

Изменение энергетических спектров различных групп ядер в процессе распространения космических лучей в Галактике

Н.Н.Калмыков¹, А.В.Тимохин²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета; kalm@eas.sinp.msu.ru

² Физический факультет Московского государственного университета; alexey@timokhin.ru

Аннотация

В рамках подхода, использующего численное моделирование траекторий, рассмотрено влияние процесса распространения космических лучей на энергетические спектры космических лучей, наблюдаемые у Земли. Данные о количестве вещества, пройденного ядрами космических лучей, и вероятности их взаимодействия представлены для различных моделей регулярного магнитного поля Галактики. Отмечено возможное уположение энергетических спектров тяжёлых элементов по сравнению со спектрами лёгких, обусловленное влиянием ядерных взаимодействий в процессе распространения. С учётом полученных результатов проведено сопоставление энергетических спектров космических лучей, определённых по данным широких атмосферных ливней, с предсказаниями стандартной модели ускорения космических лучей ударными волнами.

Введение

Вопрос о происхождении КЛ является одним из наиболее важных в физике космических лучей и до сих пор не решен.

Традиционными кандидатами на роль источников КЛ в большом энергетическом диапазоне являются остатки взрывов сверхновых. В процессах, приводящих к ударным волнам, связанным со вспышками сверхновых, как правило, выделяется большое количество энергии в форме направленного движения плазмы. Заметная часть этой энергии может идти на ускорение небольшой доли частиц плазмы вплоть до сверхвысоких энергий.

По различным моделям ускорения на ударных волнах сверхновых энергетический спектр ускоренных частиц космических лучей имеет показатель степени $2 \div 2,1$ [1,2], сохраняя такое значение до максимальной энергии ускорения, зависящей от различных, варьируемых в разных моделях, параметров среды, в которой происходит ускорение.

При распространении КЛ в галактических магнитных полях со спектром происходят некоторые изменения, вызванные вылетом частиц КЛ из Галактики, а также процессами взаимодействия с веществом межзвездной среды по пути распространения. Аналитически это утверждение можно записать следующим образом:

$$N(E) \propto Q(E) \left(\frac{1}{\lambda_{esc}(E)} + \frac{1}{\lambda_{int}(E)} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где $\lambda_{esc}(E)$ - пробег частицы КЛ до вылета из Галактики, $\lambda_{int}(E)$ - пробег до взаимодействия с межзвездным веществом.

Обычно предполагается, что $\lambda_{int}(E)$ гораздо слабее изменяется с энергией, чем $\lambda_{esc}(E)$, и эта зависимость не является существенной для объяснения разницы в наклоне энергетических спектров – наблюдаемого у Земли (показатель степени при энергии – 2,7) и спектра в источниках, полученного в предположениях ускорения КЛ в остатках сверхновых ($\gamma_{src} = 2 \div 2,1$).

В рамках модели распространения КЛ в Галактике leaky box, хорошо описывающей экспериментальные результаты (ACE/CRIS, HEAO-3) по отношениям потоков различных групп ядер КЛ энергий от ~ 70 МэВ до ~ 30 ГэВ на нуклон (см. [4]), пробег частиц КЛ до вылета из Галактики может быть представлен следующим выражением:

$$\lambda_{lb} = \frac{26,7 \beta z / \text{см}^2}{(\beta E / 1 \text{ГэВ})^{0,58} + (\beta R / 1,4 \text{ГэВ})^{-1,4}} \quad (2)$$

$\beta = v/c$, R – жесткость.

Эта и другие подобные модели распространения дают зависимость

$$\lambda_{esc} \propto E^{-0,6 \pm 0,7} \quad (3)$$

Как правило, при использовании стандартной модели ускорения КЛ ударными волнами предполагается, что разность между теоретическим показателем спектра до излома ($\gamma \approx 2$) и экспериментально наблюдаемым может быть скомпенсирована введением зависимости времени жизни КЛ от энергии вида (1) при $\alpha = 0,7$ [1,3].

Целью данной работы являлось изучение процессов распространения КЛ в магнитных полях Галактики и получение расчетных зависимостей $\lambda_{esc}(E)$, $\lambda_{int}(E)$. При этом проводилось численное моделирование траекторий распространения заряженных частиц КЛ в магнитном поле Галактики.

1 Предположения расчета

К сожалению, вопрос о точной конфигурации магнитного поля Галактики остается открытым – на основании имеющихся экспериментальных данных возникают различные модели магнитного поля Галактики [5-8].

Магнитное поле Галактики, используемое в расчетах, включает крупномасштабную (регулярную) и хаотическую компоненты:

$$\vec{B} = \vec{B}_{reg} + \vec{B}_{irr}$$

Расчеты были выполнены при различных предположениях конфигурации регулярного магнитного поля Галактики.

По одной из моделей выражение для магнитного поля имеет следующий вид [7]:

$$B_z = 0, B_r = 0, B_\phi \propto \exp\left(-\frac{z^2}{(5\text{кпк})^2} - \frac{r^2}{(10\text{кпк})^2}\right) \quad (4)$$

Также, расчеты были выполнены для модифицированной модели магнитного поля Ранда-Кулкарни [9]:

$$B_\phi = 3\text{мкГс} \cdot \exp\left(-\frac{r}{30\text{кпк}} - \frac{|z|}{z_0}\right) \sin\left(1.0134 \left[\frac{r}{1\text{кпк}}\right] - 3.1876\right), \quad (5)$$

где $z_0 = 175\text{пк}$ для $|z| < 500\text{пк}$ и $z_0 = 1\text{кпк}$ для $|z| > 500\text{пк}$.

Это выражение хорошо описывает имеющиеся данные из экспериментов по измерению поля – амплитуду и величину спадания поля с удалением от центра Галактики, а также изменения направления поля, связанные со спиральной структурой распределения вещества Галактики.

Случайное поле задавалось согласно алгоритму, использованному в работе [7], который учитывает корреляцию между напряженностью магнитного поля в соседних ячейках.

Расчеты траекторий частиц КЛ производились от области, соответствующей местоположению Солнечной Системы, до их вылета из Галактики, ограниченной сферой с радиусом 15кпк.

С использованием полученной зависимости времени жизни частиц КЛ в Галактике был проведен расчет энергетической зависимости количества пройденного вещества. Плотность межзвездного вещества в расчетах предполагалась равной $n_0 = 1 \text{ см}^{-3}$ для галактического диска и $n_g = 0,01 \text{ см}^{-3}$ для области гало.

2 Результаты

На рис.1 представлены расчетные энергетические зависимости количества вещества, пройденного протонами КЛ для двух моделей магнитного поля (сплошная линия – модель концентрических колец Ранда-Кулкарни (5), пунктирная линия, немного ниже – поле, представленное выражением (4)). Для более тяжелых ядер зависимость количества пройденного вещества выражается через протонную следующим образом: $X(E, Z) = X\left(\frac{E}{Z}\right)$, где $X(E)$ – пробег протонов.

Расчеты были выполнены для диапазона энергий 10^{13} - 10^{20} эВ для модели Ранда-Кулкарни (5) и 10^{14} - 10^{20} эВ – для модели (4). В области больших энергий ($>10^{18}$ эВ) частицы практически не удерживаются магнитным полем Галактики, вылетая из нее, и проходя, в среднем, одинаковый путь при различных энергиях. В области энергий 10^{16} эВ $< E < 10^{18}$ эВ показатель степени в зависимости от энергии составляет -0,8. Эта область также соответствует интенсивному вылету частиц из Галактики. В

области около «колена» зависимость снова сглаживается и выходит на наклон $\approx -0,2$. В этом энергетическом диапазоне магнитное поле Галактики эффективно удерживает частицы.

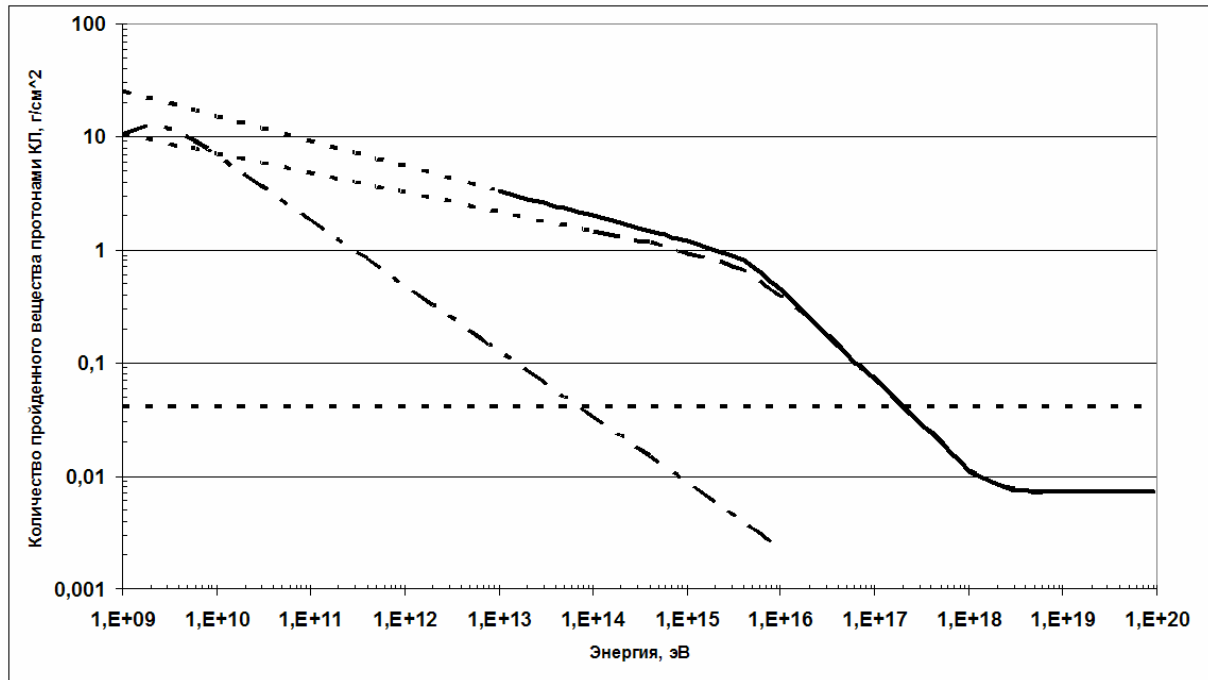


Рис. 1. Энергетические зависимости количества вещества, пройденного протонами КЛ в Галактике.

Пунктиром изображена экстраполяция расчетных зависимостей до области энергий ГэВ, для которых имеются косвенные экспериментальные данные о значении количества пройденного вещества $X(E)$ частицами КЛ при этих энергиях ~ 15 г/см² (из соотношения первичных/вторичных ядер в составе первичного космического излучения). По расчетным данным, наклон энергетической зависимости пройденного пути не может быть сильнее чем $-0,2$, иначе трудно получить адекватные значения $X(E)$ в диапазоне энергий Гэв.

Штрихпунктирной линией на рис. 1 изображена энергетическая зависимость количества пройденного вещества в рамках модели распространения КЛ в Галактике leaky box (2).

Как это следует из графика, использование подобной зависимости (наклон $\alpha \approx 0,6$) приводит к тому, что уже при энергии излома частицы КЛ должны проходить количество вещества, меньшее соответствующей величины при распространении по прямой от центра Галактики до Солнечной системы - $\lambda_{gc} = 8\pi k \cdot n_{\text{протон}} / c \approx 0,04 \text{ г/см}^2$ (на рис.1 изображено горизонтальной линией). Это обстоятельство осложняет проблему согласования наблюдаемого энергетического спектра с предсказаниями стандартной модели ускорения КЛ ударными волнами в остатках сверхновых.

На рис.2 представлена вероятность того, что ядро дойдет от области источников до Земли, не испытав при этом взаимодействия с ядрами галактической среды. Расчет проводился в рамках модели QGSJET [11] с учетом полученных зависимостей $X(E)$. Влияние взаимодействий ядер на спектры не сводится, вообще говоря, только к поглощению. Однако расчеты показали, что учет фрагментации ядер, в результате которой могут возникать более легкие ядра, не меняет существенным образом интенсивности различных групп ядер. Соответствующие изменения в энергетическом диапазоне 10^{14} - 10^{20} эВ не превосходят нескольких процентов, так что с хорошей точностью можно ограничиться только учетом поглощения ядер.

Кривые на рис.2 описывают относительную величину изменения интенсивности парциальных спектров КЛ. Так как сечение взаимодействия растет с увеличением Z ядра, взаимодействие с веществом межзвездной среды является более выраженным для групп тяжелых элементов и практически не оказывает влияния на изменение интенсивности легких. Полученные расчеты указывают, например, на то, что парциальный спектр железа должен быть жестче спектров легких частиц. Если парциальный спектр протонов имеет показатель $-2,7$, то спектр железа при прочих равных условиях должен иметь показатель $-2,55$.

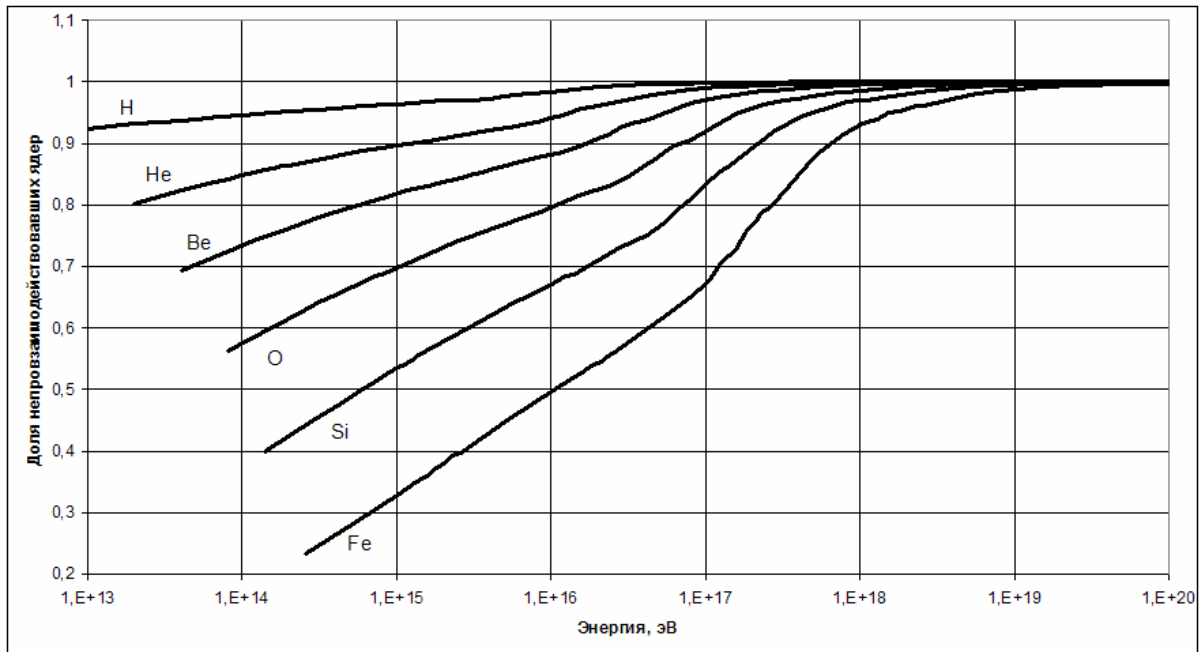


Рис.2 Доля непровазимодействовавших ядер КЛ.

Заключение

Результаты настоящей работы показывают, что разность между теоретическим показателем спектра до излома ($\gamma \approx 2$) в стандартной модели ускорения КЛ ударными волнами и экспериментально наблюдаемым показателем ($\gamma \approx 2,7$) не может быть скомпенсирована введением зависимости пробега частиц КЛ от энергии вида (3). Согласование наблюдаемого энергетического спектра КЛ с выводами стандартной модели требует дополнительных предположений.

Полученные расчеты поглощения ядер КЛ в результате взаимодействия с протонами межзвездной среды указывают на некоторое уположение парциальных спектров тяжелых элементов (показатель степени в парциальном спектре железа меняется на $\Delta\gamma = 0,15$). При достаточно низких энергиях ($<10^{13}$ эВ), из-за экспоненциального уменьшения интенсивности ядер КЛ от роста количества пройденного вещества, интенсивность ядер железа в ПКЛ должна быть существенно меньше, чем в источниках (вплоть до нескольких процентов, при энергиях несколько ГэВ). Это обстоятельство усугубляет вопрос об источниках тяжелых ядер КЛ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-02-16401).

Список литературы

- [1] Бережко Е.Г., Ксенофонтов Л.Т. ЖЭТФ, 1999, 89 том, № 3, 391 стр.
- [2] D.C. Ellison et al., Ap. J. 487 (1997) 197.
- [3] Sveshnikova L.G. Astropart. Phys. 2003. V. 409. P. 799
- [4] N.E. Yanasak et al., Astrophys. J. 563, 768 (2001)
- [5] Березинский В.С., Буланов С.В., Гинзбург В.Л. Астрофизика космических лучей. М.: Наука. 1990
- [6] Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д., Шукуров А.М. Магнитные поля галактик. М.: Наука. 1988
- [7] Ptuskin V.S., Rogovaya S.I., Zirakashvili V.N. et al. Astron. Astrophys. 1993. V. 268. P. 726
- [8] Горчаков Е.В., Харченко И.В. Изв. РАН. Сер. физ. 2000. Т.64. №7. С. 1457
- [9] R.J.Rand, S.R.Kulkarni, ApJ, 343: 760-772, 1989