

УДК 52.6

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

Ф.А. Уртьев

PHYSICAL PARAMETERS OF GAMMA BURSTS

F.A. Urtiev

Исследуются физические параметры гамма-всплесков применительно к численному и компьютерному моделированию излучения гамма-всплесков. Рассматривается вопрос о возможности определения усредненных параметров источника гамма-всплесков на основе статистического анализа большого количества наблюдаемых спектров интенсивности излучения.

Physical parameters of gamma-ray bursts (GRBs) with reference to numerical and computer modelling of GRB radiation are investigated. The question is considered of a possibility for determining of the average parameters of a GRB source using the statistical analysis of a large number of observable spectra of radiation intensity.

Введение

Космологические гамма-всплески (gamma-ray bursts, GRB) это короткие интенсивные вспышки гамма-излучения, происходящие, в среднем, несколько раз в день во Вселенной. За несколько секунд они полностью заполняют своим излучением обычно темную в гамма-диапазоне Вселенную. В момент вспышки гамма-всплеск затмевает все другие источники гамма-излучения на небе включая Солнце. Это наиболее сконцентрированные и яркие электромагнитные взрывы во вселенной. Первый значимый шаг на пути к пониманию природы гамма-всплесков был сделан в 1991г., когда был запущен спутник-обсерватория Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO), чьи результаты собраны в [1]. Круговой обзор неба прибором BATSE, установленным на CGRO, показал, что гамма-всплески распределены по небу практически изотропно (рис. 1) и расположены на космологических расстояниях. До недавнего времени излучение от гамма-всплесков не детектировалось в других диапазонах длин волн, кроме гамма-излучения, которое давало плохую информацию о координатах всплеска и, следовательно, делало невозможным определение места во Вселенной, где произошел всплеск. Ситуация изменилась в 1997 г., когда со спутника Верро-SAX наблюдался всплеск в рентгеновском диапазоне, что позволило существенно уточнить положение источника на небе для большого наземного телескопа и продолжить наблюдения с его помощью. Оказалось, что источники гамма-всплесков расположены от нас на космологических расстояниях, сравнимых с расстояниями до наиболее удаленных

квazarов и галактик, известных во Вселенной. Даже несмотря на огромные расстояния (до 10^{28} см), они светят намного ярче галактик и квазаров, что требует затраты огромных энергий. Их электромагнитная энергия, которая высвобождается за десятки секунд, сравнима с энергией, которую Солнце излучило бы за все время существования Вселенной. Существующее объяснение того, как происходят выбросы таких огромных энергий, предполагает высвобождение соответствующего количества гравитационной энергии, примерно равной массе покоя Солнца, за очень короткий промежуток времени (секунды или меньше) в очень малой области пространства (около тысячи километров) во время коллапса массивных звезд или слияния двух компактных звезд. Основная часть энергии высвобождается в первые секунды в виде горячих нейтрино, а остальная часть может быть излучена гравитационными волнами. Внезапное высвобождение энергии приведет к образованию очень горячей огненной оболочки (фаербол), расширяющейся с релятивистскими скоростями, в которой идут процессы внутренней диссипации, выражающиеся в гамма-излучении. Затем образуются ударные волны при торможении о внешнюю среду по мере распространения в пространстве и происходит заметно более слабое послесвечение. В результате электромагнитное излучение такого события составляет не более процента от общего выброса энергии. Хорошая особенность этого теоретического сценария гамма-всплеска состоит в том, что он успешно предсказывает множество наблюдаемых свойств гамма-всплеска. Сценарий фаерболы и модель взаимодействия ударных волн при образовании послесвечения в значительной мере проверены наблюдениями и стали главными в нашем понимании гамма-всплесков [2].

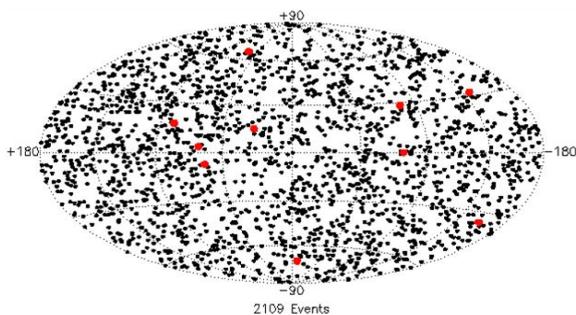


Рис. 1. Источники гамма-всплесков распределены по небу изотропно. Черными точками показаны события гамма-всплесков, (2109 событий).

Наблюдательные данные о гамма-всплесках

Феноменология гамма-излучения в гамма-всплесках была детально изучена при помощи инструмента BATSE в составе спутника Compton GRO [1]. Спектр испускаемого гамма-излучения нетепловой, обычно хорошо фитируемый в диапазоне нескольких МэВ двумя соединенными сте-

пенными законами, причем максимум излучения лежит в диапазоне 50–500 кэВ (см. рис. 2). Для анализа наблюдательные спектры, усредненные по времени, фитируются аппроксимационной функцией. Бэнд (Band) предложил использовать в качестве такой функции [3] два плавно соединенных степенных закона:

$$N_E(E) = A \left(\frac{E}{100\text{keV}} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right)$$

при $(\alpha - \beta)E_0 \geq E$,

$$N_E(E) = A \left(\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100\text{keV}} \right)^{\alpha - \beta} \exp(\beta - \alpha) \left(\frac{E}{100\text{keV}} \right)^\beta$$

при $(\alpha - \beta)E_0 < E$.

Функция Бэнда зависит от четырех независимых параметров: α , β , E_0 и A . Одна из соединенных степенных функций имеет показатель спектра α , а другая – β . Также фитирующая функция характеризуется энергией E_0 , при которой соединяются эти два степенных закона, и нормировкой A . Большинство наблюдательных спектров, усредненных по времени и полученных с инструмента BATSE, хорошо фитируются упомянутой функцией Бэнда. На данный момент доступны гистограммы распределения параметров α , β и E_0 , полученные после фитирования наблюдаемых усредненных по времени спектров нескольких тысяч событий гамма-всплесков (рис. 3). Продолжительность гамма-излучения меняется в диапазоне от 10^{-3} до примерно 10^3 с и разделяется на длинные всплески длительностью больше 2 с и короткие меньше 2 с [4]. Кривые блеска гамма-излучения меняются от гладких, быстрорастущих и квазиэкспоненциально спадающих кривых с несколькими пиками до кривых с множеством пиков. Усредненный по телесному углу поток составляет от 10^{-4} эрг/см² до 10^{-7} эрг/см², хотя указанный нижний предел является скорее характеристикой детектора, а не самой вспышки. Это соответствует значениям изотропной светимости 10^{51} – 10^{52} эрг/с. Однако сегодня известно, что большинство гамма-всплесков являются узконаправленными, т. е. излучают в узком диапазоне энергий вблизи 10^{51} эрг [5]. Такие энергии сравнимы с полными энергиями излучения сверхновых.

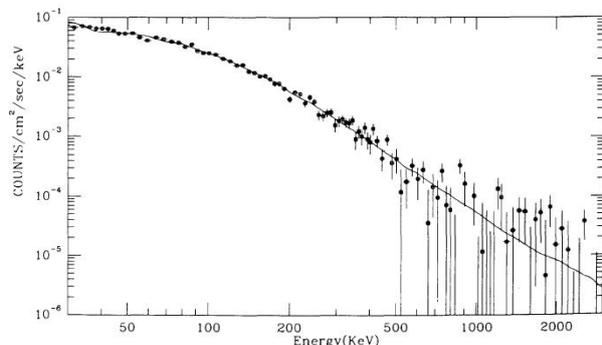


Рис. 2. Пример фитирования спектра вспышки GRB 911127 BATSE [1]. Здесь $\alpha = -0.968$, $\beta = -2.427$ и энергия среза $E_0 = 149.5$.

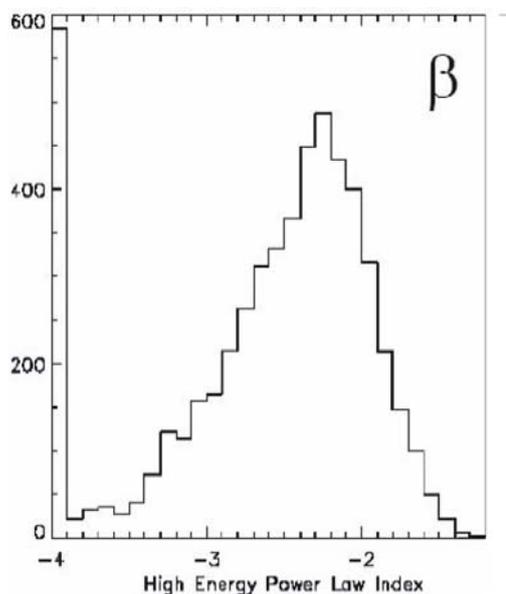
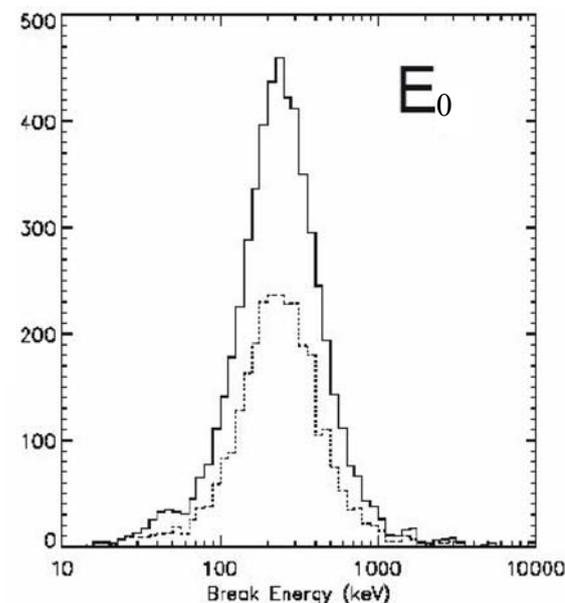
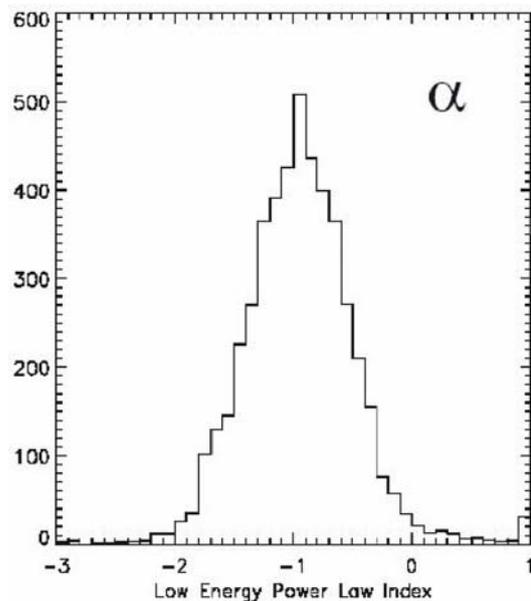


Рис. 3. Гистограммы распределений параметров функции Бэнда α , β и E_0 .

Общие оценки параметров гамма-всплесков

Требование оптической прозрачности гамма-всплеска для высокоэнергичных фотонов позволяет определить нижнее предельное значение общего лоренц-фактора всего потока. Получилось два граничных значения. Первый предел является требованием того, чтобы оптическая толщина образования электрон-позитронных пар в источнике для фотонов с наивысшей наблюдаемой энергией ϵ_{\max} была меньше единицы. Второй предел получается из требования, чтобы томпсоновская оптическая глубина для $e\pm$ пар, которые создаются высокоэнергичными фотонами в источнике, не превышала единицу. Поставленным требованиям удовлетворяют $\Gamma > 100$ [6].

Параметрами, определяющими излучательное остывание электронов, являются напряженность магнитного поля B , и электронное распределение Лоренц-фактора γ_e . Оба этих параметра трудно оценить, исходя из первых принципов. Подход к решению этой проблемы состоит в использовании двух безразмерных параметров ϵ_B и ϵ_e . Безразмерный параметр ϵ_B показывает отношение плотности энергии магнитного поля к полной тепловой энергии e :

$$\epsilon_B = \frac{U_B}{e} = \frac{B^2}{8\pi e}$$

Слабые поля со значениями $\epsilon_B \ll 1$ противоречат наблюдениям GRBs. Разумными (соответствующими наибольшей эффективности процесса излучения) представляются значения $\epsilon_B \sim 0.01$ [7]. И передний, и задний фронты ударных волн могут иметь $\epsilon_B \ll 1$ при чистом замерзании потока без турбулентностей и они могут достигать $\epsilon_B \rightarrow 1$ в присутствии неоднородностей. В принципе, значения ϵ_B могут быть различны для переднего и заднего фронтов, но обычно это не учитывают в оценках. Второй параметр ϵ_e определяет долю полной тепловой энергии, которая заключена в хаотическом движении электронов:

$$\epsilon_e \equiv \frac{U_e}{e}$$

Считается, что тепловая энергия сразу за волной разделена в отношении $(1 - \epsilon_e) / \epsilon_e$ между протонами и электронами соответственно. Предполагается, что разделение происходит на масштабах, меньших по сравнению с временем остывания электрона. Диапазон значений безразмерной плотности хаотической энергии электронов разумно определить как: $m_e/m_p < \epsilon_e < 0.5$ [7]. Под эффективностью будем понимать эффективность, с которой две ударные волны преобразуют их тепловую энергию в наблюдаемое излучение. Общепринято следующее определение эффективности вспышки [8]:

$$\zeta \equiv E_\gamma / (E_k + E_\gamma),$$

где E_γ – энергия, излученная в основном выбросе; E_k – кинетическая энергия всплеска, сохраняющаяся на протяжении фазы послесвечения. Поскольку электроны приобретают хаотическое движение за счет разогрева ударным взаимодействием, можно сделать стандартное предположение, что они имеют степенное распределение по лоренц-факторам,

$$N(\gamma_e) \sim \gamma_e^{-p}$$

для $\gamma_e > \gamma_{e,\min}$. Мы требуем, чтобы $p < -2$, так что энергии не превосходят γ_e .

Для разумных значений эффективности значение относительной энергии электронов не должно быть много меньше единицы $\epsilon_e \leq 1$, а $\epsilon_B \leq 1$ в зависимости от того, какой механизм излучения ответственен за наблюдаемый МэВ-пик – синхротронное излучение или обратное комптоновское рассеяние [2].

Обсуждение

Рассмотренные особенности физических параметров гамма-всплесков следует принимать во внимание при проведении компьютерного моделирования вспышек и при численных расчетах. Представляет интерес компьютерное моделирование спектров гамма-всплесков на основании существующих представлений о механизме излучения во всплеске и статистический анализ распределений параметров функции Бэнда для большого числа всплесков, что, возможно, позволит получить более точные сведения о значениях физических параметров в источниках гамма-всплесков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fishman, G.J., Meegan, C.A. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1995. V. 33. P. 415.
2. Mezaros P. Reports on Progress in Physics, 2006.
3. Band D., et al. // Astrophys. J. 1993. V. 413, N 1. P. 281–292.
4. Kouveliotou C., Meegan C.A., Fishman G.J., et al. // Astrophys. J. 1993. V. 413. P. L101.
5. Piran, T., P. Kumar A., Panaitescu, and Piro L. // Astrophys. J. Lett. 2001. V. 560, P. L167.
6. Lithwick Y., Sari R. // Astrophys. J. 2001. V. 555, N 1. P. 540–545.
7. Paczynski B., Rhoads J. Radio transients from GRB, 1993.
8. Lloyd-Ronning N.M., Zhang B. // Astrophys. J. 2004. V. 613, N 1. P. 477–483.

СПбГПУ, Санкт-Петербург.