

PAZH.CLS 08.02.06

О ПЕРЕМЕННОСТИ ПОСЛЕСВЕЧЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ — ВОЗМОЖНОСТЬ ПЕРЕХОДА К НЕРЕЛЯТИВИСТСКОМУ ДВИЖЕНИЮ

© 2008 Р. А. Буренин*¹

¹Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12 февраля 2008 г.

В послесвечениях космических гамма-всплесков во многих случаях наблюдается переменность на временных масштабах $\delta t < t$. Известно, что излучение, которое рождается в головной ударной волне, образованной при взаимодействии ультррелятивистского выброса с окружающей межзвездной средой, не должно содержать такой переменности, в рамках простых моделей. Соответствующие ограничения установлены в работе (Иока и др., 2005) и в некоторых случаях не согласуются с наблюдениями. С другой стороны, если движение не является релятивистским, быстрая переменность послесвечения может быть объяснена гораздо проще.

В этой связи, обсуждаются различные оценки времени перехода к нерелятивистскому движению в источнике гамма-всплеска. Показано, что переход к нерелятивистскому движению должен происходить на масштабе наблюдаемого времени порядка десяти суток. В случае более высокой плотности окружающего вещества $\sim 10^2 - 10^4 \text{ см}^{-3}$ или звездного ветра $\dot{M} \sim 10^{-5} - 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$, переход к нерелятивистскому движению может происходить на временном масштабе порядка суток. Такие плотности вполне можно ожидать в областях звездообразования и вокруг массивных звезд Вольфа-Райе.

Ключевые слова: космические гамма-всплески — послесвечения — переменность

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям, в источниках гамма-всплесков происходит ультррелятивистское движение струи вещества, направленной на наблюдателя (см. обзоры Мессароса, 2002; Жанга и Мессароса, 2003; Пирана, 2005). Послесвечения гамма-всплесков, наблюдаемые в рентгеновском, оптическом и радио диапазонах, объясняются излучением возникающим на фронте ударной волны, образованной при взаимодействии выброса с веществом, окружающим источник. При этом, от однородной сферической ударной волны, которая движется внутри конуса с половинным углом раствора $\theta > \gamma^{-1}$, где γ — множитель Лоренца, невозможно получить переменной кривой блеска. Для удаленного наблюдателя переменность должна иметь временной масштаб $\delta t \sim t$.

Однако, переменность кривых блеска оптических послесвечений на временных масштабах $\delta t < t$ наблюдается во многих случаях. Наиболее известен гамма-всплеск 030329, послесвечение которого благодаря своей исключительной яркости было исследовано очень подробно (Буренин и др., 2003; Урата

и др., 2004; Липкин и др., 2004). Также, подобная переменность наблюдалась и в других случаях, когда удавалось получить подробные измерения кривой блеска: 021004 (см., например, Холланд и др., 2003; Берсиер и др., 2003; де Угарте Постиго и др., 2005), 050408 (де Угарте Постиго и др., 2007), 060526 (Дай и др., 2007; Хамитов и др., 2007) и другие.

Различные объяснения переменности послесвечений гамма-всплесков подробно разбираются в работе Иока и др. (2005), где также установлены ограничения на временные масштабы и амплитуду переменности послесвечений для различных моделей. Все они основаны на том, что при этом происходит ультррелятивистское движение выброса. В некоторых случаях ограничения, полученные при простых предположениях, нарушаются (Иока и др., 2005; Хамитов и др., 2007).

Однако, на самом деле, при более высоких значениях плотности вещества, окружающего источник, или при наличии плотного звездного ветра, движение вполне может становиться умеренно релятивистским на наблюдаемых временных масштабах. Например, в работе Дай и Лу (1999) обсуждается такая возможность для послесвечения гамма-всплеска 990123 и показано, что переход к нерелятивистско-

*Электронный адрес: rodion@hea.iki.rssi.ru

му движению на временном масштабе около 2.5 суток происходит при плотности окружающего вещества $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$. В этой работе не учитывается расширение струи в стороны после того, как начинает выполняться условие $\gamma < \theta^{-1}$ (Рoadс, 1997, 1999; Сари и др., 1999). Из-за расширения выброса, он собирает на своем пути больше вещества и тоmozится быстрее.

В этом сообщении обсуждаются различные оценки времени перехода к нерелятивистскому движению и показано, что оно вполне может быть порядка суток.

КОГДА ЗАКАНЧИВАЕТСЯ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКОЕ ДВИЖЕНИЕ?

Наиболее простая оценка времени перехода к нерелятивистскому движению t_{NR} с учетом расширения струи в стороны получена в работе Ваксмана и др. (1998):

$$t_{NR} \approx 27(E_{52}/n_1)^{1/3} \theta_{0.1}^{2/3} \text{ сут.}, \quad (1)$$

где E_{52} — «изотропная» энергия оболочки в единицах 10^{52} эрг/см^2 , n_1 — плотность числа частиц в среде, окружающей источник, в единицах см^{-3} , $\theta_{0.1} = \theta/0.1$ — угол раствора конуса, в который движется выброс.

Эта оценка получена из зависимости $\gamma(t)$ для адиабатической оболочки предполагая, что после начала расширения струи движение приближается к сферически симметричному и происходит согласно тем же решениям. По порядку величины она согласуется с другими оценками, которые можно получить из более полного рассмотрения динамики движения струи. Например, если струя начинает расширяться при $\gamma = \theta^{-1}$ то, учитывая, что после этого гамма-множитель зависит от наблюдаемого времени как $\gamma \propto t^{-1/2}$ (Рoadс, 1999), получим:

$$t_{NR} = t_j \theta^{-2}, \quad (2)$$

где t_j — время начала расширения струи. Если взять выражение для t_j из работы Сари и др. (1999), тогда $t_{NR} = 26 \text{ сут.}$, при тех же значениях параметров, что и выше.

В работе Рoadса (1999) предполагается, что расширение струи в ее системе покоя происходит со скоростью звука $c_s = c/\sqrt{3}$, а не со скоростью света. Соответственно, расширение струи начинается позже, при $\gamma \approx (3\sqrt{2}\theta)^{-1}$. Используя зависимость $\gamma(t)$ из этой работы и применяя такие же рассуждения, как выше, получим $t_{NR} = 25 \text{ сут.}$, для таких же значений параметров. В работе Панаитеску и Мессароса (1999) считается, что расширение струи также происходит со скоростью звука. При этом отмечается, что при $\theta > 0.1$ оболочка перестает быть релятивистской уже до начала расширения. В этой работе оценка t_{NR} выполнена явным образом. Переписывая ее в наших

обозначениях, получим для тех же значений параметров $t_{NR} = 6.1 \text{ сут.}$

Если учесть, что в первое время движение оболочки может не быть адиабатическим и она может терять существенную часть энергии на излучение, то оценка t_{NR} может существенно уменьшиться. Для синхротронного излучения движение должно быть излучательным если на ускорение электронов идет значительная часть энергии, которое вещество получает на фронте ударной волны, и если электроны охлаждаются быстро по сравнению с динамическим временем. Последнее всегда выполняется в начале движения оболочки. Выражение для энергии, которую надо использовать для расчетов последующего адиабатического движения, если вначале эволюция была излучательной, приведено в работе Сари и др. (1998). Подставляя эту энергию в (1), получим:

$$t_{NR,r} \approx 7.6 \epsilon_B^{-1/5} \epsilon_e^{-1/5} E_{52}^{4/15} \gamma_2^{-4/15} n_1^{-7/15} \theta_{0.1}^{2/3} \text{ сут.}, \quad (3)$$

где ϵ_B, ϵ_e — доли плотности энергии магнитного поля и ускоренных электронов за фронтом ударной волны, $\gamma_2 = \gamma_0/100$ — начальный гамма-множитель выброса. Эту оценку следует использовать, если предполагается, что $\epsilon_e \sim 1$, т.е. электроны ускоряются на фронте ударной волны эффективно.

Оценку t_{NR} для случая звездного ветра с плотностью, пропорциональной r^{-2} , можно взять из работы Ливио и Ваксмана (2000). Переписывая ее в наших обозначениях, получим:

$$t_{NR,w} \approx 5.7 E_{52} (\dot{M}_{-5}/v_3)^{-1} \theta_{0.1}^2 \text{ сут.}, \quad (4)$$

где \dot{M}_{-5} — скорость потери массы звездой в единицах $10^{-5} M_\odot/\text{год}$, v_3 — скорость ветра в единицах 10^3 км/с . Если электроны ускоряются эффективно и первое время движение оболочки излучательное, то эта оценка должна быть значительно меньше, так же, как и в случае среды постоянной плотности выше.

ОБСУЖДЕНИЕ

Из этих оценок видно, что даже при общепринятых значениях параметров наблюдаемое время перехода к нерелятивистскому движению имеет порядок десяти суток. Для того, чтобы это время было порядка суток требуется более высокая плотность окружающего вещества $n \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$ для адиабатической ударной волны, $n \sim 10^2 \text{ см}^{-3}$, если электроны на фронте ударной волны ускоряются эффективно и вначале оболочка излучательная, или требуется звездный ветер с $\dot{M} \sim 10^{-5} - 10^{-4} M_\odot/\text{год}$.

Повышенная плотность межзвездной среды вполне ожидается рядом с источниками гамма-всплесков, поскольку по-крайней мере большая их часть связана со вспышками сверхновых в конце

эволюции массивных звезд и происходит в областях усиленного звездообразования (см., например, обзор Вуслей и Блума, 2006, и ссылки в нем). Кроме того, массивные звезды в конце своей эволюции усиленно теряют вещество и должны быть окружены веществом собственного звездного ветра (например, Кроузер, 2007). Наличие ветра вокруг источников гамма-всплесков в некоторых случаях подтверждается экспериментально. Например, спектроскопия высокого разрешения послесвечения гамма-всплеска 021004, что источником была массивная звезда Вольфа-Райе, вокруг которой имелся ветер со скоростью истечения массы $\sim 10^{-4} M_{\odot} \text{ лет}^{-1}$ и скоростью разлета до 3000 км/с (Мирабаль и др., 2003; Лаззати и др., 2006).

Если движение уже не является релятивистским, быстрая переменность послесвечения, на временном масштабе $\delta t \ll t$, может быть объяснена, например, предполагая наличие неоднородностей плотности. Наличие таких неоднородностей также ожидаемо. Например, известно, что звездный ветер вокруг звезд Вольфа-Райе в высокой степени неоднороден и имеет клочковатое строение (Хаманн и Коестерке, 1998; Кроузер, 2007). Кроме того, время охлаждения в наблюдаемой оптической части спектра должно быть малым. Для синхротронного спектра на достаточно поздних стадиях эволюции ударной волны это выполняется (например, Сари и др., 1998).

Таким образом, действительно, переход к нерелятивистскому движению на масштабе наблюдаемого времени порядка суток вполне возможен, и в этом случае быстрая переменность послесвечений гамма-всплесков легко объясняется. Конечно, быстрая переменность послесвечений, при специальных предположениях, может быть объяснена и в случае ультрарелятивистской струи (Иока и др., 2005). Однако, переход к нерелятивистскому движению, по крайней мере, должен рассматриваться в качестве одного из возможных объяснений возникновения этой быстрой переменности. Для этого требуется наличие межзвездной среды более высокой плотности или плотного звездного ветра, которые ожидаются в областях звездообразования и вокруг массивных звезд Вольфа-Райе.

Автор выражает благодарность анонимному рецензенту, который сделал ряд очень существенных замечаний относительно содержания статьи. Работа поддержана грантами РФФИ 05-02-16540, РФФИ 07-02-01004, НШ-1100.2006.2, МК-4064.2005.2, а также программами Российской академии наук П-04 и ОФН-17.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берсиер и др.* (D. Bersier, K. Z. Stanek, J. N. Winn, T. Grav, M. J. Holman, T. Matheson, *et al.*), *Astrophys. J. (Letters)* **584**, L43 (2003).
- Р. А. Буренин, Р. А. Сюняев, М. Н. Павлинский, Д. В. Денисенко, О. В. Терехов, А. Ю. Ткаченко, и др.*, Письма в Астрон. журн. **29**, 649 (2003) (*Astronomy Letters* **29**, 573 (2003)).
- Ваксман и др.* (E. Waxman, S. R. Kulkarni, D. A. Frail), *Astrophys. J.* **497**, 288 (1998).
- Вуслей и Блум* (S. E. Woosley, J. S. Bloom), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **44**, 507 (2006).
- Дай и Лу* (Z. G. Dai, T. Lu), *Astrophys. J. (Letters)* **519**, L155 (1999).
- Дай и др.* (X. Dai, J. P. Halpern, N. D. Morgan, E. Armstrong, N. Mirabal, J. B. Haislip, D. E. Reichart, and K. Z. Stanek), *Astrophys. J.* **658**, 509 (2007).
- де Угарте Постуго и др.* (A. de Ugarte Postigo, A. J. Castro-Tirado, J. Gorosabel, G. Jóhannesson, G. Björnsson, E. H. Gudmundsson, *et al.*), *Astron. Astrophys.* **443**, 841 (2005).
- де Угарте Постуго и др.* (A. de Ugarte Postigo, T. A. Fatkhullin, G. Jóhannesson, J. Gorosabel, V. V. Sokolov, A. J. Castro-Tirado, *et al.*), *Astron. Astrophys. (Letters)* **462**, L57 (2007).
- Жанг и Месцарос* (B. Zhang, P. Mészáros), *International Journal of Modern Physics A* **19**, 2385 (2003).
- Иока и др.* (K. Ioka, S. Kobayashi, B. Zhang), *Astrophys. J.* **631**, 429 (2005).
- Кроузер* (P. A. Crowther), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.*, in press (2007); astro-ph/0610356.
- Лаззати и др.* (D. Lazzati, R. Perna, J. Flasher, V. V. Dwarkadas, F. Fiore), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **372**, 1791 (2006).
- Ливьо и Ваксман* (M. Livio, E. Waxman), *Astrophys. J.* **538**, 187 (2000).
- Липкин и др.* (Y. M. Lipkin, E. O. Ofek, A. Gal-Yam, E. M. Leibowitz, D. Poznanski, S. Kaspi, *et al.*), *Astrophys. J.* **606**, 381 (2004).
- Месцарос* (P. Meszaros), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **40**, 137 (2002).
- Мирабаль и др.* (N. Mirabal, J. P. Halpern, R. Chornock, A. V. Filippenko, D. M. Terndrup, E. Armstrong, *et al.*), *Astrophys. J.* **595**, 935 (2003).

Панаитеску и Месцарос (A. Panaitescu, P. Mészáros),
Astrophys. J. **526**, 707 (1999).

Пирани (T. Piran), Rev. Mod. Phys. **76**, 1143 (2005).

Роадс (J. E. Rhoads), Astrophys. J. (Letters) **487**, L1
(1997).

Роадс (J. E. Rhoads), Astrophys. J. **525**, 737 (1999).

Сари и др. (R. Sari, T. Piran, R. Narayan), Astrophys. J.
(Letters) **497**, L17 (1998).

Сари и др. (R. Sari, T. Piran, J. P. Halpern), Astrophys. J.
(Letters) **519**, L17 (1999).

Урата и др. (Y. Urata, T. Miyata, S. Nishiura, T. Tamagawa,
R. A. Burenin, T. Sekiguchi, *et al.*), Astrophys. J.
(Letters) **601**, L17 (2004).

Хаманн и Коестерке (W.-R. Hamann, L. Koesterke), Astron.
Astrophys. **335**, 1003 (1998).

*И. М. Хамитов, Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев, Н. А. Сахибуллин,
М. Н. Павлинский, Р. А. Сюняев, З. Аслан,*
Письма в Астрон. журн., готовится к печати.

Холланд и др. (S. T. Holland, M. Weidinger, J. P. U. Fynbo,
J. Gorosabel, J. Hjorth, K. Pedersen, *et al.*), Astron.
J. **125**, 2291 (2003).