

Отчёт  
Лаборатории фундаментальной и прикладной  
рентгеновской астрофизики № 502

**Ограничения на массы и радиусы нейтронных звезд из рентгеновских наблюдений аккрецирующих миллисекундных пульсаров**

*Ю.И. Поутанен (лаборатория 502)*

В этой статье мы представили байесовский метод для получения ограничений на массу и радиус нейтронных звезд с использованием информации, закодированной в рентгеновском профиле импульса аккрецирующих миллисекундных пульсаров. Для моделирования формы импульсов использовалась аппроксимация «сплющенного Шварцшильда», которая учитывает деформированную форму звезды вместе с поправками специальной и общей теории относительности к траекториям фотонов и углов. Спектр излучения получен из эмпирической модели комптонизации в горячем слое. Используя метод Монте-Карло по схеме марковской цепи, мы получили распределения вероятностей для разных параметров модели, в том числе для массы и радиуса. Чтобы проверить надежность нашего метода, мы сначала проанализировали синтетические данные с известными параметрами модели. Аналогичный анализ был затем применен к наблюдениям пульсара SAX J1808.4–3658 рентгеновским телескопом Росси (RXTE). Результаты показывают, что наш метод может воспроизводить параметры модели синтетических данных и что точные ограничения радиуса могут быть получены с использованием RXTE наблюдений профиля импульса, если масса известна априори. Для массы в диапазоне  $1,5-1,8 M_{\odot}$  радиус нейтронной звезды в SAX J1808.4–3658 находится между 9 и 13 км. Если масса точно известна, радиус может быть определен с точностью 5%. Например, для массы  $1,7 M_{\odot}$  экваториальный радиус звезды равен  $11,9 \pm 0,5$  км. Точность может быть улучшена, когда появятся данные о поляризации рентгеновского излучения пульсаров полученные телескопом IXPE.

**Оригинальная статья:**

*T. Salmi, J. Nättilä, J. Poutanen, Bayesian parameter constraints for neutron star masses and radii using X-ray timing observations of accretion-powered millisecond pulsars, A&A, 618, A161 (2018), IF = 5.565, Q1 <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833348> (поддержана мегагрантом 14.W03.31.0021)*

**Атмосферы нейтронных звезд нагретых аккрецией во время рентгеновских всплесков**

*В.Ф. Сулейманов, Ю.И. Поутанен (лаборатория 502)*

Спектральная эволюция термоядерных рентгеновских всплесков на поверхностях нейтронных звезд в рентгеновских двойных системах во время жесткого состояния хорошо описывается моделью атмосферы пассивно охлаждающей нейтронной звезды, когда яркость всплеска достаточно высока. При падении яркости ниже критического значения 20-70% от максимальной яркости наблюдаемая эволюция отклоняется от предсказаний модели. Амплитуда отклонений и критической светимости коррелирует со светимостью объекта, что позволяет предположить, что эти отклонения вызваны дополнительным нагревом за счет аккреции. В работе приведен метод расчета атмосферы

нейтронной звезды, нагреваемой аккрецированными частицами, предполагая, что их энергия высвобождается при кулоновских взаимодействиях с электронами. Мы рассчитали температурные структуры и спектры атмосфер различных химсоставов и исследовали зависимость результатов от скорости падения частиц, их температуры и угла проникновения. Мы показали, что в нагретой атмосфере возникают две области: верхний горячий поверхностный слой с температурой 20-100 кэВ, охлаждающийся комптоновским рассеянием, и глубокий, почти изотермический оптически толстый слой с температурой в несколько кэВ. Возникающие спектры тоже имеют два компонента: чернотельный с температурой, близкой к температуре изотермической области, и жесткий комптонизированный спектр в виде степенного закона с экспоненциальным завалом. Их относительный вклад зависит от отношения скорости диссипации энергии аккрецированных частиц к внутреннему потоку с поверхности нейтронной звезды. Эти спектры сильно отличаются от производимых пассивно охлаждающейся нейтронной звездой, при этом основные отличия появляются в наличии высокоэнергетичного хвоста и сильного избытка в низкоэнергетической части спектра. Они также не имеют скачков поглощения из-за железа, которые видны в спектрах невозмущенных атмосфер низкой светимости с солнечным химическим составом. Используя рассчитанные спектры, мы получили зависимости коэффициента дилуции и цветовой поправки как функции относительных светимостей для атмосфер из гелия и солнечного содержания. Мы показали, что гелиевая атмосфера, нагретая аккрецией, соответствующей 5% эддингтоновской светимости, хорошо описывает поздние стадии рентгеновских всплесков в 4U 1820–30.

#### **Оригинальная статья:**

*V.F. Suleimanov, J. Poutanen, K. Werner, Accretion heated atmospheres of X-ray bursting neutron stars, A&A, 619, A114 (2018), IF = 5.565, Q1*

<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833581> (*поддержана мегагрантом 14.W03.31.0021*)

#### **Проявление скачка поглощения в рентгеновском всплеске с расширением радиуса фотосферы**

*В.Ф. Сулейманов, Ю.И. Поутанен (лаборатория 502)*

Термоядерные рентгеновские всплески на поверхности нейтронных звезд могут обогатить фотосферу металлами, которые могут проявиться в виде фотоионизационных скачков поглощения в спектрах всплесков. Мы обнаружили скачки поглощения в спектрах всплеска от рентгеновской двойной GRS 1747–312 в шаровом скоплении Терзан 6 во время наблюдений рентгеновским телескопом *Rosetta*. Мы обнаружили, что энергия скачка эволюционирует с  $9,45 \pm 0,51$  до  $\sim 6$  кэВ, а затем обратно до  $9,44 \pm 0,4$  кэВ во время фазы расширения радиуса фотосферы и остается на уровне  $8,06 \pm 0,6$  кэВ в хвосте охлаждения. Наблюдения могут быть объяснены как скачками поглощения водородоподобного никеля, железа, или их смеси, так и резонансными переходами в металлах. Отношение измеренной энергии скачка поглощения в хвосте охлаждения к лабораторному значению скачка водородоподобного никеля (железа) позволяет оценить гравитационное красное смещение  $1+z_{\text{eff}} = 1.34 \pm 0.11$  ( $1,15 \pm 0,09$ ). Эволюция спектральных параметров в хвосте охлаждения всплеска хорошо описывается моделями атмосфер, богатыми металлами. Ограничения на массу и радиус нейтронных звезд, полученные методом хвоста охлаждения и используя значения приливной деформируемости, указывают на высокое

атмосферное обилие элементов железной группы и ограничивают расстояние до источника до  $11 \pm 1$  кпк.

#### **Оригинальная статья:**

*Z. Li, V.F. Suleimanov, J. Poutanen, T. Salmi, M. Falanga, J. Nättilä, R. Xu*, Evidence for the photoionization absorption edge in a photospheric radius expansion X-ray burst from GRS 1747–312 in Terzan 6, *ApJ*, 866, 53 (2018), IF = 5.551, Q1

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aade8e> (поддержана мегагрантом 14.W03.31.0021)

#### **Геометрия горячей среды при аккреции на черную дыру в рентгеновской двойной системе**

*Ю.И. Поутанен, А.В. Веледина (лаборатория 502)*

Мы изучали эффекты взаимодействия горячей плазмы и холодной среды в аккрецирующих черных дырах в их жестком спектральном состоянии. Мы рассмотрели ряд различных геометрий. В отличие от предыдущих теоретических исследований, мы использовали современный код для расчетов отражения и переработки излучения в холодной среде. Мы показали, что статическая корона над аккреционным диском производит спектры несовместимые с наблюдениями. Они либо слишком мягкие, либо требуют намного большей ионизации диска, чем наблюдается. Этот вывод подтверждает ряд предыдущих результатов, но опровергает недавнее исследование, в котором утверждается согласие этой модели с наблюдениями. Мы показали, что холодный диск должен быть усечен, чтобы получить наблюдаемую спектральную жесткость. Однако холодный диск, усеченный на большом радиусе и замененный на горячий поток, создает спектры, которые являются слишком жесткими, если единственным источником фотонов для комптонизации является аккреционный диск. Наша предпочтительная геометрия – это усеченный диск, сосуществующий с горячей плазмой, либо перекрывающейся с диском, либо содержащей холодную материю, а также мягкие фотоны, возникающие в результате синхротронного излучения гибридных электронов, содержащих как тепловую, так и нетепловую части.

#### **Оригинальная статья:**

*J. Poutanen, A. Veledina, A.A. Zdziarski*, Doughnut strikes sandwich: the geometry of hot medium in accreting black hole X-ray binaries, *A&A*, 614, A79 (2018), IF = 5.565, Q1

<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732345> (поддержана мегагрантом 14.W03.31.0021)

#### **Определение периода сверхгорба (суперхампа) в рентгеновской двойной системе в черной дырой GX 339–4**

*А.В. Веледина (лаборатория 502)*

Мы исследовали изменение оптического и ближнего инфракрасного потока рентгеновской двойной GX 339–4 на временах порядка дня. Мы использовали данные в четырех фильтрах из шести интервалов, соответствующих мягкому состоянию рентгеновского

источника, и от четырех интервалов, соответствующих спокойному состоянию. В мягком состоянии мы находим заметные колебания со средним периодом  $P = 1,772 \pm 0,003$  дня, что отличается от измеренного орбитальным периодом системы на 0,7 процента. Мы предполагаем, что измеренная периодичность берет начало от суперхампов. В согласии с этой интерпретацией мы не находим периодичности в спокойном состоянии. Полученный избыточный период ниже типичных значений, найденных у катаклизмических переменных с тем же отношением масс компаньонов.

**Оригинальная статья:**

*I.A. Kosenkov, A. Veledina, Superhump period of the black hole X-ray binary GX 339–4, MNRAS, 478, 4710 (2018), IF = 5.194, Q1 <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1142> (поддержана мегагрантом 14.W03.31.0021)*

**Проявление взаимодействия спектральных компонент во временных характеристиках аккрецирующих компактных объектов**

*A.V. Веледина (лаборатория 502)*

Считается, что рентгеновая переменность аккрецирующих черных дыр обусловлена флуктуациями, распространяющимися в сторону компактного объекта. Наблюдения показывают, что кривые блеска в разных энергетических полосах связаны, но флуктуации в жестком диапазоне опаздывают относительно мягкого. В стандартной интерпретации это объясняется зависимостью спектра от расстояния, где более жесткие спектры производятся ближе к черной дыре. В последнее время был выявлен ряд проблем, связанных с этим сценарием, как на качественном, так и на количественном уровне. Эта модель не объясняет большую наблюдаемую задержку между различными энергиями, а также зависимость амплитуды переменности от спектрального диапазона. Мы показали, что одновременное присутствие двух спектральных компонент приводит к сложной форме спектров мощности и фазовых задержек между рентгеновскими полосами: амплитуда фазовой задержки становится независимой от задержки между компонентами, а спектры мощности показывают искусственное уменьшение или, наоборот, усиление на низких частотах Фурье. Это оказывает существенную поддержку модели распространения флуктуаций.

**Оригинальная статья:**

*A.Veledina, Interplay of spectral components in timing properties of accreting compact objects, MNRAS, 481, 4236 (2018), IF = 5.194, Q1 <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2556> (поддержана мегагрантом 14.W03.31.0021)*

**Обнаружение рентгеновского излучения от старого пульсара PSR J1154–6250**

*С.С. Цыганков, А.А. Муштуков (лаборатория 502)*

В работе представлены результаты исследования изолированного радиопулсара PSR J1154–6250 с периодом пульсаций 0.28 с, выполненного с помощью наблюдений орбитальной обсерватории ХММ-Ньютон в 2018 году, в которых впервые обнаружено рентгеновское излучение от источника. Энергетический спектр источника можно

одинаково хорошо описать либо моделью поглощенного степенного закона с фотонным индексом  $\Gamma \approx 3.3$ , либо моделью поглощенного черного тела с температурой  $kT = 0.21 \pm 0.04$  кэВ и радиусом излучения  $R_{\text{ВВ}} \approx 80$  м (при условии расстояния до пульсара 1.36 кпк). Рентгеновская светимость пульсара  $4.4 \times 10^{30}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , полученная для степенной аппроксимации спектра, соответствует эффективности  $\eta_{\text{X}} = L_{\text{Xunabs}}/\dot{E} = 4.5 \times 10^{-3}$ , аналогичной другим старым пульсарам. Таким образом в работе показано, что рентгеновские свойства PSR J1154–6250 соответствуют его оценочному возрасту 8 миллионов лет, что в свою очередь свидетельствует о случайном пространственном совпадении этого пульсара с ОВ-ассоциацией Cru OB1.

**Оригинальная статья:**

*A.P. Igoshev, S.S. Tsygankov, M. Rigoselli, S. Mereghetti, S.B. Popov, J.G. Elfritz, A.A. Mushtukov, Discovery of X-rays from the old and faint pulsar J1154–6250, ApJ, 865, 116 (2018), IF = 5.551, Q1 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aadd93> (поддержана мегагрантом 14.W03.31.0021)*

## **Приглашенные доклады:**

А.В. Веледина:

29 октября - 2 ноября 2018, Looking at the disc-jet coupling from different angles, Bern, Switzerland  
<http://www.issibern.ch/teams/discjetcoupling/index.php/meeting-1-schedule/>

The challenge of transitional millisecond pulsars, Рим, Италия, 21-23 марта 2018,  
<https://tmspchallenge.wordpress.com/invited/>

А.А. Муштуков

The challenge of transitional millisecond pulsars, Рим, Италия, 21-23 марта 2018,  
<https://tmspchallenge.wordpress.com/invited/>

Ultra-luminous X-ray pulsars, ESAC, Мадрид, Испания, 6-8 июня 2018

<https://www.cosmos.esa.int/web/ulx-pulsars-workshop>

COSPAR-2018-E1.13, The extreme physics of Eddington and super Eddington accretion onto compact objects: simulations meet observations, Pasadena, USA, 14-22 июля 2018

<https://www.cospas-assembly.org/abstractcd/COSPAR-18/>

Ю. Поутанен

The challenge of transitional millisecond pulsars, Рим, Италия, 21-23 марта 2018,  
<https://tmspchallenge.wordpress.com/invited/>

Fire and ice: Hot QCD meets cold and dense matter, Saariselkä, Финляндия, 3-7 апреля 2018

<http://www.helsinki.fi/~arjvuori/workshop.html>

The radio and X-ray connection in accreting objects, Монполи, Италия, 21-25 мая 2018

<https://xrayradiomay2018.wixsite.com/xray-radio-may2018>

Ultra-luminous X-ray pulsars, ESAC, Мадрид, Испания, 6-8 июня 2018

<https://www.cosmos.esa.int/web/ulx-pulsars-workshop>

Search and photometry of optical transient sources in the era of LIGO/Virgo - 2018, Таруса, Россия, 25-29 июня 2018

<https://sites.google.com/site/phototarusa2018/program>

В.Ф. Сулейманов

Звезды, планеты и их магнитные поля, Санкт-Петербург, 17-21 сентября 2018

<https://events.spbu.ru/events/stars-2018>

Fire and ice: Hot QCD meets cold and dense matter, Saariselkä, Финляндия, 3-7 апреля 2018

<http://www.helsinki.fi/~arjvuori/workshop.html>

С.С. Цыганков

Звезды, планеты и их магнитные поля, Санкт-Петербург, 17-21 сентября 2018

<https://events.spbu.ru/events/stars-2018>

Time for accretion, Sigtuna, Sweden, 6-10 августа 2018

<https://ttt.astro.su.se/groups/head/accretion18/program.html>

*3) Список грантов которые есть в отделе*

*Мегагрант Министерства науки и высшего образования 14.W03.31.0021*