

ЛИЦЕЙ «ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ШКОЛА»  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО АКАДЕМИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

ОТЧЕТ ПО ПРАКТИКЕ

---

# Анализ активности аккрецирующих рентгеновских пульсаров и черных дыр

---

*Работу выполнил:*

Киселев Владимир

*Научный руководитель:*

Свинкин Дмитрий Сергеевич

*Место прохождения практики:*

Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе  
лаборатория экспериментальной астрофизики

Октябрь, 2018  
Санкт-Петербург



## **Аннотация**

Суть работы заключается в анализе данных наблюдений рентгеновских пульсаров и кандидатами в черные дыры с космических аппаратов, дальнейшее определение параметров таких особенностей компактных объектов, как квазипериодические осцилляции и их эволюция со временем.

## **Оглавление**

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1 Методика</b>	<b>5</b>
<b>2 Математические методы</b>	<b>6</b>
2.1 Спектр мощности сигнала . . . . .	6
<b>3 Инструменты</b>	<b>6</b>
<b>Результаты</b>	<b>8</b>
<b>Список литературы</b>	<b>9</b>

## Список таблиц

## Список иллюстраций

1	Устройство (а) спутника <i>GGS-Wind</i> и (б) самого прибора . . . . .	7
2	Устройство прибора (а) BAT и (б) IBIS, частью которого является ISGRI . .	7
3	Сравнение счета фотонов у Конус-Винд с (а) INTEGRAL или (б) BAT . . .	8

# Введение

Согласно исследованию 2006 года около 30 процентов звезд, принадлежащих нашей Галактике, находятся в составе, так называемых кратных систем, конкретнее двойных [1]. Двойная система представляет собой две звезды, вращающиеся вокруг общего центра масс, причем необязательно звезды по массам (и соответственно являются одинаковыми). Хорошим и известным всем примером двойной системы является система Сириус, состоящая из белого карлика (Сириус В) и звезды главной последовательности Сириуса А. В двойной системе более массивная звезда эволюционирует быстрее и, в конечном счете, превращается в компактный объект, как например белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра. Когда менее массивная звезда доходит до стадии расширения, в случае, если она находится достаточно близко к компактной звезде, ее внешние слои начинают перетекать на компактный компонент. Газ перетекает в аккреционный диск вокруг компактного компаньона, вращается, нагревается и в конце концов падает на компактную звезду. Кинетическая энергия аккрецируемого вещества переходит в энергию излучения (при этом максимум интенсивности приходится на рентгеновский и мягкий гамма-диапазон). Изучение этого излучения может помочь понять свойства аккрецирующих объектов и механизмы генерации излучения.

В реальности отличить жесткое рентгеновское и мягкое гамма-излучения трудно, поскольку конкретной границы между ними нет, ведь они оба являются формами ионизирующего излучения (т.е. фотоны этих двух типов настолько высоко энергичны, что способны ионизировать атомы), но принято считать, что рентгеновское излучение имеет внеядерное происхождение, тогда как гамма — результат изменения состояния ядер (будь-то их распад или слияние). Примерные границы рентгеновского и гамма-излучения:  $1 - 10^{-4}$  нм.

Нейтронные звезды быстро вращаются при возникновении (всё-таки звезда по размерам уменьшается в тысячи раз по сравнению с уменьшением массы), но со временем они замедляются, поскольку излучают, ускоряют заряженные частицы и теряют часть своей энергии. Скорость вращения нейтронной звезды в итоге снижается настолько, что веществу ничего не препятствует падать на такую нейтронную звезду. Падая, вещество, уже будучи в состоянии плазмы, движется по линиям магнитного поля и ударяется о поверхность нейтронной звезды в районе её полюсов, разогреваясь до десятков миллионов градусов. Вещество, нагретое до столь высоких температур, ярко светится в рентгеновском диапазоне. Область, в которой происходит столкновение падающего вещества с поверхностью тела нейтронной звезды, очень мала — всего около 100 метров. Это горячее пятно из-за вращения звезды периодически пропадает из вида, поэтому наблюдаются регулярные пульсации рентген-излучения. Такие объекты и называются рентгеновскими пульсарами.

В космосе существуют тесные двойные системы, состоящие из компактного объекта (черной дыры или нейтронной звезды) и звезды-компаньона. Они могут быть источниками пульсирующего рентгеновского и мягкого гамма-излучения, которое может быть зарегистрировано различными космическими приборами (INTEGRAL, Swift/BAT, Konus-Wind и другие).

Тесные двойные системы играют ключевую роль в понимании процессов аккреции и выбросов с компактных объектов в присутствии сильного магнитного и гравитационно-

го поля, поэтому их изучение может помочь понять свойства аккрецирующих объектов и механизмы генерации излучения. Одним из представителей тесной двойной системы является кандидат в черную дыру MAXI J1820+070.

Кандидат в черную дыру MAXI J1820+070 был впервые зарегистрирован 11 марта 2018 года с помощью прибора MAXI и был отождествлен с оптическим объектом ASASSN-18eu. Интенсивность источника достигла 3 Crab и её видимая звездная величина достигла значения  $m_V = 12 - 13$ . Столь яркое событие позволило наблюдать источник в различных диапазонах волн и различными космическими и наземными обсерваториями [2].

Квазипериодические колебания были в открыты в начале 80-х годах у нескольких маломассивных рентгеновских двойных. В отличие от периодического излучения, излучение этих объектов менялось в каких-то пределах: существенная часть излучения испытывала «квазиколебания» с «квазипериодом» от  $\sim 0.1$  до  $\sim 0.01$  Гц. Было предположено, что такие неустойчивые явления происходят при аккреции на нейтронные звезды, что хорошо согласовывалось с теоретическими моделями, но при дальнейшем изучении QPO были найдены и у кандидатов в черные дыры.

## Научная новизна

### 1 Методика

Суть работы заключается в анализе данных наблюдения за рентгеновскими пульсарами и кандидатами в черные дыры с космических аппаратов, дальнейшее определение параметров таких особенностей компактных объектов, как квазипериодические осцилляции и их эволюция со временем.

Методика состоит в поиске значимых гармоник в данных с прибора и сопоставление их с известными источниками данные к которым приведены, например в статье Ларса Бильдстена «Observation of Accreting Pulsars» (в ней представлены характеристики аккрецирующих пульсаров на момент 1997 года). Для MAXI J1820+070 предполагается анализ квазипериодических осцилляции, регистрируемых как широкая линия в спектре мощности.

Данные наблюдения взяты с трех приборов: Konus-Wind, INTEGRAL/ISGRI и Swift/BAT. Данные представляют собой несколько массивов чисел, означающих сколько фотонов было считано прибором за единицу времени. Каждый массив отличается друг от друга диапазоном энергий принимаемых фотонов.

Чтобы получить частоту квази-периодических колебаний, график зависимости приходящих фотонов в единицу времени с помощью преобразования Фурье преобразовывался в график спектра мощности сигнала от частоты, из которого дальше можно узнать требуемые параметры.

## 2 Математические методы

### 2.1 Спектр мощности сигнала

Большую часть процессов переменности яркости астрономических объектов трудно описать, поскольку процесс является стохастическим. Переменность является «суммой» отдельно взятых процессов, количество которых может быть довольно велико. (можно представить аналогию с газом, где малые колебания поршня являются суммарным действием молекул газа, которые двигаются по определенным законам, но молекул настолько много, что процесс нельзя описать, отдельно учитывая каждую молекулу).

Поскольку в стохастических процессах сигнал невозможно учесть все летали кривой переменности яркости, то модель стохастического процесса должна описывать общие свойства сигнала. Чтобы иметь возможность строить такие модели и сравнивать их с наблюдениями, общие свойства сигнала не должны зависеть от времени, т.е. стохастический процесс, формирующий сигнал, должен быть так же и стационарным.

Ряды Фурье или преобразование Фурье позволяет выделить определяющие свойства сигнала и тем самым провести анализ временной переменности яркости астрономических объектов.

[3]

## 3 Инструменты

Конус — гамма-спектрометр, установленный на космический аппарат *GGS-Wind*. Конус-Винд состоит из двух одинаковых NaI(Tl) сцинтилляционных гамма-спектрометров (S1 и S2), расположенных на противоположных сторонах космического аппарата, что обеспечивает обзор всей небесной сферы. Каждый детектор состоит из кристалла NaI(Tl), который просматривается фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) через свинцовое стекло, нужное для снижения фонового излучения от космического аппарата. Попадая в детектор, гамма-квант передаёт часть или всю свою энергию веществу сцинтиллятора, которая преобразуется в световую вспышку, регистрируемую ФЭУ. Заряд, собранный с анода ФЭУ, преобразуется в импульс напряжения, который усиливается и формируется для получения максимального отношения сигнал-шум, после чего амплитуда импульса измеряется аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Схематический вид прибора и аппарата представлен на рис. 1 [4]. Прибором ведется запись в 4 энергетических каналах: G1 (13 – 50 кэВ), G2 (50 – 200 кэВ), G3 (200 – 760 кэВ) и Z (>10 МэВ) [5].

BAT — один из инструментов орбитальной обсерватории SWIFT, представляющий из себя телескоп с кодирующей маской. Кодирующая апертура является одним из способов построения изображения источника в жестком рентгеновском и мягком гамма диапазоне без использования системы линз и зеркал. Метод широко применяется в гамма- и рентген-астрономии, в том числе и в INTEGRAL/ISGRI. Линзы и зеркала в астрономии высоких энергий не используются, поскольку при попадании на линзу они почти не преломляются и либо проходят насквозь стекло, либо поглощаются материалом. Сигнал регистрирует массив CdZnTe-детекторов, половина которых закрывается маской. В отличие от Konus-Wind, его поле зрения меньше и равняется 1.4 стерадиана. На рис. 2а можно увидеть

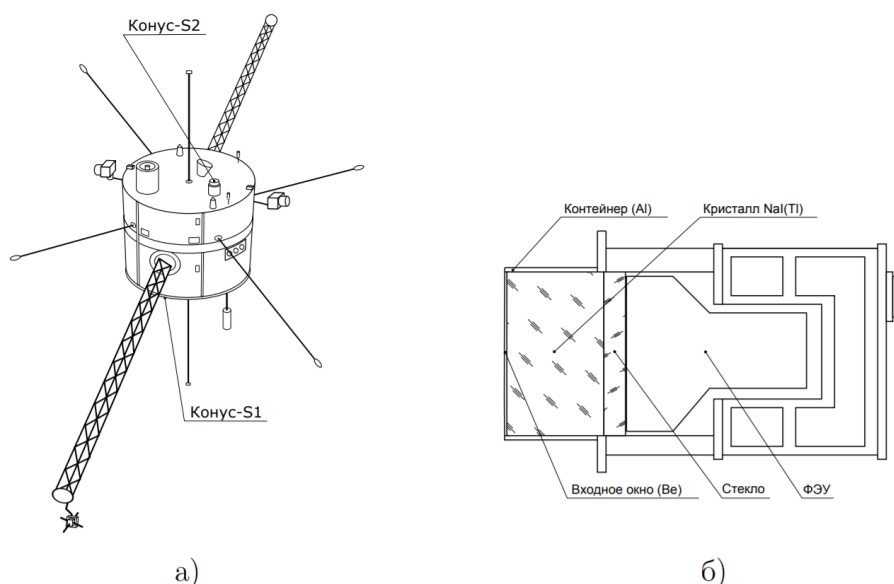


Рис. 1: Устройство (а) спутника *GGS-Wind* и (б) самого прибора

схематическое представление прибора.

CdZnTe-детекторы также, как и CdZn являются полупроводниковыми детекторами, широко используемые в астрономии высоких энергий. Полупроводниковые детекторы представляют собой полупроводниковый кристалл и работает аналогично ионизационной камере. Главное их отличие состоит в том, что в камере используется газ, который является менее плотным, чем кристалл, что делает камеру менее чувствительной. Полупроводниковый детектор представляет собой полупроводниковый диод, на который подается какое-то обратное напряжение. Заряженная частица, попадая в область, находящуюся рядом с границей р-п перехода, создает электроно-дырочные пары, которые под воздействием электрического поля продвигаются к электродам полупроводникового детектора. В результате в цепи образуется какой-то электрический импульс, который можно измерить и узнать энергию, прилетевшей частицы.

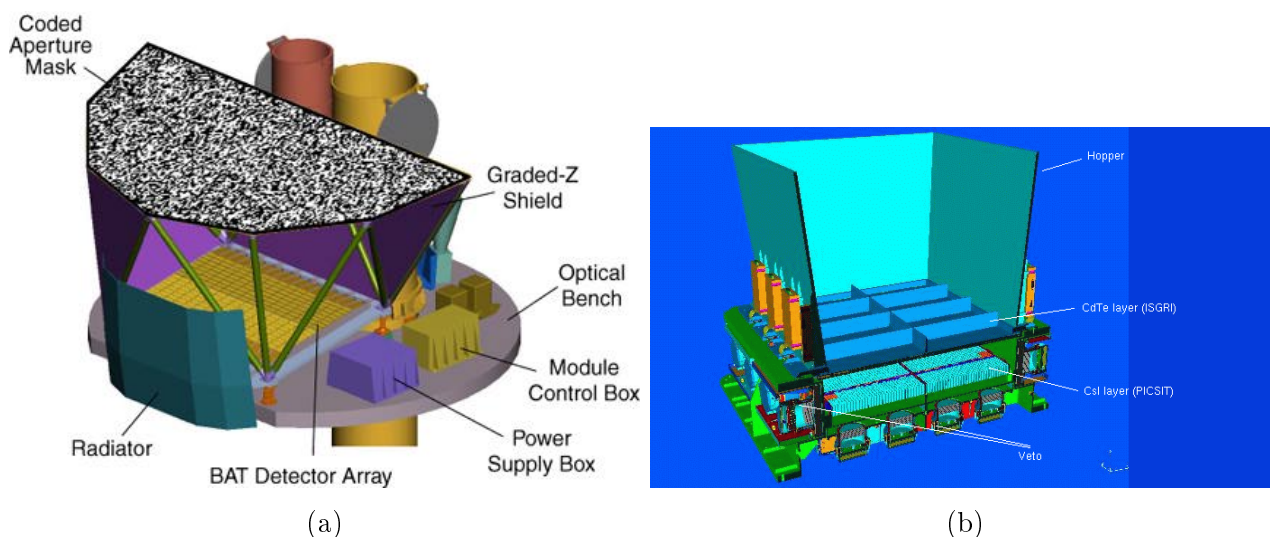


Рис. 2: Устройство прибора (а) BAT и (б) IBIS, частью которого является ISGRI



INTEGRAL аналогичен BAT, но его инструмент ISGRI импользует CdTe-детекторы и его поле зрения равно 0.26 стерадиан. На рис. 2b представлено его схематическое строение.

## Результаты

На данный момент сделана программа для анализа периодических сигналов, поиска значимых гармоник и их аппроксимация для дальнейшего нахождения пика QPO. Также сравнены данные по MAXI J1820+070, полученные с инструментов Konus-Wind, Swift/BAT, INTEGRAL/ISGRI, что можно увидеть ниже. Интересно то, что, несмотря на одинаковый спектр одинаковых фотонов у ISGRI и Konus-Wind, счет фотонов после пика у них разный. В конце работы будут получены зависимости амплитуды и частоты пульсирующей компоненты сигнала от времени для Vela-X1, GX301-2, A0535+262, SWIFT J0243.6+6124 и эволюция параметров QPO для MAXI1820+070.

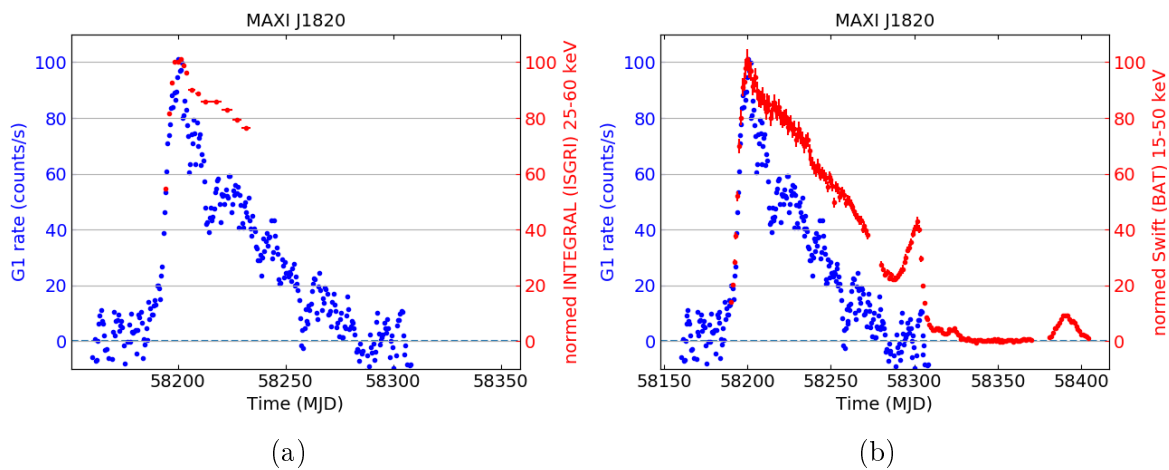


Рис. 3: Сравнение счета фотонов у Конус-Винд с (a) INTEGRAL или (b) BAT

## Список литературы

- [1] Lada Charles J. Stellar Multiplicity and the IMF: Most Stars Are Single // Astrophys.J. 640 (2006) L63-L66.
- [2] Veledina A. Evolving optical polarization of the black hole X-ray binary MAXI J1820+070 // Astronomy & Astrophysics. 2018.
- [3] van der Klis M. Fourier techniques in X-ray timing // NATO Advanced Study Institutes Series. Series C, Mathematical and Physical Sciences. 1988.
- [4] Свинкин Д. С. Наблюдения коротких гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд. Ph.D. thesis: Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Физико-Технический Институт им. А. Ф. Иоффе Российской Академии Наук. 2016.
- [5] Aptekar R. L. Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft. 1993.