

**Научно-Исследовательский
Институт Ядерной Физики
имени Д.В. Скобелъца**

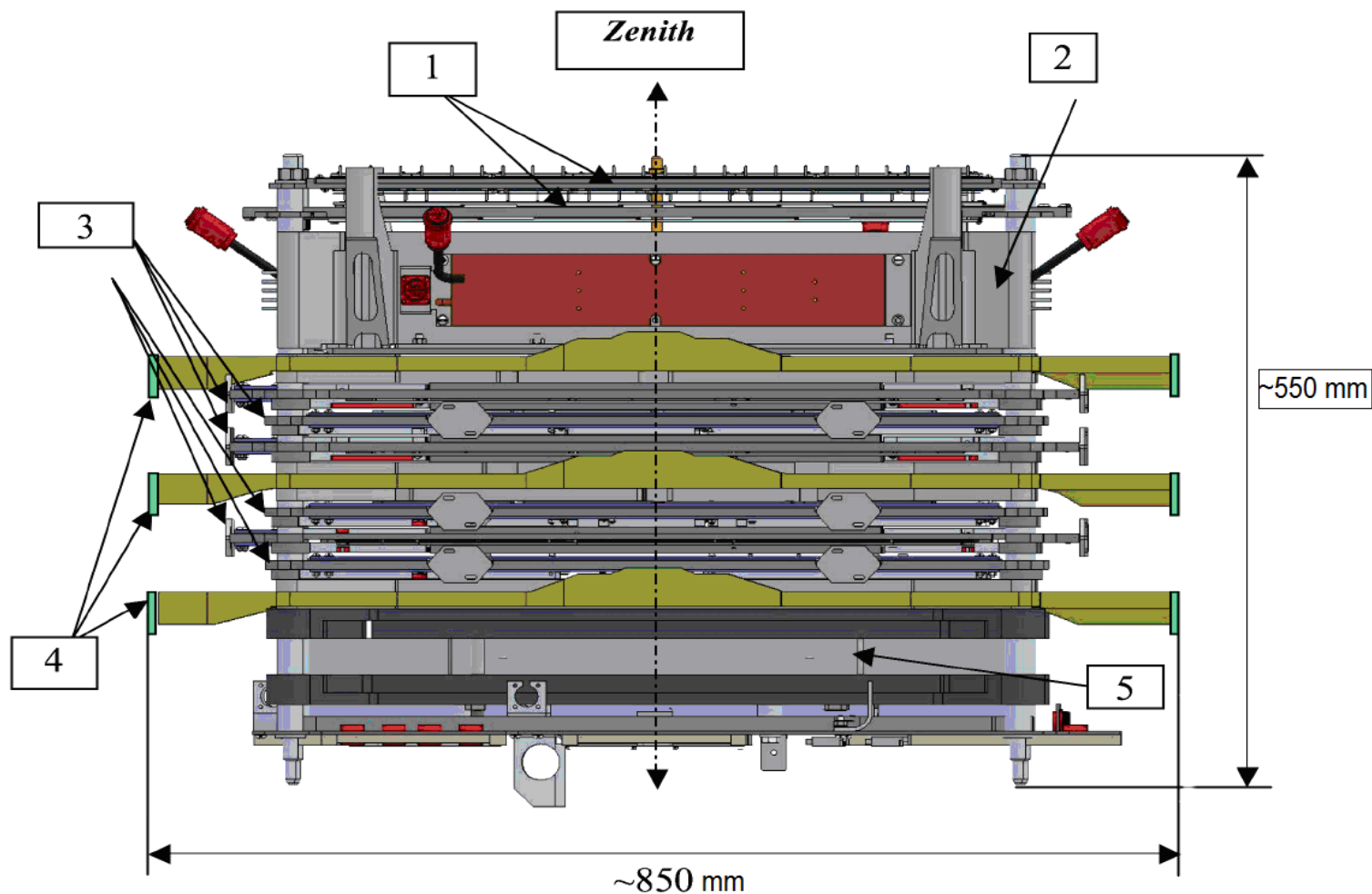


Основные результаты эксперимента НУКЛОН

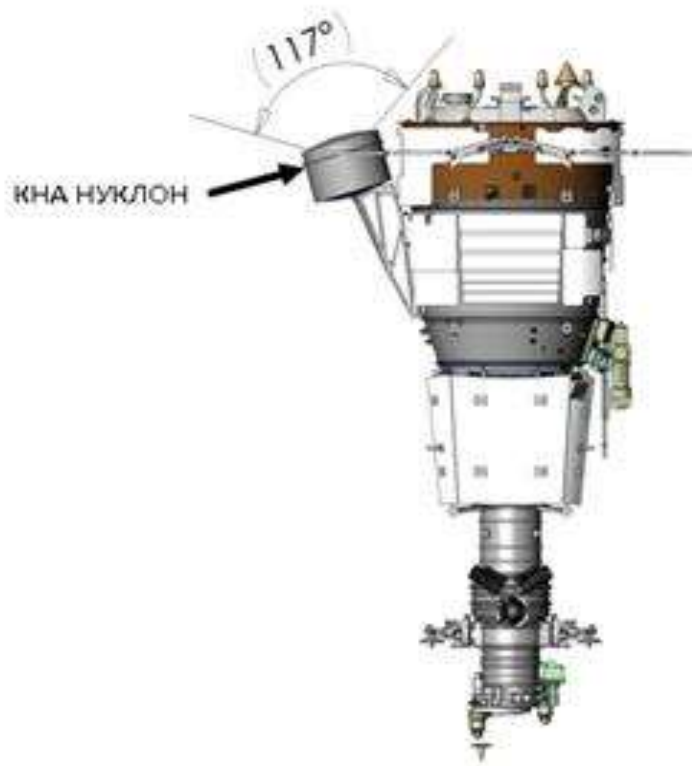
**А.Турундаевский, О.Васильев, Д.Карманов,
И.Ковалев, И.Кудряшов, А.Курганов,
А.Панов, Д.Подорожный**

Представлены основные научные результаты, полученные в течение трех лет экспозиции орбитального эксперимента НУКЛОН и последующей обработки данных. В ходе эксперимента был измерен химический состав и энергетический спектр космических лучей в области 2-500 ТэВ. Получены отдельные спектры обильных ядер. Измерен спектр ядер никеля высоких энергий. Измерены потоки высокоэнергичных вторичных ядер. Исследована зависимость отношения потоков протонов и ядер гелия от магнитной жесткости. Обнаружено универсальное "коллено" в спектрах различных ядер по магнитной жесткости. Сделан вывод о наличии возможного близкого источника космических лучей.

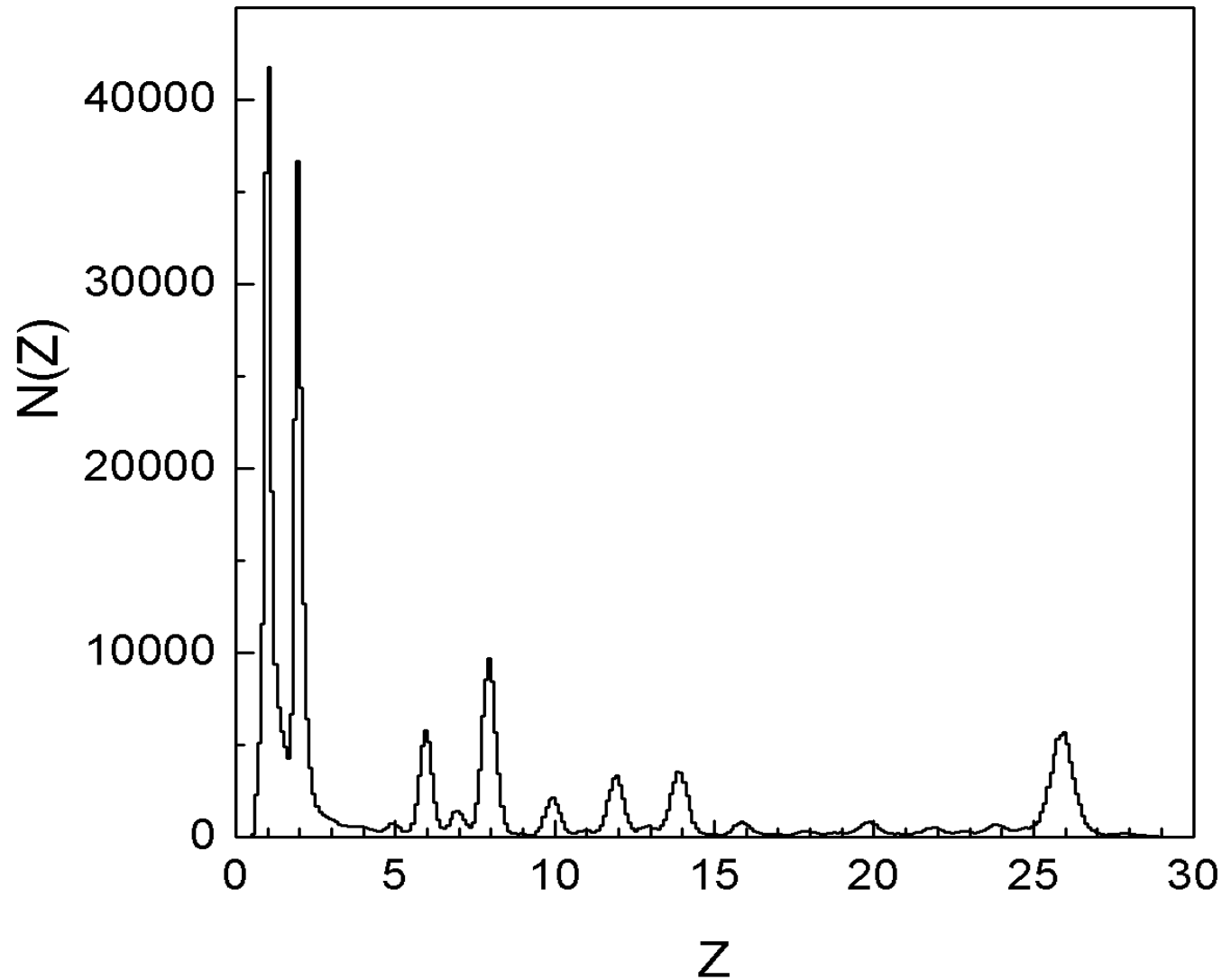
Упрощенная схема аппаратуры НУКЛОН. (1) - две пары плоскостей системы измерения заряда; (2) - углеродная мишень; (3) - 6 плоскостей системы измерения энергии с использованием методики KLEM; (4) - 3 слоя триггерной системы; (5) – калориметр.
Эффективный геометрический фактор составляет более $0.2 \text{ м}^2\text{ср}$ для системы KLEM и около $0.06 \text{ м}^2\text{ср}$ для калориметра. Рабочая площадь установки равна $0,25 \text{ м}^2$. Система измерения заряда обеспечивает разрешение $0.15 - 0.20$ зарядовой единицы.



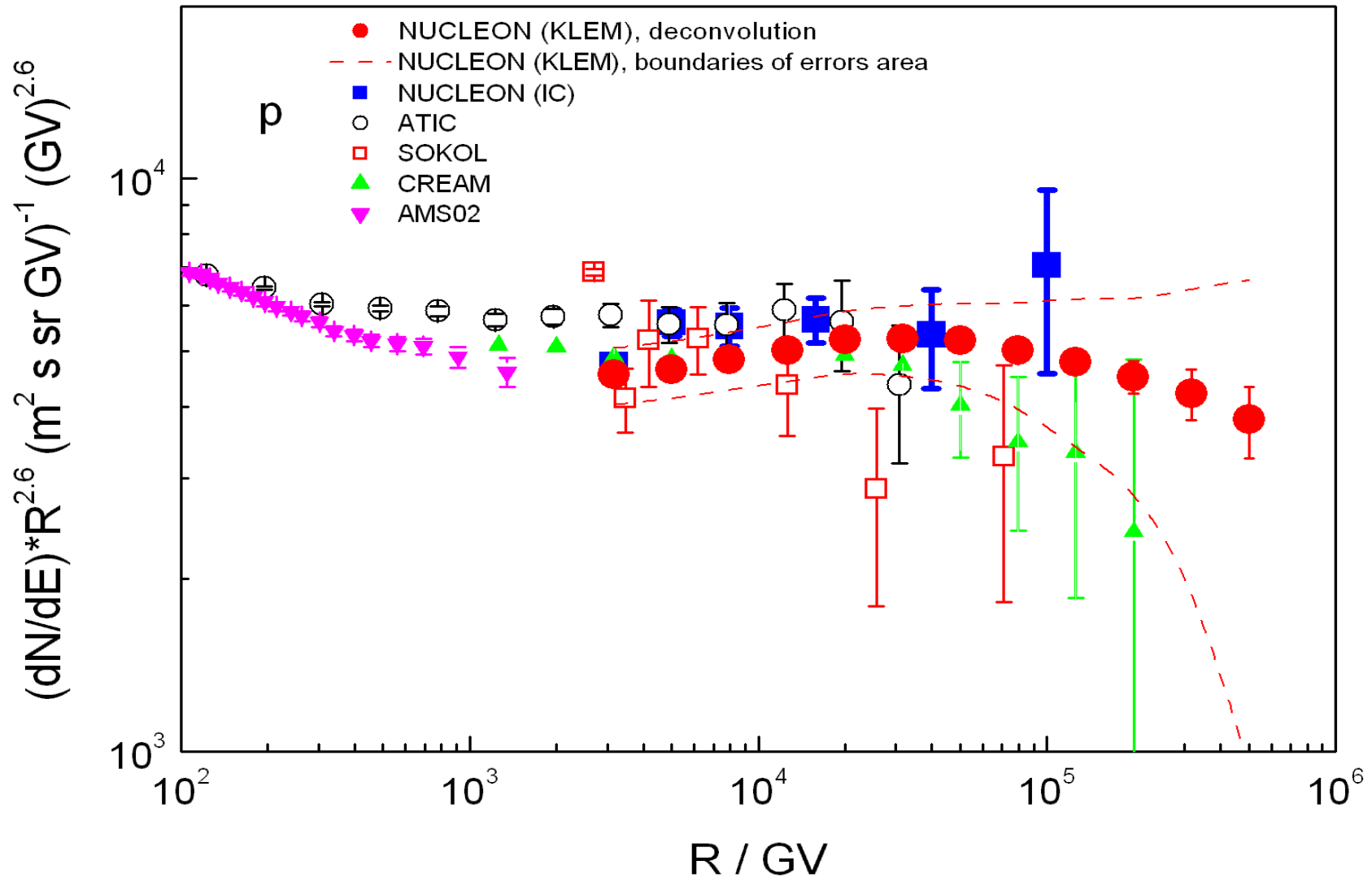
Прибор был размещен на борту спутника РЕСУРС-П №2. Орбита космического аппарата является гелиосинхронной, с наклоном 97.276 и средней высотой 475 км. Спутник был запущен 26 декабря 2014 года и проработал около трех лет. Целью эксперимента является измерение химического состава и энергетических спектров космических лучей в области 2-500 ТэВ.



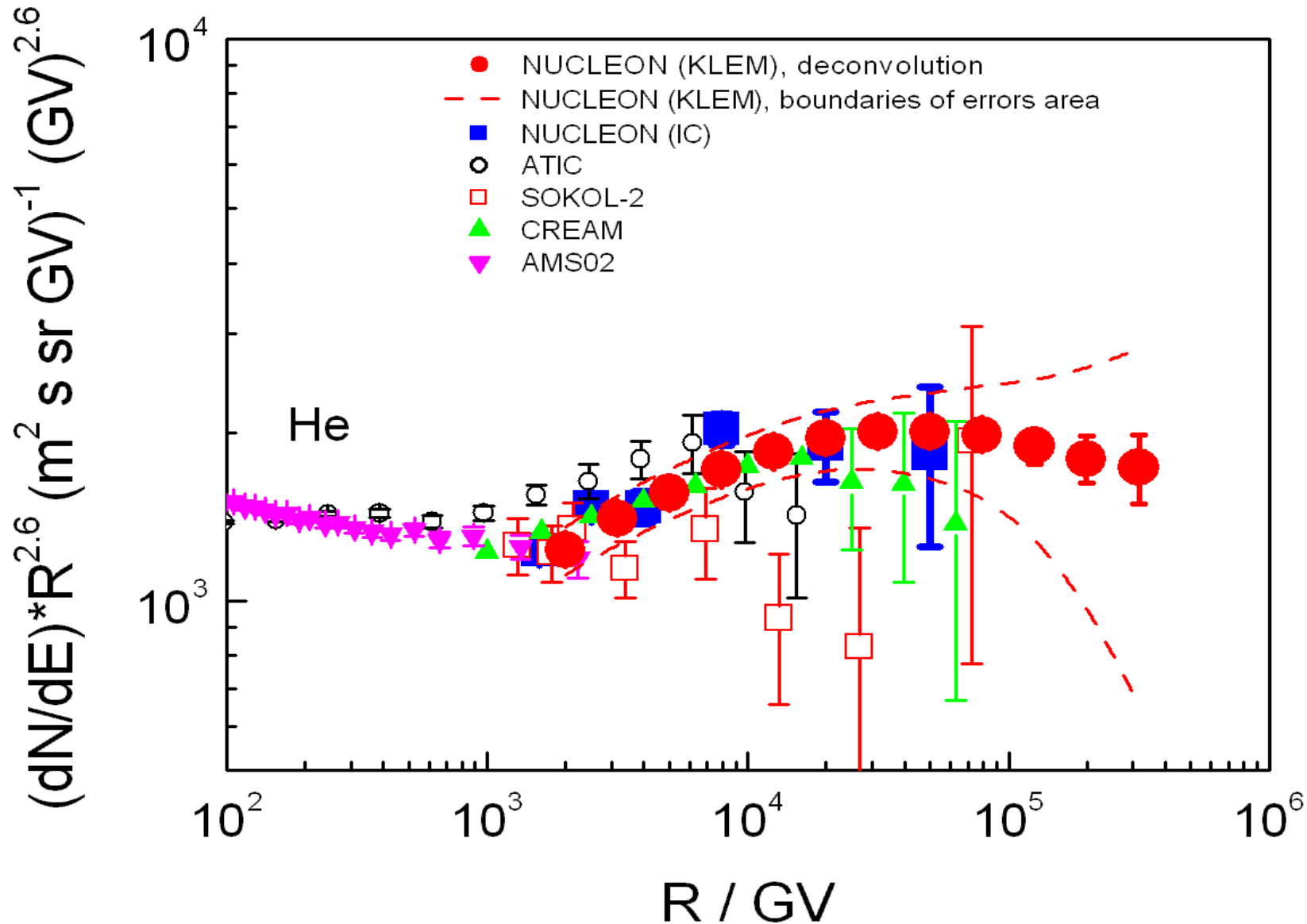
Зарядовое распределение



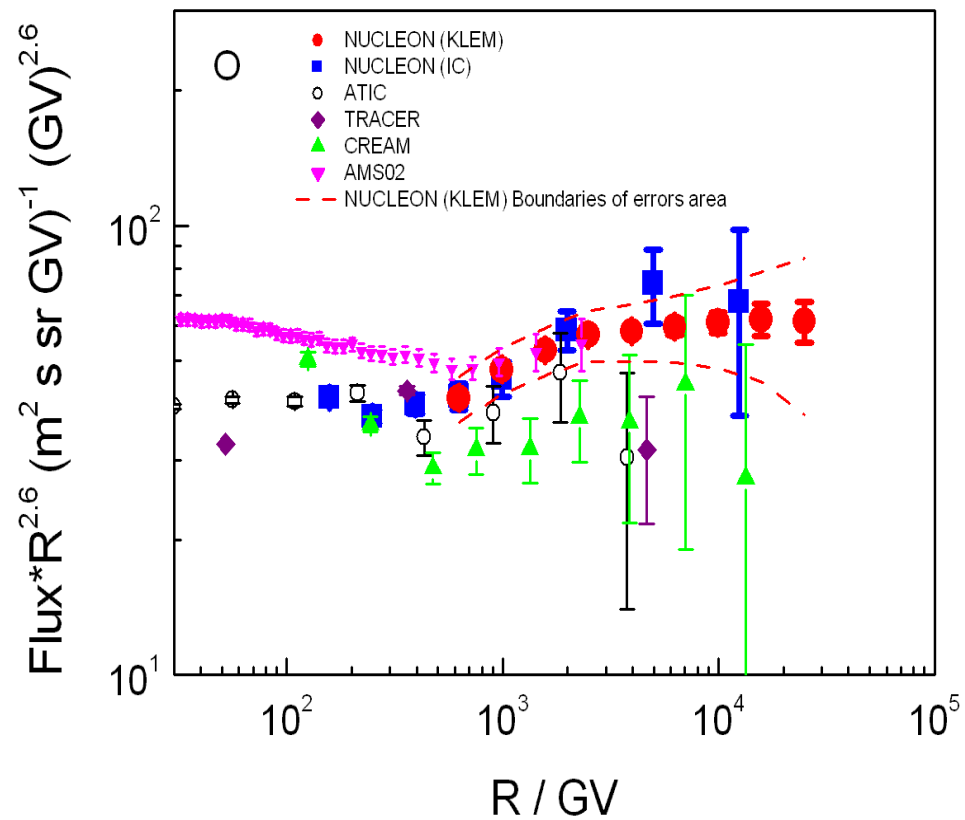
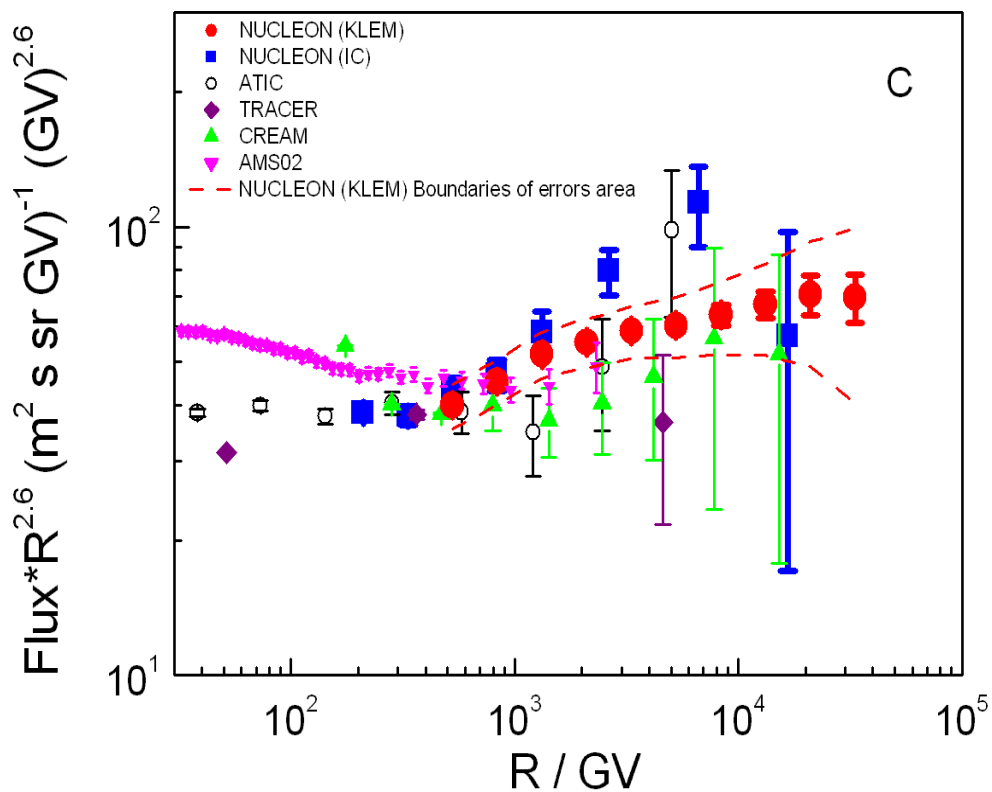
Спектр протонов



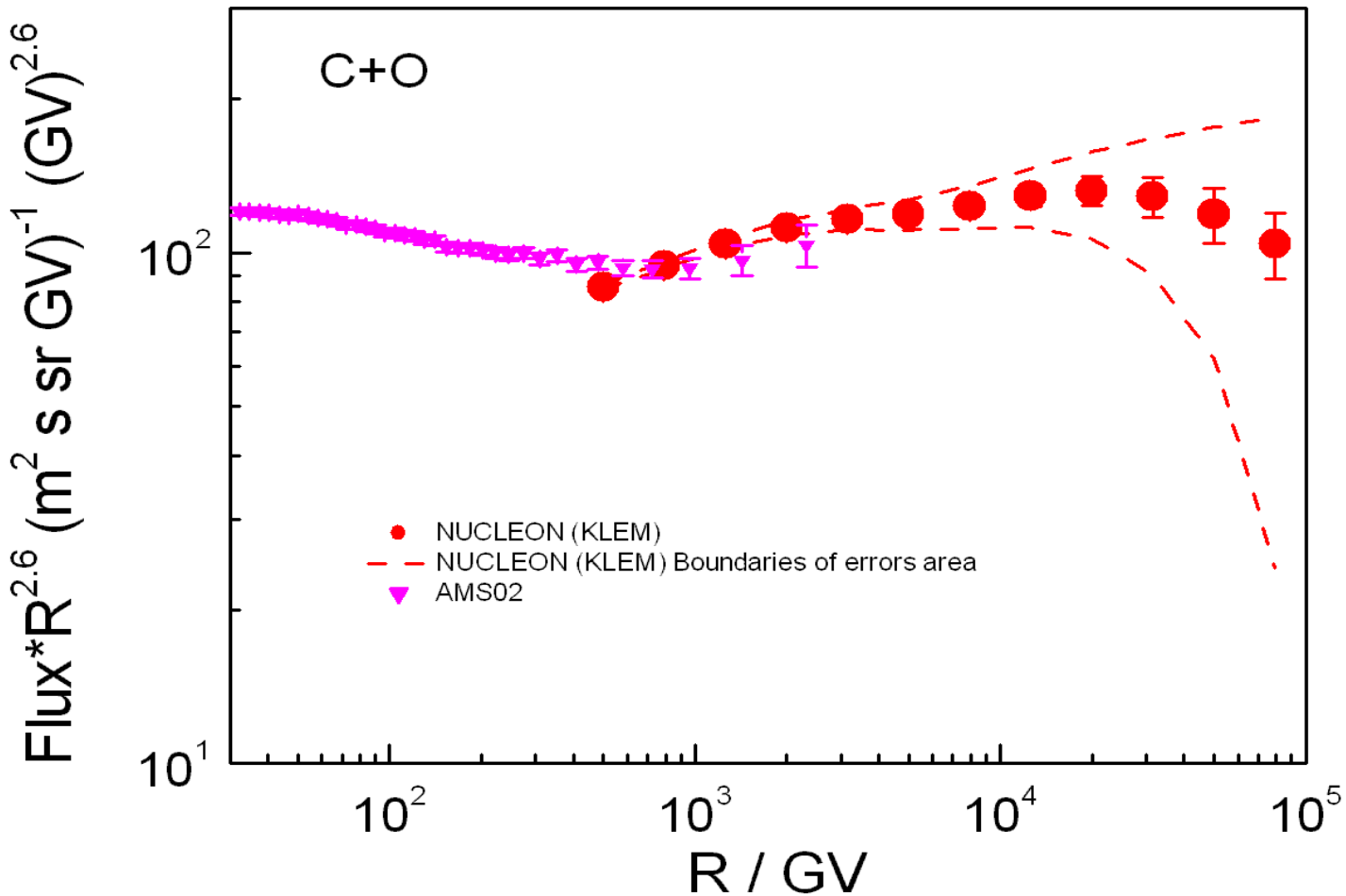
Спектр ядер гелия



Спектры ядер углерода и кислорода

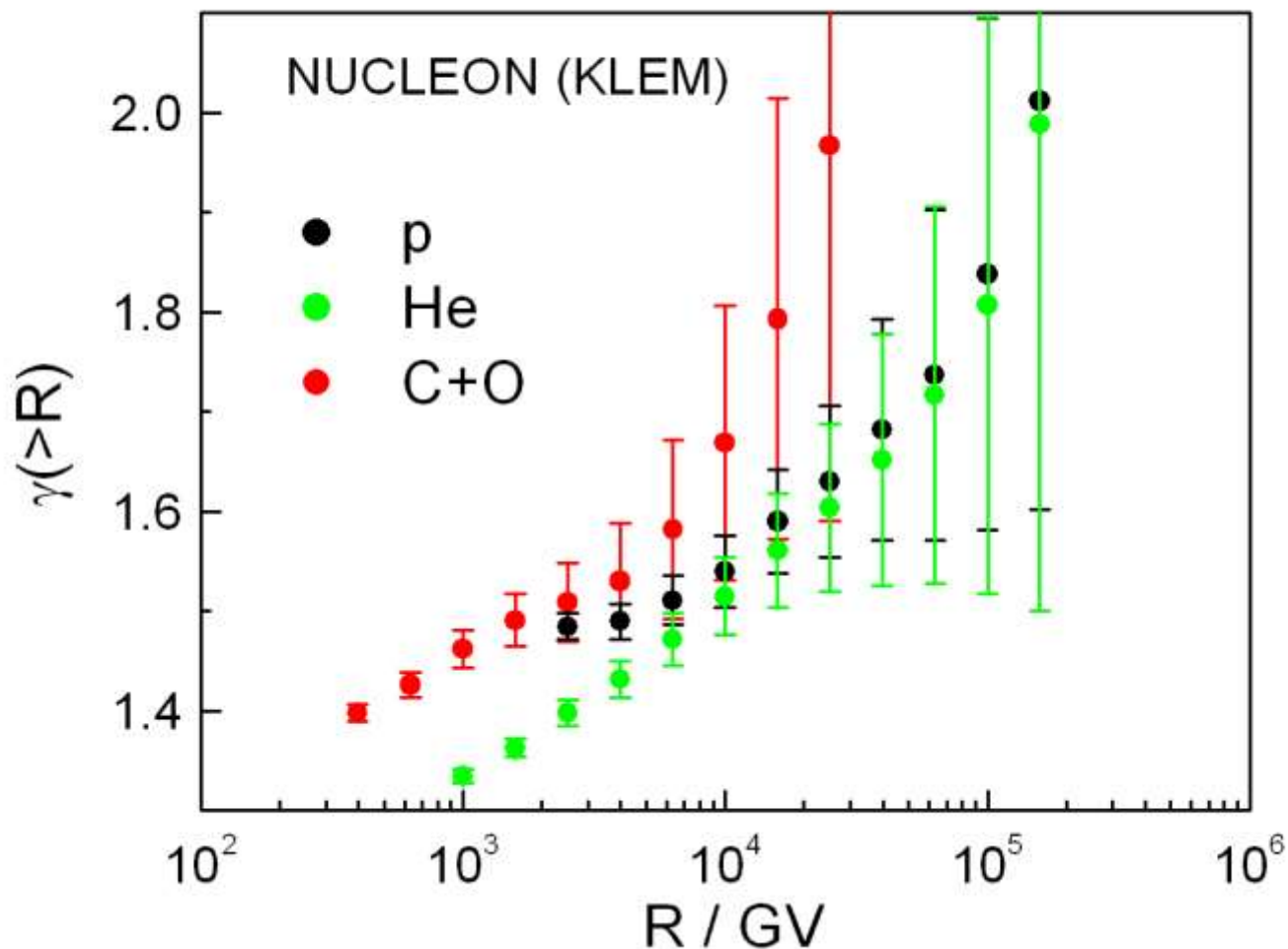


Суммарный спектр углерода и кислорода



Показатели спектров при разных порогах.

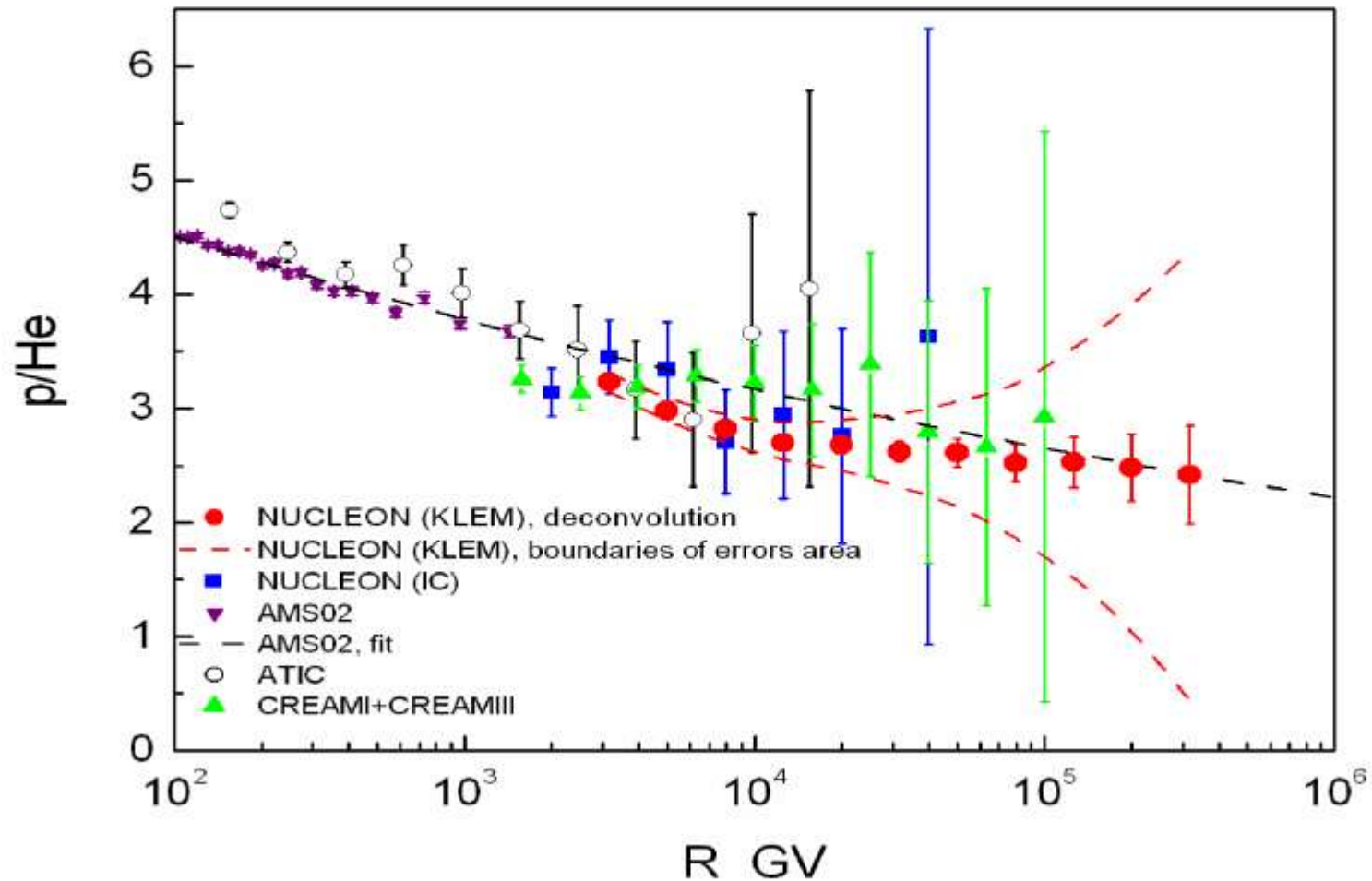
$$\gamma(R > R_t) = 1 / \langle \ln(R / R_t) \rangle$$



Универсальное «колено»

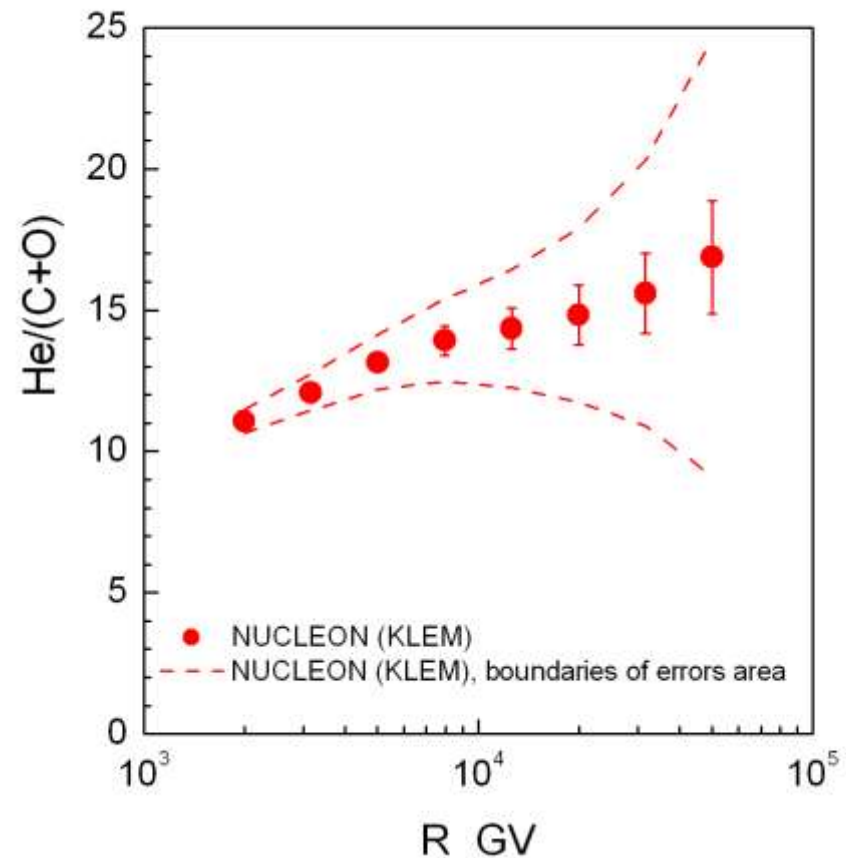
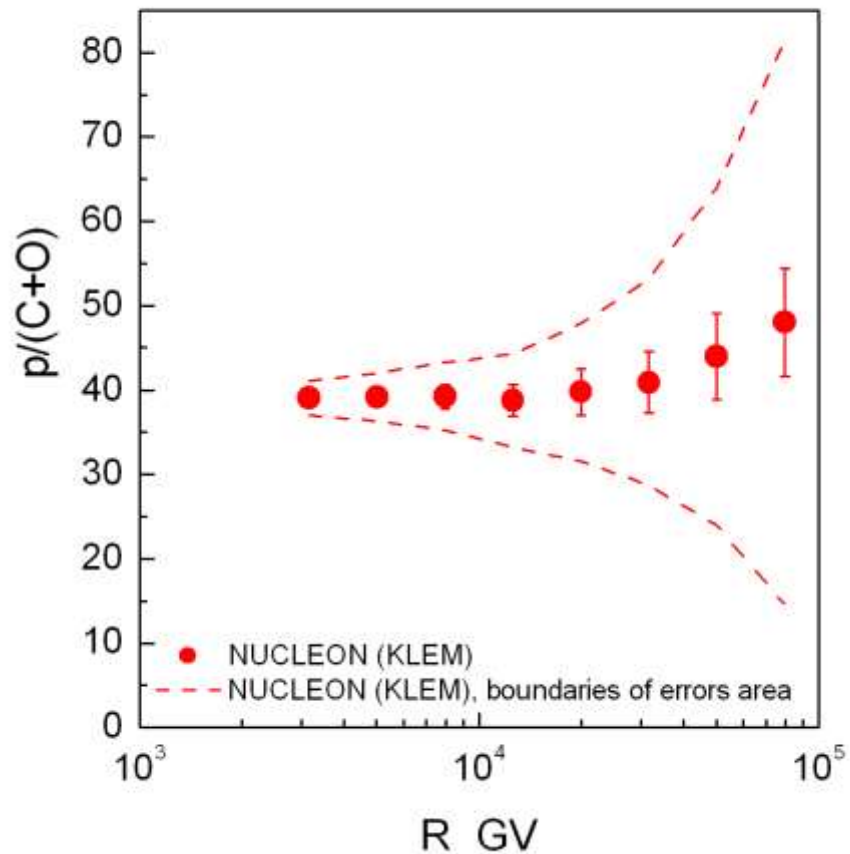
- Показано наличие «колена» для разных компонент в области жесткостей ~ 10 ТВ.
- Из сравнения спектров ядер углерода и кислорода с данными AMS-02 для низких жесткостей, в области 200-300 ГВ происходит выполаживание спектров, что согласуется с данными других экспериментов.

Отношение спектров протонов и ядер гелия с ростом жесткости падает, но в области «колена» выходит на постоянный уровень



Отношения $p/(C+O)$ и $He/(C+O)$

наклон 0.012 ± 0.058 и 0.142 ± 0.40



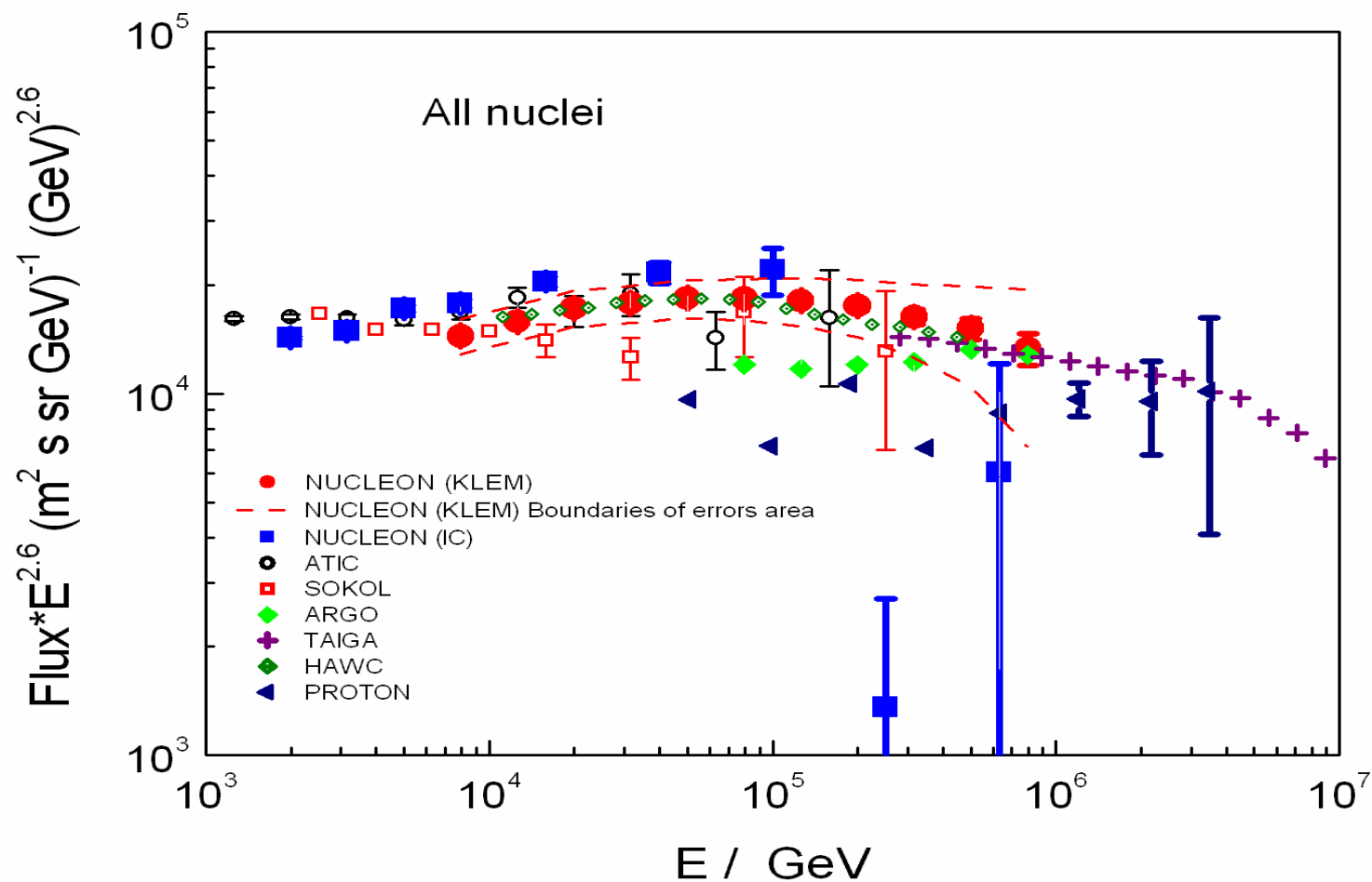
Возможная астрофизическая интерпретация

Полученный результат можно интерпретировать в рамках моделей с разными классами источников или моделей с близким источником. Возможно, спектр, создаваемый большим количеством галактических источников, является достаточно мягким. На этот спектр накладывается более жесткий спектр от близкого источника с изломом в области магнитных жесткостей ~ 10 ТВ.

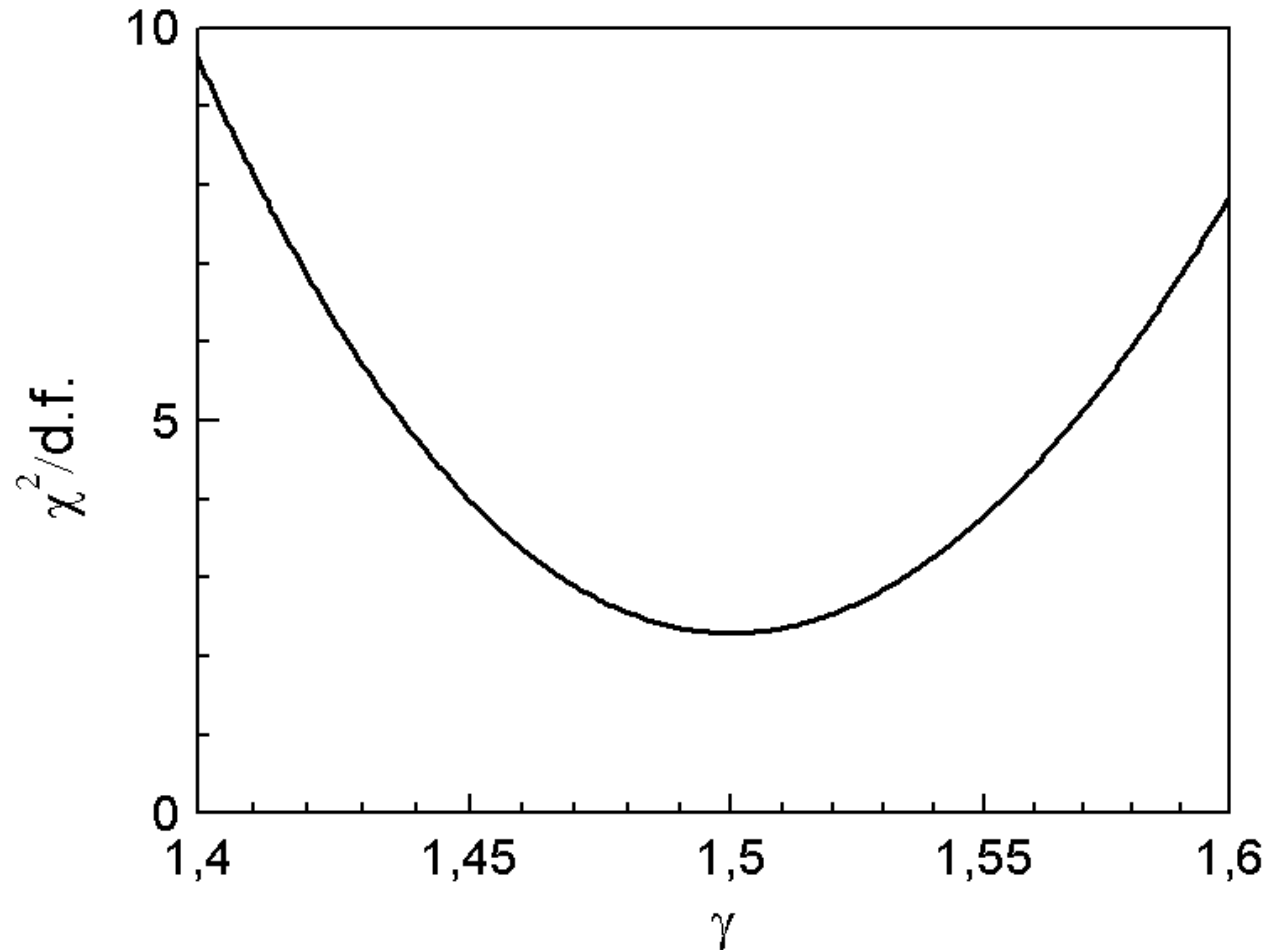
В результате при малых жесткостях преобладает поток от многих источников, выше 1 ТВ – от близкого источника с химическим составом, отличающимся от среднего состава от низкоэнергичных источников. В частности, это различие выражается в большем содержании гелия по сравнению с другими компонентами.

Спектр всех частиц, сопоставление с данными наземных экспериментов.

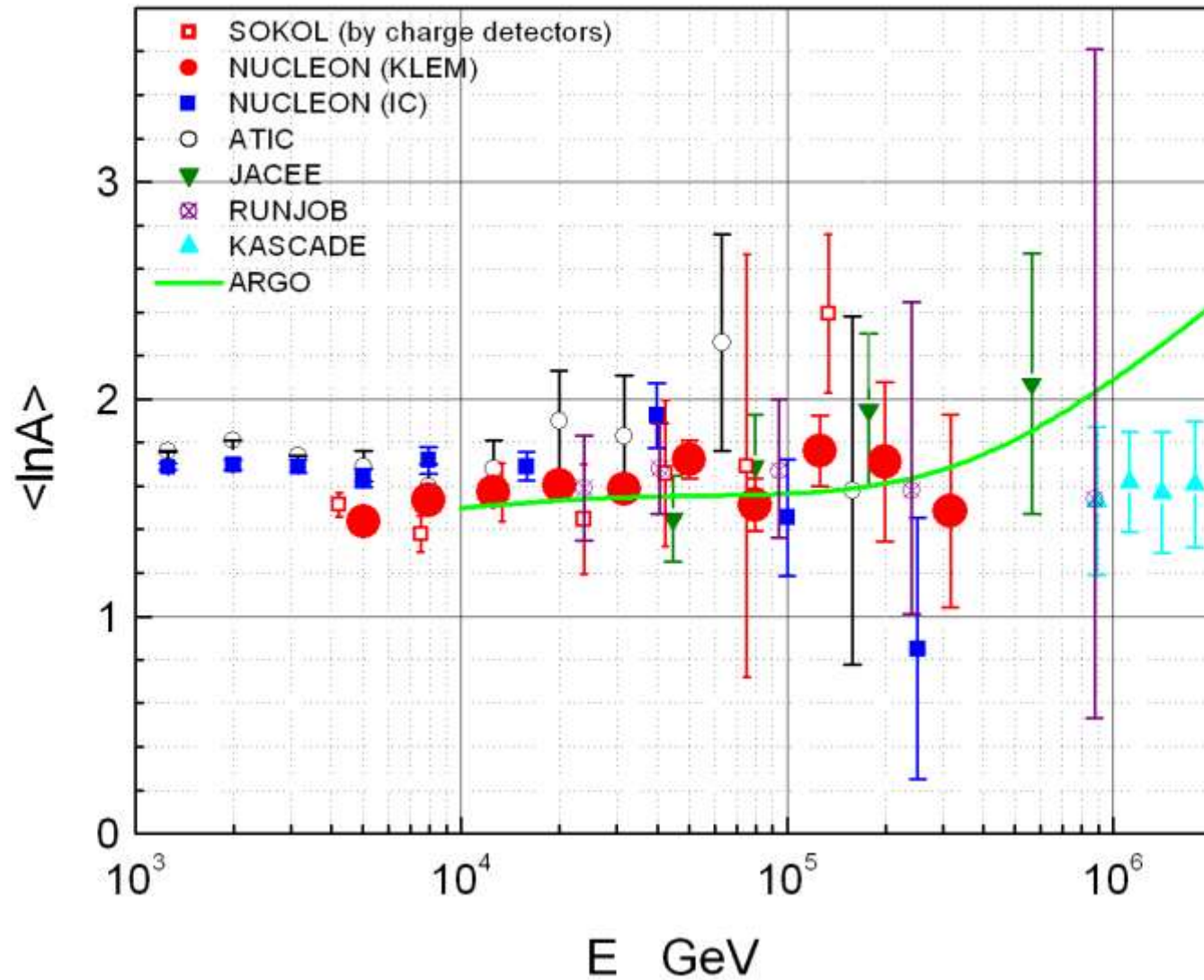
При пороге 10 ТэВ показатель спектра равен 1.48 ± 0.014 , а при пороге 100 ТэВ равен 1.78 ± 0.096 . Эффект на уровне 3σ .



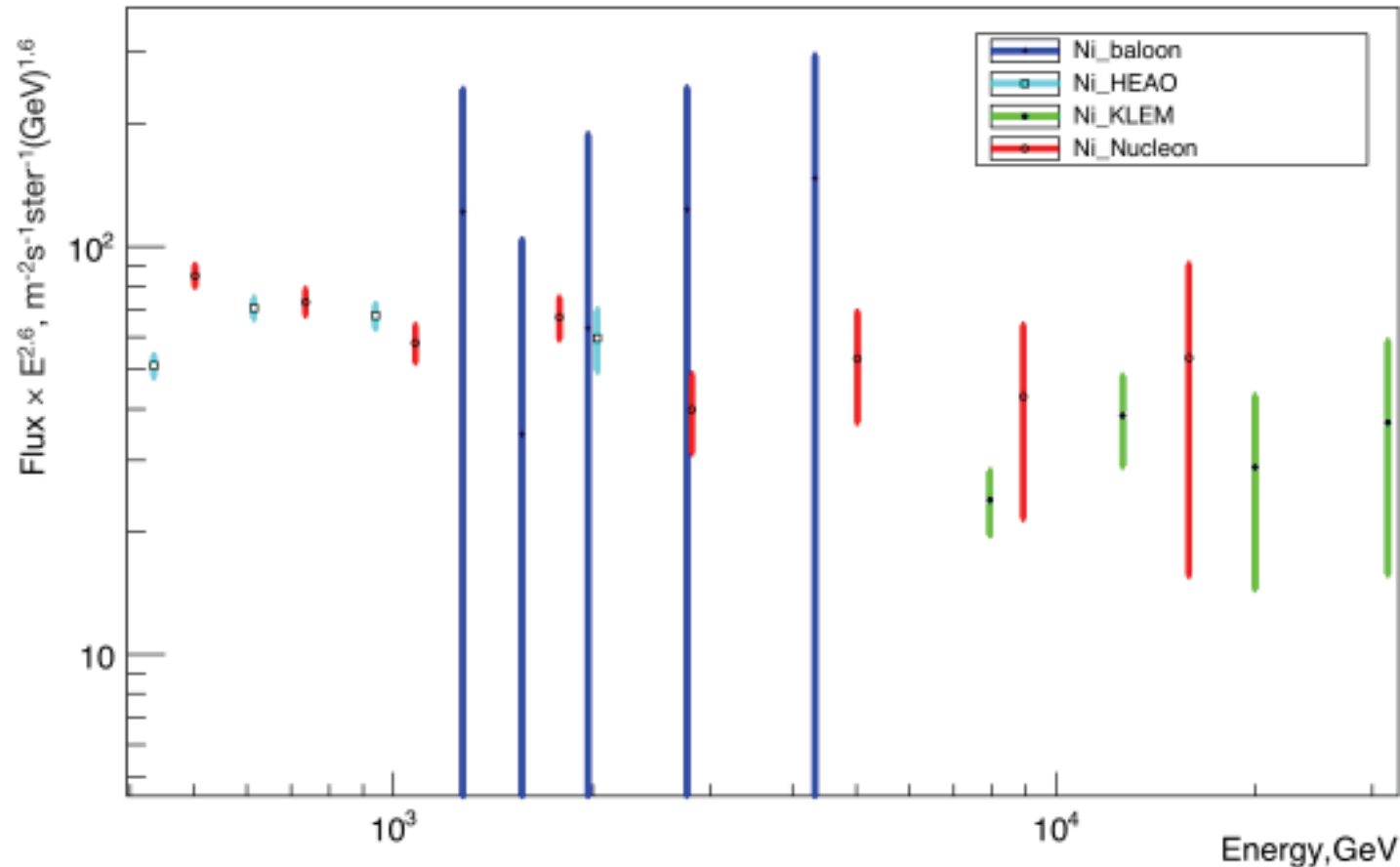
Зависимость χ^2 на одну степень свободы от показателя интегрального спектра γ
Спектр не степенной, $\min(\chi^2)=2.21$



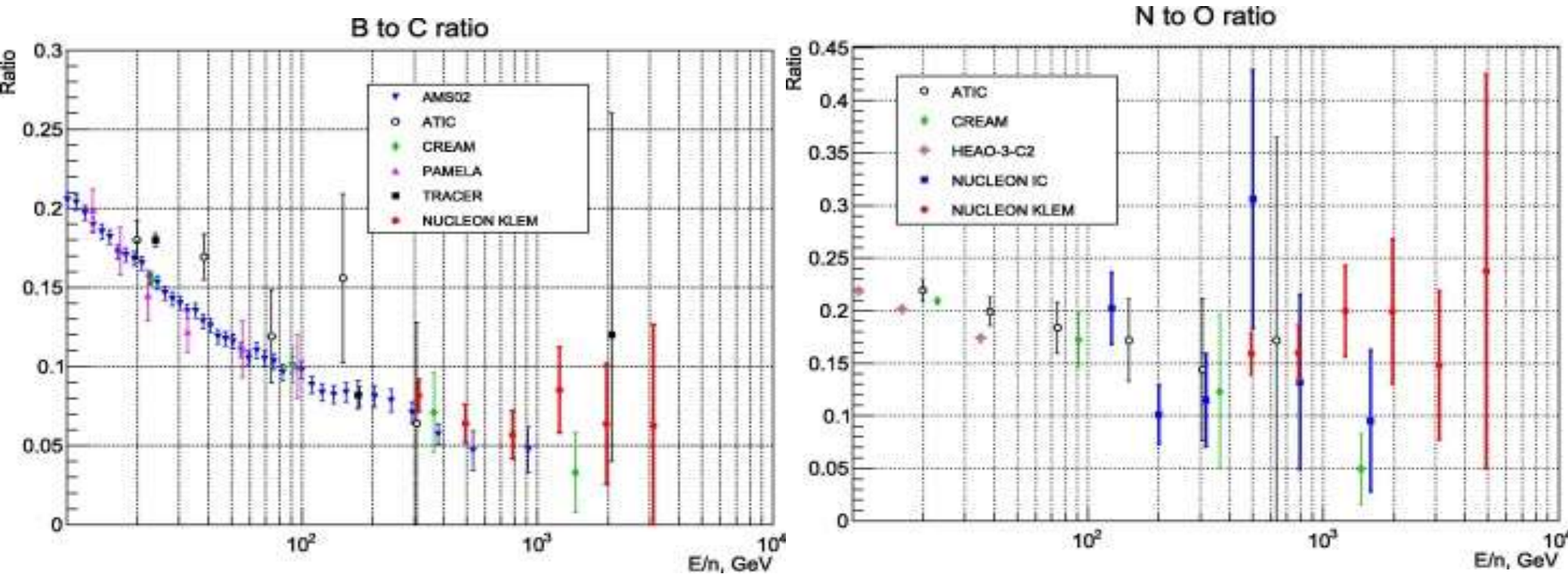
Средний логарифм массового числа



В ходе эксперимента НУКЛОН впервые измерен спектр ядер никеля высоких энергий (до ~ 40 ТэВ), что дает важную информацию о процессах нуклеосинтеза. Спектр никеля имеет наклон 2.83 ± 0.09 . Это существенно отличается от наклона спектра ядер железа 2.64 ± 0.02 . Отличие спектров может отражать свойства процессов нуклеосинтеза и ускорения космических лучей.



Получены спектры вторичных ядер высоких энергий и их отношения к первичным (B/C, N/O, subFe/Fe). В области высоких энергий (>500 ГэВ/н) эти отношения выходят на плато, т.е. спектры вторичных ядер становятся подобными спектру первичных. Возможно, это связано с астрофизическими процессами. При высоких энергиях пробег первичных ядер в межзвездной среде оказывается сравним с пробегом в источниках, и мы наблюдаем спектр вторичных ядер, образовавшихся в источниках и ускорившихся вместе с первичными.



ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- Обнаружено универсальное «колено» в спектре по магнитной жесткости. В области ~ 10 ТВ спектры становятся более мягкими.
- Из сравнения спектров ядер C, O с данными AMS-02 в области 200-300 ГВ происходит выполаживание спектров, что согласуется с данными других экспериментов.
- Отношение спектров протонов и ядер гелия с ростом жесткости падает, но в области «колена» выходит на постоянный уровень.
- Доля гелия растет на участке, предшествующем «колenu», что может говорить о наличии близкого источника, обогащенного гелием.
- Полученный энергетический спектр всех частиц хорошо согласуется с данными наземных экспериментов. Заметны отличия от степенного вида.
- Средний логарифм массового числа хорошо согласуется как с другими прямыми измерениями, так и с наземным экспериментом ARGO

- Впервые измерен спектр ядер никеля высоких энергий (до ~ 40 ТэВ), что дает важную информацию о процессах нуклеосинтеза. Спектр никеля имеет наклон 2.83 ± 0.09 . Это существенно отличается от наклона спектра ядер железа 2.64 ± 0.02 . Отличие спектров может отражать свойства процессов нуклеосинтеза и ускорения космических лучей.
- Получены спектры вторичных ядер высоких энергий и их отношения к первичным (B/C, N/O, subFe/Fe). В области высоких энергий (> 500 ГэВ/н) эти отношения выходят на плато, т.е. спектры вторичных ядер становятся подобными спектру первичных. Возможно, при высоких энергиях пробег первичных ядер в межзвездной среде оказывается сравним с пробегом в источниках, и мы наблюдаем спектр вторичных ядер, образовавшихся в источниках и ускорившихся вместе с первичными.

Публикации по результатам эксперимента НУКЛОН

1. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, N. Gorbunov, S. Filippov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, M. Merkin, A. Pakhomov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, L. Sveshnikova, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin. The NUCLEON space experiment for direct high energy cosmic rays investigation in TeV–PeV energy range. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 770:189–196, 2015.
2. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, N. Gorbunov, S. Filippov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kudryashov, I. Kovalev, M. Merkin, A. Pakhomov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, L. Sveshnikova, A. Tkachenko, L. Tkachev, M. Torochkov, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin. The NUCLEON space experiment. *EPJ Web of Conferences*, 105:01002–p1–01002–p4, 2015.
3. L. Tkachev, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, S. Porokhovoy, A. Sadovsky, A. Tkachenko, E. Atkin, V. Shumikhin, V. Bulatov, V. Dorokhov S. Filippov, D. Polkov, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, M. Merkin, A. Pakhomov, A. Panov, D. Podorozhny, L. Sveshnikova, M. Torochkov, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin. Preliminary results of the cosmic ray study in the nucleon space experiment. *PoS ICHEP2016*, (792):C16–08–03, 2016.

4. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, S. Filippov, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, M. Merkin, A. Panov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, L. Sveshnikova, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin. The NUCLEON experiment. results of the first year of data acquisition. *Astroparticle Physics*, 90:69–74, 2017
5. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, N. Gorbunov, S. Filippov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, M. Merkin, A. Panov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, L. Sveshnikova, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin. First results of the cosmic ray NUCLEON experiment. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2017(7):20, 2017
6. Е. Аткин, В. Булатов, В. Дорохов, Н. Горбунов, С. Филиппов, В. Гребенюк, Д. Карманов, И. Ковалев, И. Кудряшов, А. Курганов, М. Меркин, А. Панов, Д. Подорожный, Д. Полков, С. Пороховой, В. Шумихин, А. Ткаченко, Л. Ткачев\$, А. Турундаевский, О. Васильев, and А. Воронин. Новое универсальное колено космических лучей вблизи магнитной жесткости 10 ТВ по данным космической обсерватории НУКЛОН. *Письма в ЖЭТФ*, 108(1):5–13, 2018
7. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, N. Gorbunov, S. Filippov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, M. Merkin, A. Panov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin. New universal cosmic-ray knee near a magnetic rigidity of 10 tv with the nucleon space observatory. *JETP Letters*, 108(1):5–12, 2018

8. V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. A. Kurganov, A. Panov, D. Podorozhny, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. G. Voronin. Cosmic ray nickel nuclei spectrum by the nucleon experiment. *ArXiv e-prints*, (1809.07285), 2018.
9. Э. В. Аткин, В. Л. Булатов, О. А. Васильев, А. Г. Воронин, Н. В. Горбунов, В. М. Гребенюк, В. А. Дорохов, Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, И. А. Кудряшов, А. А. Курганов, М. М. Меркин, А. Д. Панов, Д. М. Подорожный, Д. А. Полков, С. Ю. Пороховой, Л. Г. Свешникова, Л. Г. Ткачев, А. В. Ткаченко, А. Н. Турундаевский, С. Б. Филиппов, and В. В. Шумихин. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ И ЯДЕР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ИЗМЕРЕННЫЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НУКЛОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ МЕТОДИКИ. *Астрономический журнал*, 96(1):75–88, 2019.
10. E. V. Atkin, V. L. Bulatov, O. A. Vasiliev, A. G. Voronin, N. V. Gorbunov, V. M. Grebenyuk, V. A. Dorokhov, D. E. Karmanov, I. M. Kovalev, I. A. Kudryashov, A. A. Kurganov, M. M. Merkin, A. D. Panov, D. M. Podorozhny, D. A. Polkov, S. Yu Porokhovoï, L. G. Sveshnikova, L. G. Tkachev, A. V. Tkachenko, A. N. Turundaevskiy, S. B. Filippov, and V. V. Shumikhin. Energy spectra of cosmic-ray protons and nuclei measured in the nucleon experiment using a new method. *Astronomy Reports*, 63(1):66–78, 2019
11. Э. В. Аткин, В. Л. Булатов, О. А. Васильев, А. Г. Воронин, Н. В. Горбунов, В. М. Гребенюк, В. А. Дорохов, Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, И. А. Кудряшов, А. А. Курганов, М. М. Меркин, А. Д. Панов, Д. М. Подорожный, Д. А. Полков, С. Ю. Пороховой, Л. Г. Свешникова, Л. Г. Ткачев, А. В. Ткаченко, А. Н. Турундаевский, С. Б. Филиппов, and В. В. Шумихин. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ И ЯДЕР ГЕЛИЯ В СОСТАВЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА “НУКЛОН”. *Известия РАН, серия физическая*, 83(8):1077–1079, 2019

12. А. Д. Панов, Э. В. Аткин, В. Л. Булатов, О. А. Васильев, А. Г. Воронин, Н. В. Горбунов, В. М. Гребенюк, В. С. Дорохов, Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, И. А. Кудряшов, А. А. Курганов, М. М. Меркин, Д. М. Подорожный, Д. А. Полков, С. Ю. Пороховой, А. В. Ткаченко, Л. Г. Ткачев, А. Н. Турундаевский, С. Б. Филиппов, and В. В. Шумихин. Обзор результатов космического эксперимента НУКЛОН. *Известия РАН, серия физическая*, 83(8):1080–1082, 2019
13. A. D. Panov, E. V. Atkin, V. L. Bulatov, O. A. Vasiliev, A. G. Voronin, N. V. Gorbunov, V. M. Grebenyuk, V. S. Dorokhov, D. E. Karmanov, I. M. Kovalev, I. A. Kudryashov, A. A. Kurganov, M. M. Merkin, D. M. Podorozhny, D. A. Polkov, S. Yu Porokhovoy, A. V. Tkachenko, L. G. Tkachev, A. N. Turundaevskiy, S. B. Filippov, and V. V. Shumikhin. Review of the results from the nucleon space experiment. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 83(8):980–982, 2019.
14. V. M. Grebenyuk, D. E. Karmanov, I. M. Kovalev, I. A. Kudryashov, A. A. Kurganov, A. D. Panov, D. M. Podorozhny, A. V. Tkachenko, A. N. Turundaevskiy, L. G. Tkachev, O. A. Vasiliev, and A. G. Voronin. Secondary cosmic rays in the nucleon space experiment. *Advances in Space Research*, 64(12):2559–2563, 2019.
15. V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, A. Panov, D. Podorozhny, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin. Energy spectra of abundant cosmic-ray nuclei in the nucleon experiment. *Advances in Space Research*, 64(12):2546–2558, 2019

16. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, N. Gorbunov, S. Filippov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, M. Merkin, A. Panov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, L. Sveshnikova, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin. Energy spectra of cosmic ray protons and helium nuclei in the nucleon experiment. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 83(8):977–979, 2019.
17. A. Turundaevskiy, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, M. Merkin, A. Panov, D. Podorozhny, A. Sadovsky, L. Tkachev, O. Vasiliev, and A. Voronin. Charge composition of cosmic rays at energies more than 1 tev based on the results of the nucleon mission. *Physics of Atomic Nuclei*, 82(6):920–923, 2019
18. D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, V. Latonov, A. Panov, D. Podorozhnyy, and A. Turundaevskiy. A possibility of interpretation of the cosmic ray kneenear 10 tv as a contribution of a single close source. *ArXiv Astrophysics e-prints*, 1907(1907.05987), 2019.
19. Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, И. А. Кудряшов, А. А. Курганов, А. Д. Панов, Д. М. Подорожный, А. Н. Турундаевский, and О. А. Васильев. Спектры протонов и ядер гелия и их сравнение по данным эксперимента НУКЛОН. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 111(7):435–440, 2020
20. D. E. Karmanov, I. M. Kovalev, I. A. Kudryashov, A. A. Kurganov, A. D. Panov, D. M. Podorozhny, A. N. Turundaevskiy, and O. A. Vasiliev. Spectra of protons and alpha particles and their comparison in the nucleon experiment data. *JETP Letters*, 111(7):363–367, 2020

**Анализ полученных
данных продолжается!**