

## Аннотация

В работе представлен анализ наблюдений жесткого рентгеновского источника MAXI J1820+070 по данным эксперимента *Konus-Wind* в период с марта по июнь 2018 года. В результате проанализирован спектр мощности и кривая блеска источника, и получена зависимость частоты квазипериодических колебаний от времени.

## Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Методика</b>	<b>5</b>
<b>2 Математические методы</b>	<b>5</b>
2.1 Спектр мощности сигнала . . . . .	5
2.2 Метод наибольшего правдоподобия . . . . .	7
<b>3 Инструменты</b>	<b>7</b>
<b>Результаты</b>	<b>9</b>
<b>4 Интерпретация результатов</b>	<b>9</b>
<b>Список литературы</b>	<b>12</b>

## Список иллюстраций

1	Область неба, в которой был обнаружен MAXI J1820+070 в диапазоне от 2 до 20 кэВ (а) и диапазоне от 2 до 4 кэВ (b) . . . . .	4
2	Спектр мощности тестового сигнала с частотой 0,75 Гц. Синим обозначено среднее значение шума. Красным обозначен сигнал с вероятностью $5\sigma$ , а зеленый с вероятностью $3\sigma$ . . . . .	6
3	Устройство (а) спутника <i>GGS-Wind</i> и (б) самого прибора . . . . .	8
4	Устройство прибора (а) BAT и (б) IBIS, частью которого является ISGRI . .	8
5	Сравнение счета фотонов у Конус-Винд с (а) INTEGRAL или (b) BAT . . .	9
6	Типичная диаграмма твердости-интенсивности для черной дыры. Кривая поделена на пять спектральных состояний, также отмечено в каком состоянии проявляются какие QPO . . . . .	10
7	Спектр мощности излучения от черной дыры на 41 день. Хорошо виден пик на частоте 0,032 Гц . . . . .	11

# 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 по размерам) 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.

Граница между жестким рентгеновским и мягким гамма-излучением весьма условна. Оба вида излучения 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 излучения — 0,1 — 300 КэВ, а гамма-излучения больше, чем 300 КэВ.

Нейтронные звезды — звезды с очень малыми размерами (20-30 км в диаметре). Считается, что нейтронные звезды появляются в результате взрывов сверхновых. При взрыве происходит стремительный коллапс ядра нормальной звезды, которое затем и превращается в нейтронную звезду. Во время сжатия в силу закона сохранения момента импульса, а также сохранения магнитного потока происходит резкое увеличение скорости вращения и магнитного поля звезды. Высокая скорость вращения нейтронной звезды (она может достигать частоты около 100 оборотов в секунду) и чрезвычайно высокие магнитные поля ( $10^{12} - 10^{13}$  Гс) являются основными условиями возникновения феномена рентгеновского пульсара. Хотя в начале нейтронные звезды в начале быстро вращаются, со временем они замедляются, поскольку излучают, ускоряют заряженные частицы и в следствие чего 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 аккрецирующими рентгеновскими пульсарами.

В черных дырах также возможны рентгеновские пульсации, хотя в них излучает сам аккреционный диск, разогретый до высоких температур. Разогрет он по причине того, что сама черная дыра является еще более компактным объектом по сравнению с нейтронной звездой, что делает аккреционный диск более плотным, а плазму более горячей, за счет столкновений.

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 гравитационного 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]. На рис. 1 представлена вспышка, которую зафиксировал прибор MAXI/GSC 10 марта 2018 года [3].

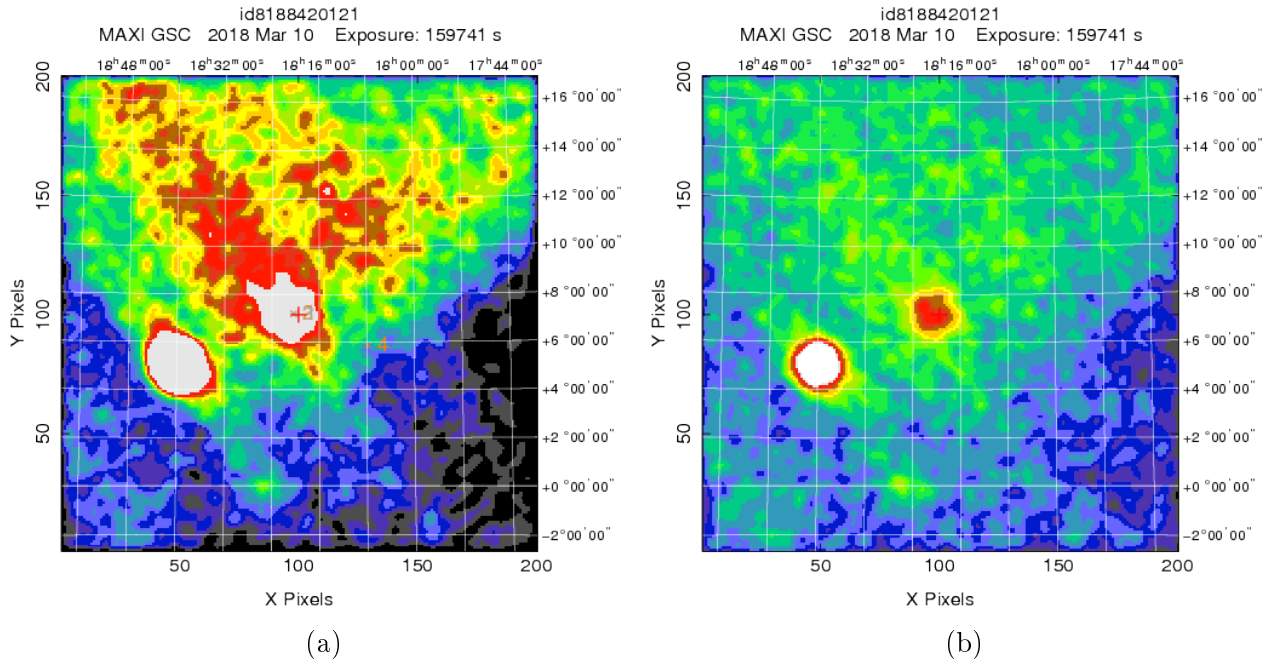


Рис. 1: Область неба, в которой был обнаружен MAXI J1820+070 в диапазоне от 2 до 20 кэВ (a) и диапазоне от 2 до 4 кэВ (b)

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

В данной работе впервые произведен анализ излучения от аккрецирующей черной дыры (т.е. анализ ее спектра мощности и кривой блеска) по данным непрерывных наблюдений в течение порядка 190 дней в диапазоне энергий от  $\sim 13$  кэВ вплоть до  $\sim 300$  кэВ.

## 1 Методика

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

Данные наблюдения взяты с трех приборов: Konus-Wind, INTEGRAL/ISGRI и Swift/BAT. Они представляют собой несколько массивов чисел, означающих количество считанных фотонов за единицу времени на разных энергетических диапазонах.

Для анализа квазипериодических осцилляций используется спектр мощности сигнала, полученный из временных историй скоростей счёта гамма-квантов преобразованием Фурье, о котором написано ниже.

При анализе кандидата в черную дыру временная история разбивается на равные части определенной длительности (в нашем случае — 1 день). Для каждого участка строится его спектр мощности, который затем аппроксимируется степенной функцией вида  $f^{-1}$  и распределением Гаусса при помощи так называемого метода наибольшего правдоподобия. В результате выполнения программы находится частота квазипериодических колебаний.

Полученные значения частот далее сравниваются с характерными частотами осцилляций черных дыр из статьи С. Е. Мотта [4] для определения состояния объекта.

## 2 Математические методы

### 2.1 Спектр мощности сигнала

Преобразованием Фурье функции  $f(x)$  называется функция  $\hat{f}(\omega)$ :

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-2\pi i x \omega} dx \quad (1)$$

Поскольку в реальности сигнал является ограниченным во времени, а также дискретным (т.е. сигнал является набором точек), то вместо преобразования Фурье используется дискретное преобразование Фурье, которое записывается в таком виде:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{2\pi i}{N}kn}, \text{ где} \quad (2)$$

$x_n$  — изначальный набор данных,  $N$  — количество точек, в изначальном наборе данных, а  $X_k$  — набор данных, полученный после преобразования.

Одним из свойств преобразования Фурье (и соответственно дискретного преобразования) является теорема Парсеваля, которая записывается как:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (3)$$

Свойство физически означает, что при преобразовании Фурье энергия сигнала (условный квадрат амплитуды) сохраняется.

Если нормировать мощность сигнала  $P_j$  (изначальный квадрат амплитуды), как:

$$P_j = \frac{2|X_j|^2}{N_\gamma}, \text{ где} \quad (4)$$

$N_\gamma$  — суммарное количество фотонов в приходящем сигнале, то можно доказать, что, считая процесс пуассоновским (т.е. детектор идеальный), полученная величина подчиняется распределению  $\chi^2$  с двумя степенями свободы.  $\chi^2_2$  распределение имеет такой вид:  $p(x)dx = \exp(-x/2)/2dx$ . Для данного распределения верно, что средняя мощность сигнала  $\langle P_j \rangle = 2$ , а вероятность превысить данное значение  $x$ :  $P(> x) = \exp(-x/2)$ . Так можно находить значимые гармоники с определенной вероятностью, например  $3\sigma$  или  $5\sigma$  (если мощность сигнала на данной гармонике с определенной вероятностью выше среднего). На рис. 2 представлен спектр мощности тестового сигнала с одной гармоникой.

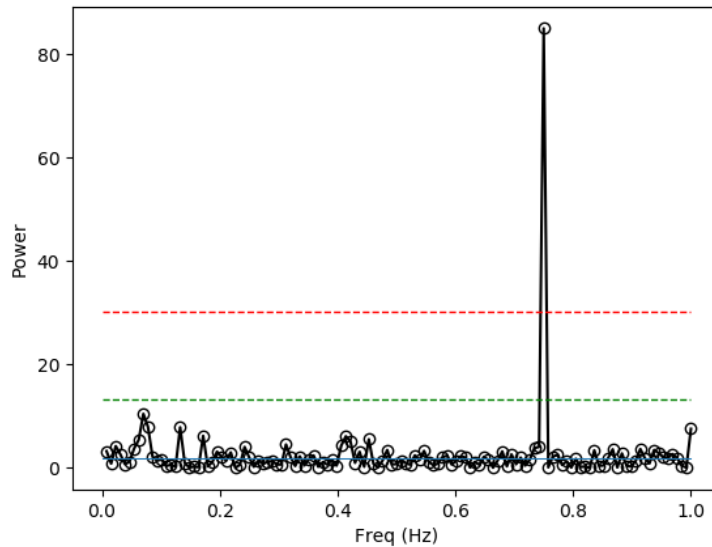


Рис. 2: Спектр мощности тестового сигнала с частотой 0,75 Гц. Синим обозначено среднее значение шума. Красным обозначен сигнал с вероятностью  $5\sigma$ , а зеленый с вероятностью  $3\sigma$

## 2.2 Метод наибольшего правдоподобия

Наиболее часто встречающийся метод аппроксимации спектра мощности различными моделями — метод наибольшего правдоподобия.

Он состоит в максимизации так называемой функции правдоподобия, которая является произведением вероятностей при модельном значении  $y_i$  иметь экспериментальное значение  $x_i$ :  $L = \prod p(x_i|y_i)$ .

Поскольку логарифм — монотонная, возрастающая функция, то обычно от функции правдоподобия берут логарифм, поскольку сумма значений считается проще, чем их произведение. Также чаще функцию аппроксимации минимизируют, поэтому от всего выражения берут минус и в итоге получается, что функция максимального правдоподобия записывается таким образом:

$$L = -\ln \prod p(x_i|y_i) = -\sum \ln(p(x_i|y_i))$$

В данном случае плотность вероятности  $p(I_j|S_j)$  при модельном значении мощности  $S_j$  иметь экспериментальное значение  $I_j$  равна:

$$p(I_j|S_j) = \frac{1}{S_j} \exp(-I_j/S_j) \quad (5)$$

Тогда для нее функция правдоподобия записывается таким образом:

$$L = -2 \ln \prod \frac{1}{S_j} \exp(-I_j/S_j) = 2 \sum (I_j/S_j + \ln(S_j)) \quad (6)$$

## 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. 3 [5]. Прибором ведется запись в 4 энергетических каналах: G1 (13 – 50 кэВ), G2 (50 – 200 кэВ), G3 (200 – 760 кэВ) и Z (>10 МэВ) [6].

ВАТ — 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 рентгеновские

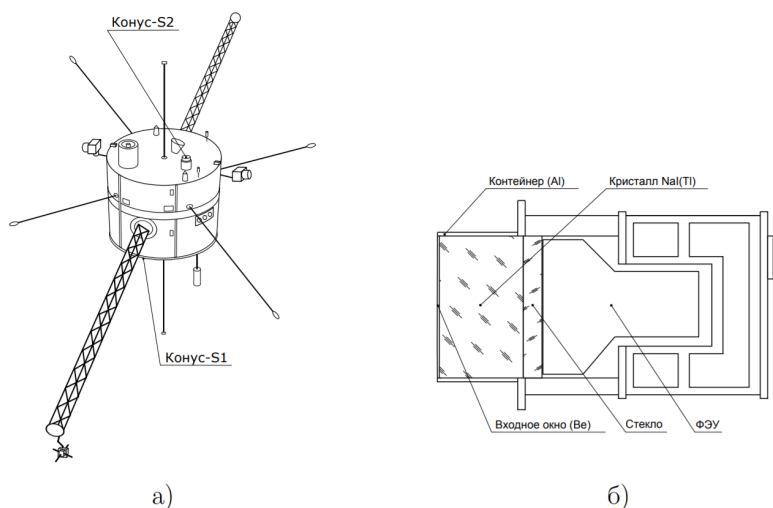


Рис. 3: Устройство (а) спутника *GGS-Wind* и (б) самого прибора

и гамма-кванты почти не преломляются и либо проходят насквозь стекло, либо поглощаются материалом. Сигнал регистрирует массив  $\text{CdZnTe}$ -детекторов, половина которых закрывается маской. В отличие от *Konus-Wind*, его поле зрения меньше и равняется 1.4 стерadians. На рис. 4а можно увидеть схематическое представление прибора.

$\text{CdZnTe}$ -детекторы также, как и  $\text{CdZn}$  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 p-n перехода, создает электронно-дырочные пары, которые под воздействием электрического поля продвигаются к электродам полупроводникового детектора. В результате в цепи образуется электрический импульс, амплитуда которого пропорциональна энергии поглощенного кванта.

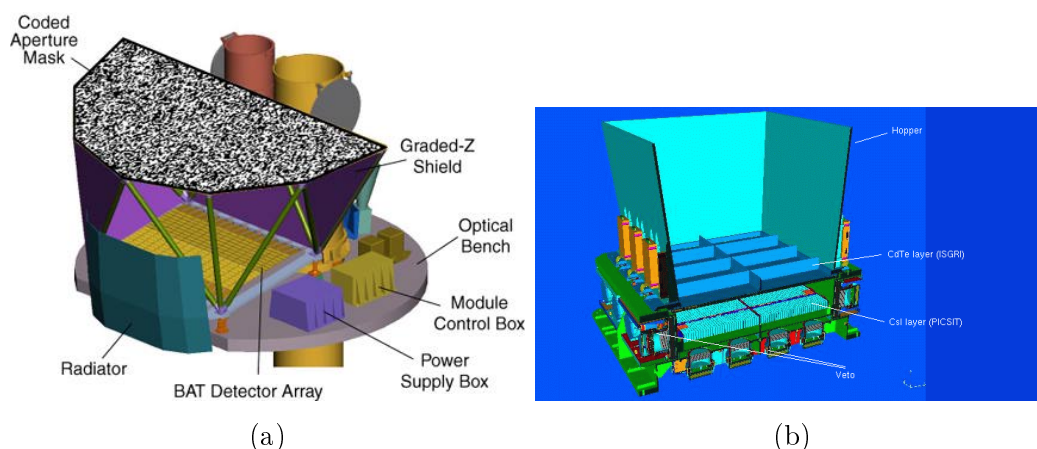


Рис. 4: Устройство прибора (а) BAT и (б) IBIS, частью которого является ISGRI

INTEGRAL аналогичен BAT, но его инструмент ISGRI использует  $\text{CdTe}$ -детекторы и



его поле зрения равно 0.26 стерadian. На рис. 4b представлено его схематическое строение.

## Результаты

В итоге 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 регистрируемых фотонов у ISGRI и Konus-Wind, первый прибор после пика регистрировал больше фотонов, чем второй.

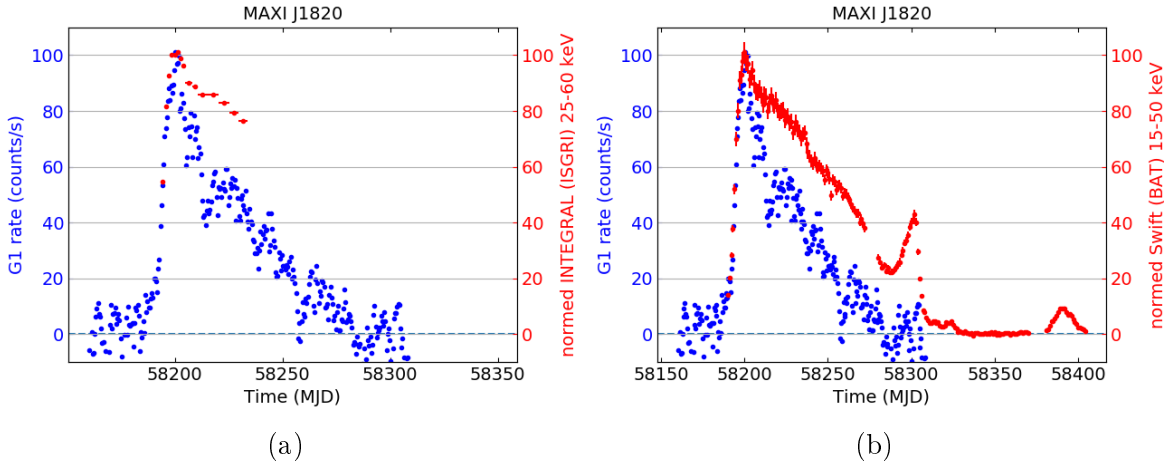


Рис. 5: Сравнение счета фотонов у Конус-Винд с (a) INTEGRAL или (b) BAT

Изначально была дана информация о первых 130 днях наблюдения ха MAXI J1820+070. После разбиения сигнала на 130 однодневных сигналов, оказалось, что на 38-ой день в спектре мощности можно найти квазипериодические осцилляции. Их возможно обнаружить до 62 дня. Частота осцилляций увеличивалась со временем от 0,03 до 0,078 Гц.

При построении графика зависимости частоты квазипериодических осцилляций от времени, получается, что ... (продолжение следует)

## 4 Интерпретация результатов

Согласно статье С. Мотта [4] рентгеновские пульсары, конкретно аккрецирующие черные дыры — транзитные системы, т.е. они меняются от длинных «спокойных» периодов до коротких вспышек. Такие процессы длятся порядка дней, недель или месяцев, поэтому за ними удобно наблюдать, ведь необходимость вести длинные наблюдения почти отсутствует. Такие систематические изменения (вспышка, например) в спектре черной дыры являются следствием изменений в аккреционном диске. Само состояние можно описать с помощью шаблонов отслеживаемых на диаграмме твердости-интенсивности. Под интенсивностью подразумевается скорость счета фотонов, а под твердостью подразумевается эквивалент фотометрического индекса цвета; он рассчитывается как  $HR = \frac{H+S}{H-S}$ , где где

Н и S - скорости счета данного телескопа в заданных жестких (Н) и мягких (S) полосах. На рис. 6 показана типичная форма кривой диаграммы.

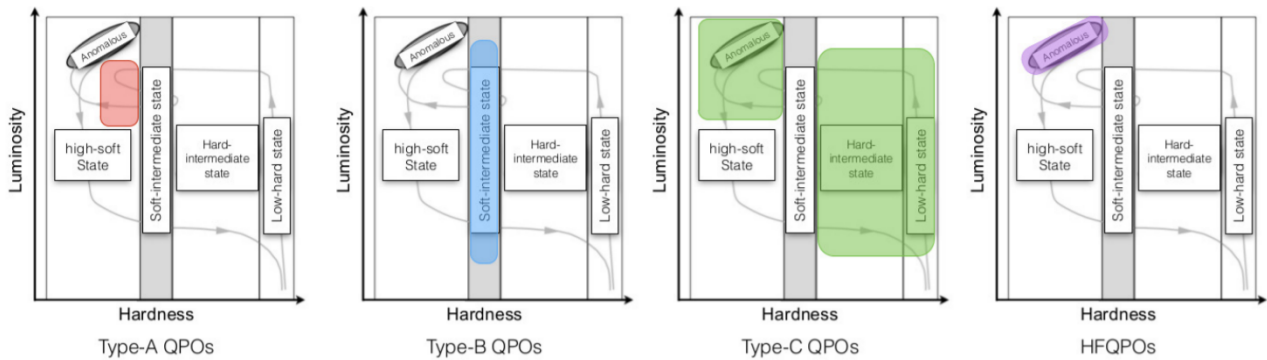


Рис. 6: Типичная диаграмма твердости-интенсивности для черной дыры. Кривая поделена на пять спектральных состояний, также отмечено в каком состоянии проявляются какие QPO

Пять спектральных состояний различаются по способу излучения, а именно:

1. Low Hard. В этом состоянии основной источник излучения — комптоновское эмиссия
2. High Soft. Здесь источник излучения — нагретый аккреционный диск
3. Hard Intermediate и Soft Intermediate. В этих двух состояниях спектр состоит как из жесткого компонента (джет, например), так и теплового излучения диска.
4. Аномальное. Отличие от Hard Intermediate и Soft Intermediate состоит в том, что светимость объекта значительно выше, чем при последних.

Квазипериодические осцилляции разделяют на несколько типов: А, В, С и высокочастотные осцилляции. Каждый из типов осцилляций характерен для своего спектрального состояния черной дыры.

Поскольку мы знаем, что частота квазипериодических колебаний MAXI J1820+070 лежит в пределах от 0,03 до 0,1 Гц. Типичные частоты для квазипериодических колебаний типа С лежат примерно в таких пределах, что означает, что черная дыра находится в состоянии Hard Intermediate и сами колебания относятся к типу С. На рис. 7 представлено, как менялась частота колебаний у объекта.

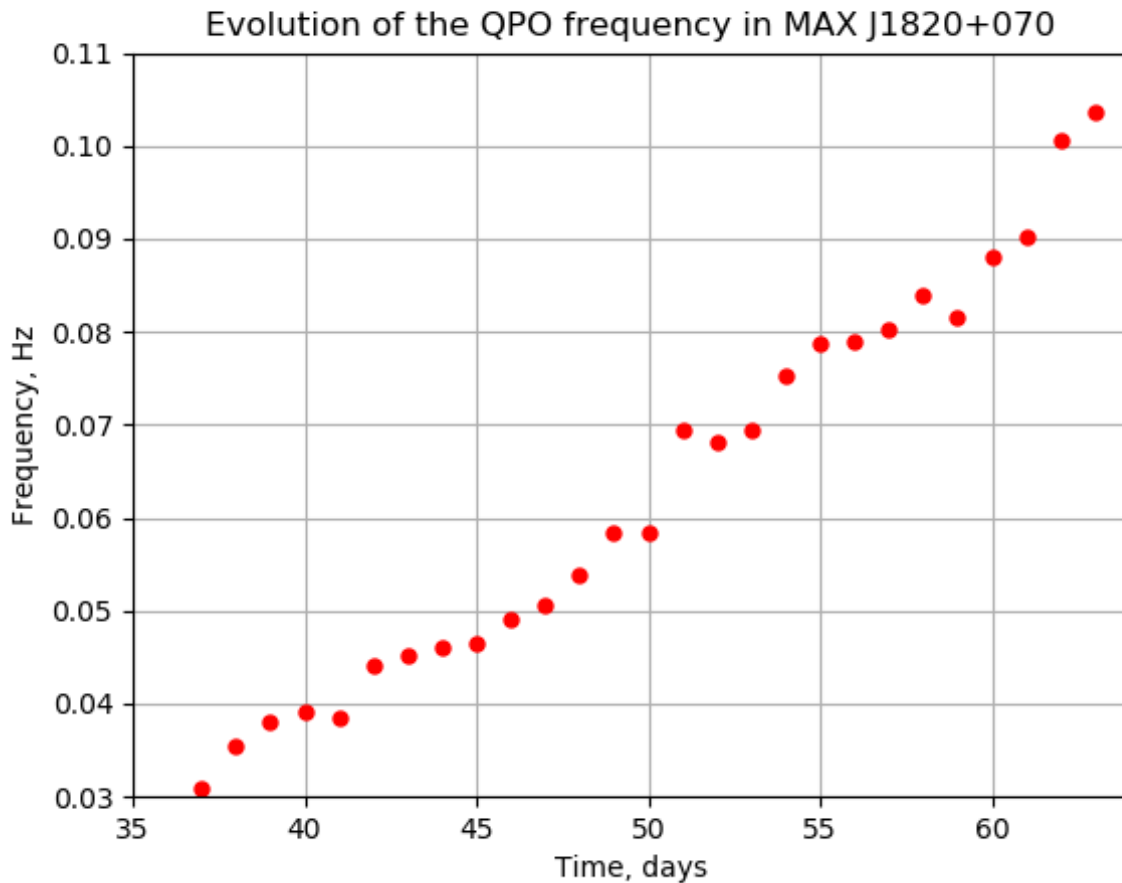


Рис. 7: График зависимости частоты квазипериодических колебаний от дня наблюдения

Скрипт и остальные графики аппроксимации расположены в Github:

<https://github.com/Grindegreen/report>

## 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] Kawamuro T. et al. // The Astronomer's Telegram. 2018. № 11399.
- [4] Motta S. E. Quasi periodic oscillations in black hole binaries.
- [5] 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.
- [6] Aptekar R. L. Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft. 1993.