

УДК 524.7

ВСПЛЕСК ЖЕСТКОГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЫХОДЕ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ ГИПЕРНОВОЙ

В.В. Марченко

THE HARD THERMAL RADIATION BURST AT RELATIVISTIC SHOCK BREAK-OUT TO THE HYPERNOVA SURFACE

V.V. Marchenko

Рассмотрен выход релятивистской ударной волны на поверхность гиперновой звезды. Вычислены параметры всплеска жесткого теплового излучения, возникающего при подходе ударной волны к поверхности звезды. Проанализированы условия наблюдения этого всплеска космическими рентгеновскими миссиями.

The astrophysical consequences of relativistic shock break-out at the surface of Hypernova star are considered. The parameters of hard thermal radiation flash that appears when shock approaches the star surface are estimated. The detectability of such flash by space X-ray missions is calculated.

Введение

Широкий спектр астрофизических явлений связан со значительным энерговыделением внутри звезд и последующим выходом на поверхность звезды ударной волны. В частности, наиболее популярная на данное время модель для объяснения длительных гамма-всплесков основана на взрывах массивных звезд – гиперновых или коллапсаров [1]. Космологические гамма-всплески были открыты более 30 лет назад и представляют собой спорадические всплески гамма-излучения длительностью от миллисекунд до десятков и сотен секунд в диапазоне энергий 0.02–2 МэВ. В распределении гамма-всплесков по длительности была выявлена бимодальная структура: всплески можно разделить на длительные (с длительностью более 2 с) и короткие. Современные исследования показывают отличие в физических механизмах, ответственных за генерацию этих двух типов всплесков. Основной проблемой в исследовании гамма-всплесков с самого момента их открытия было полное отсутствие астрофизических объектов, с которыми можно было бы отождествить эти всплески. Важным этапом в решении данной проблемы был запуск космической гамма-обсерватории имени Комптона, на основании данных которой была выявлена изотропность в распределении гамма-всплесков по небу. Это говорило в пользу так называемой космологической модели, согласно которой источники гамма-всплесков располагаются на космологических расстояниях. Но решающим аргументом в пользу космологической модели стал запуск рентгеновского спутника Верро-SAX, когда удалось выяснить, что гамма-излучение приходит с далеких галактик, расположенных на космологических расстояниях.

Теория о связи гамма-всплесков со взрывами звезд получила первое наблюдательное доказательство, когда сразу после открытия гамма-всплеска GRB 980425 в его окрестностях была замечена необычная сверхновая SN 1998bw, которая была в 20–30 раз мощнее обычных сверхновых [2]. Такой класс сверхновых получил название гиперновых.

Ускорение частиц при выходе релятивистской ударной волны на поверхность звезды

В нашей работе мы используем модель гиперновой звезды, используемую для объяснения гамма-

всплеска GRB 980425 [2, 3]. Это углеродно-кислородная звезда Вольфа-Райе массой $M_s = 6.5M_\odot$ и радиусом $R_s = 1.22 \cdot 10^{10}$ см.

Движение ударной волны во внешних областях звезды определяется преимущественно профилем плотности вещества в оболочке и при достаточно большом градиенте плотности ударная волна может ускоряться до релятивистских скоростей. С достаточной точностью распределение плотности во внешних слоях оболочки гиперновой звезды можно аппроксимировать политропным законом $\rho(r) = \rho_0(1-r/R_s)^3$, где $\rho_0 = 910$ г/см³, r – расстояние от центра звезды [3]. Для описания движения ударной волны будем использовать аналитический аппроксимационный закон, предложенный и апробированный в работах [4, 5]. Согласно этому закону для верхних слоев оболочки звезды (когда $r \approx R_s$) имеем: $\Gamma_s \beta_s \propto \rho(r)^{-a}$, где Γ_s – лоренц-фактор фронта ударной волны; β_s – безразмерная скорость ударной волны (в единицах скорости света); $\rho(r)$ – плотность вещества оболочки; a – параметр со значениями в интервале $0.2 \div 0.232$.

В процессе выхода ударной волны на поверхность звезды частицы оболочки звезды будут ускоряться ударной волной в два этапа. Первый этап ускорения связан с прохождением частиц невозмущенного вещества оболочки звезды через фронт ударной волны. После этого этапа частицы приобретают лоренц-фактор γ_2 , который зависит от Γ_s (для ультрарелятивистского случая имеем $\gamma_2 = \Gamma_s / \sqrt{2}$). Второй этап ускорения частиц реализуется после выхода ударной волны на поверхность звезды при последующем расширении в вакуум, когда нагретые ударной волной внешние слои оболочки звезды под действием теплового давления газа дополнительно ускоряются вследствие отсутствия внешнего давления. Окончательный лоренц-фактор в конце второго этапа γ_f выражается через γ_2 и в ультрарелятивистском случае $\gamma_f \propto \gamma_2^b$, где b – некоторый параметр (для случая произвольного релятивизма эта зависимость имеет более сложный вид [5]). Параметр b зависит от типа расширения (сферическое или плоское) и равен 2.0 и 2.73 соответственно [5]. По окончании этих двух этапов ускорения мы получим пучок релятивистских частиц, со степенным энергетическим

Параметры всплеска жесткого теплового излучения и условия его наблюдения

Параметры	$a = 0.2$			$a = 0.232$		
	$\beta_i = 0.2$	$\beta_i = 0.3$	$\beta_i = 0.4$	$\beta_i = 0.2$	$\beta_i = 0.3$	$\beta_i = 0.4$
T_2^{sur} [К]	$4.9 \cdot 10^7$	$5.8 \cdot 10^7$	$6.7 \cdot 10^7$	$7.7 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^8$	$1.2 \cdot 10^8$
E_γ^{obs} [кэВ]	$1.2 \cdot 10^1$	$2.1 \cdot 10^1$	$3.3 \cdot 10^1$	$2.9 \cdot 10^1$	$5.8 \cdot 10^1$	$9.8 \cdot 10^1$
l_γ [см]	$9.4 \cdot 10^6$	$8.5 \cdot 10^6$	$7.3 \cdot 10^6$	$8.9 \cdot 10^6$	$6.9 \cdot 10^6$	$5.5 \cdot 10^6$
W_γ [эрг]	$5.3 \cdot 10^{46}$	$1.4 \cdot 10^{47}$	$2.9 \cdot 10^{47}$	$4.8 \cdot 10^{47}$	$1.6 \cdot 10^{48}$	$4.2 \cdot 10^{48}$
t_{obs} [с]	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$6.1 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$4.6 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$
D [Мпк]	$1.2 \cdot 10^2$	$2.1 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^2$	$3.8 \cdot 10^2$	$7.0 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^2$
z	$2.8 \cdot 10^{-2}$	$4.8 \cdot 10^{-2}$	$6.5 \cdot 10^{-2}$	$8.4 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$	$2.2 \cdot 10^{-1}$

спектром с показателем степени от 3.5 до 4.8 (в зависимости от параметров a , b и начальной энергии взрыва) [6].

Всплеск жесткого теплового излучения

Рассмотрим движение ударной волны в верхних слоях оболочки гиперновой звезды. При достижении расстояния r_{max} , которому соответствует оптическая толщина внешних слоев $\tau \approx 1$, часть фотонов и быстрых частиц, запертых ранее во фронте ударной волны, получают возможность покинуть этот фронт и это приведет к разрушению ударной волны.

Оценим характерную энергию фотонов, которые высветятся при диссипации ударной волны. Вследствие движения излучающей области излученные фотоны будут смещены в коротковолновую часть спектра и для типичной энергии данных фотонов получим

$$E_\gamma^{\text{obs}} \propto \gamma_2^{\text{max}} k T_2^{\text{sur}}, \quad (1)$$

где γ_2^{max} – максимальный лоренц-фактор частиц за фронтом ударной волны, который соответствует радиусу r_{max} ; k – постоянная Больцмана; T_2^{sur} – температура равновесного излучения за фронтом ударной волны. Как было показано в [5], для этой температуры можно записать уравнение

$$T_2^{\text{sur}} = \left[(4\gamma_2^{\text{max}} + 3) (\gamma_2^{\text{max}} - 1) \frac{\rho(r_{\text{max}}) c^2}{a_K} \right]^{1/4}, \quad (2)$$

где a_K – постоянная плотности энергии излучения; c – скорость света. Полная энергия данного всплеска будет определяться количеством тепловой энергии, которая освобождается из-за фронта ударной волны. Численные расчеты показывают, что основной вклад в подобный всплеск дают фотоны с оптической глубины вплоть до $\tau \approx 100$ (см. обзор в [7]). Полная энергия теплового всплеска в системе отсчета плазмы равна

$$W_\gamma^{\text{rest}} \approx 4\pi R_S^2 l_\gamma a_K (T_2^{\text{sur}})^4, \quad (3)$$

где l_γ – геометрическая глубина, которая соответствует $\tau \approx 100$. Эту глубину можно оценить как $l_\gamma \propto \tau / (\sigma_T n_e) \approx 100 / (\sigma_T n_e)$; σ_T – томсоновское сечение; $n_e = \rho / m_p$ – концентрация электронов; m_p – масса протона. Полная энергия теплового всплеска в системе удаленного наблюдателя будет соответственно равна $W_\gamma = \gamma_2^{\text{max}} W_\gamma^{\text{rest}}$.

Астрофизические проявления

Поток излучения от этого всплеска на расстоянии D от звезды будет равен

$$F_{\text{obs}} = \frac{W_\gamma}{4\pi D^2 t_{\text{obs}}}, \quad (4)$$

где t_{obs} – длительность этого всплеска для удаленного наблюдателя. В нашем случае эта длительность будет определяться задержкой времени прихода фотонов от разных частей диска звезды. С учетом релятивистского эффекта уменьшения телесного угла, с которого приходит излучение, получим [5]:

$$t_{\text{obs}} \approx \frac{R_S}{c} \frac{1}{\gamma_2^2}. \quad (5)$$

Максимальные расстояния, с которых данный всплеск может быть зафиксирован прибором с чувствительностью, подобной чувствительности детектора BATSE с космической обсерватории имени Комптона [9], близки к хабловскому горизонту ($\sim 10^{28}$ см). Поэтому такой всплеск может быть зафиксирован при значительных красных смещениях ($z \leq 0.2$) и присутствовать в большом количестве наблюдаемых гамма-всплесков. Параметры всплеска и условия его детектирования приведены в таблице, где β_i – начальная скорость ударной волны, значения которой соответствуют оценкам кинетической энергии релятивистской оболочки в сверхновой SN 1998bw [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang B., Meszaros P. Gamma-ray bursts: progress, problems and prospects // IJMPA. 2004. V. 19. P. 2385–2472.
2. Woosley S.E., Eastman R.G., Schmidt B.P. Gamma-ray bursts and type IC Supernova SN 1998bw // ApJ. 1999. V. 516. P. 788–796.
3. Tan J.C., Matzner C.D., McKee C.F. Trans-relativistic blast waves in Supernovae as gamma-ray burst progenitors // ApJ. 2001. V. 551. P. 946–972.
4. Гнатых Б.И. Закономерности движения релятивистских ударных волн в неоднородных средах // Письма в АЖ. 1985. Т. 11, № 10. С. 785–787.
5. Berezhinsky V.S., Blasi P., Hnatyk B.I. A new mechanism for gamma-ray Bursts in SN Type I explosions. I. Weak magnetic field // ApJ. 1996. V. 469. P. 311–319.
6. Marchenko V.V., Hnatyk B.I. Relativistic shock break-out at the surface of Hypernova star // Odessa Astronomical Publications. 2004. V. 17. P. 48–50.
7. Ensmann L., Burrows A. Shock break-out in SN 1987A // ApJ. 1992. V. 393. P. 742–755.
8. Waxman E. Does the detection of X-Ray emission from SN 1998bw support. Its association with GRB 980425? // ApJ. 2004. V. 605. P. L97–L100.
9. Paciesas W.S. et al. The Fourth BATSE gamma-ray burst Catalog (Revised) // ApJSS. 1999. V. 122. P. 465–495.

Астрономическая Обсерватория Киевского национального университета им.Тараса Шевченко, Киев, Украина