.	0.325	Готтхелф и др. (2000)
AX J1811-1926 (G11.2-0.3)	Композ.	0.065	Бекер, Павлов (2002)
RX J0205+6449 (3C58)	Плерион	0.065	Мюррей и др. (2002)
RX J0007.0+7302 (CTA1)	Плерион	—	Чакрабарти и др. (2000)
PSR J1930+1852 (G54.1+0.3)	Плерион	0.136	Камило и др. (2002б)
Название источника и остатка	**Тип источника**	**Период, с**	**Ссылки**
1E 1841-045 (Kes 73)	АРП	11.8	Мерегетти (1999)
AX J1845-0300 (G29.6+0.1)	АРП	6.97	Генслер и др. (1999)
			Мерегетти (1999)
1E 2259+586 (CTB 109)	АРП	6.98	Мерегетти (1999)
SGR 1900+14 (G42.8+0.6)	МПГ	5.16	Харлей (1999)
SGR 0526-66 (N49)	МПГ	8	Харлей (1999)
SGR 1627-41 (G337.0-0.1)	МПГ	6.41	Харлей (1999)

августе 1999 г. (здесь мы следуем работам Павлова и др. 2000, Чакрабарти и др. 2001).

Компактный источник расположен практически в центре остатка. Оптические и ИК-наблюдения дают только верхние пределы на излучение компактного объекта.

Сложности начинаются уже при определении светимости компактного источника. В зависимости от модели спектра (чернотельный или степенной) светимость оценивается от $\sim 2\cdot 10^{33}$ эрг с$^{-1}$ до $\sim 6\cdot 10^{35}$ эрг с$^{-1}$. Важной особенностью является маленькая площадь (~ 1 км^2) излучающей поверхности во всех вариантах интерпретации спектра. Эти характеристики не дают возможности однозначно определить природу компактного источника и механизм излучения.

Радиопульсары в остатках сверхновых являются подклассом наиболее молодых пульсаров, и потому чрезвычайно важны для определения начальных параметров НЗ. Однако до сих пор не ясно, какая доля сверхновых порождает радиопульсары. Вопросы ассоциации радиопульсаров с остатками сверхновых с наблюдательной точки зрения детально рассматривались в обзорах Каспи (1996), Лоримера и др. (1998), Готтхелфа и Васишта (2000) и статьях Брауна и др. (1989), Камило и др. (2001), Нараяна и Шаудта (1988) (см. также Гварамадзе 2002). Теоретические расчеты числа таких ассоциаций можно найти в работах Генслера и Джонстона (1995а,б,в). Трудности, связанные с определением возрастов пульсаров, недавно обсуждались на примере B1757-24 (Генслер, Фрейл 2000). АРП и МПГ в остатках сверхновых изучались Марсденом с соавторами (1999). Обзор по компактным рентгеновским источникам в остатках сверхновых можно найти в работе Бразиер и Джонстона (1999) (хотя эта статья была написана не так давно, но в данной области с тех пор было получено много важных результатов). По всем этим вопросам было проведено несколько крупных международных конференций (см., например, «Взаимосвязь между нейтронными звездами и остатками сверхновых»). На русском языке детальный обзор остатков сверхновых приведен в книге Лозинской (1986), а также в обзоре Блинников и др. (1987), однако за прошедшие 15 лет было открыто множество новых объектов, и т.о., с этой точки зрения работы несколько устарели.

Пожалуй самыми «модными» объектами из всех, рассматривающихся в нашем обзоре, являются АРП (Мерегетти, Стелла 1995, ван Парадайз и др. 1995) и МПГ (Мазец и др. 1979, см. также обзор ранних наблюдений в Мазец, Голенецкий 1987).

МПГ представляют собой объекты, демонстрирующие случайные (непредсказуемые) периоды вспышечной активности в мягком (<100 кэВ) гамма-диапазоне (см. каталог МПГ в статье Аптекарь и др. 2001). Периоды активности длятся от дней до месяцев. Вспышки соответствуют светимости выше эддингтоновской для объекта солнечной массы. Иногда происходят гигантские вспышки, которые характеризуются более жестким спектром и энергией в тысячи раз больше, чем выделяется в обычной вспышке. Подробное описание вспышечной активности МПГ и эволюции их периодов приведено в обзоре Вудс (2003).

В спокойном состоянии МПГ наблюдаются как относительно мягкие рентгеновские источники. Всего на данный момент известно 4 таких источника: SGR 1900+14 ($p=5.16$ с), SGR 1806-20 ($p=7.47$ с), SGR 1627-41 ($p=6.4$ с), SGR 0525-66 ($p=8$ с). (см. обзоры в Израел и др. 2002а, Мерегетти 1999, Харлей 1999, Томпсон 2001). Некоторые из них находятся в остатках сверхновых (Генслер 2002). Степень достоверности генетической связи между МПГ и остатками остается под вопросом. Источник SGR 1806-20 находится в скоплении массивных звезд (Эйкенберри 2002).

АРП были выделены в отдельный класс в 1995 году. Они характеризуются близкими периодами порядка 6–12 секунд (1E 1048.1-5937 – 6.44 с; 4U 0142+61 – 8.69 с; 1E 1841-045 – 11.77 с; 1E 2259+586 – 6.98 с; 1RXS J170849.0-400910 – 10.99 с; AX J1845-3000 – 6.97 с), низкими светимостями ($\sim 10^{35}$ эрг с$^{-1}$) и более мягким спектром, чем у обычных рентгеновских пульсаров в тесных двойных системах; стабильной светимостью на больших масштабах времени (обычно для рентгеновских пульсаров в тесных двойных системах характерна заметная переменность), постоянным замедлением (т.е. отсутствием эпизодов уменьшения периода вращения) и отсутствием данных о наличии второго компонента системы (см. обзоры Мерегетти 1999, Томпсона 2001 и Мерегетти и др. 2002б).

Вероятно недавно в Малом Магеллановом Облаке был открыт первый внегалактический АРП (Лэмб и др. 2002), здесь необходимы новые наблюдения.

Сейчас уже не вызывает больших сомнений то, что АРП являются одиночными НЗ (не исключены только очень маломассивные компаньоны). Природа светимости (аккреция из остаточного диска или излучение горячей звезды-магнитара) остается неизвестной. Вероятно наиболее важную информацию можно получать из детальных данных об изменении периодов этих объектов (Гавриил, Каспи 2002, Пол и др. 2000), а также из спектральных характеристик (особенно во время вспышек см. Марсден и Вайт 2001, Перна и др. 2001). Для получения этой информации необходим мониторинг (см. Готтхелф и др. 2001, Гавриил и др. 2001).

В результате такого мониторинга (использовались архивные данные спутника RXTE) были обнаружены две рентгеновские вспышки от АРП 1E 1048-5937 (Гавриил и др. 2002, 2003). Обе вспышки пришли в момент максимума кривой блеска пульсара. В одной из вспышек обнаружена спектральная деталь на 14 кэВ. Если ее интерпретировать как протонную циклотронную линию, то можно получить оценку магнитного поля $\sim 2.4 \cdot 10^{15}$ Гс. По своим характеристикам (временным, спектральным и т.д.) зарегистрированные вспышки очень похожи на вспышки МПГ. Авторы делают из этого вывод о том, что АРП и МПГ являются крайне похожими объектами (см. также Жанг 2002). Недавно также с помощью RXTE около 45 коротких вспышек (менее 1–2 секунд) было зарегистрировано от АРП 1E 2259+586 (Каспи, Гавриил 2002).

В последнее время появились результаты по рентгеновской спектроскопии АРП и МПГ. Спутник Чандра наблюдал АРП 4U 0142+61 (Джюэт и др. 2002). Не было найдено никаких указаний на присутствие в спектре эмиссионных или абсорбционных линий. Если источник является магнитаром, то эти данные накладывают существенные ограничения на модель атмосферы. Спектральные детали обнаружены у объекта 1E 1207.4-5209, являющегося компактным рентгеновским источником в остатке сверхновой (Санвал и др. 2002, Мерегетти и др. 2002, см. возможную интерпретацию результатов в Хэйлей и Мори 2002, Мори и Хэйлей 2003). В недавней работе Биньями и др. (2003) сообщают о регистрации в спектре этого источника трех (возможно даже четырех) циклотронных гармоник на энергиях 0.7, 1.4, 2.1 и 2.8 кэВ. Если это электронные циклотронные линии, то поле нейтронной звезды равно $8 \cdot 10^{10}$ Гс, для менее вероятного протонного циклотронного излучения — соответственно, $1.6 \cdot 10^{14}$ Гс. Оба этих значения не совпадают с магнитодипольной оценкой поля по торможению нейтронной звезды, которая дает $(2\text{–}3)\,10^{13}$ Гс.

Есть указания на обнаружение протонной циклотронной линии у SGR 1806-20 (Ибрагим и др. 2002а,б). Магнитное поле, определенное по наблюдениям циклотронной линии, соответствует значению, полученному по магнитодипольной формуле ($\sim 10^{15}$ Гс). Линия имеет транзиентный характер. Она была обнаружена по данным спутника RXTE во время вспышки источника. Кроме того, спектральная деталь наблюдалась у АРП 1RXS J 170849-400910 (Реа и др. 2003), но ее интерпретация как циклотронной линии спорна.

Особое место среди одиночных радиотихих НЗ занимает Геминга (однако на очень низких частотах удалось зарегистрировать и радиоизлучение от этого объекта, см. ниже). Объект Геминга (см. Каравео 2000, Биньями, Каравео 1996) был открыт в гамма-диапазоне в 1973 г. на спутнике SAS-2. В 1992 г. Хальперн и Холт объявили об открытии периода 237 мс. Современные наблюдательные данные об этом источнике в жестких диапазонах приведены в статье Джексон и др. (2002). Вероятно, что Геминга это радиопульсар, у которого основная часть диаграммы излучения не направлена на Землю, поэтому удается наблюдать лишь низкочастотное радиоизлучение. Источники данного типа очень трудно обнаружить, поэтому доля подобных НЗ неизвестна даже примерно. Ожидается, что будущие спутники (GLAST и др.) смогут увидеть в жестком диапазоне сотни НЗ такого типа в Галактике. Сегодня известен один объект, очень похожий по своим свойствам на Гемингу, — 3EG J1835+5918 (Мирабал, Гальперн 2001, Гальперн и др. 2002). Кроме того, один из источников третьего каталога EGRET, 3EG J2227+6122, отождествлен как радиопульсар (Гальперн и др. 2001, см. также Крамер и др. 2003, где авторы обсуждают результаты сравнения нового Парксовского обзора с обзором EGRET и работу Гренье 2003, посвященную неотождествленным источникам EGRET).

2.1.2 Наблюдения в радиодиапазоне

В настоящее время основная масса нейтронных звезд наблюдается как радиопульсары. Сейчас число известных источников этого типа перевалило за тысячу, а в будущем с созданием километровой антенной решетки станет возможным наблюдение практически всех радиопульсаров в Галактике, диаграммы излучения которых направлены на нас (Браун 1996). В связи с этим оказывается очень важным пытаться пронаблюдать все НЗ в этом диапазоне.

В большинстве моделей радиоизлучения НЗ конус излучения шире в низкочастотной области, поэтому активные поиски радиосигналов от «нестандартных» НЗ ведутся в ПРАО АКЦ ФИ РАН на низких частотах (порядка 110 Мгц). Уже зарегистрировано радиоизлучение Геминги (Кузьмин и Лосовский 1997, Малофеев и Малов 1997, Шитов и Пугачев 1998), одного источника повторяющихся гамма-всплесков (Шитов и др. 2000) и одного аномального рентгеновского пульсара (Малофеев, Малов, см. astro-ph/0106435, стр.31). В связи с уникальностью радиотелескопа ПРАО эти результаты пока не имеют надежного независимого подтверждения, кроме регистрации Геминги (см. Ватс и др. 1997). Отсутствие излучения на более высокочастотной части радиодиапазона может свидетельствовать о крутом спектре.

Для объектов «великолепной семерки» получены только отрицательные результаты (см. Джонстон 2003).

2.1.3 Наблюдения в ИК-диапазоне

Наблюдения в ИК-диапазоне относятся в основном к аномальным рентгеновским пульсарам. Для объяснения этих источников предложено существование остаточных аккреционных дисков (см. ниже раздел, посвященный аккреции). Для выбора между существующими моделями и необходимы ИК-наблюдения.

Для АРП 1E 2259+586 получены данные, указывающие на наличие ИК-объекта (Халлеман и др. 2001). Ванг и Чакрабарти (2002) сообщают о регистрации АРП 1E 1048.1-5937. Израэл и др. (2002б) зафиксировали переменность этого источника в ИК-диапазоне (в одном из наблюдений источник не был зафиксирован, т.о., можно говорить о существенном возрастании ИК-потока за время порядка 50 дней). Клозе и др. (2002) сообщают об отрицательных результатах ИК-наблюдений источника SGR 1900+14. Для АРП 1RXS J 170849-400910 произведено отождествление в ИК-диапазоне (Израэл и др. 2003), переменность излучения не была обнаружена. Как и у других АРП в спектре этого объекта присутствует избыток ИК-излучения.

Пока полученные результаты свидетельствуют об отсутствии аккреционных дисков или маломассивных компонентов у АРП и МПГ. Необходимы дальнейшие исследования.

Обычные радиопульсары также наблюдаются в ИК-области спектра. Спектральные исследования показывают, что основные источники энергии в этом диапазоне у пульсаров Crab и Vela различны (подробнее см. Шибанов и др. 2003).

2.1.4 Наблюдения в оптическом диапазоне

Наблюдения одиночных НЗ всех типов в оптическом диапазоне представляют большой интерес (см. Каравео 2000).

Начнем с семи одиночных радиотихих НЗ, открытых спутником ROSAT. Эти объекты были выделены как возможные НЗ именно по большому отношению рентгеновской светимости к оптической (см. табл. 1). Два источника достоверно зарегистрированы в оптике (RX J1856.5–3754 и RX J0720.4–3125, см. список в Каплан и др. 2003а). Возможно, что также оптически отождествлены источники RX J1308.6+2127 и RX J1605.3+3249 (Каплан и др. 2002б, 2003а). Этот результат нуждается в подтверждении. Для остальных известны только верхние пределы. Возможной интерпретацией рентгеновского потока от объектов «великолепной семерки» является тепловое излучение поверхности молодой НЗ. В связи с этим важно зарегистрировать тепловое излучение вне рентгеновского диапазона, в первую очередь в оптике.

Оптические наблюдения также важны для исследования атмосфер одиночных НЗ. У источника RX J1856.5-3754 наблюдается заметный избыток оптического и ультрафиолетового излучения по сравнению с чернотельным спектром, экстраполированным из рентгеновского диапазона в более мягкие. Эти данные можно объяснить с помощью подбора состава атмосферы НЗ. Пока разные группы получают противоречивые результаты. Расчеты Понс и др. (2002) показывают наличие атмосферы, состоящей из тяжелых элементов (т.н. «кремниевого пепла»). В то время как Туролла и др. (2002) объясняют наблюдаемый спектр в рамках тонкой водородной атмосферы сильнозамагниченной НЗ. Еще больший избыток в оптике обнаружен у RX J1605.3+3249 (Каплан и др. 2003а).

Наблюдения НЗ активно ведутся на Космическом телескопе. Для RX J1856.5-3754 удалось определить параллакс (первым, но с существенной ошибкой, параллакс получил Волтер (2001), уточненнение этого значения было сделано в (Каплан и др. 2002а), а затем в (Волтер, Латтимер 2002)). Расстояние до объекта равно 117$\pm$12 пк. По наблюдениям SGR 0526-66 (Каплан 2001) получены важные ограничения на обе модели (аккреционную и магнитарную; обсуждение моделей см. ниже).

Предложено оптическое отождествление для аномального пульсара 4U 0142+61 (Халлеман и др. 2000). Керн и Мартин (2002) обнаружили пульсации оптического излучения от этого объекта (высокая доля пульсирующего излучения в оптике является аргументом в пользу магнитарной интерпретации АРП). Для нескольких источников получены важные верхние пределы (Израел и др. 2002а), позволяющие исключить двойственность источника (кроме экзотических спутников).

Об оптических наблюдениях Геминги см. подробнее работу Биньями и Каравео (1996).

Кроме наблюдения оптического излучения от самой НЗ, важным является наблюдение ее самых близких окрестностей. Так наблюдение туманностей вокруг радиопульсаров позволило сделать заключение о скорости их движения и о том, что на измеренном расстоянии от них истекают потоки частиц, а не электромагнитного излучения. Ван Керквийк и Кулкарни (2001) обнаружили в H_α кометообразную туманность вокруг источника RX J1856.5-3754. Это открытие является существенным аргументом против аккреционной интерпретации излучения данного объекта.

В России оптическими наблюдениями НЗ активно занимаются две группы на 6-метровом телескопе в САО РАН (Курт и др. 1997, Копцевич и др. 2001, Голден и др. 2000 и Бескин, Неустроев 2001). Пока положительный результат получен только для радиопульсаров и Геминги, но наблюдения продолжаются. Оригинальными результатами последней группы было обнаружение отсутствия микроструктуры оптического импульса и наличие оптического излучения (для пульсара в Крабе) в межимпульсном промежутке.

2.2 Физика НЗ

2.2.1 Расчеты тепловой эволюции НЗ

Нейтронные звезды рождаются на заключительных стадиях эволюции массивных ($M > 8$–$10\mathrm{M}_\odot$) звезд в результате потери устойчивости и коллапса их ядер. (Из наиболее массивных $M \gtrsim 25\mathrm{M}_\odot$ звезд, по-видимому, рождаются черные дыры, но где и насколько резко проходит эта граница, сегодня неизвестно.) Этот процесс сопровождается вспышкой сверхновой. Нейтронные звезды рождаются очень горячими, до 90% выделяющейся при коллапсе ядра гравитационной энергии (порядка 10^{53} эрг) выделяется в виде очень мощного потока нейтрино, испускаемого горячей молодой нейтронной звездой, в первые несколько секунд или, самое большее, в первые 10–20 секунд (Пракаш и др. 2001, Феррари и др. 2002). Для близких сверхновых (Галактика или галактики местной группы) нейтринная вспышка с помощью современной аппаратуры может быть зафиксирована непосредственно. Единственным пока случаем прямой регистрации нейтрино от вспышки сверхновой была SN1987a в Большом Магеллановом Облаке (см. Хирата и др. 1987, Бионта и др. 1987, Алексеев и др. 1988 и обзор Имшенник, Надежин 1988). Хотя НЗ испускает нейтрино и на более поздних этапах своего остывания, но их поток на много порядков меньше начальной вспышки и не может быть зарегистрирован современными средствами.

Далее в НЗ действуют два различных механизма охлаждения: нейтринный — за счет излучения нейтрино и антинейтрино из всего объема НЗ (в основном из центральной его части) и фотонное охлаждение за счет электромагнитного излучения с поверхности НЗ. Нейтринный механизм более эффективен, пока внутренняя (центральная) температура НЗ превосходит $\sim 10^8$ K, что в типичных случаях соответствует температуре поверхности НЗ $T_s > 10^6$ K. Обычно эта стадия длится 10^5–10^6 лет. Современный спутниковый рентгеновский эксперимент позволяет обнаруживать только достаточно близкие и яркие, то есть молодые и горячие НЗ (например, объекты «великолепной семерки»), поэтому ниже основное внимание будет уделено рассмотрению процессов на стадии нейтринного охлаждения.

Пионерскими работами по остыванию НЗ, написанными еще *до* открытия радиопульсаров, являются работы (Цурюта, Камерон 1965, Бакал, Вольф 1965). Затем эта проблема исследовалась рядом авторов, но в настоящее время нет единой точки зрения по этому вопросу.

С математической точки зрения моделирование остывания НЗ сводится к решению уравнения диффузии тепла внутри звезды (Торн 1977, Левенфиш и др. 1999) с учетом объемных (нейтринное излучение) и поверхностных (фотонное охлаждение) стоков энергии. В большинстве случаев достаточно рассматривать одномерную сферически-симметричную задачу. Составными частями теории остывания НЗ являются: теплоемкость и теплопроводность ядра НЗ; величина нейтринных потерь энергии; теплопроводность коры НЗ, которая определяет связь центральной и поверхностной температур.

В первые 100–1000 лет с момента образования НЗ процессы переноса тепла внутри НЗ достаточно сложны, так как на этой стадии температуры различных внутренних частей НЗ существенно отличаются друг от друга (оболочка горячее охлаждающегося из-за нейтринного излучения ядра, см., например, Гнедин и др. 2001). Однако на этой стадии электромагнитное излучение НЗ скорее всего невозможно наблюдать из-за большой оптической толщины сброшенной во время взрыва сверхновой оболочки, которая становится прозрачной для мягкого рентгеновского излучения поверхности НЗ лишь примерно через 100 лет после взрыва. После первичной стадии тепловой релаксации ядро НЗ становится практически изотермическим, а весь перепад температуры ядра и поверхности НЗ определяется теплопроводящими свойствами коры НЗ.

Нейтрино, испускаемые горячей НЗ, образуются в ходе различных микроскопических процессов (см., например, недавнюю статью Гусакова 2002). Рассмотрим их:

- **Прямые урка-процессы** [Гамов, Шенберг (1941); Пинаев (1963)].
  Это обычные процессы бета-распада и бета-захвата, проходящие в веществе ядра НЗ.

  $$n \to p + e + \widetilde{\nu}_e\,, \qquad p + e \to n + \nu_e\,, \qquad n + e^+ \to p + \widetilde{\nu}_e. \tag{1}$$

  Реакции захвата и распада идут с одинаковым темпом, и, таким образом, состав вещества не изменяется, а рождающиеся в каждом из процессов нейтрино и антинейтрино свободно покидают НЗ.

  Прямые урка-процессы — самый мощный источник нейтрино, но они возможны не всегда. Для того, чтобы бета-реакции могли идти, должно выполняться так называемое «условие треугольника» $p_{\rm F}(n) \le p_{\rm F}(e) + p_{\rm F}(p)$, вытекающее из закона сохранения импульса частиц. В идеальном газе вырожденных нуклонов и электронов это условие не выполняется никогда. В более реалистичных уравнениях состояния при высоких плотностях (около $2 \cdot 10^{15}$ г см$^{-3}$) данные реакции становятся возможными (Латтимер и др. 1991, Яковлев и др. 1999).

  Поток нейтрино от прямых урка-процессов с учетом релятивистских эффектов был рассчитан в работе (Леинсон 2002).

- **Модифицированные урка-процессы** [Чиу, Салпитер (1964)].
  Они отличаются от прямых тем, что в реакции участвует дополнительный нуклон:

  $$n + n \to n + p + e + \widetilde{\nu}_e\,, \qquad n + p + e \to n + n + \nu_e\,, \tag{2}$$
  $$p + n \to p + p + e + \widetilde{\nu}_e\,, \qquad p + p + e \to p + n + \nu_e\,. \tag{3}$$

  Участие в реакции дополнительной частицы снимает ограничения, налагаемые законом сохранения импульса. Данные реакции возможны в ядрах НЗ с практически любыми уравнениями состояния. С присутствием дополнительного нуклона связано то, что производимый модифицированными урка-процессами поток нейтрино заметно слабее, чем в прямых реакциях, и быстрее убывает при понижении температуры.

  Именно модифицированные урка-процессы считаются основным механизмом генерации нейтрино при *стандартном* остывании НЗ.

- **Тормозное ν-излучение.**
  Пары нейтрино–антинейтрино могут рождаться при столкновении нуклонов в одной из следующих реакций:

  $$\begin{gathered} n + n \to n + n + \nu + \widetilde{\nu}\,, \quad n + p \to n + p + \nu + \widetilde{\nu}\,, \\ p + p \to p + p + \nu + \widetilde{\nu}\,. \end{gathered} \tag{4}$$

Зависимость выхода нейтрино от температуры в данных реакциях такая же, как в модифицированных урка-процессах, но поток для нормального (несверхтекучего) вещества на 1–2 порядка ниже (Фримен, Максвелл 1979). Однако эти процессы могут стать важны при наличии сверхтекучести. (Впервые идею о сверхтекучести недр НЗ высказал еще в 1959 г. Мигдал, а затем, в 1964 г., Гинзбург и Киржниц.)

Рождение $\nu\widetilde{\nu}$-пар возможно также при рассеянии электронов (Каминкер, Хенсел 1999)

$$e + e \to e + e + \nu + \widetilde{\nu}\,. \tag{5}$$

В несверхтекучей среде этот процесс слабее всех других. Но он совершенно не зависит от сверхтекучести и может становиться важным, когда она наступит.

- **Испускание ν при куперовском спаривании** [Флауэрс и др. (1976)]. Этот процесс представляет собой испускание пары нейтрино-антинейтрино любого типа при переходе нуклона через щель в энергетическом спектре сверхтекучего вещества.

$$N \to N + \nu + \widetilde{\nu}\,. \tag{6}$$

При отсутствии сверхтекучести подобное испускание $\nu\widetilde{\nu}$-пары свободным нуклоном запрещено законами сохранения. Этот процесс был впервые предложен в 1976 в работе (Флауэрс и др. 1976), затем вновь был исследован Воскресенским и Сенаторовым (1987), но в расчетах остывания НЗ стал учитываться только с 1997 года. В общем случае данный процесс уступает по эффективности генерации нейтрино прямым урка-процессам. Его учет при моделировании остывания НЗ обязателен, так как он действует в тех случаях, когда урка-процессы подавляются сверхтекучестью.

- **Другие («экзотические») процессы.** В большинстве случаев основной поток нейтрино создается перечисленными выше процессами. Но при некоторых комбинациях параметров заметную роль могут начать играть «экзотические» реакции (см., например, Арретче и др. 2002).

Какие из перечисленных четырех процессов действуют в конкретной НЗ с заданной массой и температурой, зависит от свойств нейтронного вещества при плотностях, достигающихся в центре НЗ. Так диапазон масс НЗ и плотностей в их центрах зависит от жесткости уравнения состояния (Латтимер, Пракаш 2001). Наибольшие массы достигаются при жестких уравнениях состояния. За возможность включения прямых урка-процессов во внутренних ядрах НЗ отвечает другой параметр уравнения состояния — так называемая «асимметрия». (В центрах НЗ с не очень высокой массой и низкими центральными плотностями прямые урка-процессы всегда запрещены, но для более массивных НЗ возможность протекания данных реакций почти не зависит от жесткости уравнения состояния, см., например, (Каминкер и др. 2002).)

Присутствие протонной и/или нейтронной сверхтекучести и поведение их критических температур являются дополнительными параметрами задачи остывания горячей НЗ. Наличие и свойства сверхтекучести сильно зависят как от самого уравнения состояния, так и от метода учета многочастичных эффектов. На сегодняшний день предложенные различными авторами модели сверхтекучести перекрывают весь интересный для астрофизики диапазон свойств (см., например, рис.3 из Яковлев и др. 1999). Важность сверхтекучести для процессов остывания заключается в том, что ее наличие может частично или полностью подавлять урка-процессы и, таким образом, существенно изменять кривые остывания НЗ (подробнее см. обзор Яковлев и др. 2002).

Со сверхтекучим ядром НЗ может быть связан еще один процесс: в таком ядре могут порождаться бесстолкновительные звуковые колебания в электронном газе, которые распространяются внутри НЗ столь же свободно, как и нейтрино. В коре НЗ при наличии магнитного поля такие колебания трансформируются в электромагнитные и вызывают ее дополнительный прогрев (Свидзинский 2002). Однако данный механизм еще плохо изучен.

Еще одной возможностью, недостаточно изученной на сегодняшний момент, является появление в центре НЗ при плотности в несколько раз выше ядерной экзотических частиц. В литературе в настоящее время обсуждается несколько гипотез: рождение в центре звезды Σ- и Λ-гиперонов; образование в центре НЗ пионного или каонного конденсата (это две разные гипотезы) (об остывании НЗ с учетом пионного конденсата см. Воскресенский, Сенаторов 1986, учет появления мюонов в ядре НЗ проведен Бейгером и др. 2002, каонов — Кубисом и Кучерой 2002); фазовый переход к странной материи — плазме почти свободных u, d и s кварков (о странных звездах см. ниже, а про охлаждение странных звезд см., например, Шовковый, Эллис 2002). Любой из указанных вариантов может усилить нейтринную светимость НЗ в несколько раз или даже на несколько порядков (Блашке и др. 2001).

Качественно различающиеся кривые остывания НЗ приведены на рис. 1. «Стандартной» называется кривая, определяемая модифицированными урка-процессами без сверхтекучести и прямых урка-реакций. Включение прямых урка-процессов (по-прежнему при отсутствии сверхтекучести) приводит к резкому падению температуры НЗ, когда ее возраст достигает нескольких сотен лет. Это так называемое ускоренное остывание НЗ. Наличие сверхтекучести протонов и/или нейтронов вызывает сильное подавление урка-процессов (как прямых, так и модифицированных) при температурах ниже критической. Протонная сверхтекучесть обычно наступает раньше, а сверхтекучесть нейтронов сильнее всего сказывается в конце стадии нейтринного остывания НЗ. На смену подавленным механизмам излучения нейтрино через урка-процессы приходит излучение $\nu\widetilde{\nu}$-пар в сверхтекучем веществе при куперовском спаривании нуклонов. Наблюдательные данные (см. табл. 3) позволяют жестко ограничить критическую температуру наступления нейтронной сверхтекучести (отметим, что поток наблюдательных данных постоянно растет в первую очередь благодаря спектральным исследованиям на рентгеновских спутниках, см., например, Маршалл, Шульц 2002).

Таким образом, можно сказать, что медленнее всего спадают кривые остывания НЗ, получаемые при подавленных сверхтекучестью урка-процессах без учета куперовского механизма генерации нейтрино. Быстрее всего — кривые ускоренного остывания с прямыми урка-процессами и без сверхтекучести. «Стандартные» кривые остывания и кривые для сверхтекучих НЗ с учетом излучения нейтрино при куперовском спаривании нейтронов занимают промежуточное положение. («Стандартное» остывание без прямых урка-процессов и без сверхтекучести, по-видимому, никогда не реализуется в природе и представляет теперь только исторический интерес, см., например, Каминкер и др. 2002).

В последнее время сравнение теоретических кривых остывания с наблюдательными данными о температурах молодых НЗ (см. таблицу 3) приводят исследователей к заключению, что среди этих объектов выделяются две группы, связанные, вероятно, с различием масс НЗ: очень медленно остывающие (маломассивные НЗ) и с более быстрым остыванием (НЗ промежуточной массы). Объекты, остывание которых определяется прямыми урка-процессами, по-видимому, до сих пор не обнаружены. Более подробно данный вопрос рассмотрен в обзоре Каминкер и др. (2002),

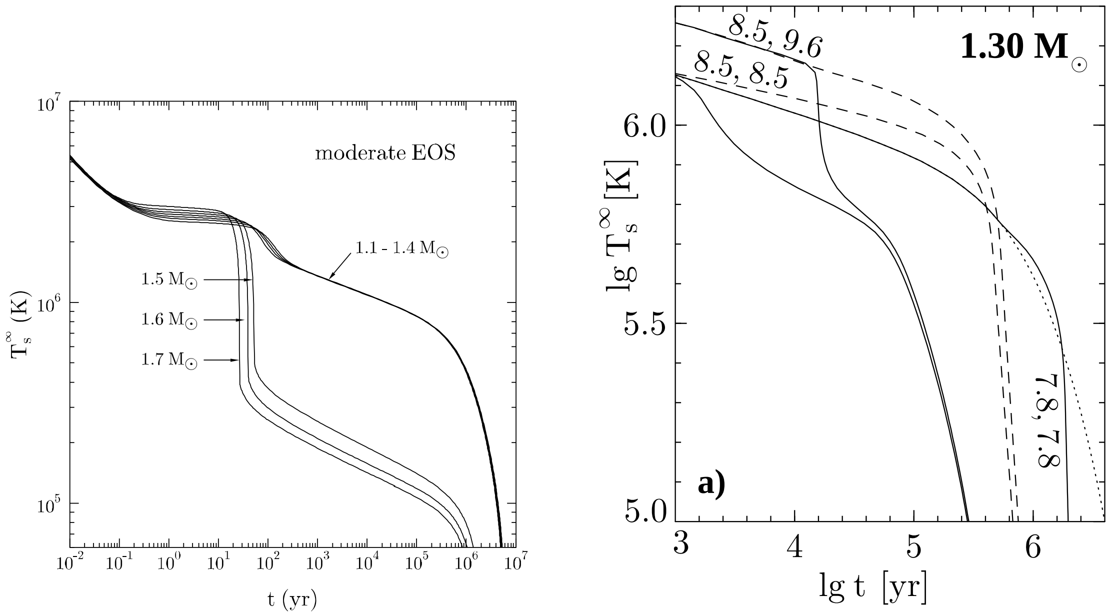

Рис. 1. Рисунки из обзоров Яковлева и др. (2001, 1999), иллюстрирующие различные типы остывания НЗ. На левом рисунке показаны стандартное (верхняя группа кривых для малых масс) и ускоренное (нижняя группа) остывание без сверхтекучести. На правом — стандартное (пунктир) и ускоренное (за счет куперовского спаривания нейтронов — сплошная линия) остывание сверхтекучих нейтронных звезд. Числа около кривых на левом рисунке означают массы НЗ, на правом — параметры перехода ядра в сверхтекучее состояние.

а медленно остываюшие маломассивные НЗ — в статье Потехин и др. (2003).

Более подробное описание остывания НЗ можно найти в (Яковлев и др. 1999, Шааб и др. 1999, Паж и др. 2000, Яковлев и др. 2001, 2002), а критику части из этих работ в (Цурюта и др. 2002).

Кроме перечисленных выше процессов на ход остывания НЗ существенное влияние могут оказать свойства внешних слоев НЗ (их атмосфер, см. раздел 2.2.2) и наличие дополнительных источников энергии. Сейчас известны три ситуации, когда поверхность или внешние слои НЗ дополнительно нагреваются. Это происходит в полярных шапках радиопульсаров, при аккреции и из-за распада магнитного поля (нагрев за счет диссипации вращательной энергии и подобные процессы представляют отдельную проблему). Рассмотрим их последовательно.

Полярные шапки. Стандартные модели пульсаров (Голдрайх, Джулиан 1969, Бескин и др. 1993) предсказывают, что в небольших областях вокруг магнитных полюсов электрическое поле, возникающее из-за вращения наклонного ротатора, будет вырывать из поверхности, а затем эффективно ускорять электроны. Через небольшое время ускоренные электроны начинают рождать $e^{\pm}$–пары. Вторичные электроны также начинают удаляться от НЗ, а позитроны движутся в обратном направлении, и, так как их движение происходит практически вдоль силовых линий магнитного поля, то они попадают в области вблизи магнитных полюсов («полярные магнитные шапки») и прогревают их до температур $T \sim 10^6 - 10^7$ К. Именно они обуславливают пульсирующую часть теплового излучения, наблюдаемого у некоторых молодых и близких радиопульсаров (например у пульсара в Крабе). Этот механизм действует, пока НЗ проявляет себя как радиопульсар, т.е. пока

$$\frac{B_{12}}{p^2} > 0.2, \tag{7}$$

Таблица 3. Экспериментально определенные поверхностные температуры восьми изолированных нейтронных звезд умеренного возраста. Таблица взята из работы Каминкер и др. (2002).

Объект	$\lg t$ [лет]	$\lg T_s^\infty$ [K]	Модель[a)]	Ссылки
RX J0822–43	3.57	$6.23^{+0.02}_{-0.02}$	H	Завлин и др. (1999)
1E 1207–52	3.85	$6.10^{+0.05}_{-0.06}$	H	Завлин и др. (1998)
RX J0002+62	3.95[b)]	$6.03^{+0.03}_{-0.03}$	H	Завлин, Павлов (1999)
PSR 0833–45 (Vela)	4.4[c)]	$5.83^{+0.02}_{-0.02}$	H	Павлов и др. (2001б)
PSR 0656+14	5.00	$5.96^{+0.02}_{-0.03}$	bb	Поссенти и др. (1996)
PSR 0633+1748 (Geminga)	5.53	$5.75^{+0.05}_{-0.08}$	bb	Гальперн, Ванг (1997)
PSR 1055–52	5.73	$5.88^{+0.03}_{-0.04}$	bb	Огельман (1995)
RX J1856.5–3754	5.95	$5.72^{+0.05}_{-0.06}$	[d)]	Понс и др. (2001)
		5.851 ± 0.002	bb	Дрейк и др. (2002)
PSR J0205+6449 (3C58)	2.91[e)]	< 6.05	все	Слэйн и др. (2002)

[a)] Температура определялась либо для модели водородной атмосферы (H), либо в предположение чернотельного спектра излучения (bb)

[b)] Средний возраст взят согласно Крейгу и др. (1997).

[c)] Согласно Лайну и др. (1996).

[d)] Оценка температуры получена для аналитической модели Si-атмосферы (Понс и др. 2001).

[e)] Пульсар отождествляется с исторической сверхновой 1181 года.

где $B_{12} \equiv B/10^{12}$ Гс — магнитное поле на поверхности НЗ, а p — период пульсара в секундах (Рудерман, Сазерленд 1975).

Аккреция. Условия наступления этой стадии описаны в параграфе 2.2.6. Для «стандартной» НЗ (радиопульсара) с $B \simeq 10^{12}$ Гс, $p_0 \simeq 0.01$–0.1 с, с медленным ($\tau > 10^8$ лет) затуханием магнитного поля аккреция из межзвездной среды (МЗС) начнется спустя не менее чем 10^9 лет после ее рождения. В первую очередь это время зависит от пространственной скорости НЗ (см. параграф 2.2.6). Аккреция на молодые ($\sim 10^6$ лет) НЗ возможна при больших p_0 и/или меньших B. Даже аккреция на старую НЗ ($t > 10^7$ лет) быстро прогревает ее кору и может сделать звезду видимой. При аккреции на НЗ со слабым полем вещество падает на всю поверхность звезды. Типичная температура одиночной аккрецирующей НЗ лежит в интервале $0.03-0.3$ кэВ.

Для НЗ с более сильными полями аккрецирующее вещество будет двигаться вдоль магнитных силовых линий и выпадать на магнитные полюса НЗ. В этом случае температура излучения будет более высокой из-за меньшей площади излучающей области.

Аккреция на одиночные НЗ возможна не только из МЗС, но и из околозвездного диска, образующегося из остатков оболочки сверхновой (см. ниже). В этом случае темп аккреции может быть достаточно велик.

Следует также отметить, что наличие аккрецированной оболочки весьма сильно влияет на кривые остывания. Через оболочку из легких элементов тепло переносится легче, чем через железную, такая оболочка увеличивает тепловую светимость НЗ на нейтринной стадии остывания и ускоряет высвечивание тепловой энергии на фотонной стадии (см., Шабрие и др. 1997, Потехин и др. 1997).

Сильные магнитные поля. Магнитное поле, превосходящее $\sim 10^{11}$ Гс, может существенно повлиять на темп охлаждения НЗ. Это связано в первую очередь с изменением теплопроводности коры НЗ, теплоперенос в которой определяется электронами. Теплопроводность в коре НЗ при произвольном магнитном поле была изучена в работе Потехина (1999), а влияние магнитного поля на тепловую структуру оболочек и кривые остывания НЗ — в работе (Потехин, Яковлев 2001). Магнитное поле облегчает теплоперенос вблизи магнитных полюсов и затрудняет его вблизи экватора. Эти два процесса конкурируют, из-за чего при умеренно сильных полях (как у радиопульсаров) общая тепловая прозрачность оболочки НЗ уменьшается, а при сверхсильных полях (у магнитаров) она увеличивается.

Теория магнитаров и их сверхсильных полей находится на начальном этапе развития, поэтому здесь будет достаточно простых оценок (см. также Хейл и Хернквист 1997а,б). Магнитар со средним полем $\langle B \rangle$ внутри НЗ может обеспечить за счет его распада светимость L в течение интервала времени

$$\tau_{\text{магн.}} = \frac{\langle B^2 \rangle}{8\pi} \cdot \frac{4\pi}{3} R_{\rm NS}^3 \cdot \frac{1}{L} = \frac{\langle B^2 \rangle R_{\rm NS}^3}{6L} \,. \tag{8}$$

Откуда видно, что при начальном поле $\langle B \rangle = 10^{15}$ Гс распад поля обеспечивает светимость $L = 10^{33} - 10^{34}$ эрг с$^{-1}$ на протяжении $\sim 10^6$ лет и может сказаться на поздних этапах остывания НЗ. Такую же светимость может обеспечить магнитар с $\langle B \rangle = 10^{14}$ Гс, но уже только в течение $\sim 10^4$ лет, что, во-первых, снизит количество наблюдаемых объектов (т.к. нам требуется попасть в узкий, $\sim 1\%$, интервал времени жизни объекта), а, во-вторых, потребует объяснения для позднего начала подобного затухания.

Однако для многих молодых НЗ должно выполняться условие $B < 3 \cdot 10^{12}$ Гс, и распад поля (по наблюдениям радиопульсаров) несущественен на ранних стадиях эволюции многих НЗ. Поэтому представляется важным рассмотреть охлаждение НЗ без усложняющего влияния магнитного поля, а также эффектов нагрева из-за внутреннего трения при замедлении вращения НЗ (об этих эффектах см., например, Ларсон и Линк 1999).

При расчетах остывания НЗ необходимо учитывать эффекты общей теории относительности, которые хотя и не меняют картину остывания качественно, существенно сказываются на численных результатах. Детальное обсуждение эффектов ОТО при остывании НЗ можно найти, например, в работе Паж и др. (2000).

2.2.2 Расчеты спектров НЗ с учетом атмосфер различного состава

Геометрически тонкий (несколько миллиметров, самое большее несколько сантиметров) наружный слой вещества НЗ существенным образом влияет на спектр испускаемого звездой излучения (см. обзоры в Завлин, Павлов 2002, Павлов, Завлин 2003). Интересно отметить, что, в то время как вопросы переноса излучения, структуры

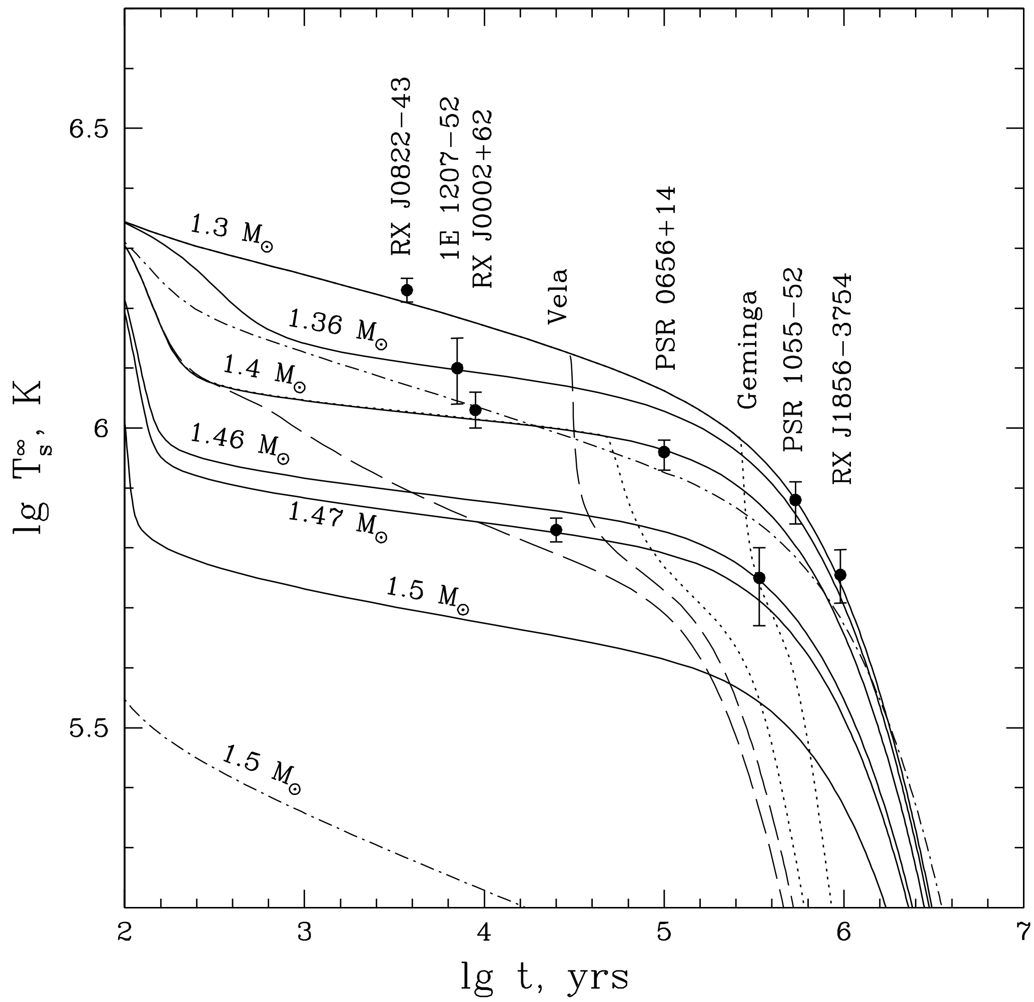

Рис. 2. Рисунок из работы Каминкер и др. (2001). Наблюдательные измерения поверхностной температуры восьми НЗ (показаны с ошибками измерений) из табл. 3 в сравнении с теоретическими кривыми остывания НЗ с протонной и нейтронной сверхтекучестью. Все кривые (за исключением штрих-пунктирных) построены для одной и той же протонной сверхтекучести. Сплошные линии показывают остывание нейтронных звезд с различной массой без нейтронной сверхтекучести. Штриховые и пунктирные линии соответствуют нейтронным звездам с массами $M = 1.3$ и $1.4\,\mathrm{M}_\odot$, обладающими нейтронной сверхтекучестью. Штрих-пунктирными линиями показаны несверхтекучие НЗ с массами 1.3 и $1.5\,\mathrm{M}_\odot$. Сравнение теоретических кривых с наблюдениями позволяет жестко ограничить некоторые параметры НЗ. [Примечание: В настоящее время возраст объекта RX J1856.5–3754 оценивается в 500 000 лет (Волтер и Латтимер 2002).]

атмосфер и формирования спектров у обычных звезд изучаются многие десятилетия (Чандрасекар 1953, Соболев 1985) и в послевоенное время составляли основное содержание астрофизики, изучение атмосфер НЗ началось совсем недавно. Первая работа была выполнена Романи в 1987 (см. также Павлов, Шибанов 1978). Затем разными авторами были выполнены несколько циклов работ по моделированию атмосфер НЗ (Шибанов и др. 1992, Завлин и др. 1996, Раджагопал, Романи 1996 и другие). Обзор этих работ см. в (Вентура, Потехин 2001), а результаты недавних расчетов в (Хо, Лай 2001). (Результаты расчетов группы в ФТИ им. А.Ф. Иоффе доступны по сети Интернет:
http://www.ioffe.rssi.ru/astro/Stars/).

Моделирование атмосфер НЗ имеет свои особенности, как упрощающие, так и усложняющие расчеты, по сравнению с обычными звездами. К первым относятся крайне малая геометрическая толща атмосфер НЗ, позволяющая всегда пользоваться только плоско-параллельной геометрией, и предположение о гидростатическом равновесии. С высокой точностью выполняются также ионизационное и локальное термодинамическое равновесия. Ко второй группе факторов относятся худшая изученность рентгеновских спектров атомов по сравнению с оптическими, неопределенность химического состава атмосфер и наличие у НЗ сильного магнитного поля (от 10^8 Гс до, возможно, 10^{15} Гс).

Рассмотрим два последние фактора. В работах разных авторов делались различные предположения о химическом составе атмосфер НЗ: чисто водородная, гелиевая и железная атмосферы, смесь с солнечным химсоставом и так называемый «кремниевый пепел» («Si-ashes», вещество такого состава может выпадать на поверхность НЗ при аккреции самых внутренних слоев оболочки сверхновой). Конечно, всегда проводилось сравнение с чернотельным планковским спектром. Наличие любой рассеивающей атмосферы делает спектр испускаемого излучения более жестким, то есть реальная температура оказывается ниже, чем определяемая по форме спектра. Но результаты, получаемые для тяжелых элементов и солнечного химсостава, отличались от чернотельного спектра не более, чем на 20–30%. Сильные отличия (в 10 раз по потоку и в 2–3 раза по температуре) показывают только водородная и гелиевая атмосферы. При достаточно высоких температурах ($T > 10^7$ K) и/или плотностях ($\rho > 10^8$ г/см^3) водород на поверхности НЗ достаточно быстро выгорает в термоядерных или пикноядерных реакциях (см. Чанг и Билдстен 2002 и ссылки там). В этом случае для поддержания атмосферы необходима хотя бы небольшая аккреция. Гелий на поверхности НЗ выгорает существенно медленнее, с другой стороны, присутствие в атмосфере даже незначительного количества CNO-элементов заметно ускоряет выгорание. Таким образом, для моделирования большинства случаев обычно достаточно двух моделей: водородной атмосферы и черного тела.

Сильное магнитное поле ($B > 10^{11}$ Гс) оказывает на атмосферы НЗ очень существенное и сложное по своему характеру воздействие – перенос излучения становится анизотропным. Особенно сильным оказывается влияние магнитных полей на спектр выходящего излучения. В настоящее время в серии работ группы из ФТИ им.А.Ф.Иоффе (Шибанов и др. 1992, 1995а,б, Павлов и др. 1995, Завлин и др. 1996, Потехин, Павлов 1997, Потехин и др. 1998, 2003) были построены спектры атмосфер, состоящих из элементов тяжелее гелия для полей до 10^{14} Гс, а для водородных атмосфер — до 10^{13} Гс (Потехин и Шабрие 2002, см. также Раджагопал и др. 1997). В работе (Потехин, Яковлев 2001) была сделана попытка рассмотреть остывание и атмосферы НЗ при полях до 10^{16} Гс. Эти модели активно используются при интерпретации спектров одиночных НЗ, от которых зарегистрировано тепловое излучение и известен возраст объектов (Завлин и др. 1996, Завлин, Павлов 1998, Гансик и др. 2002).

Спектры аккрецирующих одиночных НЗ изучались начиная с конца 60-х годов (Зельдович, Шакура 1969, Шварцман 1970в). В 90-е гг. много результатов было получено итальянской группой (Туролла и др. 1994, Зампьери и др. 1995).

В последние годы благодаря наличию на борту спутников XMM и Чандра спектрографов высокого (для рентгеновского диапазона) разрешения удается получать богатый наблюдательный материал для непосредственной проверки расчетов (см., например, работу Маршалл, Шульц 2002).

2.2.3 Процессы в магнитосферах

Теории магнитосфер для различных стадий эволюции НЗ разработаны на сегодняшний день в различной мере. Для стадий *эжекции* и *георотатора* есть достаточно детальные и более-менее самосогласованные модели магнитосфер. В первом случае их разработка была направлена на объяснение свойств радиопульсаров (Голдрайх, Джулиан 1969, Бескин 1990, Муслимов, Цыган 1990, 1992, Майкель 1991, Бескин и др. 1993, Цыган 1993, Любарский 1995, Боговалов 1999, 2001), во втором — на описание взаимодействия магнитосферы Земли с солнечным ветром (например, Жигулев, Ромашевский 1959). Для стадий *аккреции* и *пропеллера* получены только существенно более простые результаты при дополнительных модельных предположениях (см., например, Липунов 1987). Следует заметить, что в то время как в магнитосферах *эжекторов* и *георотаторов* присутствуют как замкнутые, так и уходящие на бесконечность силовые линии, магнитосферы *пропеллеров* и *аккреторов* могут быть полностью замкнуты (при сферической аккреции).

Как неоднократно отмечалось в обзорах и докладах В.С Бескина, в последние годы снизилась активность авторов, исследующих магнитосферы радиопульсаров. Зато, наметилась новая область исследований — магнитосферы магнитаров — особенно сильно замагниченных НЗ (Д.Г. Яковлевым было замечено, что уместнее именно такое написание данного термина, несмотря на устоявшееся воспроизведение англоязычного варианта; отметим также, что похожий термин «магнетор» применялся Липуновым и др. для обозначения магнитных двойных систем, где альвеновский радиус превосходит большую полуось). Исследования магнитаров особенно актуальны в приложении к МПГ (см., например, Томпсон, Дункан 1996).

Сильные магнитные поля, которыми обладают обычные НЗ, и, тем более, магнитары, существенным образом влияют на элементарные физические процессы вблизи поверхностей этих объектов. Отметим ряд критических значений напряженности магнитного поля (см. также Либерман, Йоханссон 1995):

- НЗ с полем порядка 10^8 Гс и менее можно рассматривать как незамагниченные, поскольку характерное время замедления вращения такого объекта превышает возраст Вселенной, а при аккреции магнитное поле прижимается к поверхности НЗ потоком падающего вещества ($R_A < R_{\rm NS}$) и перестает оказывать какое-либо влияние (здесь R_A— альвеновский радиус).

- При $B > \alpha^2 B_{\rm Sh} = 2.4 \cdot 10^9$ Гс (здесь $\alpha \equiv e^2/\hbar c \simeq 1/137$ — постоянная тонкой структуры, а $B_{\rm Sh} \equiv m_e^2 c^3/(\hbar e) = 4.4 \cdot 10^{13}$ Гс — Швингеровское поле) гирорадиус электрона становится меньше радиуса Боровской орбиты в атоме водорода. Более сильные поля оказывают сильное влияние на структуру атомов, которые не ионизуются полностью даже на поверхности магнитаров (Томпсон, Дункан 1995, Хейл, Херnквист 1997a). В первую очередь эти изменения сказываются на свойствах атмосфер НЗ (см. параграф 2.2.2).

  Ближе к верхней границе интервала важными становятся анизотропия теплопроводности в коре НЗ (см. 2.2.1) и рассеяния излучения в атмосфере (см. 2.2.2).

- В интервале $B_{\rm Sh} = 4.4 \cdot 10^{13}$ Гс $< B \lesssim 10^{18}$ Гс начинает происходить еще ряд интересных процессов. Энергия первого уровня Ландау начинает превышать энергию покоя электрона. Становятся существенными реакции расщепления фотона ($\gamma \to 2\gamma$), однофотонного рождения и аннигиляции электрон-позитронной пары ($\gamma \longleftrightarrow e^+ + e^-$). Причем сечения последнего процесса для фотонов с различной поляризацией в сильных полях ($\gg B_{\rm Sh}$) существенно различаются (Томпсон, Дункан 1995). Без магнитного поля эти процессы невозможны в принципе, а в слабых магнитных полях ($B \ll B_{\rm Sh}$) они происходят только для очень энергичных фотонов ($h\nu \gg m_e c^2$). Анизотропия атмосферного рассеяния и теплопроводности в коре НЗ еще более усиливается.

Верхняя граница интервала ($\sim 10^{18}$ Гс) определяется равенством энергии магнитного поля и гравитационной энергии связи НЗ. Более сильные стационарные магнитные поля по-видимому не могут существовать на НЗ.

Подробнее о новых результатах физики в сверхсильных магнитных полях можно прочесть, например, в обзорах Томпсон (2001), Михеев (2000), Дункан (2000), Хардинг (2003) (см. также материалы конференции «Сильные магнитные поля в нейтринной астрофизике» (2000) и старый, но очень хороший обзор Павлова и Гнедина (1983), посвященный поляризации вакуума и элементарным процессам в сильных магнитных полях).

Отметим дискуссию по поводу отсутствия пульсарного радиоизлучения магнитаров (см. работы Усова и Мелроуза 1996, Баринг и Хардинг 1995 и др.). Расщепление фотонов в поле магнитара конкурирует с рождением пар и приводит к быстрому снижению энергии жестких квантов. Однако неясно, достаточно ли эффективен этот процесс, чтобы объяснить полное отсутствие пульсирующего радиоизлучения у магнитаров. Отметим также работы (Томпсон и др. 2002, Лютиков и др. 2001), посвященные генерации жесткого излучения — мягких гамма-всплесков — в магнитосферах сильнозамагниченных НЗ, и спорную работу Бастуркова с соавторами (2002), в которой периоды магнитаров объясняются вращательными (нерадиальными) колебаниями НЗ. С открытием радиопульсара J1847-0130 (МакЛафлин и др. 2003), который обладает периодом 6.7 с и магнитное поле которого оценивается в $9.4 \cdot 10^{13}$ Гс, проблема радиомолчания остальных магнитаров становится более острой.

Современные спутники (Чандра, XMM-Ньютон) позволяют надеяться на открытие деталей в спектрах АРП и МПГ. Поэтому детальные расчеты рентгеновских спектров становятся очень актуальной задачей. Наиболее интересные результаты в этом направлении получены Дзане и др. (2001) — ими предсказана возможность обнаружения с помощью современных детекторов протонной циклотронной линии, которая у магнитаров с полями 10^{14}–10^{15} Гс попадает в «стандартный» рентгеновский диапазон 2–10 кэВ: $\sim 0.63\,(B/10^{14}$ Гс) кэВ (см. также недавние расчеты Озела 2003, Хо и Лая 2002). Появились сообщения об обнаружении такой линии у МПГ, см. выше (Ибрагим и др. 2002а,б).

2.2.4 Расчеты затухания магнитного поля НЗ

Молодые НЗ (радиопульсары, НЗ в массивных двойных системах и т.д.) имеют сильные магнитные поля. Старые НЗ (миллисекундные пульсары) имеют слабые поля (см. обзор по магнитным полям в работе Чанмугама 1992). Таким образом, логично предположить наличие механизма затухания поля. Затухание магнитного поля становится все более стандартным предположением при рассмотрении эволюции НЗ и описании их свойств. Вопрос же о механизме диссипации поля остается открытым. С этим связано появление в последние годы большого числа работ по этой теме (см., например, Митра и др. 2000, Таурис и Конар 2001 и др.). Впервые идея о затухании магнитного поля была высказана в пионерской работе Острайкера и Ганна (1969).

Прежде всего необходимо понять, сконцентрировано ли магнитное поле в коре НЗ, или же пронизывает и ее ядро, а также какую роль играет аккреция. Механизмы, ответственные за эволюцию поля в коре и ядре НЗ, различны. Наиболее полное исследование распада поля в коре (без учета эффектов ОТО) было проведено в работе (Урпин, Коненков 1997) (см. также Урпин и Муслимов 1992). Расчеты

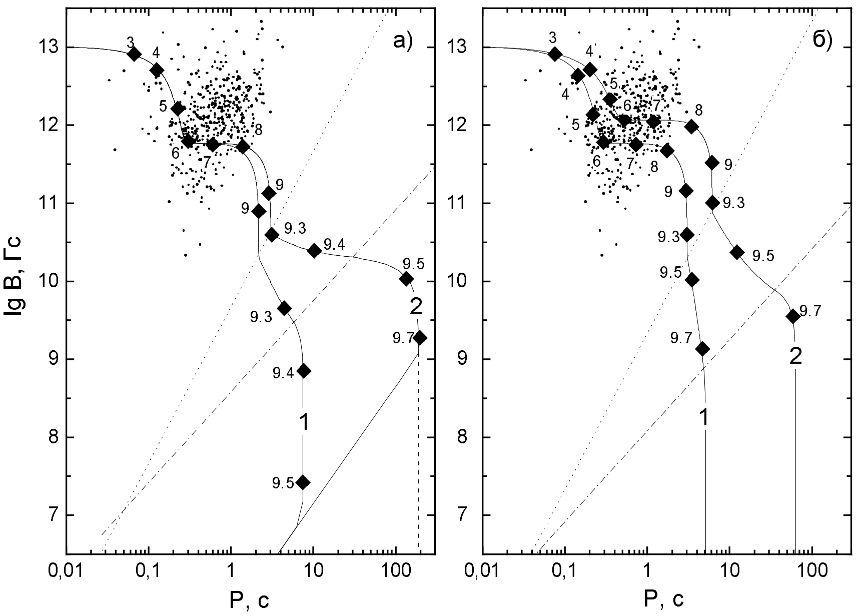

Рис. 3. Эволюционные треки НЗ для темпа аккреции $\dot{M} = 10^{-15} M_{\odot}$год$^{-1}$ (а) и $\dot{M} = 10^{-16} M_{\odot}$ год$^{-1}$ (b) (Коненков, Попов 1997). Целью вышеуказанной работы было воспроизведение наблюдаемых параметров источника RX J0720.4-3125 в модели аккрецирующей НЗ с затухшим полем. Пунктирные линии соответствуют $p = P_E$; штрих-пунктирные — $p = P_A$. Числа возле отметок на треках отмечают логарифм возраста НЗ в годах. Точками показаны радиопульсары из каталога Тейлора и др. (1993).

затухания поля, сосредоточенного в коре, с учетом эффектов ОТО приведены в (Гепперт и др. 2000, Паж и др. 2000).

Основные результаты расчета распада дипольного магнитного поля в коре одиночной НЗ таковы. Диссипация магнитного поля оказывается тесным образом связанной с тепловой эволюцией НЗ. Для *стандартного* остывания, при котором нейтринная светимость НЗ определяется в основном модифицированными урка-процессами (Петик 1992), за первый миллион лет поле распадается в 2–1000 раз в зависимости от начальной глубины залегания и уравнения состояния в ядре звезды (Урпин, Коненков 1997, см. рис. 4). По мере остывания НЗ проводимость увеличивается, и распад поля замедляется. Скорость распада на поздней стадии зависит от примесной проводимости σ_{imp} (см. рис. 4). Например, при типичном значении σ_{imp}, принятом в (Урпин, Коненков 1997), поле практически не уменьшается за последующие 10^8 лет. Однако как только магнитное поле продиффундирует сквозь всю кору и достигнет сверхпроводящего ядра (за $2 \cdot 10^9$ лет при той же σ_{imp}), распад становится экспоненциальным.

Отметим, что при отсутствии других процессов затухание поля в коре НЗ должно приводить к антикорреляции между температурой и магнитным полем молодых НЗ (т.е. чем горячее звезда, а значит, чем меньше ее масса, тем меньше ее поле).

Аккреция оказывает влияние на эволюцию поля. Во-первых, она нагревает кору нейтронной звезды (Ждуник и др. 1992), уменьшая тем самым проводимость. Во-вторых, возникает поток вещества, направленный к центру звезды, который стремится перенести поле в более глубокие слои. Как показывают расчеты (Гепперт и др. 1996), аккреция с темпом $\dot{M} < 10^{-14} M_{\odot}$ год$^{-1}$ незначительно ускоряет распад поля. Таким образом, для одиночных НЗ этими эффектами можно пренебречь.

Аккреция может воздействовать на магнитное поле НЗ еще одним способом: если аккрецируемое вещество обладает достаточно высокой проводимостью, то рас-

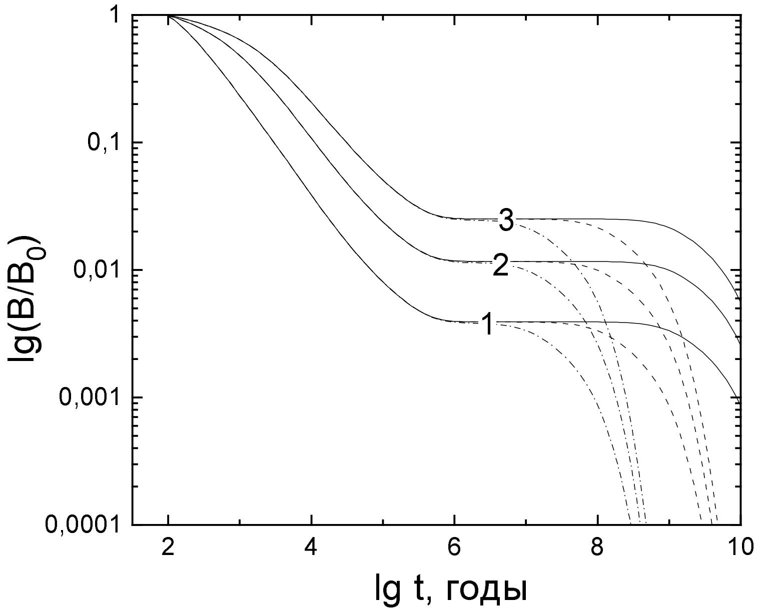

Рис. 4. Затухание магнитного поля НЗ (Коненков, Попов 1997). Кривые 1, 2, 3 соответствуют различным начальным глубинам залегания 10^{11}, 10^{12} и 10^{13} г см$^{-3}$, соответственно. Сплошные кривые соответствуют Q = 0.001, штриховые — Q = 0.01, штрих-пунктирные — Q = 0.1. Q — параметр, характеризующий концентрацию и заряды примесей в коре НЗ.

текаясь по поверхности НЗ, оно может заэкранировать магнитное поле. Впервые такой механизм был предложен Бисноватым-Коганом и Комбергом (1974), результаты численных расчетов приведены в работах (Чодури, Конар 2003, Конар, Чодури 2003). Для реализации подобного механизма в слое вещества над магнитным полем должны быть подавлены неустойчивости.

Возможен механизм, в котором поле из ядра НЗ «выталкивается» в кору за счет вращения или архимедовой силы (см. Муслимов и Цыган 1985) и там уже затухает за счет омических потерь. Недавно вычисления для этого механизма были проведены Коненковым и Гeппертом (2000, 2001а,б).

Нелинейный распад магнитного поля рассмотрен в работе (Гепперт, Рейнхардт 2002). В статье исследуется затухание поля в относительно немолодых звездах ($> 10^5$ лет). В частности, авторы объясняют большие индексы торможения некоторых

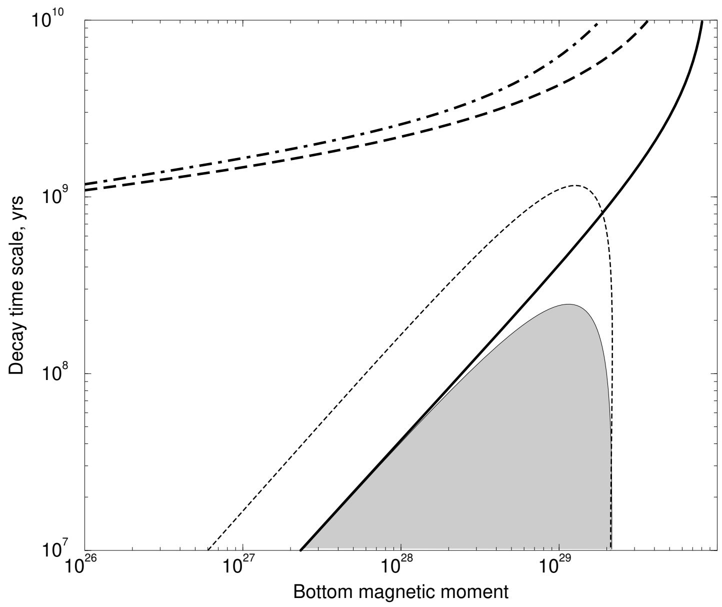

Рис. 5. Рисунок иллюстрирует области параметров, в зависимости от которых одиночная НЗ успевает выйти на стадию *аккреции*, или же остается на стадии *эжектора* (или *пропеллера*). По осям отложены характерный масштаб экспоненциального затухания магнитного поля, t_d, и минимальный магнитный момент, μ_b (ниже этой величины поле не распадается). В закрашенной области для НЗ с начальным магнитным моментом $\mu_0 = 10^{30}$ Гс см^3 время жизни на стадии *эжекции*, t_E, превосходит время жизни Галактики, 10^{10} лет. Таким образом, НЗ из этой области параметров не может стать *аккретором*. Штриховая линия соответствует условию $t_H = t_d \cdot \ln(\mu_0/\mu_b)$, где $t_H = 10^{10}$ лет, т.е. НЗ достигает минимального значения поля за Хаббловское время. Сплошная линия соответствует $P_E(\mu_b) = p(t = t_{cr})$, где $t_{cr} = t_d \cdot \ln(\mu_0/\mu_b)$, она определяет левую границу «запрещенной» области. Правая граница определяется минимальным начальным полем, при котором без распада НЗ успевает выйти на стадию *аккреции*. Эти линии и заштрихованная область нарисованы для $\mu_0 = 10^{30}$ Гс см^3. Штрих-пунктирная линия аналогична штриховой, но нарисована для $\mu_0 = 5 \cdot 10^{29}$ Гс см^3. Пунктир очерчивает область, аналогичную заштрихованной, для $\mu_0 = 5 \cdot 10^{29}$ Гс см^3 (Попов, Прохоров 2000).

радиопульсаров, полученные в работе Джонстона и Галлоувея 1999). В ряде работ рассматривались и другие нелинейные эффекты: дрейф Холла (Холлербах и Рюдигер 2002), релятивистский парамагнетизм Паули (Мандал, Чакрабарти 2002).

В работе (Колпи и др. 2000) рассмотрены три механизма распада, применимые в случае сверхсильных полей (магнитары). Авторы делают вывод, что с точки зрения наблюдений наиболее привлекательным является механизм Холловского каскада (Hall cascade).

С точки зрения эволюции одиночных НЗ распад поля может давать разные эффекты. Для некоторого набора параметров распад может уменьшить число НЗ на стадии *аккреции* (Колпи и др. 1998, Ливио и др. 1998), для другого набора — может увеличить это число (см. Попов, Прохоров 2000 и рис. 5). В первом случае из-за распада НЗ «застынет» на стадии *пропеллера*. Во втором (быстрый распад до малых полей) — исчезновение поля приведет к исчезновению барьера, и вещество сможет беспрепятственно выпадать на поверхность НЗ, начнется аккреция.

Затухание магнитного поля активно используется в популяционном синтезе радиопульсаров и НЗ других типов (см. ниже).

Кроме уменьшения магнитного поля разумно также рассмотреть возможные механизмы его увеличения, особенно на начальных стадиях жизни НЗ (по-видимому, впервые о больших полях НЗ на основании сохранения магнитного потока писал

Гинзбург в 1964 г.). В первую очередь важна т.н. термоэлектронная генерация поля (Урпин, Яковлев 1980, Блэндфорд и др. 1983, Урпин и др. 1986). Кроме этого для генерации очень сильных полей надо привлекать дополнительные механизмы (Томпсон, Дункан 1993, Спруит 1998).

2.2.5 Аккреция на одиночные НЗ из межзвездной среды и из околозвездных остаточных (remnant) дисков

Классическая теория аккреции уходит корнями в 30-40-е гг. (Бонди и Хойл 1944, Хойл и Литтлтон 1939, см. также ссылки на ранние работы в книге Горбацкого 1977). Аккрецию на одиночные НЗ начали рассматривать еще в самом начале 70-х гг. (см. Шварцман 1970в, Острайкер и др. 1970), когда стало очевидным, что аккрецирующие НЗ являются источниками рентгеновского излучения.

Физика аккреции на одиночные объекты несколько отличается от аккреции в двойных системах. Во-первых, отсутствует орбитальный момент. Во-вторых, чаще всего (при аккреции из МЗС) темп аккреции невелик (см. Тревес и др. 1993).

Для астрофизических приложений ключевым вопросом является определение темпа аккреции, $\dot{M}$. Все рассмотрение проводится для столкновительной среды, что всегда выполняется в случае аккреции на НЗ из МЗС. При аккреции Бонди одиночная НЗ, аккрецирующая вещество обычной межзвездной среды может иметь светимость порядка 10^{30}-10^{32} эрг с$^{-1}$. Если же НЗ находится в плотном молекулярном облаке (Колпи и др. 1993, Попов, Прохоров 1998), то светимость может существенно возрасти (однако облако будет поглощать мягкое рентгеновское излучение, см. раздел, посвященный поглощению).

Современные работы направлены на учет различных эффектов, которые могут изменять (обычно уменьшать) темп аккреции по-сравнению с классическими результатами Бонди и др.

Очевидно, что темп аккреции можно записать в виде: $\dot{M}=\sigma\rho_\infty v_\infty$. Определим сечение σ. В случае сферической аккреции радиус гравитационного захвата будет равным:

$$R_G=\frac{2GM}{c_s^2}, \tag{9}$$

где c_s — скорость звука в МЗС вдали от НЗ. Таким образом, $\dot{M}=4\pi R_G^2\rho_\infty c_s\propto c_s^{-3}$. Отметим сильную зависимость темпа аккреции от температуры $\dot{M}\propto T_\infty^{-3/2}$. Поэтому вопрос о прогреве МЗС излучением НЗ является исключительно важным. Остановить аккрецию прогрев не может (Бисноватый-Коган, Блинников 1980), но он может заметно уменьшить ее темп. Влияние прогрева будет рассмотрено ниже.

В случае цилиндрической аккреции ($v_\infty>c_s$) изменяется формула для радиуса гравитационного захвата:

$$R_G=\frac{2GM}{c_s^2+v_\infty^2}. \tag{10}$$

И, таким образом, для темпа аккреции имеем:

$$\dot{M}=k\pi\frac{(2GM)^2}{(c_s^2+v_\infty^2)^{3/2}}\rho_\infty\,. \tag{11}$$

Коэффициент пропорциональности, k, зависит от скорости НЗ. Грубо можно положить его равным единице. Точные аналитические решения в данном случае отсутствуют. Важным также оказывается учет влияния магнитосферы НЗ (Торопина и др. 2001).

Обратное влияние излучения аккрецирующего объекта на аккреционный поток не раз рассматривалось разными авторами, начиная с Шварцмана (1970a). В случае одиночной НЗ светимость далека от эддингтоновской, $L < 10^{-4} L_E$. Однако, как показано в работе Блаез и др. (1995), прогрев может уменьшить темп аккреции еще в несколько раз, что может многократно уменьшить число потенциально наблюдаемых одиночных аккрецирующих НЗ.

За счет жесткого излучения движущейся НЗ вокруг нее возникает кометообразная туманность размером порядка 10^{17} см для самых низкоскоростных НЗ при плотности порядка 10^{-24} г см$^{-3}$ (Блаез и др. 1995). При движении в среде с плотностью порядка 10^{-24} г см$^{-3}$ уменьшение темпа аккреции составляет от 30 раз при скорости порядка 20 км с$^{-1}$ до 3 раз при скорости 40 км с$^{-1}$, при скоростях > 60 км с$^{-1}$ отличия становятся несущественными. Также различие становится менее существенным при больших плотностях МЗС (о характеристиках МЗС см. книгу Бочкарева 1992).

Численное моделирование сферической и цилиндрической аккреции на НЗ проводилось неоднократно. Остановимся на недавних расчетах аккреции на НЗ с учетом магнитного поля (Торопин и др. 1999, Торопина и др. 2001, Романова и др. 2003, Торопина и др. 2003) (результаты этой группы также доступны в Интернете по адресу **http://www.astro.cornell.edu/us-russia/**).

В случае сферически-симметричной аккреции в расчетах было получено уменьшение темпа аккреции примерно в 2 раза по сравнению с формулой Бонди. Темп аккреции на магнитный диполь зависит от магнитного поля НЗ и от магнитной проницаемости среды: $\dot{M}_{dip} \propto \eta_m^{0.38}$, $\dot{M}_{dip} \propto (\dot{M}_B/\mu^2)$, где η_m — магнитная проницаемость, а $\dot{M}_B$ — темп аккреции Бонди.

В случае цилиндрической аккреции показано, что при наличии магнитного поля темп аккреции уменьшается в несколько раз по сравнению с незамагниченной НЗ. Чем больше магнитное поле, тем меньше темп аккреции: $\dot{M} \propto B^{-1.3}$.

Таким образом, современные исследования показывают, что темп аккреции Бонди является верхним пределом, редко реализующимся в природе.

Интересный результат был получен в работе Мока и Джосса (1998). Авторы показали, что аккреция с невысоким темпом может приводить к вспышечной активности в гамма-области за счет энергии, накопленной в коре НЗ. Для НЗ, аккрецирующей с темпом $\sim 10^{10}$ г с$^{-1}$, требуется $\sim 10^{10}$ лет, чтобы накопить энергию для вспышки максимальной энергии $\sim 5.4 \cdot 10^{45}$ эрг. Энергия выделяется в результате развития неустойчивости. В начале выделяется относительно небольшая запасенная гравитационная энергия. Это приводит к разогреву вещества, достаточного для начала термоядерных реакций, в результате которых и выделяется основная доля энергии вспышки. Все это приводит к «звездотрясению», сопровождающемуся движениями магнитных силовых линий, приводящими к гамма-всплеску (Блаез и др. 1990). В связи с падением интереса к галактическому происхождению гамма-всплесков после определения красных смещений для нескольких источников данные работы в последнее время активно не обсуждаются. Однако для астрофизики старых одиночных аккрецирующих НЗ они представляют значительный интерес. В частности, необходимо более детальное рассмотрение условия возникновения неустойчивости, запускающей весь процесс вспышки.

В последние несколько лет появилась серия работ, посвященных остаточным (remnant) аккреционным дискам вокруг молодых НЗ (см. Ротшильд и др. 2002, Мену и др. 2001a, Чаттерье и др. 2000, Марсден и др. 2000 и ссылки там). Эти исследования связаны с гипотезой о том, что активность многих молодых радиотихих НЗ связана не с энергией магнитного поля и не с остаточным теплом, а с аккрецией. Темп аккреции является функцией времени, т.к. новое вещество в диск не поступает. Аккреционный диск образуется из вещества остатка взрыва, захваченного гравитационным полем образовавшегося компактного объекта (fall-back). В настоящее время процесс обратного выпадения вещества считается стандартным в моделях взрыва сверхновой. Ранее эволюция таких дисков в основном рассматривалась в связи с образованием планет около радиопульсаров.

Получены оценки темпа аккреции, времени существования диска, изменения периода вращения НЗ, а также рассчитаны спектральные характеристики излучения. Исследованы диски разного химического состава, поскольку вещество внутренних частей остатка сверхновой должно быть существенно обогащено тяжелыми элементами. Рассчитана устойчивость дисков на разных стадиях их эволюции (Мену и др. 2001а).

В данных моделях (см. Ротшильд и др. 2002) показано, что для получения нужного эффекта достаточно диска с массой $\sim 10^{-5} M_{\odot}$, хотя его начальная масса может быть существенно большей (до $\sim 0.01 M_{\odot}$). Типичный возраст НЗ оказывается порядка тысяч и десятков тысяч лет, что находится в соответствии с независимыми оценками (в первую очередь по возрасту остатка сверхновой). Вспышки МПГ объясняются процессами в коре НЗ. Спектр диска существенно отличается от дисков Шакуры-Сюняева из-за наличия пыли.

Во многих моделях (см. Чаттерье и др. 2000, Альпар 2001) НЗ находятся не на стадии *аккреции*, а на стадии *пропеллера*. Были предложены сценарии, в которых аккреционный диск вносит вклад в увеличение периода радиопульсаров (Мену и др. 2001б, Альпар и др. 2001). В этом случае индекс торможения оказывается меньшим 3. Например, для пульсара в Крабе требуется диск с втоком вещества $3 \cdot 10^{13} - 10^{17}$ г с$^{-1}$. Для пульсара Vela требуется диск очень малой массы с сильным наклоном диска к оси вращения.

Подбором параметров, авторам удается построить «единую модель» эволюции одиночных НЗ, описывающую все наблюдаемые типы объектов (Альпар 2001). На данный момент в таких работах есть много непроработанных деталей, что приводит к тому, что модели выглядят несколько искусственными.

Существует много попыток «закрыть» дисковую модель для АРП и родственных объектов (см. Францискелли, Виерс 2002 и ссылки там).

2.2.6 Расчеты эволюции периодов вращения НЗ

Из всех параметров НЗ наиболее точно измеряются периоды их вращения. Кроме того, измерения периодов являются модельно независимыми (в отличие от температуры поверхности, массы одиночных НЗ и т.д.). Поэтому необходимо иметь хорошее описание эволюции этого параметра.

Распределение начальных периодов НЗ неизвестно (см. ван дер Сваллоу, Ву 2001, Регимбо, де Фрейтас Пачеко 2001, Шевалье, Эммеринг 1986). Наблюдения молодых НЗ с известными периодами может дать важные ограничения (Готтхелф и др. 1999) (также см. Мильяццо и др. 2002, где авторы приводят список из семи молодых радиопульсаров в остатках сверхновых, для которых удалось в рамках разумных предположений определить начальные периоды).

На начальные периоды НЗ существенное влияние могут оказывать т.н. r-моды, связанные с излучением гравитационных волн (Андерсон и др. 2000, Оуэн и др. 1998, о гравитационных волнах от НЗ см. также Брагинский 2000, Грищук и др. 2000 и Джиазотто и др. 1997, о неустойчивостях и колебаниях НЗ — Баструков и др. 1999, Линдблом 2001). Кроме того, на начальные периоды существенное влияние может оказывать возвратная аккреция, см. ниже (fall-back).

Разумно выделить четыре основные стадии эволюции НЗ: *эжектор* (E), *пропел-*

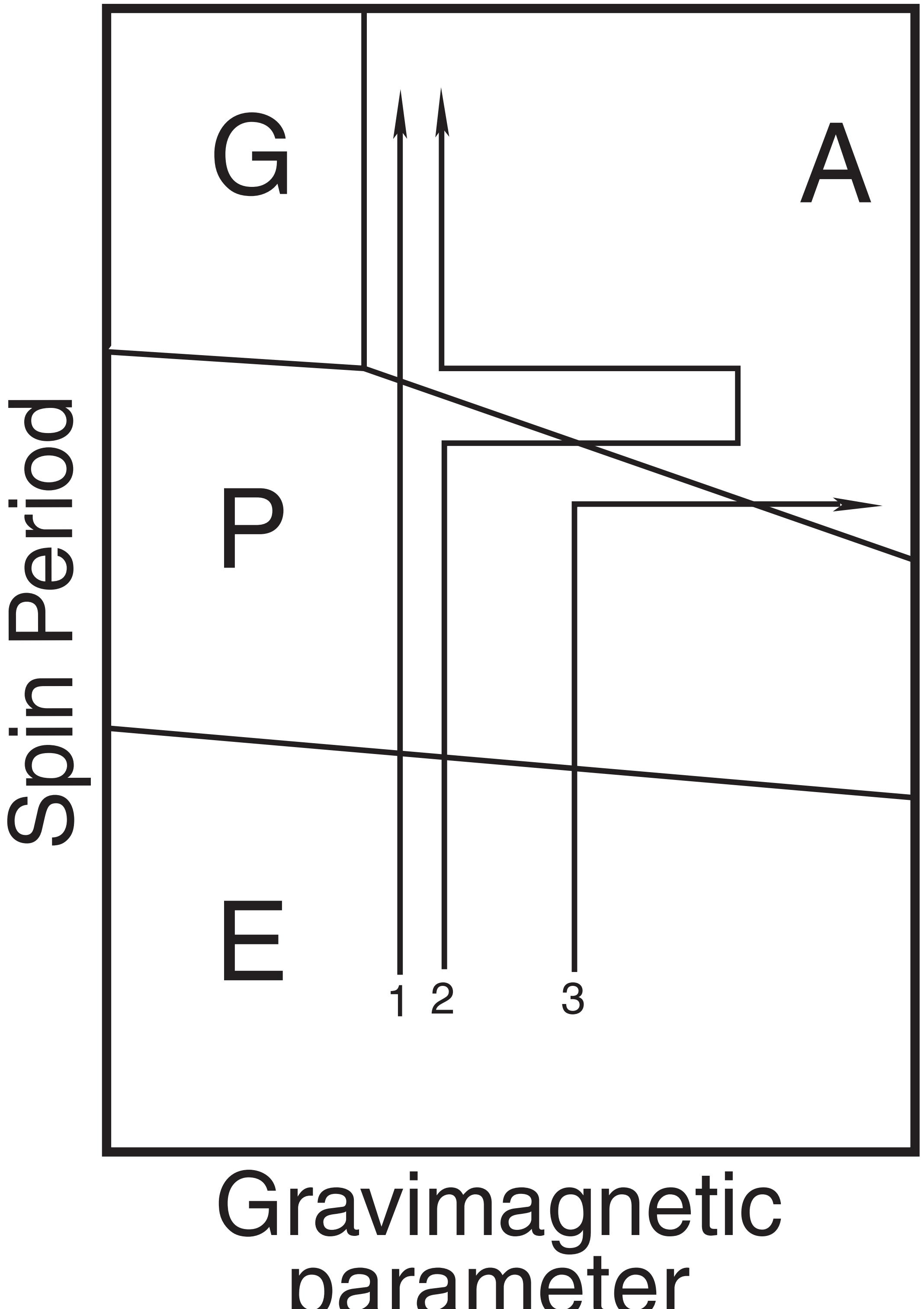

Рис. 6. $p - y$ диаграмма, позволяющая проиллюстрировать эволюцию одиночной НЗ (см. Липунов 1987, Липунов, Попов 1995). По горизонтальной оси отложен гравимагнитный параметр, $y = \dot{M}/\mu^2$. Схематично показаны три эволюционных трека. *1* — постоянные внешние условия и магнитное поле, *2* — пролет области плотного газа (например, молекулярного облака), *3* — трек с затуханием магнитного поля.

лер (P), *аккретор* (A) и *георотатор* (G) (см. Липунов 1987, Липунов и др. 1996). На стадии *эжектора* поток электро-магнитных волн и релятивистских частиц от НЗ «выдувает» окружающее вещество за пределы всех характерных радиусов. Типичными представителями *эжекторов* являются радиопульсары. Заметим, что стадия радиопульсара заканчивается раньше стадии *эжектора* (Аронс 2000, Чен и Рудерман 1993). Продолжительность стадии *эжектора* при постоянном поле составляет:

$$t_E \approx 10^9 \mu_{30}^{-1} n^{-1/2} v_{10} \text{ лет.} \tag{12}$$

На стадии *пропеллера* аккреция невозможна из-за наличия быстровращающейся магнитосферы (Илларионов, Сюняев 1975, Шварцман 1970в). *Георотатором* мы называем стадию, на которой радиус магнитосферы настолько велик, что вещество не захватывается НЗ гравитационно.

Конкретное состояние НЗ определяется соотношениями между четырьмя характеристическими радиусами: $R_l = c/\omega$ — радиусом светового цилиндра, R_{st} — радиусом остановки (например альвеновский радиус, R_A, это частный случай радиуса остановки, см. Липунов 1987), $R_G = (2GM)/v^2$ — радиусом гравитационного захвата и $R_{co} = (GM/\omega^2)^{1/3}$ — радиусом коротации. Здесь M – масса НЗ, c — скорость света, ω — частота вращения, $v^2 = v_\infty^2 + c_s^2$, c_s — скорость звука, v_∞ — скорость НЗ относительно МЗС.

Соотношение между радиусами определяет два критических периода: P_E и P_A, разделяющих различные стадии эволюции НЗ. Эти периоды могут быть оценены по формулам (Липунов 1987):

$$P_E = 2\pi \left(\frac{2\,k_t}{c^4}\right)^{1/4} \left(\frac{\mu^2}{v\dot{M}}\right)^{1/4}, \quad R_l < R_G, \tag{13}$$

$$P_A = 2^{5/14}\pi (GM)^{-5/7} \left(\frac{\mu^2}{\dot{M}}\right)^{3/7}, \quad R_A < R_G. \tag{14}$$

Здесь μ — магнитный дипольный момент, $\dot{M} \equiv \pi R_G^2 \rho v$ — темп аккреции, ρ — плотность МЗС, k_t – безразмерная константа порядка единицы.

Если $p < P_E$, то НЗ находится на стадии *эжектора*; если $P_E < p < P_A$, мы имеем НЗ на стадии *пропеллера*; наконец, если $p > P_A$ и $R_{st} < R_G$, то НЗ является *аккретором*.

Когда $p > P_A$, но $R_{st} > R_G$ то аккреция невозможна, т.к. образуется геоподобная магнитосфера. Заметим, что замедление на стадии *георотатора* подобно замедлению на стадии *пропеллера* (см. ниже). Численно стадия *георотатора* исследовалась в работах (Торопина и др. 2001, Романова и др. 2001). Также некоторые аспекты рассматривались в (Рутледж 2001).

На стадии *эжектора* эволюция периода определяется потерями энергии вращения НЗ на излучение:

$$\dot{p} = \frac{8\pi^2 R^6}{3c^3 I} \cdot \frac{B^2(t)}{p}, \tag{15}$$

где R — радиус НЗ, I — момент инерции, $B = \mu/R^3$ — магнитное поле на поверхности. Ось магнитного диполя предполагается перпендикулярной оси вращения.

Существуют различные интерпретации этого замедления (см. Бескин и др. 1993). Однако магнитодипольная формула удовлетворительно описывает наблюдения (существует ряд работ, привлекающих дополнительное замедление, связанное с существованием остаточного аккреционного диска, см. выше пункт, посвященный аккреции).

На стадии *пропеллера* НЗ замедляется из-за передачи углового момента окружающему веществу (Шварцман 1970в, Илларионов, Сюняев 1975). Существует множество формул, описывающих замедление на стадии *пропеллера* (см. Липунов 1987, Липунов, Попов 1995). Фактически все они сводятся к виду:

$$\frac{dI\omega}{dt} = -k_t \frac{\mu^2}{R_A^3}. \tag{16}$$

Множитель k_t будет различным в разных моделях, в том числе он может зависеть от частоты вращения НЗ.

В работе (Липунов, Попов 1995) было сформулировано важное утверждение: для постоянного магнитного поля длительность стадии *эжектора* при разумных параметрах всегда больше длительности стадии *пропеллера*. В случае затухания поля это может быть не так. В недавних работах было показано, что распад магнитного поля может как увеличить количество НЗ на стадии *пропеллера* (Колпи и др. 1998, Ливио и др. 1998), так и уменьшить его, если распад очень быстрый и идет до низких значений полей (Попов, Прохоров 2000).

Отметим также, что существенной может быть стадия дозвукового *пропеллера* (она соотвествует условию $p > P_A$, но нагрев на границе магнитосферы и турбуленция делают аккрецию невозможной или существенно ее подавляют). Описание стадии см. в (Липунов 1987), в приложении к одиночным НЗ стадия была очень кратко рассмотрена в (Липунов, Попов 1995, см. также Тревес и др. 1993). В своей недавней работе Ихсанов (2003) вновь привлек внимание к этой стадии в связи с ее недоучетом ранее. Однако здесь необходимо более детальное исследование, чем простое применение результатов работы (Дэвис, Прингл 1981). Ввиду относительно большой удаленности радиуса гравитационного захвата от границы магнитосферы в случае одиночных НЗ возможна промежуточная стадия между сверхзвуковым и классическим дозвуковым *пропеллером* (в этом случае турбуленция должна быть дозвуковой везде до внешней границы), когда на границе магнитосферы турбулентность является дозвуковой, но переход через скорость звука осуществляется до достижения внешней границы. Торможение на этой стадии может быть очень существенным (как и на стадии сверхзвукового *пропеллера*), т.о. переход на стадию классического дозвукового *пропеллера* будет осуществляться при очень длинных периодах ($\sim 10^4$ с и более). Кроме того, радиус магнитосферы на стадии *пропеллера* может быть существенно больше классического Альвеновского радиуса,

$$R_A = \left(\frac{\mu^2}{2\dot{M}\sqrt{GM}}\right)^{2/7}$$

(см., например, Липунов 1987).

Увеличение продолжительности стадии *пропеллера* (за счет дозвукового этапа или же за счет неэффективного торможения) может привести к существенному пересмотру числа *аккреторов* (в сторону его уменьшения) и их свойств (на стадии *аккретора* будут оказываться лишь очень низкоскоростные НЗ с достаточно большими магнитными полями; периоды вращения будут очень большими, т.к. момент начала аккреции будет определяться новым критическим периодом, существенно превосходящим определенный выше P_A.). В связи с этим желательны более детальные исследования этой стадии, включая трехмерные расчеты, подобные старым двумерным расчетам Ванга и Робертсона (1985) (см., например, Торопин и др. 1999) с учетом различных механизмов выделения и переноса энергии.

На стадии *аккретора* на НЗ действуют два момента сил:

$$\frac{dI\omega}{dt} = K_{sd} + K_{turb}, \tag{17}$$

$$K_{sd} = -k_t \frac{\mu^2}{R_{co}^3}.$$

Здесь K_{sd} – тормозящий момент сил, связанный с магнитным полем НЗ, а K_{turb} – момент сил, возникающий из-за того, что МЗС может быть сильно турбулизована. K_{turb} действует случайно, и может как ускорять, так и замедлять НЗ (см. Липунов, Попов 1995).

Отметим, что в приведенной выше формуле мы можем как переоценивать, так и недооценивать замедляющий момент, т.к. детали передачи момента внешней среде неясны. Если указанная выше формула применима, то аккреция должна быть существенно дозвуковой, а значит темп аккреции на НЗ будет ниже определяемого по формуле Бонди. При эффективной аккреции, соответствующей формуле Бонди, темп уноса углового момента должен быть меньше.

Изменение периода аккрецирующей НЗ связано со взаимодействием с турбулизованной МЗС. Это вносит свою специфику в задачу об эволюции периода. Если принять гипотезу об ускорении нейтронной звезды в турбулизованной МЗС (Липунов, Попов 1995), то возникает новый характерный период, P_{eq}. Он определяется условием квазиравновесия процессов замедления (оно определяется как торможением за счет магнитного поля НЗ, так и аккрецируемым моментом) и ускорения (определяется только моментом аккрецируемого вещества).

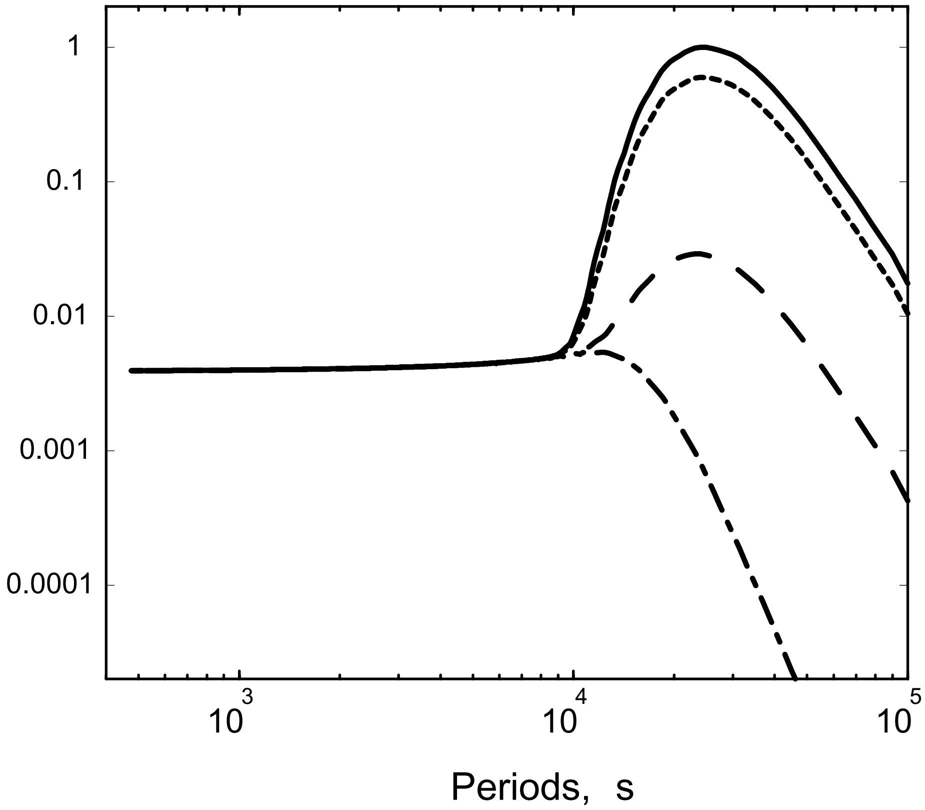

Рис. 7. Эволюция распределения периодов вращения одиночных аккрецирующих НЗ (Прохоров и др. 2002а). Параметры задачи: $\mu = 10^{30}$ Гс·см^3, $n = 1$ см$^{-3}$, $v = 10$ км с$^{-1}$. Кривые относительных плотностей распределения по периодам нарисованы для четырех моментов времени от $1.72 \cdot 10^9$ лет до $9.8 \cdot 10^9$ лет с момента рождения НЗ. Для выбранных параметров $t_A \simeq 1.7 \cdot 10^9$ лет. Видно, что требуется значительное время для достижения квазистационарного распределения (для некоторых наборов параметров время достижения такого состояния больше Хаббловского). НЗ пересекает горизонтальную часть распределения от $\simeq 10^2$ с до 10^4 с примерно за $\sim 6 \cdot 10^7$ лет. Кривые нормированы на единицу в максимуме самой высокой кривой.

В реальной ситуации (Прохоров и др. 2002а) квазиравновесие не достигается (рис. 7). Для определения распределения НЗ по периодам надо решать дифференциальное уравнение, используя реалистичные распределения НЗ по скоростям и магнитным полям.

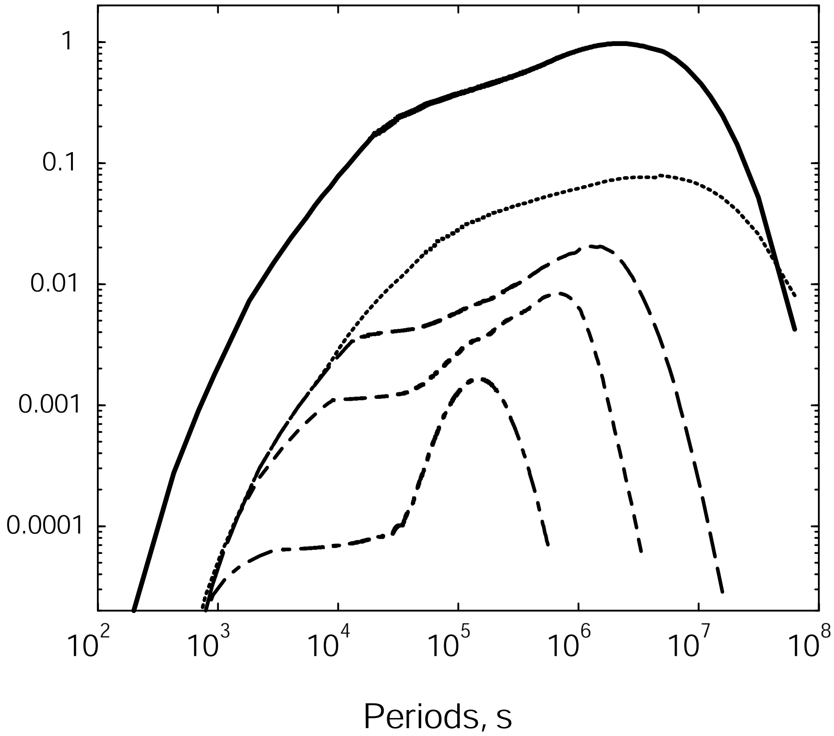

Рис. 8. Распределение периодов вращения одиночных аккрецирующих НЗ (Прохоров и др. 2002а). В этих расчетах распределение НЗ по скоростям было максвелловским с дисперсией 140 км с$^{-1}$, магнитные поля были распределены в соответствии с данными для радиопульсаров. Верхняя кривая показывает относительное распределение НЗ по периодам для концентрации МЗС $n = 1$ см$^{-3}$. Вторая (пунктирная) — для $n = 0.1$ см$^{-3}$. Другие кривые рассчитаны для низкоскоростных НЗ ($v < 60$, 30, 15 км с$^{-1}$ соответственно) при $n = 0.1$ см$^{-3}$. Кривые нормированы на единицу в максимуме самой верхней.

Расчеты для постоянного магнитного поля и максвелловского распределения НЗ по скоростям показали наличие широкого максимума в распределении вблизи периодов 10^6–10^7 секунд (Прохоров и др. 2002а). Распределение периодов для разных параметров показано на рис.8. Таким образом, в такой модели следует ожидать отсутствия наблюдений периодов вращения аккрецирующих НЗ (типичное время наблюдения на рентгеновском спутнике порядка $10^4 - 10^5$ секунд).

В случае распада поля ситуация будет совсем иной (Ванг 1997, Коненков, Попов 1997). Период «застынет», запомнив значение, соответствующее начальному полю (см. рис. 3), и можно ожидать появления аккрецирующих НЗ с периодами порядка 10 секунд.

Качественная картина эволюции периода для случая постоянного поля показана на рис. 9.

Распределение периодов АРП и МПГ исследовалось в работе Псалтиса и Миллера (2002). В этой статье авторам не удалось получить серьезных ограничений на значение начального периода, т.к. показатель торможения для АРП и МПГ известен очень плохо. Единственным положительным (хотя и очевидным) результатом является необходимость «выключения» АРП и МПГ на периодах, близких к максимальным из наблюдающихся (порядка 12 с).

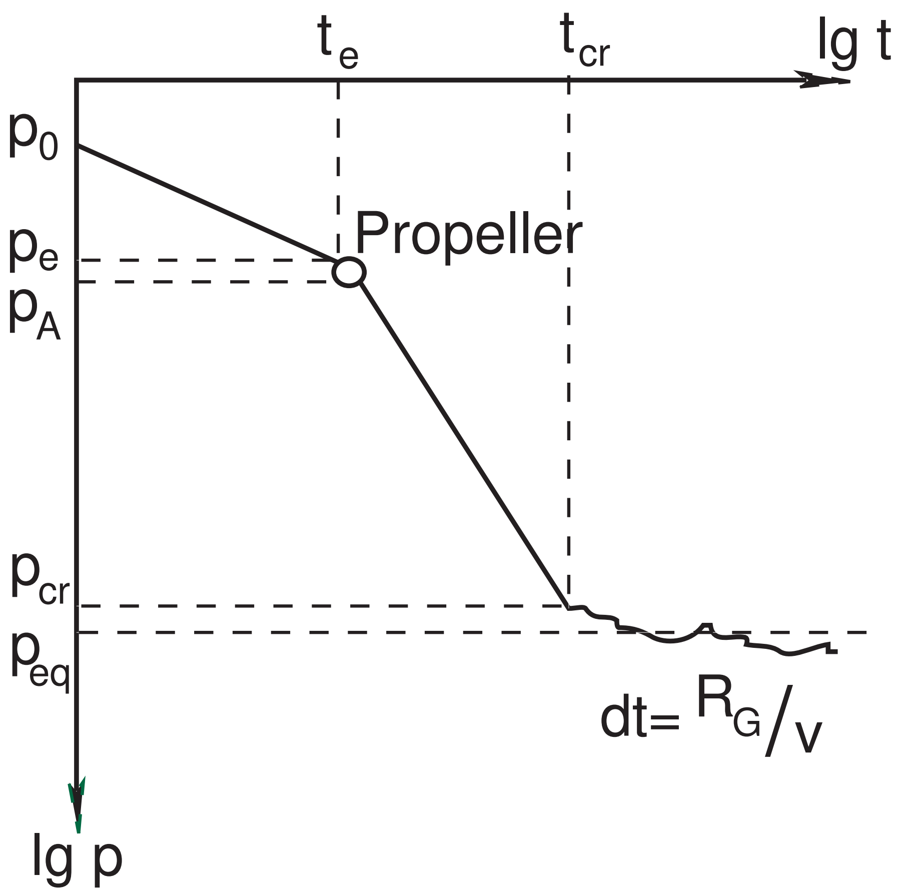

Рис. 9. Эволюция одиночной НЗ в турбулизованной МЗС. После замедления на стадии *эжектора*, когда период достигает $p = P_E$, и короткой стадии *пропеллера*, показанной на рисунке кружком, НЗ попадает на стадию *аккретора* ($p > P_A$). В начале этой стадии торможение за счет магнитного поля оказывается более существенным, чем изменение момента за счет аккреции турбулизованной среды. Затем в момент $t = t_{cr}$ эти два эффекта сравниваются, и период начинает флуктуировать. На этой стадии типичным периодом является P_{eq}, при этом отклонения могут быть очень значительными. Типичный временной масштаб флуктуаций $dt = R_G/v$ (подробнее см., Попов 2001).

В расчетах магнитовращательной эволюции НЗ существует еще много нерешенных вопросов.

2.2.7 Изменение угла между осью вращения и магнитной осью

Обычно обсуждаются такие параметры НЗ как масса, период, магнитное поле. Как правило понятие эволюции применяется к последним двум (т.н. магнито-вращательная эволюция). Еще одна важная величина — угол между магнитной осью (диполя) и осью вращения, α. Этот параметр также может существенно изменяться в течение жизни НЗ.

Существует два различных варианта поведения α. В одном, угол α увеличивается с течением времени (см. Бескин и др. 1993). В другом — уменьшается. Последнее в англоязычной литературе называется alignment (схождение). Впервые, по-видимому, проблему схождения в рамках модели вращающегося диполя в вакууме начали обсуждать Голдрайх (1970) и Дейвис, Голдштейн (1970). Мотивация этого подхода довольно проста: потери (по магнито-дипольной формуле) тем меньше, чем меньше угол. Соответственно, НЗ приходит в положение наименьших потерь. Под это можно подвести основательную теоретическую базу (см. Мейси 1974, Кэнди и Блэр 1986, Джонс 1976, 1977). В рамках более детализированной модели Бескина и др. (1993) угол наоборот увеличивается.

В пользу обеих моделей существуют наблюдательные аргументы (см. недавнюю дискуссию в работах Регимбо и де Фрейтас Пачеко 2001, а также Таурис и Манчестер 1998). Однако пока выбрать какой-либо из двух вариантов не представляется возможным.

К вопросам эволюции периода вращения одиночных нейтронных звезд и ориентации их осей вращения близко примыкает вопрос об их прецессии. Данные о прецессии молодых НЗ (радиопульсаров) приведены в обзоре Линка (2002). О возможном обнаружении 60-секундной свободной прецессии пульсара в Крабовидной туманности по стробоскопическим оптическим наблюдениям см. (Видри и др. 2003). Измерение периода прецессии позволяет определить свойства коры НЗ.

2.2.8 Роль межзвездного поглощения

Для многих исследований, рассматриваемых в данном обзоре, важным является учет межзвездного поглощения в рентгеновском диапазоне. Межзвездное поглощение велико в мягком рентгеновском диапазоне ($\sim 0.1-1$ эВ) (см. Вилмс и др. 2000). Поэтому наблюдения рентгеновских источников на различных энергиях демонстрируют нам выборки объектов с разной селекцией по расстоянию. Из вышеперечисленных типов источников этот эффект наиболее существенен для слабых рентгеновских источников в диске Галактики. Объекты этого типа мы не можем наблюдать уже на расстояниях порядка 1 кпк.

Некоторые из рассматриваемых нами источников имеют максимумы излучения вблизи 0.1 кэВ. Спутники, с которых производят наблюдения этих объектов, работают в диапазонах энергий $\sim 0.1-1$ кэВ, некоторые выше, до ~ 10 кэВ. В этом интервале энергий поглощение рентгеновского излучения в межзвездной среде достаточно велико и обязательно должно учитываться.

В самом общем виде поглощение может быть описано формулой:

$$I = I_0 \exp\left(-\sigma_{\rm ISM}(E,Z)\cdot N_{\rm H}(\mathbf{n},r)\right)\,. \tag{18}$$

Здесь I и I_0 — интенсивности излучения на детекторе и у источника, соответственно, $\sigma_{\rm ISM}$ — сечение поглощения, приходящееся на один атом водорода, и $N_{\rm H}=\int\limits_0^r n_{\rm H} d\ell$ — количество водорода на луче зрения между источником и приемником. На больших расстояниях от Солнца $\sigma_{\rm ISM}$ также будет зависеть от $\mathbf{n}$. Данная формула приведена не столько для того, чтобы напомнить закон поглощения, сколько для явного указания параметров, от которых зависит данный процесс.

Удельное сечение поглощения в рассматриваемом нами диапазоне очень быстро убывает с ростом энергии E и достаточно сильно зависит от химического состава МЗС, главным образом от содержания металлов Z в межзвездном газе. Сечение умножается на лучевую плотность $N_{\rm H}$, которая зависит как от расстояния r до источника, так и от его положения на небе (которое обозначалось единичным вектором $\mathbf{n}$). Рассмотрим каждую из величин подробнее.

В рассматриваемом спектральном диапазоне теоретические значения элементарных сечений фотоионизации различных атомов и молекул хорошо известны и вносят

наименьшую ошибку в соотношение (18). Сечение поглощения $\sigma_{\rm ISM}$ складывается из фотопоглощения на атомах различных элементов и молекулах, поглощения на пыли, поглощения и рассеяния на ионах и свободных электронах. В различных компонентах МЗС (холодной, теплой, горячей), оказывающихся на луче зрения, роль перечисленных процессов различна.
Оценки показывают (Вилмс и др. 2000), что вкладами теплой и горячей (ионизованной) фаз МЗС можно пренебречь, поскольку большая часть межзвездной среды находится в слабоионизованном состоянии. Такое допущение нельзя делать для источников в остатках сверхновых, или если на луче зрения оказывается мощная область ионизации.

В МЗС для энергий $E < 5-10$ кэВ основную роль в поглощении играют процессы фотоионизации, и сечение поглощения $\sigma_{\rm bf}$ быстро убывает с ростом E. Эта зависимость близка к $\sigma_{\rm bf} \propto E^{-3}$, поскольку суммарный коэффициент поглощения состоит из совокупности фотоионизационных K–скачков для различных элементов, за каждым из которых сечение поглощения убывает приблизительно как $\propto E^{-3}$. Точнее, величина $\sigma_{\rm bf} E_{\rm keV}^3$ изменяется от $\sim 70\cdot10^{-24}$ см$^{-2}$ при $E = 0.1$ кэВ до $\sim 1000\cdot10^{-24}$ см$^{-2}$ при $E = 10$ кэВ (при солнечном химсоставе).

Суммарное сечение поглощения зависит от количества тяжелых элементов в МЗС. Наиболее простым предположением о химическом составе межзвездного газа является его совпадение с солнечным. Это не вполне корректно, так как измерения химического состава среды вне Солнечной системы указывают, что обилие тяжелых элементов там ниже, чем в Солнце, и составляет ~ 70–80% от этого уровня для разных химических элементов (Софиа и др. 1994, Саваж и Сембах 1996). Во столько же раз уменьшается сечение поглощения атомарного газа. Вероятно, основной причиной недостатка тяжелых элементов в МЗС по сравнению с Солнцем является их частичная конденсация в виде межзвездной пыли, которая в Солнце полностью испарена и перемешана с веществом.

Из межзвездных молекул следует принимать во внимание только молекулярный водород $\rm H_2$. В среднем в МЗС $\rm H_2$ составляет 20–25% от H I (Грингел и др. 2000), однако это отношение обладает как сильной систематической зависимостью от расстояния от центра Галактики, так и существенными различиями на малых угловых масштабах. Указанное поведение вызвано тем, что основная доля $\rm H_2$ заключена в молекулярных облаках, а большая часть таких облаков образует кольцо на расстоянии ~ 5 кпк от центра Галактики.

Поглощение, вызываемое межзвездной пылью, невелико, не более нескольких процентов от полного сечения $\sigma_{\rm ISM}$. Его зависимость от E примерно такая же, как и при фотоабсорбции. Исключение составляют ситуации, когда на луче зрения оказываются богатые пылью молекулярные облака или протозвездные объекты.

Последний нерассмотренный компонент — ионизованная фаза МЗС. Можно сразу сказать, что в МЗС для рентгеновского диапазона свободно–свободное поглощение неважно (см., например, Бочкарев 1992). А вот томсоновское рассеяние на электронах, которое практически не зависит от E, необходимо учитывать для $E > 10$ кэВ или для $N_{\rm H} \gtrsim 10^{22}$ см$^{-2}$.

Типичные для Галактики значения лучевой плотности составляют $N_{\rm H} = 10^{20}$–10^{22} см$^{-2}$. Следует заметить, что величина $N_{\rm H}$ может испытывать существенные локальные увеличения на малых угловых масштабах в отдельных точках небесной сферы. Это происходит, если, например, поток излучения от рентгеновского источника пересекает компактное уплотнение МЗС, например, туманность, остаток сверхновой или молекулярное облако.

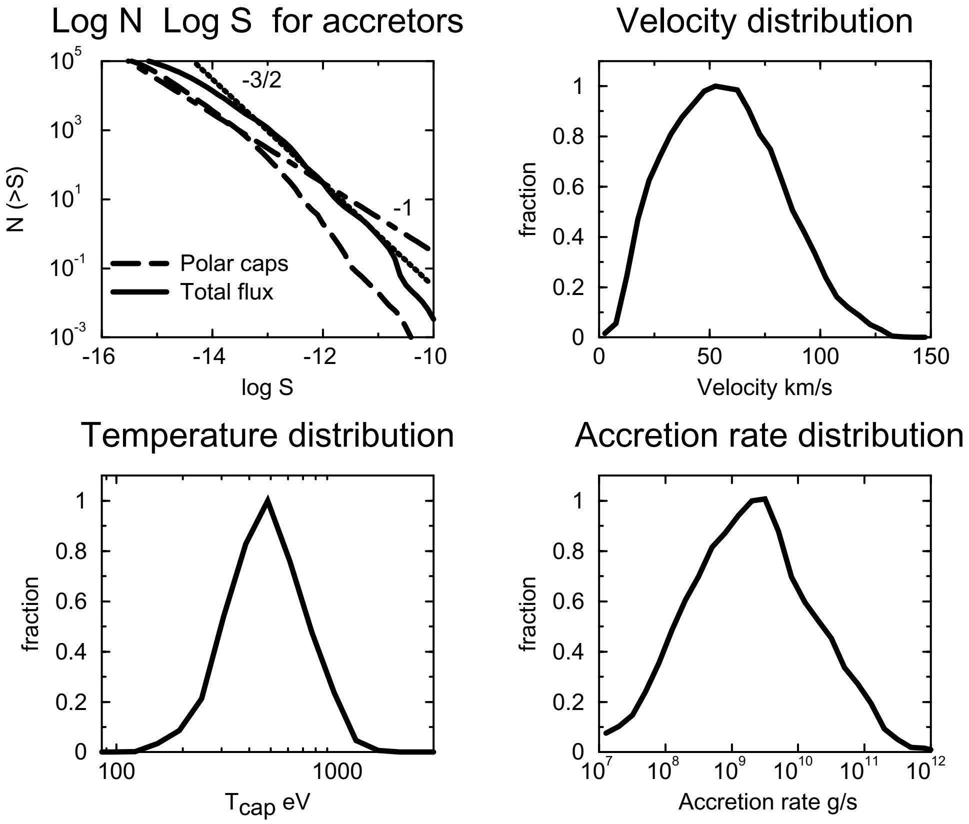

Рис. 10. Результаты популяционного синтеза одиночных аккрецирующих НЗ (Попов и др. 2000б). На верхнем левом рисунке приведены кривые Log N – Log S для полного потока (рассчитанного по формуле Бонди и 100-процентной эффективности аккреции) и для аккреции на полярные шапки в диапазоне 0.5-2 кэВ. Магнитное поле предполагалось постоянным с распределением, соответствующим наблюдающемуся у радиопульсаров. Распределение по скоростям было максвелловским со средним значением 300 км c^{-1}. На трех других рисунках показано распределение аккрецирующих НЗ по скоростям, температурам и темпу аккреции.

2.2.9 Популяционный синтез НЗ

В последнее время популяционный синтез стал популярным методом в различных областях астрофизики. В первую очередь он применяется для изучения эволюции двойных и одиночных звезд (см. Липунов и др. 1996, Фритце-ф.Альфенслебен 2000).

Обычно моделирование проводится методом Монте-Карло. Задаются начальные параметры объектов и законы их изменения. В идеале стремятся получить все эти данные в аналитической форме, хотя часто используют и затабулированные данные.

Сравнение с наблюдениями может проводиться как на уровне параметров отдельных объектов, так и на уровне интегральных параметров (например, интегральный спектр галактики).

Как правило в популяционных моделях эволюционный трек отдельного члена популяции не имеет очень высокой точности. Однако большая совокупность объектов позволяет судить о таких важных параметрах, как распределение начальных параметров, а также делать предсказания, касающиеся популяции в целом.

Метод популяционного синтеза дает существенные преимущества по сравнению с исследованием свойств индивидуальных объектов (см., например, Липунов и др. 1996). Различные популяции изолированных НЗ не раз изучались с помощью данного метода (см. Пачинский 1990, Бхатачарья и др. 1992, Прохоров, Постнов 1993, 1994, Мадау и Блаез 1994, Мэннинг и др. 1996). Детальное изучение НЗ в применении к

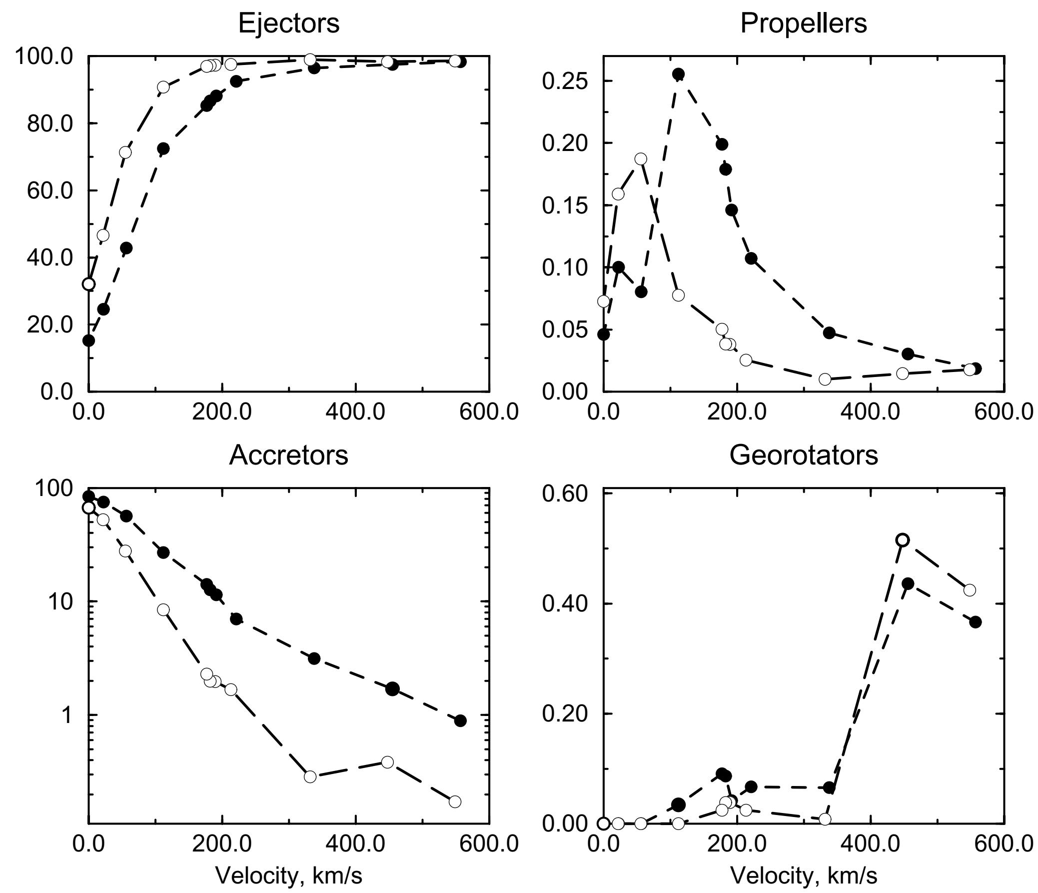

Рис. 11. Результаты популяционного синтеза одиночных НЗ (Попов и др. 2000а). Показано распределение НЗ по стадиям (*эжекторы*, *пропеллеры*, *аккреторы* и *георотаторы*) для постоянного магнитного поля в зависимости от средней скорости НЗ. Белые кружки — $\mu_{30} = 0.5$, черные — $\mu_{30} = 1$. μ — магнитный момент. По горизонтальной оси отложена средняя скорость НЗ (для максвелловского распределения).

слабым рентгеновским источникам в диске Галактики и в шаровых скоплениях было недавно проведено в (Попов и др. 2000б, Попов, Прохоров 2002). Исследовался вклад одиночных аккрецирующих НЗ в рентгеновский фон (Дзане и др. 1995), а также НЗ в центре Галактики (Дзане и др. 1996).

В работе Попов и др. 2000а (см. рис 11) было получено распределение НЗ по стадиям (*эжектор*, *пропеллер*, *аккретор* и *георотатор*). Расчеты показали, что большая часть НЗ находится на стадии *эжекции*. Это связано с высокими (в среднем) пространственными скоростями этих объектов (Лайн и Лоример 1994, Кордес и Чернофф 1997, 1998, Хансен и Финней 1997, Хартман 1997, Рамачандран 1999, Кордес 1998, Арзуманян и др. 2002, см. также Тревес и др. 1998). *Аккреторы* составляют порядка нескольких процентов от всей популяции в случае постоянного магнитного поля.

Эволюция двойных и одиночных радиопульсаров неоднократно исследовалась методом популяционного синтеза. Здесь мы не будем рассматривать миллисекундные радиопульсары (см. Поссенти и др. 1999, Колпи и др. 2001), обратимся к эволюции одиночных пульсаров, следуя серии работ (Вербунт и др. 1999, Бхатачарья и др. 1992, Хартман и др. 1997).

Одним из ключевых вопросов в эволюции НЗ является проблема распада магнитного поля. Если в двойных системах распад может быть ускорен аккрецией вещества (см. Гепперт и др. 1996), то в одиночной НЗ распад обусловлен только внутренними причинами. Поэтому именно исследование изолированных объектов представляет

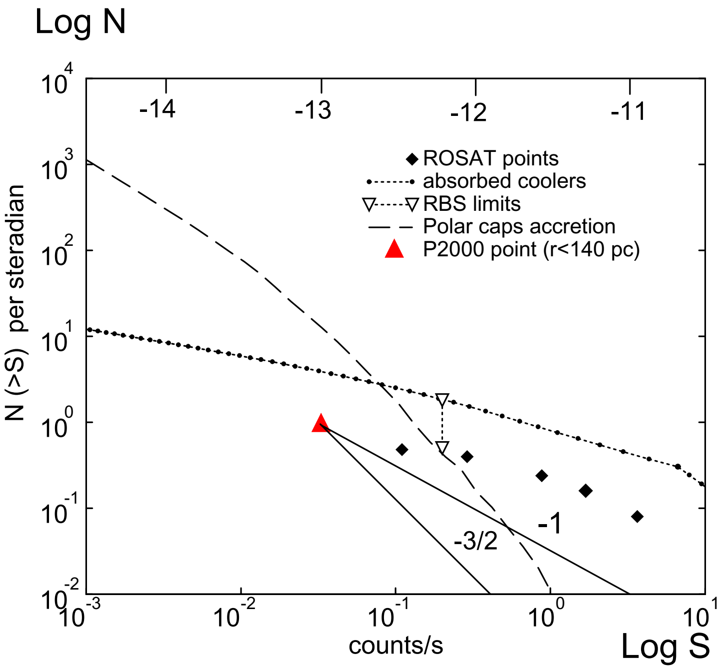

Рис. 12. Диаграмма Log N — Log S (из работы Попов 2001, с исправлениями, отметим, что и в работе Попов и др. 2000б на рис. 2 и 3 допущена неточность в представлении некоторых кривых, непринципиальная для основных выводов работы). На горизонтальной оси отложены отсчеты в секунду для спутника ROSAT. Ромбами показаны объекты «великолепной семерки». Треугольники — предел из ROSATовского каталога ярких источников. Пунктирная кривая — результаты расчетов для аккрецирующих НЗ с постоянным магнитным полем, аккреция идет на полярные шапки. Точки – кривая для молодых охлаждающихся НЗ в предположении их высокой пространственной плотности в окрестностях Солнца. Черным треугольником показана точка, соответствующая расчетам Попова и др. (2000а), для наглядности от нее проведены прямые с наклоном -1 и $-3/2$. Видно, что аккрецирующие НЗ с постоянным магнитным полем не могут объяснить наблюдения. Требуется повышенная плотность молодых НЗ (это может объясняться Поясом Гулда, см. Попов и др. 2002) для объяснения наблюдаемой кривой Log N — Log S.

особый интерес (Попов, Прохоров 2000). Поскольку до недавнего времени только радиопульсары удовлетворяли этому требованию, не удивительно, что авторы работ (Вербунт и др. 1999, Бхатачарья и др. 1992, Хартман и др. 1997) обратились именно к ним.

Специфическая трудность заключена в сравнении результатов с наблюдениями. Дело в том, что пульсарные данные подвержены множеству селекционных эффектов. Для сравнения расчетов с данными наблюдений необходимо ввести критерий детектируемости для моделируемых НЗ. Кроме этого, данные по расстояниям до пульсаров не обладают высокой степенью надежности (например, в 1994 году они были существенно пересмотрены (Лайн, Лоример 1994), новые данные см. в Кордес, Лацио 2002).

Кроме изменения периода вращения и величины магнитного поля в расчетах необходимо учитывать движение НЗ в Галактике, т.к. за время жизни пульсар может существенно удалиться от места своего рождения.

Наилучшего согласия с данными наблюдений авторы достигли используя следующий набор параметров: $\tau \sim 10^8$ лет, $\log B_0 = 12.34$, $\sigma_B = 0.34$. Здесь $B = B_i \exp(-t/\tau)$, а распределение начальных полей соответствует распределению:

$$B = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_B} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{\log B_i - \log B_0}{\sigma_B}\right). \qquad (19)$$

Последняя (по времени) попытка популяционного синтеза радиопульсаров с учетом затухания магнитного поля приведена в работе (Регимбо и де Фрейтас Пачеко 2001). Авторы также пришли к выводу о том, что наличие затухания на временах, превышающих время жизни пульсара, способствует улучшению статистики. Кроме того, в работе показано, что хороших результатов можно достичь и без затухания, если в процессе эволюции НЗ увеличивается угол между магнитной осью и осью вращения (см. Бескин и др. 1993, где приводятся теоретические аргументы в пользу такой эволюции). Кроме этого, авторы делают вывод о том, что наличие магнитаров может быть объяснено без бимодальности функции распределения НЗ по магнитным полям, и оценивают темп рождения магнитаров как 1/750 лет.

Кроме исследования популяции радиопульсаров в целом различные авторы рассматривали важный вопрос об ассоциации этих объектов с остатками сверхновых. Впервые к вопросу о малом числе пар (ассоциаций) обратились в конце 80-х (Браун и др. 1989, Нараян, Шаудт 1988). Нараян и Шаудт предположили, что пульсары не наблюдаются в некоторых остатках из-за того, что магнитное поле слишком слабо или период вращения НЗ слишком велик, т.е. пульсар находится или очень близко к линии смерти или же уже за ней (о линии смерти см. Чен и Рудерман 1993, Аронс 2000). Более современные расчеты были проведены в работах Генслера и Джонстона (1995а,б,в). Основной вывод работы Генслера и Джонстона (1995в) заключается в том, что даже если каждая сверхновая порождает радиопульсар, то число ассоциаций будет меньше наблюдаемого. Т.е. среди имеющихся пар пульсар+остаток часть является лишь результатом проекции.

Методом популяционного синтеза было исследовано распределение компактных объектов по массам (Бельчинский и др. 2002). Кроме тривиального результата о наличии популяции черных дыр в двойных системах с более высокими массами по сравнению с массами одиночных черных дыр, авторы нашли, что количество странных звезд (см. также ниже) оказывается порядка количества черных дыр. При этом большая часть странных звезд является одиночными объектами.

В связи с популяционным синтезом НЗ особенно интересны попытки построения «единых теорий», описывающих с единых позиций НЗ разных типов. Некоторые такие попытки рассмотрены в разделе, посвященном аккреции, другие — в разделе, посвященном магнитарам. Ниже мы кратко суммируем эти работы.

Как было указано выше существует две основные ветви: «магнитарная» и «аккреционная».

В первом случае предполагается, что различия в проявлениях НЗ определяются разной величиной магнитного поля (и/или различной конфигурацией поля). НЗ с большими полями могут в принципе не проявлять радиопульсарной активности (Баринг и Хардинг 1995, см., однако Усов и Мелроуз 1996). Возможно, также, что из-за быстрого замедления стадия радиопульсара для этих звезд оказывается очень короткой. «Магнитарная» гипотеза обязательно привлекает затухание магнитного поля для объяснения кластеризации периодов МПГ и АРП (Колпи и др. 2000). Различие между источниками может определяться разницей в возрасте, и, соответственно, различием в величине поля. При этом в большинстве вариантов (см., например, Гавриил и др. 2002) именно АРП являются более молодыми объектами. Возможными указаниями на это являются два факта. Один из них заключается в ассоциациях АРП и МПГ с остатками сверхновых. Второй — с возможно большим магнитным полем у АРП (у 1E 1048.1-5937 обнаружена спектральная деталь, которая может указывать на поле $\sim 2.4\ 10^{15}$ Гс).

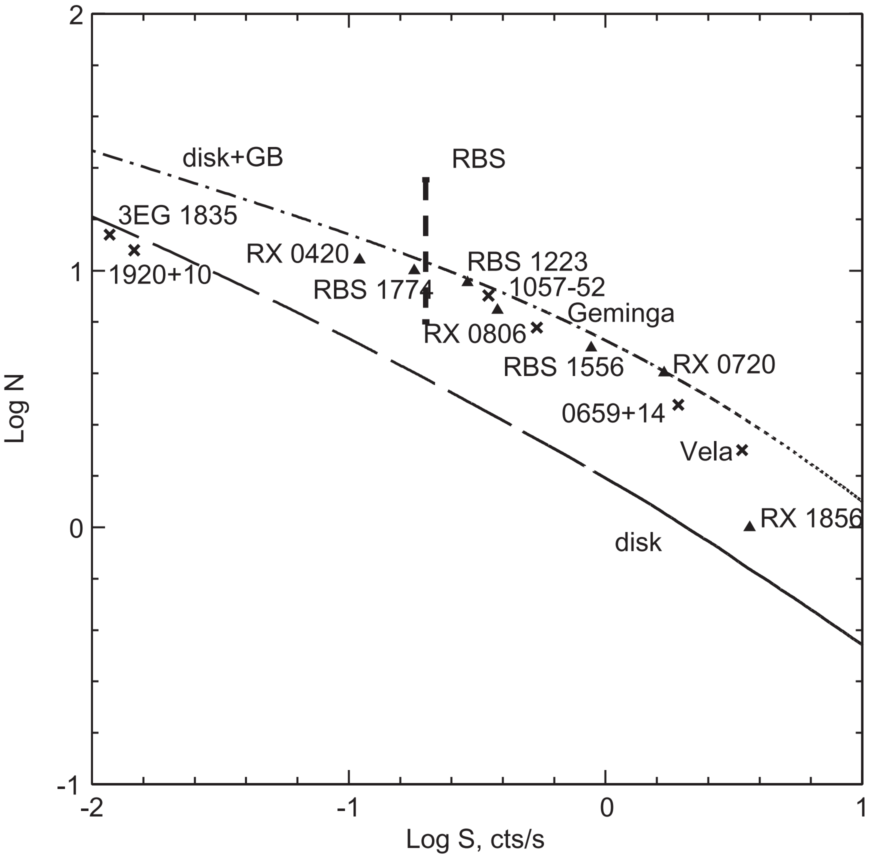

Рис. 13. Распределение Log N – Log S по всему небу (описание модели и расчетов см. в Попов и др. 2003а,в). Черные треугольники — семь ROSATовских радиотихих одиночных НЗ. Кресты — Геминга, «три мушкетера», PSR B1929+10 и 3EG J1835+5918 (точнее, символ соответствует самому слабому источнику на данном потоке). Мы также показываем предел обзора ROSATовских ярких источников (RBS) (Швопе и др. 1999). Верхняя кривая: НЗ, родившиеся в Поясе Гулда и в диске Галактики ($r_{\rm disk} = 3$ кпк, полный темп рождения 270 НЗ за млн. лет). Нижняя кривая: только НЗ, родившиеся в диске ($r_{\rm disk} = 3$ кпк, темп рождения 250 НЗ за млн. лет).

Во втором случае для единого объяснения природы различных одиночных НЗ требуется наличие остаточных аккреционных дисков. В таком случае различные источники объясняются или как последовательные стадии (эволюция диска и темпа вращения НЗ), или как НЗ с разными параметрами дисков.

Хорошую дискуссию по этим проблемам можно найти в работах Томпсона (2002), Альпара (2001), Дункана (2002).

2.2.10 Близкие одиночные молодые нейтронные звезды

Популяция близких (r<1 кпк) молодых (возраст менее 4.25 миллионов лет, это число соответствует температуре 100 000 K для наиболее легких НЗ массой 1.1 $M_\odot$ согласно расчетам Каминкера и др. 2002) включает в себя объекты разных типов: радиопульсары, радиотихие нейтронные звезды, объекты типа Геминги (см. табл. 4 и Попов и др. 2003а).

В образовании молодых близких НЗ большую роль играет Пояс Гулда. Пояс Гулда — наклоненный к плоскости Галактики диск диаметром 500-1000 пк, центр диска находится на расстоянии 150-250 пк от Солнца в направлении антицентра Галактики. Пояс назван в честь Бенджамина Гулда, впервые детально исследовавшего

Таблица 4. Близкие (< 1 кпк) молодые (< 4.25 млн. лет) одиночные нейтронные звезды

Название источника	Период, [с]	Поток ROSAT, [отсч./с]	$\dot{P}$ $/10^{-15}$	Расст., [кпк]	Возраст^a, [10^6 лет]	Ссылки
RX J1856.5-3754	—	3.64	—	0.117^d	~ 0.5	[1,2]
RX J0720.4-3125	8.39	1.69	$\sim 30 - 60$	—	—	[1,3]
RX J1308.6+2127	10.31	0.29	$< 10^4$?	—	—	[1,4]
RX J1605.3+3249	—	0.88	—	—	—	[1]
RX J0806.4-4123	11.37	0.38	—	—	—	[1,5]
RX J0420.0-5022	22.69	0.11	—	—	—	[1]
RX J2143.7+0654	—	0.18	—	—	—	[6]
PSR B0633+17	0.237	0.54^c	10.97	0.16^d	0.34	[7]
3EG J1835+5918	—	0.015	—	—	—	[8]
PSR B0833-45	0.089	3.4^c	124.88	0.294^d	0.01	[7,9,10]
PSR B0656+14	0.385	1.92^c	55.01	0.288^d	0.11	[7,10,11]
PSR B1055-52	0.197	0.35^c	5.83	$\sim 1^b$	0.54	[7,10]
PSR B1929+10	0.227	0.012^c	1.16	0.33^d	3.1	[7,10]
PSR J0056+4756	0.472	—	3.57	0.998^e	2.1	[10]
PSR J0454+5543	0.341	—	2.37	0.793^e	2.3	[10]
PSR J1918+1541	0.371	—	2.54	0.684^e	2.3	[10]
PSR J2048-1616	1.962	—	10.96	0.639^e	2.8	[10]
PSR J1848-1952	4.308	—	23.31	0.956^e	2.9	[10]
PSR J0837+0610	1.274	—	6.8	0.722^e	3.0	[10]
PSR J1908+0734	0.212	—	0.82	0.584^e	4.1	[10]

^{a}) Возраста пульсаров определены как $P/(2\dot{P})$, для RX J1856.5-3754 оценка возраста получена из кинематических соображений (Вольтер, Латтимер 2002)

^{b}) Расстояние до PSR B1055-52 неопределенно ($\sim$ 0.9-1.5 кпк)

^{c}) Полный отсчет (черное тело + нетепловое излучение)

^{d}) Расстояния определены по измерениям параллаксов

^{e}) Расстояния определены по мере дисперсии

[1] Тревес и др. (2000); [2] Каплан и др. (2002а); [3] Дзане и др. (2002);

[4] Хамбарян и др. (2001), Хаберл (2003); [5] Хаберл, Завлин (2002); [6] Зампьери и др. (2001);

[7] Бекер, Трюмпер (1997); [8] Мирабал, Гальперн (2001); [9] Павлов и др. (2001б);

[10] Каталог пульсаров ATNF (http://wwwatnf.atnf.csiro.au/research/pulsar/catalogue/)

[11] Брискен и др. (2003);

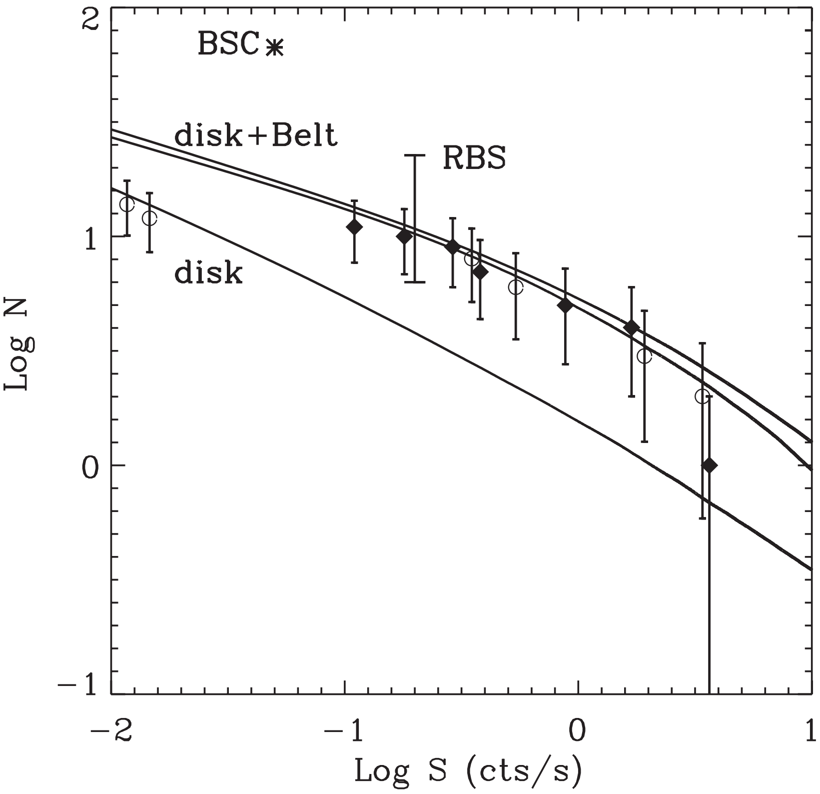

Рис. 14. Распределение Log N – Log S по всему небу. На этом рисунке мы добавили результаты новых расчетов и предел, полученный Рутледжом и др. (2003) после обработки данных более обширного чем RBS каталога ROSAT (BSC – Bright Source Catalog), данных Чандры и поиска отождествлений в других спектральных диапазонах. Предел соответствует 67 источникам в предположении их изотропии по небу. Верхняя и нижний кривые такие же, как на предыдущем рисунке. Средняя кривая соответствует НЗ, родившимся в Поясе Гулда и в диске Галактики, при использовании более детализированной модели (Попов и др., 2003б), чем модель (Попов и др. 2003а,в). В этой модели использовано начальное распределение НЗ по скоростям из работы Арзуманян и др. 2002, радиус Пояса Гулда положен равным 300 пк, на основе каталога Hipparcos и расчетов Вусли и др. (2002) и Тиммес и др. (1996) получен реалистичный спектр масс молодых НЗ в окрестности Солнца, а также в упрощенной форме учтено влияние атмосферы, приводящее к уменьшению светимости источников. Как видно из сравнения с предыдущим рисунком, различные эффекты (в случае Пояса Гулда) почти компенсируют друг друга. Вклад же дисковой составляющей (для новых расчетов не показана) становится меньше, т.к. один из «компенсирующих» эффектов – уменьшение размера Пояса – здесь не работает. Если самым слабым источником на данном потоке является объект «великолепной семерки», то на рисунке стоит черный символ, если нет - светлый. Ошибки соответствуют квадратному корню из числа источников.

распределение ярких звезд и определившего параметры образования, носящего теперь его имя (см. Поппел 1997). Около двух третей близких массивных звезд входят в Пояс.

По всей видимости именно Пояс ответственен за большее количество молодых НЗ, чем это следует из статистики радиопульсаров (см. Попов и др. 2000б, 2002). Было построено распределение Log N – Log S (см. рис 13, 14 и Попов и др. 2003а,в) для близких молодых НЗ. Из рисунков видно, что НЗ, родившиеся в Поясе Гулда, могут представлять *всю* «великолепную семерку», НЗ диска начинают доминировать лишь на более слабых потоках.

Оценки пространственного распределения (см. рис. 15) показывают, что

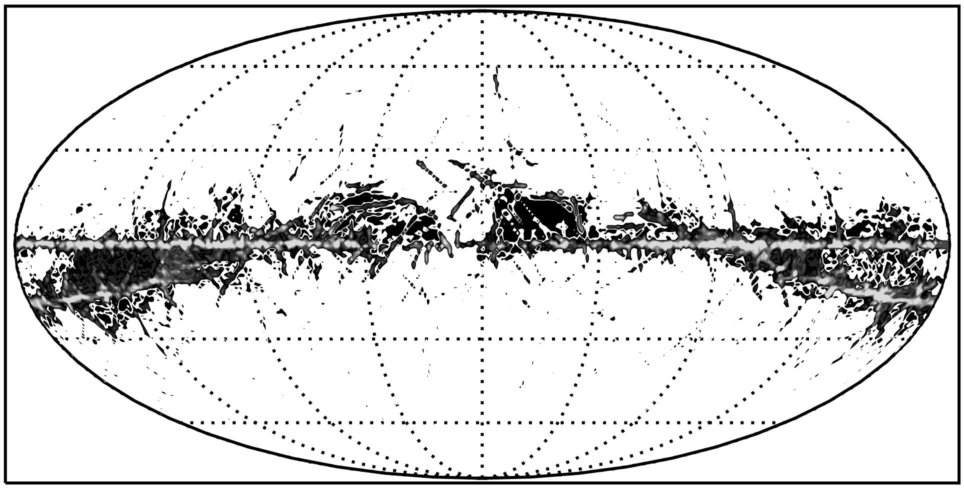

Рис. 15. В условных единицах показано распределение в галактических координатах числа ярких (> 0.01 отсчета ROSAT в секунду) остывающих НЗ. Получение подобной карты не было основной целью расчетов (Попов и др. 2003а,в), поэтому был сделан ряд упрощающих предположений (а именно, не учитывалась детальная структура поглощающей МЗС, использовались упрощенные форма и ориентация Пояса Гулда). Кроме того, на рисунке проявились треки отдельных звезд, что связано с нашим методом моделирования (см. детали, например, в Попов и др. 2000а). Однако рисунок дает ясное представление о глобальных характеристиках распределения молодых близких остывающих НЗ. На рисунке показаны только области с достаточно большим количеством ожидаемых источников. Полная статистика показывает, что лишь около 12% источников лежат на широтах более $40°$, около 19% — на широтах более $30°$. Более половины источников ожидается в поясе $\pm 12°$ от плоскости Галактики. Эти предсказания находятся в разумном соответствии с результатами поисков одиночных НЗ (Швопе и др. 1999, Рутледж и др. 2003).

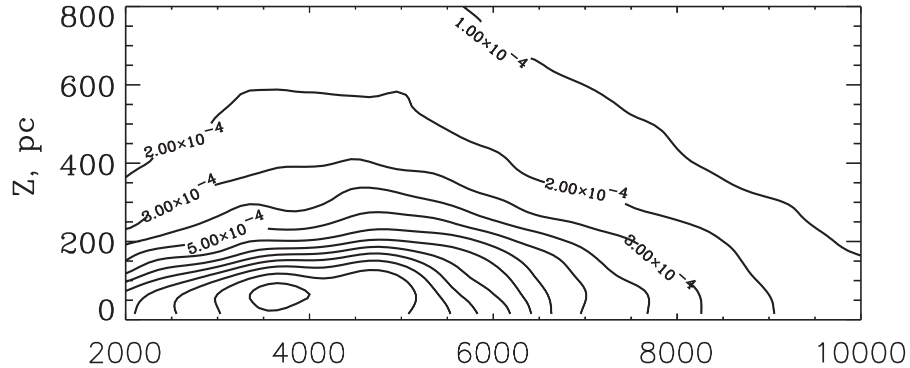

Рис. 16. На рисунке показано распределение НЗ всех возрастов в плоскости, перпендикулярной плоскости Галактики и проходящей через ее центр. Контуры проведены через 0.0001 пк$^{-3}$. Темп рождения НЗ был принят пропорциональным квадрату локальной плотности МЗС. Рассматривались только НЗ, родившиеся на расстояниях от 2 до 16 кпк от центра Галактики. Распределение скоростей отдачи (kick) было взято из работы Арзуманяна и др. (2002). Результаты были нормированы на $5 \cdot 10^8$ НЗ, родившихся в данной области. На солнечном расстоянии (порядка 8 кпк) вблизи плоскости Галактики плотность составляет примерно $2.8 \cdot 10^{-4}$ НЗ на кубический пк. Рисунок из работы Попов и др. (2003б).

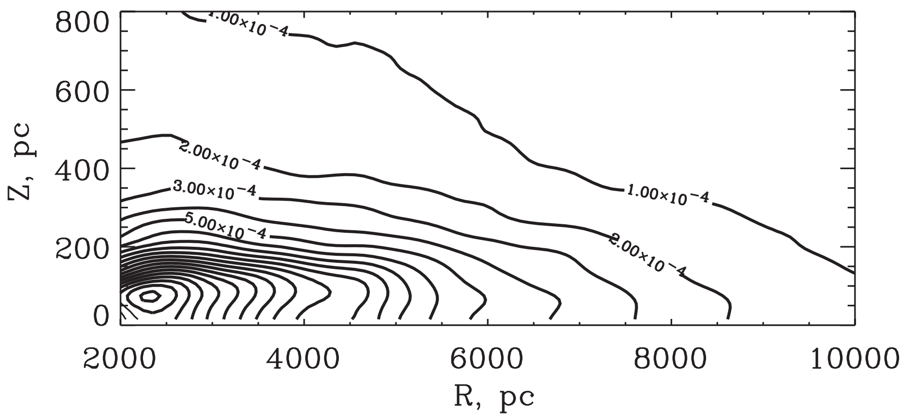

Рис. 17. То же, что на предыдущем рисунке. Отличие состоит в другом распределении темпа рождения НЗ по радиусу и по z. Здесь темп был пропорционален $[\exp(-z/75\,\mathrm{pc})\exp(-R/4\,\mathrm{kpc})]$ и не зависел от распределения МЗС. Видно, что в этом случае сильнее концентрация в центру Галактики, а не к молекулярному кольцу на ~ 4 кпк. На солнечном расстоянии плотность составляет примерно $2.1 \cdot 10^{-4}$ пк$^{-3}$.

остывающие близкие НЗ сосредоточены в основном вблизи плоскости Галактики, что конечно же затрудняет их отождествление.

Распределение старых НЗ, приведенное на рисунках 16 и 17, заметно отличается. Поэтому распределение аккрецирующих одиночных НЗ в окрестности Солнца будет отличаться от распределения молодых остывающих НЗ (кроме того, будет существенна детальная структура МЗС).

Близкие молодые компактные объекты через породившие их взрывы сверхновых и их остатки связаны со множеством интересных проблем, причем не только в астрофизике высоких энергий, но и в физике космических лучей (Ерлыкин, Вольфендейл 2003), в исследованиях местной МЗС (Смит, Кокс 2001), геофизики и палеоклиматологии (Бенитес и др. 2002). К обсуждению некоторых вопросов, связанных с астрофизикой одиночных НЗ мы и переходим.

2.3 Другие близкие области исследований

2.3.1 Механизмы взрывов сверхновых и возвратная аккреция (fall-back)

Поскольку НЗ является одним из результатов взрыва сверхновой (о темпах вспышек сверхновых см. Каппелларо и др. 1999), то, разумеется, свойства молодых НЗ несут информацию о породивших их сверхновых (см. Имшенник 2000, 1998, Янка и др. 2001).

Примерами такой связи являются проблемы начальных скоростей НЗ (kick, см. Лай 2002) и начальных периодов (см. Хегер и др. 2003). В настоящий момент распределение начальных скоростей НЗ неизвестно. Наблюдения радиопульсаров (Лайн, Лоример 1994, Лоример и др. 1997) указывают на высокие средние скорости. Распределение по начальным периодам также неизвестно. Пока достоверно известны начальные периоды для пульсара в Крабе и, возможно, еще для двух пульсаров (см. Каспи, Хельфанд 2002). Как предполагают Спруит и Финней (1998) и Постнов и Прохоров (1998), распределение по начальным периодам может быть связано с процессом взрыва сверхновой и, соответственно, с распределением по скоростям. Однако в работах этих авторов сделаны выводы, *противоречащие* друг другу.

Другим примером может являться пока незарегистрированное гравитационное излучение от новорожденных горячих НЗ (см. обзор Андерссона 2002). Параметры спектра испускаемых гравволн существенным обоазом зависят от параметров новообразовавшейся НЗ, а, следовательно, от свойств сверхновой, породившей компактный объект. Расчеты показывают (Феррари и др. 2002), что уже первое поколение лазерных интерферометров сможет зарегистрировать гравитационное излучение новорожденной НЗ в нашей Галактике. Если же рассмотреть излучение от т.н. супрамассимных (supra-massive) НЗ, образующихся после слияния двух НЗ, то гравитационные волны от такого объекта можно зафиксировать первым поколением детекторов (LIGO, VIRGO и т.д.) с расстояния скопления в Деве, что дает темп событий порядка нескольких в год. Регистрация гравитационных волн от НЗ является чрезвычайно актуальной задачей ближайщего будущего.

В работах по взрывам коллапсирующих сверхновых (типа II и Ib/c) можно встретить три качественно различных механизма преобразования выделяющейся гравитационной энергии связи коллапсирующего ядра предсверхновой в кинетическую энергию сбрасываемой оболочки.

Первый механизм объединяет классическую модель «отскока» («bounce») падающих внешних слоев ядра предсверхновой от сформировавшегося и ставшего жестким сверхплотного остатка сверхновой (горячей прото-НЗ) с нейтринными механизмами, в которых образовавшаяся в результате отскока ударная волна в дальнейшем подпитывается нейтринным излучением горячего ядра. Это самая первая и долгое время считавшаяся основной модель взрыва сверхновой. Хотя ранее в рамках этой модели несколько раз удавалось объяснить вспышку сверхновой, последующие более точные исследования отвергали эти найденные возможности (см. Меццакаппа и др. 1998а и ссылки там). На сегодня данный механизм не объясняет сброс оболочки сверхновой ни в сферически симметричном, ни в осесимметричном (с вращением) случаях (Янка и др. 2001). Есть надежда, что ситуацию могла бы исправить крупномасштабная нейтринная конвекция (Херант и др. 1994, Меццакаппа и др. 1998б). В настоящее время в данном направлении ведутся интенсивные исследования (см., например, Кифонидис и др. 1999 и ссылки там).

Другой механизм (Имшенник 1992) связан с делением быстровращающегося коллапсирующего ядра звезды на 2 части, по крайней мере одна из которых должна быть нейтронной звездой. Затем части двойного ядра сближаются из-за гравитационного излучения, пока меньшая по массе (и большая по размеру) компонента не заполнит свою полость Роша. Сближение двойного ядра может длиться от нескольких минут до нескольких часов. После этого начинается перетекание вещества до тех пор, пока масса меньшей компоненты не достигнет нижнего предела масс НЗ (около $0.1\mathrm{M}_{\odot}$), при котором происходит взрывная денейтронизация маломассивной нейтронной звезды (Блинников и др. 1984). Такое дополнительное выделение энергии, происходящее достаточно далеко от центра коллапсирующей звезды, может эффективно сбросить ее оболочку. Этот механизм может действовать только у наиболее быстро вращающихся предсверхновых. Проблема данного сценария заключена в том, что пока еще никому не удалось воспроизвести деление ядра предсверхновой при коллапсе (об этом механизме см. также Колпи, Вассерман 2002).

Последний из рассматриваемых нами механизмов взрывов сверхновых — магниторотационный — был предложен Г.С.Бисноватым-Коганом в 1970 г. Идея этого механизма очень проста — сброс оболочки производится магнитным полем быстро вращающейся НЗ. При этом оболочка ускоряется за счет торможения вращения нейтронной звезды. Поскольку на самом деле эта простая идея объединяет в себе генерацию и усиление магнитных полей и сложную трехмерную гидродинамику с сильным влиянием переноса излучения, то реалистичные расчеты данного сценария крайне затруднены. Результаты двумерных расчетов (Арделян и др. 1998, 2000) показывают, что магниторотационный механизм может передать несколько процентов вращательной энергии компактного остатка в кинетическую энергию оболочки.

Как показывают упомянутые расчеты, магниторотационный взрыв (стадия на которой происходит существенное ускорение и сброс оболочки) длится 0.01–0.1 с. Ему предшествует фаза «накрутки», на которой тороидальное магнитное поле линейно усиливается до критической величины ($\sim 10^{16}$–10^{17} Гс), при которой происходит сброс оболочки. Длительность этой стадии зависит от величины начального магнитного поля НЗ и от скорости ее вращения и может меняться от долей секунды до минут (и даже часов). Для данного механизма требуется достаточно быстрое вращение НЗ (период порядка нескольких миллисекунд), однако не столь быстрое, как в механизме с делением ядра.

С исследованиями взрывов массивных звезд тесно связан вопрос о начальном спектре масс компактных объектов. Наблюдения указывают на близость масс НЗ к «классическому» значению 1.35 $M_{\odot}$ с очень небольшим разбросом (Торсетт и Чакрабарти 1999). Есть, однако, данные по НЗ в тесной двойной системе Vela X-1 (Квайнтрелл и др. 2003), говорящие о массе, близкой к 2 $M_{\odot}$. Подозрения о высокой массе НЗ в этом рентгеновском пульсаре были и ранее (ван Керквийк и др 1995, Инам и Байкал 1999, Барзив и др. 2001).

На наш взгляд, к данным, указывающим на очень узкое распределение НЗ по массам, следует относиться с некоторой долей скептицизма, т.к. массы определялись только у определенных типов объектов (двойные радиопульсары, рентгеновские двойные) и, вполне вероятно, их распределение по массам может не отражать спектра масс всей популяции в целом. Измерения массы НЗ в источнике Vela X-1 также подвержены систематическим эффектам. Потому, разумно рассмотреть предсказания теории.

Как было указано выше, теория взрыва сверхновой далека от завершения. Однако для расчета спектра масс НЗ детали механизма взрыва не столь важны. Гораздо важнее знание эволюции звезд-прародителей сверхновых. Современный уровень понимания указаных выше процессов не позволяет сделать высокоточное предсказание начального спектра масс НЗ и черных дыр, однако можно указать на важную особенность. (В дальнейшем мы следуем работам Тиммес и др. (1996) и Вусли и др. (2002)). Распределение масс НЗ оказывается двухпиковым. Положение и величина пиков определяются не очень хорошо. Один из них находится на гравитационных массах порядка 1.27 $M_{\odot}$, второй – на $1.4-1.6$ $M_{\odot}$.

Менее массивный пик связан со звездами в интервале начальных масс от 8 до 11 солнечных масс. По всей видимости, эти объекты дают НЗ очень близких масс. В эволюции звезд из этого интервала масс много неопределенного (собственно и сам интервал определен неточно), но большинство расчетов указывает на отсутствие центрального горения неона в их ядрах. В итоге барионные массы коллапсирующих железных ядер кластеризуются около значения 1.39 $M_{\odot}$, что соответствует нулевой энтропии. Есть указания на то, что пульсар в Крабе имел прародителя с массой в интервале $8-11M_{\odot}$.

Второй пик связан с тем, что в некотором интервале масс (порядка $15-20$ $M_{\odot}$) ядра массивных звезд имеют практически одинаковую массу (см. рис. 14 и 21 в обзоре Вусли и др. 2002).

Начальная функция масс звезд влияет на относительную высоту пиков (например, в Поясе Гулда первый пик оказывается более существенным по сравнению с его относительным вкладом при солпитеровской функции масс), но не влияет на их положение. Последнее может существенно зависеть от металличности.

Повторимся, в расчетах и наблюдениях масс НЗ еще много неопределенного. Поэтому все вышенаписанное следует рассматривать как предварительные результаты. Кроме того, на начальный спектр масс НЗ существенно может влиять процесс возвратной аккреции, к рассмотрению которой мы и переходим.

При рассмотрении связи НЗ и вспышек сверхновых особенно интересной оказывается проблема fall-back, падения на НЗ вещества остатка сверхновой (Шевалье 1989). Существует ряд моделей (см. Альпар 2001), объясняющих природу АРП, МПГ, слабых рентгеновских источников в диске Галактики и компактных рентгеновских источников в остатках сверхновых выпадением вещества, выброшенного при взрыве, на поверхность НЗ (см. пункт, посвященный аккреции).

Выпадение вещества на образовавшийся в результате взрыва сверхновой компактный объект рассматривалось уже в начале 70-х годов (Колгейт 1971, Зельдович и др. 1972). В последние годы были получены новые важные результаты (см. Хук, Шевалье 1991, Зампьери и др. 1998). Получены оценки времени, после которого аккреционная светимость образовавшейся черной дыры превосходит другие источники излучения. Мониторинг известных сверхновых позволит в течение нескольких лет проверить эту модель.

Возможно, что процесс возвратной аккреции может впоследствии приводить к наличию корреляций между различными параметрами НЗ. Например, между начальным полем и массой.

Сильная аккреция может способствовать затуханию поля, т.о. более массивные НЗ будут иметь меньшее поле. С другой стороны в случае наличия быстровращающейся сильнозамагниченной НЗ поле может предотвратить выпадение части вещества на поверхность. Тогда НЗ с большим полем будут иметь несколько меньшую массу. Т.к. охлаждение НЗ существенно зависит от массы, то можно ожидать и корреляции между полем и температурой: более горячие НЗ могут иметь более высокое магнитное поле. Это может быть существенно для объяснения свойств «великолепной семерки» (можно ожидать, что масса этих НЗ меньше средней, т.к. они селектированы по относительно высокой температуре, а значит по медленному остыванию; кроме того, наличие у четырех из семи объектов магнитарных периодов может свидетельствовать о более высоком, в среднем, магнитном поле).

Если мы рассмотрим период P_A, то получим:

$$P_A \sim 20\mu_{32}^{6/7}\left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-5/7}\left(\frac{\dot{M}}{M_\odot\,\text{год}^{-1}}\right)^{-3/7}\quad \text{мс}. \qquad (20)$$

Здесь темп аккреции нормирован на типичное для возвратной аккреции значение одна масса Солнца в год. Магнитный момент – на типичное магнитарное значение. Двадцать миллисекунд – типичный период для молодой НЗ. Т.о., вполне вероятно возникновение на стадии возвратной аккреции аналога режима пропеллера. Однако необходимо более детальное рассмотрение данной ситуации. (См., например, Томпсон, Мюррей 2001, где также дискутируется эта проблема, однако авторы приходят к выводу об увеличении поля при возвратной аккреции, что связано с дополнительной генерацией за счет конвекции, возникающей при прогреве НЗ). Вещество может не выбрасываться на бесконечность, а накапливаться, и затем все равно выпадать на НЗ. Кроме того, сильная аккреция на начальных стадиях fall-back может «вбить» магнитное поле, т.о., оно будет динамически несущественным на более поздних стадиях, когда темп аккреции упадет до нескольких масс Солнца в год (хотя отметим, что комбинация более коротких периодов и более сильного поля может препятствовать аккреции с темпом в сотни масс Солнца в год, кроме того, на ранних стадиях может генерироваться значительное тороидальное поле). Далее, если единственным важным процессом является затухание магнитного поля в коре звезды, то следовало бы ожидать более слабые поля у более горячих (т.е. менее массивных) НЗ. Тем не менее нужно помнить, что традиционное допущение того, что параметры (период, магнитное поле, масса) НЗ независимы, является лишь нулевым приближением (например, по крайней мере для низкоскоростных НЗ есть корреляция между векторами угловой и пространственной скоростей, Романи, Нг 2003).

2.3.2 Микролинзирование на нейтронных звездах

Среди множества наблюдательных задач в астрофизике НЗ особое место занимает определение массы этих объектов. В астрономии массы звездных объектов определяют тремя основными способами.

1). По орбитальному движению в двойных системах. Для НЗ это применимо к двойным радиопульсарам, а также к аккрецирующим нейтронным звездам в тесных двойных. Именно на этом методе основано определение масс подавляющего большинства НЗ.

2). По гравитационному красному смещению (собственно само смещение дает отношение масса-радиус, но радиус часто можно оценить по спектру). Этот способ не работает для обычных звезд, а вот для НЗ как раз подходит (для них красное смещение имеет заметную величину). Пока, однако этот метод дал хороший результат только в одном случае (Коттам и др. 2002). Проблема заключается в отсутствии четких отождествленных деталей в спектрах НЗ.

3). По эффекту гравитационного микролинзирования (см., например, Захаров, Сажин 1998 и Гулд 2001). Зная параллакс и собственное движение, можно точно определить массу НЗ, если она является линзой (напомним, что для RX J1856.5-3754 параллакс и собственное движение известны, см. табл. 4). Для одиночной «темной» НЗ это, по всей видимости, единственный способ!

Следует различать два случая: фотометрическое и астрометрическое микролинзирование. В первом наблюдается увеличение блеска звезды-источника. Во втором – смещение источника.

Фотометрическому микролинзированию на НЗ посвящено три работы: Моллерах и Руле (1997), Гулд (2000) и Шварц, Сейдел (2002). В первой из них в основном рассматривается линзирование звезд Большого Магелланова облака, в последних двух — звезд галактического балджа. Оценки по линзированию звезд Магелланова облака неоптимистичны: современные программы вряд ли смогут обнаружить хотя бы одно событие. Гулд в своей статье делает предсказания для будущего космического эксперимента. Эти оценки позволяют надеятся на регистрацию нескольких событий. Шварц и Сейдел концентрируются на возможности определения масс известных одиночных НЗ (радиопульсаров, объектов «великолепной семерки» и др.). Их расчеты показывают, что будущие проекты (особенно космические) смогут обеспечить измерение масс НЗ по эффекту микролинзирования.

Также большой интерес могут представлять т.н. астрометрические эффекты микролинзирования (см. общее описание метода в Боден и др. 1998, Доминик и Саху 1999). Белокуров и Эванс (2002, частное сообщение) обратили наше внимание на то, что НЗ могут представлять здесь особый интерес в связи с их большими пространственными скоростями. Здесь простые оценки показывают существенную вероятность регистрации событий на астрометрическом спутнике GAIA. Однако необходимы детальные расчеты (Прохоров и др. 2002б).

Кроме этого, в последнее время появились данные наблюдений, указывающие на линзирование на одиночных черных дырах (Мао и др. 2001, Беннет и др. 2002). К краткому обсуждению этих объектов мы и переходим.

2.3.3 Одиночные черные дыры

Аккрецирующие одиночные НЗ могут быть довольно близки по многим параметрам к одиночным аккрецирующим черным дырам (о физике черных дыр см. книгу Новикова, Фролова 1986). Различные аспекты, связанные с аккрецией на одиночные черные дыры звездных масс изучались уже 30 лет назад (см. Шварцман 1971). Существовала надежда на обнаружение аккрецирующих черных дыр в областях повышенной плотности МЗС – молекулярных облаках – в оптическом и ИК-диапазонах (Кампана, Парди 1993).

Недавно аккреция из МЗС на одиночные черные дыры была рассмотрена Фуджитой и др. (1998) и Аголом и Камионковским (2001). Авторы рассмотрели как обычные черные дыры звездных масс, так и гипотетические объекты, которые могут вносить существенный вклад в темную массу гало нашей Галактики и обнаруженные по эффекту микролинзирования. (Об обнаружении кандидатов в черные дыры методом микролинзирования см. Агол и др. 2002, о начальной функции масс черных дыр см. Тиммес и др. 1996). Используя модель адвекционно-доминированной аккреции, было показано, что черные дыры звездных масс могут в недалеком будущем наблюдаться в рентгеновском, ИК- или оптическом диапазонах. Обнаружение менее массивных объектов гало за счет аккреции маловероятно, однако отмечается вероятность обнаружения гравитационных волн от слияния таких черных дыр, если они образуют достаточно тесные двойные системы.

За счет того, что МЗС является турбулентной, возможно образование аккреционного диска вокруг одиночных черных дыр при их малой пространственной скорости. Вообще наличие внешнего углового момента может быть очень существенно. Недавние расчеты Прога и Бегелмана (2003) показывают, что наличие даже небольшого момента у аккрецируемого вещества может существенно уменьшать темп аккреции по-сравнению с формулой Бонди.

Балберг и Шапиро (2001) рассчитали темп образования черных дыр после вспышек сверхновых. Используя аналитическую модель изменения аккреционной светимости (за счет fall-back, см. выше), они оценили, что при современных методах наблюдений можно увидеть до нескольких «проявлений» черных дыр в год. Т.е., наблюдая кривые блеска сверхновых, можно увидеть, как начинает доминировать вклад аккреции в полную светимость сверхновой. Если эти оптимистические оценки оправдаются, то в скором будущем мы сможем непосредственно определить темп рождения черных дыр.

Вероятно существует возможность обнаружить одиночные черные дыры в непосредственной окрестности Солнца, на расстоянии менее 1 кпк. Такая возможность связана с существованием массивных «убегающих» звезд. Эти объекты образуются в результате распада двойных систем. Большая масса ($> 30\,M_{\odot}$) убегающих звезд говорит о том, что образовавшимся в результате взрыва второго компонента компактным объектом является черная дыра (см., однако, статьи Эргмы и ван ден Хевела 1998а,б о массе прародителей НЗ и черных дыр). Таким образом, оказывается возможным вычисление приближенных положений близких черных дыр (Попов и др. 2002, Прохоров, Попов 2002). Другая возможность поиска одиночных черных дыр на основе обработки массовой многоцветной фотометрии (обзора SDSS) подробно рассмотрена в работе Чисхолм и др. (2002).

2.3.4 Странные звезды

В ядре НЗ плотность может существенно (в несколько раз) превосходить ядерную. Это создает условия для существования свободных кварков (деконфайнмент). Такая возможность была осознана в начале 70-х годов. Одной из первых работ, посвященных кварковому веществу, была статья Бодмера (1971), где впервые было показано, что в кварковом веществе энергия, приходящаяся на один нуклон, ниже, чем в обычном ядерном веществе. Первыми работами, посвященными непосредственно кварковым звездам, были статьи Ито (1970), Фечнера и Джосса (1978) и Виттена (1984) (нельзя не упомянуть и работу Иваненко, Курдгелаидзе (1965), где пророчески были предсказаны «кварковые», но не «странные» звезды, т.е. странный кварк естественно не обсуждался авторами в 1965 г. Детальнее см. обзоры Бомбачи 2001, Тома и др. 2003 и Ксу 2002, где также упоминаются многие ранние работы, имеющие отношение к странным звездам).

Странные звезды имеют уравнение состояния, отличное от нормальных НЗ. Это проявляется, в частности, в меньших радиусах при той же массе компактного объекта. Таким образом, измерения массы и радиуса объекта могут позволит определить его природу. С этой точки зрения чрезвычайно актуальны наблюдения одного из семи объектов «великолепной семерки» — RX J1856.5-3754. (О наблюдениях и определении массы и радиуса этого объекта см. Понс и др. 2001, об интерпретации его как кварковой зведы см. Дрейк и др. 2002. Ограничениям на радиусы и массы других НЗ по наблюдениям Chandra и XMM посвяшена статья Тома и др. 2003.) Пачинским (2001) была предложена идея определения массы этого объекта с помощью микролинзирования, которая может быть осуществлена в ближайшие несколько лет. Если же верна новая оценка расстояния до этого объекта, сделанная Капланом и др. (2002a), а не оценка Волтера (2001), то идея Пачинского об определении массы НЗ *не сможет быть осуществлена* в ближайшие годы. Более подробное исследование микролинзирования на НЗ было недавно проведено Шварцем и Сейделом (2002). В будущем возможны одновременные измерения массы и радиуса НЗ при наблюдении гравитационных волн (Валлиснери 2002).

Среди одиночных НЗ в качестве другого кандидата в странные звезды назывался объект 3C58 (Слэйн 2002). Это пульсар с периодом 0.065 с в плерионе (Камило и др. 2002a). Однако Яковлев и др. (2002) показали, что свойства этого источника можно объяснить без введения странного вещества.

В настоящее время существует несколько кандидатов в странные звезды в тесных двойных системах: 4U 1820-30, SAX J1808.4-3658, 4U 1728-34, Her X-1, GRO J1744-28 (см. Бомбачи 2002). Некоторые авторы связывают активность МПГ со странными звездами (см., например, Дар, Де Рухула 2000, Усов 2001). Основная доля исследований, посвященных странным звездам, представлена теоретическими работами.

3 Заключение

В заключение еще раз повторим, что благодаря прогрессу в наблюдательной астрономии в последние 10 лет складывается картина, в которой значительная роль принадлежит *радиотихим* НЗ.

По всей видимости, значительная доля НЗ не проходит в молодости стадию радиопульсара, или же эта стадия оказывается очень короткой. Около 10% НЗ могут являться магнитарами. Часть НЗ может сохранять остаточные аккреционные диски, образовавшиеся за счет выпадения вещества из оболочки (fall-back). Этот же процесс может существенно влиять на начальные параметры НЗ.

Картина эволюции НЗ уже не выглядит такой ясной, как 15-20 лет назад, когда пульсар в Крабе считался «идеальной молодой НЗ». Для дальнейшего прогресса необходимы совместные усилия наблюдателей и теоретиков.

При написании этого обзора мы активно использовали материалы сайтов NASA ADS и arXiv.org.

Выражаем глубокую признательность за многочисленные дискуссии в процессе совместной работы нашим соавторам по исследованиям, вошедшим в данный обзор: В.А. Белокурову, М. Колпи, Д.Ю. Коненкову, В.М. Липунову, Ф. Пиццолатто, А. Поссенти, К.А. Постнову, А. Тревесу, Р. Туролле и Н.В. Эвансу.

Рискуя не упомянуть очень многих коллег, мы благодарим В.С. Бескина, Л. Зампьери, М. Кьерегато, Ю.А. Шибанова, Д.Г. Яковлева за подробные дискуссии, а также С.И. Баструкова, С.В. Боговалова, А.А. Гвоздева, А.Д. Кузьмина, Т.А. Лозинскую, М. Лютикова, Д.К. Надежина, И.С. Огнева, Г.Г. Павлова, А.Ю. Потехина, М.В. Чистякова, Н.И. Шакуру за сделанные комментарии к тексту обзора.

Работа поддержана грантами РФФИ 02-02-07002, 03-02-16068.

Список литературы

1. Агол и др. (Agol, E., Kamionkowski, M., Koopmans, L.V.E., Blandford, R.D.) 2002, «Finding black holes with microlensing», ApJ 576, L131 (astro-ph/0203257)
2. Агол, Камионковский (Agol, E., Kamionkowski, M.,) 2001, «X-rays from isolated black holes in the Milky Way», MNRAS 334, 553 (astro-ph/0109539)
3. Алексеев и др. (Alexeyev, E.N., Alexeyeva, L.N., Volchenko, V.I., Krivosheina, I.V.) 1998, «Characteristics of a neutrino signal from SN 1987A, detected by the Baksan underground scintillation telescope of the Nuclear Research Institute of the Soviet Academy of Sciences», Phys. Lett. B 205, 209
4. Альпар (Alpar, M.A.) 2001, «On young neutron stars as propellers and accretors with conventional magnetic fields», ApJ 544, 1245 (astro-ph/0005211)
5. Альпар и др. (Alpar, M.A., Ankay A., Yazgan, E.) 2001, «Pulsar spindown by a fall-back disk and the P-$\dot{P}$ diagram», ApJ 557, L61 (astro-ph/0104287)
6. Андерссон и др. (Andersson, N., Jones, D.I., Kokkotas, K.D., Stergioulas, N.) 2000, «R-mode runaway and rapidly rotating neutron stars», ApJ 543, L75 (astro-ph/0002114)
7. Андерссон (Andersson, N.) 2002, «Gravitational waves from instabilities in relativistic stars», astro-ph/0211057
8. Аптекарь и др. (Aptekar, R.L., Frederiks, D.D., Golenetskii, S.V., Il'inskii, V.N., Mazets, E.P., Pal'shin, V.D., Butterworth, P.S., Cline, T.L.) 2001, «Konus catalog of soft gamma repeater activity: 1978 to 2000», ApJ Suppl. 137, 227
9. Арделян и др. (Ardeljan N.V., Bisnovatyi-Kogan G.S., Moiseenko S.G.) 1998, «Magnetorotational mechanism: 2D simulation», in: Proc. IAU Coll. No. 166 «The local bubble and beyond». Eds. D. Breitschwerdt, M.J. Freyberg, J. Trumper. Lecture Notes in Physics vol. 506, p. 145
10. Арделян и др. (Ardeljan N.V., Bisnovatyi-Kogan G.S., Moiseenko, S.G.) 2000, «Nonstationary magnetorotational processes in a rotating magnetized cloud», A&A 355, 1181
11. Арзуманян и др. (Arzoumanian, Z., Chernoff, D.F., Cordes, J.M.) 2002, «The velocity distribution of isolated radio pulsars», ApJ 568, 289
12. Аронс (Arons, J.) 2000, «Pulsar death line at an advanced age», in: Proceedings of IAU Coll. 177, «Pulsar astronomy — 2000 and beyond», ASP Conf. Series vol. 202 (San Francisco), Eds. M.Kramer, N.Wex, R. Wielebinski, p. 449 (astro-ph/9911478)
13. Арретче и др. (Arretche, F., Natale, A.A., Voskresensky, D.N.) 2002, «Medium effects in the pion pole mechanism (photon photon –> pion-zero –> neutrino-R antineutrino-L (neutrino-L antineutrino-R)) of neutron star cooling», astro-ph/0208362
14. Бакал, Вольф (Bahcall, J.N., Wolf, R.A.) 1965, «An observational test of theories of neutron star cooling», ApJ 142, 1254
15. Балберг, Шапиро (Balberg, S., Shapiro S.L.) 2001, «Rates of observable black hole emergence in supernovae», ApJ 556, 944 (astro-ph/0104215)
16. Барзив и др. (Barziv, O., Kaper, L., van Kerkwijk, M.H., Telting, J.H., van Paradijs, J.) 2001, «The mass of the neutron star in Vela X-1», A&A 377, 925 (astro-ph/0108237)
17. Баринг, Хардинг (Baring, M.G., Harding, A.K.) 1995, «Photon splitting in soft gamma repeaters», Ap&SS 231, 77 (astro-ph/9507059)

18. Баструков, С.И., Молодцова, И.В., Подгайный, Д.В., Вебер, Ф., Папоян, В.В., 1999, «Эластодинамические свойства ядерной материи нейтронных звезд», ЭЧАЯ 30, 992

19. Баструков и др. (Bastrukov, S., Podgainy, D., Yang, J., Weber, F.) 2002, «Magneto-torsional pulsations of magnetar», in: «Soft Gamma Repeaters: The Rome 2000 Mini-Workshop», Mem. Soc. Astron. It., 73, 522, Eds. M. Feroci, S. Mereghetti

20. Бейгер и др. (Bejger, M., Yakovlev, D.G., Gnedin, O.Y.) 2002, «Cooling of superfluid neutron stars with muons», astro-ph/0210485

21. Бекер (Becker, W.) 2000, «X-ray emission characteristics of pulsars» in: Proceedings of IAU Symp. 195, Eds. P.C.H. Martens, S. Tsuruta, M.A. Weber, p.49

22. Бекер, Павлов (Becker, W., Pavlov, G.) 2002, «The Milky Way – pulsars and isolated neutron stars», in: «The century of space science», Eds. J. Bleeker, J. Geiss, M. Huber, Kluwer Academic Publishers (в печати) (astro-ph/0208356)

23. Бекер, Ашенбах (Becker, W., Aschenbach, B.) 2002, «X-ray observations of neutron stars and pulsars: first results from XMM-Newton», 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-Plank-Institut fur extraterrestrische Physik, p.64 (astro-ph/0208466)

24. Бельчинский и др. (Belczynski, K., Bulik, T., Kluzniak, W.) 2002, «Population synthesis of neutron stars, strange (quark) stars and black holes», ApJ 567, L63 (astro-ph/0202186)

25. Бенитес и др. (Benitez, N., Maiz-Apellaniz, J., Canelles, M.) 2002, «Evidence for nearby supernova explosions», Phys. Rev. Lett., 88, 081101

26. Беннетт и др. (Bennett, D.P. et al.) 2002, «Gravitational microlensing events due to stellar mass black holes», ApJ 579, 639(astro-ph/0109467)

27. Бескин, В.С., 1993, «Влияние эффектов ОТО на электродинамику пульсаров», ПАЖ 16, 665

28. Бескин и др. (Beskin, V.S., Gurevich, A.V., Istomin, Ya.N.) 1993, «Physics of pulsar magnetosphere», Cambridge University Press

29. Бескин, В.С., 1999, «Радиопульсары», УФН 169 N11, 1169

30. Бескин, Неустроев (Beskin, G. M., Neustroev, V. V.) 2001, «Spectroscopy of the Crab pulsar», A&A 374, 584

31. Биньями, Каравео (Bignami, G.F., Caraveo, P.A.) 1996, «Geminga, its fenomenology, its fraternity and its physics», ARAA 34, 331

32. Биньями и др. (Bignami, G.F., Caraveo, P.A., de Luca, A., Mereghetti, S.) 2003, «The magnetic field of an isolated neutron star from X-ray cyclotron absorption lines», Nature 423, 725 (astro-ph/0306189)

33. Бионта и др. (Bionta, R.M., Blewitt, G., Bratton, C.B., Caspere, D., Ciocio, A.) 1987, «Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud», Phys. Rev. Lett. 58, 1494

34. Бисноватый-Коган, Г.С., 1970, «О механизме взрыва вращающейся звезды как сверхновой», АЖ 47, 813

35. Бисноватый-Коган, Блинников (Bisnovatyi-Kogan, G. S., Blinnikov, S. I.) 1980, «Spherical accretion on to compact X-ray sources with preheating – No thermal limit for the luminosity», MNRAS 191, 711

36. Бисноватый-Коган, Г.С., Комберг, Б.В., 1974, «Пульсары и тесные двойные системы», АЖ 51, 373

37. Блаез, Мадау (Blaes, O., Madau, P.) 1993, «Can we observe accreting, isolated neutron stars?», ApJ 403, 690

38. Блаез, Раджагопал (Blaes, O., Rajagopal, M.) 1991, «The statistics of slow interstellar accretion onto neutron stars», ApJ 381, 210

39. Блаез и др. (Blaes, O., Blandford, R.D., Goldreich, P., Koonin, S.E.) 1990, «Slowly accreting neutron stars and the origin of gamma-ray bursts», ApJ 363, 612

40. Блаез и др. (Blaes, O., Warren, O., Madau, P.) 1995, «Accreting, isolated neutron stars. III. Preheating of infalling gas and cometary HII regions», ApJ 454, 370

41. Блашке и др. (Blaschke, D., Grigorian, H., Voskresensky, D. N.) 2001, «Cooling of hybrid neutron stars and hypothetical self-bound objects with superconducting quark cores», A&A 368, 561

42. Блинников С.И., Новиков И.Д., Переводчикова Т.В., Полнарев А.Г., 1984, «О возможности взрыва нейтронной звезды в тесной двойной системе», ПАЖ 10, 422

43. Блинников, С.И., Лозинская, Т.А., Чугай, Н.Н., 1987, «Сверхновые звезды и остатки вспышек сверхновых», в сборнике Итоги науки и техники. Астрономия. том 32, Ред. Р.А. Сюняев, с. 142

44. Блэндфорд и др. (Blandford, R. D., Applegate, J. H., Hernquist, L.) 1983, «Thermal origin of neutron star magnetic fields», MNRAS 204, 1025

45. Боговалов (Bogovalov, S.V.) 2001, «Acceleration and collimation of relativistic plasmas ejected by fast rotators», A&A 371, 1155 (astro-ph/0102415)

46. Боговалов (Bogovalov, S.V.) 1999, «On the physics of cold MHD winds from oblique rotators», A&A 349, 1017 (astro-ph/9907051)

47. Боден и др. (Boden, A.F., Shao, M., Van Buren, D.) 1998, «Astrometric observation of MACHO gravitational microlensing», ApJ 502, 538

48. Бодмер (Bodmer, A.R.) 1971, «Collapsed nuclei», Phys. Rev. D 4, 1601

49. Бомбачи (Bombaci, I.) 2001, «Strange quark stars: structural properties and possible signatures for their existence», in: «Physics of neutron star interiors», Eds. D. Blaschke, N.K. Glendenning, A. Sedrakian (Springer), Lecture Notes in Physics, vol. 578, p. 364

50. Бомбачи (Bombaci, I.) 2002, «Strange star candidates», eConf C010815, 29 (astro-ph/0201369)

51. Бонди, Хойл (Bondi, H., Hoyle, F.) 1944, «On the mechanism of accretion by stars», MNRAS 104, 273

52. Бочкарев, Н.Г., 1992, «Основы физики межзвездной среды», Москва, Издательство МГУ

53. Брагинский, В.Б., 2000, «Гравитационно-волновая астрономия: новые методы измерений», УФН 170, 743

54. Бразиер, Джонстон (Brazier, K.T.S., Johnston, S.) 1999, «The implications of radio-quiet neutron stars», MNRAS, 305, 671

55. Браун (Braun, R.) 1996, «The square kilometer array interferometer», in: «Continuing adventure in radio astronomy», Eds. E. Raimond, R. Genee, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, Astrophysics and Space Science Library (ASSL) vol. 208, p. 167 (astro-ph/9512060)

56. Браун и др. (Braun, R., Goss, W.M., Lyne, A.G.) 1989, «Three fields containing young pulsars: the observable lifetime of supernova remnants», ApJ 340, 355
57. Брискен и др. (Brisken, W.F., Benson, J.M., Goss, W.M., Thorsett, S.E.) 2002, «VLBA measurement of nine pulsar parallaxes», ApJ 571, 906 (astro-ph/0204105)
58. Брискен и др. (Brisken, W.F., Thorsett, S.E., Golden, A., Goss, W.M.) 2003, «The distance and radius of the neutron star PSR B0656+14», astro-ph/0306232
59. Бхатт (Bhatt, H.C.) 1990, «Is the X-ray pulsar H0253+193 a neutron star spun down in a molecular cloud?», A&A 232, 367
60. Бхаттачарья и др. (Bhattacharya, D., Wijers, R.A.M.J., Hartman, J.W., Verbunt, F.) 1992, «On the decay of the magnetic fields of single radio pulsars», A&A 254, 198
61. Валлиснери (Vallisneri, M.) 2002, «What can we learn about neutron stars from gravity-wave observations?», gr-qc/0202037
62. Ванг (Wang, J.) 1997, «Evidence for magnetic field decay in RX J0720.4-3125», ApJ 486, L119
63. Ванг, Робертсон (Wang, Y.-M., Robertson, J.A.) 1985, «“Propeller” action by rotating neutron stars», A&A 151, 361
64. Ванг, Чакрабарти (Wang, Z., Chakrabarty, D.) 2002, «The likely near-infrared counterpart to the anomalous X-ray pulsar 1E 1048.1-5937», ApJ 579, L33 (astro-ph/0207540)
65. ван дер Сваллу, Ву (van der Swalluw, E., Wu, Y.) 2001, «Inferring initial spin periods for neutron stars in composite remnants», ApJ 555, L49 (astro-ph/0104390)
66. ван Керквийк, Кулкарни (van Kerkwijk, M.H., Kulkarni, S.R.) 2001, «An unusual H_α nebula around the nearby neutron star RX J1856.5-3754», A&A 380, 221
67. ван Керквийк и др. (van Kerkwijk, M.H., van Paradijs, J., Zuiderwijk, E.J., Hammerschlag-Hensberge, G., Kaper, L., Sterken, C.) 1995, «Spectroscopy of HD 77581 and the mass of Vela X-1», A&A 303, 483 (astro-ph/9505070)
68. ван Парадайз и др. (van Paradijs, J., Taam, R.E., van den Heuvel, E.P.J.) 1995, «On the nature of the ’anomalous’ 6-s X-ray pulsars», A&A 299, L41
69. Ватс и др. (Vats, H.O., Deshpande, M.R., Shah, C. et al.) 1997, «A possible detection of radio pulses from Geminga at 103 MHz», MNRAS 302, L65
70. Вентура, Потехин (Ventura, J., Potekhin, A.Y.) 2001, «Neutron star envelopes and thermal radiation from the magnetic surface», in «The neutron star — black hole connection», NATO ASI Ser. C, vol. 567, Kluwer, Dordrecht, p. 393 (astro-ph/0104003)
71. Вербунт и др. (Verbunt, F., Hartman, J.W., Bhattacharya, D., Wijers, R.A.M.J., Nelemans, G.) 1999, «Applications of radio pulsar population synthesis», in: «Pulsar timing, general relativity and the internal structure of neutron stars», Eds. Z. Arzoumanian, F. Van der Hooft, E.P.J. van den Heuvel (Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Amsterdam), p.215
72. Вербунт (Verbunt, F.) 2001, «A census with ROSAT of low-luminosity X-ray sources in globular clusters», A&A 368, 137 (astro-ph/0012261)
73. «Взаимосвязь между нейтронными звездами и остатками сверхновых» («The relationship between neutron stars and supernova remnants») 1998, Mem. Soc. Astr. It. vol. 69, Eds. R. Bandiera, E. Masini, F. Pacini, M. Salvati, L. Woltjer
74. Видри и др. (Vidrih, S., Cadez, A., Galicic, M., Carraminana, A.) 2003, «Stroboscopic optical observations of the Crab pulsar», astro-ph/0301328

75. Вилмс (Wilms, J., Allen, A., McCray, R.) 2000, «On the absorption of X-rays in the interstelalr medium» ApJ 542, 914 (astro-ph/0008425)

76. Винк и др. (Vink, J., Bocchino, F., Damiani, F., Kaastra, J.S.) 2000, «An unresolved X-ray source inside the supernova remnant RCW 86», A&A 362, 711

77. Виттен (Witten, E.) 1984, «Cosmic separation of phases», Phys. Rev. D 30, 272

78. Волтер и др. (Walter, F., Wolk, S. J., Neuhauser, R.) 1996, «Discovery of a nearby isolated neutron star», Nature 379, 233

79. Волтер (Walter, F.) 2001, «The proper motion, parallax, and origin of the isolated neutron star RX J185635-3754», ApJ 549, 443

80. Волтер, Латтимер (Walter, F.M., Lattimer, J.M.) 2002, «A revised parallax and its implications for RX J185635-3754», ApJ 576, L145 (astro-ph/0204199)

81. Воскресенский Д.Н., Сенаторов А.В., 1986, «Излучение нейтрино нейтронными звездами», ЖЭТФ 90, 1505

82. Воскресенский Д.Н., Сенаторов А.В., 1987, Ядерная физ. 45, 657

83. Вудс (Woods, P.M.) 2003, «The dynamic behavior of soft gamma repeaters», astro-ph/0304372.

84. Вусли и др. (Woosley, S.E., Heger, A., Weaver, T.A.) 2002, «The evolution and explosion of massive stars», Reviews of Modern Physics 74, 1015

85. Гавриил и др. (Gavriil, F.P., Kaspi, V.M., Chakrabarty, D.) 2001, «Long-term monitoring of anomalous X-ray pulsars», in: «Neutron stars in supernova remnants», ASP Conference Series, vol. 271, Eds. P.O. Slane, B.M. Gaensler, p. 274 (astro-ph/0111562)

86. Гавриил, Каспи (Gavriil, F.P., Kaspi, V.M.) 2002, «Long-term RXTE monitoring of anomalous X-ray pulsars», ApJ 567, 1067 (astro-ph/0107422)

87. Гавриил и др. (Gavriil, F.P., Kaspi, V.M., Woods, P.M.) 2002, «Magnetar-like X-ray bursts from an anomalous X-ray pulsar», Nature 419, 142 (astro-ph/0209202)

88. Гавриил и др. (Gavriil, F.P., Kaspi, V.M., Woods, P.M.) 2003, «Anomalous X-ray pulsars: long-term monitoring and soft-gamma repeater like X-ray bursts», astro-ph/0301092

89. Гальперн, Ванг (Halpern, J.P., Wang, F.Y.-H.) 1997, «A broadband X-ray study of the Geminga pulsar», ApJ 477, 905

90. Гальперн и др. (Halpern, J. P., Camilo, F., Gotthelf, E. V., Helfand, D. J., Kramer, M., Lyne, A. G., Leighly, K. M., Eracleous, M.) 2001, «PSR J2229+6114: Discovery of an energetic young pulsar in the error box of the EGRET source 3EG J2227+6122», ApJ 552, L125

91. Гальперн и др. (Halpern, J.P., Gotthelf, E.V., Mirabal, N., Camilo, F.) 2002, «The next Geminga: deep multiwavelength observations of a neutron star identified with 3EG J1835+5918», ApJ 573, L41 (astro-ph/020544)

92. Гамов, Шенберг (Gamow, G., Schoenberg, M.) 1941, «Neutrino theory of stellar collapse», Phys. Rev. 59, 539

93. Гансик и др. (Gaensicke, B.T., Braje, T.M., Romani, R.W.) 2002, «Thermal emission from low-field neutron stars», A&A 386, 1001(astro-ph/0110130)

94. Гварамадзе (Gvaramadze, V.V.) 2002, «Neutron stars in supernova remnants and beyond», astro-ph/0212541

95. Генслер, Джонстон (Gaensler, B.M., Johnston, S.) 1995a, «The case for associations between old pulsars and supernova remnants», MNRAS 275, L73

96. Генслер, Джонстон (Gaensler, B.M., Johnston, S.) 1995б, «Do we expect to see young pulsars outside their parent shells?», Publ. Astron. Soc. Aust. 12, 76

97. Генслер, Джонстон (Gaensler, B.M., Johnston, S.) 1995в, «The pulsar/supernova remnant connection», MNRAS 277, 1243

98. Генслер, Фрейл (Gaensler, B.M., Frail, D.A.) 2000, «A large age for the pulsar B1757-24 from an upper limit on its proper motion», Nature 406, 158

99. Генслер и др. (Gaensler, B.M., Gotthelf, E.V., Vasisht, G.) 1999, «A supernova remnant coincident with the slow X-ray pulsar AX J1845-0258», ApJ 526, L37 (astro-ph/9909400)

100. Генслер (Gaensler, B.M.) 2002, «Anomalous X-ray pulsars and soft gamma-ray repeaters – the connection with supernova remnants», astro-ph/0212086

101. Гепперт и др. (Geppert, U., Page, D., Zanninias, T.) 2000, «Magnetic field decay in neutron stars. Analysis of general relativistic effects» Phys. Rev. D 61, 3004 (astro-ph/0005313),

102. Гепперт и др. (Geppert, U., Urpin, V., Konenkov, D.) 1996, «Wind accretion and magnetorotational evolution of neutron stars in binaries.», A&A 307, 807

103. Гепперт, Рейнхардт (Geppert, U., Rheinhardt, M.) 2002, «Non-linear magnetic field decay in nautron stars — Theory and observations», A&A 392, 1015 (astro-ph/0207065)

104. Гехрелс и др. (Gehrels, N., Macomb, D. J., Bertsch, D. L., Thompson, D. J., Hartman, R. C.) 2000, «Discovery of a new population of high-energy γ-ray sources in the Milky Way», Nature 404, 363

105. Гинзбург, В.Л. 1964, «О магнитных полях коллапсирующих масс и природе сверхзвезд», ДАН СССР 156, 43

106. Гинзбург, В.Л., Киржниц, Д.А., 1965, «О сверхтекучести нейтронных звезд», ЖЭТФ 47, 2006

107. Гнедин и др. (Gnedin, O.Y., Yakovlev, D.G., Potekhin, A.Y.) 2001, «Thermal relaxation in young neutron stars», MNRAS 324, 725

108. Голден и др. (Golden, A., Shearer, A., Redfern, R. M., Beskin, G. M., Neizvestny, S. I., Neustroev, V. V., Plokhotnichenko, V. L., Cullum, M.) 2000, «High speed phase-resolved 2-d UBV photometry of the Crab pulsar», A&A 363, 617

109. Голдрайх (Goldreich, P.) 1970, «Neutron star crusts and alignment of magnetic axes in pulsars», ApJ 160, L11

110. Голдрайх, Джулиан (Goldreich, P., Julian, W.H.) 1969, «Pulsar electodynamics», ApJ 157, 869

111. Горбацкий, В.Г., 1977, «Космическая газодинамика» М. Наука

112. Готтхелф и др. (Gotthelf, E.V., Vasisht, G., Dotani, T.) 1999, «On the spin history of the X-ray pulsar Kes 73: further evidence for an ultramagnetized neutron star», ApJ 522, L49

113. Готтхелф, Васишт (Gotthelf, E.V., Vasisht, G.) 2000, «A new view on young pulsars in supernova remnants: slow, radio-quiet & X-ray bright», in: Proceedings of IAU Coll. 177, «Pulsar astronomy – 2000 and beyond», ASP Conf. Series vol. 202 (San Francisco), Eds. M. Kramer, N. Wex, N. Wielebinski, p. 699

114. Готтхелф и др. (Gotthelf, E.V., Vasisht, G., Boylan-Kolchin, M., Torii, K.) 2000, «A 700 year-old pulsar in supernova remnant Kes 75», ApJ 542, L37 (astro-ph/0008097)

115. Готтхелф и др. (E. V. Gotthelf, F. P. Gavriil, V. M. Kaspi, G. Vasisht, D. Chakrabarty) 2001, «15 years going steady – timing the magnetar 1E 1841-045», in: «Neutron stars in supernova remnants», ASP Conference Series, vol. 271, Eds. P. O. Slane, B. M. Gaensler, p. 309 (astro-ph/0112019)

116. Гренье (I.A. Grenier) 2000, «Gamma-ray sources as relics of recent supernovae in the nearby Gould Belt», A&A, 364, L93

117. Гренье (I.A. Grenier) 2003, «Unidentified EGRET sources in the Galaxy», astro-ph/0303498

118. Гренье, Перро (I.A. Grenier, C.A. Perrot) 2001, «Neutron star contribution to the Galactic unidentified EGRET sources», «Gamma–2001» Eds. S. Ritz, N. Gehrels, C.R. Shrader, Melville, New York, AIP conferences, 2001, vol. 587, p. 649

119. Грингел и др. (Gringel, W., Barnstedt, J., de Boer, K. S., Grewing, M., Kappelmann, N., Richter, P.) 2000, «ORFEUS II Echelle spectra: molecular hydrogen at high velocities toward HD 93521», A&A 358, L37

120. Грищук, Л.П., Липунов, В.М., Постнов, К.А., Прохоров, М.Е., Сатьяпракаш, Б.С., 2001, «Гравитационно-волновая астрономия: в ожидание первого зарегистрированного источника», УФН 171, 3

121. Гулд (Gould, A.) 2000, «Measuring the remnant mass function of the Galactic buldge», ApJ 535, 928

122. Гулд (Gould, A.) 2001, «Applications of microlensing to stellar astrophysics», PASP 113, 903

123. Гусаков (Gusakov, M.E.) 2002, «Neutrino emission from superfluid neutron-star cores: various types of neutron pairing», A&A 389, 702 (astro-ph/0204334)

124. Д'Амико и др. (D'Amico, N., Lyne, A.G., Manchester, R.N., Camilo, F.M., Kaspi, V.M., Bell, J., Stairs, I.H., Crawford, F., Morris, D., Possenti, A.) 1999, «The Parkes multibeam pulsar survey: preliminary results», in: «X-ray astronomy : stellar endpoints, AGN, and the diffuse X-ray background», Eds. N.E. White, G. Malaguti, G.G.C. Palumbo, AIP conference proceedings vol. 599, p. 598 (astro-ph/9911482)

125. Дар, Де Рухула (Dar, A., De Rujula) 2000, «Soft gamma ray repeaters and anomalous X-ray pulsars: magnetars or young quark stars?», Res. Persp. Part. Phys., vol. XVII, p. 13 (astro-ph/0002014)

126. Дейвис, Голдштейн (Davis, L., Goldstein, M.) 1970, «Magnetic-dipole alignment in pulsars», ApJ 159, L81

127. Джексон и др. (Jackson, M.S., Halpern, J.P., Gotthelf, E.V., Mattox, J.R.) 2002, «A high-energy study of the Geminga pulsar», ApJ 587, 935 (astro-ph/0207001)

128. Джиозотто и др. (Giazotto, A., Bonazzola, S., Gourgoulhon, E.) 1997, «Gravitational waves emitted by an ensemble of rotating neutron stars», Phys. Rev. D 55 2014

129. Джонс (Jones, P.B.) 1976, «Pulsar magnetic alignment – The critical period and integrated pulse width», ApJ 209, 602

130. Джонс (Jones, P.B.) 1977, «Pulsar magnetic alignment – A classification of pulsars», MNRAS 178, 87

131. Джонстон, Галлоувей (Johnston, S., Galloway, D.) 1999, «Pulsar braking indices revisited», MNRAS 306, L50

132. Джонстон (Johnston, S.) 2003, «Radio observations of two isolated neutron stars, RXJ0720.4-3125 and RX J0806.4-4132», astro-ph/0302502

133. Джюэт и др. (Juett, A.M., Marshall, H.L., Chakrabarty, D., Schulz, N.,S.) 2002, «Chandra high-resolution spectrum of the anomalous X-ray pulsar 4U 0142+61», ApJ 568, L31 (astro-ph/0202304)

134. Дзане и др. (Zane, S., Turolla, R., Treves, A.) 1996, «Old isolated neutron stars: the diffuse X-ray emission from the galactic center», ApJ 471, 248

135. Дзане и др. (Zane, S., Turolla, R., Zampieri, L., Colpi, M., Treves, A.) 1995, «Old isolated neutron stars: contribution to the soft X-ray background in the 0.5-2 keV band», ApJ 451, 739

136. Дзане и др. (Zane, S., Turolla, R., Stella, L., Treves, A.) 2001, «Proton cyclotron features in thermal spectra of ultra-magnetized neutron stars», ApJ 560, 384 (astro-ph/0103316)

137. Дзане и др. (Zane, S. et al.) 2002, «Timing analysis of the isolated neutron star RX J0720.4-3125», MNRAS 334, 345 (astro-ph/0203105)

138. Доминик, Саху (Dominik, M., Sahu, K.C.) 1999, «Astrometric microlensing of stars», ApJ 534, 213 (astro-ph/9805360)

139. Дрейк и др. (Drake, J.J., Marshall, H.L., Dreizler, S., Freeman, P.E., Fruscione, A., Juda, M., Kashyap, V., Nicastro, F., Pease, D.O., Wargelin, B.J., Werner, K.) 2002, «Is RX J18563.5-3754 a quark star?», ApJ 573, 996 (astro-ph/0204159)

140. Дункан (Duncan, R.C.) 2000, «Physics in ultra-strong magnetic fields», in: 5th Huntsville Symposium, Eds. R.M. Kippen, R.S. Mallozzi, G.J. Fishman. AIP Conference Series, American Institute of Physics, Melville, New York, vol. 526, p. 830 (astro-ph/0002442)

141. Дункан (Duncan, R.C.) 2002, «Nature, nurture or not sure? A debate about SGRs and AXPs», Mem. Soc. Astron. Ital., 73, 534(astro-ph/0106041)

142. Дэвис, Прингл (Davis, R.E., Pringle, J.E.) 1981, «Spindown of neutron stars in close binary systems-II», MNRAS 196, 209

143. Ерлыкин, Вольфендейл (Erlykin, A.D., Wolfendale, A.W.) 2003, «High-energy cosmic gamma rays from the "Single source"», astro-ph/0302380

144. Жанг (Zhang, B.) 2002, «Magnetars and pulsars: a missing link», astro-ph/0212016

145. Ждуник и др. (Zdunik J.L., Haensel P., Paczynski B., Miralda-Escude J.) 1992, «Thermal structure of neutron stars with very low accretion rates», ApJ 384, 129

146. Жигулев, В.Н., Ромашевский, Е.А., 1959, «О взаимодействии потоков проводящей среды с магнитным полем Земли», ДАН 127, 1001

147. Завлин, Павлов (Zavlin, V.E., Pavlov, G.G.) 1998, «Soft X-rays from polar caps of the millisecond pulsar J0437-4715», A&A 329, 583

148. Завлин, Павлов (Zavlin, V.E., Pavlov, G.G.) 1999, private communication

149. Завлин и др. (Zavlin, V.E., Pavlov, G.G., Shibanov, Yu.A.) 1996, «Model neutron star atmospheres with low magnetic fields. I. Atmospheres in radiative equilibrium», A&A 315, 141

150. Завлин и др. (Zavlin, V.E., Pavlov, G.G., Trumper, J.) 1998, «The neutron star in the supernova remnant PKS 1209-52», A&A 331, 821

151. Завлин и др. (Zavlin, V.E., Trumper , J., Pavlov, G.G.) 1999, «X-ray emission from radio-quiet neutron star in Puppis A», ApJ 525, 959

152. Завлин, Павлов (Zavlin, V.E., Pavlov, G.G.) 2002, «Modeling neutron star atmospheres», in: Proceedings of the «WE-Heraeus seminar on neutron stars, pulsars, and supernova remnants», MPE Report 278, Eds. W. Becker, H. Lesch, J. Trumper, p.263 (astro-ph/0206025)

153. Зампьери и др. (Zampieri, L., Turolla, R., Zane, S., Treves, A.) 1995, «X-ray spectra from neutron stars accreting at low rates», ApJ, 439, 849

154. Зампьери и др. (Zampieri, L., Campana, S., Turolla, R., Chieregato, M., Falomo, R., Fugazza, D., Moretti, A., Treves, A.) 2001, «1RXS J214303.7+065419/RBS 1774: a new isolated neutron star candidate», A&A 378, L5 (astro-ph/0108456)

155. Зампьери и др. (Zampieri, L., Colpi, M., Shapiro, S. L., Wasserman, I.) 1998, «Supernova fallback and the emergence of a black hole», ApJ 505, 876

156. Захаров, А.Ф., Сажин, М.В., 1998, «Гравитационное микролинзирование», УФН 168, 1041

157. Зельдович, Я.Б., Иванова, Л.Н., Надежин, Д.К., 1972, «Нестационарная гидродинамическая аккреция на нейтронную звезду», АЖ 49, 253

158. Зельдович, Я.Б., Шакура, Н.И., 1969, «Рентгеновское излучение сопровождающее аккрецию газа на нейтронную звезду», АЖ 46, 225

159. Ибрагим и др. (Ibrahim , A.I., Safi-Harb, S., Swank, J.H., Parke, W., Zane, S., Turolla, R.) 2002a, «Discovery of cyclotron resonance features in the soft gamma repeater SGR 1806-20», ApJ 574, L51 (astro-ph/0210513)

160. Ибрагим и др. (Ibrahim , A.I., Swank, J.H., Parke) 2002б, «New evidence for proton cyclotron resonance in a magnetar strength field from SGR 1806-20», astro-ph/0210515

161. Иваненко, Д.Д., Курдгелаидзе, Д.Ф. 1965, «Гипотеза кварковых звезд», Астрофизика 1, 479

162. Израэл и др. (Israel, G.L., Mereghetti, S., Stella, L.) 2002a, «Observations of anomalous X-ray pulsars», Mem. Soc. Astron. Ital. 73, 465(astro-ph/0111093)

163. Израэл и др. (Israel, G.L. et al.) 2002б, «The detection of variability from the candidate IR counterpart to the anomalous X-ray pulsar 1E1048.1-5937», astro-ph/0209599

164. Израэл и др. (Israel, G.L. et al.) 2003, «The IR counterpart to the anomalous X-ray pulsar 1RXS J170849-400910», astro-ph/0304233

165. Илларионов, Сюняев (Illarionov, A.F., Syunyaev, R.A.) 1975, «Why the number of Galactic X-ray stars is so small?», A&A 39, 185

166. Имшенник В.С., 1992, «Возможный сценарий взрыва сверхновой в условиях гравитационного коллапса массивного звездного ядра», ПАЖ 18, 489

167. Имшенник, В.С., 2000, «Вспышки сверхновых и историческая хронология», УФН 170, 553

168. Имшенник (Imshennik, V.S.) 1998, «Models of supernovae», in: «Modern problems in stellar evolution», Proceedings of the International Conference in honour of Professor A.G. Massevitch's 80th birthday (Moscow: GEOS), Ed. D.S. Wiebe, p.163

169. Имшенник, В.С., Надежин, Д.К., 1988, «Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом Облаке: наблюдения и теория», УФН 156, 561

170. Инам, Байкал (Inam, S.C., Baykal, A.) 1999, «X-ray flux and pulse frequency changes of three high mass X-ray binary pulsars: Vela X-1, GX 301-2 and OAO 1657-415», A&A 353, 617 (astro-ph/9911013)

171. Ито (Itoh, N.) 1970, «Hydrostatic equilibrium of hypothetical quark stars», Prog. Theor. Phys. 44, 291

172. Ихсанов (Ikhsanov, N.R.) 2003, «On the accretion luminosity of isolated neutron stars», A&A 399, 1147 (astro-ph/0301076)

173. Камило и др. (Camilo, F., Bell, J.F., Manchester, R.N., Lyne, A.G., Possenti, A., Kramer, M., Kaspi, V.M., Stairs, I.H., D'Amico, N., Hobbs, G., Gotthelf, E.V., Gaensler, B.M.) 2001, «PSR J1016-5857: a young radio pulsar with possible supernova remnant, X-ray, and gamma-ray associations», ApJ 557, L51 (astro-ph/0107180)

174. Камило и др. (Camilo, F. et al.) 2002а, «Discovery of radio pulsations from the X-ray pulsar J0205+6449 in supernova remnant 3C58 with the Green Bank Telescope», ApJ 571, L71 (astro-ph/0204219)

175. Камило и др. (Camilo, F. et al.) 2002б, «Discovery of a 136 millisecond radio and X-ray pulsar in SNR G54.1+0.3», ApJ 574, L71 (astro-ph/0206220)

176. Каминкер, Хенсел (Kaminker, A.D., Haensel, P.) 1999, «Neutrino emission due to electron bremsstrahlung in superfluid neutron-star cores», Acta. Phys. Polonica 30, 1125 (astro-ph/9908249)

177. Каминкер и др. (Kaminker, A.D., Haensel, P., Yakovlev, D.G.) 2001, «Nucleon superfluidity vs observations of cooling neutron stars», A&A 373, L17 (astro-ph/0105047)

178. Каминкер и др. (Kaminker, A.D., Yakovlev, D.G., Gnedin, Y.O.) 2002, «Three types of cooling superfluid neutron stars: theory and observations», A&A 383, 1076

179. Кампана, Парди (Campana, S., Pardi, M.C.) 1993, «Do molecular clouds contain accreting black holes?», A&A 277, 477

180. Каплан и др. (Kaplan, D.L., Kulkarni, S.R., van Kerkwijk, M.H., Rothschild, R., Lingenfelter, R.L., Marsden, D., Danner, D., Murakami, T.) 2001, «HST observations of SGR 0526-66: new constraints on accretion and magnetar models», ApJ 556, 270 (astro-ph/0103179)

181. Каплан и др. (Kaplan, D.L., van Kerkwijk, M.H., Anderson, J.) 2002а, «The parallax and proper motion of RX J1856.5-3754 revisited», ApJ, 571, 447 (astro-ph/0111174)

182. Каплан и др. (Kaplan, D.L., Kulkarni, S.R., van Kerkwijk, M.H.) 2002б, «A probable optical counterpart for the isolated neutron star RX J1308.6+2127», ApJ 579, L29 (astro-ph/0209519)

183. Каплан и др. (Kaplan, D.L., Kulkarni, S.R., van Kerkwijk, M.H., Marshall, H.L.) 2002в, «X-ray timing of the enigmatic neutron star RX J0720.4-3125», ApJ 570, L79 (astro-ph/0205029)

184. Каплан и др. (Kaplan, D.L., Kulkarni, S.R., van Kerkwijk, M.H.) 2003а, «The optical counterpart of the isolated neuron star RX J1605.3+3249», astro-ph/0302370

185. Каплан и др. (Kaplan, D.L., Marshall, H.L., Jacoby, B.A., Kulkarni, S.R., van Kerkwijk, M.H., Frail, A.) 2003б, «The nearby neutron star RX J0720.4-3125 from radio to X-rays», astro-ph/0303126

186. Каппелларо и др. (Cappellaro, E., Evans, R., Turatto, M.) 1999, «A new determination of supernova rates and a comparison with indicators for galactic star formation», A&A 351, 459

187. Каравео (Caraveo, P.A.) 2000, «A sociological study of the optically emittimg isolated neutron stars», in: Proceedings of IAU Coll. 177, «Pulsar astronomy – 2000 and beyond», ASP Conf. Series vol. 202 (San Francisco), Eds. M.Kramer, N.Wex, R. Wielebinski, p. 289

188. Каравео (Caraveo, P.) 2002, «High-energy gamma-ray sources and the quest for their identification», astro-ph/0206236

189. Каравео и др. (Caraveo, P.A., Bignami, G.F., Trumper, J.E.) 1996, «Radio-silent isolated neutron stars as a new astronomical reality», Astron. Astrophys. Rev. 7, 209
190. Картер (Carter, B.) 2000, «Superconducting superfliuds in neutron stars», Grav. Cosmol. Suppl. 6, 204
191. Каспи (Kaspi, V.M.) 1996, «Pulsar/supernova remnant associations», in: «Pulsars: problems and progress», Eds. S. Johnston, M. Bailes, M. Walker, ASP Conference Series vol. 105, p. 375
192. Каспи, Хелфанд (Kaspi, V.M., Helfand, D.J.) 2002, «Constraining the birth events of neutron stars», in: «Neutron stars in supernova remnants», ASP Conference Series, vol. 271, Eds. P.O. Slane, B.M. Gaensler, p. 3 (astro-ph/0201183)
193. Каспи и др. (Kaspi, V.M., Crawford, F., Manchester, R.N., Lyne, A.G., Camilo, F., D'Amico, N., Gaensler, B.M.) 1998, «The 69ms radio pulsar near the supernova remnant RCW 103», ApJ 503, L161 (astro-ph/9806328)
194. Каспи, Гавриил (Kaspi, V.M., Gavriil, F.P.) 2002, «1E 2259+586», IAUC 7924
195. Квайнтрелл и др. (Quaintrell, H. et al.) 2003, «The mass of the neutron star in Vela X-1 and tidally induced non-radial oscillations in GP Vel», A&A 401, 313 (astro-ph/0301243)
196. Кенди, Блэр (Candy, B.N., Blair, D.G.) 1986, «The evolution of radio pulsars», ApJ 307, 535
197. Керн, Мартин (Kern, B., Martin, C.) 2002, «Optical pulsations from the anomalous X-ray pulsar 4U0142+61», Nature 417, 527
198. Кифонидис и др. (Kifonidis K., Plewa T., Janka H.-Th., Muller E.) 1999, in: «Astronomy with radioactivities», Eds. R. Diehl, D. Hartmann (Garching: Max-Planck-Institut fur Extraterrestrische Physik) p.141 (http://www.gamma.mpe-garching.mpg.de/mpeteam/workshop/proceedings.html)
199. Клозе и др. (Klose, S., Stecklum, B., Hartmann, D.H., Vrba, F.J., Henden, A.A., Bacmann, A.) 2002, «Mid-infrared observations of the SGR 1900+14 error box», astro-ph/0201093
200. Клужняк Kluzniak, W.) 2000, «Neutron stars and strong-field effects of general relativity», in: «From the Sun to the Great Attractor», Eds. D.Page, J.G.Hirsch (Heidelberg, Springer), p.173 (astro-ph/0012548)
201. Колгейт (Colgate, S. A.) 1971, «Neutron-star formation, thermonuclear supernovae, and heavy-element reimplosion», ApJ 163, 221
202. Колпи и др. (Colpi, M, Campana, S., Treves, A.) 1993, «The observability of old isolated neutron stars with ROSAT. 2: Molecular clouds and deep fields», A&A 278, 161
203. Колпи и др. (Colpi, M., Turolla, R., Zane, S., Treves, A.) 1998, «The elusiveness of old neutron stars», ApJ 501, 252
204. Колпи и др. (Colpi, M., Geppert, U., Page, D.) 2000, «Period clustering of the anomalous X-ray pulsars and magnetic field decay in magnetars», ApJ 529, L29
205. Колпи и др. (Colpi M., Possenti A., Popov S.B., Pizzolatto F.) 2001, «Spin and magnetism in old neutron stars», in «Physics of neutron star interiors», Eds. D. Blaschke, N.K. Glendenning, A. Sedrakian (Springer, 2001), Lecture Notes in Physics, vol. 578, p.440 (astro-ph/0012394)
206. Колпи, Вассерман (Colpi, M., Wasserman, I.) 2002, «Formation of an evanescent proto-neutron star binary and the origin of pulsar kicks», ApJ 581, 1271 (astro-ph/0207327)

207. Конар, Чодури (Konar, S., Choudhuri, A.R.) 2003, «Diamagnetic screening of magnetic field in accreting neutron stars II — The effect of polar cap widening», astro-ph/0304490

208. Коненков, Д.Ю., Попов, С.Б. 1997, «RX J0720.4-3125 как возможный пример затухания магнитного поля нейтронных звезд», ПАЖ, 23, 569

209. Коненков, Гепперт (Konenkov, D.Yu., Geppert, U.) 2001a, «The evolution of core and surface magnetic field in isolated neutron stars», MNRAS 325, 426 (astro-ph/0103060)

210. Коненков, Гепперт (Konenkov, D.Yu., Geppert, U.) 2001б, «On the nature of the residual magnetic fields in millisecond pulsars», A&A 372, 583

211. Коненков, Гепперт (Konenkov, D.Yu., Geppert, U.) 2000, «The effect of the neutron-star crust on the evolution of a core magnetic field», MNRAS 313, 66

212. Копцевич и др. (Koptsevich, A. B., Pavlov, G. G., Zharikov, S. V., Sokolov, V. V., Shibanov, Yu. A., Kurt, V. G.) 2001, «Optical photometry of the PSR B0656+14 and its neighborhood», A&A 370, 1004

213. Кордес (Cordes, J.M.) 1998, «Kinematics of neutron star populations», in: «Neutron stars and pulsars», Eds. N. Shibazaki, N. Kawai, S. Shibata, T. Kifune (Universal Academy Press, Tokyo), p.19

214. Кордес, Чернофф (Cordes, J.M., Chernoff, D.F.) 1997, «Neutron star population dynamics. I. Millisecond pulsars», ApJ 482, 971

215. Кордес, Чернофф (Cordes, J.M., Chernoff, D.F.) 1998, «Neutron star population dynamics. II. Three-dimensional space velocities of young pulsars», ApJ 505, 315

216. Кордес, Лацио (Cordes, J.M., Lazio, T.J.W.) 2002, «NE2001.I. A new model for the galactic distribution of free electrons and its fluctuations», astro-ph/0207156

217. Коттам и др. (Cottam, J., Paerels, F., Mendez, M.) 2002, «Gravitationally redshifted absorption lines in the X-ray burst spectra of a neutron star», Nature 420, 51 (astro-ph/0211126)

218. Крамер и др. (Kramer, M. et al.) 2003, «The Parkes multibeam pulsar survey: III. Young pulsars & the discovery and timing of 200 pulsars», astro-ph/0303473

219. Крейг и др. (Craig, W.W., Hailey, Ch.J., Pisarski, R.L.) 1997, «ROSAT observations of the supernova remnant CTB 1», ApJ 488, 307

220. Ксу (Xu, R.X.) 2002, «Strange quark stars – A review», astro-ph/0211348

221. Кубис, Кучера (Kubis, S., Kutschera, M.) 2002, «Kaon condensates, nuclear symmetry energy and cooling of neutron stars», astro-ph/0207490

222. Кузьмин, А.Д., Лосовский, Б.Я. 1997, «Обнаружение радиопульсара PSR J0633+1746 в Геминге», ПАЖ 23, 323

223. Курт и др. (Kurt, V. G., Komberg, B. V., Sokolov, V. V., Zharykov, S. V.) 1997, «Optical observations of the nearby isolated pulsar PSR 0656+14 at the SAO 6-meter telescope», Ap&SS. 252, 451

224. Лай (Lai, D.) 2002, «Core-collapse supernovae and neutron star kicks», astro-ph/0212140

225. Лайн, Лоример (Lyne, A.G., Lorimer, D.R.) 1994, «High birth velocities of radio pulsars», Nature, 369, 127

226. Лайн и др. (Lyne, A.G., Pritchard, R.S., Graham-Smith, F., Camilo, F.) 1996, «Very low braking index for the Vela pulsar», Nature 381, 497

227. Ланглуа (Langlois, D.) 2000, «Superfluidity in relativistic neutron stars», astro-ph/0008161

228. Ларсон, Линк (Larson, M.B., Link, B.) 1999, «Superfluid friction and late-time thermal evolution of neutron stars», ApJ 521, 271

229. Латтимер и др. (Lattimer, J.M., Prakash, M., Pethick, C.J., Haensel, P.) 1991, «Direct URCA process in neutron stars», Phys. Rev. Lett. 66, 2701

230. Латтимер, Пракаш (Lattimer, J.M., Prakash, M.) 2001, «Neutron star structure and the equation of state», ApJ 550, 426

231. Левенфиш, К.П., Шибанов, Ю.А., Яковлев, Д.Г. 1999, «Простая модель остывающей нейтронной звезды со сверхтекучим ядром: сравнение с наблюдениями», ПАЖ 25, 491 (astro-ph/9903098)

232. Леинсон (Leinson, L.B.) 2002, «Direct Urca processes on nucleons in cooling neutron stars», Nucl.Phys. A707, 543(hep-ph/0207116)

233. Либерман, М.А., Йоханссон, Б., 1995, «Вещество в сверхсильном магнитном поле и структура поверхности нейтронных звезд», УФН 165, 121

234. Ливио и др. (Livio, M., Xu, C., Frank, J.) 1998, «On the magnetic field evolution in isolated neutron stars», ApJ 492, 298

235. Линдблом (Lindblom, L.) 2001, «Neutron stars pulsations and instabilities», astro-ph/0101136

236. Линк (Link, B.) 2002, «Precession of isolated neutron stars», astro-ph/0211182

237. Липунов, В.М., 1987, «Астрофизика нейтронных звезд», М., Наука (English translation: Lipunov, V.M., 1992, «Astrophysics of neutron stars», Springer-Verlag, Berlin)

238. Липунов и др. (Lipunov, V.M., Postnov, K.A., Prokhorov, M.E.) 1996 «The Scenario Machine: binary star population synthesis» Astrophysics and space physics reviews, Ed. R.A. Sunyaev, vol. 9 part 4 (см., также, **http://xray.sai.msu.ru/~ mystery/html/articles/review/**)

239. Липунов, В.М., Попов, С.Б. 1995, «Эволюция периодов изолированных нейтронных звезд: теорема о замедлении», АЖ, 71, 711

240. Лозинская, Т.А., 1986, «Сверхновые звезды и звездный ветер. Взаимодействие с газом Галактики», М. Наука

241. Лоример и др. (Lorimer, D.R., Bailes, M. Harrison, P.A.) 1997, «Pulsar statistics–IV. Pulsar velocities», MNRAS 289, 592

242. Лоример и др. (Lorimer, D.R., Lyne, A.G., Camilo, F.) 1998, «A search for pulsars in supernova remnants», A&A 331, 1002

243. Лоример и др. (Lorimer, D.R., Kramer, M., Muller, P., Wex, N. Jessner, A., Lange, C., Wielebinski, R.) 2000, «A 1400-hz pilot search for young pulsars», A&A 358, 169 (astro-ph/9910569)

244. Любарский (Lyubarsky, Yu.E.) 1995, «Physics of pulsars», Astrophysics and space physics reviews, Ed. R.A. Sunyaev, vol. 9, part 2

245. Лютиков и др. (Lyutikov, M., Thompson, C., Kulkarni, S.R.) 2001, «Magnetospheric structure and non-thermal emission of AXPs and SGRs», in: «Neutron stars in supernova remnants», ASP Conference Series, vol. 271, Eds. P.O. Slane, B.M. Gaensler, p. 262 (astro-ph/0111319)

246. Лэмб и др. (Lamb, R.C., Fox, D.W., Macomb, D.J., Prince, T.A.) 2002, «Discovery of a possible anomalous X-ray pulsar in the Small Magellanic Cloud», ApJ 574, L29 (astro-ph/0205310)

247. Мадау, Блаез (Madau, P., Blaes, O.) 1994, «Constraints on accreting, isolated neutron stars from the ROSAT and EUVE surveys», ApJ, 423, 748

248. МакЛафлин и др. (McLaughlin, M.A. et al.) 2003, «PSR J1847–0130: a radio pulsar with magnetar spin characteristics», astro-ph/0306065

249. Мазец, Е.П., Голенецкий, С.В., Гурьян, Ю.А., 1979, «Мягкие гамма-всплески от источника в 1900+14», ПАЖ 5, 641

250. Мазец, Е.П., Голенецкий, С.В., 1987, «Наблюдения космических гамма-всплесков», в сборнике Итоги науки и техники. Астрономия. том 32, Ред. Р.А. Сюняев, с. 16

251. Майкель (Michel, F.C.) 1991, «Theory of neutron star magnetospheres», The University of Chicago Press

252. Малов, И.Ф., 2001, «О синхротронных спектрах короткопериодических пульсаров», АЖ 78, 165

253. Малофеев, Малов (Malofeev, V.M., Malov, O.I.) 1997, «Detection of Geminga as a radio pulsar», Nature 389, 697

254. Малофеев, В.М., Малов, О.И., 2000, «Необычный профиль радиопульсара Геминга», АЖ 77, 45

255. Мандал, Чакрабарти (Mandal, S., Chakrabarty, S.) 2002, «Pauli paramagnetism of neutron star matter and the upper limit for neutron star magnetic fields», astro-ph/0209015

256. Мао и др. (Mao, S. et al.) 2001, «Optical gravitational lensing experiment. OGLE-1999-BUL-32: the longest ever microlensing event - evidence for a stellar mass black hole?», MNRAS 329, 349 (astro-ph/0108312)

257. Марсден и др. (Marsden, D., Lingenfelter, R., Rothschild, R., Higdon, J.) 1999, «Environmental influences in SGRs and AXPs», in: 5th Huntsville Symposium, Eds. R.M. Kippen, R.S. Mallozzi, G.J. Fishman, AIP Conference Series (American Institute of Physics, Melville, New York), vol. 526, p. 847 (astro-ph/9912315)
258. Марсден и др. (Marsden, D., Lingenfelter, R.E., Rothschild, R.E.) 2000, «Does pulsar B1757-24 have a fallback disk?», ApJ 547, L45
259. Марсден, Вайт (Marsden, D., White, N.E.) 2001, «Correlations between spectral properties and spin-down rate in soft gamma-ray repeaters and anomalous X-ray pulsars», ApJ 551, L155 (astro-ph/0102375)
260. Маршалл, Шульц (Marshall, H.L., Schulz, N.S.) 2002, «Using high resolution X-ray spectrum of PSR B0656+14 to constrain the chemical composition of the neutron star atmosphere», ApJ 574, 377 (astro-ph/0203463)
261. Материалы колл. MAC 177 (Proceedings of IAU Coll. 177), «Pulsar astronomy – 2000 and beyond», 2000, ASP Conf. Series vol. 202 (San Francisco), Eds. M. Kramer, N. Wex, N. Wielebinski
262. Мейси (Macy, W.W.) 1974, «Pulsar magnetic axis alignment and counteralignment», ApJ 190, 153
263. Мену и др. (Menou, K., Perna, R., Hernquist, L.) 2001a, «Stability and evolution of supernova fallback disks», ApJ 559, 1032 (astro-ph/0102478)
264. Мену и др. (Menou, K., Perna, R., Hernquist, L.) 2001б, «Disk-assisted spin-down of young radio pulsars», ApJ 554, L63 (astro-ph/0103326)
265. Мерегетти и др. (Mereghetti, S., Bandiera, R., Bocchino, F., Israel, G.L.) 2002a, «BeppoSAX observations of the young pulsar in the Kes 75 supernova remnant», ApJ 574, 873 (astro-ph/0204050)
266. Мерегетти и др. (Mereghetti, S., Chiarlone, L., Israel, G.L., Stella, L.) 2002б, «The anomalous X-ray pulsars», 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-Plank-Institut fur extraterrestrische Physik, p.29 (astro-ph/0205122)
267. Мерегетти (Mereghetti, S.) 1999, «The anomalous X-ray pulsars», astro-ph/9911252
268. Мерегетти (Mereghetti, S.) 2000, «The X-ray sources at the center of the supernova remnant RX J0852.0-4622», ApJ 548, L213 (astro-ph/0011554)
269. Мерегетти, Стелла (Mereghetti, S.,Stella, L.) 1995, «The very low mass X-ray binary pulsars: A new class of sources?», ApJ 442, L17
270. Мерегетти и др. (Mereghetti, S., Bignami, G.F., Caraveo, P.A.) 1996, «The X-ray source at the center of G296.5+10.0 as a young isolated neutron star», ApJ 464, 842
271. Мерегетти и др. (Mereghetti, S., De Luca, A., Caraveo, P., Becker, W., Mignani, R., Bignami, G.F.) 2002, «Pulse phase variations of the X-ray spectral features in the radio-quiet neutron star 1E 1207-5209», ApJ 581, 1280 (astro-ph/0207296)
272. Меццакаппа и др. (Mezzacappa A., Calder A. C., Bruenn S. W., Blondin J. M., Guidry M. W., Strayer M. R., Umar A. S.) 1998a, «The interplay between proto–neutron star convection and neutrino transport in core-collapse supernovae», ApJ 493, 848

273. Меццакаппа и др. (Mezzacappa A., Calder A. C., Bruenn S. W., Blondin J. M., Guidry M. W., Strayer M. R., Umar A. S.) 1998б, «An investigation of neutrino-driven convection and the core collapse supernova mechanism using multigroup neutrino transport», ApJ 495, 911

274. Мигдал, А.Б., 1959, «Сверхтекучесть и моменты инерции ядер», ЖЭТФ 37, 249

275. Мильяццо и др. 2002 (Migliazzo, J.M., Gaensler, B.M., Backer, D.C., Stappers, B.W., van der Swalluw, E, Strom, R.G.) 2002, «Proper motion measurements of pulsar B1951+32 in the supernova remnant CTB 80», ApJ 567, L141 (astro-ph/0202063)

276. Мирабал, Гальперн (Mirabal, N., Halpern, J.P.) 2001, «A neutron star identification for the high-energy gamma-ray source 3EG J1835+5918 detected in the ROSAT all-sky survey», ApJ 547, L137

277. Митра и др. (Mitra, D., Konar, S., Bhattacharya, D., Hoensbroech, A.V., Seiradakis, J.H., Wielebinski, R.) 2000, «Evolution of multipolar magnetic fields in isolated neutron stars and its effect on pulsar radio emission» in: Proceedings of IAU Coll. 177, «Pulsar astronomy – 2000 and beyond», ASP Conf. Series vol. 202 (San Francisco), Eds. M. Kramer, N. Wex, N. Wielebinski, p. 265

278. Михеев (Mikheev, N.V.) 2000, «Neutrino processes in a strong magnetic field and plasma», in: «Strong magnetic fields in neutrino astrophysics», Eds. A.V. Kuznetsov, N.V. Mikheev, A.Ya. Parkhomenko, Yaroslavl, p.26

279. Мок и Джосс (Mock, P.C., Joss, P.C.) 1998, «Limits on energy storage in the crusts of accreting neutron stars», ApJ 500, 374

280. Моллерах, Руле (Mollerach, S., Roulet, E.) 1997, «Kicked neutron stars and microlensing», ApJ 479, 147

281. Мори и Хэйлей (Mori, K., Hailey, C.J.) 2003, «X-ray spectroscopy of the isolated neutron star 1E1207.4-5209: atmospheric composition and equation of state», astro-ph/0301161

282. Моррис и др. (Morris, D.J., Hobbs, G., Lyne, A.G. et al) 2002, «The Parkes multibeam pulsar survey — II. Discovery and timing of 120 pulsars», MNRAS 335, 275

283. Мотч (Motch, C.) 2001, «Isolated neutron stars discovered by ROSAT», in: «X-ray Astronomy», AIP Conference proceedings, vol. 599, p. 244 (astro-ph/0008485)

284. Муслимов, А.Г., Цыган, А.И., 1985, «Сверхпроводимость и сверхтекучесть нейтронных звезд и затухание магнитных полей пульсаров», ПАЖ 11, 196

285. Муслимов, А.Г., Цыган, А.И., 1990, «Влияние эффектов ОТО на электродинамические процессы вблизи магнитных полюсов нейтронных звезд», АЖ 67, 263

286. Муслимов, Цыган (Muslimov, A.G., Tsygan, A.I.) 1992, «General relativistic electric potential drops above pulsar polar caps», MNRAS 255, 61

287. Мэннинг и др. (Manning, R.A., Jeffries, R.D., Willmore A.P.) 1996, «Are there any isolated old neutron stars in the ROSAT Wide Field Camera survey?», MNRAS 278, 577

288. Мюррей и др. (Murray, S.S., Slane, P.O., Seward, F.D., Ransom, S.M., Gaensler, B.M.) 2002, «Discovery of X-ray pulsations from the compact central source in the supernova remnant 3C 58», ApJ 568, 226 (astro-ph/0108489)

289. Нараян, Шаудт (Narayan, R., Schaudt, K.J.) 1988, «Pulsars and supernova remnants», ApJ 325, L43

290. «Нейтронные звезды и пульсары» («Neutron stars and pulsars») 1998, Frontiers science series N24, Universal Academy Press (Tokyo), Eds. N. Shibazaki, N. Kawai, S. Shibata, T. Kifune
291. Новиков, И.Д., Фролов, В.П., 1986, «Физика черных дыр», Москва, Наука
292. Нойхойзер, Трюмпер (Neuhauser, R., Trumper , J.E.) 1999, «On the number of accreting and cooling isolated neutron stars detectable with the ROSAT All-Sky Survey», A&A, 343, 151
293. Огельман (Ogelman, H.) 1995, «X-ray observations of cooling neutron stars», in: «Lives of neutron stars», Eds. M.A.Alpar, U.Kiziloglu, J. van Paradjis, NATO ASI Ser., Kluwer, Dordrecht, p.101
294. Озел (Ozel, F.) 2003, «The effect of vacuum polarization and proton cyclotron resonances on photon propagation in strongly magnetized plasmas», ApJ 583, 402 (astro-ph/0203449)
295. Острайкер, Ганн (Ostriker, J.P., Gunn, J. E.) 1969, «On the nature of pulsars. I. Theory», ApJ 157, 1395
296. Острайкер и др. (Ostriker, J.P., Rees, M.J. and Silk, J.) 1970, Astrophys. Lett. 6, 179
297. Оуэн и др. (Owen, B.J., Lindblom, L., Cutler, C., Schutz, B.F., Vecchio, A., Andersson, N.) 1998, «Gravitational waves from hot young rapidly rotating neutron stars», Phys. Rev. D58 084020-1/15
298. Павлов, Г.Г., Шибанов, Ю.А., 1978, « Тепловое излучение оптически толстой плазмы с сильным магнитным полем», АЖ 55, 373
299. Павлов, Г.Г., Гнедин, Ю.Н., 1983, «Поляризация вакуума магнитным полем и ее астрофизические проявления», в сборнике Итоги науки и техники. Астрономия. том 22, Ред. Р.А. Сюняев, с.172
300. Павлов, Завлин (Pavlov, G.G., Zavlin, V.E.) 2003, «Thermal radiation from cooling neutron stars», astro-ph/0305435
301. Павлов и др. (Pavlov, G.G., Shibanov, Yu.A., Zavlin, V.E., Meyer, R.D.) 1995, «Neutron star atmospheres», in: Proc. NATO ASI «The lives of the neutron stars», Eds. M.A.Alpar, U.Kiziloglu, J. van Paradijs, Kluwer Academic, Dordrecht, p.71
302. Павлов и др. (Pavlov, G.G., Zavlin, V.E., Aschenbach, B., Trumper , J., Sanwal, D.) 2000, «The compact central object in Cas A: a neutron star with hot polar caps or a black hole?», ApJ 531, L53
303. Павлов и др. (Pavlov, G.G., Sanwal, D., Garmire, G.P., Zavlin, V.E.) 2001a, «The puzzling compact sources in supernova remnants», in: «Neutron stars in supernova remnants», ASP Conference Series, vol. 271, Eds. P.O. Slane, B.M. Gaensler, p. 247 (astro-ph/0112322)
304. Павлов и др. (Pavlov, G.G., Zavlin, V.E., Sanwal, D., Burwitz, V., Garmire, G.P.) 2001б, «The X-ray spectrum of the Vela pulsar resolved with the Chandra X-ray observatory», ApJ 552, L129
305. Павлов и др. (Pavlov, G.G., Zavlin, V.E., Sanwal, D., Trumper , J.) 2002, «1E 1207.4-5209: the puzzling pulsar pulsar at the center of the PKS 1209-51/52 supernova remnant», ApJ 569, L95 (astro-ph/0203271)
306. Паж и др. (Page, D., Geppert, U., Zannias, T.) 2000, «General relativistic treatment of the thermal, magnetic and rotational evolution of isolated neutron stars with crustal magnetic fields», A&A 360, 1052

307. Пачинский (Paczynski, B.) 1990, «A test of the Galactic origin of gamma-ray bursts», ApJ, 348, 485
308. Пачинский (Paczynski, B.) 2001, «Can HST measure the mass of the isolated neutron star RX J185635-3754?», astro-ph/0107443
309. Перна и др. (Perna, R., Heyl, J.S., Hernquist, L.E.) 2001, «Anomalous X-ray pulsars and soft γ-ray repeaters: spectral fits and the magnetar model», ApJ 557, 18 (astro-ph/0103273)
310. Петик (Pethick, C. J.) 1992, «Cooling of neutron stars», Rev. Mod. Phys. 64, 1133
311. Петре и др. (Petre, R., Becker, C.M., Winkler, P.F.) 1996, «A central stellar remnant in Puppis A», ApJ 465, L43
312. Пинаев В.С., 1963, «О некоторых процессах образования нейтринных пар в звездах», ЖЭТФ 45, 548(English translation: Sov. Phys. JETP 18, 377, 1964)
313. Пол и др. (Paul, B., Kawasaki, M., Dotani, T., Nagase, F.) 2000, «Study of long term stability of two anomalous X-ray pulsars 4U 0142+61 and 1E 1048.1-5937 with ASCA», ApJ 537, 319 (astro-ph/0002220)
314. Понс и др. (Pons, J. A., Walter, F. M., Lattimer, J. M., Prakash, M., Neuhauser, R., An, P.) 2001, «Toward a mass and radius determination of the nearby isolated neutron star RX J185635-3754», ApJ 564, 981
315. Попов (Popov S.B.) 1998, «On the nature of the compact X-ray source inside RCW 103» Astron. Astroph. Trans., 17, 35
316. Попов (Popov, S.B.) 2001, «Evolution of isolated neutron stars», in: «Astrophysical sources of high energy particles and radiation», Eds. M.M. Shapiro, T. Stanev, J.P. Wefel, NATO Science Series, II. Mathematics, Physics, Chemistry, vol. 44, p. 101 (astro-ph/0101031)
317. Попов, Прохоров (Popov, S.B., Prokhorov, M.E.) 1998, «Spatial distribution of the accretion luminosity of isolated neutron stars and black holes in the Galaxy», A&A 331, 535
318. Попов, Прохоров (Popov, S.B., Prokhorov, M.E.) 2000, «ROSAT X-ray sources and exponential field decay in isolated neutron stars», A&A 357, 164
319. Попов и др. (Popov, S.B., Colpi, M., Treves, A., Turolla, R., Lipunov, V.M., Prokhorov, M.E.) 2000а, «The neutron star census», ApJ 530, 896
320. Попов и др. (Popov, S.B., Colpi, M., Prokhorov, M.E., Treves, A., Turolla, R.) 2000б, «Log N – Log S distributions of accreting and cooling isolated neutron stars», ApJ 544, L53
321. Попов, Прохоров (Popov S.B., Prokhorov M.E.) 2002, «Evolution of isolated neutron stars in globular clusters: number of Accretors», Astr. Astroph. Trans. 21, 217 (astro-ph/0102201)
322. Попов и др. (Popov S.B., Prokhorov M.E., Colpi M., Treves A., Turolla R.) 2002, «Young close isolated compact objects», Gravitation & Cosmology 8, Suppl. II, 133 (astro-ph/0201030)
323. Попов и др. (Popov S.B., Prokhorov M.E., Colpi, M., Treves A., Turolla R.) 2003а, «Young compact objects in the solar vicinity», in: «The third international Sakharov conference on physics», Scientific World, Eds. A.Semikhatov et al., p. 420 (astro-ph/0210688)
324. Попов и др. (Popov S.B., Turolla R., Prokhorov M.E., Colpi, M., Treves A.) 2003б, «Young close-by neutron stars: the Gould Belt vs. the Galactic disc», Ap&SS (направлена в печать) (astro-ph/0305599)

325. Попов и др. (Popov S.B., Prokhorov M.E., Colpi, M., Treves A., Turolla R.) 2003в, «Young isolated neutron stars from the Gould Belt», A&A (принята в печать) (astro-ph/0304141)

326. Поппел (Poppel, W.) 1997, «The Gould Belt system and the local instellar medium», Fund. Cosm. Phys. 18, 1

327. Поссенти и др. (Possenti, A., Mereghetti, S., Colpi, M.) 1996, «The pulsed soft X-ray emission from PSR 0656+14», A&A 313, 565

328. Поссенти и др. (Possenti, A., Colpi, M., Geppert, U., Burderi, L., D'Amico, N.) 1999, «Recycling neutron stars to ultrashort periods: A statistical analysis of their evolution in the μ-P plane», ApJ Suppl. 125, 463

329. Поссенти и др. (Possenti, A.; Cerutti, R.; Colpi, M.; Mereghetti, S.) 2002, «Re-examining the X-ray versus spin-down luminosity correlation of rotation powered pulsars», A&A 387, 993

330. Постнов, К.А., Прохоров, М.Е., 1998, «О возможной раскрутке молодых нейтронных звезд при асимметричных вспышках сверхновых», ПАЖ 24, 659

331. Потехин (Potekhin, A.Y.) 1999, «Electron conduction in magnetized neutron star envelopes», A&A 351, 787 (astro-ph/9909100)

332. Потехин, Павлов (Potekhin, A.Y., Pavlov, G.G.) 1997, «Photoionization of hydrogen in atmospheres of magnetic neutron star», ApJ 483, 414

333. Потехин и Шабрие (Potekhin, A.Y., Chabrier, G.) 2002, «Equation of state and opacities for hydrogen atmospheres of neutron stars with strong magnetic fields», ApJ 585, 955 (astro-ph/0212062)

334. Потехин, Яковлев (Potekhin, A.Y., Yakovlev, D.G.) 2001, «Thermal structure and cooling of neutron stars with magnetized envelopes», A&A 374, 213

335. Потехин и др. (Potekhin, A.Y., Chabrier, G., Yakovlev, D.G.) 1997, «Internal temperatures and cooling of neutron stars with accreted envelopes», A&A 323, 415 (astro-ph/9706148)

336. Потехин и др. (Potekhin, A.Y., Shibanov, Yu.A., Ventura, J.) 1998, «Equation of state and opacities for hydrogen atmospheres of strongly magnetized cooling neutron stars», in «Neutron stars and pulsars», Eds. N.Shibazaki et al., Universal Academy Press, Tokyo, p.161 (astro-ph/9803046)

337. Потехин и др. (Potekhin, A.Y., Yakovlev, D.G., Chabrier, G., Gnedin, O.Y.) 2003, «Thermal structure and cooling of superfluid neutron stars with accreted maznetized envelopes», in «Neutron stars and pulsars», Eds. N.Shibazaki et al., Universal Academy Press, Tokyo, p.161 (astro-ph/9803046)

338. Пракаш и др. (Prakash, M., Lattimer, J.M., Pons, J.A., Steiner, A.W., Reddy, S.) 2001, «Evolution of a neutron star from its birth to old age», in: «Physics of neutron star interiors», Eds. D. Blaschke, N.K. Glendenning, A. Sedrakian (Springer), Lecture Notes in Physics, vol. 578, p. 364 (astro-ph/0012136)

339. Прога, Бегелман (Proga, D., Begelman, M.C.) 2003, «Accretion of low angular momentum material onto black holes: 2D magnetohydrodynamical case», ApJ 582, 69 (astro-ph/0303093)

340. Прохоров и др. (Prokhorov, M.E., Popov, S.B., Khoperskov, A.V.) 2002a, «Period distribution of old accreting isolated neutron stars», A&A 381, 1000

341. Прохоров и др. (Прохоров, М.Е., Белокуров, В.А., Эванс, Н.В., Попов, С.Б.) 2002б, «Микролинзирование на одиночных нейтронных звездах и эксперимент GAIA», доклад на конференции HEA-2002, ИКИ, Москва

342. Прохоров, Постнов (Prokhorov, M.E., Postnov, K.A.) 1994, «Spatial distribution of old neutron stars. Semianalytical considerations», A&A, 286, 437

343. Прохоров, Постнов (Prokhorov, M.E., Postnov, K.A.) 1993, «The distribution of old neutron stars in the Galaxy», Astron. Astroph. Trans., 4, 81

344. Прохоров, М.Е., Попов, С.Б. 2002, «Близкие молодые черные дыры», ПАЖ 28, 609

345. Псалтис, Миллер (Psaltis, D., Miller, M.C.) 2002, «Implications of the narrow period distribution of anomalous X-ray pulsars and soft gamma-ray repeaters», ApJ 578, 325 (astro-ph/0202339)

346. Пфал, Раппапорт (Pfahl, E., Rappaport, S.) 2001, «Bondi-Hoyle-Lyttleton accretion model for low-luminosity X-ray sources in globular clusters», ApJ 550, 172 (astro-ph/0009212)

347. Раджагопал, Романи (Rajagopal, M., Romani, R.W.) 1996, «Model atmospheres for low-field neutron stars», ApJ 461, 327

348. Раджагопал и др. (Rajagopal, M., Romani, R.W., Miller, M.C.) 1997, «Magnetized iron atmospheres for neutron stars», ApJ 479, 347

349. Рамачандран (Ramachandran, R.) 1999, «Kinematics of radio pulsars», astro-ph/9911083

350. Реа и др. (Rea, N., et al.) 2003, «Evidence of a cyclotron feature in the spectrum of the anomalous X-ray pulsar 1RXS J170849-400910», ApJ 586, L65 (astro-ph/0302490)

351. Регимбо, де Фрейтас Пачеко (Regimbau, T., de Freitas Pacheco, J. A.) 2001, «Population synthesis of pulsars: Magnetic field effects», A&A 374, 181

352. Реймер и др. (Reimer, O., Brazier, K.T.S., Carramiñana, A., Kanbach, G., Nolan, P.L., Thompson, D.J.) 2001, «Multifrequency studies of the enigmatic gamma-ray source 3EG J1835+5918», MNRAS 324, 772 (astro-ph/0102150)

353. Романи (Romani, R.W.) 1987 «Model atmospheres for cooling neutron stars», ApJ 313, 718

354. Романи, Нг (Romani, R.W., Ng, C-Y.) 2003, «The PWN torus of PSR J0538+2817 and the origin of pulsar velocities», ApJ 585, L41, (astro-ph/0301506)

355. Романова и др. (Romanova, M.M., Toropina, O.D., Toropin, Yu.M., Lovelace, R.V.E.) 2001, «Interaction of evolved pulsars and magnetars with the ISM», in: «Relativistic astrophysics», proceedings of the 20th Texas symposium, AIP Conf. Series (Melville, New York), Eds. J.C. Weeler, H. Martel, vol. 586, p. 519

356. Романова и др. (Romanova, M.M., Toropina, O.D., Toropin, Yu.M., Lovelace, R.V.E.) 2003, «Magnetohydrodynamic simulations of accretion onto a star in the "Propeller" regime», ApJ 588, 400 (astro-ph/0209548)

357. Ротшильд и др. (Rothschild, R.E., Marsden, D., Lingenfelter, R.E.) 2002, «Fossil disks and propellor spindown of SGR/AXPs», Mem. Soc. Astron. Ital., 73, 508(astro-ph/0105419)

358. Рудерман, Сазерленд (Ruderman, M.A., Sutherland, P.G.) 1975, «Theory of radiopulsar gaps, sparks, and coherent microwave radiation», ApJ 196, 51

359. Рутледж (Rutledge, R.E.) 2001, «Magneticaly accreting isolated old neutron stas», ApJ 553, 796 (astro-ph/0101550)

360. Рутледж и др. (Rutledge, R.E., Fox, D.W., Bogosavljevic, M., Mahabal, A.) 2003, «A limit on the number of isolated neutron stars detected in the ROSAT Bright Source Catalog», astro-ph/0302107

361. Рэнсом и др. (Ransom, S.M., Gaensler, B.M., Slane, P.O.) 2001, «A deep search for pulsations from the nearby isolated neutron star RX J1856.5-3754», ApJ 570, L75

362. Саакян Г.С., 1995, «Физика нейтронных звезд», Дубна

363. Саваж, Сембах (Savage, B. D., Sembach, K. R.) 1996, «Interstellar abundances from absorption-line observations with the Hubble space telescope», ARAA 34, 279

364. Санвал и др. (Sanwal, D., Pavlov, G.G., Zavlin, V.E., Teter, M.A.) 2002, «Discovery of absorption features in the X-ray spectrum of an isolated neutron star», ApJ 574, L61 (astro-ph/0206195)

365. Свидзинский (Svidzinsky, A.A.) 2002, «Radiation of neutron stars produced by superfluid core», astro-ph/0212367

366. «Сильные магнитные поля в нейтринной астрофизике» («Strong magnetic fields in neutrino astrophysics») 2000, Eds. A.V. Kuznetsov, N.V. Mikheev, A. Ya. Parkhomenko, Yaroslavl

367. Слейн и др. (Slane, P., Hughes, J.P., Edgar, R.J., Plucinsky, P.P., Miyata, E., Aschenbach, B.) 2001, «Nonthermal X-ray emission from G226.2-1.2 (RX J0852.0-4622)», ApJ 548, 814 (astro-ph/0104353)

368. Слейн и др. (Slane, P., Helfand, D.J., Murray, S.S.) 2002, «New constraints on neutron star cooling from Chandra observations of 3C58», ApJ 571, L45 (astro-ph/0204151)

369. Смит, Кокс (Smith, R. K., Cox, D. P.) 2001, «Multiple Supernova Remnant Models of the Local Bubble and the Soft X-Ray Background», ApJS 134, 283

370. Соболев, В.В., 1985, «Курс теоретической астрофизики», М., Наука

371. Софиа и др. (Sofia, U. J., Cardelli, J.A., Savage, B. D.) 1994, «The abundant elements in interstellar dust», ApJ 430, 650

372. Спруит (Spruit, H.) 1998, «Gamma-ray bursts from X-ray binaries», astro-ph/9811007

373. Спруит, Финней (Spruit, H., Phinney, E.S.) 1998, «Birth kicks as the origin of pulsar rotation», Nature, 393, 139

374. Сьювард и др. (Seward, F.D., Slane, P.O., Smith, R.K., Sun, M.) 2002, «A compact central object in the supernova remnant Kes 79», ApJ 584, 414 (astro-ph/0210496)

375. Таурис, Манчестер (Tauris, T.M., Manchester, R.N.) 1998, «On the evolution of pulsar beams», MNRAS 298, 625

376. Таурис, Конар (Tauris, T.M., Konar, S.) 2001, «Torgue decay in the pulsar (p, $\dot{p}$) diagram. Effects of crustal ohmic dissipation and alignment», A&A 376, 543 (astro-ph/0101531)

377. Тейлор и др. (Taylor, J. H., Manchester, R. N., Lyne, A. G.) 1993, «Catalog of 558 pulsars», ApJ Supp. 88, 529

378. Тиммес и др. (Timmes, F. X., Woosley, S. E., Weaver, T. A.) 1996, «The neutron star and black hole initial mass function», ApJ 457, 834

379. Тома и др. (Thoma, M.H., Trumper, J., Burwitz, V.) 2003, «Strange quark matter im neutron stars? — New results from Chandra and XMM», astro-ph/0305249

380. Томпсон (Thompson, C.) 2001, «Astrophysics of the soft gamma repeaters and anomalous X-ray pulsars», in «The neutron star – black hole connection», Eds. C.Kouveliotou, J.Ventura, E.Van den Heuvel. Kluwer Academic Publishers (Dordrecht), NATO science series C: Mathematical and physical sciences, vol. 567, p.369 (astro-ph/0010016)

381. Томпсон (Thompson, C.) 2002, «Nature of the soft gamma repeaters and anomalous X-ray pulsars», Mem. Soc. Astron. Ital. 73, 477(astro-ph/0110679)
382. Томпсон, Дункан (Thompson, C., Duncan, R.C.) 1993, «Neutron star dynamos and the origins of pulsar magnetism», ApJ 408, 194
383. Томпсон, Дункан (Thompson, C., Duncan, R.C.) 1995, «The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars–I. Radiative mechanism for outbursts», MNRAS 275, 255
384. Томпсон, Дункан (Thompson, C., Duncan, R.C.) 1996, «The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars. II. Quiescent neutrino, X-ray, and Alfven wave emission», ApJ 473, 322
385. Томпсон, Мюррей (Thompson, C., Murray, N.) 2001, «Transport of magnetic fields in convective, accreting supernova cores», ApJ 560, 339
386. Томпсон и др. (Thompson, C., Lyutikov, M., Kulkarni, S.R.) 2002, «Electrodynamics of magnetars: Implications for the persistent X-ray emission and spindown of the soft gamma repeaters and anomalous X-ray pulsars», ApJ 574, 332 (astro-ph/0110677)
387. Торн (Thorne, K.S.) 1977, «The relativistic equations of stellar structure and evolution», ApJ 212, 825
388. Торопин и др. (Toropin, Yu.M., Toropina, O.D., Savelyev, V.V., Romanova, M.M., Chechetkin, V.M., Lovelace, R.V.E.) 1999, «Spherical Bondi accretion onto a magnetic dipole», ApJ, 517, 906
389. Торопина и др. (Toropina, O.D., Romanova, M.M., Toropin, Yu.M., Lovelace, R.V.E.) 2001, «Propagation of magnetized neutron stars through the interstellar medium», ApJ 561, 964
390. Торопина и др. (Toropina, O.D., Romanova, M.M., Toropin, Yu.M., Lovelace, R.V.E.) 2003, «Magnetic inhibition of accretion and observability of isolated old neutron stars», ApJ (в печати)
391. Торсетт и Чакрабарти (Thorsett, S.E., Chakrabarty, D.) 1999, «Neutron star mass measurements. I. Radio pulsars», ApJ 512, 288
392. Тоскано и др. (Toscano, M., Britton, M.C., Manchester, R.N., Bailes, M., Sandhu, J.S., Kulkarni, S.R., Anderson, S.B.) 1999, «Parallax of PSR J1744-1134 and the local interstellar medium», ApJ 523, L171
393. Тревес и др. (Treves, A., Colpi, M., Lipunov, V.M.) 1993, «Old isolated neutron stars: fire burns and cauldron bubbles», A&A, 269, 319
394. Тревес и др. (Treves, A., Colpi, M., Turolla, R., Zane, S.) 1998, «Neutron stars accreting the ISM: are they fast or slow objects?», Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 69, 249
395. Тревес, Колпи (Treves, A., Colpi, M.) 1991, «The observability of old isolated neutron stars», A&A, 241, 107
396. Тревес и др. (Treves, A., Turolla, R., Zane, S., Colpi, M.) 2000, «Isolated neutron stars: accretors and coolers», PASP 112, 297
397. Туролла и др. (Turolla, R., Zampieri, L., Colpi, M., Treves, A.) 1994, «Spherical accretion onto neutron stars revisited: are hot solutions possible?», ApJ 426, L35
398. Туролла, Дзане, Дрейк (Turolla, R., Zane, S., Drake, J.J.) 2002, «Bare quark stars or naked nuetron stars? The case of RX J1856.5-3754», ApJ (в печати)
399. Урпин, Коненков (Urpin, V., Konenkov, D.) 1997, «Magnetic and spin evolution of isolated neutron stars with the crustal magnetic field», MNRAS 295, 167

400. Урпин, В.А., Муслимов, А.Г., 1992, «Эволюция магнитного поля в коре и охлаждение нейтронных звезд», АЖ 69, 1028

401. Урпин, В.А., Яковлев, Д.Г. 1980, «Термогальваномагнитные эффекты в белых карликах и нейтронных звездах», АЖ 57, 738

402. Урпин и др. (Urpin, V. A., Levshakov, S. A., Iakovlev, D. G.) 1986, «Generation of neutron star magnetic fields by thermomagnetic effects», MNRAS 219, 703

403. Усов (Usov, V. V.) 2001, «Strange star heating events as a model for giant flares of soft-gamma-ray repeaters», Phys. Rev. Let. 87, 021101

404. Усов, Мелроуз (Usov, V. V., Melrose, D. B.) 1996, «Bound pair creation in polar gaps and gamma-ray emission from radio pulsars», ApJ 464, 306

405. Феррари и др. (Ferrari, V., Miniutti, G., Pons, J.A.) 2002, «Gravitational waves from newly born, hot neutron stars», astro-ph/0210581

406. Фечнер, Джосс (Fechner, W.B., Joss, P.C.) 1978, «Quark stars with 'realistic' equations of state», Nature 274, 347

407. «Физика недр нейтронных звезд» («Physics of neutron star interiors») 2001, Eds. D. Blaschke, N.K. Glendenning, A. Sedrakian (Springer), Lecture Notes in Physics, vol. 578

408. Флауэрс и др. (Flowers, E.G., Ruderman, M., Sutherland, P.G.) 1976, «Neutrino pair emission from finite-temperature neutron superfluid and the cooling of young neutron stars», ApJ 205, 541

409. Францискелли, Виерс (Francischelli, G.J., Wijers, R.A.M.J.) 2002, «On fossil disk models of anomalous X-ray pulsars», astro-ph/0205212

410. Фриман, Максвелл (Friman, B.L., Maxwell, O.) 1979, «Neutrino emissivities of neutron stars», ApJ 232, 541

411. Фритце-ф.Алфенслебен (Fritze-v. Alvensleben, U.) 2000, «Modelling tools: population and evolutionary synthesis», in: «Stars, gas and dust in galaxies: exploring the links», Eds. D. Alloin, K. Olsen, G. Galaz, ASP Conference Proceedings, vol. 221, p. 179 (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific) (astro-ph/0009290)

412. Фуджита и др. (Fujita, Y., Inoue, S., Nakamura, T., Manmoto, T., Nakamura, K. E.) 1998, «Emission from isolated black holes and MACHOs accreting from the interstellar medium», ApJ 495, L85

413. Хаберл (Haberl, F.) 2003, «AXPs and X-ray dim neutron stars: recent XMM-Newton and Chandra results», astro-ph/0302540

414. Хаберл, Завлин (Haberl, F., Zavlin, V.E.) 2002, «XMM–Newton observations of the isolated neutron star RX J0806.4-4123», A&A 391, 571 (astro-ph/0205460)

415. Хаберл и др. (Haberl, F., Motch, C., Pietsch, W.) 1998, «Isolated neutron stars in the ROSAT survey», Astron. Nachr. 319, 97

416. Хаберл и др. (Haberl, Schwope, A.D., Hambaryan, V., Hasinger, G., Motch, C.) 2003, «A broad absorption feature in the X-ray spectrum of the isolated neutron star RBS1223 (1RXS J130848.6+212708)», A&A 403, L19 (astro-ph/0304088)

417. Халлеман и др. (Hulleman, F., Tennant, A.F., van Kerkwijk, M.H., Kulkarni, S.R., Kouveliotou, C., Patel, S.K.) 2001, «A possible faint near-infrared counterpart to the AXP 1E 2259+58.6», ApJ 563, L49

418. Халлеман и др. (Hulleman, F., van Kerkwijk, M. H., Kulkarni, S. R.) 2000, «An optical counterpart to the anomalous X-ray pulsar 4U0142+61», Nature 408, 689

419. Хальперн, Холт (Halpern, J.P., Holt, S.S.) 1992, «Discovery of soft X-ray pulsations from the gamma-ray source Geminga», Nature 357, 222

420. Хамбарян и др. (Hambaryan, V., Hasinger, G., Schwope, A. D., Schulz, N. S.) 2001, «Discovery of 5.16 s pulsations from the isolated neutron star RBS 1223», A&A 381, 98
421. Хансен, Финней (Hansen, B.M.S., Phinney, E.S.) 1997, «The pulsar kick velocity distribution», MNRAS 291, 569
422. Хардинг (Harding, A.K.) 2003, «Physical processes in strong magnetic fields of neutron stars», astro-ph/0304120
423. Харлей (Hurley, K.) 1999, «The 4.5±0.5 soft gamma repeaters in review», in: «Gamma-ray bursts», 5th Huntsville Symposium, Eds. R. M. Kippen, R. S. Mallozzi, G. J. Fishman (American Institute of Physics, Melville, New York), p.763 (astro-ph/9912061)
424. Хартман (Hartman, J.W.) 1997, «On the velocity distribution of radio pulsars at birth», A&A, 322, 127
425. Хартман и др. (Hartman, J.W., Bhattacharya, D., Wijers, R.A.M.J., Verbunt, F.) 1997, «A study of the evolution of radio pulsars through improved population synthesis» A&A, 322, 477
426. Хегер и др. (Heger, A, Woosley, S.E., Langer, N., Spruit, H.C.) 2003, «Presupernova evolution of rotating massive stars and rotation rate of pulsars», astro-ph/0301374
427. Хейл, Хернквист (Heyl, J.S., Hernquist, L.) 1997a, «Powering anomalous X-ray pulsars by neutron star cooling», ApJ 489, L67
428. Хейл, Хернквист (Heyl, J.S., Hernquist, L.) 1997b, «The thermal evolution of ultramagnetized neutron stars», ApJ 491, L95
429. Хелфанд (Helfand, D.J.) 1998, «A cradle census evidence for young neutron stars in supernova remnants», Mem. Soc. Astron., Ital. 69, 791
430. Херант и др. (Herant M., Benz W., Hix J., Fryer C.L., Colgate S.A.) 1994, «Inside the supernova: a powerful convective engine», ApJ 435, 339
431. Хирата и др. (Hirata, K., Kajita, T., Koshiba, M., Nakahata, M., Oyama, Y.) 1987, «Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987», Phys. Rev. Lett. 58, 1490
432. Хо, Лай (Ho, W.C.G., Lai, D.) 2001, «Atmospheres and spectra of strongly magnetized neutron stars», MNRAS 327, 1081 (astro-ph/0104199)
433. Хойл, Литтлтон (Hoyle, F., Littleton, R.A.) 1939, «Evolution of stars», Proc. Camb. Phil. Soc. 35, 592
434. Холлербах, Рюдигер (Hollerbach, R., Rudiger, G.) 2002б «The influence of Hall drift on the magnetic fields of neutron stars», MNRAS 337, 216 (astro-ph/0208312)
435. Хук, Шевалье (Houck, J.C., Chevalier, R.A.) 1991, «Steady spherical hypercritical accretion onto neutron stars», ApJ 376, 234
436. Хьюиш, Белл и др. (Hewish, A., Bell, S.J., Pilkington, J.D.H., Scott, P.F., Collins, R.A.) 1968, «Observation of a rapidly pulsating radio source», Nature 217, 709
437. Хэйлей, Мори (Haylei, C. J., Mori, K.) 2002, «Evidence for a mid-atomic-number atmosphere in the neutron star 1E1207.4-5209», ApJ 578, L133 (astro-ph/0207590)
438. Цыган, А.И., 1993, «Влияние сильного гравитационного поля на электрические поля нейтронных звезд», ПАЖ 19, 665
439. Цурюта, Камерон (Tsuruta, S., Cameron, A.G.W.) 1965, «Cooling of neutron stars», Nature 207, 364

440. Цурюта и др. (Tsuruta, S., Teter, M.A., Takatsuka, T., Tatsumi, T., Tamagaki, R.) 2002 «Confronting neutron star cooling theories with new observations», ApJ 571, L143 (astro-ph/0204508)

441. Чакрабарти и др. (Chakrabarty, D., Pivovaroff, M. J., Hernquist, L. E., Heyl, J. S., Narayan, R.) 2000, «The central X-ray point source in Cassiopeia A», ApJ 548, 800 (astro-ph/0001026)

442. Чанг, Билдстен (Chang, P, Bildsten, L.) 2002, «Diffusive nuclear burning in neutron star envelopes», ApJ 585, 464 (astro-ph/0211028)

443. Чандрасекар, С., 1953, «Перенос лучистой энергии», М., ИЛ (Chandrasekhar, S., 1960, «Radiative transfer», Dover, NY)

444. Чанмугам (Chanmugam, G.) 1992, «Magnetic fields of degenerate stars», ARAA 30, 143

445. Чаттерье и др. (Chatterjee, S., Corder, J.M., Lazio, T.J.W., Goss, W.M., Fomalont, E.B., Benson, J.M.) 2001, «Parallax and kinematics of PSR B0919+06 from VLBA astrometry and interstellar scintillometry», ApJ 550, 287

446. Чаттерье и др. (Chatterjee, P., Hernquist, L., Narayan, R.) 2000, «An accretion model for anomalous X-ray pulsars», ApJ 534, 373 (astro-ph/9912137)

447. Чен, Рудерман (Chen, K., Ruderman, M.) 1993, «Pulsar death lines and death valley», ApJ 402, 264

448. Чисхолм и др. (Chisholm, J.R., Dodelson, S., Kolb, E.W.) 2002, «Stellar-mass black holes in the Solar neighborhood», astro-ph/0205138

449. Чиу, Салпитер (Chiu, H.-Y., Salpeter, E.E.) 1964, «Surface X-ray emission from neutron stars», Phys. Rev. Lett. 12, 413

450. Чодури, Конар (Choudhuri, A.R., Konar, S.) 2002, «Diamagnetic screening of magnetic field in accreting neutron stars», MNRAS 332, 933

451. Шааб и др. (Schaab, Ch., Sedrakian, A., Weber, F., Weigel, M. K.) 1999, «Impact of internal heating on the thermal evolution of neutron stars», A&A, 346, 465

452. Шабрие и др. (Chabrier, G., Potekhin, A.Y., Yakovlev, D.G.) 1997, «Cooling neutron stars with accreted envelopes», ApJ 477, L99

453. Шапиро, С., Тьюколски, С., 1985, «Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды», М. Мир

454. Шварц, Сейдел (Schwarz, D.J., Seidel, D.) 2002, «Microlensing neutron stars», A&A 388, 483 (astro-ph/0204053)

455. Шварцман, В.Ф., 1970а, «Зоны ионизации вокруг нейтронных звезд», АЖ 47, 824

456. Шварцман, В.Ф., 1970б, «О влиянии звездного ветра на аккрецию», АЖ 47, 660

457. Шварцман, В.Ф., 1970в, «Два поколения пульсаров», Изв. ВУЗов, серия Радиофизика 13, 1852

458. Шварцман, В.Ф., 1971, «Ореолы вокруг черных дыр», АЖ 48, 479

459. Швопе и др. (Schwope, A. D., Hasinger, G., Schwarz, R., Haberl, F., Schmidt, M.) 1999, «The isolated neutron star candidate RBS1223 (1RXS J130848.6+212708)», A&A, 341, L51

460. Шевалье (Chevalier, R.A.) 1989, «Neutron star accretion in a supernova», ApJ 346, 847

461. Шевалье, Эммеринг (Chevalier, R.A., Emmering, R.T.) 1986, «Are pulsars born as slow rotators?», ApJ 304, 140

462. Шибанов и др. (Shibanov, Yu.A., Zavlin, V.E., Pavlov, G.G., Ventura, J.) 1992, «Model atmospheres and radiation of magnetic neutron stars. I – The fully ionized case», A&A 266, 313

463. Шибанов и др. (Shibanov, Yu.A., Pavlov, G.G., Zavlin, V.E., Qin, L., Tsuruta, S.) 1995a, «Anisotropic cooling and atmospheric radiation of neutron stars with strong magnetic field», Ann. N. Y. Acad. Sci. 759, 291

464. Шибанов и др. (Shibanov, Yu.A., Zavlin, V.E., Pavlov, G.G.) 1995b, «Model atmospheres of neutron stars», in: Proc. NATO ASI «The lives of the neutron stars», Eds. M.A.Alpar, U.Kiziloglu, J. van Paradijs (Kluwer Academic, Dordrecht), p.91

465. Шибанов и др. (Shibanov, Yu.A., Koptsevich, A.B., Sollerman, J., Lundquist, P.) 2003, «The Vela pulsar in the near-infrared», astro-ph/0211028

466. Шитов, Пугачев (Shitov, Yu.P., Pugachev, V.D.) 1998, «The radio pulsar Geminga», New Astronomy 3, 101

467. Шитов и др. (Shitov, Yu. P., Pugachev, V. D., Kutuzov, S. M.) 2000, «Low frequency radio emission of pulsar PSR J1907+0919 associated with the magnetar SGR 1900+14», in Proceedings of IAU Coll. 177, «Pulsar astronomy – 2000 and beyond», ASP Conf. Series vol. 202 (San Francisco), Eds. M.Kramer, N.Wex, R. Wielebinski, p. 685

468. Шовковый, Эллис (Shovkovy, I.A., Ellis, J.P.) 2002, «Quark color superconductivity and the cooling of compact stars», astro-ph/0207346

469. Эйкенберри (Eikenberry, S.S.) 2002, «The environments of SGRs: a brief & biased review», astro-ph/0203054

470. Эргма, ван ден Хевел (Ergma, E., van den Heuvel, E.P.J.) 1998, «From which stars black holes and neutron stars may form?», Physica Scripta 77, 76

471. Эргма, ван ден Хевел (Ergma, E., van den Heuvel, E.P.J.) 1998, «On the initial progenitor masses of stellar mass black holes and neutron stars», A&A 331, L29

472. Яковлев и др. (Yakovlev, D.G., Kaminker, A.D., Gnedin, O.Y., Haensel, P.) 2001, «Neutrino emission from neutron stars», Phys. Rept. 354, 1 (astro-ph/0012122)

473. Яковлев и др. (Yakovlev, D.G., Gnedin, O.Y., Kaminker, A.D., Potekhin, A.Y.) 2002, «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-Plank-Institut fur extraterrestrische Physik, p.287 (astro-ph/0204226)

474. Яковлев, Д.Г., Левенфиш, К.П., Шибанов, Ю.А., 1999, «Остывание нейтронных звезд и сверхтекучесть в их ядрах», УФН 169, 825

475. Яковлев и др. (Yakovlev, D.G., Kaminker, A.D., Haensel, P., Gnedin, O.Y.) 2002, «The cooling neutron star in 3C 58», A&A 389, L24 (astro-ph/0204233)

476. Янка и др. (Janka, H.-Th., Kifonidis, K., Rampp, M.) 2001, «Supernova explosions and neutron star formation», in: «Physics of neutron star interiors», Eds. D. Blaschke, N.K. Glendenning, A. Sedrakian (Springer), Lecture Notes in Physics, vol. 578, p. 333 (astro-ph/0103015)

Оригинал-макет издания подготовлен
авторами при участии В.Н. Семенцова.

Научное издание
Сергей Борисович Попов, Михаил Евгеньевич Прохоров
**«Астрофизика одиночных нейтронных звезд:
радиотихие нейтронные звезды и магнитары»**

Подписано к печати 28.07.2003.
Формат 60x84/16. Бумага офс. 1.
Гарнитура Балтика
Усл.печ.л. 5,25. Уч.-изд.л. 6,4. Тираж 300 экз.

заказ 6
отпечатано в ГАИШ МГУ