

УДК 537.591

БАЛЛОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ЯДЕР ВОДОРОДА В ГАЛАКТИЧЕСКОМ КОСМИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ 0,8 – 1,8 ГэВ/нуклон

Э. А. Богомолов¹, Г.И. Васильев¹, С. Ю. Крутьков¹, С. В. Степанов¹,
М. С. Шулакова¹, Л. А. Разоренов

Представлены результаты измерений изотопного состава ядер водорода в первичном космическом излучении в релятивистской области энергий, проведенных в баллонном полете магнитного спектрометра в период вблизи максимума солнечной активности. По данным измерений поток ядер дейтерия на границе атмосферы в энергетической области 0,8 – 1,8 ГэВ/нуклон равен 12 ± 3 ($\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ/нуклон}$)⁻¹. Отношение потоков ${}^2\text{H}/{}^4\text{He}$ равно $0,36 \pm 0,08$.

Исследование спектров и изотопного состава ядер водорода в первичном космическом излучении в широкой энергетической области является одной из важных задач физики космических лучей. Относительное содержание дейтерия в космических лучах на несколько порядков превышает его естественную распространенность и формируется в основном за счет ядерных взаимодействий ядер гелия в межзвездной среде, что позволяет исследовать проблемы, связанные с распространением ядер гелия в Галактике, и выяснить, отличается ли распространение гелия в межзвездной среде от распространения других ядер.

К настоящему времени из-за экспериментальных трудностей спектры ядер дейтерия в различные периоды солнечной активности измерены в основном лишь в нерелятивистской области энергий до 450 МэВ/нуклон [1]. Попытки измерений были предприняты в

¹Физико-технический институт РАН, С.-Петербург.

70-е годы в России в области 1 ГэВ/нуклон [2], в Индии при энергии $7,5 \text{ ГэВ/нуклон}$ [3] и в настоящее время планируются в баллонных и спутниковых экспериментах в ряде лабораторий мира. В последние годы в ФТИ РАН были проведены баллонные эксперименты по измерению спектра ядер дейтерия в энергетических диапазонах $0,8 - 1,8$ и $3 - 7 \text{ ГэВ/нуклон}$ с использованием магнитного спектрометра при пороговых жесткостях геомагнитного обрезания $2,8$ и 9 ГВ . Трехсуточный баллонный полет, проведенный в июле 1991 г. из Китая с целью измерения потоков ядер дейтерия с энергией $3 - 7 \text{ ГэВ/нуклон}$, закончился безрезультатно из-за потери магнитного спектрометра в горах Киргизии, поэтому обсуждаются лишь результаты баллонного эксперимента по измерению ядер дейтерия с энергией $0,8 - 1,8 \text{ ГэВ/нуклон}$.

Запуск аэростата с магнитным спектрометром ФТИ РАН был осуществлен 12 июля 1990 г. в районе с пороговой жесткостью $2,8 \text{ ГВ}$. Полет проходил на высоте при остаточном давлении $10,9 \pm 0,2 \text{ г/см}^2$ в период вблизи максимума солнечной активности.

Магнитный спектрометр включал в себя управляющий телескоп из сцинтилляционных и черенковского детекторов, постоянный магнит и систему искровых камер для определения траекторий пролета регистрируемых частиц, позволяющую совместно с магнитным анализом измерять их жесткостной спектр. Газовый черенковский детектор с пороговым лоренц-фактором, равным $2,90$, позволял регистрировать частицы с пороговым лоренц-фактором меньше $2,90$ и проводить амплитудный анализ сигналов для частиц, имеющих скорость выше пороговой. Совместное использование магнитного анализа, порогового черенковского детектора и жесткости геомагнитного обрезания позволяло разделить в регистрируемом жесткостном спектре области отклонений ядер дейтерия и гелия с энергиями $0,8 - 1,8 \text{ ГэВ/нуклон}$ (где нижний энергетический предел определялся жесткостью геомагнитного обрезания, а верхний предел – порогом черенковского детектора), вторичные протоны из остаточной атмосферы над прибором в энергетическом диапазоне $0,08 - 1,8 \text{ ГэВ}$ и мюоны с энергией ниже $0,20 \text{ ГэВ}$. Соответствующие расчетные отклонения для частиц с положительным знаком заряда в единицах R^{-1} , где R – жесткость частицы, равны соответственно $0,19 - 0,35$, $0,38 - 2,50$ и выше $3,48 \text{ ГВ}^{-1}$. Разделение ядер дейтерия и гелия осуществлялось с помощью амплитудного анализа сигналов сцинтилляционных детекторов.

Калибровка магнитного спектрометра проводилась перед полетом с помощью атмосферных мюонов, позволяющих, в частности, определить геометрический фактор прибора и эффективность черенковского детектора. Измеренный геометрический фактор прибора равен $1,06 \pm 0,08 \text{ см}^2 \cdot \text{ср.}$, эффективность регистрации черенковским де-

тектором частиц с лоренц-фактором больше 3, согласно измерениям, не ниже 0,999. При точности координатных измерений 0,2 мм и усредненной отклоняющей способности магнита 66,1 $\kappa\Gamma\text{с} \cdot \text{см}$ разрешение по жесткости определяется соотношением: $\Delta R/R = 5,8 \cdot 10^{-2} R$ (ГВ).

В результате эксперимента на высотах дрейфа аэростата измерен жесткостной спектр регистрируемых прибором частиц. На рис. 1 представлен спектр отклонений частиц с лоренц-фактором ниже 2,9 в магнитном поле спектрометра за 11 часов полета. В области отклонений частиц, соответствующей регистрации ядер дейтерия и гелия в энергетическом диапазоне 0,8 – 1,8 ГэВ/нуклон, зарегистрировано 41 ядро дейтерия и 107 ядер гелия. С учетом геометрического фактора прибора и времени экспозиции (36370 с) при остаточном давлении $10,9 \pm 0,2 \text{ г/см}^2$ для потоков ядер дейтерия и гелия в области энергий 0,8 – 1,8 ГэВ/нуклон получены значения $dI_d/dE = 11 \pm 2$ ($\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ/нукл.})^{-1}$, $dI_{He}/dE = 28 \pm 3$ ($\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ/нукл.})^{-1}$.

N/0.05 ГВ

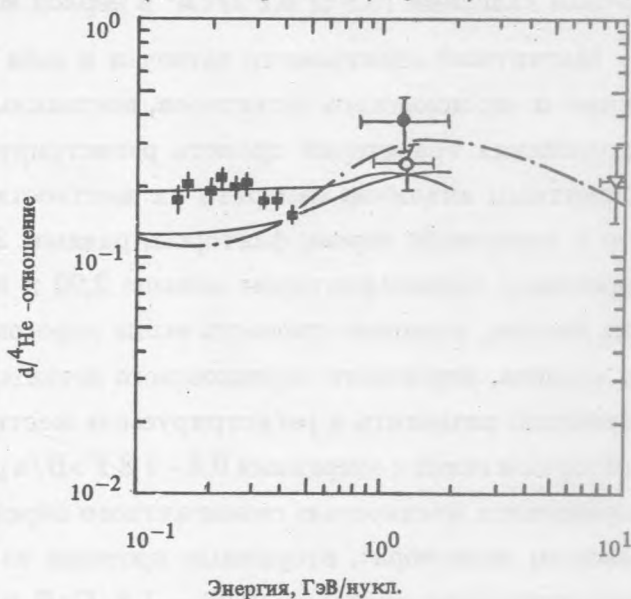
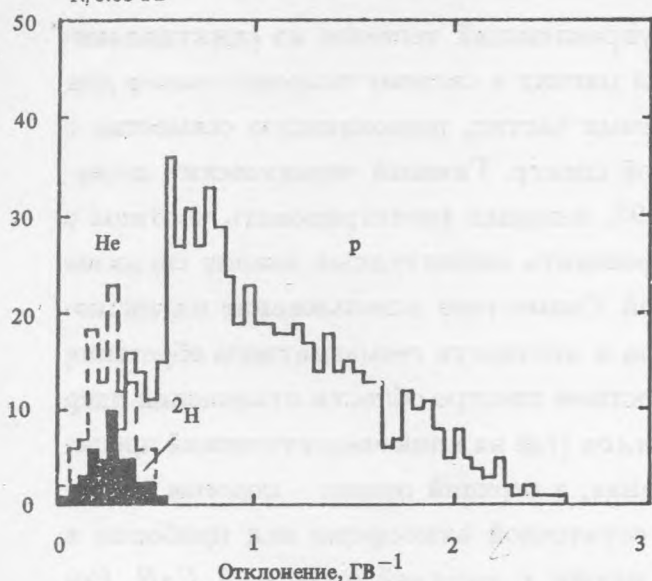


Рис. 1. Спектр частиц, зарегистрированных магнитным спектрометром.

Рис. 2. Отношение потоков ядер d и ${}^4\text{He}$ в зависимости от энергии E.

С учетом вклада ядер дейтерия из остаточной атмосферы над прибором, оцененного на основе работы [4] на уровне 1 ($\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ/нукл.})^{-1}$, поглощения регистрируемых ядер в остаточной атмосфере и материале прибора над трековой системой (3 г/см^2 , алюминий и сцинтиллятор), с учетом пробегов для релятивистских ядер гелия и дейтерия (45 и 75 г/см^2 [5]), потоки ядер дейтерия и гелия на границе атмосферы в области энергий 0,8 – 1,8 ГэВ/нуклон равны: $dI_d/dE = 12 \pm 3$ ($\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot$

$\text{ГэВ/нукл.})^{-1}$, $dI_{\text{He}}/dE = 38 \pm 5 (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ/нукл.})^{-1}$. Отношение потоков $d/{}^4\text{He}$ на границе атмосферы с учетом измеренного в работе [6] отношения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ равно $0,36 \pm 0,08$.

Измеренный в эксперименте поток ядер гелия хорошо согласуется с ожидаемым [1] для периода максимума солнечной активности. Рассчитанный в работе [1] поток ядер дейтерия с энергией $0,8 - 1,8 \text{ ГэВ/нуклон}$, возникающих за счет взаимодействий космических лучей в межзвездной среде, равный $8 (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ/нукл.})^{-1}$, заметно ниже измеренного в эксперименте. Результаты экспериментов ФТИ РАН и [1, 3] и расчетов [1, 7] по определению отношения $d/{}^4\text{He}$ в космических лучах представлены на рис. 2.

Возможное увеличение потока ядер дейтерия за счет регистрации части первичных протонов с энергией выше $1,8 \text{ ГэВ}$, неточности траекторных измерений или регистрации ядер гелия было тщательно проанализировано с использованием, в частности, наземных калибровочных данных по эффективности черенковского детектора и сцинтилляционных детекторов. Анализ показал, что вклад этих эффектов не может объяснить полученное превышение потока ядер дейтерия над расчетным. Измеренный нами в работе [2] поток ядер дейтерия в диапазоне $0,9 - 1,6 \text{ ГэВ/нуклон}$ в период вблизи минимума солнечной активности в 1975 г. на глубине остаточной атмосферы 10 г/см^2 с помощью магнитного спектрометра, имевшего дополнительный черенковский твердотельный детектор с пороговым лоренц-фактором $1,5$, был равен $18 \pm 5 (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ/нукл.})^{-1}$ и также заметно отличался от расчетного. Соответствующее значение потока ядер дейтерия с энергией $0,9 - 1,6 \text{ ГэВ/нуклон}$ на границе атмосферы с учетом работ [4, 5] равно $19 \pm 5 (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ/нукл.})^{-1}$. Является ли расхождение измеренного и расчетного потоков ядер дейтерия объективным, могут показать лишь дальнейшие исследования.

Выполнение этой работы было поддержано грантом фонда Дж. Сороса, присужденного Американским физическим обществом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Webber W. R. et al. *Astrophys. J.*, **380**, 230 (1991).
- [2] Bogomolov E. A. et al. *Proc. 16th ICRC, Kyoto*, **1**, 330 (1979). Webber W. R. *Proc. 20th ICRC, Moscow*, **8**, 65 (1987).
- [3] Arraño K. M. V. *Proc. 13th ICRC, Denver*, **1**, 126 (1973).
- [4] Papini P., Grimani C., Stephens S. A. *Proc. 23rd ICRC, Calgary*, **1**, 503 (1993).
- [5] Mayer J. P. *Astron. Astrophys. Suppl.*, **7**, 417 (1972).

- [6] Ficenec D. J. et al. Proc. 23rd ICRC, Calgary, 1, 515 (1993).
- [7] Mewaldt R. A. AIP Conf. Proc., 183, Cosmic Abundances of Matter, ed. C. J. Waddington (New York, AIP), 124 (1989).

Поступила в редакцию 19 января 1994 г.