

## Аннотация

*Е.В. Филиппова, И.А. Мереминский, А.А. Лутовинов, С.В. Мольков,  
С.С. Цыганков*

«Радиус магнитосферы нейтронной звезды при дисковой аккреции»

Рентгеновские пульсары являются естественной лабораторией для исследования дисковой аккреции вещества, поскольку структура внутренних областей диска и их взаимодействие с магнитосферой нейтронной звезды влияют на период вращения пульсара. Из наблюдений следует, что периоды пульсаций подвержены переменностям в широком диапазоне характерных времен — от нескольких часов до нескольких лет, что связано с изменениями режима и темпа аккреции на нейтронную звезду. Одним из инструментов исследования режима аккреции является анализ зависимости темпа изменения частоты вращения нейтронной звезды от темпа аккреции вещества,  $\dot{\nu} \sim \dot{M}$ . Режим аккреции определяется радиусом магнитосферы нейтронной звезды, который задается как  $r_m = \xi r_A$ , где  $r_A$  — альвеновский радиус, определяемый равенством давлений магнитного поля и аккрецирующего вещества, падающего из бесконечности сферически-симметрично на диполь,  $\xi$  — безразмерный параметр. Существует несколько моделей, описывающих изменение частоты вращения нейтронных звезд в результате взаимодействия их магнитосферы с аккреционным диском. Эта задача интенсивно рассматривалась разными авторами с начала 70-х гг., однако в наиболее законченном виде ее решение было впервые опубликовано в работе Гош, Лэмб (1979). Авторы рассмотрели модель, в которой линии магнитного поля нейтронной звезды пронизывают стандартный аккреционный диск. Зависимость темпа изменения скорости вращения нейтронной звезды от темпа аккреции в этой модели имеет вид  $\dot{\nu} \sim N \dot{M}^\beta$ , где  $\beta = 6/7$ , а коэффициент  $N$  является функцией от отношения частот вращения нейтронной звезды и Кеплеровской частоты на радиусе магнитосферы. Позднее, в работе Ванга (1987) была показана внутренняя несогласованность расчета коэффициента  $N$  в этой модели, а в работах Ванга (1995) и Ли, Ванга (1995) опубликованы расчеты для самосогласованных моделей. В наиболее современной работе Парфрея и др. (2016) была рассмотрена модель, в которой линии, проходящие через аккреционный диск, в результате магнитной диффузии выносятся за радиус светового цилиндра. Влияние условий во внутренних частях диска на зависимость  $\dot{\nu}(\dot{M})$  было рассмотрено в работе Гоша, Лэмба (1992), где было показано, что: для радиационно-доминированного диска  $\beta = 0.925$ ; для двухтемпературного оптически тонкого газо-доминированного диска  $\beta = 0.15$  в случае охлаждения электронов за счет комптонизации мягких фотонов от внешнего источника либо  $\beta = 0.76$  в случае охлаждения электронов за счет тормозного излучения. Из аналитических расчетов следует, что при аккреции через стандартный диск  $\xi$  может быть как  $< 0.5$  (Гош и др., 1977; Клужняк, Раппапорт, 2007), так и  $> 1$  (Ванг, 1996). Численные расчеты показывают, что относительный размер магнитосферы нейтронной звезды ближе к  $0.5$  (Лонг и др., 2005; Бессолаз и др., 2008; Занни, Ферейра, 2013). В недавней работе Чашкиной и др. (2017) было продемонстрировано, что в случае радиационно-доминированного диска предсказываемое значение  $\xi$  в 1.5–2 раза больше, чем в случае стандартного диска, при этом абсолютное значение радиуса магнитосферы не зависит от темпа аккреции вещества, а показатель  $\beta = 1$ . Таким образом, не только  $\beta$ , но и размер магнитосферы зависит от темпа аккреции в других состояниях диска. При этом изменения обоих параметров отражаются на особенностях эволюции темпа изменения скорости вращения нейтронной звезды.

Подходящими объектами для исследования переменности скорости вращения аккрецирующих нейтронных звезд являются Ве-системы, поскольку они проявляют достаточно регулярную всплещечную активность, при которой темп аккреции меняется на

несколько порядков. На сегодняшний день имеется большой массив данных наблюдений телескопа Fermi/GBM, который проводит непрерывное наблюдение рентгеновских пульсаров и отслеживает историю изменения их частоты пульсаций с 2008 г., а также данных телескопа Swift/BAT, который строит непрерывные кривые блеска источников в жестком рентгеновском диапазоне (15–50 кэВ) начиная с 2005 года. На основе этих наблюдений нам удалось построить зависимость изменения частоты вращения пульсара от болометрической светимости,  $\dot{\nu}(L_{bol})$ , для восьми рентгеновских пульсаров в Be-системах во время вспышек второго типа, что позволило исследовать эту зависимость в широком диапазоне темпов аккреции вещества. В работе были отобраны пульсары в Be-системах, удовлетворяющих следующим критериям: наличие вспышек второго типа, так как такие вспышки позволяют измерить зависимость  $\dot{\nu}(L_{bol})$  в широком диапазоне светимостей, а, следовательно, и темпов аккреции вещества; во время вспышек имеются измерения частоты вращения нейтронной звезды по данным телескопа Fermi/GBM; известны орбитальные параметры системы, необходимые для корректировки частоты вращения нейтронной звезды на орбитальное движение; в энергетическом спектре источника регистрируется циклотронная линия, что позволяет сделать независимые оценки магнитного поля нейтронной звезды; имеются измерения расстояния до системы. Для перевода потока излучения в диапазоне энергий 15-50 кэВ в болометрическую светимость нами впервые были посчитаны зависимости болометрической поправки от потока.

Аппроксимация экспериментальных данных простым степенным законом  $\dot{\nu} \sim L_{bol}^{\beta}$ , проведенная в настоящей работе, для большинства систем дает показатель степени, близкий к значению 6/7, за исключением системы V 0332+53, у которой  $\beta = 1.8(0.5)$ . Таким образом, имеющиеся данные не позволяют отличить зависимости, полученные на основе работы Гоша, Лэмба (1992) для радиационно-доминированного диска и двух- температурного оптически тонкого в вертикальном направлении газодоминированного диска, где охлаждение электронов происходит за счет их тормозного излучения, но позволяют с уверенностью исключить модель двухтемпературного оптически тонкого газодоминированного диска, где охлаждение электронов происходит за счет комптонизации мягких фотонов от внешнего источника.

В работе были получены оценки на размер магнитосферы нейтронных звезд в приближении простой модели аккреции и моделей из работ Ванга (1995), Ли, Ванга (1995). Поведение зависимости  $\dot{\nu}(L_{bol})$  во время вспышки в системе V 0332+53 указывает на то, что модели из работ Ванга (1995), Ли, Ванга (1995) для нее не работают; для ее исследования мы использовали модель из работы Парфрея и др. (2016), которая также может быть применена и для систем 4U 0115+634 и GRO J1008-57. Благодаря независимым измерениям величины магнитного поля пульсаров по регистрации циклотронной линии поглощения в их энергетических спектрах, размер магнитосферы нейтронной звезды был единственным свободным параметром в рассматриваемых моделях.

У систем KS 1947+300, GRO J1008-57 и 1A 0535+26 впервые обнаружено, а у системы V 0332+53 подтверждено гистерезисное поведение ускорения вращения нейтронной звезды во время вспышки. Для этих систем мы оценили размер магнитосферы на растущей и убывающей ветвях зависимости  $\dot{\nu}(L_{bol})$  отдельно и получили, что в системах V 0332+53, GRO J1008-57 и 1A 0535+26 размер магнитосферы от ветки к ветке не меняется, в то время как в системе KS 1947+300 присутствует некоторое отличие: на растущей ветви размер магнитосферы в 1.4 раза меньше, чем на убывающей ветке (0.7 и 1, соответственно).