

Спектры протонов и ядер гелия и их сравнение по данным эксперимента НУКЛОН

Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, И. А. Кудряшов, А. А. Курганов, А. Д. Панов, Д. М. Подорожный, А. Н. Турундаевский¹⁾, О. А. Васильев

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 20 декабря 2019 г.

После переработки 13 марта 2020 г.

Принята к публикации 13 марта 2020 г.

Целью космического эксперимента НУКЛОН было измерение спектров космических лучей высокой энергии. Для решения важных астрофизических задач необходимы прямые измерения энергетических спектров протонов и ядер космических лучей, позволяющие разделить частицы по заряду. Спутник был запущен 26 декабря 2014 г. и функционировал три года. Представлены измеренные спектры протонов и ядер гелия в диапазоне 2–500 ТэВ на частицу. Полученные результаты анализируются и сравниваются с данными других экспериментов для более низких энергий. Отношение потоков протонов и ядер гелия близко к постоянному в широкой области магнитных жесткостей (3–100 ТВ). Таким образом, вид отношения спектров здесь существенно отличается от аналогичной зависимости в области меньших магнитных жесткостей, измеренной в других экспериментах. Одно из возможных объяснений этого эффекта основано на использовании модели с одним близким источником.

DOI: 10.31857/S0370274X20070012

Измерения спектров космических лучей необходимы для понимания процессов их ускорения и распространения.

Прямых измерений спектра космических лучей в области “колена” пока нет. Для предшествующей области 1–100 ТэВ основная информация была получена с помощью баллонных (ATIC [1–3], CREAM [4–6], TRACER [7]) и спутниковых (PAMELA [8], AMS02 [9, 10], ПРОТОН [11], для меньших энергий, СОКОЛ [12, 13]) экспериментов. В настоящее время производятся эксперименты CALET [14, 15] (на борту МКС) и DAMPE [16, 17]. Продолжается эксперимент ISS-CREAM [18]. Однако требуются дополнительные прямые измерения в области энергий до 1000 ТэВ. Для таких экспериментов при высоких энергиях необходим большой геометрический фактор.

Эксперимент НУКЛОН проводился на борту спутника РЕСУРС-П в течение трех лет. Главной целью эксперимента было измерение зарядового состава и энергетических спектров космических лучей при энергиях выше 1 ТэВ.

Уже много лет разрабатывается теория, основанная на идее, что основным механизмом ускорения космических лучей является ускорение на ударных

волнах вблизи сверхновых [19–21]. Описания основных вариантов таких моделей, в том числе и с доускорением, приведены в работах [22–26]. Простые модели предсказывают гладкие степенные спектры с близкими значениями показателей для различных ядер в широком диапазоне энергий. Но возникает вопрос о том, достаточно ли такого подхода для описания всех экспериментальных данных, насколько модели чувствительны к возможным особенностям спектров. Существуют варианты теории происхождения и ускорения космических лучей, предсказывающие или описывающие отклонения спектра от чисто степенного вида. К их числу можно отнести вариант модели с доускорением [27], модель ускорения в горячем супербаббле [28], модель двух разных типов источников [29] и различные варианты моделей с одним или несколькими близкими локальными источниками космических лучей [30–33].

Выбор модели существенно зависит от того, одинаковы ли спектры разных компонент или различаются между собой. Разница спектров может быть вызвана существованием разных источников, отличающихся по химическому составу. При этом эта разница должна проявляться именно в области изломов, поскольку наличие излома в спектре одного источника не означает наличия аналогичного излома в спектре другого источника. Следовательно, изучение разли-

¹⁾e-mail: ant@eas.sinp.msu.ru

чий спектров разных компонент нужно для детализации моделей ускорения и распространения космических лучей.

Например, различия энергетических спектров протонов и ядер гелия наблюдались в экспериментах CAPRICE98 [34], BESS-TeV [35]. Эти различия более заметны в экспериментах ATIC [1–3], CREAM [4–6, 37], AMS02 [9, 10]. Особо следует отметить эксперимент ATIC, где разница спектров проявляется в диапазоне 100–1000 ГэВ на частицу [3].

Прямые измерения энергетических спектров протонов и ядер космических лучей крайне важны для решения фундаментальных астрофизических проблем, включая проблему происхождения космических лучей. В отличие от измерений с использованием широких атмосферных ливней такие измерения дают модельно-независимую информацию о зарядовом составе космических лучей, позволяющую исследовать разные компоненты отдельно и, как указывалось выше, делать выбор между различными моделями ускорения и распространения.

В экспериментальной установке заряд частицы измеряется с помощью многослойного кремниевого падового детектора. Для измерения энергии применяются две независимые методики: ионизационный калориметр и новая методика KLEM (Kinematic Lightweight Energy Meter), основанная на энергетической зависимости пространственного распределения вторичных частиц, рожденных в первом неупругом взаимодействии [38–41]. Конструкция прибора НУКЛОН детально описана в [42, 43].

Общий геометрический фактор прибора составляет $0.24 \text{ м}^2 \text{ ср}$ для методики KLEM и $0.06 \text{ м}^2 \text{ ср}$ для ионизационного калориметра. Суммарная толщина установки, включая толщину мишени и системы измерения энергии KLEM, составляет 15.2 радиационных единицы или 0.78 ядерного пробега протона. Толщина углеродной мишени составляет 0.23 ядерного пробега протона. Установка НУКЛОН экспонировалась на околоземной орбите в течение трех лет.

Первые измеренные энергетические спектры различных компонент космических лучей дали возможность изучать энергетический диапазон 1–100 ТэВ и получить первые точки в прямых измерениях при энергиях выше 100 ТэВ [44, 45].

Спектры по магнитной жесткости строились и анализировались для четырех компонент: протоны, ядра гелия, объединенный поток тяжелых ядер с зарядами $Z = 6 \div 27$, а также суммарный спектр всех частиц. Во всех случаях энергия измерялась двумя методами: с помощью ионизационного калориметра и методикой KLEM.

Статистическая обеспеченность различных компонент существенно отличается. Однако проведенный анализ полученных данных показал, что спектры разных компонент могут быть описаны как функция магнитной жесткости с изломом около 10 ТВ [46]. При этом отдельные спектры различных ядер представлены в [47, 48].

Статистическая значимость “колена” анализируется в [46]. Возможно, для объяснения этого эффекта потребуется усовершенствовать детальные модели ускорения космических лучей.

Спектры всех частиц по энергии и магнитной жесткости представлены на рис. 1, 2. При построении учитывалась деконволюция спектров [47, 48]. Спек-

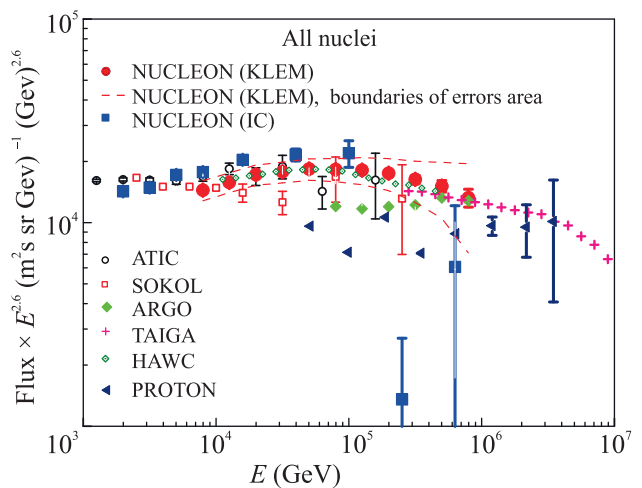


Рис. 1. (Цветной онлайн) Суммарный энергетический спектр всех частиц по данным эксперимента НУКЛОН в сравнении с данными других экспериментов (ATIC [3], SOKOL [13], ARGO [51], TAIGA [49], HAWC [50], ПРОТОН [11])

тры всех частиц по энергии сравниваются не только с данными экспериментов на спутниках и баллонах, но и с данными наземных измерений (TAIGA [49], HAWC [50], ARGO [51]). Впервые получено значительное перекрытие результатов прямого космического эксперимента и данных, полученных с помощью широких атмосферных ливней. Энергетические спектры всех частиц, полученные разными методами, хорошо согласуются между собой, что в будущем позволит провести их анализ для построения астрофизических моделей.

Новое “колени” при 10 ТВ и его интерпретация представляют собой интересную проблему. На основе ранних экспериментальных данных В. Зацепин и Н. Сокольская в статье [29] предположили, что излом в спектрах протонов и ядер гелия должен иметь уни-

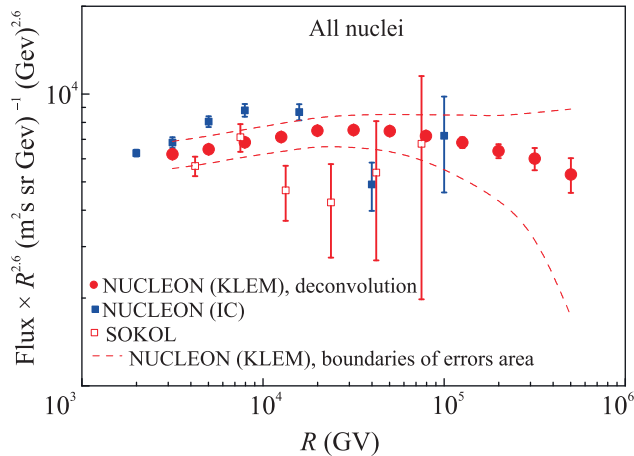


Рис. 2. (Цветной онлайн) Спектр всех частиц по магнитной жесткости по данным эксперимента НУКЛОН (в сравнении с данными эксперимента SOKOL [13])

версальный характер и наблюдаться также в спектрах всех ядер при примерно одинаковой магнитной жесткости.

Была выдвинута гипотеза, что этот излом связан с определенным типом источников космических лучей, который может ускорять частицы до примерно 10 ТВ. С использованием этого предположения была разработана феноменологическая трехкомпонентная модель спектров космических лучей [29].

Как указывалось выше, существуют различные астрофизические модели, предсказывающие наличие изломов в спектрах космических лучей [27, 28, 30–33]. При этом причины изломов в разных моделях различны. Если причина в особенностях механизма ускорения, то она должна действовать на все ядра одинаково при одинаковой магнитной жесткости. Это значит, что и химический состав в области такого излома не должен меняться. Если причиной излома является переход от одного типа источников к другому, с иным химическим составом, тогда и химический состав космических лучей также должен меняться в области излома. Поэтому изучение зависимости химического состава космических лучей от магнитной жесткости помогает сделать выбор между моделями.

Изучение состава космических лучей в экспериментах СОКОЛ и НУКЛОН [13, 47, 48] не выявило статистически значимой зависимости среднего логарифма массового числа от магнитной жесткости. При постоянной магнитной жесткости протоны и ядра гелия дают основной вклад в поток космических лучей [52]. Их спектры по жесткости представлены на рис. 3, 4 с учетом деконволюции [47, 48]. При де-

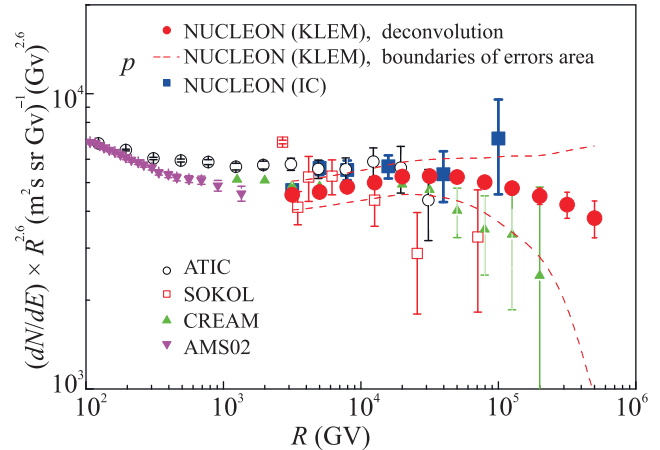


Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектр протонов по магнитной жесткости. Помимо данных эксперимента НУКЛОН, приведены точки экспериментов AMS02 [10], ATIC [3], SOKOL [13], CREAM [6]

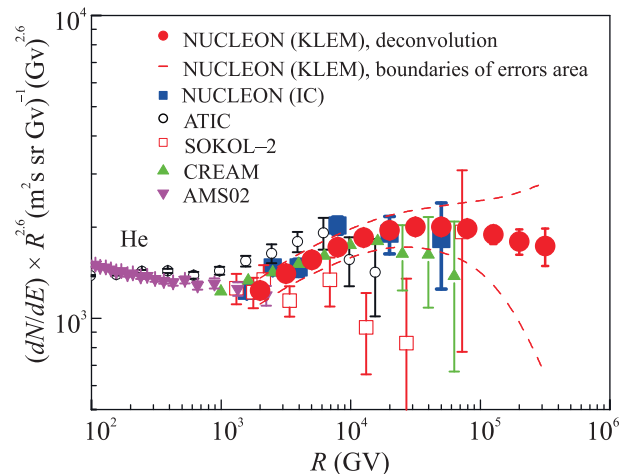


Рис. 4. (Цветной онлайн) Спектр ядер гелия по магнитной жесткости. Помимо данных эксперимента НУКЛОН, приведены точки экспериментов AMS02 [9], ATIC [3], SOKOL [13], CREAM [6]

конволюции учитывалась ненулевая вероятность попадания частиц в последние бины. Поэтому на рис. 3 добавлены две точки по сравнению с [48] (в предыдущем варианте деконволюции спектра протонов рассматривались только бины с достаточно высокой статистикой, превышающей 10 событий).

Энергетические спектры протонов и ядер гелия исследовались во многих экспериментах (ATIC, СОКОЛ, AMS02, CREAM и др.). Оказалось, что спектр протонов более мягкий, по сравнению со спектром гелия.

В эксперименте PAMELA [8] было показано выполнение спектров протонов (при $R = 232_{-30}^{+35}$ ГВ)

и ядер гелия (при $R = 243_{-31}^{+27}$ ГВ). При этом спектр ядер гелия более жесткий. В эксперименте AMS02 спектры космических лучей с хорошей статистикой по магнитной жесткости были получены до 1.8 ТВ для протонов [10] и до 3 ТВ для ядер гелия [9]. Параметризация проводилась как для самих спектров, так и для их отношения. Здесь также видно, что оба спектра становятся более жесткими при магнитных жесткостях выше 200–350 ГВ. Наклон зависимости отношения спектров уменьшается с 0.15 при 10 ГВ до 0.077 для области выше 45 ГВ [9].

Данные эксперимента НУКЛОН получены для области магнитных жесткостей выше 2 ТВ, что выходит за верхний предел рабочего диапазона эксперимента AMS02. Анализ результатов показал универсальный характер формы спектра по магнитной жесткости для разных компонент. Зависимость отношения потоков протонов и ядер гелия от магнитной жесткости представлена на рис. 5. Для жесткостей

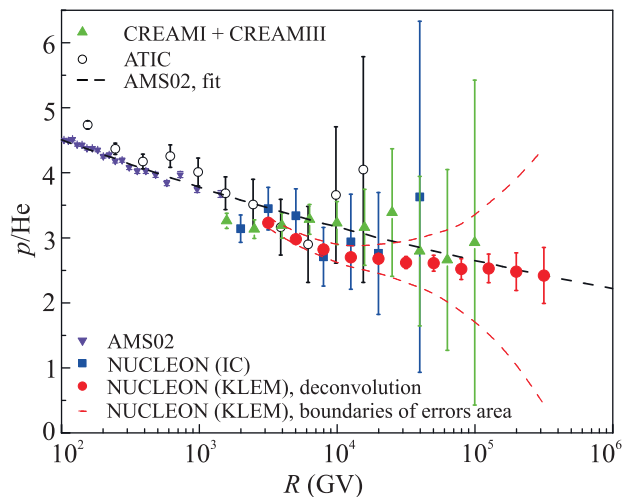


Рис. 5. (Цветной онлайн) Отношение спектров протонов и ядер гелия как функция магнитной жесткости. Помимо данных эксперимента НУКЛОН, приведены точки экспериментов AMS02 [9], ATIC [3], CREAM [6]

меньше 2 ТВ показаны точки из данных эксперимента AMS02 [9, 10, 53]. Сопоставление данных различных экспериментов показывает, что доля протонов в диапазоне 0.1–1 ТВ падает с ростом жесткости, но при больших жесткостях (выше нескольких ТВ) выходит на почти постоянный уровень.

Следует отметить, что погрешность в измерении заряда в эксперименте НУКЛОН определялась характеристиками многослойных кремниевых падовых детекторов и считывающей электроники и практически не зависела от энергии частиц. Благодаря мелкому секционированию детекторов вклад обратного тока подавлялся, что подтвердило математическое мо-

делирование. Перекачка между протонами и ядрами гелия оценивается на уровне 0.6–0.7%. Поэтому при восстановлении спектров обильных компонент мы пренебрегали такой перекачкой.

Была сделана оценка наклона зависимости отношения потоков протонов и ядер гелия от магнитной жесткости. В случае применения алгоритма деконволюции [48] производилось Монте-Карло моделирование распределения восстановленной жесткости, что позволило получить значение показателя наклона и оценить его погрешность. Показатель наклона оценивается как $0.063 \pm 0.010(\text{stat.}) \pm 0.031(\text{syst.})$ для методики KLEM и 0.095 ± 0.163 для ионизационного калориметра в области выше 4 ТВ.

Алгоритм деконволюции [48] учитывает различную эффективность регистрации для разных компонент, определяемую с помощью математического моделирования.

Зарядовый состав космических лучей в области излома существенно отличается от состава в области магнитных жесткостей ~ 100 ГВ, измеренного в эксперименте AMS02 [9, 10, 53]. Отношение потоков протонов и ядер гелия равно $2.98 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.09(\text{syst.})$ ($R \sim 5$ ТВ), $2.68 \pm 0.07(\text{stat.}) \pm 0.20(\text{syst.})$ ($R \sim 20$ ТВ), тогда как при ~ 100 ГВ это отношение составляет 4.46 ± 0.20 [9].

Таким образом, отношение потоков протонов и ядер гелия близко к постоянному в области нового излома, наблюдаемого при жесткости ~ 10 ТВ (2.5–100 ТВ). Не исключено, что есть небольшое снижение этого отношения, но оно не выходит за границы статистической погрешности измерений. Зарядовый состав космических лучей в этой области существенно отличается от измеренного при низких значениях магнитной жесткости в эксперименте AMS02. Возможно, объяснить эти свойства космических лучей реально с помощью модели единственного близкого источника.

Для описания свойств космических лучей в исследуемой области надо найти причины четырех основных эффектов. Во-первых, по данным предшествующих экспериментов (PAMELA, AMS02 и др.) при магнитной жесткости 250 ГВ спектры различных компонент становятся более пологими. Во-вторых, в области жесткостей 250–2000 ГВ спектр ядер гелия более жесткий, чем спектр ядер гелия. В-третьих, по данным эксперимента НУКЛОН в спектрах различных компонент наблюдается излом при 10 ТВ. В-четвертых, в области, непосредственно предшествующей этому излому и после него (2.5–100 ТВ), отсутствуют существенные различия спектров протонов и гелия.

Общее объяснение для всех этих эффектов можно получить в предположении, что спектры в области излома формируются единственным близким источником, дающим основной вклад. При этом отношение протонов и ядер гелия в космических лучах определяется отношением водорода и гелия в данном источнике. Это отношение должно быть ниже, чем в источнике (или источниках), формирующем спектры при низких магнитных жесткостях. Это может иметь место для молодых источников, так как их спектры пологие, что делает возможной ситуацию, когда вклад источника при низких энергиях мал, а при энергиях, близких к пределу ускорения в источнике, доминирует в наблюдаемом потоке космических лучей [54, 55].

Излом жесткостных спектров при 10 ТВ также объясняется пределом ускорения в близком источнике. Единая форма спектров по магнитной жесткости для разных компонент и постоянное отношение потоков протонов и ядер гелия в указанной области определяются химическим составом этого источника. Заметим, что альтернативная модель с доускорением [27] предсказывает излом только при жесткостях выше 100 ТВ.

Выполаживание спектров, наблюдаемое в экспериментах PAMELA [8] и AMS02 [9, 10] при 200–350 ГВ, возможно, отражает переход от богатого водородом низкоэнергичного источника к высокоэнергичному источнику с низким содержанием водорода.

Таким образом, анализ результатов эксперимента НУКЛОН показывает, что излом спектров и постоянство химического состава в его области можно объяснить с помощью гипотезы об единственном близком источнике космических лучей. Эта же гипотеза объясняет и свойства спектров в предшествующей области жесткостей, измеренных в предыдущих экспериментах. В дальнейшем планируется провести отдельное дополнительное исследование по совместному анализу данных и эксперимента НУКЛОН, и других экспериментов с целью разработки детальной модели происхождения и ускорения космических лучей, учитывающей особенности спектров разных компонент.

Авторы благодарят за поддержку Российское космическое агентство (Роскосмос) и Российскую академию наук (РАН). Представленное исследование было поддержано Суперкомпьютерным центром МГУ им. М. В. Ломоносова [56].

2. A. D. Panov, J. H. Adams, Jr, H. S. Ahn et al. (ATIC Collaboration), *Adv. Space Res.* **37**, 1944 (2006).
3. A. D. Panov, J. H. Adams, Jr, H. S. Ahn (ATIC Collaboration), *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **71**, 494 (2007).
4. Y. S. Yoon, H. S. Ahn, P. S. Allison et al. (CREAM Collaboration), *Astrophys. J.* **728**, 122 (2011).
5. H. S. Ahn, P. Allison, M. G. Bagliesi et al. (CREAM Collaboration), *Astrophys. J.* **707**, 593 (2009).
6. Y. S. Yoon, T. Anderson, A. Barrau et al. (CREAM Collaboration), *Astrophys. J.* **839**, 5 (2017).
7. A. Obermeier, M. Ave, P. Boyle, Ch. Hoppner, J. Horandel, and D. Muller, *Astrophys. J.* **742**, 14 (2011).
8. O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya et al. (PAMELA Collaboration), *Science* **332**, 69 (2011).
9. M. Aguilar, D. Aisa, B. Alpat et al. (AMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **115**, 211101 (2015).
10. M. Aguilar, D. Aisa, B. Alpat et al. (AMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **114**, 171103 (2015).
11. N. Grigorov, V. Nesterov, and I. Savenko, in *Space Research XII*, Akademie, Berlin (1972), v. 2, p. 1617.
12. I. P. Ivanenko, V. Ya. Shestoporov, L. O. Chikova, I. M. Fateeva, L. A. Khein, D. M. Podorozhnyi, I. D. Rapoport, G. A. Samsonov, V. A. Sobinyakov, A. N. Turundaevskii, and I. V. Yashin, in *Proc. 23 Inter. Cosmic Ray Conf.*, ed. by R. B. Hicks, D. A. Leahy, and D. Venkatesan, Calgary, Canada (1993), v. 2, p. 17.
13. A. Turundaevskiy and D. Podorozhnyi, *Adv. Space Res.* **60**, 1578 (2017).
14. O. Adriani, Y. Akaike, K. Asano et al. (CALET Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **122**, 181102 (2019).
15. P. Brogi, P. Marrocchesi, P. Maestro, and N. Mori, in *Proc. 34 Inter. Cosmic Ray Conf.*, Hague, Netherlands, 2016, PoS ICRC2015 (2016), p. 595.
16. Q. An, R. Asfandiyarov, P. Azzarello et al. (DAMPE Collaboration), *Sci. Adv.* **5**, eaax3793 (2019).
17. X. Wu, G. Ambrosi, R. Asfandiyarov et al. (DAMPE Collaboration), in *Proc. 34 Inter. Cosmic Ray Conf.*, Hague, Netherlands, 2016, PoS ICRC2015 (2016), p. 1192.
18. S. C. Kang, Y. Amare, T. Anderson et al. (CREAM Collaboration), *Adv. Space Res.* **64**, 2564 (2019).
19. Г. Ф. Крымский, *Докл. АН СССР* **234**, 1306 (1977).
20. V. L. Ginzburg and S. I. Syrovatskii, *The Origin of Cosmic Rays*, Pergamon Press, Oxford (1964).
21. V. L. Ginzburg and V. S. Ptuskin, *Physics-Uspekhi* **18**, 931, (1975).
22. R. D. Blandford and J. P. Ostriker, *Astrophys. J.* **237**, 793 (1980).
23. R. Blandford and D. Eichler, *Phys. Rep.* **154**, 1 (1987).
24. W. I. Axford, in *Proc. 17 Inter. Cosmic Ray Conf.*, Paris, France (1981), v. 1, p. 155.

1. H. S. Ahn, E. S. Seo, J. Adams et al. (ATIC Collaboration), *Adv. Space Res.* **37**, 1950 (2006).

25. T.K. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, N.Y. (1990).
26. V.S. Ptuskin, *Physics-Uspokhi* **50**, 534 (2007).
27. S. Thoudam and J.R. Horandel, *J. Phys. Conf. Ser.* **632**, 012026 (2015).
28. Y. Ohira and K. Ioka, *Astrophys. J. Lett.* **729**, L13 (2011).
29. V.I. Zatsepin and N.V. Sokolskaya, *Astron. Astrophys.* **458**, 1 (2006).
30. Y. Keum and P. Salati, *Pramana – Journal of Physics* **86**, 369 (2016).
31. N. Tomassetti, *Astrophys. J. Lett.* **815**, L1 (2015).
32. S. Thoudam and J.R. Horandel, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **421**, 1209 (2012).
33. S. Thoudam and J.R. Horandel, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **435**, 2532 (2013).
34. M. Boezio, V. Bonvicini, P. Schiavon et al. (CAPRICE Collaboration), *Astropart. Phys.* **19**, 583 (2003).
35. S. Haino, T. Sanuki, K. Abe et al. (BESS Collaboration), *Phys. Lett. B* **594**, 35 (2004).
36. T. Sanuki, *Nucl. Phys. B Suppl.* **145**, 132 (2005).
37. E.S. Seo, *Astropart Phys.* **39–40**, 76 (2012).
38. N.A. Korotkova, D.M. Podorozhnyi, E.B. Postnikov, T.M. Roganova, L.G. Sveshnikova, and A.N. Turundaevsky, *Physics of Atomic Nuclei* **65**, 852 (2002).
39. J. Adams, G. Bashindzhagyan, P. Bashindzhagyan et al. (Collaboration), *Adv. Space Res.* **27**, 829 (2001).
40. J. Adams, G. Bashindzhagyan, A. Chilingaryan et al., *AIP Conf. Proc.* **504**, 175 (2000).
41. E.B. Postnikov, G.L. Bashindzhagyan, N.A. Korotkova, D.M. Podorozhnyi, T.N. Roganova, L.G. Sveshnikova, and A.N. Turundaevsky, *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz.* **66**, 1634 (2002).
42. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al. (NUCLEON Collaboration), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **770**, 189 (2015).
43. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al. (NUCLEON Collaboration), *EPJ Web of Conferences* **105**, 01002-p1 (2015).
44. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al. (NUCLEON Collaboration), *Astropart. Phys.* **90**, 64 (2017).
45. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al. (NUCLEON Collaboration), *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2017**, 20 (2017).
46. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al. (NUCLEON Collaboration), *JETP Lett.* **108**, 5 (2018).
47. E.V. Atkin, V.L. Bulatov, O.A. Vasiliev et al. (NUCLEON Collaboration), *Astron. Rep.* **63**, 66 (2019).
48. V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, A. Panov, D. Podorozhnyi, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin, *Adv. Space Res.* **64**, 2546 (2019).
49. V.V. Prosin, I.I. Astapov, P.A. Bezgazeekov et al. (Tunka Collaboration), *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **83**, 1016 (2019).
50. R. Alfaro, C. Alvarez, J.D. Alvarez et al. (HAWC Collaboration), *Phys. Rev. D* **96**, 122001 (2017).
51. I. De Mitri, *EPJ Web of Conferences* **99**, 08003 (2015).
52. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al. (NUCLEON Collaboration), *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **83**, 977 (2019).
53. M. Aguilar, L. Ali Cavazonza, B. Alpat et al. (AMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **119** 251101 (2017).
54. V. Ptuskin, V. Zirakashvili, and E.-S. Seo, *Astrophys. J.* **718** 31 (2010).
55. V. Ptuskin and V. Zirakashvili, *Astron. Astrophys.* **403**, 1 (2003).
56. V. Sadovnichy, A. Tikhonravov, Vl. Voevodin, and V. Opanasenko, in *Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale*, CRC Press, Boca Raton, USA (2013), p. 283.