

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ КРИВОЙ
БЛЕСКА GRB 080319BВ.А.ДРАНЕВИЧ¹, П.Б.ДМИТРИЕВ¹, Ю.Н.ГНЕДИН²

Поступила 24 апреля 2009

Модифицированным методом спектрального анализа исследована временная структура излучения гамма-всплеска GRB 080319B, зарегистрированного в трех космических экспериментах: Swift/BAT, Wind/KONUS, Integral/SPI ACS. Диапазон энергии гамма-квантов, регистрируемых в этих экспериментах, перекрывает область 15-10000 кэВ. Временное разрешение составляет - 64 мс для первых двух и 50 мс для последнего эксперимента. Обнаружены квазипериодические осцилляции с периодами от 0.6 с до 6 с. Осцилляции с периодами 1.28, 0.89 и 0.64 с с точностью до временного разрешения экспериментов являются соответственно 2, 3 и 4 гармониками осцилляции с периодом 2.56 с, а колебания с периодом 0.96 с третьей гармоникой колебания с периодом 2.94 с. Рассмотрено поведение квазипериодических компонентов в зависимости от фазы события. Анализируются возможные физические механизмы, ответственные за появление квазипериодических осцилляций в кривых блеска гамма-всплесков.

Ключевые слова: *гамма-всплески; кривые блеска - объект: GRB 080319B*

1. *Введение.* Изучение временной структуры гамма-всплесков при помощи спектрального анализа [1,2] привело к нахождению общих закономерностей, которые свойственны всем "длинным" гамма-всплескам. В частности, было показано, что, несмотря на некоторые индивидуальные особенности, усредненный для многих событий спектр мощности кривой блеска подчиняется степенному закону с показателем степени $-5/3$ при изменении частоты более чем на два порядка. Также было отмечено, что это значение наклона совпадает с Колмогоровским спектром флуктуации скоростей в турбулентной среде. Отсюда был сделан вывод о том, что область излучения сосредоточена в полностью турбулентном релятивистском "джете", выходящем из центрального источника [2], а сам всплеск можно рассматривать как случайную реализацию единого стохастического процесса.

Однако спектральный анализ кривых блеска некоторых конкретных гамма-всплесков привел к получению новых интересных результатов. Среди немногочисленных работ, опубликованных по этой теме, можно отметить одну из самых ранних [3], в которой для мощного "длинного" всплеска GRB 830801 с помощью фурье-анализа был выявлен квазипериод величиной 5.9 с. В кривой блеска "длинного" гамма-всплеска GRB 060614 были обнаружены колебания с квазипериодом 7 с [4]. В рентгеновских "хвостах" коротких гамма-всплесков также были обнаружены квазипериодические колебания с

периодами 13.8 с для GRB 970110 [5] и 6.4 с для GRB 930905 [6]. Отдельно стоит упомянуть об обнаружении квазипериодических осцилляций (7.2 мин) на кривой послесвечения гамма-всплеска GRB 050922C в оптическом диапазоне [7]. Анализируя наблюдения GRB 060614, авторы [4] пришли к выводу, что гамма-всплеск возник вследствие приливного разрушения звезды в поле тяготения черной дыры промежуточной массы. Такие объекты представляют особый интерес для астрофизики и космологии. Поэтому исследование кривых блеска гамма-всплесков на наличие осциллирующих процессов в настоящее время приобретает особую актуальность.

2. Экспериментальные данные и метод исследования. Гамма-всплеск GRB 080319B был зарегистрирован прибором "BAT" на борту спутника "SWIFT" 19 марта 2008г. в 06:12:49.25 UT [8]). Измеренное космологическое красное смещение составило 0.937 [9]. Всплеск был также одновременно зарегистрирован аппаратурой "Konus" на спутнике "WIND" и спектрометром "SPI ACS" на спутнике "INTEGRAL".

Гамма-телескоп "BAT" на борту спутника "SWIFT" регистрирует излучение с энергией гамма-квантов от 15 до 350 кэВ с временным разрешением 64 мс. Данные эксперимента хранятся в архиве: <ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/swift/data/>, который регулярно пополняется примерно через неделю после регистрации очередного события. Данные с аппаратуры "Konus", смонтированной на борту спутника "WIND", имеют такое же временное разрешение, охватывают энергетический диапазон 50-200 кэВ и находятся в архиве <http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/konus/grbs.html>. Данные с прибора "SPI ACS" со спутника "INTEGRAL" охватывают энергетический диапазон 100-10000 кэВ, имеют временное разрешение 50 мс и хранятся по адресу <http://isdcarc.unige.ch/arc/FTP/ibas/spiacs/>.

Благодаря удачному расположению приборов и исключительной интенсивности всплеска, кривая блеска была записана с очень хорошим соотношением сигнал/шум. Всплеск представляет один широкий импульс, на который наложена серия узких пиков. Можно четко выделить три стадии (рис.1а): стадию нарастания 1, стадию спада после главного максимума 2 и стадию "неустойчивости" 3, после которой происходит резкий спад события, причем на стадии "неустойчивости" наблюдается серия сильных импульсов. Общая длительность всплеска составляет 147 с [10] при длительности активной импульсной фазы ~62 с.

Рассчитанный спектр мощности кривой блеска для четырех энергетических каналов прибора "BAT" (15-25, 25-50, 50-100 и 100-350 кэВ) хорошо описывается степенным законом, причем показатель степени меняется в зависимости от энергетического канала от -1.48 до -1.81, что согласуется с результатами работы Белобородова и др. [2]. Поэтому, чтобы извлечь информацию о высокочастотных компонентах спектра, кривую блеска необходимо предварительно очистить от мощных низкочастотных компонент.

Для детального изучения временной структуры кривой блеска гамма-всплеска GRB 080319B был использован модифицированный метод спектрального анализа. Модификация метода заключалась в следующем. Выборочная оценка нормированной спектральной плотности [11] для исходных временных рядов вычислялась в зависимости не от частоты, а от пробного периода, что обуславливается самой постановкой задачи о выявлении скрытой периодичности в исходных данных [12]. Помимо этого, исходные временные ряды подвергались предварительной высокочастотной фильтрации [13] с наперед заданной частотой "среза" фильтра на половине мощности сигнала, которой во временной области соответствует величина "разделительного" периода T_{ϕ} . Затем для каждого отфильтрованного со своим конкретным значением параметра T_{ϕ} высокочастотного компонента снова вычислялась оценка нормированной спектральной плотности от периода и все эти оценки, вычисленные для различных значений параметра T_{ϕ} , накладывались друг на друга на одном и том же поле графика, образуя "комбинированную" спектральную периодограмму" (КСП).

Для фильтрации сигнала использовался модифицированный фильтр Блэкмана-Тьюки [13]. Значения разделительного периода составляли: $T_{\phi} = 7\Delta_t$, $19\Delta_t$, $31\Delta_t$, $53\Delta_t$, $79\Delta_t$, $113\Delta_t$, и $173\Delta_t$, где Δ_t - временное разрешение сигнала. Эти значения параметра T_{ϕ} использовались для обработки данных всех трех экспериментов.

Такая модификация общепринятого метода спектрального анализа позволяет исследовать стабильность положения выявленного периода на периодограмме, т.е. независимость обнаруженного значения скрытого периода от параметров исходного временного ряда и параметров фильтра, которые могут влиять на результат применяемого математического метода обработки. Вследствие фильтрации во временной области в дисперсию отфильтрованной высокочастотной составляющей сигнала вносят вклад только слабые короткопериодические компоненты, а за счет нормировки спектральной мощности, вклад от этих компонентов в комбинированную периодограмму становится соизмеримым с вкладом от более длительных и мощных составляющих сигнала.

Достоверность максимальных значений пиков на КСП для кривых блеска определяется величиной значимости более $4-7\sigma$, по сравнению со случайным шумом с нормальным распределением. Достоверность расположения пиков определяется величиной шага по оси пробных периодов при вычислениях. В нашем случае, для КСП это величина временного разрешения исходных временных рядов: для первых двух экспериментов - 64 мс, для третьего - 50 мс.

Ранее этот метод успешно применялся для изучения временной структуры солнечных вспышек в рентгеновском диапазоне длин волн [14,15].

3. *Обсуждение результатов обработки наблюдений.* На рис.1а представлены результаты обработки кривой блеска GRB 080319В, зарегистрированной в эксперименте Swift/BAT в диапазоне энергии гамма-квантов 15-350 кэВ. На рис.1б изображена КСП, построенная для фонового участка кривой блеска длительностью 81.7 с до события, на рис.1с - для участка самого события длительностью 62.2 с и на рис.1д - для фонового участка после события длительностью 80.2 с.

Из рисунка хорошо видно, что значения нормированной спектральной плотности излучения во время всплеска возрастают на порядок по сравнению

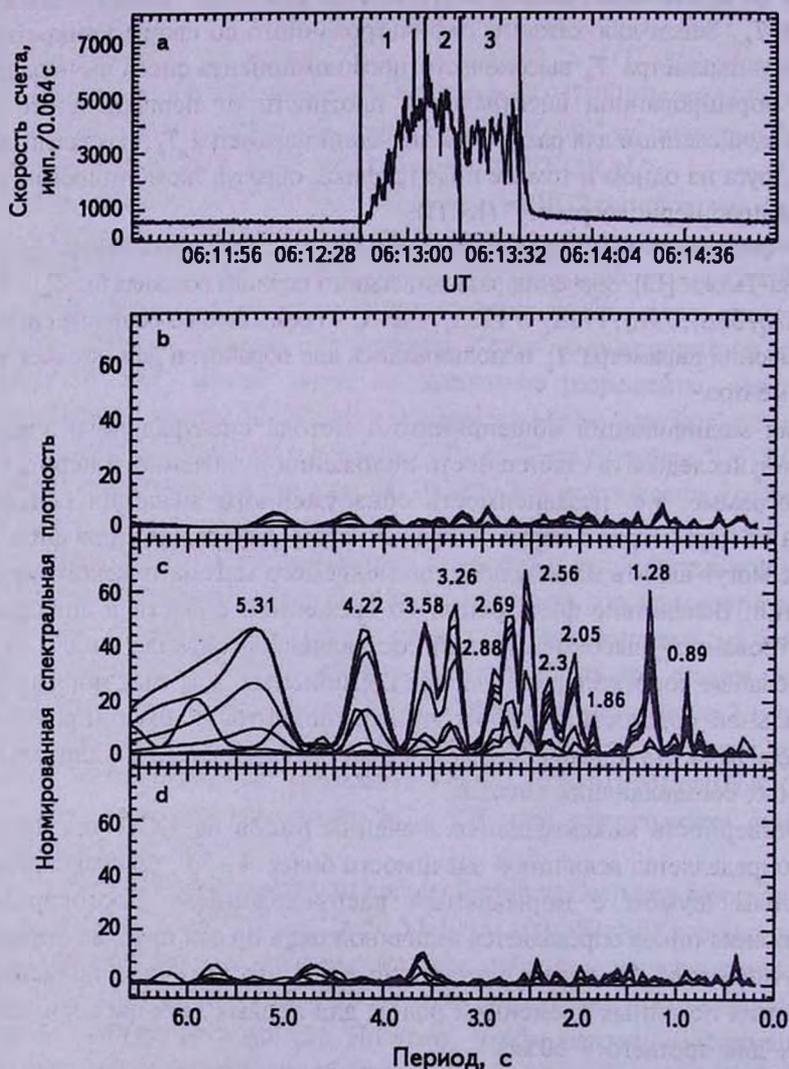


Рис.1. а) Кривая блеска GRB 080319В, зарегистрированная в эксперименте Swift/BAT 19 марта 2008г. и КСП ее различных участков: б) фонового до события длительностью 81.7 с, с) самого события длительностью 62.2 с и д) фонового после события длительностью 80.2 с.

со спектральной плотностью до и после активной фазы всплеска. Более того, распределение энергии колебаний по частотам (периодам) не является шумовым. На периодограмме всплеска (рис.1с) присутствуют как отдельные пики (0.89, 1.28, 4.22 и 5.31 с), так и пики, расщепленные на два (3.26, 3.58 с) или на три (1.86, 2.05, 2.3 с и 2.56, 2.69, 2.88 с) сателлита.

Проведенное численное моделирование показало, что такое расщепление возможно при изменении значения периода соответствующей осцилляции на протяжении всего события. Другая причина расщепления пиков может быть вызвана дифференциальным вращением поверхности излучающего объекта, как, например, в случае асимметрии вращения северного и южного полушарий Солнца.

Первое из этих двух предположений может быть легко проверено на основе имеющихся экспериментальных данных. Для этого кривая блеска самого события GRB 080319В была разбита на три участка, помеченные цифрами 1, 2 и 3 на рис.1а, и для каждого из них была построена своя КСП (рис.2). Из этого рисунка хорошо видно, что на КСП, построенных для трех выделенных участков события, разрешение периодов от 2.5 с и более резко падает по сравнению с КСП, построенной для всего всплеска. Это и не удивительно, так как длина выборки (62.2с) сокращается в 3-5 раз: 21.2, 13.6 и 19.2с соответственно для каждой из выделенных частей всплеска. На рис.2а-2с четко прослеживается характер поведения квазипериодов величиной менее 3с на протяжении всего события. На стадии роста (1) доминируют две гармоники 0.96 с и 2.94 с по сравнению с более слабой третьей - 1.34 с (рис.2а). Затем на стадии частичного спада кривой блеска (2) гармоники 1.34 с и 2.94 с пропадают (хотя можно считать, что гармоника 1.34с, определяемая с точностью до 64мс, на этой стадии события проявляется как 1.28 с), а гармоника 0.96 с "расщепляется" на две: 0.89 с (которая с точностью до 64 мс совпадает с 0.96 с) и 1.09 с (рис.2б), из которых первая почти вдвое больше второй и присутствует на КСП всего события (рис.1с). На этой же стадии события появляются гармоники 0.64 с, 1.28 с (которую, как уже упоминалось, можно рассматривать как гармонику 1.34 с предыдущей стадии), 1.92 с и, в какой-то мере, 2.56 с (рис.2б), которые на третьей стадии (3) не сохраняются (рис.2с), за исключением гармоники 1.28 с, которая, как и гармоника 0.89 с, присутствует на КСП всего события (рис.1с). Далее, на третьей стадии события - стадии "неустойчивости" (3), можно отметить появление значительной гармоники 2.11 с (рис.2с), которая с точностью до 64мс присутствует на КСП всего события, скорее всего, как 2.05 с (рис.1с), и, в какой-то мере, гармоники 2.75 с.

Итак, основной триплет колебаний 2.56, 2.69 и 2.88 с на КСП всего события (рис.1с) с точностью до временного разрешения построения периодограммы совпадает с гармониками 2.56, 2.75 и 2.94 с, присутствующими по отдельности на разных стадиях события, а гармоники 1.28 и 0.89 с КСП

всего события присутствуют на всех стадиях события с точностью до 64 мс.

КСП всплеска, измеренного экспериментами Wind/KONUS и Integral/SPI ACS, представлены на рис.3 и рис.4, соответственно. Несмотря на различную

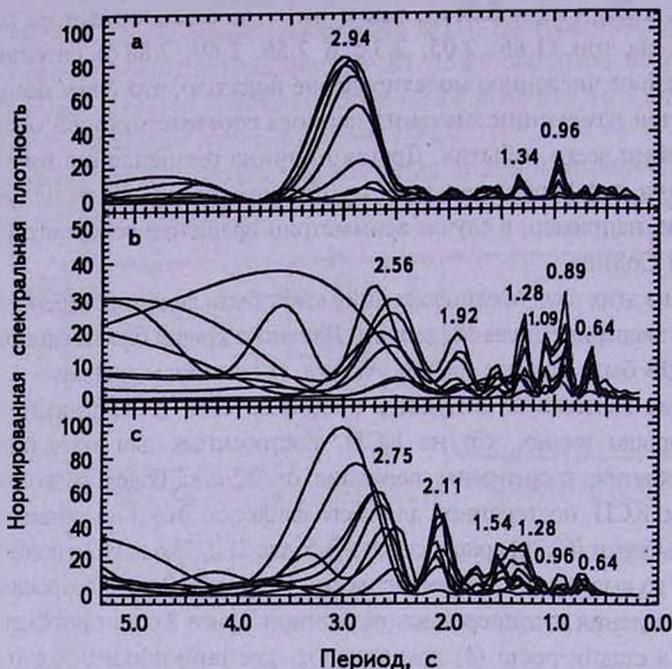


Рис.2. КСП трех стадий развития гамма-всплеска GRB 080319B, зарегистрированного в эксперименте Swift/BAT. а) участка 1, б) участка 2 и в) участка 3 кривой блеска рис.1а.

интенсивность временного хода яркостных кривых и разное временное разрешение, КСП в целом сохраняют свою форму. Положение пиков на КСП совпадает с точностью до величины временного разрешения построения КСП, заданного равным временному разрешению исходных данных. Изменяется лишь амплитуда пиков, и соответственно, форма дуплетов и триплетов.

Кривая блеска GRB 080319B, измеренная приборами "KONUS" и "SPI ACS", также была разбита на три участка, как и в случае прибора "BAT", и для каждого участка была построена своя КСП. Суммарный результат значений выявленных квазипериодов в данных всех трех приборов для трех выделенных фаз гамма-всплеска приведен в табл.1, где, если периоды образуют дуплетную или триплетную структуру, то они помещены на одной строке.

Легко заметить, что для всех рядов наблюдений всех трех экспериментов на соответствующих КСП существуют пики, значения квазипериодов которых составляют гармонический ряд. Например, осцилляции с периодами 1.28, 0.89 и 0.64 с могут с точностью до временного разрешения экспериментов являться соответственно 2, 3 и 4 гармониками осцилляции с периодом 2.56 с, а

колебания с периодом 0.96 с - третьей гармоникой колебания с периодом 2.94 с (рис.2). Такая ситуация возможна в нескольких случаях. Например, когда форма осцилляции сильно отличается от синусоидальной. В этом случае

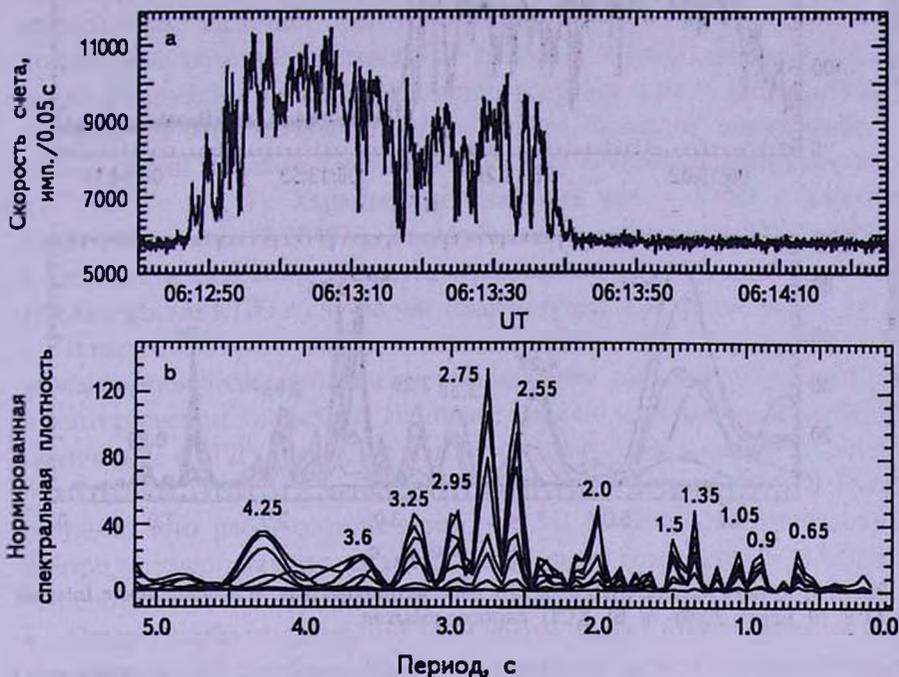


Рис.3. а) Кривая блеска GRB 080319B, зарегистрированная в эксперименте Wind/KONUS 19 марта 2008г. и б) КСП самого события.

периодическая функция преобразованием Фурье разлагается на основную гармонику и ее обертоны. Либо когда излучающий источник имеет собственную резонансную частоту колебаний, и, соответственно, излучение модулируется по амплитуде, как на основной резонансной частоте, так и на ее гармониках. Один из вариантов такого поведения - прецессионное вращение излучающего источника, кратное основному периоду вращения.

Обращает на себя внимание относительно быстрая "перекачка" энергии колебаний между основными частотами. Это может свидетельствовать о сильной связи между физическими процессами, ответственными за разные типы колебаний. Наконец, необходимо отметить, что излучение гамма-квантов в широком диапазоне энергий 15-10000 кэВ модулируется одними и теми же частотами.

Таким образом, очевидно, что положение пиков на кривой блеска GRB 080319B не определяется случайными процессами. Положение максимумов на периодограмме фиксировано, со временем изменяется лишь их амплитуда. Наблюдаемый небольшой дрейф периодов колебаний можно связать с влиянием

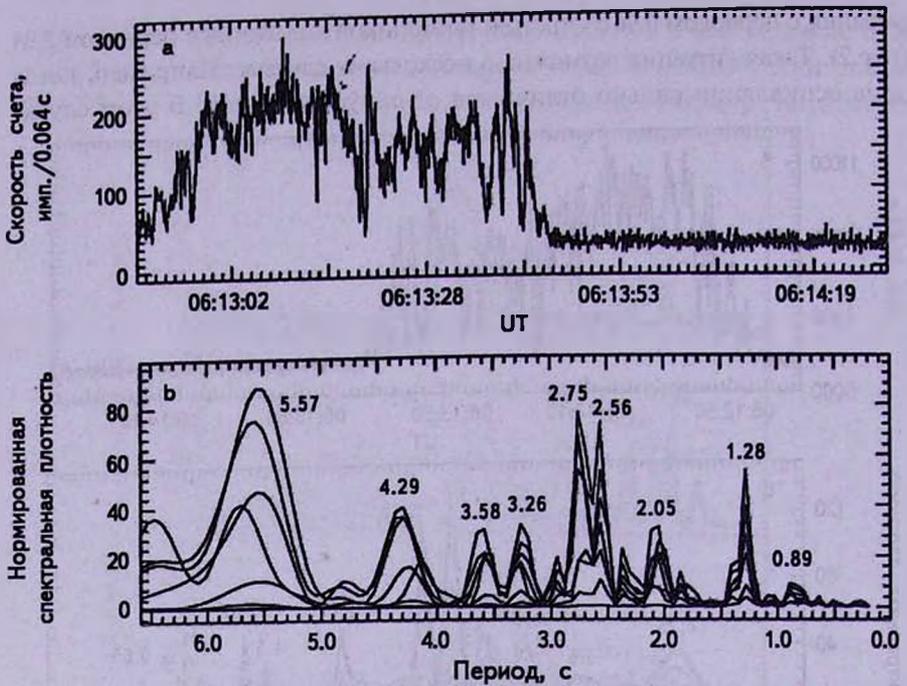


Рис.4. а) Кривая блеска GRB 080319В, зарегистрированная в эксперименте Integral/SPI ACS 19 марта 2008г. и б) КСП самого события.

Таблица 1

СУММАРНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ ЗНАЧЕНИЙ ВЫЯВЛЕННЫХ КВАЗИПЕРИОДОВ

Эксперимент	Значения выявленных квазипериодов, с		
	Стадия (1)	Стадия (2)	Стадия (3)
Swift/BAT		0.64	0.64
	0.96	0.89, 1.09	0.96
	1.34	1.28	1.28, 1.54
		1.92	2.11
	2.94	2.56	2.75
Wind/KONUS		0.64	0.77
	0.89	0.89, 1.09	0.96
	1.28	1.28	1.28, 1.41, 1.54
	1.92	1.92	2.11
			2.56
Integral/SPI ACS	0.65	0.65	0.7
	0.8		
	0.95	0.9	0.9
		1.05	
	1.25	1.3	1.25, 1.4
		1.75	2.1
		2.6	

шумовой компоненты или с изменением физических параметров источника.

4. *Анализ физических механизмов квазипериодических осцилляций.* Квазипериодические осцилляции (КПО) являются характерным явлением рентгеновских двойных систем, содержащих компактные объекты (нейтронные звезды и черные дыры). КПО были также обнаружены в хвостах гигантских вспышек мягких гамма-репитеров, которые по современным представлениям являются магнетарами, т.е. нейтронными звездами с исключительно огромными магнитными полями $\sim 10^{14}$ - 10^{15} Гс [16,17]. Характерные значения частот КПО у магнетаров лежат в интервале 18-1840 Гц. Теоретически считается, что КПО возникают в результате аккреции вещества, выброшенного в процессе вспышки. Исследованию КПО в случае магнетаров посвящена серия работ [18,6,5].

В настоящее время довольно значительный материал накоплен в области исследования квазипериодических осцилляций активных областей Солнца в рентгеновском диапазоне. Наиболее хорошо изучены магнитогидродинамические (МГД) колебания магнитных плазменных трубок, выходящих из активной области Солнца в хромосферу и корону [19-24]. Главный результат этих работ состоит в том, что МГД моды колебаний довольно быстро затухают, так что их характерное время составляет 2-10 периодов, что соответствует ситуации с кривой блеска GRB 080319В.

Следует особо отметить, что МГД волны играют важную роль во многих астрофизических явлениях. Часто при описании ряда таких явлений можно ограничиться линейным приближением, когда амплитуды таких волн достаточно малы. Однако в сильно динамичной и неоднородной плазме (именно такая ситуация и реализуется по современным представлениям в источниках гамма-всплесков) существенную роль играет взаимодействие между различными МГД модами, которое может усиливать амплитуды отдельных мод за счет подавления других.

Периоды основных магнитоакустических колебаний (быстрая (kink) и медленная моды) могут быть представлены в виде [25]:

$$P_{fast} = 2 \times 10^{-5} \frac{R_6 n_{28}^{1/2}}{B_{14}}, \text{ с}, \quad (1)$$

$$P_{slow} = 0.015 \frac{R_6}{k T_{10}^{1/2}}, \text{ с}, \quad (2)$$

где $R_6 = R/10^6$ см - характерный размер области осцилляций, $n_{28} = n/10^{28}$ см $^{-3}$ - концентрация плазмы в этой области, $B_{14} = B/10^{14}$ Гс - напряженность магнитного поля, $T_{10} = kT/10$ кэВ - температура плазмы в этой области.

Для протонейтронной звезды с радиусом $R = 10^7$ см и плотностью магнитосферы $n = 10^{24}$ см $^{-3}$ величина $P_{fast} \sim (2 \cdot 10^{12}/B)s$, что хорошо соответствует главному наблюдаемому пику. Наличие других пиков (рис.1-4) связано, по-

видимому, с нелинейным взаимодействием различных мод колебаний в магнитосфере протонейтронной звезды, как возможного компактного остатка взрыва сверхновой, и требует отдельного детального исследования.

Другой интересный результат в рамках рассматриваемой ситуации следует из сравнения двух доминирующих гармоник на стадии роста: $P_1 = 2.94$ с и $P_2 = 0.96$ с. Если их интерпретировать как фундаментальную (с периодом P_1) и первую (с периодом P_2) гармоники кинк-моды, то отличие отношения $P_1/2P_2$ от единицы позволяет получить информацию о структуре области магнитосферы протонейтронной звезды и, в частности, о характерной шкале L распределения плотности плазмы в ней [24]. Следуя их работе (формулы (16), (19) и (23)), можно сделать интересный вывод, что данные наблюдений квазипериодических колебаний GRB 080319B можно согласовать только в случае более-менее однородного $L > R$ распределения магнитосферной плазмы.

В случае аккреции на черную дыру, как возможный остаток взрыва, сопровождавшегося гамма-всплеском, можно попытаться интерпретировать наблюдавшиеся квази-периодические колебания, как, например, глобальные гидродинамические моды колебаний в пограничном слое вязкого аккреционного диска. В этом случае частота главной моды колебаний определяется как [26]:

$$v = \alpha \left(\frac{H}{R} \right)^2 \Omega_k, \quad (3)$$

где α - коэффициент вязкости аккреционного диска [27], H - толщина аккреционного диска, R - его радиус и Ω_k - частота кеплеровского вращения вокруг черной дыры. Формула (3) позволяет оценить массу возможной черной дыры, если считать, что колебания происходят вблизи последней устойчивой орбиты. Оценка, основанная на величине частоты наблюдавшегося главного пика, дает, что масса черной дыры равна, примерно, 100 массам Солнца. Это означает, что гамма-всплеск возник в результате взрыва очень массивной звезды, что, в принципе, не исключается современными моделями гамма-всплесков. Наблюдаемые многочисленные гармоники можно интерпретировать как результат нелинейного взаимодействия между различными модами вблизи границы устойчивости, а также вследствие отличия орбитального движения пробной частицы в диске от кеплеровского. На наш взгляд такая модель содержит в настоящее время больше свободных параметров по сравнению с первой (образование протонейтронной звезды), хотя, конечно, исключить ее полностью нельзя.

В заключение, укажем еще на одну возможную интерпретацию наблюдавшихся квазипериодических колебаний, которая использовалась при анализе осцилляций в карликовых новых звездах, а также для нейтронных звезд в тесных двойных системах [28,29].

Речь идет о возможной интерпретации наблюдавшихся квазипериодических

колебаний как колебаний токовых слоев, образовавшихся в плазме около компактного объекта после взрыва. Теория колебаний токовых слоев довольно детально разработана в ряде работ (см., например, [30]). В принципе основные гармоники колебаний токовых слоев хорошо вписываются в наблюдающуюся для GRB 080319В картину. Однако существенным элементом такой картины должны быть довольно яркие кратковременные вспышки радио-, рентгеновского и гамма-излучения, которые должны наблюдаться одновременно именно в тот же самый период, что и квазипериодические колебания, выявляемые в гамма-излучении.

Последнее обстоятельство обусловлено тем фактом, что процесс образования и разрушения токового слоя сопровождается процессом ускорения электронов плазмы и, следовательно, вспышками нетеплового излучения. Требуется более детальный анализ данных наблюдений космического гамма-всплеска GRB 080319В для подтверждения или опровержения данной модели.

5. Заключение. В данной работе выполнено исследование временной структуры излучения космического гамма-всплеска GRB 080319В. В результате анализа обнаружены квазипериодические осцилляции с периодами от 0.6 с до 6 с. Установлено, что частоты некоторых колебаний составляют гармонический ряд, что свидетельствует о несинусоидальности основных колебаний и, следовательно, о значительной нелинейности процессов. Анализ возможных физических механизмов выявленных квазипериодических колебаний позволяет сделать вывод, что наиболее вероятным механизмом генерации колебаний являются магнитоакустические неустойчивости, генерируемые в плазменной оболочке, окружающей протонейтронную звезду. Однако не исключено, что источником гамма-всплеска является формирующаяся черная дыра. В таком случае ее масса составляет не менее 100 масс Солнца.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 07-02-00535а), программ Президиума и ОФН РАН, а также при поддержке Президентской программы "Ведущие научные школы" (НШ-6110.2008.2).

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Paul.D@mail.ioffe.ru

² Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: gnedin@gao.spb.ru

THE QUASI-PERIODICAL OSCILLATIONS OF GRB 080319B LIGHT CURVE

V.A.DRANEVICH¹, P.B.DMITRIYEV¹, Yu.N.GNEDIN²

The γ -ray burst GRB 080319B light curve observed by the Swift/BAT, the Wind/KONUS and the Integral/SPI ACS space missions has been investigated using a modified method of spectral analysis. The energy range of the γ -photons registered during these experiments is from 15 up to 10000 keV. The time resolution of the Swift/BAT and the Wind/KONUS experiments is 64 ms and it is 50 ms for the last one. The quasi-periodical oscillations with periods from 0.6 to 6 s were revealed in light curve structure. The quasi-periods of 1.28, 0.89 and 0.64 s can be interpreted (accurate to the experimental time resolution) as, respectively, the second, the third and the fourth harmonics of the 2.56 s oscillation and the quasi-period of 0.96 s can be the third harmonic of the 2.94 s oscillation. The possible physical mechanisms responsible for the occurrence of the quasi-periodical oscillations in the light curve structure of the γ -ray bursts are analyzed.

Key words: γ -ray burst:light curves - individual:GRB 080319B

ЛИТЕРАТУРА

1. A.M.Beloborodov, B.E.Stern, R.Svensson, *Astrophys. J. (Lett.)*, **508**, L25, 1998.
2. A.M.Beloborodov, B.E.Stern, R.Svensson, arXiv: astro-ph/0001401, 2000.
3. А.В.Кузнецов, Р.А.Сюняев, О.В.Терехов и др., *Письма в Астрон. ж.*, **13**, 1055, 1987.
4. Y.Lu., Y.F.Huang, S.N.Zhang, *Astrophys. J.*, **684**, 1330, 2008.
5. A.Crider, arXiv: astro-ph/0601019, 2006.
6. A.Pzanenko, V.Lochnikov, R.Preece, *Proc. of the XLth Rencontres de Moriond, Series: Moriond Particle Physics Meetengs eds. by Jacques Dumarchez, Jean Tran Thanh Van*, 253, 2006.
7. B.E.Zhilyaev, M.V.Andreev, A.V.Sergeev, V.B.Petkov, arXiv: astro-ph/0711.0038, 2007.
8. J.I.Racusin, S.V.Karпов, M.Sokolowski et. al., *Nature*, **455**, pp183-188, 2008, а также arXiv: astro-ph/0805.1557, 2008.
9. P.M.Vreeswijk, A.Smette, D.Malesani et. al., <http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/7459.gcn3>, 2008.
10. J.S.Bloom, D.A.Perley, W.Li et. al., arXiv: astro-ph/0803.3215, 2008.
11. Т.Дженкинс, Д.Ваттс, *Спектральный анализ и его приложения*, М.,

Мир, вып.2, с.8, 1972.

12. М.Г.Серебренников, А.А.Первозванский, Выявление скрытых периодичностей, М., Наука, с.9, 1965.
13. A.S.Alavi, G.M.Jenkins, Appl. Statist., 14, 70, 1965.
14. П.Б.Дмитриев, И.В.Кудрявцев, В.П.Лазутков и др., Астрон. Вестник, 40, 160, 2006.
15. П.Б.Дмитриев, И.В.Кудрявцев, В.П.Лазутков и др., Изв. РАН. сер. Физ., 70, 1453, 2006.
16. C.Thomson, R.C.Duncan, Astrophys. J., 473, 322, 1996.
17. C.Thomson, R.C.Duncan, Astrophys. J., 561, 980, 2001.
18. A.N.Timokhin, D.Eichler, Yu.Lyubarsky, astro-ph/0706.3698, 2007.
19. T.V.Zaqarashvili, B.Roberts, Phys. Rev. E, 66, 020461, 2002.
20. T.V.Zaqarashvili, B.Roberts, arXiv: astro-ph/0602535, 2006.
21. Y.Kato, M.R.Hayashi, R.Matsumoto, arXiv: astro-ph/0308437, 2003.
22. D.Kuridze, T.V.Zaqarashvili, B.Roberts, Proc. 11 European Solar Phys. Meeting, ESA SP-596, 2005.
23. A.Costa, R.Gonzales, arXiv:astro-ph/0807.1722, 2008.
24. M.P.McEwan, A.J.Diaz, B.Roberts, Astron. Astrophys., 481, 819, 2008.
25. B.Ma, X.-D.Li, P.F.Chen, arXiv:astro-ph/0807.0683, 2008.
26. M.H.Erkut, D.Psaltis, M.Ali Alpar, arXiv: astro-ph/0807.0730, 2008.
27. N.I.Shakura, R.A.Sunyaev, Astron. Astrophys., 24, 3, 1973.
28. Ю.Н.Гнедин, Ю.А.Наговицын, Т.М.Нацалишвили, Астрон. ж., 76, 532, 1999.
29. Ю.Н.Гнедин, С.О.Куйков, Письма в Астрон. ж., 27, №8, 1, 2001.
30. J.Sakai, A.Colin, E.Priest, Sol. Phys., 114, 253, 1987.