

П И С Ь М А В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 70, ВЫПУСК 7
10 ОКТЯБРЯ, 1999

Письма в ЖЭТФ, том 70, вып.7, стр.417 - 421

© 1999г. 10 октября

О ПРОИСХОЖДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

И.Л.Розенталь, Б.А.Трубников

*Институт космических исследований РАН
117810 Москва, Россия*

*Российский научный центр "Курчатовский институт"
123182 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 4 марта 1999 г.

После переработки 1 сентября 1999 г.

Как известно, распределение числа космических гамма-всплесков (КГВ) по их длительности имеет два максимума, и в данной работе предполагается, что длительные, но менее мощные КГВ возникают при слиянии двух нейтронных звезд с рассмотренной ниже генерацией магнитного поля, а более краткие КГВ могут возникать при столкновениях черной дыры либо с нейтронной звездой либо с другой черной дырой.

PACS: 98.70.Rz

1. Распределение космических гамма-всплесков (КГВ) по их длительности T показано на рис.1 из [1]. На рисунке видны два (а возможно и три) типа КГВ – короткие, с $T \sim 1$ с, и длинные, с $T \sim 10 - 100$ с. Более того, они отличаются и зависимостями мощности от их частоты, и наблюдается также определенная корреляция между средней энергией квантов и полной длительностью импульса – более мощные всплески характеризуются меньшей длительностью. По-видимому, это указывает на существование нескольких типов КГВ, и разумно предполагать, что в более мощных участвуют черные дыры (столкновения типа НН и НН), а менее мощные возникают при слиянии двух нейтронных звезд (NN-столкновения). Идея о том, что КГВ могут возникать при слияниях звезд типа NN и НН, высказывалась, например, в работах [2, 3].

В таблице указаны параметры некоторых КГВ¹⁾ (здесь $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ – красное смещение, D – болометрическое расстояние до источника²⁾, S – спектр или наблюдаемый поток энергии, E – истинная энергия взрыва, E_γ^{max} – максимальная энергия фотонов, T – длительность).

¹⁾ Смещение z , а по нему D и E начали определять лишь с 1997 г. после открытия оптических послесвечений КГВ, поэтому для первых трех КГВ параметры z , D , E не известны.

²⁾ Здесь $D = (2cz/H\Omega)[1 - (2 - \Omega)(1 + \sqrt{1 + z\Omega})^{-1}]$, $E = 4\pi D^2 S/(1+z)$, $\Omega = 0, 3$, $H = 65$ км/сМпс.

Столкновения типа НН и НН с участием черных дыр, как можно предполагать, должны быть более краткими, так как в них проявляются более мощные гравитационные силы. И по-видимому, максимальная энергия гамма-квантов E_{γ}^{max} в них выше, чем в NN-столкновениях, хотя, например, в необычно длительном КГВ от 17 февраля 1994 г. с $T = 90$ мин наблюдались кванты с $E_{\gamma}^{max} = 18$ ГэВ.

Всплеск	z	D [Мпс]	S [эрг/м ²]	E [эрг]	E_{γ}^{max} [ГэВ]	T [с]
GRB 910503	нет	нет	$E^{-2,2}$	нет	10	84
GRB 910601	дан- ных	дан- ных	$E^{-3,7}$	дан- ных	0,314	200
GRB 930131	дан- ных	дан- ных	$E^{-2,0}$	дан- ных	1,2	100
GRB 970508	0,24	1217	0,35	$5 \cdot 10^{51}$	—	—
GRB 971214	3,4	31164	0,032	$3 \cdot 10^{53}$	—	—
GRB 980329	5	52519	0,075	$2 \cdot 10^{54}$	—	—
GRB 980425	0,009	42	0,6	10^{49}	—	—
GRB 980703	1	6328	2,6	10^{54}	—	—
GRB 990123	1,61	11473	2,4	$3 \cdot 10^{54}$	—	—

Из рис.1 видно, что число длительных КГВ больше, чем кратких, и, вероятно, это указывает на то, что число нейтронных звезд во Вселенной примерно в 100 раз превышает число черных дыр, которые могут состоять из кварков и глюонов. Любопытно отметить также, что указанные в таблице высокоэнергетические степенные спектры гамма-квантов типа $dN_{\gamma}/dE \sim E^{-\alpha}$ с показателем $\alpha \sim 2 - 3$ близки к спектру космических лучей с показателем $\alpha \approx 2,75$. Так что возможно, что КГВ являются источниками и космических лучей. Заметим, что в нашей Галактике открыты три тесные NN пары, которые постепенно сближаются, теряя энергию на излучение гравитационных волн, и по оценкам могут вызвать близкий к нам КГВ за время 10 - 100 тыс. лет.

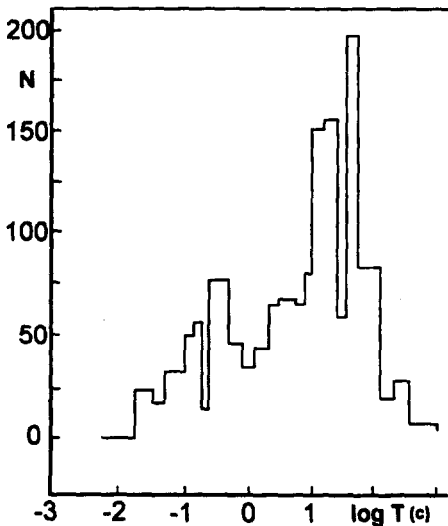


Рис.1. Распределение числа ГВ по их длительности T (выборка из 400 ГВ)

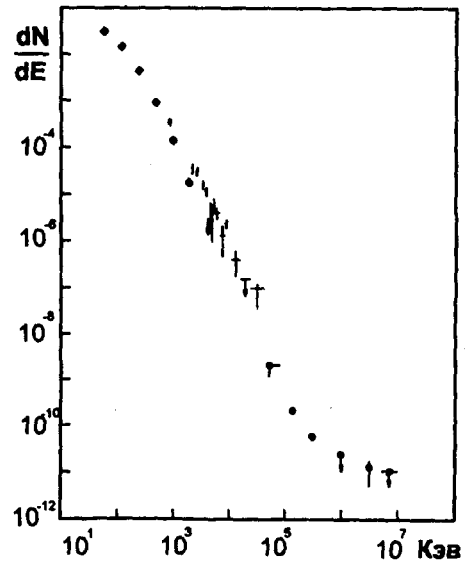


Рис.2. Энергетический спектр ГВ из работы [6] (dN/dE - число фотонов/кэВ·с·см²)

2. Возникновение гамма-всплесков (ГВ) в NN-столкновениях может объяснить гипотеза генерации магнитного поля, предложенная в [4,5]. Здесь мы подробнее рас-

смотрим соответствующие механизмы. В [4] считается, что магнитное поле B с плотностью энергии $w = B^2/8\pi$ со скоростью света "вытекает" из шара с поверхностью $S = 4\pi R^2$, что дает мощность

$$W = cwS = c(BR)^2/2 = 1,5 \cdot 10^{52} (B/10^{15} \text{ Гс})^2 (R/10 \text{ км})^2 \text{ эрг/с.} \quad (1)$$

Например, при поле $B \sim 10^{15}$ Гс такой механизм за 20 с даст полную энергию $E = 3 \cdot 10^{53}$ эрг, которая, в частности, выделилась в ГВ от 14 декабря 1997 г. (GRB 971214). По нашему мнению, однако, здесь работает несколько иной механизм, и магнитное поле не просто "в готовом виде" вытекает из шара, а непрерывно генерируется в процессе разбрызгивания плазмы сталкивающихся вращающихся звезд. Рассмотрим этот процесс подробнее.

Генерация магнитного поля описывается уравнением магнитной гидродинамики $\partial \mathbf{B}/\partial t = \text{rot}[\mathbf{v}\mathbf{B}]$. Далее будем пользоваться сферической системой координат r, ϑ, φ и для простоты считать, что магнитные полюсы находятся на оси вращения шарообразной звезды с радиусом R . Предполагаем, что ее вращение увлекает окружающую плазму так, что φ -тая компонента скорости плазмы вне звезды равна $v_\varphi = r\Omega \sin \vartheta f(r)$, где $f(r)$ — спадающая функция радиуса, удовлетворяющая условию $f = 1$ на поверхности шара $r = R$. Вращение начинается в момент $t = 0$, при котором начальное магнитное поле, "вмороженное" в плазму, было чисто дипольным и имело компоненты

$$B_r^0 = B_o(R/r)^3 \cos \vartheta, \quad B_\vartheta^0 = (B_o/2)(R/r)^3 \sin \vartheta, \quad B_\varphi^0 = 0. \quad (2)$$

где B_o — значение поля на полюсах. Решая указанное выше уравнение генерации, нетрудно найти, что две полоидальные компоненты магнитного поля $B_{r,\vartheta}^0$ не меняются, а φ -тая компонента поля нарастает линейно со временем по закону

$$B_\varphi = B_o \Omega t \sin \vartheta \cos \vartheta F, \quad F = R^3 r^{-2} df/dr, \quad (3)$$

и уже после нескольких оборотов с периодом $\tau = 2\pi/\Omega$ будет больше, чем полоидальные компоненты. Пренебрегая последними, найдем, что плотность магнитной энергии в окружающей звезду плазме нарастает по закону $w \approx B_\varphi^2/8\pi \sim t^2$, и полная магнитная энергия во всем пространстве вне звезды будет нарастать по закону

$$E = \int w dV = \frac{\pi}{5} V_o (B_o N_{\text{об}})^2 C, \quad (4)$$

где $V_o = (4/3)\pi R^3$ — объем звезды, $N_{\text{об}} = t/\tau$ — число оборотов звезды с момента начала вращения, а $C = R^3 \int_0^\infty (df/dr)^2 dr$ — безразмерный множитель. Если функция f спадает по степенному закону $f = (R/r)^n$, то $C = n^2/(2n-3)$ и, например, при $n = 3$ имеем $C = 3$, а при $n = 6$ имеем $C = 4$. Приблизительно можно использовать формулу $E \approx 2V_o (B_o N_{\text{об}})^2$.

В момент сближения двух нейтронных звезд их орбитальные скорости могут быть порядка скорости света. И, например, при $v = c/2$ период взаимного вращения составит $\tau \approx 2 \cdot 10^{-4}$ с. При радиусе звезды $R = 10$ км ее объем равен $V_o = 4 \cdot 10^{18}$ см³, и при начальном магнитном поле на полюсах $B_o = 10^{12}$ Гс магнитная энергия, равная энергии покоя Солнца $E \approx M_\odot c^2 = 1,8 \cdot 10^{54}$ эрг, будет создана за $5 \cdot 10^5$ оборотов, то есть за 100 с, что по порядку величины соответствует "длительным" ГВ.

3. Механизм возникновения гамма-квантов из найденного выше магнитного поля, по нашему мнению, может заключаться в следующем. Поле B_φ порождается токами $j_{\rho,\vartheta}$, в частности, в нашей модели имеем $j_\vartheta = C(R/r)^{n+4} \sin 2\vartheta$, где $C = -n(n+2)cB_o\Omega t/8\pi R$. Компонента j_ϑ максимальна при $\vartheta = 45^\circ$, и через всю

поверхность этого конуса протекает ток $J = (n/4\sqrt{2})cRB_o\Omega t$. При $n = 5$, $R = 10$ км, $B_o = 10^{12}$ Гс численно в амперах имеем ток $J = 5,5 \cdot 10^{19} N_{об}$ А, который вследствие неустойчивости может разбиваться на отдельные токовые нити (филаменты) с относительно малыми токами J_1 , обрываемые нарастающими перетяжками. Многочисленные непрерывные обрывы токовых нитей должны приводить к появлению потоков ускоренных частиц, как это происходит и в лабораторных плазменных пинчах. В работе [3] показано, что энергетический спектр ультрарелятивистских частиц, ускоряемых при обрывах перетяжек плазменного пинча с током J_1 , описывается формулой

$$dN_p/d\varepsilon = (C_o/\varepsilon) \exp[-(\varepsilon/\varepsilon_o)], \quad (5)$$

где C_o и $\varepsilon_o = (e/c)J_1$ — постоянные.

Величину C_o трудно оценить, поскольку она определяется совокупностью всех многочисленных обрывов токовых нитей, но примерно такой же спектр должен возникать и для гамма-квантов, порождаемых столкновениями частиц. Так, на рис.2 из [6] показан экспериментально зарегистрированный спектр одного из ГВ, и весьма любопытно, что сами авторы [6] указывают, что в области энергий квантов 40 кэВ — 3 МэВ он хорошо аппроксимируется формулой

$$dN_\gamma/dE = 0,02(100/E)^{1,2} \exp[-(E/E_o)] \text{ [фотонов} \cdot \text{кэВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}], \quad (6)$$

где энергия фотонов E измеряется в кэВ и $E_o = 900$ кэВ. Этот спектр практически совпадает с формулой (5), что также может свидетельствовать в пользу механизма "магнитной генерации", предлагаемого нами для NN-столкновений.

Однако, возможен и другой, рассмотренный ниже, механизм формирования энергетического спектра гамма-квантов КГВ.

4. Спектр КГВ в модели "файрбола". Описанное выше представление о нитевидной структуре обрывающихся токов и образуемых ими многочисленных разнонаправленных тонких пучков частиц помогает понять природу многочисленных микро-всплесков, из которых состоит каждый ГВ. Сходные последовательности микроимпульсов наблюдаются, как известно, и в каждом импульсе радиопульсаров, излучение которых обладает "карандашной" (точнее "конусной") диаграммой направленности. Однако экспериментальное значение параметра $E_o = 900$ кэВ в формуле (6) по нашей модели должно было бы соответствовать току в нитях (филаментах) $J_1 = (c/e)E_o = 3 \cdot 10^4$ А, который представляется слишком малым, так что соответствие с моделью является лишь качественным.

Скорее всего, экспериментальный параметр $E_o = 900$ кэВ соответствует температуре термодинамически равновесной среды, состоящей из электронно-позитронных пар и фотонов с энергией, близкой к значению $m_e c^2 = 511$ кэВ. В работе [7] была рассмотрена гидродинамика разлета огненного шара — "файрбола" из электронно-позитронных пар и фотонов и показано, что спектр его излучения должен описываться формулой:

$$\frac{dN_\gamma}{dE} = \frac{\text{const}}{2\Gamma} \int_{E/2\Gamma}^{\infty} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon[\exp(\varepsilon/kT) - 1]} \approx \frac{\text{const}}{E} \exp(-\frac{E}{2\Gamma kT}). \quad (7)$$

(Разлет файрбола рассматривался и ранее в ряде работ других авторов, однако такая формула спектра ими не приводилась.) Здесь Γ — лоренц-фактор макроскопического движения газа, и эта формула также находится в качественном согласии с экспериментальным спектром (6), однако в модели строго изотропного разлета трудно объяснить микровсплески, из которых состоит каждый отдельный КГВ.

По мнению авторов, предположение о различной природе длительных и кратких КГВ может объяснить некоторые их особенности а также дать сведения о числе нейтронных звезд и черных дыр во Вселенной.

Дополнение после рецензии

Данная работа довольно долго находилась на рецензии, и мы благодарны рецензенту, указавшему нам на работы [8, 9] (появившиеся после того, как наша статья была послана в печать), в связи с чем хотим сделать ряд замечаний.

В препринте [8] авторы разделяют все ГВ не на две, а на три группы по их длительности T : – краткие однопиковые (short $T < 0.1$ s), средние (meadle $0.1 < T < 1$ s) и длинные (long $T > 1$ s) и указывают, что графики "logN-logS" для средних и длинных ГВ отклоняются от "закона $3/2$ ", что, по-видимому, указывает на космологическую удаленность таких ГВ.

Однако для кратких ГВ график близок к "закону $3/2$ ", что может свидетельствовать об их локальном расположении, а следовательно, сравнительно малой энергии таких всплесков. По мнению авторов [8], эти ГВ могут порождаться в процессе быстрого испарения "первичных" черных дыр малой массы, состоящих из кварк-глюонной плазмы (по нашей гипотезе из нее же состоят большие черные дыры звездной массы). Однако анализируемое в [8] число кратких ГВ весьма мало (~ 20), так что вывод об их локальном расположении можно рассматривать лишь как предварительный. Кроме того, большинство исследователей полагает, что первичные черные дыры вряд ли могли сохраниться до нашей эпохи.

В обзоре [9] автор отмечает ряд тонких, но существенных особенностей ГВ, которые, по нашему мнению, можно объяснить в рамках нашей модели с магнитной генерацией ГВ, а именно:

а) оценки показывают, что в типичном ГВ рождается сравнительно мало ультрарелятивистских бозонов ($\sim 10^{-5} M$), и наша модель удовлетворяет этому требованию, поскольку число ускоряемых протонов невелико;

б) энергия ГВ выделяется не мгновенно одноразовым образом (как это предполагается в теории фэйрбола), а постепенно, и обе наши гипотезы могут это объяснить;

в) типичный ГВ состоит из набора многих микровсплесков, что в нашей модели можно объяснить последовательностью обрывов токовых "микрорпинчей" в расширяющемся объеме плазменного облака ГВ;

г) требуется объяснить, как именно энергия взрыва передается фотонам, и наша модель, где в обрывающихся токовых пинчах рождаются пучки ультрарелятивистских частиц, последующие столкновения которых с основной плазмой дают тормозное излучение, может это объяснить.

В заключение авторы выражают признательность А. А. Старобинскому за обсуждение данной работы.

-
1. Б.И.Лучков, И.Г.Митрофанов, И.Л.Розенталь, УФН **166**, 743 (1996).
 2. С.И.Блинные, И.Д.Новиков, Т.В.Переводчикова, А.Г.Полмарев, Письма в АЖ **10**, 177 (1984).
 3. В.Пaczynski, Acta Astronomica **41**, 257 (1991).
 4. В.Пaczynski, Astroph. J. L. **494**, №1, part 2, 45 (1998).
 5. Б.А.Трубников, УФН **167**, 345 (1997).
 6. К.Hurley, В.Dingus, R.Mukherjee et al., Nature **372**, 652 (1994).
 7. I.Belousova, I.L.Rozental, Astr. Space. Sc. **249**, 117 (1997).
 8. D.B.Cline, C.Matthey, S.Otvinovski et al., Astro-ph/9905346 26 May, 1999.
 9. К.А.Постнов, УФН **169**, 545 (1999).