

УДК 523.07

КИРАЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ ВЗРЫВОВ СВЕРХНОВЫХ В МОДЕЛИ НЕЙТРОННОГО ФАЙЕРБОЛА

Г. А. Гусев, Н. Г. Полухина, В. А. Царев, А. В. Урысон

Развивается предложенная ранее идея о возможной роли нейтронов, освобождаемых при взрыве Сверхновой (СН), в качестве источника поляризованных электронов, вызывающих киральную диссимметрию органических молекул в межзвездных газо-пылевых облаках. Рассматривается конкретный физический механизм выноса большого количества свободных нейтронов за пределы плотной оболочки СН посредством релятивистского нейтронного файербола с Лоренц-фактором порядка 100. Оценки показывают высокую эффективность кирального воздействия электронов от СН в рассматриваемом механизме.

Происхождение открытой около 150 лет назад Л. Пастером киральной асимметрии биомолекул до сих пор остается нерешенной проблемой. Несмотря на многочисленные гипотезы, предложенные за прошедшее время, нет единого мнения относительно механизма возникновения этой асимметрии. Подробный обзор различных моделей происхождения киральной асимметрии можно найти в работах [1–6]. В последние годы ряд результатов, связанных с исследованием эволюции Земли и с астрофизикой, способствовали возрождению интереса к космическим сценариям происхождения жизни и тесно связанной с ней “киральной чистоте” биосферы (см., например, [7, 8]).

В моделях с локальными космическими факторами, инициирующими возникновение асимметрии, обычно предполагается, что на предбиологической стадии эволюции в межзвездном газопылевом облаке некоторый астрофизический источник мог бы произвести начальный “киральный импульс”, который вызывает предпочтительный синтез или разложение правых или левых зеркальных изомеров (энантиомеров) органических

молекул. Впоследствии биологически важные молекулы, с избытком в них левых или правых энантиомеров, могли быть захвачены Землей или другими планетами Солнечной системы в процессе их формирования путем аккреции или абсорбции. Последующая химическая (и биологическая) эволюция могла бы привести к накоплению и усилению кирального избытка и, в конечном счете, к киральной чистоте биосферы.

В качестве возможных локальных космических факторов, которые могли бы инициировать некоторый избыток одного из энантиомеров, предлагались следующие: (а) электромагнитное излучение от намагниченных вращающихся объектов типа нейтронных звезд и белых карликов [4, 9]; (б) поляризованные электроны и позитроны, которые инжектируются в космическое пространство при взрывах сверхновых в результате распадов нестабильных изотопов или рождаются в потоках нейтрино от СН, $\nu + N \rightarrow e + N$ [10]; (в) прямое взаимодействие нейтрино от СН с киральными органическими молекулами газопылевого облака [11].

Недавно в работах [12, 13] был предложен еще один, более эффективный механизм кирального воздействия, также связанный с взрывами сверхновых, в котором основную роль играют поляризованные электроны от распадов нейтронов. При этом было учтено, что в фазе коллапса СН в коре коллапсирующей звезды часть протонов превращается в нейтроны и ядерная компонента СН обогащается нейтронами. После взрыва окружающая кор оболочка с массой около десяти солнечных масс, включающая значительную долю нейтронов и нестабильных ядер, выбрасывается в окружающее пространство. Точная доля ϵ выброшенных нейтронов неизвестна и зависит от модели СН. В частности, в моделях типа [14] она может быть довольно большой. В [13] эта доля консервативно выбиралась равной $\epsilon = 10^{-3}$, что соответствует выбросу примерно 10^{55} нейтронов. Распады этих нейтронов приводят к рождению левополяризованных электронов с энергией около 0.4 МэВ, которые могли бы достигать расположенного поблизости газопылевого облака и облучать его.

Наибольший интерес представляет ситуация, когда под действием ударной волны от взрыва СН протосолнечное облако (которое в отсутствие внешнего воздействия является гравитационно-устойчивым) коллапсирует с образованием Солнца и планет Солнечной системы (на которых в дальнейшем могли бы возникнуть условия для развития жизни). Наибольшее расстояние между облаком и СН, при котором взрыв СН может вызвать коллапс оценивается примерно в 15–20 пк [15]. Можно предположить [13], что на некотором расстоянии $L \leq 15$ пк от СН находилось газопылевое облако со следующими типичными параметрами: размер облака $R = 1$ пк, плотность $n = 10^4$ молекул/см³, доля

органических молекул $\zeta = 10^{-3}$. Если не учитывать возможного замедления электронов на пути от СН до облака, то в таком облаке электроны от СН с энергией 0.4 МэВ будут терять энергию со скоростью порядка 10^{-19} МэВ/см и, следовательно, будут иметь пробег порядка 1 пк [10]. Следовательно, при средней передаче энергии около 10 эВ каждый электрон будет испытывать около $n_1 \approx 10^5$ столкновений до остановки. В таком случае, полное число взаимодействий с органическими молекулами в протосолнечном облаке $N_{\text{вз}} \approx (1/4)\zeta n_1 (R/L)^2$ составит примерно 10^{54} (N – число выбрасываемых нейтронов). Это число более чем на 30 порядков превышает число $N_{\text{min}} = A^{-2} = 10^{22} - 10^{24}$, которое необходимо для того, чтобы киральное воздействие, произведенное облучением протосолнечного облака поляризованными электронами от СН, было статистически существенным [10, 13] (здесь A – фактор асимметрии при рассеянии поляризованных электронов на киральных молекулах).

Полученный результат является весьма обнадеживающим, однако рассмотрение, проведенное в [13], будучи достаточно общим, не содержит явной картины взрыва СН, который позволил бы обосновать возможность для нейтронов вылетать из достаточно плотной оболочки СН. Кроме того, необходимо понять, как “киральные заряды” (т. е., спиральность, которую несет поток электронов), образующийся при распаде нейтронов за пределами плотной оболочки СН, может быть донесен без существенных потерь до газопылевого облака. В настоящей работе приводится такая картина, основанная на представлении о возможности образования при взрыве СН релятивистских “файерболов” [16–18], обогащенных свободными нейтронами. Модель файерболов получила в последнее время развитие в связи с попытками описания наиболее энергичных событий во Вселенной, связанных с так называемыми гамма-всплесками (gamma-bursts). Здесь мы будем предполагать, что механизм образования файерболов применим к более широкой категории событий и является достаточно типичным для взрывов СН.

Астрофизические “джеты” и релятивистские файерболы, состоящие, в основном, из горячих электронов и позитронов и находящихся в тепловом равновесии с ними фотонов с энергией порядка нескольких МэВ, образуются в центральных плотных источниках благодаря выполнению некоторых вполне реализуемых условий для совокупности электромагнитных, механических и гравитационных процессов независимо от природы и массы этих центральных источников. Этот вывод делается на основе размерных соотношений между параметрами, входящими в теорию, описывающую звездный коллапс с образованием файерболов. Картина образования файерболов выглядит следующим образом. Когда заканчивается процесс термоядерного выгорания легких элементов в

ядре массивной звезды (предсверхновой второго типа с массой порядка 20 масс Солнца), внутреннее давление в ядре не может больше компенсировать гравитационную силу сжатия, и происходит коллапс ядра звезды до размеров порядка 10–100 км. На последней стадии коллапса возможно образование релятивистского файерболла, обогащенного нейтронами. Этот файерболл формируется и ускоряется при взрыве СН за счет перепада радиационного давления [19], возникающего при аннигиляции сильного магнитного поля при пересоединении магнитных силовых линий в токовых слоях, образующихся при взрыве вблизи поверхности плотного ядра СН.

Присутствие свободных нейтронов в стандартном файерболле, возникающем в результате взрыва сверхновой, неизбежно. Действительно, нейтронизация в центральном источнике происходит при большой плотности и температуре (температура черного тела 1–10 МэВ), когда реакции взаимопревращения протонов и нейтронов приводят к преобладанию нейтронов при разумных значениях температуры и плотности центрального объекта. Поэтому при захвате файерболом барионной компоненты она уже содержит много свободных нейтронов. Вместе с тем, возможны потери свободных нейтронов при дальнейшей эволюции файерболла при реакции нуклеосинтеза нуклонов в ядра гелия при быстром расширении (охлаждении). Оценки показывают, что такие потери свободных нейтронов невелики [17]. Кроме того, благодаря поглощению файерболом нейтрино из центрального источника происходит дополнительное увеличение относительной доли нейтронов [17].

Нейтроны, входящие в состав релятивистского файерболла в самом начале взрыва могут иметь Лоренц-фактор $\Gamma_n = 10^2 - 10^3$. На расстояниях $R \approx 10^{15}$ см происходит разделение нейтронной и плазменной оболочек файерболла. Поскольку ионы файерболла тормозятся благодаря взаимодействию с окружающей плазмой, нейтроны образуют ведущий фронт. При своем движении нейтроны распадаются, так что средний распадный радиус для релятивистских нейтронов с Лоренц-фактором Γ_n составляет

$$R_\beta = c\tau_\beta\Gamma_n = 0.8 \cdot 10^{16}(\Gamma_n/300) \text{ см}, \quad (1)$$

где $\tau_\beta \approx 900$ с – время жизни покоящегося нейтрона.

Распад нейтронов приводит к образованию дополнительной протон – электронной релятивистской плазмы, взаимодействующей с фоновой холодной плазмой малой плотности, в которую инжектируется вещество СН. Благодаря пучковой неустойчивости за времена порядка нескольких периодов плазменной ионной частоты релятивистская плазма довольно быстро тормозится до нерелятивистских энергий.

В работе [16] показано, что существует некое характерное расстояние R_N , когда плазменный фэйрбол, полученный от распада нейтронной компоненты фэйрбола, затормозится до нерелятивистских скоростей $\beta \approx 0.5$. Для типичных условий в окрестности предсверхновой это соответствует расстояниям

$$R_N \approx 10R_\beta = 0.8 \cdot 10^{17} (\Gamma_n/300) \text{ см.} \quad (2)$$

С точки зрения кирального воздействия на молекулы газопылевого облака нас интересует поздняя фаза эволюции плазменного остатка фэйрбола, когда в результате медленного торможения за счет "сгребания" межзвездной плазмы его направленная скорость уменьшается настолько, что соответствующая кинетическая энергия киральных электронов плазмы, получившейся от распада нейтронов, составляет величину порядка 10–100 эВ. Важно подчеркнуть, что в системе координат, связанной с нейтронной оболочкой СН, эти электроны при своем рождении имеют среднюю кинетическую энергию 0.4 МэВ и высокую степень поляризации, определяемую отношением $\beta = v/c$ (для энергии электронов 0.4 МэВ, $\beta \sim 0.8$). Их спины направлены против импульса (левая киральность), и сохраняют ориентацию при торможении плазмы фэйрбола, так как это торможение происходит за счет коллективных плазменных взаимодействий, не затрагивающих спин и сохраняющих преобладание продольной компоненты импульса над поперечной. Поперечная компонента обусловлена температурой нейтронов во время отщепления их от исходной плазменной компоненты фэйрбола. Эта температура уменьшается в процессе расширения плазменной оболочки, и к моменту торможения киральных электронов до энергий примерно 100 эВ имеет порядок величины 1 эВ. Некоторая потеря киральности все-таки может происходить из-за многократного рассеяния в межзвездной плазме и будет оценена ниже.

Следуя [13], будем исходить из величины общей массы нейтронов в фэйрболе, равной примерно 0.01 массы Солнца, что соответствует числу нейтронов около $N = 10^{55}$. Для фэйрбола от нейтронной звезды это, по-видимому, максимальное значение. Действительно, существует оценка [20] для массы отдельных фэйрболов при их множественном рождении в случае дифференциально вращающейся нейтронной звезды с периодами порядка миллисекунды. Эта оценка дает величину на уровне 10^{-5} от массы Солнца. Будем также полагать (см. [16]) Лоренц-фактор фэйрбола $\Gamma \approx 300$. Тогда, в зависимости от первоначальной геометрии фэйрбола, торможение до скоростей $1.7 \cdot 10^8$ см/с (что соответствует энергии электронов 100 эВ) будет происходить на расстояниях 10–100 пк. При оценках мы приняли для плотности межзвездной плазмы значение $n_{cp} \sim 0.1 - 1 \text{ см}^{-3}$.

В работе [13] для энергий электронов около 0.4 МэВ приводится фактор асимметрии при рассеянии продольно поляризованных электронов на киральных молекулах

$$A = 10^{-11} - 10^{-12}. \quad (3)$$

Имея в виду обратно-пропорциональную зависимость A от энергии [13], найдем, что для энергий электронов около 40 эВ этот фактор увеличивается на 4 порядка.

Будем использовать для оценок приведенные выше значения параметров L , R , n и ζ из работы [13]. При средней передаче энергии в столкновении 10 эВ каждый из электронов, попадающий в облако с начальной энергией 40 эВ, испытает $n_1 = 4$ столкновений до остановки в облаке (4 пробега относительно процесса ионизации). Для определенности предположим, что фэйрбол имеет угловой раствор 60° , так что на расстоянии 15 пк геометрический фактор облака равен $\sim 4.4 \cdot 10^{-3}$. При этом полное число взаимодействий с молекулами облака составит $N_{\text{вз}} = 4.4 \cdot 10^{-3} \cdot \xi \cdot N \cdot n_1 \sim 1.8 \cdot 10^{50}$, то есть на три порядка с лишним меньше, чем в оценке работы [13]. С учетом того, что киральные электроны в нашем случае имеют энергию на 4 порядка меньше, чем в работе [13] и, соответственно, фактор асимметрии (3) теперь на 4 порядка больше, находим, что в итоге полный эффект передачи киральности облаку будет того же порядка, что в оценке работы [13]. Это означает, что рассмотренный механизм выноса свободных нейтронов ультрарелятивистским фэйрболом из плотной оболочки СН и их дальнейшей эволюции в межзвездной среде не приводит к существенным изменениям в оценке кирального воздействия СН по сравнению с простой картиной [13].

Оценим теперь эффект многократного рассеяния электронов в межзвездной среде, который приводит к частичной деполяризации электронов, то есть к уменьшению фактора асимметрии (3). Напомним также, что необходимо учесть множитель $\beta = 0.8$, определяющий степень поляризации при рождении электронов с энергией 0.4 Мэв.

Средний угол отклонения в результате многократного рассеяния электронов с энергией порядка 100 эВ на ядрах можно оценить по известной формуле [21]

$$\bar{\theta} = \frac{21 \text{ Мэв}}{E} \times \frac{L}{l_{\text{rad}}}, \quad (4)$$

где E – энергия электрона, l_{rad} – радиационная длина и L – пробег. Например, полагая пробег $L = 5$ пк в межзвездной среде с плотностью 0.2 см^{-3} , что соответствует $l_{\text{rad}} \approx 10^{25} \text{ см}$, найдем угол порядка 20° . Поэтому спиральность электронов уменьшится на фактор $\cos \bar{\theta} \approx 0.94$. В итоге, прежде чем плазма начнет взаимодействовать с облаком, электроны будут иметь спиральность, равную $\beta \cdot \cos \bar{\theta} \approx 0.78$. Дополнительный эффект многократного рассеяния в облаке незначителен.

В заключение еще раз подчеркнем, что релятивистский фэйрбол от СН является весьма эффективным механизмом для выноса нейтронов за пределы плотной и сравнительно медленно расширяющейся при взрыве СН оболочки, которая препятствует выходу поляризованных электронов от распадов нерелятивистских нейтронов и быстро распадающихся изотопов. Благодаря этому выносу и слабой деградации поляризации электронов в межзвездной среде релятивистский фэйрбол может обеспечить эффективное киральное воздействие СН на органические молекулы в межзвездных газо-пылевых облаках, отдаленных от СН не более, чем на 10–20 пк. В то же время, если релятивистский фэйрбол рассмотренных размеров является маловероятным событием при взрывах СН в пределах нашей Галактики, то киральное воздействие фэйрболов меньших размеров, которые более вероятны и сопровождаются менее мощным гамма всплеском ниже порога регистрации (а потому и не наблюдаются), по-прежнему остается возможным существенным механизмом, обеспечивающим киральное воздействие СН. Представляется также интересным рассмотреть эффект кирального воздействия от β -распада радиоактивных изотопов расширяющейся оболочки СН. Пример учета эффекта от распадов одного изотопа ^{23}Al приведен в работе [10]. В общем случае эта задача представляется достаточно сложной из-за необходимости учета большого числа изотопов с различными временами жизни и различными массами. Их суммарная масса может значительно уступать массе большого фэйрбола, но быть сравнимой с массой малых фэйрболов, а потому и количество поляризованных электронов, а точнее, их избыток по сравнению с позитронами, может оказаться достаточным, чтобы конкурировать с киральным эффектом от малых фэйрболов.

Авторы выражают благодарность за обсуждение и стимулирующие замечания Я. Н. Истомины.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 05-02-39020.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Keszthelyi, L. *BioSystems* **20**, 15 (1987).
- [2] Mason S. F. *BioSystems* **20**, 27 (1987).
- [3] Гольданский В. И., Кузьмин В. В. *УФН* **157**, 3 (1989).
- [4] Bonner W. A. *Origin of Life and Evol. Biosphere* **21**, 59 (1991).
- [5] MacDermott A. J. *Origin of Life and Evol. Biosphere* **25**, 191 (1995).
- [6] Аветисов В. А., Гольданский В. И. *УФН* **166**, 873 (1996).

- [7] Bonner W. A. Origin of Life and Evol. Biosphere **21**, 407 (1992).
- [8] Mason S. F. Int. Rev. Phys. Chem. **3**, 217 (1983).
- [9] Greenberg J. M., Kouchi A., Niesson W. et al. J. Biol. Phys. **20**, 61 (1994).
- [10] Cline D. B. AIP Conf. Proc. **379**, American Institute of Physics, Woodbury and New York, 1996.
- [11] Царев В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 1, 18 (1999).
- [12] Царев В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 2, 22 (1999).
- [13] Саито Т., Царев В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3, 16 (2004).
- [14] Imshennik V. S. Sov. Astron. Letters **10**, 422 (1992).
- [15] Lattimer J. M., Schram D. N., Grossman L. Nature **116**, (1997).
- [16] Beloborodov A. M. Astropart. J. **585**, L19-L22 (2003).
- [17] Beloborodov A. M. arXiv: astro-ph/0302057 (2003)
- [18] Beloborodov A. M. Astropart. J. **588**, 931 (2003).
- [19] Derishev E. V., Kocharovsky V. V., Kocharovsky V. V. Astron. and Astrophys. **345**, L51 (1999).
- [20] Kluzniak W., Ruderman M. arXiv: astro-ph/9712320 (1997).
- [21] Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Релятивистская квантовая теория, часть 2 (М., Наука, 1971).

Поступила в редакцию 23 января 2007 г.