

## Заявка на конкурс научных работ ИКИ

1. *Авторы:* Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Муштуков А.А., Поутанен Ю., Дорошенко В., Сулейманов В.Ф., Мольков С.В.
2. Цикл работ «Открытие циклотронного излучения от аккрецирующих сильно-замагниченных нейтронных звезд»

### 3. Ссылки на публикации

- [1] **Tsygankov S.S., Rouco Escorial A., Suleimanov V.F., Mushtukov A.A., Doroshenko V., Lutovinov A.A., Wijnands R., Poutanen J.** “*Dramatic spectral transition of X-ray pulsar GX 304–1 in low luminous state*”, MNRAS Letters (2019) 483, L144–L148 (IF=5.356)  
<https://doi.org/10.1093/mnrasl/sly236>
- [2] **Tsygankov Sergey S., Doroshenko Victor, Mushtukov Alexander A., Suleimanov Valery F., Lutovinov Alexander A., Poutanen Juri** “*Cyclotron emission, absorption, and the two faces of X-ray pulsar A0535+262*”, MNRAS Letters (2019) 487, L30–L34 (IF=5.356)  
<https://doi.org/10.1093/mnrasl/slz079>
- [3] **Mushtukov Alexander A., Suleimanov Valery F., Tsygankov Sergey S., Portegies Zwart Simon** “*Spectrum formation in X-ray pulsars at very low mass accretion rate: Monte Carlo approach*”, MNRAS (2021) 503, 5193–5203 (IF=5.356)  
<https://doi.org/10.1093/mnras/stab811>
- [4] **Lutovinov A., Tsygankov S., Molkov S., Doroshenko V., Mushtukov A., Arefiev V., Lapshov I., Tkachenko A., Pavlinsky M.** “*SRG/ART-XC and NuSTAR Observations of the X-Ray pulsar GRO J1008-57 in the Lowest Luminosity State*”, ApJ (2021) 912, 1, id17 (IF=5.356)  
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/abec43>
- [5] **Tsygankov Sergey S., Molkov Sergey V., Doroshenko Victor, Mushtukov Alexander A., Mereminskiy Ilya A., Semena Andrei N., Thalhammer Philipp, Wilms Joern, Lutovinov Alexander A.** “*SRG/ART-XC, Swift, NICER and NuSTAR study of different states of the transient X-ray pulsar MAXI J0903-531*”, принята к печати в A&A (2021) (IF=5.636)  
<https://arxiv.org/abs/2108.06365>

### 4. Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Наблюдения сильнозамагниченных нейтронных звезд (НЗ) в двойных системах – рентгеновских пульсаров – дают уникальную информацию о физических процессах, протекающих в экстремальных условиях сильной гравитации, ультравысоких плотностей материи и радиационного излучения, сверхсильных магнитных полей, которые не доступны в земных лабораториях. Магнитные поля НЗ в таких системах достигают напряженностей  $10^{12}$ – $10^{14}$  Гс, что превосходит значения, получаемые в земных условиях, как минимум, на 6 порядков величины. Таким образом, рентгеновские пульсары представляют собой практически идеальные исследовательские лаборатории по изучению и построению теории взаимодействия магнитного поля с плазмой.

Одной из нерешенных проблем в физике рентгеновских пульсаров, является собственно механизмы рентгеновского излучения в этих объектах. Вклад в излучение могут давать как свободно-свободное излучение плазмы и циклотронное излучение электронов в сильном магнитном поле, так и их комптоновское рассеяние. Определение вкладов этих механизмов и является первоочередной задачей.

5. *Конкретная решаемая в работе задача и ее значение*

На больших светимостях пульсаров разделение широкополосного спектра на отдельные компоненты почти невозможно из-за его гладкости и вырождения параметров. На низких же светимостях до сих пор не удавалось получить спектры достаточного качества из-за слабой чувствительности рентгеновских телескопов. С появлением рентгеновских телескопов последнего поколения (*XMM-Newton*, *Chandra*, *Swift*, *NuSTAR*, *CPT*) появилась возможность детального изучения спектров пульсаров на низких светимостях с целью определения механизмов излучения. При этом обсерватория *NuSTAR* впервые позволила проводить такие исследования в широком диапазоне энергий вплоть до 80 кэВ, т.е. полностью покрыть энергетический спектр классических рентгеновских пульсаров.

6. *Используемый подход, его новизна и оригинальность*

Для исследования рентгеновских пульсаров мы осуществляли их мониторинг на протяжении месяцев в широком диапазоне светимостей с помощью обсерватории *Swift*. Используя результаты данного мониторинга, мы смогли спланировать и осуществить уникальные наблюдения нескольких рентгеновских пульсаров, обладающих широким диапазоном физических параметров (периодов пульсаций и напряженностей магнитных полей), на светимостях, ранее недоступных для наблюдений. Высокая чувствительность космических обсерваторий *XMM-Newton*, *Chandra*, *NuSTAR* и *CPT* позволили провести детальное исследование спектров пульсаров на малых светимостях, ниже  $10^{35}$  эрг/с. Впервые такая работа выполнена не только для энергетического диапазона ниже 10 кэВ, а сделана для полного диапазона вплоть до 80 кэВ.

7. *Полученные результаты и их значимость*

Используя данный подход нам впервые удалось обнаружить, что энергетические спектры некоторых пульсаров (*GX 304-1*, *A 0535+262*, *GRO J1008-57*) при низких светимостях (несколько  $10^{34}$ - $10^{35}$  эрг/с) перестают выглядеть как классические спектры рентгеновских пульсаров (степенной закон с завалом на высоких энергиях), а состоят из двух разделенных эмиссионных компонент с максимумами примерно на 5 и 40 кэВ. Наблюдаемая форма спектра была объяснена нами циклотронным излучением в атмосфере нейтронной звезды, возникающим в результате столкновительного возбуждения электронов на верхние уровни Ландау, и их дальнейшей рекомбинацией и комптонизацией фотонов перегретым электронным газом в тонком верхнем слое атмосферы. Важно отметить, что при высоких светимостях разделение спектра на компоненты почти невозможно из-за его гладкости и вырождения параметров используемых моделей.

Таким образом, впервые с момента открытия рентгеновских пульсаров были обнаружены отклонения формы спектра этих объектов от классического феноменологического «степенного закона с завалом на высоких энергиях» к двухкомпонентной модели при переходе к низким темпам аккреции. Наблюдаемые изменения спектров дают нам возможность не только оценить магнитное поле на самой поверхности нейтронной звезды, но и ставит сильные ограничения на механизмы излучения.