

УДК 524.6-732(04)

БЛИЗКИЕ ЗВЕЗДЫ КАК ИСТОЧНИКИ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

П. Д. Маркин, Б. И. Лучков

Наблюдения наземных телескопов и космического телескопа Хаббл позволили отождествить часть гамма-всплесков с далекими объектами (параметр красного смещения $Z \geq 1$). Что представляют другие всплески и каковы их источники – остается неясным. Рассмотрена возможность отождествления других всплесков с близкими источниками, известными как вспыливающие звезды малых масс. Методом корреляционного анализа сопоставлены координаты космических гамма-всплесков (GRB) за 2008–2013 гг. и близких звезд (в радиусе $r < 25$ пк). Найдено 6 совпадений с точностью $\sim 0.1^\circ$. Вероятность случайного совпадения GRB со звездами составляет $4 \cdot 10^{-8}$, что несомненно доказывает их звездное происхождение.

Ключевые слова: гамма-астрономия; гамма-всплески: наблюдения и источники; звезды малых масс; звезды ближнего окружения.

Основные характеристики гамма-всплесков. В космическом пространстве с начала 60-х годов функционировала американская система спутников Vela. Первоначально эта система была предназначена для обнаружения гамма-излучения – следствия ядерных взрывов в атмосфере. Для этой цели использовалось несколько спутников, поскольку регистрация излучения на нескольких аппаратах могла обеспечить глобальный обзор и позволить определить направление прихода излучения. После советско-американского соглашения о запрещении ядерных испытаний в атмосфере, которое выполнялось обеими сторонами, система оказалась фактически «безработной». Однако 2 июля 1967 г. на спутнике Vela 4a неожиданно были обнаружены кратковременные (порядка нескольких секунд) повышения интенсивности гамма-лучей в диапазоне 0.1–1 МэВ. Благодаря

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия, Москва 115409, Каширское шоссе, 31; e-mail: ikiran@mail.ru, b.luchkov@mail.ru.

ря нескольким достоверным событиям, зарегистрированным впоследствии на системе спутников Vela, было установлено, что гамма-всплески имеют астрономическое происхождение.

В настоящее время удалось отождествить с далекими объектами ($Z \geq 1$) только порядка 40% всех наблюдаемых всплесков [4]. Что представляют собой другие и каковы их источники остаётся неясным.

Наиболее интригующей характеристикой гамма-всплесков является отсутствие отождествления многих из них с известными астрономическими объектами. Были предложены десятки гипотез об источниках всплесков [2]. Несмотря на весьма интенсивные экспериментальные исследования этого, вероятно, одного из самых загадочных явлений в астрофизике, до сих пор не удалось решить основной вопрос о положении в пространстве источников гамма-всплесков. И этот уникальный факт проецировался на результаты, полученные на многочисленных космических приборах.

Перечислим основные твердо установленные характеристики гамма-всплесков.

1. Изотропия углового распределения источников гамма-всплесков. Этот фундаментальный для интерпретации всплесков факт был установлен на всех приборах, обеспечивших самую высокую чувствительность и самую представительную статистику. Угловое распределение в галактических координатах представлено на рис. 1.

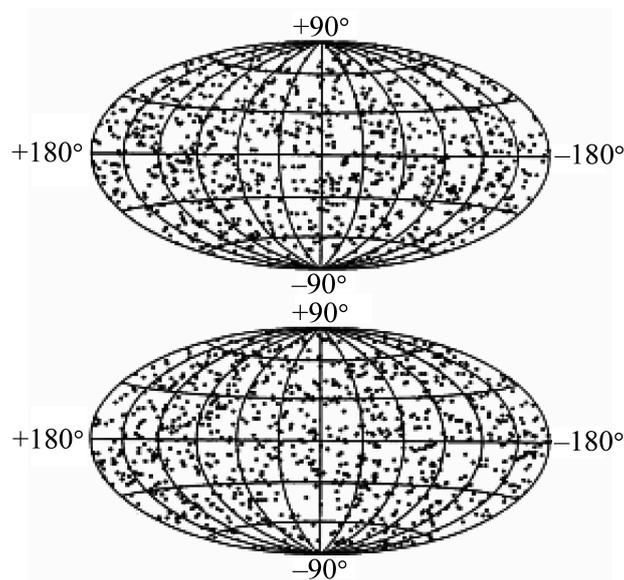


Рис. 1: Верхняя карта представляет собой распределение 1005 гамма-всплесков BATSE в галактических координатах. Для сравнения на нижней карте приведено случайное распределение по небу 1005 источников для изотропной модели

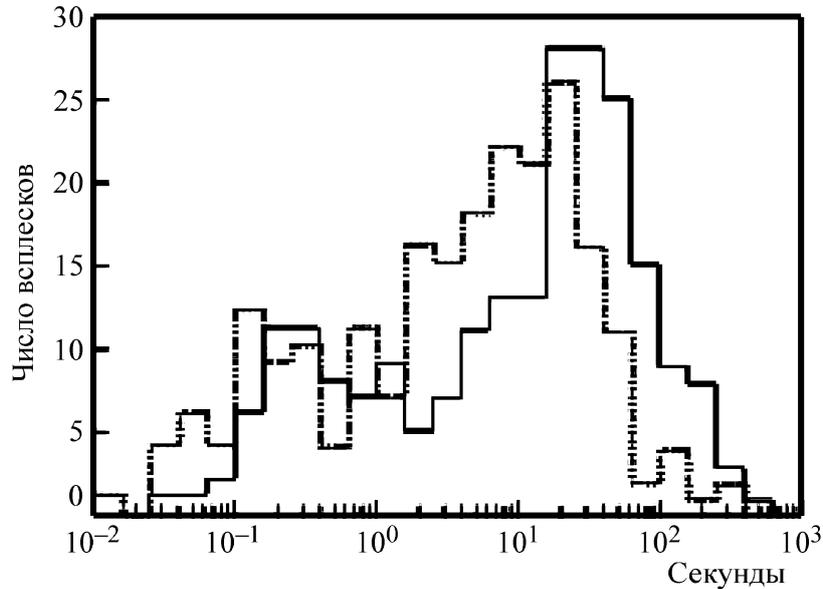


Рис. 2: Распределение по длительностям 222 гамма-всплесков BATSE [5]. Приведены данные для параметров t_{50} (пунктир) и t_{90} (сплошная линия).

2. Длительность всплесков заключена в интервале $10^{-2} - 10^3$ с [9]. Для грубых оценок можно полагать, что средняя продолжительность всплесков составляет 10 с. Иногда продолжительность всплесков описывается параметрами t_{50} и t_{90} . Первый параметр равен времени, в течение которого накапливается 50% зарегистрированной энергии всплеска; t_{90} соответствует времени накопления 90% энергии. Наблюдения указывают на существование двух основных групп гамма-всплесков: коротких, $t_{90} < 1.5$ с, и длинных с $t_{50} > 1.5$ с.

3. У Земли максимальный поток энергии всплесков достигает $10^{-4} - 10^{-3}$ эрг см^{-2} . Минимальный зарегистрированный поток зависит, разумеется, от чувствительности аппаратуры.

4. На временной шкале всплесков наблюдается тонкая структура – микровсплески. Так, в одном из наиболее упоминаемых всплесков, зарегистрированном 5 марта 1979 г. (резкий фронт 0.2 мс, большая пиковая интенсивность), наблюдалось 22 пульсации за 144 с. В этом случае в области локализации гамма-всплеска был обнаружен объект, излучающий в более мягких диапазонах, – остаток сверхновой N49, расположенный в Большом Магеллановом Облаке на расстоянии 55 кпс.

5. Отсутствие радио- или оптических всплесков, совпадающих по времени и координатам с гамма-всплесками.

6. Более сложен вопрос об энергетическом спектре всплесков. Из-за конечной разрешающей способности прибора и большого разброса спектров индивидуальных всплесков восстановить его однозначно не всегда представляется возможным. По данным ряда экспериментов, в частности BATSE, его весьма приближенно можно аппроксимировать двумя степенными функциями с перегибом при энергиях 0.1–1 МэВ (рис. 3).

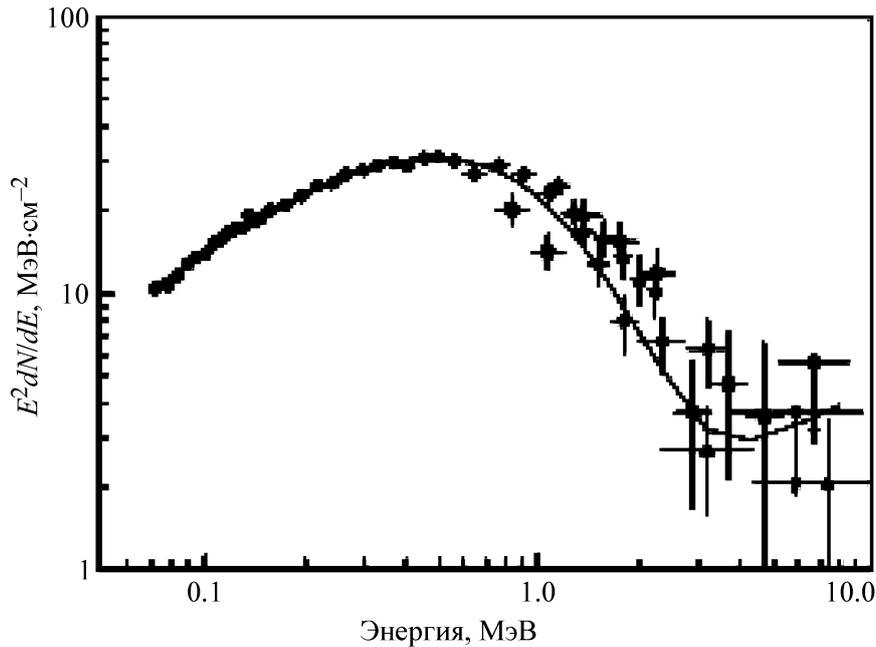


Рис. 3: Энергетический спектр гамма-всплеска GRB 910601, измеренный экспериментами OSSE, EGRET и COMPTEL обсерватории Комптон.

7. Особо стоит остановиться на зависимости числа всплесков от потока энергии в каждом всплеске. Для источников со стандартными светимостями L регистрируемый поток излучения F непосредственно связан с расстоянием до источника R :

$$F = \frac{L}{4\pi R^2}.$$

Если источники со светимостью $> L$ расположены в наблюдаемой области однородно с концентрацией n , то число всплесков с потоком $> F$ из области радиусом R равно

$$N(> F) = \frac{4\pi}{3} n R^3 = \frac{1}{6} \pi^{1/2} n \left(\frac{L}{F} \right)^{3/2}.$$

Поэтому, если зависимость $N(> F)$ соответствует закону “три вторых”, то это указывает на однородность пространственного распределения источников всплесков. Из-

вестно, что измеренная зависимость отклоняется от закона “три вторых” (рис. 4), следовательно, плотность источников неравномерна. Для более надежной проверки факта неоднородности распределения источников амма-всплесков был предложен тест, основанный на оценке среднего значения параметра V/V_{\max} . Объем V_{\max} соответствует полной наблюдаемой области для данного прибора в данной фоновой обстановке и зависит от порогового значения обнаружения всплеска F_{thr} . Объем V соответствует оценке расстояния до источника всплеска с измеренным потоком F . Отношение объемов

$$\frac{V}{V_{\max}} = \left(\frac{F_{thr}}{F} \right)^{3/2}$$

не зависит от собственной светимости источника. Величина V/V_{\max} вычисляется для каждого всплеска. Распределение гамма-всплесков по V/V_{\max} характеризует пространственное распределение их источников. Для стандартных свечей с однородной плотностью оно соответствует плоскому распределению со значениями от нуля (предел самых ярких всплесков) до единицы (всплески на пороге чувствительности). Среднее значение для однородного ансамбля должно быть равно $\langle V/V_{\max} \rangle = 0.5$. Измеренное значение для 601 всплеска эксперимента BATSE составляет $\langle V/V_{\max} \rangle = 0.328 \pm 0.012$ [7]. По сравнению с распределением для однородного случая в измеренном распределении имеется избыток ярких гамма-всплесков ($V/V_{\max} < 0.5$) или дефицит слабых всплесков ($V/V_{\max} > 0.5$).

Наиболее важным (и загадочным) фактом является седьмая особенность всплесков. В соответствии с первой характеристикой источники всплесков распределены на небесной сфере изотропно. Это обстоятельство исключает наиболее естественное их расположение – галактический диск, так как в этом случае в пространственном распределении должна быть неоднородность, а именно концентрация источников к галактическому экватору. Поэтому остаются четыре возможности:

- 1) Периферия Солнечной системы (> 100 а.е. и < 120 а.е.).
- 2) Расположение источников в Галактике, но на расстоянии, меньшем ее поперечного размера (< 100 пс).
- 3) Расположение источников на расстоянии, существенно превышающем размеры Галактики (протяженное сферическое гало, > 100 кпс).
- 4) Метагалактические (космологические) расстояния ($> 10^3$ Мпс).

Обычно в последнем случае расстояние измеряют в терминах космологического красного смещения Z спектров источников.

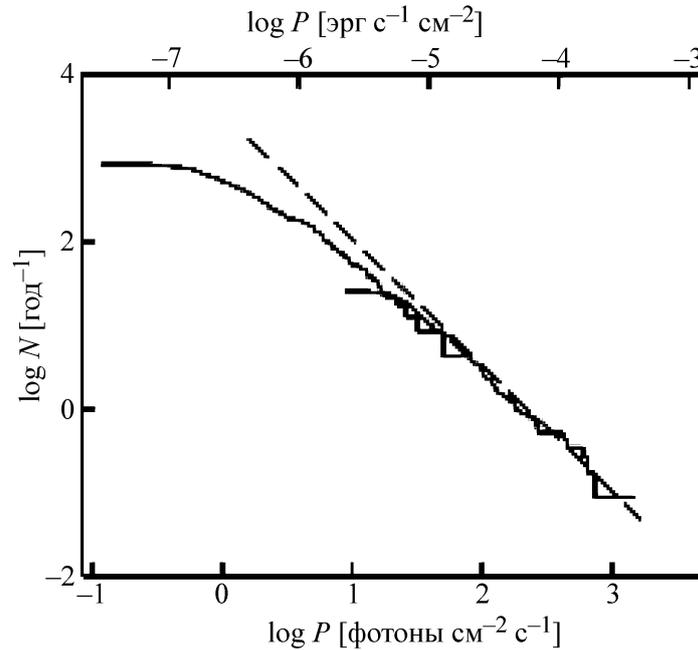


Рис. 4: Статистика подсчетов гамма-всплесков с потоками выше заданного для событий PVO (1) и BATSE (2). Штриховая линия соответствует закону “три вторых”.

Наблюдения, проведенные наземными телескопами и космическим детектором Хаббл, отождествили некоторые GRB как вспышки далеких объектов с большим параметром красного смещения ($Z \geq 1$), свечение которых медленно убывало [3]. Однако такие GRB, названные космологическими, составляли только 40% всех гамма-всплесков.

Оставалось совершенно непонятно, что представляют собой остальные всплески и каковы их источники. Нами рассмотрена возможность расположения источников в Галактике, но на расстоянии меньшем 100 пс. А точнее, это звезды ближнего окружения ($r < 25$ пс). Давно предполагалось, что вспыхивающие звезды малых масс и спектральных классов G, K, M могут быть источниками GRB [5, 8].

Корреляционный анализ положений гамма-всплесков и близких звезд. Наблюдения наземных телескопов и космического телескопа Хаббл позволили отождествить некоторые GRB с далекими объектами (красное смещение $Z \geq 1$), яркость которых медленно убывала со временем. Однако такие космологические GRB составляли только 40% всех наблюдаемых всплесков. Природа источников остальных всплесков остаётся неясной. Нами рассмотрена возможность близких источников, какими могут быть звезды спектральных классов G, K, M , известных как вспыхивающие звезды малых масс.

Координаты GRB, зарегистрированных в 2008–2013 гг. космическими аппаратами Swift, Integral, Fermi и Maxi, сопоставлялись с близкими звездами спектральных классов G, K, M из каталога Gliese [6]. Для уменьшения числа случайных наложений брались звезды с параллаксом $\Pi > 0.04$, что соответствует их расстоянию $r < 25$ пс.

Космологические гамма-всплески, которые могли совпасть со звездами только случайным образом, могут служить в этом методе критерием сравнения. Совпадение координат GRB и звезд определялось по малости отклонения

$$\Delta l = (\Delta\alpha^2 + (\sin \delta \Delta\delta)^2)^{1/2},$$

где $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ – угловые разности по прямому восхождению и склонению гамма-всплеска и соответствующих координат звезды. Результаты приведены в табл. 1, показывающей отклонения Δl по мере их возрастания.

Т а б л и ц а 1

Число гамма-всплесков, координаты которых совпали с координатами близких звёзд в пределах соответствующего отклонения Δl

Δl°	0- 0.05	0.05- 0.10	0.10- 0.15	0.15- 0.20	0.20- 0.25	0.25- 0.30	0.30- 0.35	0.35- 0.40	0.40- 0.45
Звездные (без Z)	2	2	2	1	3	1	3	1	4
Космологические ($Z \geq 1$)	0	0	0	0	1	1	3	0	1

Как видно, найденные 6 звездных гамма-всплесков распределены приблизительно поровну в интервалах от 0 до 0.15° . В этих интервалах космологических всплесков нет. Они появляются, начиная с $\Delta l = 0.2^\circ$, и численно возрастают, что определенно указывает на фон случайных наложений. При дальнейшем увеличении значения Δl возрастает и общее количество совпадений, что, очевидно, не имеет никакого отношения к звездным гамма-всплескам.

Можно дать оценку случайной вероятности шести найденных совпадений. Среднее значение $\Delta l = 0.1^\circ$, что находится в полном согласии с угловой точностью детекторов указанных космических аппаратов Swift, Integral, Fermi и Maxi.

Площадь совпадения составляет $\sigma_{\text{coin}} = \pi 0.1^2 = 0.0314$ квадратного градуса. Число звезд и гамма-всплесков, учтенных при сопоставлении каталогов всплесков и близких звёзд, $N_{\text{star}} = 470$ и $N_\gamma \approx 500$. Полное число квадратных градусов по всей небесной сфере составляет $\Omega = 41253$ кв. градус. Тогда число случайных совпадений $N_{\text{acc.coin}} = N_{\text{star}} \cdot N_\gamma \cdot \sigma_{\text{coin}} / \Omega = 0.18$.

Пуассоновская вероятность случайного появления 6 совпавших событий составляет $W = e^{-0.18} \cdot 0.18^6 / 6! = 4 \cdot 10^{-8}$.

Становится очевидным, что дополнительным источником, альтернативным космологическим ($Z \geq 1$), являются звезды ближнего солнечного окружения. Число найденных совпадений звезд с гамма-всплесками еще очень мало для того, чтобы сделать определенное заключение об их вкладе в общую сумму космических GRB. Поэтому, продолжая поиск гамма-всплесков от звезд проведенным методом, необходимо найти способ исследования далеких звездных источников ($r > 25$ пс) – более узкой и, по-видимому, малочисленной популяции.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] О. Ф. Прилуцкий, И. Л. Розенталь, В. В. Усов, УФН **116**, 517 (1975).
- [2] Б. И. Лучков, И. Г. Митрофанов, И. Л. Розенталь, УФН **166**, 743 (1996).
- [3] К. А. Постнов, УФН **169**, 545 (1999).
- [4] van Paradijs, P. J. Groot et al., Nature **386**, 686 (1997).
- [5] Р. Е. Гершберг, *Вспыхивающие звезды малых масс* (М., Наука, 1985).
- [6] W. Gliese and H. Jahress, Catalogue of Nearby Stars (ARICNS database) <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/star-catalog/cns3.html>.
- [7] Francesco Calura, Proceedings IAU Symposium No. 255, 119 (2008), <http://arxiv-web3.library.cornell.edu/pdf/0904.2206.pdf>.
- [8] Johan P. U. Fynbo, Daniele Malesani, Proceedings IAU Symposium No. 250, 119 (2008), <http://arxiv.org/pdf/0811.3897.pdf>.
- [9] С. С. Герштейн, Письма в Астрон. ж. **26**(11), 848 (2000).

Поступила в редакцию 23 января 2014 г.