

К ВОПРОСУ О СУЩЕСТВОВАНИИ МАССИВНЫХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

М.К. Абубекеров, А.М. Черепашук

Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, МГУ

Москва, Россия, email: marat@sai.msu.ru

Поступила в редакцию в 2004 г.

Проведен анализ методов оценок масс нейтронных звезд в системах Vela X-1, 4U 1700-37 и J0751+1807. Обсуждается возможность существования массивных нейтронных звезд, их доля от общего числа нейтронных звезд и возможные каналы образования.

The analysis of the methods of the neutron mass star estimations for the systems Vela X-1, 4U 1700-37 and J0751+1807 is carried out. The possibility of the existence of the massive neutron stars, their fraction of the total number of the neutral stars and the possible channels of their formation are discussed.

Введение

К настоящему времени получены оценки масс около 30 нейтронных звезд. Из них прецизионной точностью обладают лишь оценки масс радиопульсаров в двойных системах Халса-Тейлора [1], и недавно обнаруженного двойного радиопульсара J0737-3039 [2]. Из оценок следует, что масса нейтронных звезд заключена в достаточно узком интервале $1.25 - 1.44M_{\odot}$. На основании этого за стандартное значение массы нейтронной звезды во многих астрофизических расчетах и нормировках формул принимается $\sim 1.4M_{\odot}$.

Однако по результатам теоретических расчетов ожидаемые массы нейтронных звезд, образовавшихся при коллапсе ядер массивных звезд, могут лежать в интервале $1 - 1.8M_{\odot}$ (см. например, [3]-[5]). Существование нейтронных звезд с массами выше $\sim 1.8M_{\odot}$ не противоречит современным астрофизическим представлениям. Существует целый ряд жестких уравнений состояния нейтронной материи, в которых масса Опенгеймера-Волкова превышает $1.8M_{\odot}$ (см. например [6]). Особое внимание следует обратить на появившийся в последнее время цикл работ по так называемым скирмионным звездам. В 1999 году Оуед и Батлер [7] рассмотрели уравнение состояния на основе модели Скирма [8]. Характерной особенностью моделей нейтронных звезд на основе уравнения Скирма является большая предельная масса: $2.95M_{\odot}$ для невращающейся конфигурации и $3.45M_{\odot}$ для вращающейся [9, 10]. Одной из особенностей нейтронных звезд основанных на модели Скирма является большое значение их радиуса (до 23 км).

Недавно проведенные расчеты эволюции массы нейтронных звезд в двойных системах на "Машине сценариев" [11] показали, что реализуются каналы эволюции двойной

системы, в ходе которых нейтронная звезда за счет аккреции способна увеличить свою массу более чем на $\sim 1M_{\odot}$ [12, 13].

Последнее время появляется все большее число наблюдательных указаний на возможность существования массивных нейтронных звезд. Уже известно три двойных системы, в которых центральные значения массы компактных объектов превосходят $1.8M_{\odot}$. По существующим оценкам масса нейтронной звезды в системе Vela X-1 близка к $\sim 2M_{\odot}$, а массы компактных объектов в двойных 4U 1700-37 и J0751+1807 превышают $2M_{\odot}$. Поскольку наблюдательное подтверждение гипотезы о существовании массивных нейтронных звезд крайне важно с точки зрения фундаментальных свойств нейтронной материи, то еще раз следует заострить внимание на методах и результатах оценки масс нейтронных звезд в двойных системах Vela X-1, 4U 1700-37 и J0751+1807.

Оценки массы нейтронных звезд в системах Vela X-1, 4U 1700-37 и J0751+1807

Двойная система Vela X-1

Рентгеновская двойная система Vela X-1 открыта в 1967 году [14]. Система состоит из рентгеновского пульсара и сверхгиганта спектрального класса B0.5 Ibeq (HD 77581) с массой 24-25 M_{\odot} . Оптический компонент близок к заполнению своей полости Роша. Орбитальный период системы 8.96 дней. Орбита двойной системы обладает заметным эксцентриситетом $e \simeq 0.09$ (в сравнении с эксцентриситетом орбит остальных рентгеновских пульсаров).

Рентгеновская двойная Vela X-1 вызывает пристальный интерес высоким значением массы рентгеновского пульсара. На рис.1 представлена оценки масс рентгеновского пульсара полученные различными авторами.

В работе Зюдервика [15] была выполнена первая оценка массы рентгеновского пульсара $m_{NS} > 1.9M_{\odot}$. В работе ван Парадайса [16] получена оценка массы рентгеновского пульсара $m_{NS} = 1.6 \pm 0.3M_{\odot}$ по уровню доверия 1σ . Согласно результатам работы Раппапорта и Джосса масса рентгеновского пульсара лежит в пределах $m_{NS}(2\sigma) = 1.85_{-0.30}^{+0.35}M_{\odot}$ [17]. Следующие оценки массы компактного объекта в Vela X-1 составляют $m_{NS}(1.64\sigma) = 1.77_{-0.21}^{+0.27}M_{\odot}$ (Нагазе 1989) [18], $m_{NS}(2\sigma) = 1.9_{-0.5}^{+0.7}M_{\odot}$ (ван Керквик и др. 1995) [19], $m_{NS}(2\sigma) = 1.86 \pm 0.32M_{\odot}$ (Барзив и др, 2001) [20]. По результатам работы Квантрелла [21] в предположение заполнения оптической звездой полости Роша $\mu = 1$ и наклона орбиты $i = 70^{\circ}.1 \pm 2^{\circ}.6$ масса рентгеновского пульсара составляет $m_{NS}(1\sigma) = 2.27 \pm 0.17M_{\odot}$. При наклонении орбиты $i = 90^{\circ}$ и неполном заполнение полости Роша $\mu = 0.89 \pm 0.03$ масса нейтронной звезды составляет $m_{NS}(1\sigma) = 1.88 \pm 0.13M_{\odot}$ [21].

Оценки массы в работах [15, 16] выполнены на основе наблюдаемой кривой лучевых скоростей в модели точечных масс. В работах [17]-[21] оценка масс рентгеновского пульсара произведена на основе решения системы уравнений (см. например, [20]) методом Монте-Карло. В качестве наблюдаемого параметра в данном методе используется лишь полуамплитуда кривой лучевых скоростей оптической звезды K_v . При этом не принимается во внимание ее форма. Это является существенным недостатком метода.

Следует отметить, что часть выражений, на которые опирается данный метод рас-

чета параметров двойной, получены в формализме точечных масс. В то же время формализм точечных масс совершенно не применим в случае двойной системы Vela X-1. Радиус оптической звезды в двойной системе Vela X-1 близок к $\sim 30R_{\odot}$ при расстоянии между центрами масс компонент $\sim 55R_{\odot}$. В этом случае для корректной интерпретации кривой лучевых скоростей должны быть приняты во внимание эффекты взаимодействия компонент. Модель двойной системы в первом приближении должна учитывать: положение центра масс двойной в теле оптического спутника, приливно-деформированную форму оптической звезды, эффект рентгеновского прогрева и гравитационного потемнения ее поверхности.

В работе Абубекерова, Антохиной и Черепащука [22] выполнена оценка массы рентгеновского пульсара в модели Роша, которая в первом приближении учитывает вышеперечисленные эффекты взаимодействия компонентов [23]. Помимо этого в работе [22] проверена адекватность вычисленных параметров двойной системы наблюдательным данным. Отметим, что динамическая оценка массы в работе [22] проводилась на основе комплекса наблюдательного материала полученного за 1967-2003 годы. Кратко изложим метод оценки массы компактного объекта в работе [22].

С целью уменьшения влияние случайных ошибок, вызванных осцилляцией поверхности и дополнительной абсорбцией в газовых структурах двойной, в работе [22] выполнена интерпретация средней наблюдаемой кривой лучевых скоростей. Интерпретация выполнена по всем средним значениям наблюдаемой лучевой скорости и без учета средних наблюдаемых значений лучевой скорости в промежутке орбитальных фаз 0.4-0.6 как наиболее искаженных анизотропией звездного ветра.

В случае интерпретации по всем значениям лучевой скорости масса компактного объекта составила $m_{NS} = 2.02M_{\odot}$ (поскольку модель отвергается по критерию Фишера, ошибка m_{NS} не определена). В случае косвенного учета анизотропии звездного ветра масса рентгеновского пульсара составила $m_{NS} = 1.93M_{\odot}$ (поскольку модель отвергается по критерию Фишера, ошибка m_{NS} не определена). В обоих случаях модели отвергались по уровню значимости $\alpha = 5\%$. Лишь искусственное увеличение ошибки средней наблюдаемой лучевой скорости в 2 раза позволило принять модель по уровню доверия $\gamma = 95\%$ при интерпретации средней наблюдаемой кривой лучевых скоростей с косвенным учетом анизотропии звездного ветра. Масса рентгеновского пульсара составила $m_{NS}(2\sigma) = 1.93_{-0.24}^{+0.25}M_{\odot}$. Отметим, что при интерпретации полной средней кривой лучевых скоростей даже после увеличения ошибки средней наблюдаемой скорости вдвое модель по-прежнему отвергалась по уровню значимости $\alpha = 5\%$.

Таким образом, все используемые на сегодняшний день модели двойной системы Vela X-1 не способны корректно проинтерпретировать имеющиеся наблюдательные данные. Поэтому высокое значение массы рентгеновского пульсара в системе Vela X-1 остается под вопросом.

Двойная система 4U 1700-37

Рентгеновская двойная система 4U 1700-37 открыта с борта спутника "Ухуру" в декабре 1970 года [24]. Двойная система состоит из сверхгиганта спектрального класса O6.5Iaf (HD 153919) [25, 26] и компактного объекта.

Рентгеновское излучение двойной 4U 1700-37 имеет жесткий спектр [27, 28] похожий

на спектр аккрецирующих нейтронных звезд. Вместе с этим от компактного объекта не наблюдается регулярных импульсов, связанных с эффектом маяка, возникающего при аккреции вещества на нейтронную звезду. Данное обстоятельство не позволяет построить кривую лучевых скоростей компактного объекта и, следовательно, определить массу оптического спутника. Масса оптического спутника вычисляется по спектральному классу или по зависимости "масса-светимость". Однако эти оценки недостаточно надежны. Вследствие чего недостаточно точны и оценки массы компактного объекта. На рис.2 представлена оценки массы компактного объекта в системе 4U 1700-37, полученные различными авторами.

В работе Хатчингса 1973 года [29] решение наблюдаемой кривой лучевых скоростей было произведено методом наименьших квадратов в модели двух точечных масс. В предположении массы оптического компонента $35M_{\odot}$ и наклона орбиты 90° масса компактного объекта составила $m_{NS}(1\sigma) = 2.4 \pm 0.5M_{\odot}$. По результатам работы Волффа и Моррисона 1974 года масса компактного объекта заключена в диапазоне $m_{NS}(1\sigma) = 1.4 \pm 0.3M_{\odot}$ при массе оптического спутника $m_v = 25M_{\odot}$. В случае массы оптической звезды $m_v(1\sigma) = 40M_{\odot}$, масса компактного объекта превышает $2M_{\odot}$. Согласно результатам работы ван Парадайса и др. 1977 года [31] масса релятивистского компонента составляет $m_{NS}(1\sigma) = 1.74_{-0.19}^{+0.13}M_{\odot}$ при массе оптической звезды $m_v(1\sigma) = 21.3_{-1.8}^{+1.1}M_{\odot}$. В работе Хипа и Коркорана [32] оценка массы компактного объекта равна $m_{NS}(1\sigma) = 1.8 \pm 0.4M_{\odot}$, а масса оптического спутника $m_v = 52 \pm 2M_{\odot}$. По результатам работы Рубина и др. [33] масса компактного объекта составляет $m_{NS}(1\sigma) = 2.6_{-1.4}^{+2.3}M_{\odot}$ при массе оптической звезды $30_{-7}^{+11}M_{\odot}$. Авторы работы [34] получили массу компактного объекта $m_{NS}(1\sigma) = 2.44 \pm 0.27M_{\odot}$ при массе оптического спутника $m_v(1\sigma) = 58 \pm 11M_{\odot}$. Согласно оценке массы компактного объекта по "чисто" эллипсоидальной оптической кривой блеска значение m_{NS} заключено в пределах $0.95 - 2.08M_{\odot}$ по уровню доверия $\gamma = 50\%$ [35].

В работе [29] оценка массы компактного объекта получена в модели точечных масс. В работах [31]-[34] оценка массы компактного объекта выполнена путем решения системы уравнений (см. например, [34]) методом Монте-Карло. Во-первых, как уже было выше отмечено часть уравнений, получена в формализме точечных масс. Во-вторых, в методе Монте-Карло в качестве наблюдаемого параметра используется лишь полуамплитуда кривой лучевых скоростей K_v и при этом не учитывается ее форма. Тогда как в работе [22] показано, что форма кривой лучевых скоростей для систем с $q = m_x/m_v < 1$ в модели точечных масс и модели Роша значимо различны.

Двойная система 4U 1700-37, как и Vela X-1 состоит из компактного объекта и ОВ-сверхгиганта близкого к заполнению своей полости Роша. Поэтому как и в случае двойной системы Vela X-1 модель точечных масс при интерпретации наблюдательных данных неприменима. В случае системы 4U 1700-37 неопределенность массы заключена не только, в недостаточно корректной модели используемой при интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей, но и неопределенности оценки массы оптического спутника.

Поэтому в работе Абубекерова [38] проведена интерпретация кривой лучевых скоростей в модели Роша для дискретного набора масс оптической звезды $20M_{\odot}$, $30M_{\odot}$, $40M_{\odot}$, $50M_{\odot}$, $58M_{\odot}$, $70M_{\odot}$. Результатом интерпретации явились зависимости между массой компактного объекта и оптической звезды см. рис. 3. Помимо этого в работе вы-

полнена проверка адекватности моделей наблюдательным данным на основе статистического критерия Фишера. Оценка массы компактного объекта произведена несколькими методами. Масса оптической звезды на основе ускорения силы тяжести составляет $m_v = 55_{-6}^{+7} M_\odot$. Данной массе оптической звезды соответствует масса компактного объекта $m_{NS}(2\sigma) = 2.25_{-0.24}^{+0.23} M_\odot$. Исходя из массы оптической звезды, полученной по зависимости "масса-светимость" для тесных двойных систем [38] $m_v \simeq 27 M_\odot$ масса компактного объекта составляет $m_{NS}(2\sigma) = 1.35_{-0.18}^{+0.18} M_\odot$.

Таким образом, наблюдательным данным на уровне доверия $\gamma = 95\%$ адекватны модели тесной двойной системы как с высоким значением массы компактного объекта $m_v = 2.25_{-0.24}^{+0.23} M_\odot$, так и со стандартным значением массы нейтронной звезды $m_v(2\sigma) = 1.35_{-0.18}^{+0.18} M_\odot$. Поэтому на настоящий момент высокая оценка массы компактного объекта системы 4U 1700-37 $m_{NS} \simeq 2.2 M_\odot$ недостаточно надежна.

Двойная система J0751+1807

Двойная система J0751+1807 открыта в 1993 году [39]. Система состоит из миллисекундного радиопульсара и белого карлика. В подобных системах масса компонент измеряется на основе тайминга импульсов радиопульсара. Из наблюдений определяется четыре релятивистских параметра двойной системы: скорость движения периастра орбиты $\dot{\omega}$, параметр γ описывающий эффекты задержки импульсов радиопульсара за счет эффектов ОТО, временная задержка Шапиро, скорость уменьшения орбитального периода за счет излучения гравитационных волн \dot{P}_{orb} . Для того чтобы определить массу компонент двойной требуется знать два из четырех параметров (остальные используются для контроля полученного результата).

В двойной системе J0751+1807 орбита почти круговая $e = 0.000003$ [41]. Столь малое значение эксцентриситета не позволяет определить скорость движения периастра орбиты $\dot{\omega}$ и значение параметра γ . Поэтому оценка массы радиопульсара получена только на основе двух параметров: временной задержки Шапиро и \dot{P}_{orb} .

Значение \dot{P}_{orb} полученное на основе анализа наблюдательных данных 1993-1994 и 1999-2003 годов, составило $(-6.2 \pm 1.1) \cdot 10^{-14}$ с/с, соответствующая ему масса радиопульсара лежит в диапазоне $m_{PSR}(2\sigma) = 1.6 - 2.8 M_\odot$ [40]. В следующей работе этих же авторов значение \dot{P}_{orb} было уточнено $(-6.2 \pm 0.8) \cdot 10^{-14}$ с/с [41]. Новое значение массы радиопульсара составляет $m_{PSR}(2\sigma) = 2.1_{-0.5}^{+0.4} M_\odot$ [41]. Других оценок массы радиопульсара на сегодняшний момент не получено. Точность оценки массы радиопульсара в двойной системе J0751+1807 еще недостаточно высока, чтобы на ее основе делать выводы о наличии массивной нейтронной звезды.

Результаты популяционного синтеза

Масса нейтронной звезды в тесной двойной системе может измениться за счет аккреции вещества спутника. С целью оценки величины массы аккрецируемого вещества ΔM в работах [12, 13] выполнен популяционный синтез на "Машине Сценариев" [11].

В работе [12] проведен популяционный синтез 19.5 млн. двойных систем. Начальные массы компонент варьировались в диапазоне от $5 M_\odot$ до $120 M_\odot$. Распределение начальных отношений масс компонент двойных систем полагалось равновероятным.

Начальное значение большой полуоси двойной могло принимать любые значения из диапазона $10 - 10^6 R_\odot$. Начальная масса нейтронной звезды разыгрывалась в диапазоне $1.25 - 1.44 M_\odot$. Синтез выполнен для разных времен диссипации магнитного поля радиопульсара t_d : 10^7 , $5 \cdot 10^7$ и 10^8 лет. Полагалось, что скорость анизотропного толчка нейтронной звезды подчиняется максвеллоподобному распределению с характерной величиной $v_0 = 180$ км/с. Предел Опенгеймера-Волкова принят равным $2.5 M_\odot$.

Популяционный синтез 19.5 млн. двойных систем привел к образованию $\sim 7 \cdot 10^4$ систем радиопульсара с нейтронной звездой (PSR+NS) и $\sim 16 \cdot 10^4$ систем радиопульсара с белым карликом (PSR+WD). Синтез выполнен как с учетом гипераккреции, так и без ее учета. В случае учета гипераккреции максимальная масса достигаемая пульсаром составляла $\sim 1.75 M_\odot$. Канал образования радиопульсаров был достаточно узок. Радиопульсары образовывались в процессе эволюции двойных систем с начальными массами $M_1 \simeq 15 - 22 M_\odot$, $M_2 \simeq 15 - 22 M_\odot$ при начальной большой полуоси $a \simeq 10 - 10^3 R_\odot$. Радиопульсары набирали массу на двух стадиях: супераккреции ($\Delta M \simeq 0.1 - 0.2 M_\odot$) и гипераккреции ($\Delta M \simeq 0.2 - 0.3 M_\odot$). При этом аккумуляция вещества происходит достаточно быстро $t < t_d$. Без учета стадии гипераккреции максимальное значение массы радиопульсаров в системах PSR+NS составляло $\sim 1.6 M_\odot$.

Значение масс радиопульсаров в системах PSR+WD, получившихся в ходе популяционного синтеза достигали $2.5 M_\odot$. Каналы образования массивных радиопульсаров зависели от времени диссипации магнитного поля (более подробно см. [12]). Однако вне зависимости от величины t_d в каждом из сценариев возникали радиопульсары с массами $\sim 2.5 M_\odot$. Данные радиопульсары являлись продуктом эволюции двойной системы с массами компонент $M_1 \geq 10 M_\odot$ и $M_2 \simeq 1.5 - 3.0 M_\odot$ и величиной большой полуоси $a = (6 - 7) \cdot 10^2 R_\odot$. Радиопульсары в этом канале эволюции набирают массу исключительно на стадии аккреции. Вещество на них перетекает с маломассивной звезды донора через внутреннюю точку Лагранжа. Поскольку маломассивный спутник заполняет свою полость Роша в ядерной шкале времени ($t \sim 10^8 - 10^9$ лет), то поле радиопульсара успевает затухнуть и не препятствует выпадению вещества.

Популяционный синтез в работе [12] выполнен с учетом набора массы ΔM на стадии гипераккреции и без учета набора массы радиопульсаром на стадии гипераккреции. В случае учета набора массы на стадии гипераккреции число радиопульсаров с $m_{PSR} > 1.8 M_\odot$ составило $\sim 12\%$ от общего числа радиопульсаров в системах PSR+WD при $t_d = 10^7$, $\sim 30\%$ при $t_d = 5 \cdot 10^7$ лет, и $\sim 30\%$ при времени диссипации магнитного поля $t_d = 10^8$ лет. В случае неучета набора массы радиопульсаром на стадии гипераккреции число радиопульсаров с $m_{PSR} > 1.8 M_\odot$ составило $\sim 4\%$ от общего числа радиопульсаров в системах PSR+WD при $t_d = 10^7$, $\sim 3\%$ при $t_d = 5 \cdot 10^7$ лет, и $\sim 3\%$ при времени диссипации магнитного поля $t_d = 10^8$ лет. Следует отметить, что в случае искусственного увеличения предела Опенгеймера-Волкова радиопульсар за счет аккреции способен увеличить свою массу до $\sim 5 M_\odot$ [12].

В работе Попова и Прохорова [13] произведена оценка частоты рождения массивных нейтронных звезд. Она составляет $6.7 \cdot 10^{-7}$ лет $^{-1}$, что соответствует $\sim 10^4$ массивных нейтронных звезд на Галактику. Согласно полученному распределению по типу эволюционного состояния большинство массивных нейтронных звезд находится в стадии аккретора (53% от общего числа), 39% массивных нейтронных звезд находится на стадии эжектора и 8% на стадии пропеллера и георотатора. Около 25% аккрецирующих

нейтронных звезд находится в парах с заполняющими полость Роша нормальными звездами, а 75% – с заполняющими полость Роша белыми карликами [13].

Согласно результатам популяционного синтеза наиболее ожидаемые наблюдательные проявления у массивных нейтронных звезд, те же что и у обычных: радиопульсары и рентгеновские источники. Массивные нейтронные звезды должны проявляться как миллисекундные радио и рентгеновские пульсары. Вероятность встречи массивного радиопульсара в системах PSR+WD выше в сравнении с двойными системами PSR+NS. Пульсары с массами $m_{PSR} > 1.8M_{\odot}$ должны встречаться лишь в двойных системах PSR+WD. В двойных системах PSR+NS, согласно популяционному синтезу выполненному в [12] столь массивные радиопульсары должны отсутствовать.

Заключение

Основным выводом популяционного синтеза является возможность существования эволюционных каналов, в которых нейтронная звезда может значимо увеличить свою массу. В случае реализации жесткого уравнения состояния вещества в нейтронной звезде ее масса может достигать $\sim 3.5M_{\odot}$. То есть теоретические расчеты говорят в пользу существования массивных нейтронных звезд.

Несмотря на это окончательно убедительных доказательств их существования не обнаружено. Точность моделей в двойных системах Vela X-1 и 4U 1700-37 не достаточна для корректной интерпретации наблюдательных данных. В двойной системе J 0751+1807 масса радиопульсара известна с достаточно большой ошибкой, для уменьшения которой требуется увеличить временной ряд наблюдений.

Авторы выражают благодарность С.Б. Попову за полезные замечания и советы. Работа была поддержана грантом РФФИ (N 02-02-17524) и грантом Ведущие научные школы России (НШ-388.2003.2).

Список литературы

- [1] *S.E.Thorsett, D.Chakrabarty, Astrophys. J.*, **512**, 288, 1999.
- [2] *A.G.Lyne, M.Burgay, M.Kramer et al.*, astro-ph 0401086.
- [3] *S.E.Woosley, A.Heger, T.A.Weaver, Rev. Mod. Phys.*, **74**, 1015, 2000.
- [4] *F.X.Timmes, S.E.Woosley, T.A.Weaver, Astrophys.J.*, **457**, 834, 1996.
- [5] *C.L.Fryer, V.Kalogera, Astrophys.J.*, **554**, 548, 2001.
- [6] *P. Haensal*, EAS Publications Series, eds. C.Motch and J.-M.Hameury, **7**, 249, 2003.
- [7] *R.Ouyed, M.Butler, Astrophys.J.*, **522**, 453, 1999.
- [8] *T.H.R.Skyrme*, Proc. R. Soc. London A, **267**, 127, 1962.
- [9] *Ouyed R.*, Astron. Astroph., **382**, 939, 2002.

- [10] *Ouyed R.*, astro-ph 0402122.
- [11] *V.M.Lipunov, K.A.Postnov, M.E.Prokhorov*, The Scenario Machine: Binary Star Population Synthesis, eds. R.A.Sunyaev, Astrophysics and Space Physics Reviews, vol.9, Harwood academic publishers, 1996.
- [12] *Богомазов А.И., Абубекеров М.К., Липунов В.М., Черепашук А.М.*, Астрон. ж. **82**, 2005 (в печати).
- [13] *S.B.Popov, M.E.Prokhorov*, astro-ph 0412327.
- [14] *G.Chodil, Mark Hans, R.Rodrigues et al.*, Astrophys.J., **150**, 57, 1967.
- [15] *E.J.Zuiderwijk, E.P.J. van den Heuvel, G.Hensberge*, Astron. Astrophys., **35**, 353, 1974.
- [16] *J.A. van Paradijs, G.Hammerschlag-Hensberge, E.P.J. van den Heuvel et al.*, Nature, **259**, 547, 1976.
- [17] *S.A.Rappaport, P.C.Joss*, "X-ray pulsars in massive binary systems" in: Accretion-Driven Stellar X-ray Sources, eds W.H.G.Lewin, E.P.J. van den Heuvel, Cambridge University Press 1983, 1.
- [18] *F.Nagase*, "Accretion-powered X-ray pulsars", Publ. Astron. Soc. Japan, **41**, 1, 1989.
- [19] *M.H. van Kerkwijk, J. van Paradijs, E.J.Zuiderwijk*, Astron. Astrophys., **303**, 497, 1995.
- [20] *O.Barziv, L.Kaper, M.H. van Kerkwijk et al.*, Astron. Astrophys., **377**, 925, 2001.
- [21] *H.Quantrell, A.J.Norton, T.D.C.Ash et al.*, Astron. Astrophys., **401**, 313, 2003.
- [22] *М.К.Абубекеров, Э.А.Антохина, А.М.Черепашук*, Астрон. ж., **81**, 108, 2004.
- [23] *Э.А.Антохина*, Астрон. ж., **73**. 532, 1996.
- [24] *C.Jones, W.Forman, H.Tananbaum et al.*, Astrophys.J., **181**, 43, 1973.
- [25] *C.Jones, W.Forman, W.Liller et al.*, Bull. Amer. astr. soc., **4**, 329, 1972.
- [26] *C.Jones, W.Liller*, I.A.U. Circ. 2503 1973
- [27] *A.P.Reynolds, A.Owens, L.Kaper et al.*, Astron. Astrophys., **349**, 873, 1999.
- [28] *L.Kaper, A.M.Cherepaschuk*, In Black Holes in Binaries and Galactic Nuclei: Diagnostic, Demography and Formation (ESO Astrophys. Simposia, Eds. L. Kaper, E.P.J. van Heuvel, P.A. Woudt) (Berlin: Springer, 2001) P.289.
- [29] *J.B.Hutchings, A.D.Thackeray, B.L.Webster, P.J.Andrews*, Mon.Notic. Roy. Astron. Soc., **163**, 13, 1973.
- [30] *S.C.Wolff, N.D.Morrison*, Astrophys.J., **187**, 69, 1974

- [31] *J. van Paradajs, E.J.Zuiderwijk, R.J.Takens, G.Hammerschlag-Hensberge*, *Astron. Asrophys. Suppl.*, **30**, 195, 1977.
- [32] *S.R.Heap, M.F.Corcoran*, *Astrophys.J.*, **387**, 340, 1992.
- [33] *B.C.Rubin, M.H.Finger, B.A.Harmon et al.*, *Asrophys.J.*, **459**, 259, 1996.
- [34] *J.S.Clark, S.P.Goodwin, P.A.Growthier et al.*, *Astron. Asrophys.*, **392**, 909, 2002.
- [35] *Н.И.Балог, А.В.Гончарский, Т.С.Хрузина, А.М.Черепашук*, *Астрон. ж.*, **60**, 534, 1983.
- [36] *G.Hammerschlag-Hensberge, C. De Loore, van Den Heuvel*, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **32**, 375, 1978.
- [37] *G.Hammerschlag-Hensberge, M.H. van Kerkwijk, L.Kaper*, *Astron. Astrophys.*, **407**, 685, 2003.
- [38] *М.К.Абубекеров*, *Астрон. ж.*, **81**, 714, 2004.
- [39] *S.C.Lundgren, A.F.Zepka, J.M.Cordes et al.*, *American Astron. Soc.*, 183rd Meeting P.1345 1993.
- [40] *D.J.Nice, E.M.Splaver, I.H.Stairs*, astro-ph 0311296.
- [41] *D.J.Nice, E.M.Splaver, I.H.Stairs*, astro-ph 0411207.

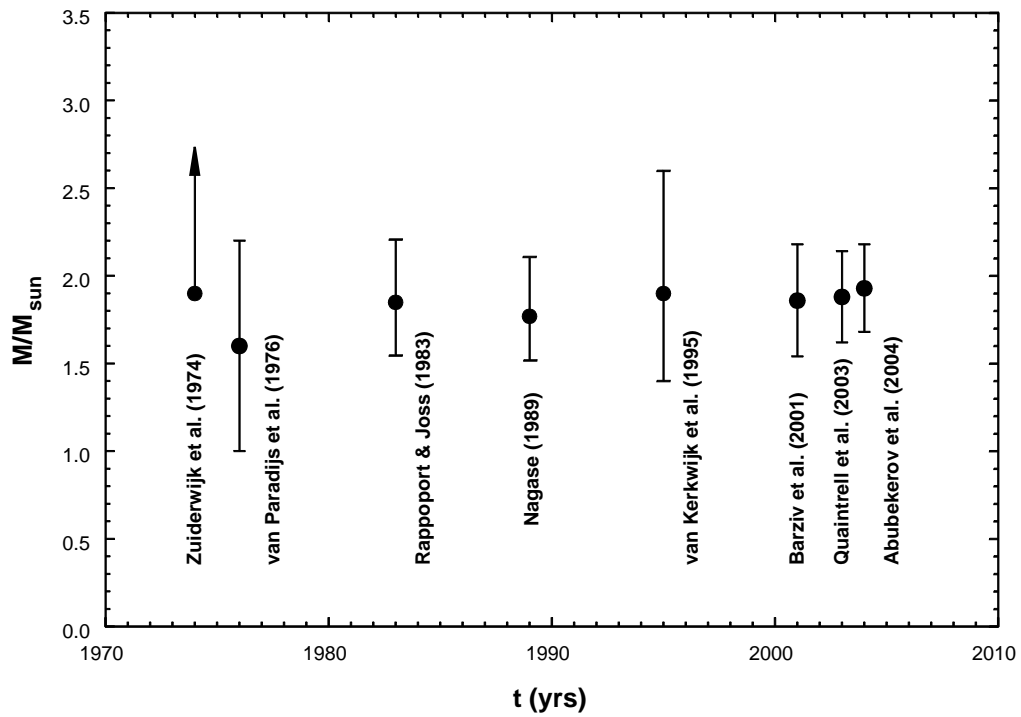


Рис 1: Оценки массы рентгеновского пульсара в двойной системе Vela X-1, полученные до 2004 года. Интервал ошибок указан на уровне 2σ .

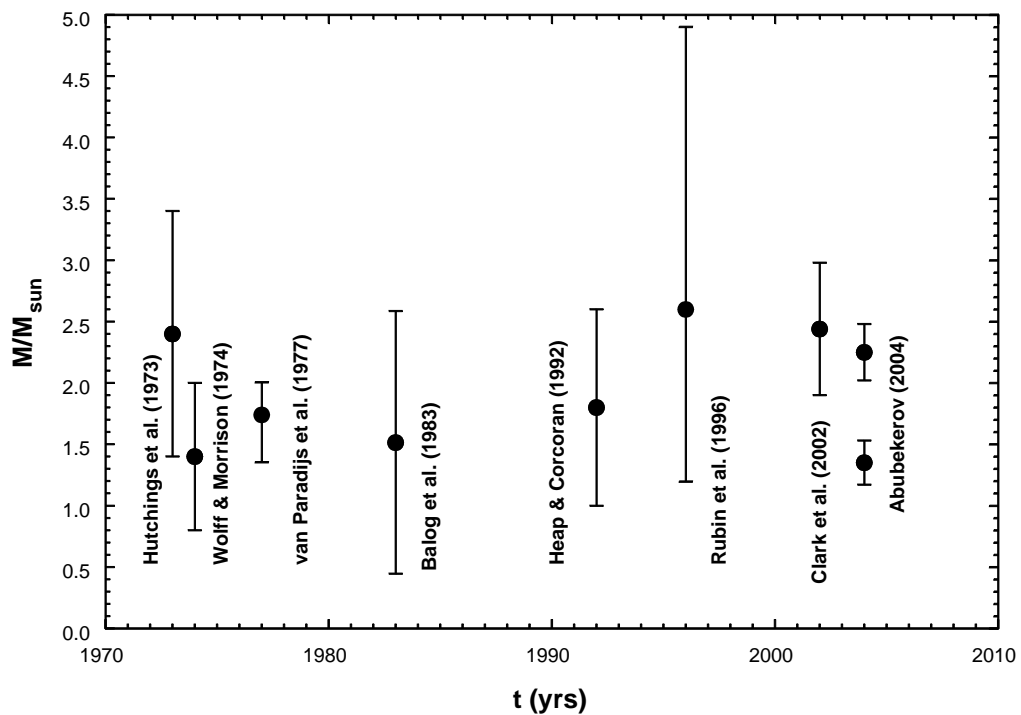


Рис 2: Оценки массы компактного объекта в двойной системе 4U 1700-37, полученные до 2004 года. Интервал ошибок указан на уровне 2σ . Balog et al. (1983) обозначены результаты работы Н.И.Балога и др. [35].

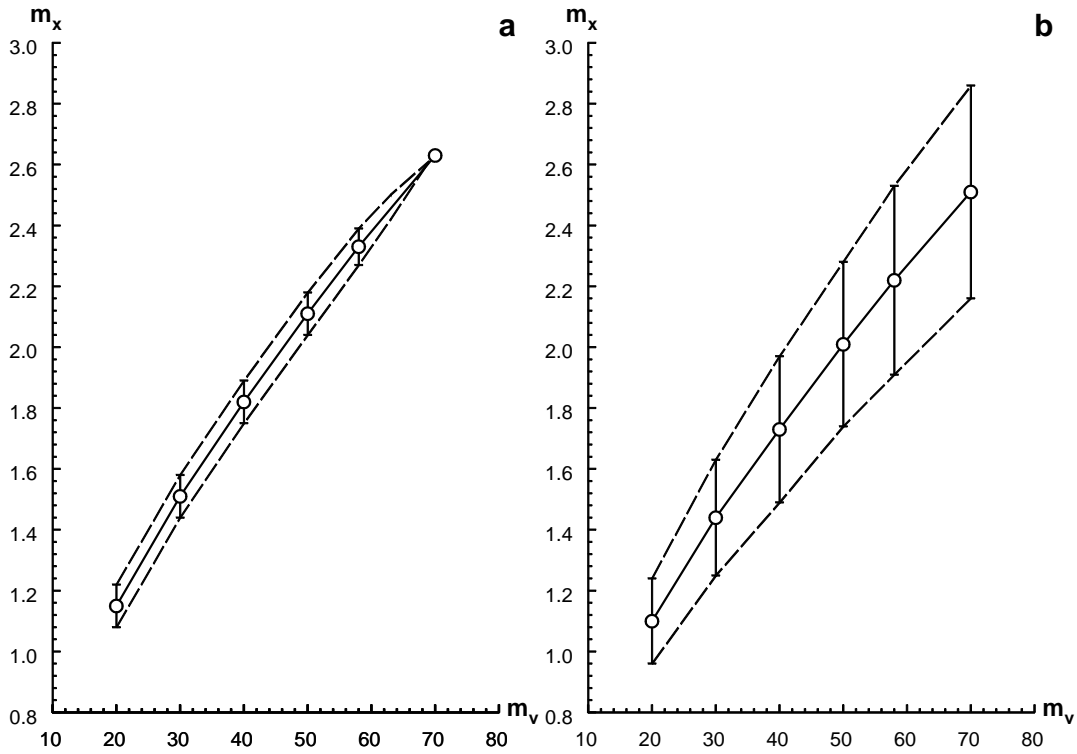


Рис 3: **а.** Зависимость массы компактного объекта рентгеновской ТДС 4U 1700-37 от массы оптической звезды при наклонении орбиты 67° . Получена интерпретацией в модели Роша лучевых скоростей, определенных по линиям абсорбции водорода из работы [36] без использования значений средней наблюдаемой лучевой скорости в фазовом интервале 0.4-0.6. **б.** Зависимость массы компактного объекта рентгеновской ТДС 4U 1700-37 от массы оптической звезды при наклонении орбиты 67° . Получена интерпретацией в модели Роша спектральных данных IUE из работы [37] без использования значений средней наблюдаемой лучевой скорости в фазовом интервале 0.4-0.6.