

УДК 523.07

## КИРАЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ПРОИЗВОДИМОЕ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ ОТ ВЗРЫВА СВЕРХНОВОЙ

В. А. Царев

*Дана оценка кирального воздействия на органику межзвездного облака ударной волны “включения” от сверхновой (СН). Найдено, что этот эффект мал и не может нарушить киральную универсальность воздействия, обусловленного лево-поляризованными электронами и нейтрино от СН.*

Взрыв сверхновой, который представляет собой “саморазрушение” звезды, означает конец жизни одной звезды, но одновременно стимулирует рождение последующих поколений звезд. Подобные события играют важнейшую роль не только в галактической эволюции, но, возможно, и в возникновении жизни. В частности, взрывы СН – это единственный механизм, который приводит к выбрасыванию атомов тяжелее гелия в межзвездную среду (МЗС). В этом смысле мы можем сказать, что “все мы являемся остатками сверхновых”. Более того, как это было недавно подчеркнуто в [1], СН играют уникальную роль одновременно как в генерации ударных волн, являющихся триггером коллапса межзвездных молекулярных облаков (ММО) в новые звезды и планеты, так и в облучении органики в этих ММО потоками лево-поляризованных электронов и нейтрино. Таким образом, сверхновые являются неизбежными факторами кирального воздействия, и в рамках данного механизма все формы жизни во Вселенной, основанные на углеводородах, должны иметь универсальную киральную структуру. В действительности критичная роль, которую играют ударные волны от СН для возникновения жизни, может не ограничиваться только иницированием коллапса облака. Во многих экспериментах (см. [2] и ссылки в этой работе) было установлено, что поликонденсация твердых мономеров и образование большого числа аминокислот может иницироваться под действием ударных волн. Более того, ниже мы покажем, что ударные волны от СН сами по себе способны, в принципе, производить киральное воздействие

на молекулы в межзвездных молекулярных облаках, причем знак этого воздействия оказывается зависящим от геометрии облучения. Мы оценим этот эффект и посмотрим, может ли он нарушить “универсальность” кирального воздействия, вызванного облучением электронами и нейтрино от СН [1].

Прежде всего, напомним картину взрыва СН (см., например, [3]). С точки зрения газодинамики, взрыв СН может быть рассмотрен как движение газа (с данными величинами плотности  $\rho$ , давления  $P$  и показателя адиабаты  $\gamma$ ) под действием расширяющейся сферической, почти непроницаемой оболочки с массой  $M$  и начальной скоростью  $V_0$  (начальное значение числа Маха  $M_0 = V_0/C_s \gg 1$ , где  $C_s$  – скорость звука в МЗП). В фазе “свободного разлета” оболочка СН расширяется с почти постоянной скоростью, и перед ней образуется ударная волна, имеющая скорость  $V = V_0(\gamma + 1)/2$ . В некоторый момент  $t = t_0$ , когда масса газа, вытесненного ударной волной, становится соизмеримой с массой газа в УВ, начальная кинетическая энергия УВ почти полностью переходит в энергию газа, скорость  $V$  падает, и устанавливается фаза Седова. Пусть при  $t = 0$  произошел взрыв СН, и затем при  $t > t_0$  сферический ударный фронт с радиусом  $R(t)$  расширяется в (однородной) межзвездной среде согласно уравнению

$$R(t) = R_0(t/t_0)^\nu. \quad (1)$$

Движение фронта ударной волны хорошо описывается формулой (1) для  $t > 10^3 - 10^4$  лет с  $\nu = 0.4$  [4]. Число Маха меняется с  $t$  согласно уравнению

$$M(t) = M_0(t/t_0)^{\nu-1}. \quad (2)$$

Степень сжатия  $\sigma = \rho/\rho_0$  (отношение плотностей газа перед ударной волной и позади нее) связано с числом Маха следующим образом:

$$\sigma = 4M^2/(M^2 + 3). \quad (3)$$

Скорость фронта ударной волны меняется со временем как

$$V(t) \approx R(t)/t \approx (R_0/t_0)(t/t_0)^{\nu-1}. \quad (4)$$

Для дальнейшего обсуждения существенно заметить, что газ межзвездной среды и молекулярного облака частично ионизован, так что отношение  $N_e/(N_{\text{ion}} + N_{\text{neutral}})$  лежит в пределах от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  [5]. Типичные значения магнитного поля, замороженного в плазму межзвездной среды, приблизительно пропорциональны плотности газа и составляют  $10^{-5} - 10^{-6}$  Гс для МЗС, тогда как для молекулярных облаков они могут быть, по крайней мере, на порядок больше.

Для нашего рассмотрения наибольший интерес представляет фаза Седова, где размеры фронта УВ становятся близкими к максимальным, и число Маха равно  $M \approx 2-3$ . При этом соответствующие значения времени  $t_M$ , радиуса УВ  $R_M$  и скорости  $V_M$  равны:

$$t_M = t_0(M/M_0)^{1/(\nu-1)}; R(t_M) \approx R_0(M_0/M)^{-\nu/(\nu-1)}; V(t_M) \approx V_0(M/M_0). \quad (5)$$

Выбирая [6]  $t_0 = 10^4$  лет,  $R_0 = 44.5$  пк,  $M_0 = 10$ , получим для  $M = 3-2$ ,  $V_0 = 4.4 \times 10^3$  км/с,  $V_2 = (1.32 - 0.88) \times 10^3$  км/с,  $\sigma = 3 - 2.3$  ( $V_2$  – это скорость газа за фронтом УВ в системе, связанной с этим фронтом).

Предположим, что УВ распространяется через замагниченную МЗС-плазму под некоторым углом  $\alpha$  к вектору магнитной индукции  $\mathbf{B}$ . В этом случае возникают так называемые волны “включения” [7], в которых компонента  $\mathbf{B}_1$  поля  $\mathbf{B}$ , лежащая в плоскости фронта УВ, вращается с некоторой частотой  $\omega$ . Выбирая ось  $x$  параллельной вектору скорости фронта УВ  $\mathbf{V}$ , запишем компоненты вектора  $\mathbf{B}_1$ :

$$B_z \approx \exp(-x/L) \cos \theta(x), \quad (6)$$

$$B_y \approx \exp(-x/L) \sin \theta(x).$$

Здесь  $L \approx (M_{\text{ion}}/m_e)(V/\nu)$  – длина поглощения;  $M_{\text{ion}}$  и  $m_e$  – массы иона и электрона, соответственно, и  $\nu$  – частота электрон-ионных столкновений. Частота вращения

$$\omega = \omega_{\text{ion}} = (4\pi N_{\text{ion}} e^2 / M_{\text{ion}})^{1/2}. \quad (7)$$

Таким образом, фронт УВ возбуждает циркулярно-поляризованное магнитное поле, подобное полю циркулярно-поляризованного света. В общем случае это поле может индуцировать киральную асимметрию, как это имеет место в случае облучения циркулярно-поляризованным светом.

Известно, что оптическая активность, обусловленная присутствием киральных молекул, может быть объяснена специальной формой электрического (и магнитного) дипольного момента  $\mathbf{P}$  (и  $\mathbf{M}$ ) молекулы, индуцированного электромагнитным полем света. Если  $\mathbf{E}$  – электрическое поле волны, тогда [8]

$$\mathbf{P} = a\mathbf{E} + (i/2)g[\mathbf{sE}], \quad (8)$$

$$\mathbf{M} = -(i/2n)g\mathbf{E},$$

где  $\mathbf{s}$  – единичный вектор нормали к волновому фронту и  $g$  – средняя величина тензора гирации, которая имеет противоположные знаки для молекул  $L$ - и  $D$ -конфигураций.



Для циркулярно-поляризованного света компоненты электрического поля могут быть записаны в виде:

$$E_z = E_0 \cos \tau, \quad (9)$$

$$E_y = \pm E_0 \sin \tau = E_0 \cos(\tau \pm \pi/2), \quad \tau = \omega(t - rs/c).$$

Или в комплексной форме:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(i\tau), \quad \mathbf{E}_0 = E_0(\mathbf{k} \pm i\mathbf{j}). \quad (9a)$$

Легко видеть, что вклад в энергию молекулы, обусловленный взаимодействием с электрическим полем, равен

$$W = (\mathbf{P}\mathbf{E}) = E_0^2(a \pm g/2). \quad (10)$$

Таким образом, величина энергии  $W$  для определенной поляризации света различна для молекул различной киральности.

Оценим величину эффекта. Полагая  $V = 10^3$  км/с,  $M_{\text{ион}}/m_e = 2 \times 10^3$ , и  $\nu = 10^{-3}$  с $^{-1}$  [9], имеем

$$L \approx 3 \times 10^9 \text{ км} \text{ и } \tau = L/c \approx 10^4 \text{ с}. \quad (11)$$

Плотность энергии, связанная с  $\mathbf{B}_1$ , составляет

$$W_B = (1/2\mu_0)B_1^2 \approx 240 \text{ эВ/см}^3. \quad (12)$$

При оценках мы использовали величину  $10^{-4}$  Гс для магнитного поля в межзвездной среде. Соответствующая плотность потока энергии равна

$$F_B = W_B c \approx 10^{13} \text{ эВсм}^{-3} \text{ с}^{-1}. \quad (13)$$

Плотность поглощенной энергии за время затухания составляет

$$\Phi_B = F_B \tau \approx 10^{17} \text{ эВ/см}^3. \quad (14)$$

Мы можем сравнить эту оценку с условиями лабораторных экспериментов [10, 11]. Эти эксперименты были проведены для моделирования процесса облучения гранул холодных газопылевых межзвездных облаков фотонами. Тонкий слой триптофана облучался при 10 К в течение 50–100 часов циркулярно-поляризованным УФ светом, поток которого на поверхности слоя составлял  $10^{12}$  фотонов/(см $^2$  с). Было найдено относительное увеличение избытка  $D$ -/ $L$ -молекул порядка 50%. Этот результат означает, что

селективное разрушение (при поглощении света) левых молекул триптофана по отношению к правым очень эффективно даже при низких температурах. Полагая среднюю энергию фотонов равной  $\langle E_{ph} \rangle \approx 3$  эВ, получаем для данного эксперимента плотность поглощенной энергии за 50 часов:

$$\Phi_{\text{ЕХР}} = 50 \times 3600 \times 10^{12} \times 3 = 5.4 \times 10^{17} \text{ эВ см}^{-3}. \quad (15)$$

Видно, что эта величина близка к значению, найденному для  $\Phi_V$  (т.е., плотности энергии, связанной с магнитным полем волны “включения”). Таким образом, на первый взгляд, можно было бы ожидать достаточно большого кирального эффекта, связанного с УВ от взрыва сверхновой. Однако в действительности это неверно. Во-первых, для использования формулы (10) в нашем случае мы должны оценить не магнитное, а электрическое поле, связанное с волной “включения”. Легко видеть, что при этом возникает фактор  $\beta = V_2/c \approx V/c$ , уменьшающий электрическое поле по сравнению с  $V_1$  (напомним, что здесь  $V_2$  – это скорость молекул газа позади фронта УВ). Таким образом, поток энергии, связанный с  $E$ , в  $1/\beta^2 = 10^4 - 10^5$  раз меньше, чем  $\Phi_V$  или  $\Phi_{\text{ЕХР}}$ . Однако имеется еще более существенное обстоятельство, связанное с частотами волн “включения”  $\omega \approx 10^5 \text{ с}^{-1}$ . Эти частоты примерно на 10 порядков меньше, чем частоты УФ-диапазона, которые наиболее важны для кирально-селективных фото-процессов.

Таким образом, мы можем заключить, что киральное воздействие, связанное с волнами “включения” (генерированными ударными волнами от СН), хотя и возможно в принципе, мало по величине и, следовательно, не может привести к нарушению “киральной универсальности”, создаваемой потоками лево-поляризованных электронов (и нейтрино) от той же СН.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Т. Саито, В. А. Царев, Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3, 16 (2004).
- [2] В. И. Гольданский, Известия АН, Сер. Хим., **3**, 409 (1997).
- [3] Е. Г. Бережко и др., ЖЭТФ **109**, 3 (1996).
- [4] L. I. Sedov, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics* (New York, Academic Press, 1959).
- [5] M. S. Longair, *High Energy Astrophysics* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1981).
- [6] T. J. Bogdan and H. J. Volk, *Astron. Astrophys* **122**, 129 (1983).
- [7] F. V. Coroniti, *Nuclear Fusion* **11**, 261 (1971).
- [8] М. В. Волькенштейн, *Молекулярная оптика* (М., Гос. Изд. Техн. Лит., 1996).

- [9] В. Л. Гинзбург, А. А. Рухадзе, *Волны в магнито-активной плазме* (М., Наука, 1975).
- [10] J. M. Greenberg et al., *J. Biol. Phys.* **20**, 61 (1994).
- [11] J. M. Greenberg in D. Cline (ed.), *Physical Origin of Homochirality in Life*, in: AIP Conference Proceedings **379** (AIP, Woodbury, New York, 1996), p. 185.

Поступила в редакцию 20 мая 2008 г.