

1) *Авторы:* Лутовинов А.А., Цыганков С.С., Кривонос Р.А., Мольков С.В.

2) *Название:* **Нейтронные звезды при низких темпах аккреции как естественные лаборатории для изучения взаимодействия плазмы со сверхсильными магнитными полями и определения структуры последних**

3) *Ссылки на публикации:*

- Lutovinov A., Tsygankov S., Krivonos R., Molkov S., Poutanen J. "Propeller Effect in the Transient X-Ray Pulsar SMC X-2", *The Astrophysical Journal*, Volume 834, Issue 2, article id. 209, 5 pp. (2017).

- Tsygankov S., Doroshenko V., Lutovinov A., Mushtukov A., Poutanen J. "SMC X-3: the closest ultraluminous X-ray source powered by a neutron star with non-dipole magnetic field", *Astronomy & Astrophysics*, Volume 605, id.A39, 8 pp. (2017).

- Tsygankov S., Wijnands R., Lutovinov A., Degenaar N., Poutanen J. "The X-ray properties of Be/X-ray pulsars in quiescence", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 470, Issue 1, p.126-141 (2017).

- Tsygankov S., Mushtukov A., Suleimanov V., Doroshenko V., Lutovinov A., Abolmasov P., Poutanen J. "Stable accretion from a cold disc in highly magnetized neutron stars", *Astronomy & Astrophysics*, accepted, arXiv:1703.04528.

4) *Общая формулировка научной проблемы и конкретная решаемая в работе задача:*

Цикл состоит из 4 статей, посвященных исследованию взаимодействия сильно- и слабо-ионизованного вещества со сверхсильными магнитными полями ( $10^{12} - 10^{14}$  Гс), существующими вблизи рентгеновских пульсаров и магнетаров.

В таких объектах взаимодействие магнитного поля с плазмой определяет все их временные и спектральные свойства и проявляется наиболее ярко при очень низких темпах аккреции, когда давления магнитного поля и аккрецируемого вещества начинают сравниваться. Одним из наиболее ярких примеров такого взаимодействия является т.н. "эффект пропеллера", связанный с внезапным прекращением аккреции из-за центробежного барьера, создаваемого быстровращающейся магнитосферой нейтронной звезды.

В частности, критическая светимость, при которой происходит переключение источника из режима аккретора в режим пропеллера, однозначно связана с периодом его вращения и напряженностью дипольной компоненты магнитного поля. Сравнение данной величины с напряженностью поля у поверхности нейтронной звезды может дать ограничения на структуру ее магнитного поля (например, наличие компонент выше дипольной).

Другой стороной задачи является понимание процессов взаимодействия вещества при разных степенях его ионизации с сильным магнитным полем, что опять же, возможно исследовать только вблизи нейтронных звезд.

5) *Используемый подход:*

Нами были предложены специальные программы длительных мониторинговых наблюдений транзиентных пульсаров при помощи высокочувствительных рентгеновских телескопов. Программы таких наблюдений были одобрены специальными комитетами по распределению наблюдательного времени рентгеновских обсерваторий Chandra и Swift (НАСА). Кроме того, нами также были использованы архивные данные обсерватории XMM-Newton. Совокупность данных этих обсерваторий представляет лучшее, что может в настоящий момент предложить экспериментальная астрофизика для решения поставленных задач. Кроме того, в работе были предложены оригинальные модели и теоретические интерпретации экспериментальных данных.

*б) Полученные результаты:*

В первых двух работах цикла были исследованы два транзиентных пульсара в Малом Магеллановом Облаке – SMC X-2 и SMC X-3. В первом случае был четко зарегистрирован переход в режим пропеллера на светимости  $4e36$  эрг/с, что соответствует напряженности дипольной компоненты магнитного поля около  $3e12$  Гс. Это значение согласуется с очень хорошей точностью с величиной, определяемой по положению циклотронной линии поглощения в спектре этого пульсара, образующейся в непосредственной близости от поверхности нейтронной звезды (НЗ). Этот факт говорит об отсутствии сильной квадрупольной компоненты магнитного поля НЗ в пульсаре SMC X-2 (Lutovinov et al., ApJ 834, 209, 2017).

Второй источник, SMC X-3, достигал рекордно высокой светимости для объектов данного класса – выше  $10^{39}$  эрг/с, что позволяет формально отнести его к классу т.н. ультраярких рентгеновских источников. В соответствии с современной моделью аккреционной колонки, для достижения такой светимости нейтронная звезда должна обладать сильным магнитным полем (не ниже  $10^{13}$  Гс). Это косвенно подтверждается отсутствием абсорбционной особенности в спектре пульсара в диапазоне энергий 3-80 кэВ. Проведенный мониторинг потока от источника показал, что он не переключается в режим пропеллера на светимостях вплоть до  $3e34$  эрг/с, что накладывает ограничения на напряженность дипольной компоненты магнитного поля сверху (ниже  $10^{12}$  Гс). Таким образом, впервые показано, что конфигурация магнитного поля нейтронной звезды в системе SMC X-3 имеет сильно недипольную структуру с квадрупольной компонентой, примерно в 10 раз сильнее дипольной (Tsygankov et al., A&A 605, A39, 2017).

В рамках проекта нами проводились мониторинговые наблюдения еще одного пульсара, GRO J1008-57, в конце мощной рентгеновской вспышки с целью регистрации эффекта пропеллера и в этой системе. Однако при светимости около  $1e35$  эрг/с дальнейшее быстрое уменьшение светимости прекратилось, и пульсар перешел в состояние квазистабильной аккреции. Интересно, что такое состояние противоречит базовой теории тепловой неустойчивости аккреционных дисков. Для объяснения данного факта нами была разработана модель стабильной аккреции из “холодного” (слабоионизованного) диска. В соответствии с предсказаниями модели, все рентгеновские пульсары могут быть разделены на два подкласса: с периодами ниже  $\sim 15$  с, переходящими в режим пропеллера, и на долгопериодические пульсары, где центробежный барьер не в состоянии выключить аккрецию до того, как аккреционный диск полностью перейдет в холодное состояние (Tsygankov et al., A&A, accepted, 2017).

Предсказания предложенной модели были проверены в последней работе цикла на выборке из 16 пульсаров с широким диапазоном свойств (периодов пульсаций и напряженностей магнитных полей). Наблюдения проводились обсерваториями Chandra, XMM-Newton и Swift вне ярких вспышек излучения. Было показано, что все источники могут быть разделены на две группы: относительно яркие со светимостью  $1e34$ - $1e35$  эрг/с и жесткими степенными спектрами и гораздо более слабые, демонстрирующие тепловые спектры (Tsygankov et al., MNRAS, 470, 126, 2017). Интересно, что в первую и вторую группы попали источники с периодами больше и меньше 20 с, соответственно. Именно такое поведение и было предсказано в нашей модели стабильной аккреции из холодного аккреционного диска.

*Общее заключение:* предложен метод определения структуры магнитного поля нейтронных звезд, основанный на раздельном определении напряженностей дипольной компоненты и поля в непосредственной близости от поверхности НЗ. Найдены объекты как с чисто дипольной конфигурацией поля, так и с более сложной, где квадрупольная компонента превышает дипольную в  $\sim 10$  раз. Открыт первый представитель замагниченной НЗ, аккрецирующей из холодного (слабоионизованного) диска. Предложена модель такого вида аккреции. Работоспособность модели и ее предсказания проверены и подтверждены на основе выборки из 16 объектов.