

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 53.043

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕГКИХ ЯДЕР С ВОЛЬФРАМОМ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ РАМЕЛА

© 2020 г. О. А. Голуб^а*, А. Г. Майоров^а, В. В. Алексеев^б

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

^бЯрославский государственный университет им. П.Г. Демидова, ул. Советская 14, Ярославль, 150003 Россия

*E-mail: ogolub394@gmail.com

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

В статье приводится энергетическая зависимость сечения неупругого взаимодействия легких ядер (протонов, гелия, лития) с энергиями от нескольких сотен мегаэлектронвольт с ядрами вольфрама, полученная с использованием данных космического эксперимента РАМЕЛА. Прибор РАМЕЛА предназначен для прецизионных измерений потоков космических лучей различной природы и включал набор детекторных систем для надежного определения характеристик частицы (типа и энергии). В работе идентификация частиц осуществлялась при помощи трековой системы в магнитном поле, время-пролётной системы и системы антисовпадений. Позиционно-чувствительный калориметр с поглотителем из вольфрама, в свою очередь, позволяет изучать характеристики взаимодействия частиц внутри него, в частности, вычислить сечение их неупругого взаимодействия.

Ключевые слова: эксперимент РАМЕЛА, космические лучи, сечение взаимодействия

DOI: 10.1134/S2079562920060263

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из главных инструментов для моделирования прохождения частиц через вещество является пакет программ Geant4 [1]. Он применяется в различных научных областях, включая фундаментальные исследования в физике высоких энергий, экспериментах на ускорителях и в космосе, а также для решения прикладных задач в области ядерной медицины, атомных реакторов и во многих других научно-прикладных исследованиях. Одной из проблем моделирования прохождения частиц через вещество в Geant4 является отсутствие единой готовой модели, которую можно было бы использовать для описания взаимодействий частиц и ядер с энергиями от нескольких килоэлектронвольт до нескольких тераэлектронвольт с разными средами. Улучшение и развитие численных моделей тесно связано с получением новых экспериментальных данных о взаимодействиях частиц с веществом и последующим сравнением с результатами моделирования. Сегодня подобные работы проводятся, но в основном они опираются на данные только наземных ускорительных комплексов, когда доступен ограниченный набор налетающих частиц с несколькими фиксированными энергиями [2–4]. Космические лучи являются природным уско-

рителем элементарных частиц, включающим в себя непрерывный энергетический спектр частиц и всех стабильных ядер, благодаря чему может быть значительно дополнен имеющийся экспериментальный ряд данных для построения численных моделей. Идея использования космических лучей для определения характеристик взаимодействий с ядрами атомов атмосферы Земли уже применяется в экспериментах по регистрации частиц ультравысоких энергий. Однако трудностью является одновременное незнание сразу нескольких ключевых характеристик: не только сечений взаимодействия, но также типа и энергии частицы [5, 6]. Спутниковый эксперимент РАМЕЛА [7], предназначенный для измерения потоков заряженных частиц, благодаря своему набору детекторов с высокой надежностью выбирает из потока частиц необходимую компоненту, формируя пучок частиц известного типа и энергии, проходящего под известным углом. И одновременно другой детектор — позиционно-чувствительный стриповый калориметр с поглотителем из вольфрама, — служит мишенью для этих частиц. В статье приводится предварительная энергетическая зависимость сечения неупругого взаимодействия легких ядер с ядрами вольфрама в диапазоне энергий от нескольких сотен мега-

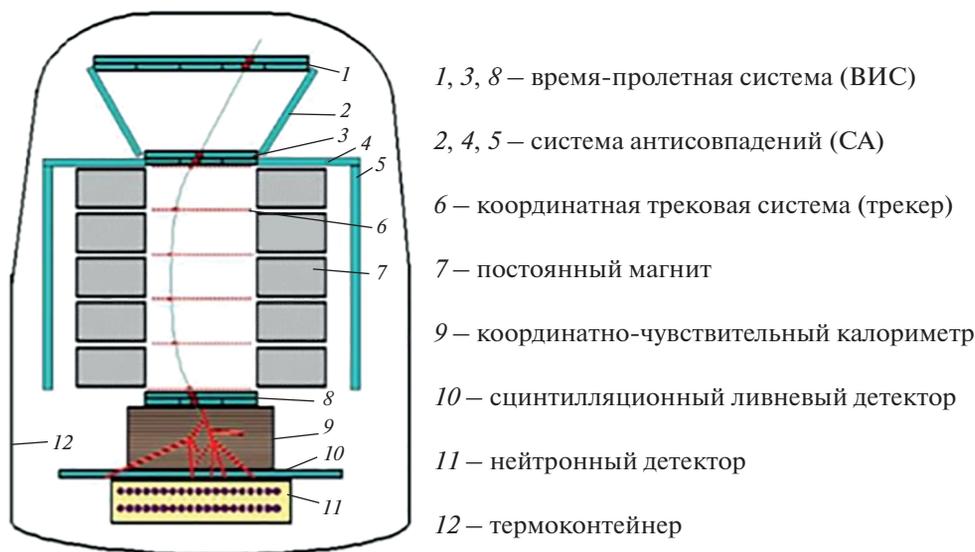


Рис. 1. Схема научной аппаратуры PAMELA.

электронвольт до нескольких сотен гигаэлектронвольт, полученная при обработке научных данных космического эксперимента PAMELA.

ЭКСПЕРИМЕНТ PAMELA

PAMELA — это спутниковый эксперимент, предназначенный для изучения потоков заряженных частиц в космическом излучении, который проводился на околоземной орбите на борту спутника Ресурс-ДК1 с июня 2006 до января 2016 года.

Прибор PAMELA, схема которого показана на рис. 1, позволяет определять жесткость (отношение импульса частицы к заряду) и знак заряда регистрируемых частиц, восстанавливая их траекторию в постоянном магнитном поле [8, 9]. Зависимость измеренных ионизационных потерь от жесткости даёт информацию об абсолютной величине заряда частицы. Общая совокупность детекторов [10–16] позволяет идентифицировать тип частицы, измерить ее характеристики, такие как скорость и энергию, а также исключить фоновые события, определение характеристик которых затруднено или невозможно.

Взаимодействие частиц изучается в координатно-чувствительном калориметре (рис. 2) [17], который состоит из 22-х пар односторонних кремниевых стриповых плоскостей толщиной 380 мкм каждая, чередующихся с таким же количеством пластин поглотителя из вольфрама толщиной по 260 мм. Общая толщина калориметра составляет ~16.3 радиационных длин и ~0.6 длин ядерного взаимодействия.

Калориметр предназначен для идентификации электронов на фоне антипротонов и позитронов на

фоне протонов, а также для измерения энергии взаимодействующих в нем частиц. В основу разделения частиц легли измерения пространственных и энергетических различий ядерного и электромагнитного каскадов частиц.

Помимо идентификации частиц калориметр позволяет изучать характеристики развивающихся в нем каскадов: их структуру, точку начала взаимодействия, продольный и поперечный размер каскадов и т.д., а также определять вероятность взаимодействия частиц с веществом калориметра.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Основной целью работы является получение энергетической зависимости сечения неупругого взаимодействия легких ядер (p , He , Li) с ядрами вольфрама с энергиями выше нескольких сотен мегаэлектронвольт. Для этого использованы общие критерии идентификации протонов в потоке космических лучей, а также критерий идентификации событий, в которых наблюдается неупругое взаимодействие легких ядер с веществом калориметра.

Общие критерии отбора:

- в трековой системе идентифицирован один трек, не касающийся стенок магнита;
- траектория в трекаре восстановлена с использованием 4-х и более точек в отклоняющей проекции X , 3-х и более точек в ортогональной проекции Y ;
- отсутствует сигнал во всех счетчиках системы антисовпадений;

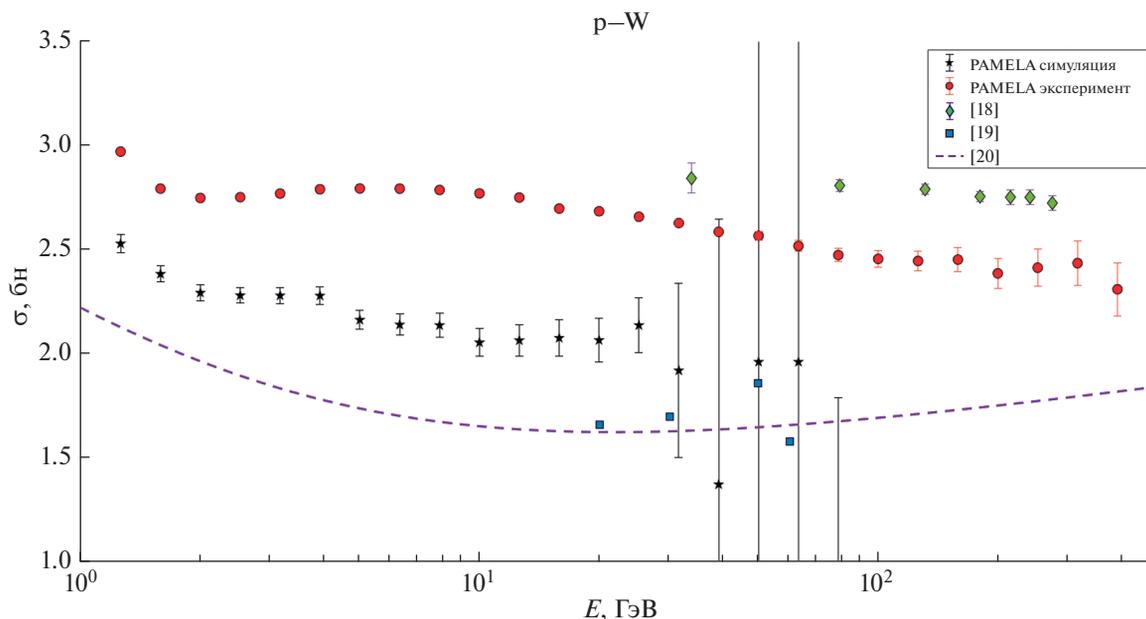


Рис. 2. Энергетическая зависимость сечения взаимодействия протонов с вольфрамом.

- в каждой из шести плоскостей ВПС не более одного сработавшего сцинтилляционного счетчика.

Первые два критерия отбора позволяют исключить из анализа события с заведомо неправильно измеренными характеристиками. Последние два критерия отсеивают “ложные” триггеры, вызванные вторичными частицами, образованными во взаимодействиях космических лучей с веществом прибора. Для идентификации легких ядер по заряду используется кривая зависимости ионизационных потерь заряженной частицы в трековой системе от модуля измеренной жесткости. Вероятность ошибки в определении типа частицы оценена при помощи моделирования Монте-Карло и составляет менее 1%. Применение общих критериев позволяет отобрать легкие ядра с энергиями от нескольких сотен мегаэлектронвольт до тераэлектронвольт (верхняя граница обусловлена максимальной регистрируемой жесткостью равной примерно 1 ТВ).

Для расчета вероятности взаимодействия ядер с веществом калориметра требуется отобрать события, которые прошли калориметр без взаимодействия. Для этого вводятся дополнительные критерии отбора:

- ограничение на отношение энерговыделения в радиусе восьми стрипов от трека, восстановленного в треkere, к полному энерговыделению;
- ограничение на количество сработавших стрипов в последней плоскости калориметра.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Описанные критерии были применены к экспериментальным данным и к данным моделирования прохождения частиц (протонов, ядер ^4He и ^7Li) через спектрометр PAMELA. В результате проведенного анализа была построена предварительная энергетическая зависимость сечения взаимодействия легких ядер с ядрами вольфрама, которое вычислено по формуле (1):

$$\sigma = \frac{1}{xn} \ln \frac{N_0}{N}, \quad (1)$$

где $x = 0.26$ (толщина одной W плоскости) $\times 22$ (количество W плоскостей) = 5.72 см (без учета точки начала взаимодействия), n – концентрация ядер мишени, N_0 – количество событий, отобранных после общих критериев отбора, N – количество событий, отобранных после общих и дополнительных критериев отбора (события, которые прошли калориметр без взаимодействия).

Полученные энергетические зависимости сечения неупругого взаимодействия легких ядер (протоны, гелий, литий) с энергиями от нескольких сотен мегаэлектронвольт с ядрами вольфрама приведены на рис. 2, 3, 4. Дается сравнение с измерениями сечений на ускорительных комплексах [18, 19] и теоретической зависимостью [20]. Сечения взаимодействия с вольфрамом для ядер гелия и лития получены впервые.

Полученные значения сечения взаимодействия неупругого взаимодействия протонов с ядрами вольфрама близки к другим измерениям, однако в работе получен непрерывный энергетиче-

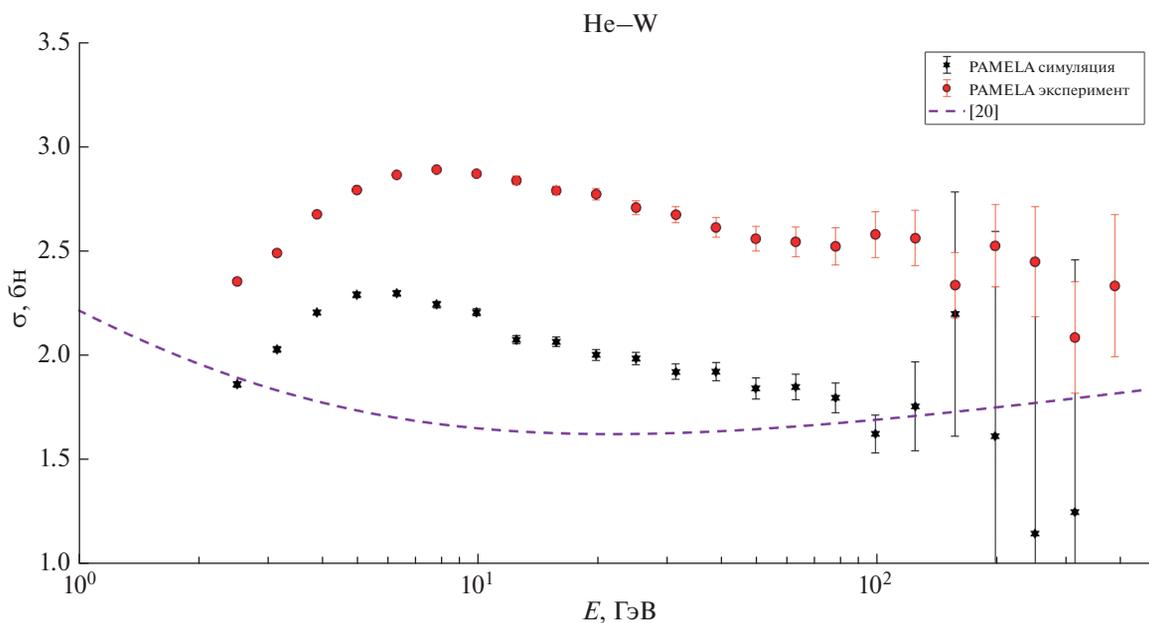


Рис. 3. Энергетическая зависимость сечения взаимодействия ядер гелия с вольфрамом.

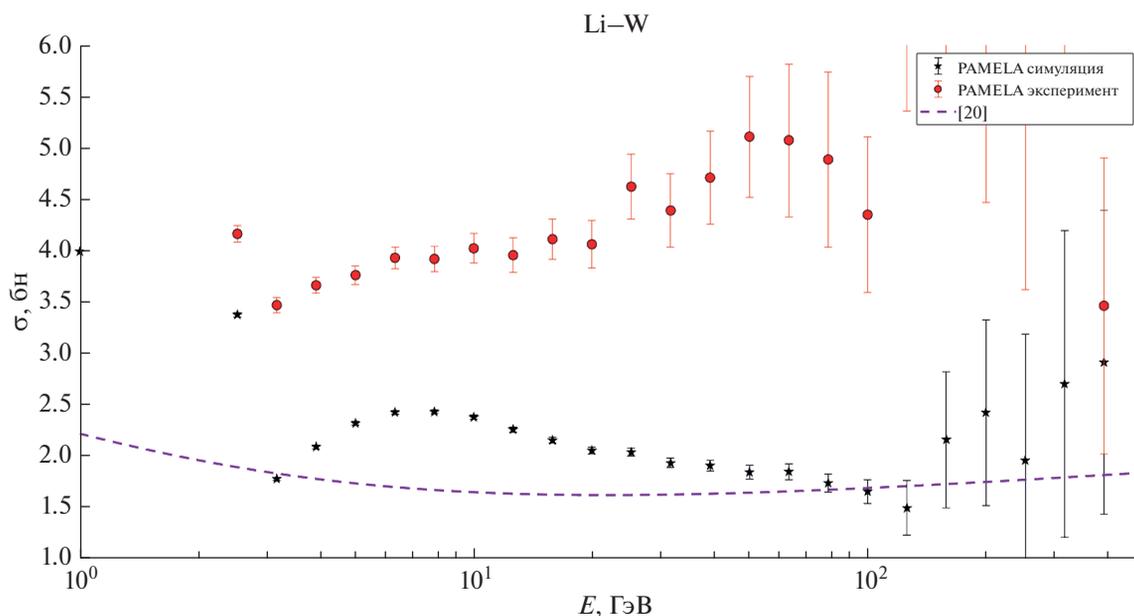


Рис. 4. Энергетическая зависимость сечения взаимодействия ядер лития с вольфрамом.

ский ряд данных в диапазоне энергий от 500 МэВ до 200 ГэВ. Энергетическая зависимость сечения взаимодействия легких ядер с вольфрамом соответствует ожиданиям и воспроизводит форму нуклон–нуклонного взаимодействия.

Тем не менее, результат является предварительным. Требуется улучшить методику идентификации неупругих взаимодействий частиц в калориметре, которая в данной работе упрощена и пред-

ставлена двумя критериями, а также оценить систематическую погрешность измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод определения сечения неупругих взаимодействий частиц в калориметре при помощи прецизионных измерений потока космических лучей. Рассмотрены p–W,

He–W и Li–W взаимодействия в веществе калориметра прибора PAMELA. Выборка налетающих на мишень (калориметр) частиц получена при помощи набора детекторных систем, входящих в состав спектрометра. С их помощью определены тип и энергия частицы. Методика применена к экспериментальным данным и к данным моделирования. В результате анализа научных данных построена энергетическая зависимость сечения взаимодействия легких ядер с ядрами вольфрама, которая близка к измерениям на ускорителях, но при этом непрерывно покрывает диапазон энергий от нескольких сотен мегаэлектронвольт до нескольких сотен гигаэлектронвольт. Работа будет развиваться: требуется улучшить методику идентификации неупругих взаимодействий частиц в калориметре и провести оценку систематической погрешности измерений, а также рассмотреть другие ядра. Ожидаемые результаты могут быть полезны для развития численных моделей взаимодействия частиц с веществом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-02-00951.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Agostinelliae S. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003. V. 506. P. 250.
2. *Allison J. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 186.
3. *Banerjee S. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 898. P. 042005.
4. *Basaglia T. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 664. P. 072037.
5. *Ulrich R.* // EPJ Web Conf. 2013. V. 53. P. 07005.
6. *Abbasi R.U. et al.* // Phys. Rev. D. 2015. V. 92. P. 032007.
7. *Adriani O. et al.* // Astropart. Phys. 2007. V. 27. P. 296.
8. *Adriani O. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003. V. 511. P. 72.
9. *Bonechi L. et al.* // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2003. V. 125. P. 308.
10. *Adriani O. et al.* // Astropart. Phys. 2007. V. 27. P. 296 (дубликат).
11. *Adriani O. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2007. V. 572. P. 471.
12. *Osteria G. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2004. V. 518. P. 161.
13. *Russo S. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2007. V. 572. P. 495.
14. *Straulino S. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2006. V. 556. P. 100.
15. *Ricciarini S. (PAMELA Collab.)* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2007. V. 582. P. 892.
16. *Boezio M. et al.* // Astropart. Phys. 2006. V. 26. P. 111.
17. *Boezio M. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2002. V. 487. P. 407.
18. *Murthy P.V.R. et al.* // Nucl. Phys. B. 1975. V. 92. P. 269.
19. *Barashenkov V. S., Gudima K. K., Toneev V. D.* // Fortschritte der Physik. 1969. V. 17. P. 683.
20. *Grichine V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2009. V. 267. P. 2460.

Determination of the Characteristics of Inelastic Interaction of Light Nuclei with Tungsten by Measuring Cosmic Rays in the PAMELA Experiment

O. A. Golub¹ *, A. G. Mayorov¹, and V. V. Alekseev²

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye sh. 31, Moscow, 115409 Russia*

²*Yaroslavl Demidov State University, Sovetskaya st. 14, Yaroslavl, 150003 Russia*

**e-mail: ogolub394@gmail.com*

Received March 4, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

The article presents the energy dependence of the cross section for the inelastic interaction of light nuclei (protons, helium, lithium) with energies of several hundred mega-electronvolts with tungsten nuclei, obtained using the data of the PAMELA space experiment. The PAMELA instrument is intended for precision measurements of cosmic ray fluxes of various natures and included a set of detector systems for reliable determination of particle characteristics (type and energy). In this work, the particles were identified using a track system in a magnetic field, a time-of-flight system, and an anti-coincidence system. A position-sensitive calorimeter with a tungsten absorber, in turn, makes it possible to study the characteristics of the interaction of particles inside it, in particular, to calculate the cross section of their inelastic interaction.

Keywords: PAMELA experiment, cosmic rays, cross section of interaction