МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

Физический Факультет
Кафедра Астрофизики и Звездной Астрономии

На правах рукописи
УДК 523.9

Сергей Борисович Попов

Популяционный синтез двойных систем после вспышки звездообразования и эволюция одиночных нейтронных звезд.

(01.03.02 – Астрофизика, радиоастрономия)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор
физико-математических наук
профессор
В. М. Липунов

МОСКВА 1997

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета Московского Государственного Университета им М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:	–	доктор физико-матем. наук профессор В.М. Липунов
Официальные оппоненты:	–	доктор физико-матем. наук профессор А.Д. Чернин
	–	кандидат физико-матем. наук С.Н. Фабрика
Ведущее учреждение:	–	Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, СПб

Защита состоится "26" февраля 1998 г. в 14 часов на заседании Диссертационного Совета Московском Государственном Университета им. М.В. Ломоносова.

Адрес: 119899, Москва, Университетский проспект, 13, ГАИШ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного Астрономического Института им. П.К. Штернберга Московского Государственного Университета (Университетский пр., 13).

Автореферат разослан "14" января 1998 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета:
канд. физ.-мат. наук *Л.Н. Бондаренко*

Актуальность работы

Изучение процессов звездообразования и популяционный синтез являются сейчас одними из наиболее "горячих" областей астрофизики. Традиционной методикой стало применение рассчитанных эволюционных треков одиночных звезд для определения звездного населения, возраста, химического состава etc. по наблюдаемым спектрам (см., например, Лейтерер и Хекман, 1995 и Хекман, 1997). При этом, несмотря на модельную зависимость результатов, удается описать и объяснить многие особенности наблюдаемых объектов. Однако, в большинстве исследований не уделяется внимания популяциям тесных двойных звезд. Это может приводить к неправильным выводам относительно параметров, используемых в расчетах, так как сильное изменение некоторых из них (в целях подгонки свойств популяций одиночных звезд) приводит к катастрофическому изменению популяций тесных двойных систем. Поэтому представляет большой интерес популяционный синтез двойных систем (Липунов и др., 1996с): как в применении к конкретным объектам и областям звездообразования, так и в виде расчетов для различных параметров эволюции, непривязанных к конкретным наблюдаемым объектам, которые могли бы применяться другими авторами для соответствующих оценок.

Возникает интересная взаимосвязь расчетов эволюции двойных и одиночных звезд с процессами в активных ядрах галактик. Кроме аккреции на сверхмассивную черную дыру, в ряде случаев активность галактических ядер связана со вспышками звездообразования (Озерной, 1994). Не является исключением и центр нашей Галактики (Озерной, 1995), являясь таким образом интересной областью для применения популяционного синтеза (Липунов и др., 1996a).

Среди двойных систем особое место занимают рентгеновские источники в тесных двойных системах, т.к. они являются достаточно мощными, чтобы наблюдаться в ближайших галактиках. Следовательно необходимы популяционные расчеты для этих систем. Для этого нужно также уметь проводить расчеты магнитовращательной эволюции нейтронных звезд, т.к. от этого зависят важнейшие параметры тесных двойных систем. Т.о. возникает взаимосвязь популяционного синтеза тесных двойных систем и свойств нейтронных звезд. Изучение эволюции нейтронных звезд позволяет проводить более надежные расчеты эволюции тесных двойных систем, а эти расчеты, в свою очередь, позволяют наложить ограничения на некоторые параметры нейтронных звезд (хорошим примером может служить дискуссия о начальных скоростях нейтронных звезд: наблюдения пульсаров указывают на высокие скорости, в то время как эволюционные расчеты свидетельствуют в пользу меньших скоростей).

Одним из наиболее интересных типов астрономических объектов (а по мнению автора – самым интересным) являются нейтронные звезды. С момента их открытия прошло более 30 лет, а с момента предсказания – более 65, но многие принципиальные свойства, необходимые для достаточно полного понимания природы этих объектов, остаются неизвестными.

Наблюдательные проявления нейтронных звезд связаны в первую очередь с их магнитным полем и вращением, т.е. описание изменения именно этих параметров должно интересовать нас в первую очередь. Нейтронные звезды наблюдаются как в двойных системах, так и как одиночные объекты. Поэтому и рассмотрение их магнитовращательной эволюции следует проводить для обоих случаев. За счет малой плотности вещества и практически неизменных внешних условий одиночные нейтронные звезды могут отличаться по многим параметрам от нейтронных звезд в тесных двойных системах (Липунов и Попов, 1995a; Попов, 1997). Более того, бóльшая часть нейтронных звезд находится вне тесных двойных систем, аккрецируя вещество межзвездной среды. Только в последнее время появились наблюдения таких объектов (Вальтер и др., 1996; Хаберл и др., 1996). Определение их свойств и интерпретация наблюдений являются актуальнейшей задачей.

Кроме того, спутники типа *ROSAT* могут наблюдать и аккрецирующие одиночные черные дыры (Хеклер и Колб, 1996). Отождествление таких объектов будет непростой задачей (Шварцман, 1971). В связи с этим наблюдательные проявления объектов этого типа также чрезвычайно интересны.

Особый интерес представляет также проблема затухания магнитного поля нейтронных звезд (см., например, Чанмугам, 1992; Урпин и Муслимов, 1992). Поскольку стадия, на которой находится нейтронная звезда, существенным образом зависит от ее магнитного поля, то наличие затухания поля приведет к изменению эволюционного сценария по-сравнению с отсутствием затухания. Данные об эволюции магнитного поля нейтронных звезд недостаточны и противоречивы (Лоример и др., 1997). Существуют достоверные оценки магнитных полей всего у двух групп объектов, связанных с нейтронными звездами: радиопульсаров и рентгеновских пульсаров. Однако, здесь возможно влияние многих селекционных эффектов. Определение полей у огромной популяции старых одиночных нейтронных звезд является мечтой многих ученых, работающих в этой области. Если наблюдения позволят, на основании сценариев магнитовращательной эволюции, понять историю затухания магнитного поля нейтронных звезд в зависимости от начальных и внешних условий, то это также позволит существенно продвинуться в понимании внутреннего строения нейтронных звезд, т.к. различные модели предсказывают качественно различную эволюцию магнитного поля (см., например, Урпин и Муслимов, 1992).

В связи с возможностью наблюдения старых нейтронных звезд с помощью рентгеновских спутников, а также в связи с различными проблемами физики пульсаров большой интерес представляет распределение этих объектов в Галактике. Этому вопросу посвящено много исследований (см. Кордес и Чернофф, 1997a,b; Пачинский, 1990; Блаез и Раджагопал, 1991; Постнов и Прохоров, 1993, 1994; Лоример и др., 1997 etc). Как правило рассматривалось распределение именно самих объектов, но т.к. в рентгеновском диапазоне светимость зависит также и от свойств межзвездной среды, то представляется интересным рассмотреть совместное распределение одиночных компактных объектов и межзвездной среды, а в конечном счете и распределение светимости этих источников. Аналогичное рассмотрение следует провести и для одиночных черных дыр, т.к. они также могут наблюдаться в мягком рентгеновском диапазоне (Хеклер и Колб, 1996). Полученная картина может представлять интерес при выработке стратегии поиска таких объектов.

Все эти проблемы в той или иной степени рассматриваются в данной диссертации.

Целью настоящей работы, начатой в 1992 г., было изучение важного и многочисленного класса галактических объектов: старых одиночных нейтронных звезд и черных дыр, а также, изучение вспышек звездообразования с точки зрения эволюции тесных двойных звезд. Особое внимание уделяется магнито-вращательной эволюции одиночных нейтронных звезд, различным аспектам, связанным с наблюдательными проявлениями этих объектов, а также расчету потенциально наблюдаемых рентгеновских двойных после вспышки звездообразования.

В диссертации решались следующие задачи: определение характерных периодов одиночных нейтронных звезд на различных стадиях, определение характерного времени изменения этих периодов в турбулизованной межзвездной среде, расчет характеристик рентгеновских пульсаров по наблюдаемым флуктуациям периодов, численное моделирование эволюции популяций тесных двойных систем после вспышек звездообразования, определение вида распределения светимости аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр в Галактике.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объем диссертации – 112 страниц; в ней содержится 23 рисунка. Список литературы насчитывает 130 наименований.

Во введении дается краткое описание проблем, затронутых в диссертации, ставятся цели и обосновывается актуальность данной работы.

1. Первая глава посвящена эволюции периодов двойных и одиночных нейтронных звезд. Первые два параграфа первой главы посвящены одиночным нейтронным звездам. Поскольку стадия, на которой находится одиночная нейтронная звезда определяется в первую очередь ее магнитным полем и периодом, то наибольший интерес представляет магнитовращательная эволюция нейтронных звезд, рассмотрению которой посвящен первый параграф. Приведены оценки параметров одиночных нейтронных звезд на разных стадиях их эволюции. Особое внимание уделено воздействию турбулизованной межзвездной среды на вращение нейтронной звезды.

   В первом параграфе в основном рассматривается магнитовращательная эволюция без учета распада магнитного поля. Во втором параграфе был рассмотрен важный элемент такой эволюции – распад магнитного поля нейтронной звезды. Расчет эволюции с распадом магнитного поля был применен к одному из источников, наблюдавшемся спутником $ROSAT$, для которого был определен период вращения. Аналитические оценки и численные расчеты магнитовращательной эволюции показывают, что данный источник является одиночной нейтронной звездой, поле которой существенно распадалось в течении жизни нейтронной звезды.

В третьем параграфе сделан переход к двойным системам: рассмотрены двойные рентгеновские пульсары с точки зрения использования тайминга (измерений периода) для определения физических параметров двойных систем и входящих в них звезд. Результаты, полученные первоначально для одиночных нейтронных звезд, позволили, в частности, определить скорости звездного ветра нормальных компаньонов для двух рентгеновских пульсаров.

2. Во второй главе рассмотрены вспышки звездообразования. Вначале на примере центральной области Галактики показана важность расчета популяций двойных источников для определения возраста вспышки звездообразования. С помощью пакета программ "Машина сценариев" промоделирована эволюция числа двойных рентгеновских источников трех типов с нейтронными звездами и черными дырами. Полученные результаты сравниваются с наблюдениями на спутнике ГРАНАТ. Проведена оценка времени, прошедшего с момента вспышки звездообразования. Показано, что относительное число источников с нейтронными звездами и черными дырами может служить удобным параметром для оценок возраста вспышек звездообразования. Также рассчитано пространственное распределение двойных рентгеновских источников, которое также сравнивается с наблюдениями. Результаты сравнения показывают, что наблюдаемая популяция рентгеновских источников находит свое объяснение в модели вспышки звездообразования, произошедшей примерно 6-8 миллионов лет назад. Оценки возраста вспышки совпадают с оценками, полученными другими авторами по наблюдениям одиночных звезд.

   Во втором параграфе главы рассчитано влияние изменения вида начальной функции масс на популяции двойных источников (на примере источников четырех типов), образовавшихся после типичной вспышки звездообразования. Результаты представлены в удобной для последующего использования форме: дана аналитическая аппроксимация числа источников в зависимости от времени. Проведена нормировка на начальную массу звезд, что также облегчает использование результатов.

3. В третьей части рассматриваются одиночные компактные объекты: нейтронные звезды и черные дыры. Поскольку аккрецирующие нейтронные звезды наблюдаются спутником $ROSAT$, свойства их распределения представляют большой практический интерес. Нами было промоделировано пространственное распределение светимости аккрецирующих одиночных нейтронных звезд и черных дыр в Галактике. Задав распределение межзвездной среды и начальные условия для компактных объектов, мы смогли определить стационарное распределение их аккреционной светимости (аккреция идет из межзвездной среды). Среди начальных условий особое значение имеет распределение скорости отдачи, которую компактный объект приобретает после взрыва сверхновой. Пока идут оживленные споры о характере этого распределения, поэтому разумно проводить расчеты для нескольких, предлагавшихся в различных работах, видов распределения. Нами рассматривалось три вида распределения: максвелловское распределение, распределение в виде $\delta-$ функции и распределение, полученное из наблюдений радиопульсаров. Для каждого вида распределения проводились расчеты для нескольких значений средней скорости. Результаты нормировались на общепринятые оценки числа черных дыр и нейтронных звезд в Галактике: $N_{BH} = 10^8$, $N_{NS} = 10^9$. Распределение аккреционной светимости имеет торообразную форму с максимумом примерно на 5 кпк в широком диапазоне начальных параметров.

Научная новизна

1. Рассмотрена аккреция на одиночные нейтронные звезды из турбулизованной межзвездной среды. Рассмотрена магнитовращательная эволюция таких объектов. Впервые предсказаны характерные периоды и темп их изменения как при наличии затухания магнитного поля нейтронной звезды так и в его отсутствии.

2. Впервые рассмотрена эволюция одиночных нейтронных звезд с учетом затухания магнитного поля при аккреции турбулизованной среды. Произведена интерпретация объекта RX J0720.4-3125 как одиночной аккрецирующей нейтронной звезды, испытавшей распад магнитного поля в течении эволюции.

3. По наблюдаемым флуктуациям периодов рентгеновских пульсаров получены независимые оценки ряда параметров этих систем, в частности скоростей звездного ветра некомпактных компонентов.

4. Впервые построена модель эволюции двойных систем в применении к центру Галактики. Впервые промоделировано пространственное распределение рентгеновских источников в Галактическом центре. Произведено сравнение с результатами наблюдений на спутнике ГРАНАТ.

5. Детально рассмотрено влияние изменения начальной функции масс на популяцию тесных двойных систем в течении первых 20 миллионов лет после вспышки звездообразования.

6. Исследовано пространственное распределение светимости аккрецирующих компактных объектов в галактике. Впервые определен торообразный вид этого распределения в широком диапазоне параметров скоростей отдачи компактных объектов.

Результаты выносимые на защиту

1. Показано, что одиночные аккрецирующие нейтронные звезды без затухания поля должны иметь относительно большие периоды $\geq 5 \cdot 10^2$ секунд.

2. Затухание магнитного поля у одиночных нейтронных звезд приводит к появлению пульсирующих источников мягкого рентгеновского диапазона с периодами ~ 10 секунд. Источник RX 0720.4-3125 по-видимому является примером такого объекта.

3. По флуктуациям периодов рентгеновских пульсаров определены важные параметры для двойных систем Vela X-1, GX 301-2, Her X-1, Cen X-3. В частности, проведено определение скоростей звездного ветра нормальных компонент для систем Vela X-1 и GX 301-2.

4. Наблюдаемая популяция двойных рентгеновсих источников в области центра Галактики и их пространственное распределение объясняется в рамках модели вспышки звездообразования, произошедшей 6-8 миллионов лет назад.

5. Распределение средней аккреционной светимости одиночных нейтронных звезд и черных дыр в Галактике имеет торообразную структуру с максимумом примерно на 5 кпк. Качественно этот результат не зависит от выбранного распределения начальных скоростей компактных объектов в широком диапазоне параметров.

Личный вклад автора

1. В задаче об эволюции одиночных нейтронных звезд автором был проведен расчет для аккреции турбулизованной среды (стохастическое ускорение нейтронных звезд), а также под руководством проф. Липунова сделаны оценки некоторых параметров.

2. При рассмотрении эволюции с распадом поля к объекту RX J0120.4-3125 автором была проделана бóльшая часть аналитических расчетов, также автору принадлежит постановка задачи. Численно автором решалась задача о нахождении аналога равновесного периода для аккреции из турбулизованной среды (с консультациями М.Е. Прохорова).

3. В задаче о периодах рентгеновских пульсаров автором проводились расчеты и аналитические оценки параметров.

4. При расчете вспышки звездообразования в центре Галактики автором проводилось моделирование с помощью пакета программ "Машина сценариев". Также автором была написана программа и проведен расчет пространственного распределения рентгеновских источников.

5. В рассмотрении влияния начальной функции масс на популяции рентгеновских источников автору принадлежит постановка задачи и расчет с помощью "Машины сценариев".

6. При расчете пространственного распределения аккреционной светимости одиночных компактных объектов автору принадлежит постановка задачи и расчет. Программа создавалась автором совместно с М.Е. Прохоровым.

Практическая ценность

1. Рассмотрена эволюция многочисленного класса одиночных нейтронных звезд. Поскольку в последние несколько лет появилась возможность наблюдения аккрецирующих одиночных нейтронных звезд в мягком рентгеновском диапазоне, определение параметров этих объектов и расчет их эволюции представляет ценность для наблюдателей и интерпретаторов. Нами получен ряд оценок параметров эволюции одиночных нейтронных звезд (характерные периоды и времена их изменения, длительности различных стадий эволюции), удобных для практического применения.

2. Применение расчетов к наблюдаемому объекту RX 0720.4-3125 позволило показать, что в данном случае, по всей видимости, мы столкнулись со случаем затухания магнитного поля у нейтронной звезды в течении ее эволюции на масштабах порядка миллиардов лет. Аналитические оценки могут непосредственно применяться к вновь открываемым объектам такого типа.

3. Показана возможность оценки ряда существенных параметров рентгеновских пульсаров по наблюдаемым флуктуациям периода. Определены скорости звездного ветра нормальных компаньонов для двух систем.

4. Предложен метод определения возраста вспышек звездообразования по отношению числа источников с черными дырами и нейтронными звездами. Действенность метода продемонстрирована на примере центра Галактики, для которого определен возраст относительно недавней вспышки звездообразования.

5. Проведен расчет эволюции популяций тесных рентгеновских двойных систем четырех типов после вспышки

звездообразования для различных параметров начальной функции масс. Результаты приведены в форме, удобной для использования другими авторами.

6. Построено распределение светимости аккрецирующих одиночных нейтронных звезд и черных дыр в Галактике, которое может быть учтено при выработке стратегии поиска этих объектов.

7. При участии автора диссертации создана WWW-версия программы “Машина сценариев” (Назин и др., 1996).

Апробация

Результаты, включенные в диссертацию, докладывались на ряде семинаров ГАИШ МГУ, САО РАН и ФТИ им. Иоффе (СПБ) в 1993-98 годах, на международных конференциях Космион-94 (Москва) и Космион-96 (Москва), на съезде Американского астрономического общества (США, 1994), на международной студенческой конференции “Ленинские Горы – 95”, на международной конференции ”From stars – to galaxies” (Крит, Греция, 1995), на международной школе по астрофизике нейтронных звезд (NATO ASI, Италия, 1996), на международной конференции памяти Шкловского, Каплана и Пикельнера (Москва, 1996), международной школе по физике плазмы Волга-97 (Нижний Новгород, 1997), 4-й рабочей встрече по физике нейтронных звезд (СПБ, 1997).

Публикации по теме диссертации:.

Результаты изложенные в диссертации были опубликованы в следующих работах:

1. В.М. Липунов и С.Б. Попов, ‘Эволюция периодов одиночных нейтронных звезд: теорема о замедлении” Астрономический Журнал, 72, N5, стр. 711-716, 1995.

2. V.M.Lipunov, S.B.Popov ‘The determination of the ’diffusion coefficients’ and stellar wind velocities for X-ray binaries” Astron. Astroph. Transactions, Vol. 8, pp.221-226, 1995 (astro-ph/9404066).

3. V.M.Lipunov, L.M.Ozernoy, S.B.Popov, K.A.Postnov, M.E. Prokhorov ‘Production of White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes During Nuclear Starburst” BAAS, Vol.26, p.1420, 1994.

4. V.M.Lipunov, L.M.Ozernoy, S.B.Popov, K.A.Postnov, M.E. Prokhorov ‘Population synthesis of X-ray sources at the Galactic center” ApJ Vol. 466, pp. 234-243, 1996.

5. V.M.Lipunov, L.M.Ozernoy, S.B.Popov, K.A.Postnov, M.E. Prokhorov ‘Population synthesis of X-ray sources at the Galactic center” 1st International Conference on CosmoParticle Physics - ”COSMION-94”, Eds. Khlopov, M.Yu., Starobinskii, A.A. , Prokhorov, M.E. & Tran Tan Van, Editions Frontiers, pp. 366-369 , 1996 (astro-ph/9404065).

6. Д.Ю. Коненков и С.Б. Попов, ‘RX J0720.4-3125 как возможный пример затухания магнитного поля нейтронных звезд” Письма в Астрономический Журнал 23, N8, стр. 569-575, 1997 (astro-ph/ 9707318).

7. S.B. Popov and M.E.Prokhorov, ‘Spatial distribution of the luminosity of accreting neutron stars and black holes in the Galaxy” Тезисы докладов 4-й рабочей встречи по физике нейтронных звезд, СПБ, 1997, стр. 29 (astro-ph/9706236).

В заключение хочу выразить признательность своему научному руководителю проф. В.М. Липунову за постановку задач, руководство и внимание к моей работе. Хочу поблагодарить М.Е. Прохорова, всегда помогавшему в решении возникающих проблем и высказавшего много полезных замечаний по тексту диссертации, а также других коллег из отдела Релятивистской Астрофизики ГАИШ, за интересные идеи, совместную работу, многочисленные полезные советы, и за плодотворные дискуссии. Также хочу поблагодарить моих друзей, которые помогали мне в трудные минуты. Особое спасибо С.Н. Назину. Я признателен соавторам из других институтов: Д.Ю. Коненкову и Л.М. Озерному, и надеюсь на дальнейшее сотрудничество. Благодарю ISSEP, Международный научный фонд, РФФИ, ИНТАС и центр ‘КОСМИОН” за финансовую поддержку исследований, вошедших в данную диссертацию.

Литература

[1] Блаез и Мадау, 1993 – Blaes, O.& Madau, P., 1993, ApJ **403**, 690

[2] Блаез и Раджагопал, 1991 – Blaes, O. & Rajagopal, M., 1991, ApJ **381**, 210

[3] Вальтер и др., 1996 – Walter, F.M., Wolk, S.J., & Neuhauser, R., 1996, Nature **379**, 233

[4] Кордес и Чернофф, 1997a – Cordes, J.M. & Chernoff, D.F., 1997, ApJ, **482**, 971

[5] Кордес и Чернофф, 1997b – Cordes, J.M. & Chernoff, D.F., 1997, astro-ph/9707308

[6] Лейтерер и Хекман, 1995 – Leitherer, C. & Heckman, T.M., 1995, ApJS **96**, 9

[7] Липунов и Попов, 1995a – Липунов, В.М. и Попов, С.Б., 1995, АЖ **72**, 711

[8] Липунов и Попов, 1995b – Lipunov, V.M. & Popov, S.B., 1995, A & A Trans., **8**, 221 (astro-ph/9504065)

[9] Липунов и др., 1996a – Lipunov, V.M., Ozernoy, L.M., Popov, S.B., Postnov, K.A. & Prokhorov, M.E., 1996, ApJ **466**, 234

[10] Липунов и др., 1996b – Lipunov, V.M., Postnov, K.A. & Prokhorov, M.E., 1996, A&A **310**, 489

[11] Липунов и др., 1996c – Lipunov, V.M., Postnov, K.A. & Prokhorov, M.E., 1996, Astroph. and Space Phys. Rev. **9**, part 4

[12] Лоример и др., 1997 – Lorimer, D.R., Bailes, M., & Harrison, P.A., 1997, perprint

[13] Назин и др., 1996 – S.N.Nazin, V.M.Lipunov, I.E.Panchenko, K.A.Postnov, M.E.Prokhorov & S.B.Popov , 1996, astro-ph/9605184

[14] Озерной, 1994 – Ozernoy, L.M. 1994, in "Multi-Wavelength Continuum Emission of AGN", Eds. Courvoisier, T.J.-L. & Blecha, A., Kluwer, 351

[15] Озерной, 1995 – Ozernoy, L.M. 1995, in "The Unsolved Problems of the Milky Way Galaxy" (IAU Symp. No. 169), Ed. Blitz, L., Kluwer

[16] Пачинский, 1990 – Paczyński, B., 1990, ApJ **348**, 485

[17] Попов, 1997 – Popov S.B., 1997, astro-ph/9708044

[18] Прохоров и Постнов, 1994 – Prokhorov, M.E. & Postnov, K.A., 1994, A & A, **286**, 437

[19] Прохоров и Постнов, 1993 – Prokhorov, M.E. & Postnov, K.A., 1993, A & A Trans., **4**, 81

[20] Урпин и Муслимов, 1992 – Урпин, В.А., Муслимов, А.Г., 1992, АЖ **69**, 1028

[21] Хаберл и др., 1996 – Haberl, F. , Pietsch, W., Motch, C., & Buckley, D. A. H., 1996, IAU Circ. No.6445

[22] Хаберл и др., 1997 – Haberl, F., Motch, C., Buckley, D. A. H., Zickgraf, F.-J., & Pietsch, W. 1997, A& A, **326**, 662

[23] Хеклер и Колб, 1996 – Heckler, A.F. & Kolb, E.W., 1996, ApJ **472**, L85

[24] Хекман, 1997 – Heckman, T.M., 1997, astro-ph/9708263

[25] Чанмугам, 1992 – Chanmugam, G. 1992, ARA&A **30**, 143