

УДК 523.165

РОСТ ОТНОШЕНИЯ ПОТОКОВ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР К ПОТОКУ ЖЕЛЕЗА, ИЗМЕРЕННЫЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ АТИС ПРИ ЭНЕРГИИ БОЛЬШЕ 100 ГэВ НА НУКЛОН

© 2013 г. А. Д. Панов, В. И. Зацепин, Н. В. Сокольская

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

E-mail: panov@dec1.sinp.msu.ru; viza@dec1.sinp.msu.ru

Приводятся аргументы в пользу того, что рост отношения потоков тяжелых ядер к потоку железа, измеренный в эксперименте АТИС-2, может быть объяснен в рамках модели закрытой галактики с включенными локальными областями, содержащими источники космических лучей. Эта модель также предсказывает универсальное поведение спектров всех обильных ядер, состоящее в уположении их спектров в области энергии около 200–300 ГэВ/нуклон. В то же время эта модель предсказывает значение спектрального индекса в источниках около $\alpha = 2.5$.

DOI: 10.7868/S0367676513050438

ВВЕДЕНИЕ

Принято считать, что отношения потоков вторичных космических лучей к потокам соответствующих родительских первичных ядер должны быть падающей функцией энергии. Это является следствием уменьшения с энергией диффузионного времени утечки из галактики. Это ожидание было очень хорошо подтверждено до энергий в несколько десятков ГэВ в экспериментах НЕАО-3-С2 [1], НЕАО-3-С3 [2–4] и в других экспериментах. Однако данные эксперимента НЕАО-3-С3 [2–4] обнаружили неожиданный рост этих отношений в области 100–600 ГэВ на нуклон. В [2–4] предполагалось, однако, что наблюдаемый рост может быть связан с систематическими ошибками. Подобное неожиданное изменение зависимости от энергии было обнаружено в отношении Ti/Fe в данных эксперимента АТИС-2 [5] около энергии 70–80 ГэВ на нуклон, но статистика для энергий больше 100 ГэВ на нуклон была мала, и эффект был признан в [5] недостаточно статистически значимым. Хотя эти результаты экспериментов НЕАО-3-С3 и АТИС-2 не рассматривались слишком серьезно, они заставили нас рассмотреть данные по тяжелым ядрам в эксперименте АТИС-2 более подробно.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ АТИС-2

АТИС (Advanced Thin Ionization Calorimeter) — это баллонный спектрометр для измерения энергетических спектров ядер первичных космических лучей от протонов до железа [6]. Спектрометр АТИС состоит из полностью активного ВГО-калориметра; углеродной мишени с встроенными в нее

сцинтилляционными годоскопами; кремниевой матрицы, которая используется как основной детектор заряда первичной частицы. Исследование отношения потоков тяжелых ядер к потоку железа в эксперименте АТИС-2 было выполнено в [7]. В эксперименте АТИС-2 зарядовое разрешение в группе тяжелых ядер недостаточно для разделения соседних ядер, поэтому в работе [7] было построено отношение потока тяжелых ядер с Z от 16 до 24 к потоку железа. Отметим, что в рассматриваемую группу тяжелых ядер входят как вторичные ядра, так и некоторое количество первичных. На рис. 1 приведено отношение потока тяжелых ядер к потоку железа из этой работы.

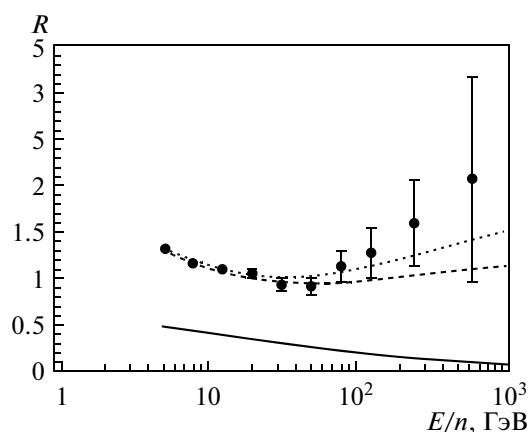


Рис. 1. Отношение потока ядер с зарядом Z от 16 до 24 к потоку железа. Точки — эксперимент АТИС, сплошная кривая — модель leaky-box, штриховая — leaky-box + вклад первичных ядер, пунктир — модель закрытой галактики со сверхпузырями.

2. ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ LEAKY-BOX

Чтобы описать распространение частиц, начнем с аппроксимации в простой модели leaky-box. Пусть N_1, N_2, \dots, N_k – типы вторичных ядер, произведенных при фрагментации железа. Тогда отношение суммарного потока вторичных $I_{\Sigma S} = \sum_{i=1}^k I_{N_i}$ к потоку железа может быть записано в виде

$$\frac{I_{\Sigma S}}{I_{\text{Fe}}} = \sum_{i=1}^k \frac{\kappa N_i \text{Fe}}{\kappa_{\text{esc}}^{N_i}(\varepsilon) + \kappa_{N_i}}, \quad (1)$$

где ε – энергия частицы на нуклон, $\kappa_{\text{esc}}^{N_i} = 1/\lambda_{\text{esc}}^{N_i}$ – обратная величина диффузионной длины утечки ядер N_i с энергией ε из галактики, $\kappa_{N_i} = 1/\lambda_{N_i}$ – обратная длина фрагментации в межзвездной среде для ядер N_i , $\kappa_{N_i, \text{Fe}} = 1/\lambda_{N_i, \text{Fe}}$ – обратная парциальная длина фрагментации железа в ядро N_i . Длина утечки λ_{esc} рассматривается как универсальная функция жесткости для всех ядер, и мы используем здесь аппроксимацию из [1]: $\lambda_{\text{esc}} = 34.1 R^{-0.6} \text{ Г} \cdot \text{см}^{-2}$. Мы использовали значения λ_{N_i} , скомпилированные в книге Гинзбурга и Сыроватского [8], и рассчитали парциальные длины $\lambda_{N_i, \text{Fe}}$, используя парциальные сечения фрагментации, приведенные в [9], предполагая состав межзвездной среды 90% протонов и 10% гелия. Расчетное отношение вторичных тяжелых ядер в группе $Z = 16-24$ к железу в простой модели leaky-box (сплошная линия) показано на рис. 1. В области энергий $\varepsilon < 40$ ГэВ/нуклон модель leaky-box предсказывает отношения более низкие, чем экспериментальные. Это может быть связано с вкладом первичных в поток тяжелых ядер. Следовательно, отношение ($Z = 16-24$)/Fe можно попытаться описать суммой вторичных ядер, образованных при фрагментации железа, как предсказывает модель leaky-box, и некоторым вкладом первичных. В [7] указано, что спектры обильных первичных ядер C, O, Ne, Mg, Si очень похожи друг на друга. Можно предположить, что и спектры более тяжелых первичных ядер (но легче железа) имеют ту же форму, поэтому в качестве образца формы мы использовали спектр кислорода. Фит данных эксперимента ATIC с помощью отношения суммы вторичных спектров в leaky-box и некоторого вклада первичных спектров для группы ($Z = 16-24$) к спектру железа показан на рис. 1 штриховой линией. Этот фит является вполне разумным для $\varepsilon < 100$ ГэВ/нуклон, но не описывает рост отношения при энергиях $\varepsilon \geq 100$ ГэВ/нуклон.

3. МОДЕЛЬ ЗАКРЫТОЙ ГАЛАКТИКИ С ЛОКАЛЬНЫМИ ПУЗЫРЬЯМИ

Таким образом, простая модель leaky-box с добавлением первичных потоков не описывает экспериментальные данные при энергиях > 100 ГэВ на нуклон. Необходимы некоторые дополнительные идеи, чтобы понять изменение хода зависимости отношений от энергии. Одна из возможностей – это модель “закрытой галактики”, предложенная в [10]. В этой работе было показано, что такая модель может обеспечивать рост отношения sub-Fe/Fe. Заметим, что модель закрытой галактики была использована в [11] при обсуждении аномально высокого значения отношения $(\text{Li} + \text{Be} + \text{B})/(\text{C} + \text{N} + \text{O})$ в данных эксперимента JACEE.

В модели закрытой галактики предполагается, что в галактике имеется ряд компактных областей, каждая из которых содержит источники космических лучей и описывается простой моделью leaky-box в отношении диффузионной утечки частиц из этой области. Более того, предполагается, что все источники КЛ концентрируются в таких локальных областях. В оригинальной статье [10] предполагалось, что этими областями являются галактические рукава, но это могут быть и сверхпузыри, произведенные взрывами сверхновых. Последняя возможность выглядит правдоподобной, если сверхновые взрываются в основном в звездных ассоциациях, где процесс звездообразования происходил недавно и где образовывались массивные короткоживущие звезды. Точная природа локальных областей не важна для модели, но мы будем предполагать, для определенности, что это сверхпузыри, и будем называть эту модель моделью “закрытой галактики со сверхпузырями” (CG + B, ClosedGalaxy + Bubbles). Второе предположение модели: вся галактика является закрытой в отношении диффузионной утечки. В модели считается, что Солнце расположено в локальном пузырьке и цель модели – предсказание потоков КЛ в этом локальном пузырьке. Полный поток КЛ в пузырьке состоит из двух частей [10]: 1) локальный поток, который может быть описан обычной простой моделью leaky-box, примененной к пузырьку, и 2) глобальный равновесный галактический поток (здесь и далее – bulk-поток), который также может быть описан моделью, похожей на leaky-box, примененной к галактике в целом, но в предположении, что $\lambda_{\text{esc}}(\varepsilon) \approx \infty$. В такой модели есть также один свободный параметр, представляющий долю bulk-потока в полном потоке, которая не известна a priori и должна быть определена, чтобы описать экспериментальные данные.

Единственными источниками КЛ в bulk-потоке в модели CG + B являются поверхности пузы-

рей. В обычном предположении, что вероятность частицы покинуть некоторый объем не зависит от уже пройденного пути в объеме, можно получить уравнение для модифицированного источника bulk-потока

$$Q_{bulk}(\varepsilon) = \frac{\kappa_{esc}(\varepsilon)}{\kappa_{esc}(\varepsilon) + \kappa} Q(\varepsilon). \quad (2)$$

Здесь $Q(\varepsilon)$ — спектр данного типа ядер в источнике в пузырьре, $\kappa_{esc}(\varepsilon)$ — обратная длина утечки для этих ядер из пузырьра, κ — обратная ядерная длина для этих ядер. Используя уравнение (2) и обычную формулу leaky-box, примененную к пузырьру и к галактике, можно получить отношение полного потока вторичных ядер N_i к потоку железа в модели CG + B:

$$\frac{I_{N_i}(\varepsilon)}{I_{Fe}(\varepsilon)} = \frac{\frac{\kappa_{N_i,Fe}}{\kappa_{esc}^{N_i} + \kappa_{N_i}} + K \frac{\kappa_{N_i,Fe} \kappa_{esc}^{Fe}(\varepsilon)}{\kappa_{N_i} \kappa_{Fe}}}{1 + K \frac{\kappa_{esc}^{Fe}(\varepsilon)}{\kappa_{Fe}}}, \quad (3)$$

где K описывает долю bulk-потока в полном потоке. Для потока группы ядер необходимо суммирование по i в уравнении (3).

Предсказания модели CG + B для потока вторичных и первичных ядер в группе $Z = 16-24$ с $K = 0.2$ показаны на рис. 1 пунктиром. Сложное поведение модели с падением и ростом отношения является результатом конкуренции локального и bulk потоков. Видно, что модель CG + B, включающая вклад первичных потоков, может описать экспериментальные данные в довольно хорошем приближении, но рост отношения в эксперименте, возможно, более резкий, чем в модели.

На рис. 2 показан спектр всех ядер с $Z \geq 6$, измеренный в эксперименте ATIC, который явно показывает уположение при энергии больше ~ 200 ГэВ на нуклон. В этот спектр основной вклад дают, конечно, первичные обильные ядра. Спектры первичных обильных ядер также могут быть поняты в рамках модели CG + B. Описание спектров кислорода и железа в ATIC из [7] с помощью модели CG + B показаны на рис. 2. Чтобы фитировать спектры, мы должны были принять значения показателя спектра в источниках $\alpha = 2.45$ для кислорода и $\alpha = 2.55$ для железа. Это очень мягкие спектры, и, возможно, это может быть проблемой для модели CG + B. Однако преимуществом этой модели является предсказание универсального уположения спектров обильных ядер в области 200–300 ГэВ/нуклон, подобного открытому в ATIC [12] и подтвержденному в CREAM [13], без гипотезы о дополнительном источнике мягкого спектра КЛ.

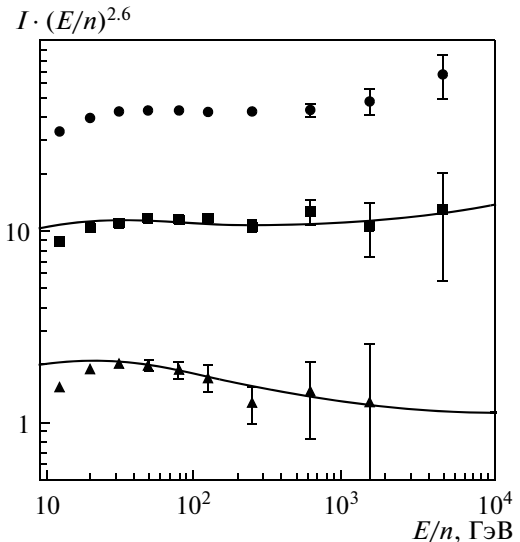


Рис. 2. Спектры всех ядер с $Z \geq 3$ (точки), кислорода (квадраты) и железа (треугольники), измеренные в эксперименте ATIC. Линии — описание спектров кислорода при $\alpha = 2.45$ и железа при $\alpha = 2.55$ в модели закрытой галактики со сверхпузырями. Интенсивность I в единицах $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{ГэВ}^{-1}$.

Отметим одно важное следствие модели CG + B. В обычной модели leaky-box коэффициент диффузии может быть оценен как [14, p. 124] $D(\varepsilon) \sim \sim \rho c H^2 / \lambda_{esc}(\varepsilon)$, где H — это некоторый характерный размер системы. В случае обычной модели leaky-box, примененной к Галактике, H означает полутолщину галактического гало (1–4 пк), а в контексте CG + B модели H означает половину размера Локального пузырьра (~ 100 пк [15, 16]). Так как λ_{esc} одинаково в обоих случаях, а ожидаемый размер пузырьра много меньше размера гало, и ρ внутри пузырьра предполагается много меньшим, чем средняя плотность в Галактике [15, 16], то CG + B предполагает коэффициент диффузии много меньшим (на два–три порядка величины, и даже меньше), чем обычно принимаемая величина.

Работа поддержана РФФИ, грант № 11-02-00275.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Engelmann J., Ferrando P., Soutoul A. et al. // *Astron. Astrophys.* 1990. V. 233. P. 96.
2. Jones M., Klarmann J., Stone E. et al. // *Proc. 19th ICRC. La Jolla.* 1985. V. 2. P. 28.
3. Israel M., Jones M., Kamionkowski M. et al. // *Proc. 20th ICRC. Moscow.* 1987. V. 1. P. 330.
4. Binns W., Garrard T., Israel M. et al. // *Astrophys. J.* 1988. V. 324. P. 1106.
5. Zatsepin V.I. et al. // *Astron. Lett.* 2004. V. 35. P. 338.
6. Guzik T.G. et al. // *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. P. 1763.
7. Panov A.D. for the ATIC Collaboration // *J. Phys. Conf. Series.* 2013. V. 409. 012036.

8. *Ginzburg V.L., Syrovatskii S.I.* The Origin of Cosmic Rays. Oxford: Pergamon press, 1964. 384 p.
9. *Ferrando P., Webber W., Goret P. et al.* // *Phys. Rev. C.* 1988. V. 37. P. 1490.
10. *Peters B., Westergaard N.* // *Astrophys. Space Sci.* 1977. V. 48. P. 21.
11. *Takahashi Y. for the JACEE Collarobation* // *Nucl. Phys. B. Proc. Suppl.* 1998. V. 60. P. 83.
12. *Панов А.Д., Адамс Дж.Х., Ан Х.С., Батьков К.Е., Башинджагян Г.Л., Ваттс Дж.В., Вефель Дж.П., Вудж., Ганел О., Гузик Т.Г., Гунасингха Р.М., Зацепин В.И., Изберт И., Ким К.Ц., Кристл М., Кузнецов Е.Н., Панасюк М.И., Сио Э.С., Сокольская Н.В., Чанг Дж., Шмидт В.К.Х., Фазели А.Р.* // *Изв. Сер. физ.* 2007. Т. 71. № 4. С. 512.
13. *Panov A.D., Adams J.H., Ahn H.S., Batkov K.E., Bashindzhagyan G.L., Watts J.W., Wefel J.P., Wu J., Ganel O., Guzik T.G., Gunasingha R.M., Zatsopin V.I., Isbert J., Kim K.C., Christl M., Kouznetsov E.N., Panasyuk M.I., Seo E.S., Sokolskaya N.V., Chang J., Schmidt W.K.H., Fazely A.R.* // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics.* 2007. V. 71. № 4. P. 494.
14. *Ahn H.S. et al.* // *Astrophys. J.* 2009. V. 707. P. 593.
15. *Gaisser T.K.* Cosmic rays and particle physics. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 1990.
16. *Frish P., York D.* // *Astrophys. J. Lett.* 1983. V. 271. L59.
17. *Berghoefer T.W., Breitschwerdt D.* // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 390. P. 299.