

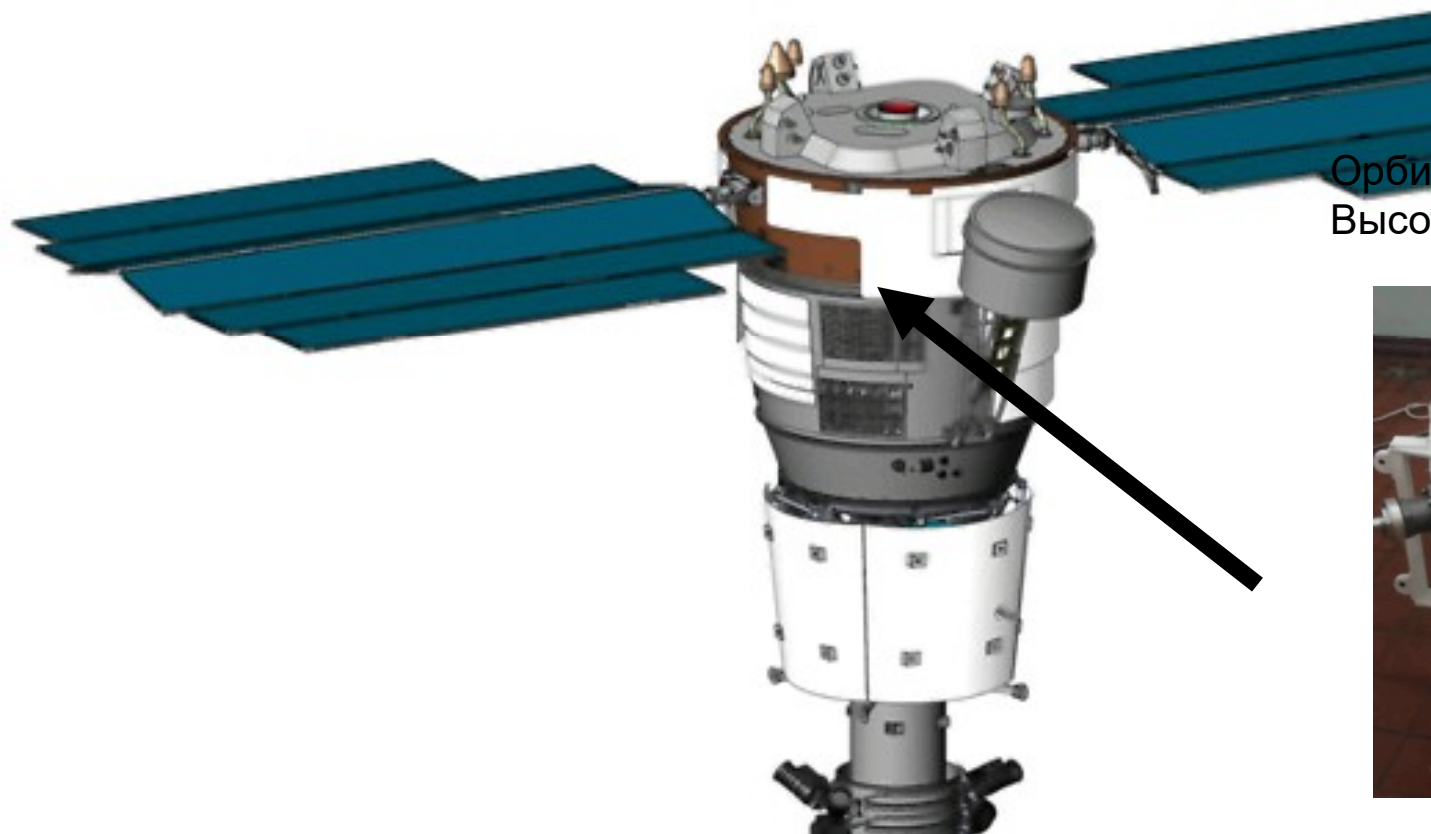
**Сессия-конференция секции ядерной физики
ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А.Рубакова
17-21 февраля 2025 г.**

ИТОГИ ЭКСПЕРИМЕНТА НУКЛОН

*А.Н.Турундаевский, Д.Е.Карманов, И.М.Ковалев,
И.А.Кудряшов, А.А.Курганов, А.Д.Панов,
Д.М.Подорожный*

НИИЯФ МГУ

аппаратуры НУКЛОН в составе космического аппарата «Ресурс-П» № 2

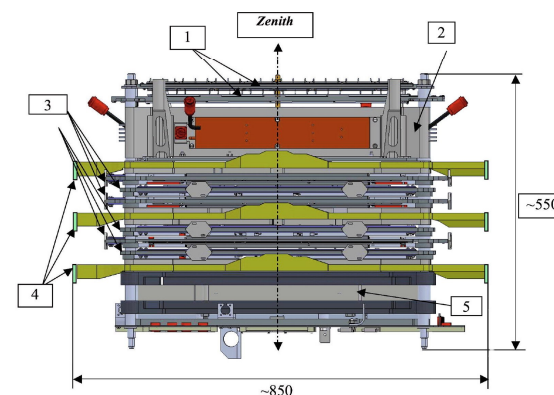


Орбита круговая, солнечно-синхронная,
Высота ~475 км; Наклонение ~97



Масса ~360 кг, энергопотребление ~360 Вт,
суточный объем телеметрии ~10 ГБ.

E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al. 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



Космический эксперимент НУКЛОН проводился в течение трех лет. В ходе эксперимента был измерен химический состав и энергетический спектр космических лучей в области 2-500 ТэВ. При этом достаточно высокой статистической значимостью был обнаружен ряд особенностей, не предсказанных ранее разработанными моделями ускорения и распространения космических лучей.

Впервые обнаружено новое «коллено» в области ~ 10 ТВ по магнитной жесткости, являющееся универсальным, т.е. наблюдаемым в спектрах протонов, гелия и более тяжелых обильных первичных ядер.

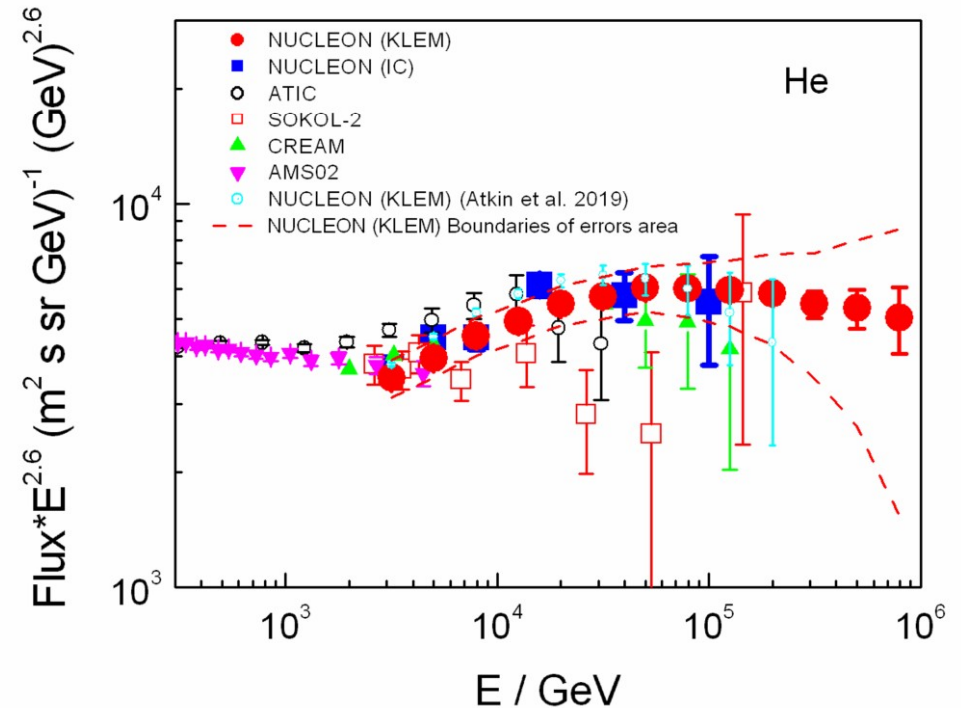
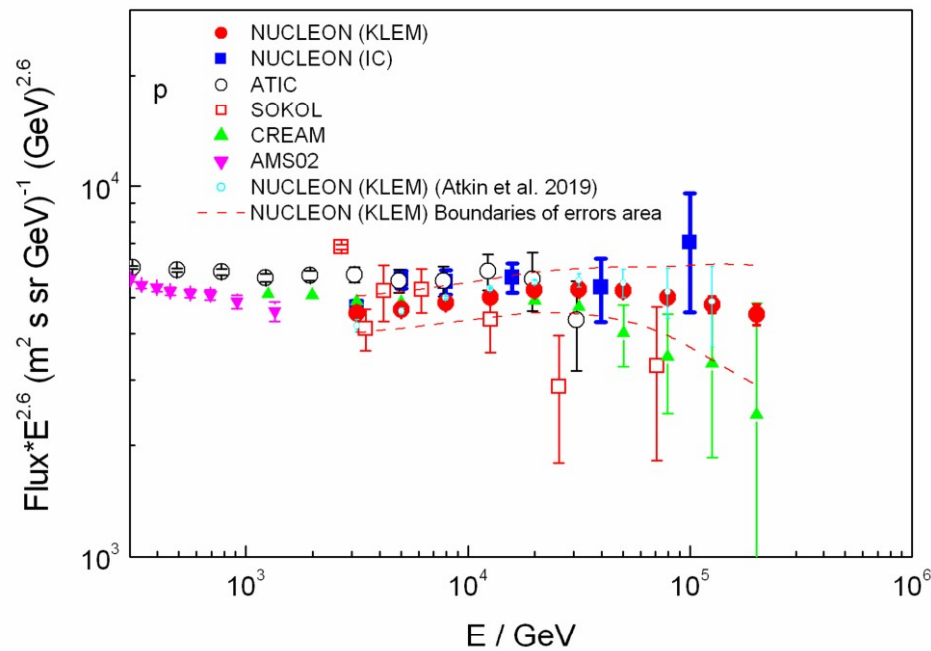
Показано, что отношение sub-Fe/Fe в шкале энергии на нуклон растет с ростом энергии.

Оказалось, что спектр редких нечетных ядер ($Z = 9-19$) более жесткий, чем спектр обильных четных ядер ($Z = 10-20$) в области магнитных жесткостей 300–10 000 ГВ.

Также анализ результатов эксперимента НУКЛОН показал, что в источнике наблюдается систематическая зависимость показателя спектра от заряда ядра.

- Оказалось, что спектр ядер углерода и кислорода по магнитной жесткости заметно более мягкий, чем спектр ядер гелия.
- По результатам измерений построены отношения спектров протонов и ядер гелия как в шкале энергий на частицу, так и в шкале магнитной жесткости. Отношение спектров в энергетической шкале уменьшается с ростом энергии. Отношение потоков протонов и ядер гелия в шкале магнитной жесткости близко к постоянному начиная с области нового излома, наблюдаемого при жесткости ~ 10 ТВ.
- Построена энергетическая зависимость логарифма массового числа в области 5-500 ТэВ. На основе данных о новом «колене» в спектре по магнитным жесткостям построена простая феноменологическая модель, описывающая энергетический спектр всех частиц и энергетическую зависимость среднего логарифма массового числа. Данная модель экстраполируется за пределы рабочего диапазона эксперимента НУКЛОН вплоть до «колена» при 3 ПэВ и стыкуется с данными наземных экспериментов. Описываются отличия спектра всех частиц от строго степенной формы.
- Впервые измерен спектр ядер никеля высоких энергий.

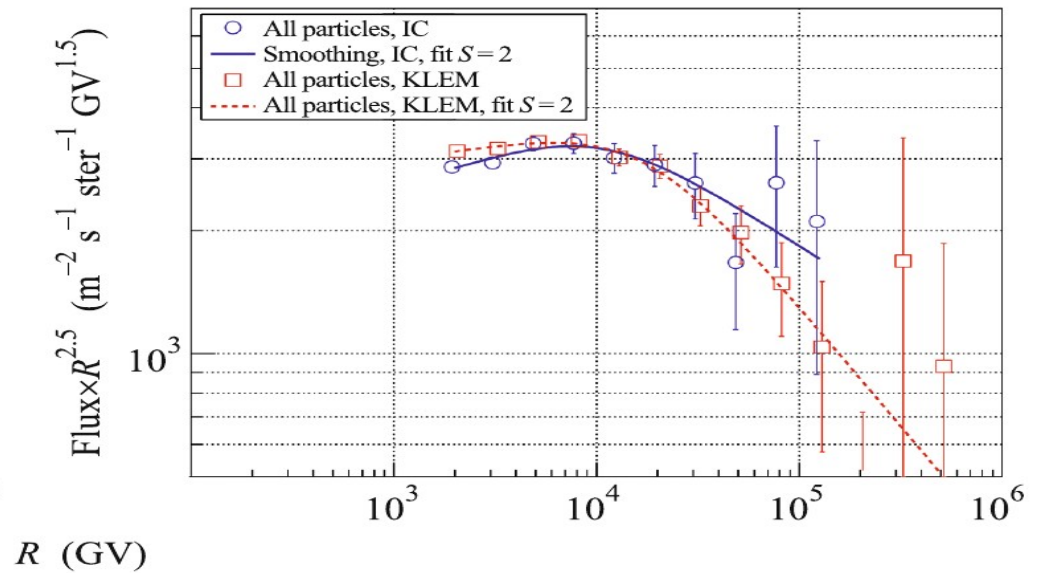
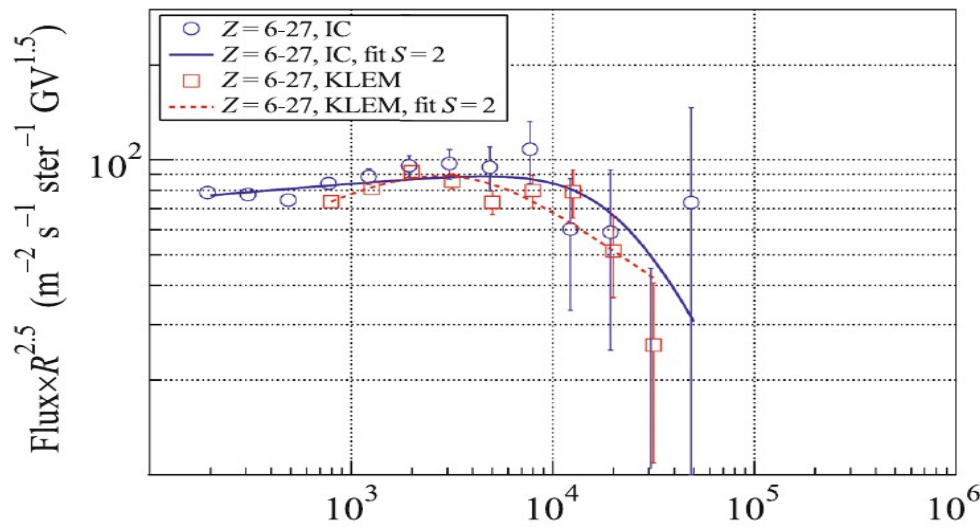
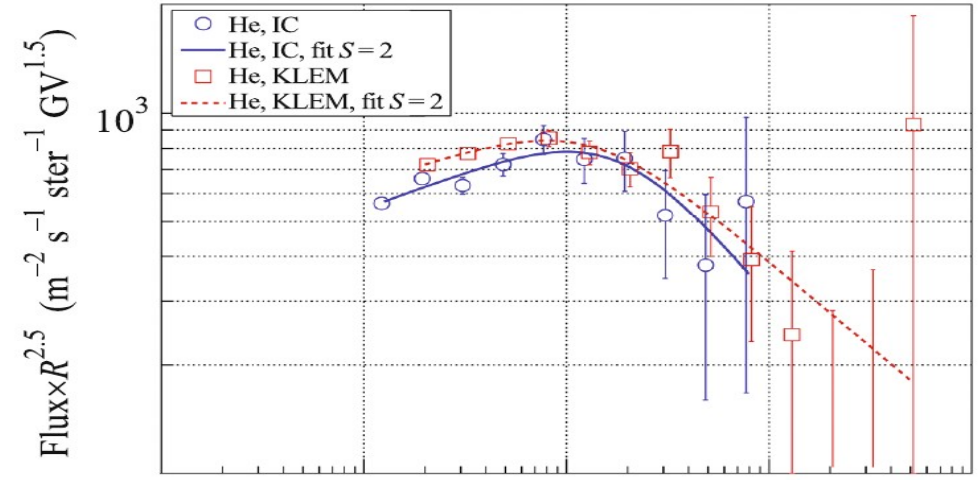
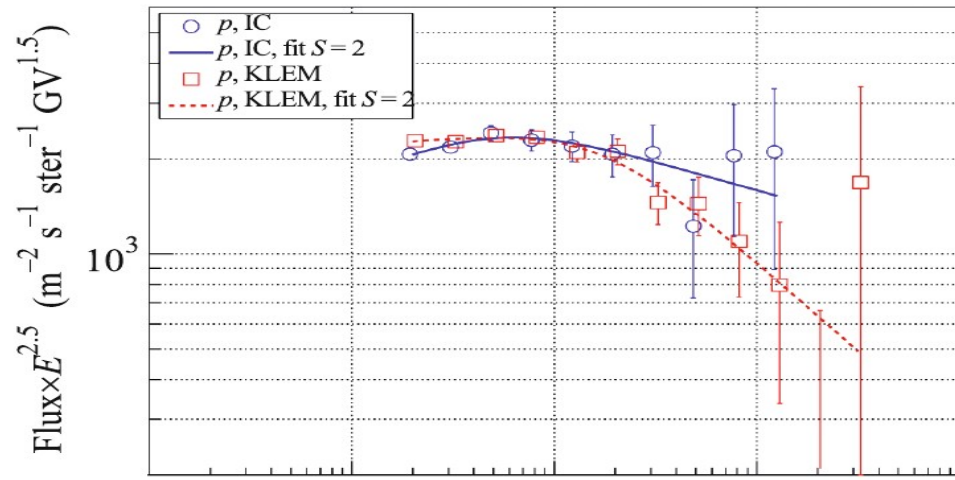
В ходе эксперимента с хорошей статистической обеспеченностью были проведены измерения энергетических спектров протонов и обильных ядер в области 2-500 ТэВ



D. Podorozhny, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, M. Merkin, A. Panov, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin. Review of the results from the NUCLEON space mission. *Advances in Space Research*, 70(5):1529–1538, 2022

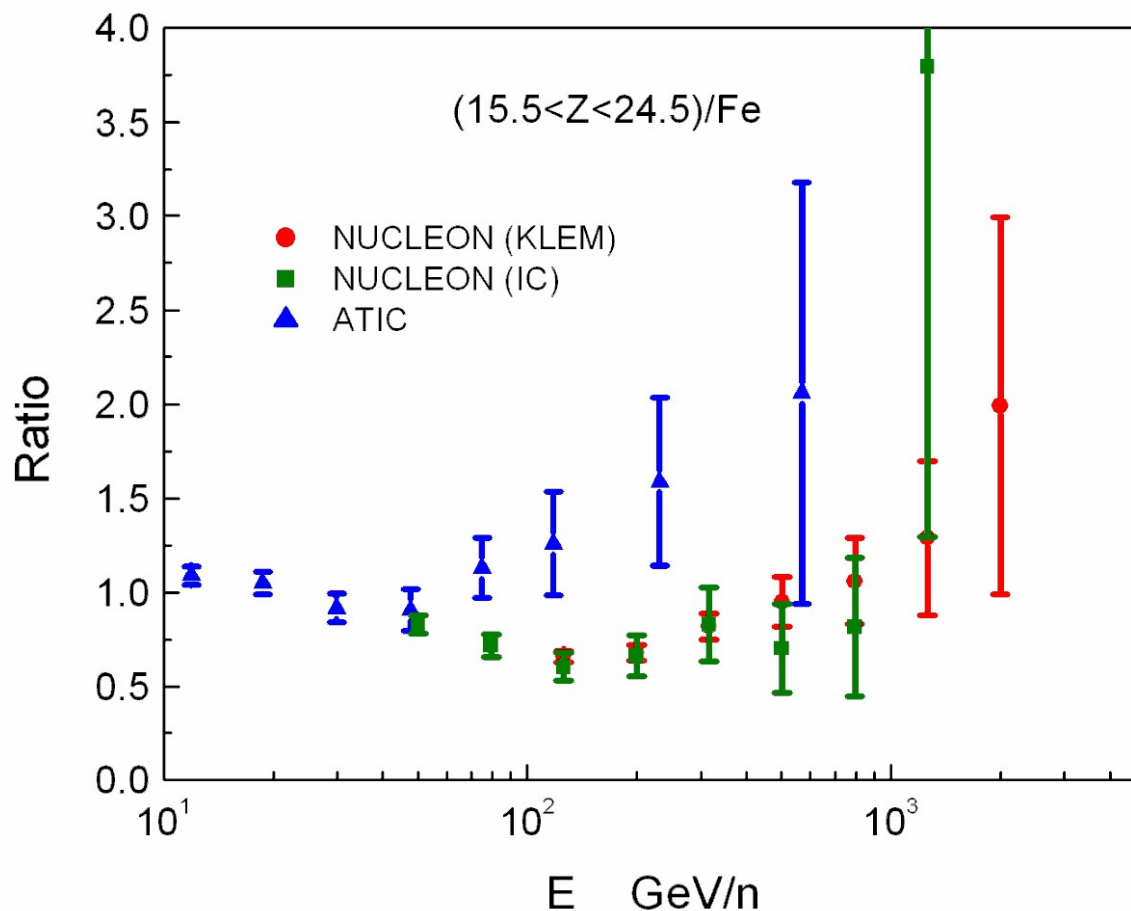
Впервые обнаружено новое «колесо» в области ~ 10 ТВ по магнитной жесткости, являющееся универсальным, т.е. наблюдаемым в спектрах протонов, гелия и более тяжелых обильных первичных ядер.

Наличие колена в спектрах протонов, гелия и спектре всех частиц подтверждено другими экспериментами



Е. Аткин, В. Булатов, В. Дорохов и др. Новое универсальное колесо космических лучей вблизи магнитной жесткости 10 ТВ по данным космической обсерватории НУКЛОН. *Письма в ЖЭТФ*, 108(1):5–13, 2018

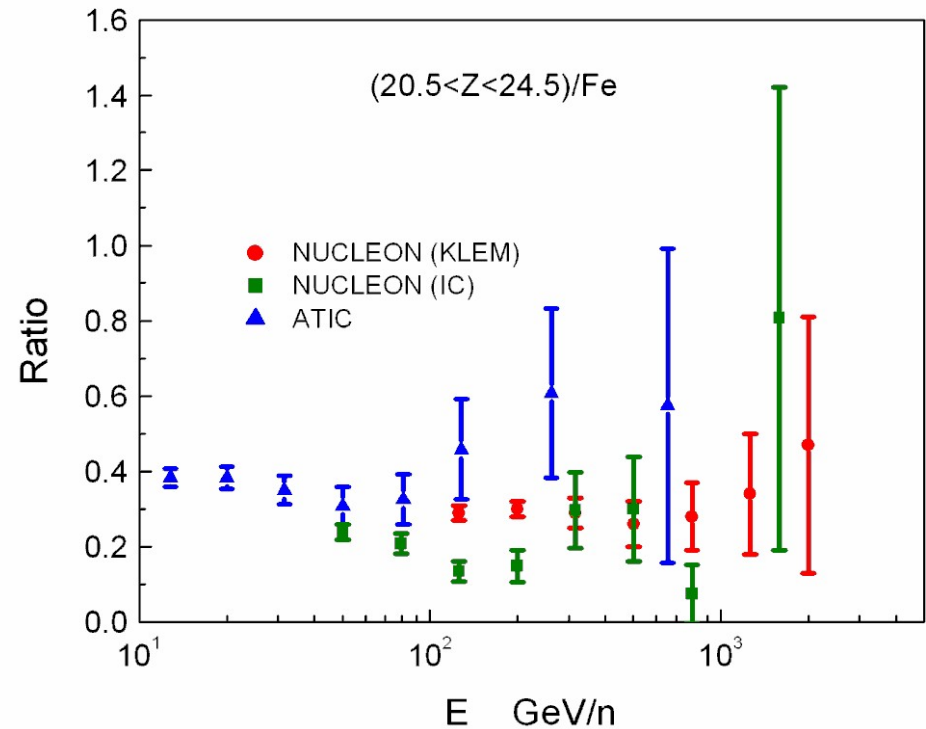
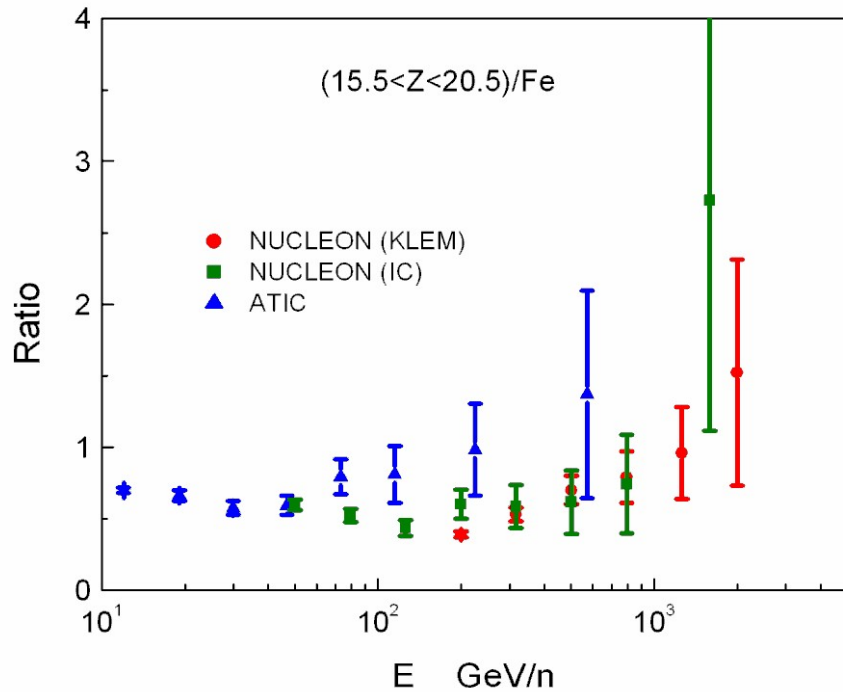
Изучение sub-Fe



Предварительные данные были опубликованы:
V.M. Grebenyuk, D. E. Karmanov, I. M. Kovalev et al.
Secondary cosmic rays in the nucleon space
experiment. Advances in Space Research, 64(12):2559-
2563, 2019.

$$\beta(>160 \text{ GeV/n})=0.340\pm 0.048=7.1\sigma$$
$$P(\beta>0)=1.$$

Отношения спектров



$$\beta(>160 \text{ GeV/n}) = 0.473 \pm 0.049 = 9.6\sigma$$

$$P(\beta > 0) = 1.$$

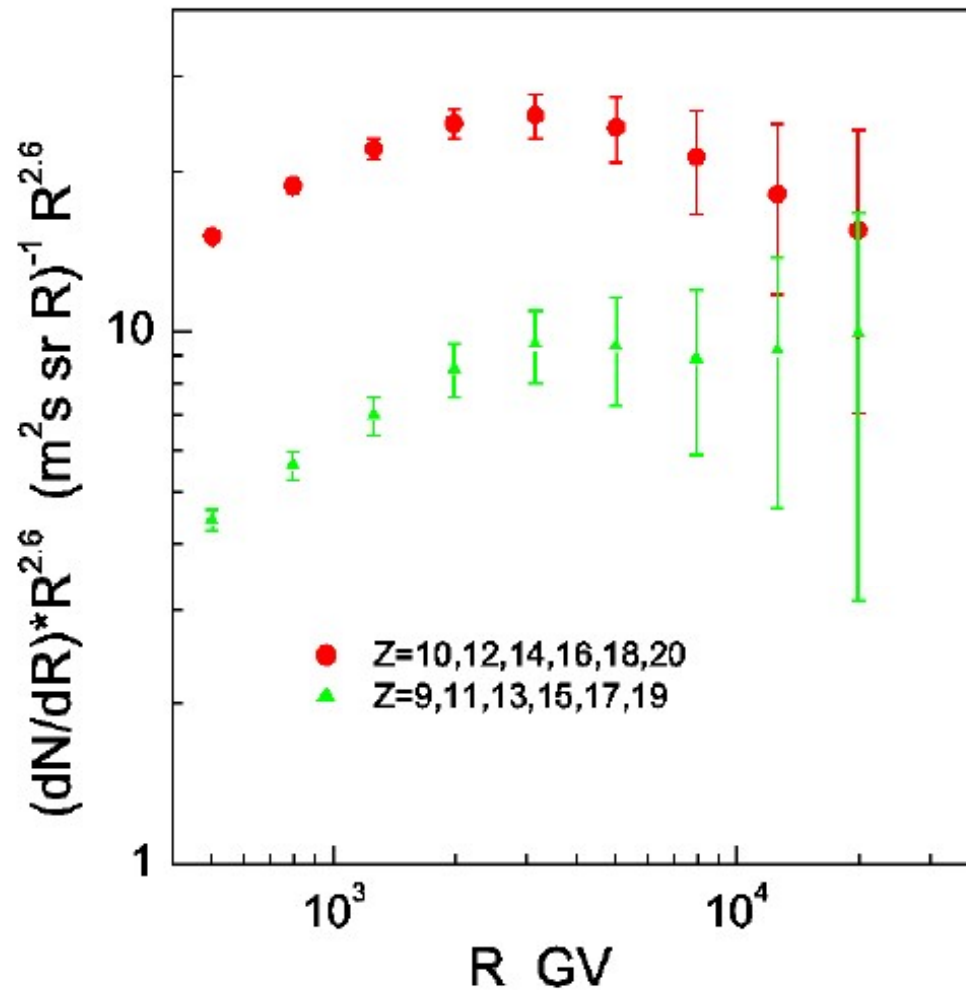
$$\beta(>160 \text{ GeV/n}) = 0.045 \pm 0.076 = 0.6\sigma$$

$$P(\beta > 0) = 0.72$$

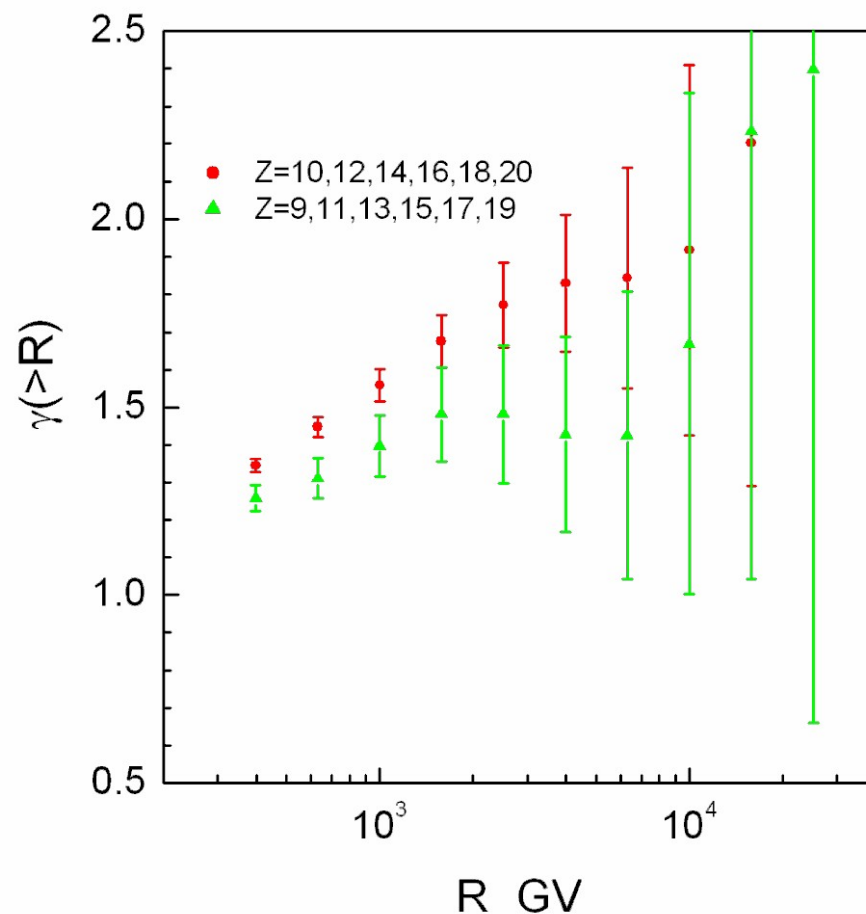
$$\beta(>400 \text{ GeV/n}) = 0.303 \pm 0.195 = 1.6\sigma$$

$$P(\beta > 0) = 0.90$$

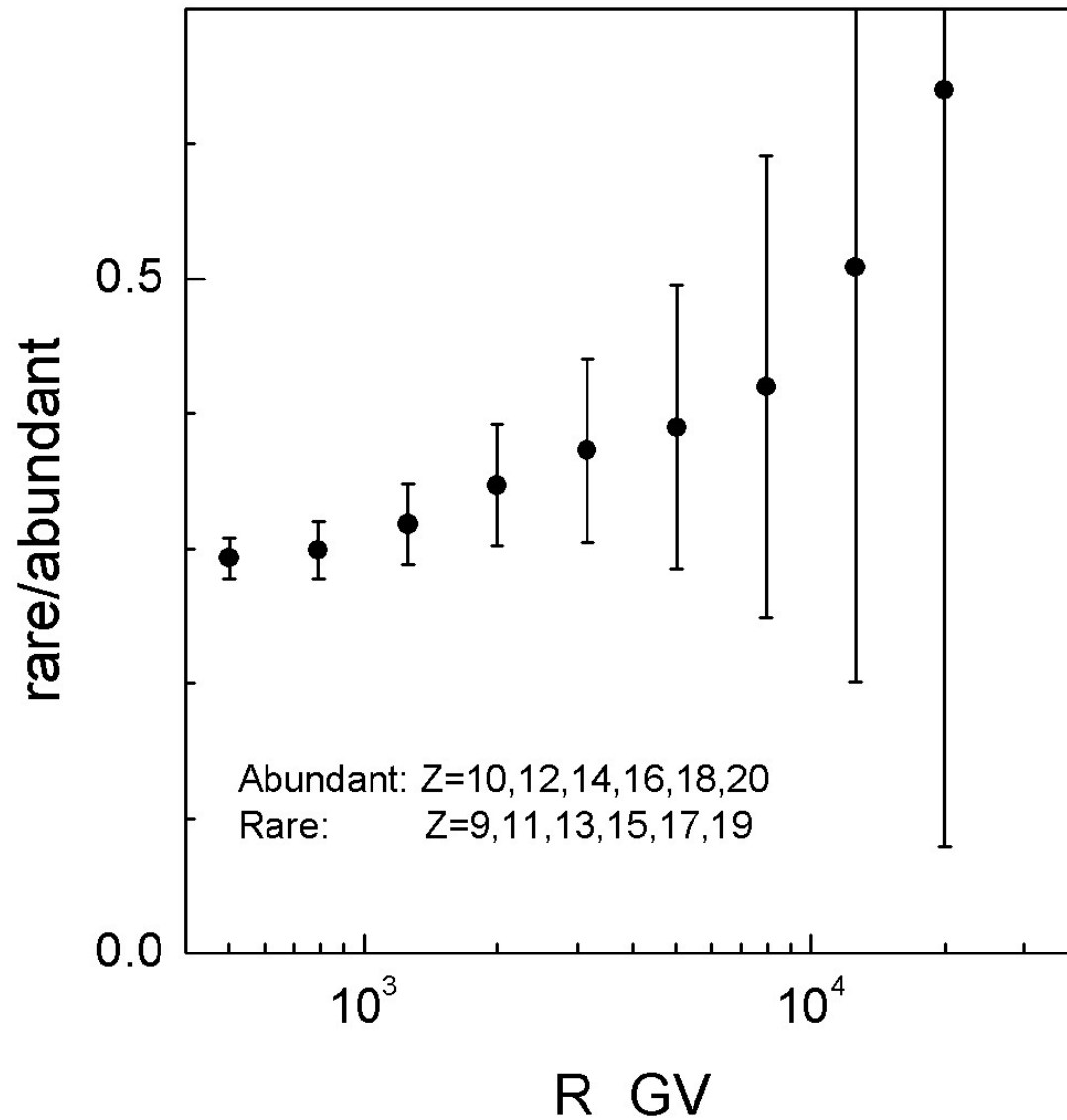
При анализе спектров по магнитной жесткости изучался суммарный спектр редких ядер с нечетными зарядами от 9 до 19 (F, Na, Al, P, Cl, K). Производилось сравнение со спектром четных ядер с зарядами 10-20.



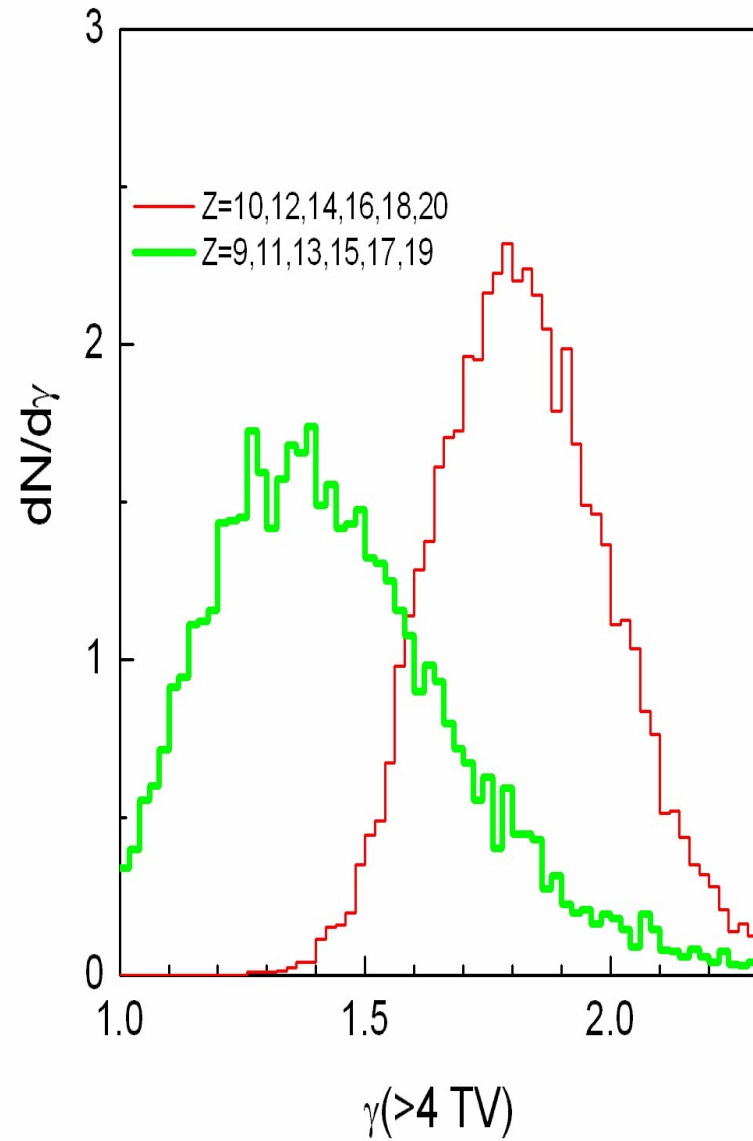
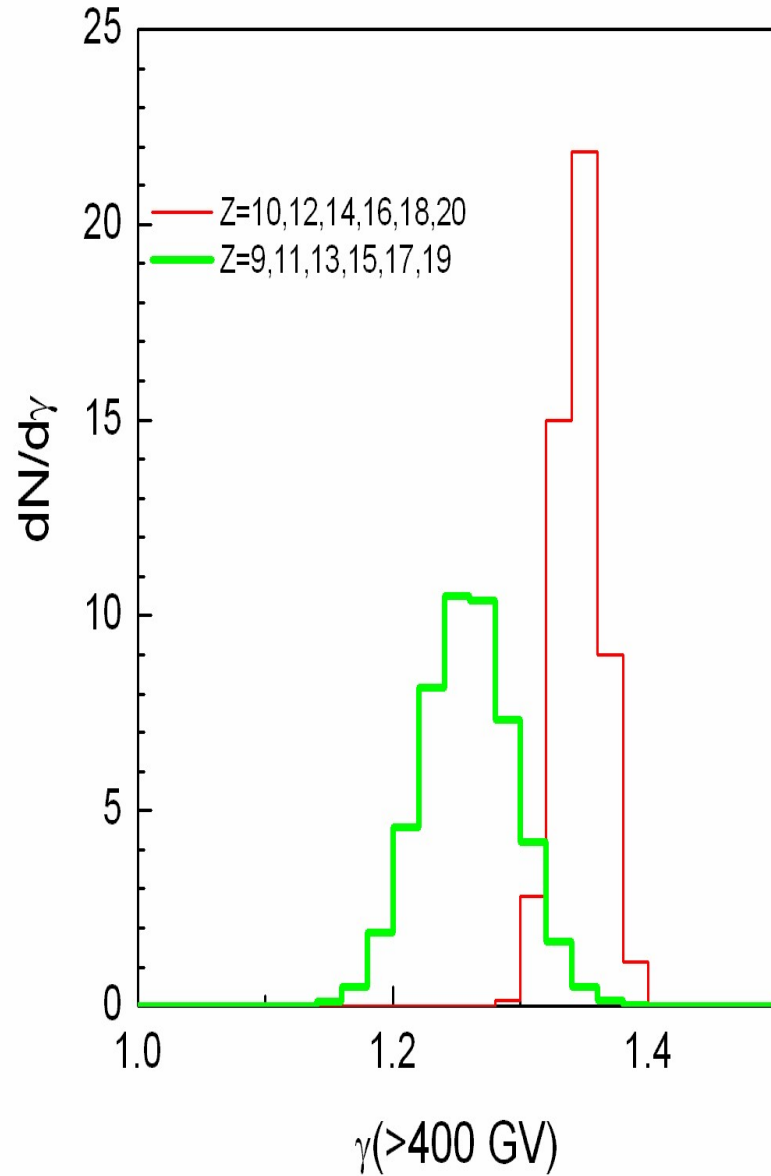
Определены показатели спектров при разных порогах по жесткости. Построены отношения потоков нечетных и четных ядер. Спектр нечетных ядер более жесткий, чем спектр четных ($Z=10-20$) в области магнитных жесткостей 300-10000 ГВ. Показатели спектра обильных и редких ядер при пороге по магнитной жесткости 400 ГВ равны 2.34 ± 0.015 и 2.24 ± 0.025 соответственно. Таким образом, разница показателей на уровне 3.4σ



Отношение спектров

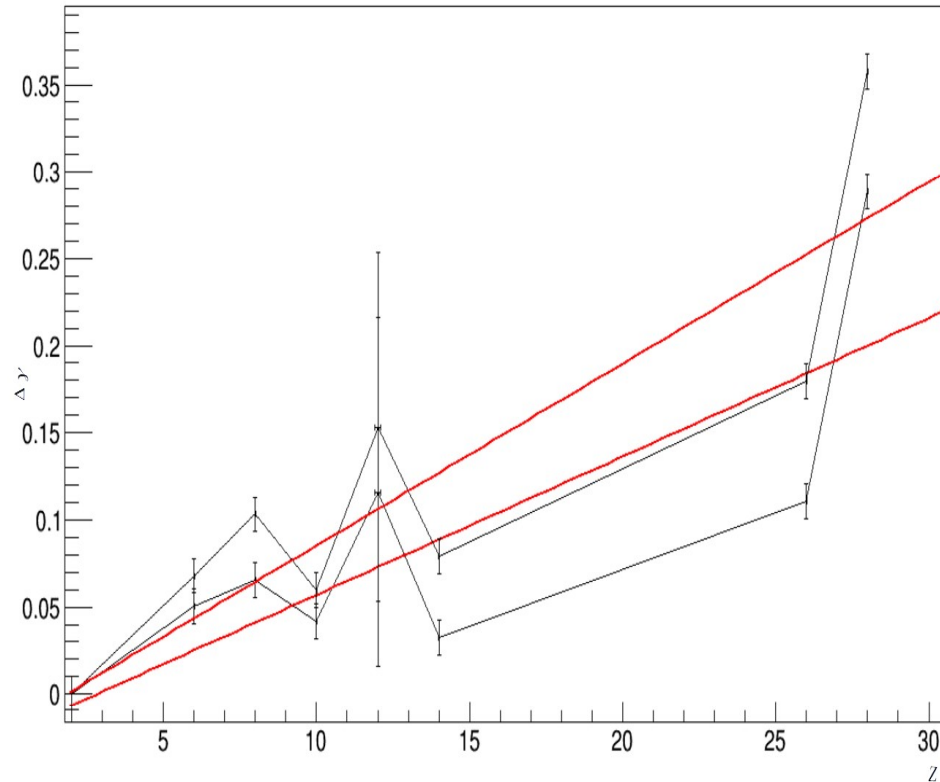


Распределения по определенным показателям интегрального спектра. При пороге 400 ГВ разница составляет 3.4σ



- Наблюдается изменение химического состава КЛ в области жесткостей 300 ГВ - 10 ТВ.
- Возможно, на высоких жесткостях состав КЛ отражает состав близкого источника.
- Если нечетные ядра являются вторичными, то их избыток может быть результатом фрагментации в веществе вблизи источника.
- Таким источником может быть сверхновая, возникшая из звезды типа Вольфа-Райе.

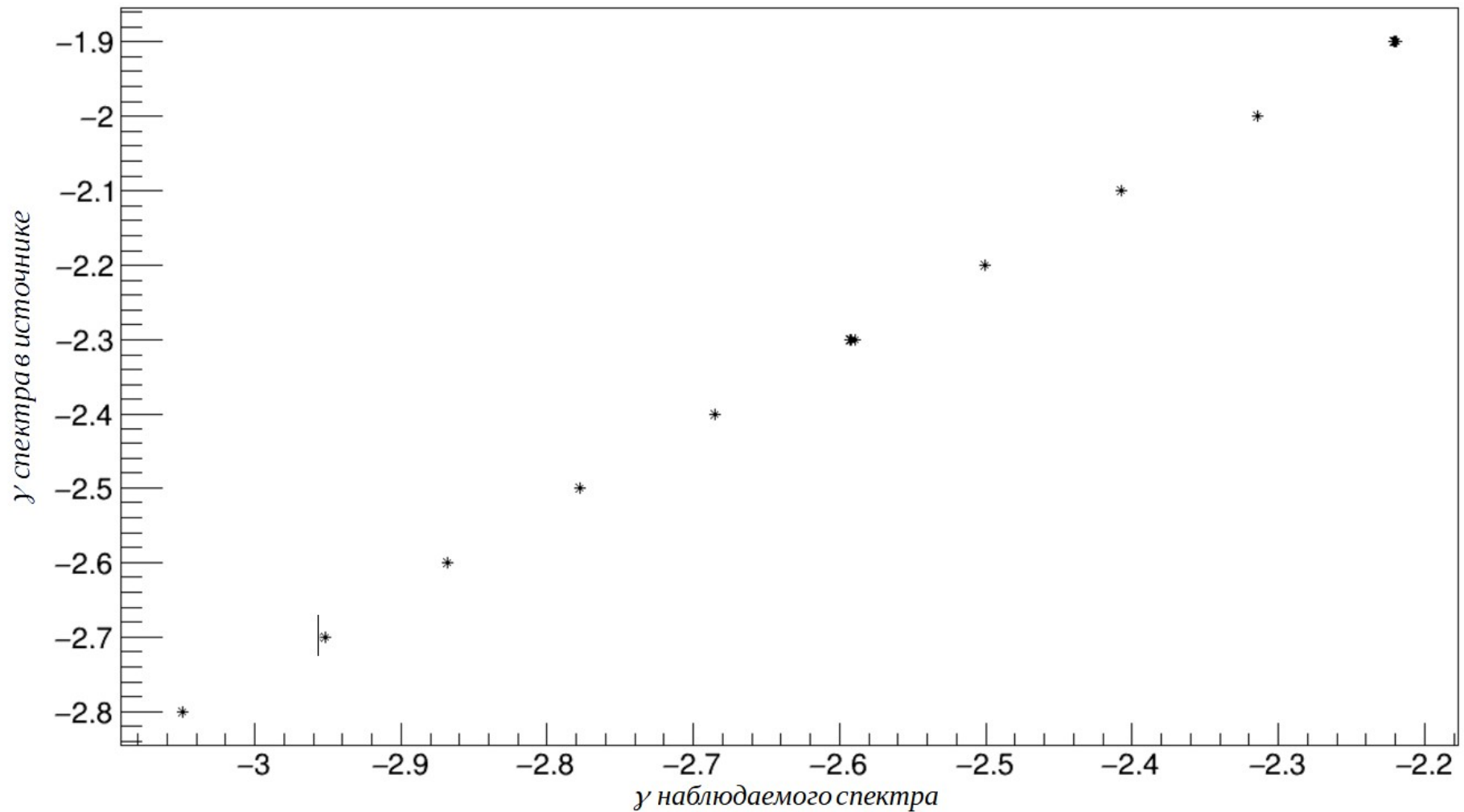
Зависимость показателя жесткостного спектра от заряда для обильных ядер



С помощью пакета GALPROP решена обратная задача распространения КЛ от источника (близкой сверхновой) до наблюдателя, построен покомпонентный спектр в источнике, показано, что в источнике наблюдается систематическое изменение степенного индекса (наклона спектра), что может быть интерпретировано как неполная ионизация космических лучей в момент ускорения на фронте ударной волны сверхновой.

И. А. Кудряшов, А. Н. Турундаевский, Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, А. А. Курганов, А. Д. Панов, Д. М. Подорожный. Потoki и спектральные индексы редких и обильных ядер космических лучей по данным спутникового эксперимента НУКЛОН. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, 87(7):927–930, 2023

Связь показателей спектра в Солнечной системе и в источнике



Близкий источник или особенности распространения космических лучей?

Примеры различных работ по астрофизике

- Li Aifeng et al – Geminga (учет анизотропии)

[Aifeng Li, Wei Liu, Yiqing Guo. Cosmic Ray Anisotropy and Spectra as Probes for Nearby Sources. *Symmetry* 2024, 16, 236]. Согласование данных по спектрам (включая данные НУКЛОИ) и по анизотропии.

- Moskalenko et al. – доускорение на ударной волне от Эпсилон Эридана

[M.A.Malkov and I.V.Moskalenko. On the Origin of Observed Cosmic-Ray Spectrum Below 100 TV. *The Astrophysical Journal*, 933:78 (10pp), 2022].

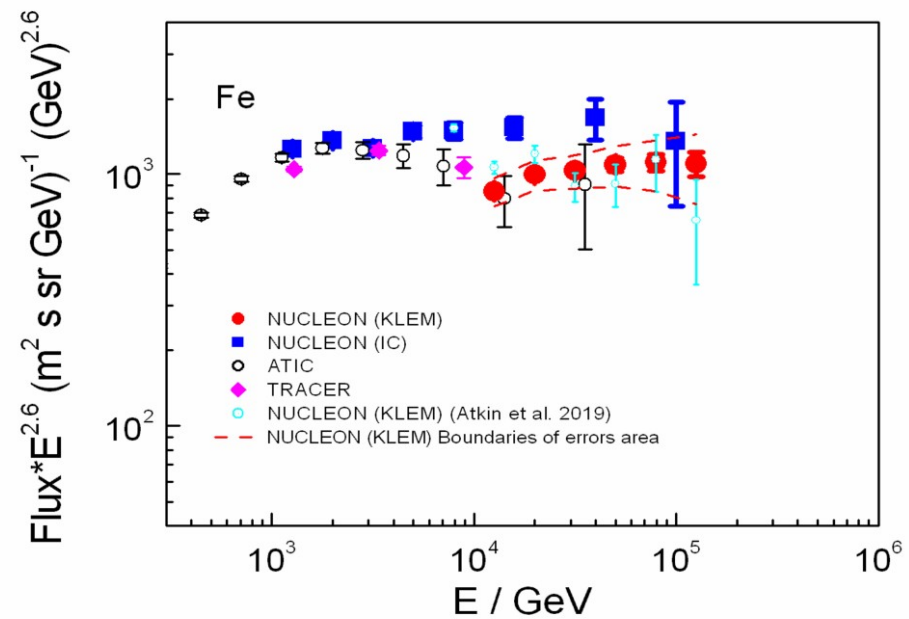
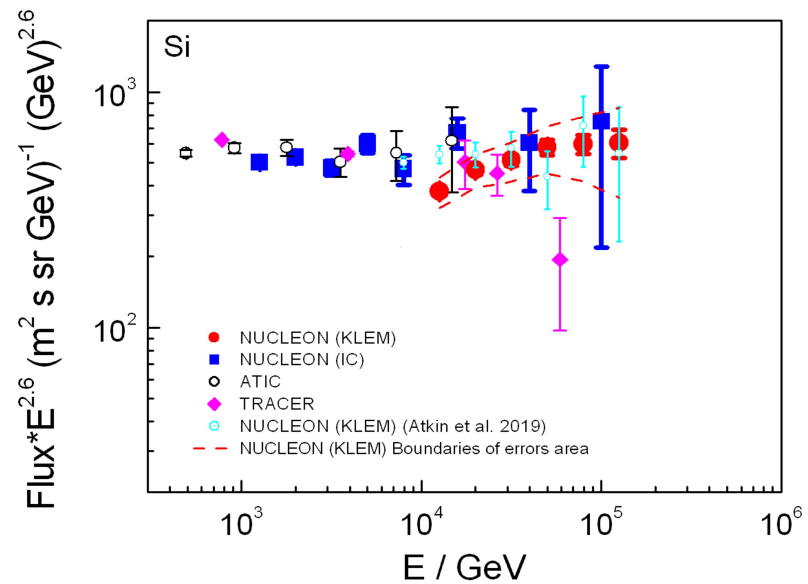
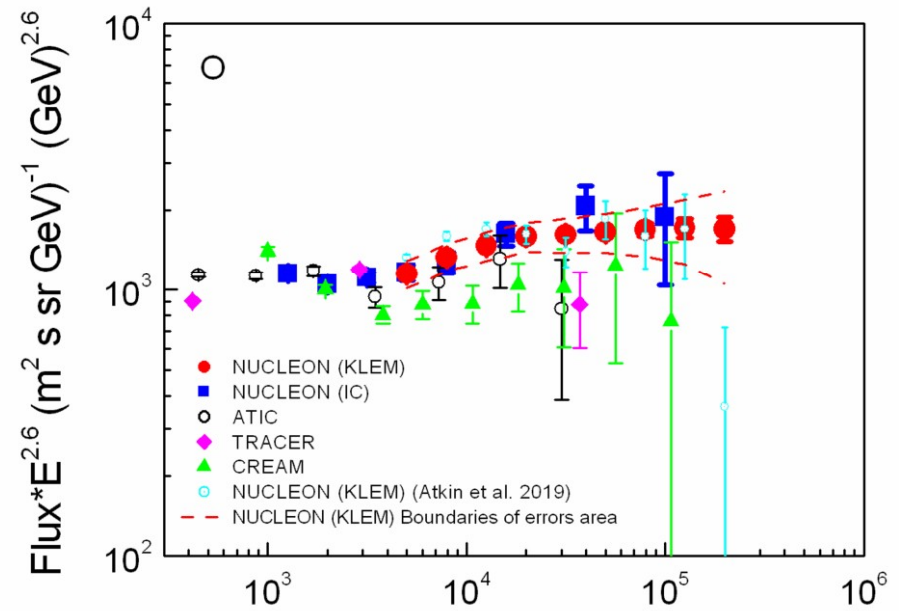
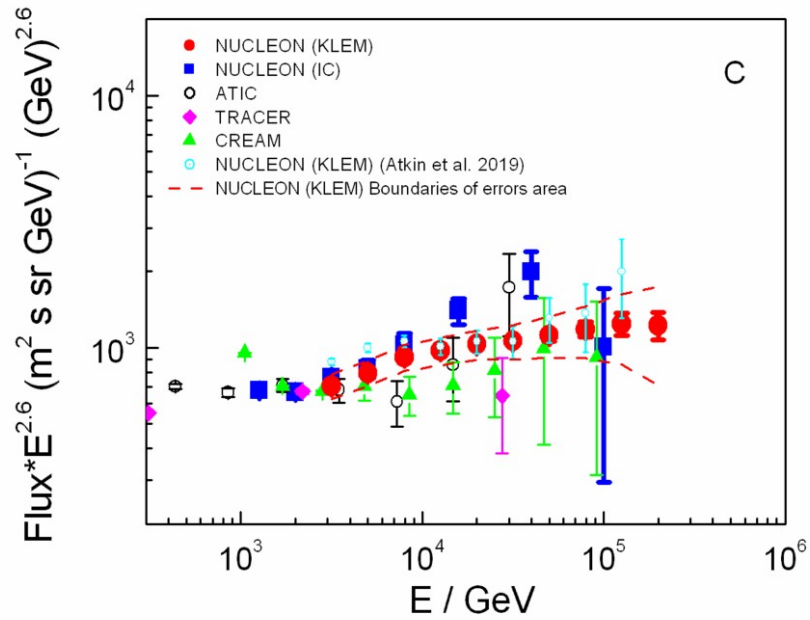
Доускорение на ударной волне от близкой звезды (3.2 пк) вдоль силовых линий магнитного поля.

Общий вывод

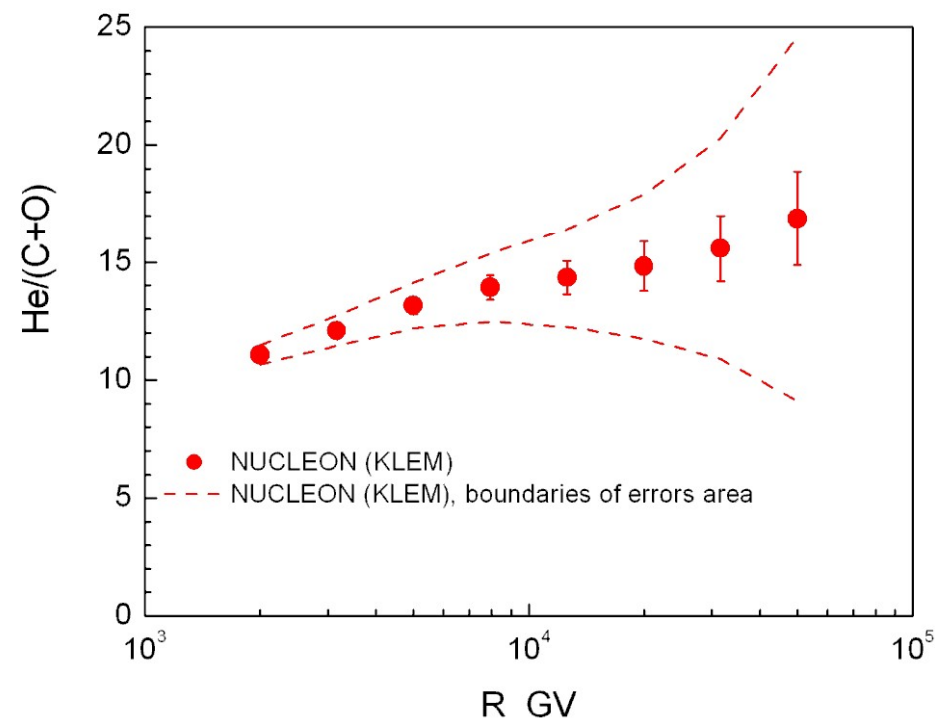
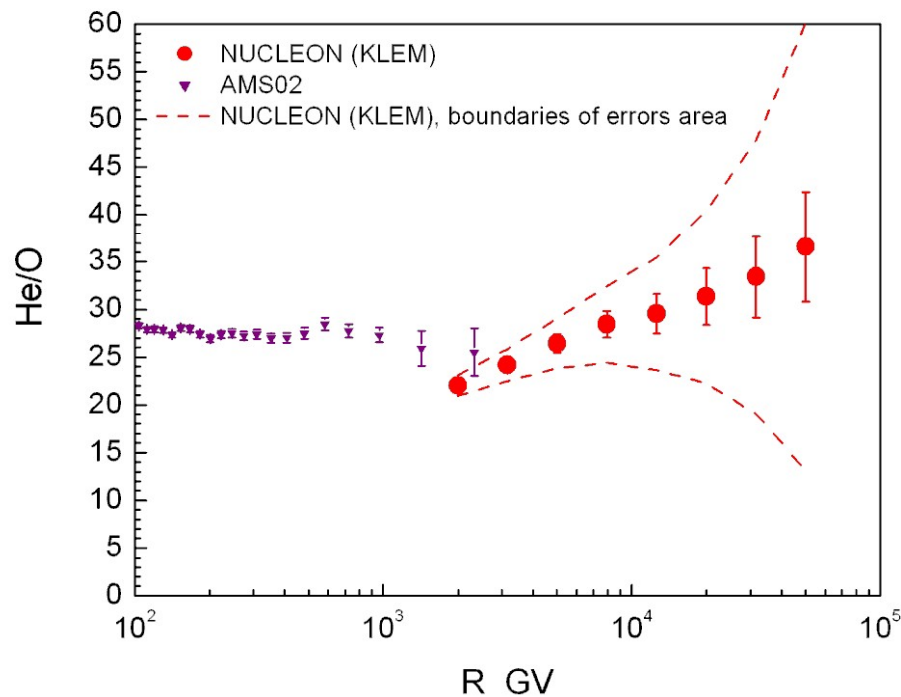
- Необходим дальнейший астрофизический анализ данных эксперимента НУКЛОН в сопоставлении с данными других экспериментов.
- Нужны новые исследования, как экспериментальные, так и теоретические!

Дополнительные материалы

Спектры некоторых обильных ядер

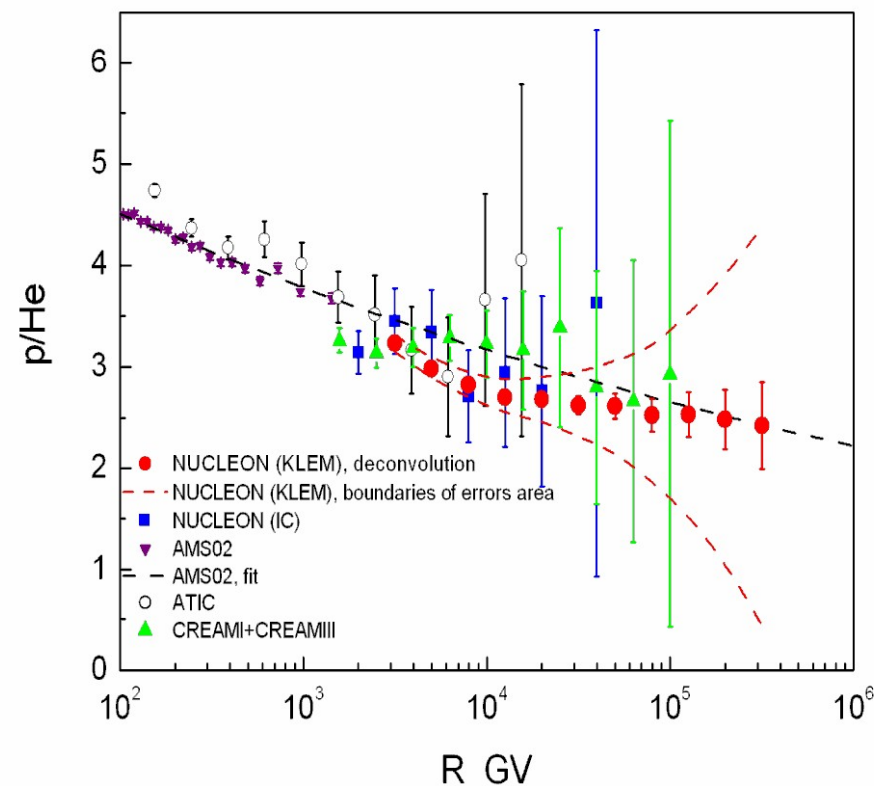
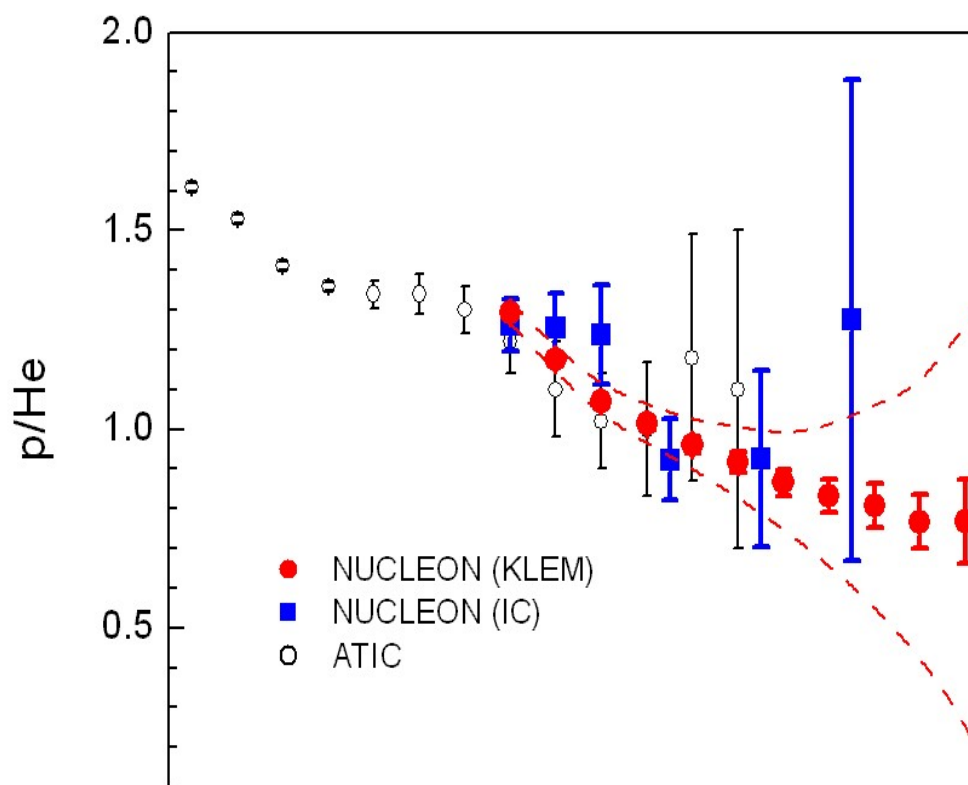


Спектр ядер углерода и кислорода по магнитной жесткости заметно более мягкий, чем спектр ядер гелия. Показатель наклона для отношения He/(C+O) равен 0.142 ± 0.40



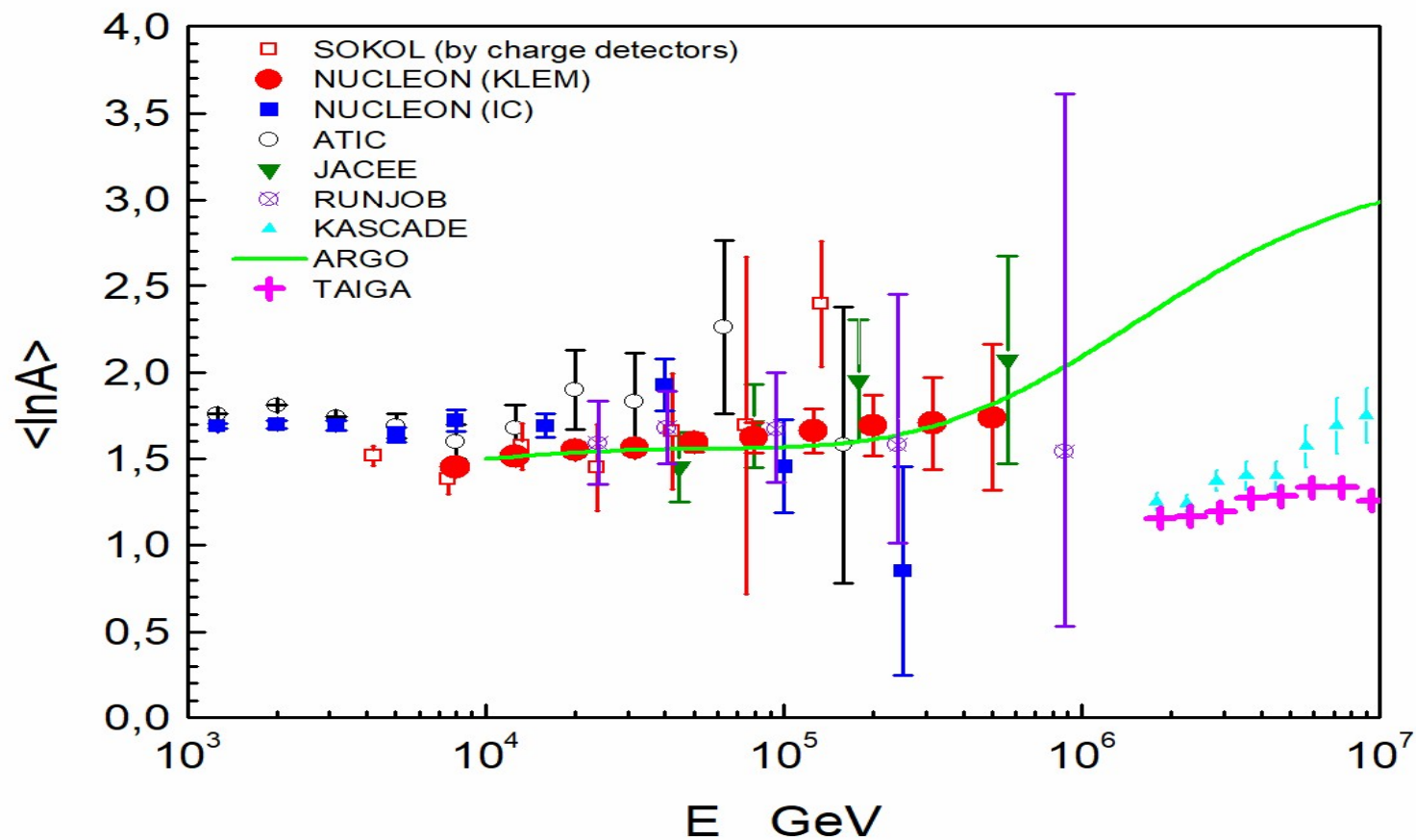
D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, A. Panov, D. Podorozhny, A. Turundaevskiy, and O. Vasiliev. Spectra of cosmic ray carbon and oxygen nuclei according to the NUCLEON experiment. *Physics Letters B*, 811:135851, 2020

По результатам измерений построены отношения спектров протонов и ядер гелия как в шкале энергий на частицу, так и в шкале магнитной жесткости. Отношение потоков протонов и ядер гелия в шкале магнитной жесткости близко к постоянному начиная с области нового излома, наблюдаемого при жесткости ~ 10 ТВ



Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, И. А. Кудряшов, А. А. Курганов, А. Д. Панов, Д. М. Подорожный, А. Н. Турундаевский, 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.

Построена энергетическая зависимость среднего логарифма массового числа в области 5-500 ТэВ



A. Turundaevskiy, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, A. Panov, and D. Podorozhny. The cosmic ray all-particles spectrum from the NUCLEON experiment in comparison with ground-based experiments data. *Advances in Space Research*, 70(9):2696–2702, 2022

На основе полученных данных о новом «колене» в спектре по магнитным жесткостям построена простая феноменологическая модель, описывающая энергетический спектр всех частиц и энергетическую зависимость среднего логарифма массового числа. Данная модель экстраполируется за пределы рабочего диапазона эксперимента НУКЛОН вплоть до «колена» при 3 ПэВ и стыкуется с данными наземных экспериментов

- 1) Рассматриваются три компонента космических лучей – протоны, ядра гелия и суммарный поток ядер от углерода до кобальта ($Z=6-27$).
- 2) Форма спектров по магнитной жесткости для ядер с $Z=6-27$ предполагается одинаковой. Вклады отдельных элементов считаются пропорциональными их суммарным потокам при магнитной жесткости $R>500$ ГВ.
- 3) В спектрах по магнитным жесткостям присутствует «колено» в области 10-20 ТВ.
- 4) Спектр по магнитным жесткостям до «колена» и в области «колена» фитируется сплайнами по экспериментальным данным.
- 5) Спектр по магнитным жесткостям после «колена» фитируется степенной функцией. С помощью такого фита спектр можно экстраполировать в область высоких жесткостей

Впервые эффект был обнаружен в эксперименте ATIC. Возможное объяснение – ускорение в «локальном пузыре»



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 256–257 (2014) 233–240

**NUCLEAR PHYSICS B
PROCEEDINGS
SUPPLEMENTS**

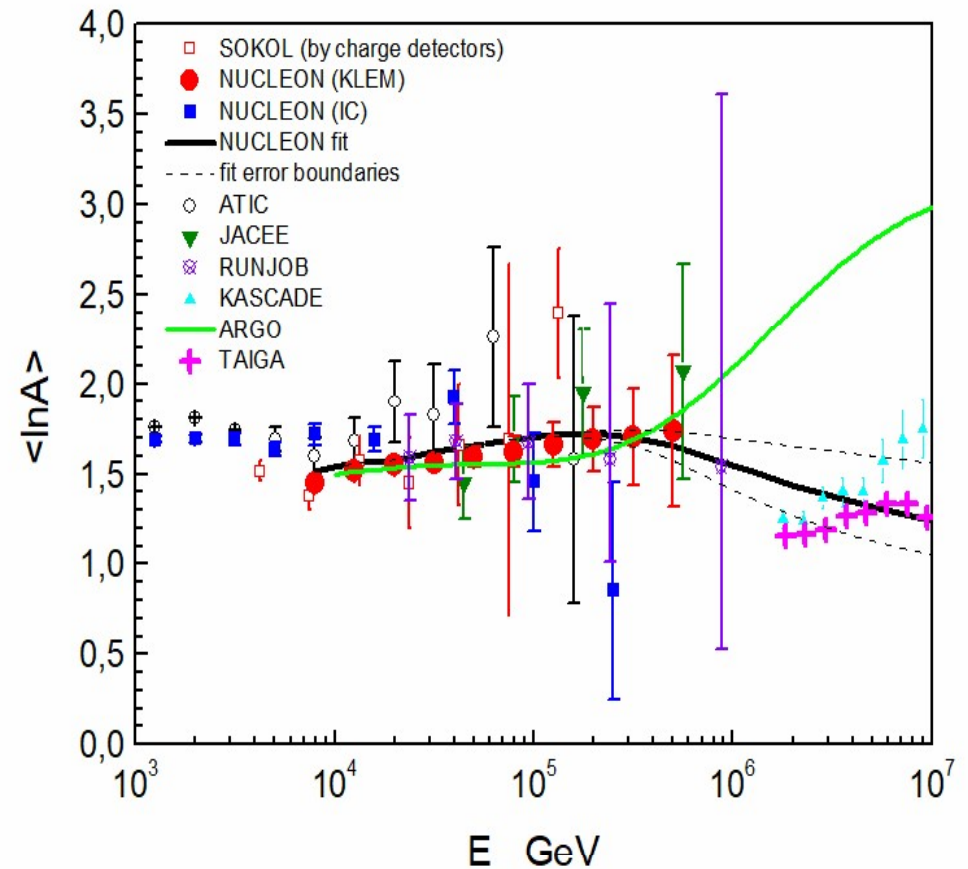
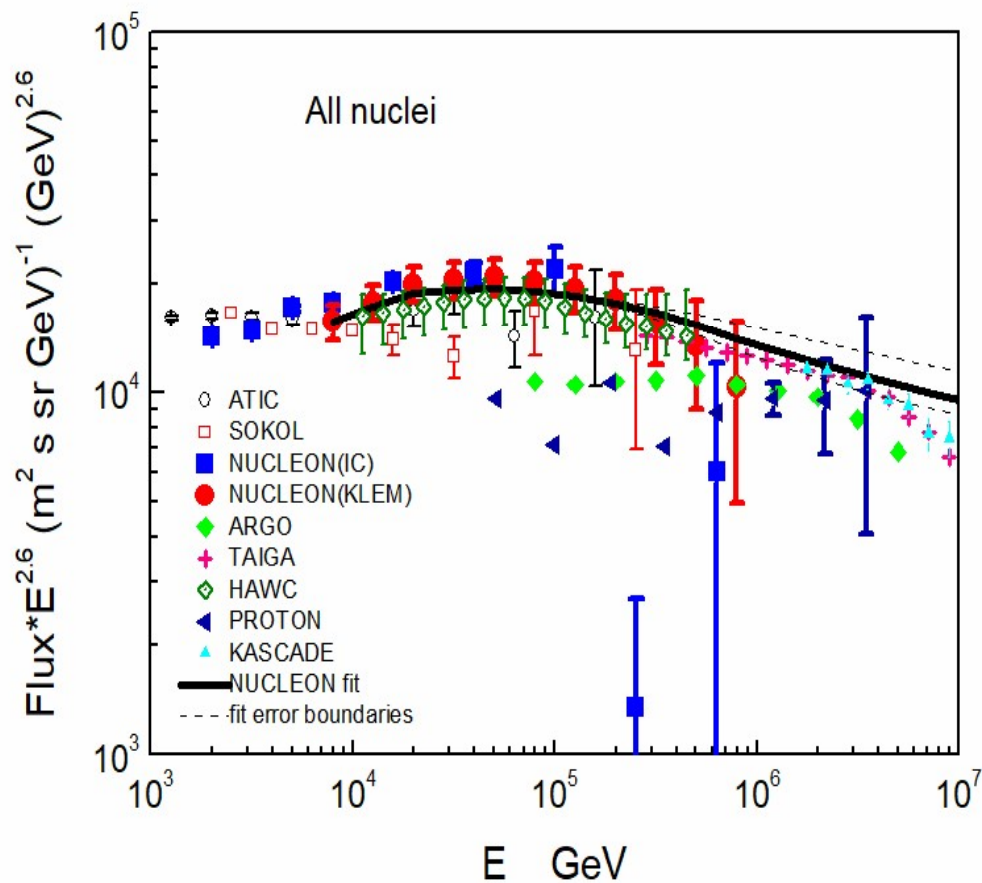
www.elsevier.com/locate/npbps

Upturn in the ratio of nuclei of $Z=16-24$ to iron observed in the ATIC experiment
and the Local Bubble

A.D. Panov, N.V. Sokolskaya, V.I. Zatsepin

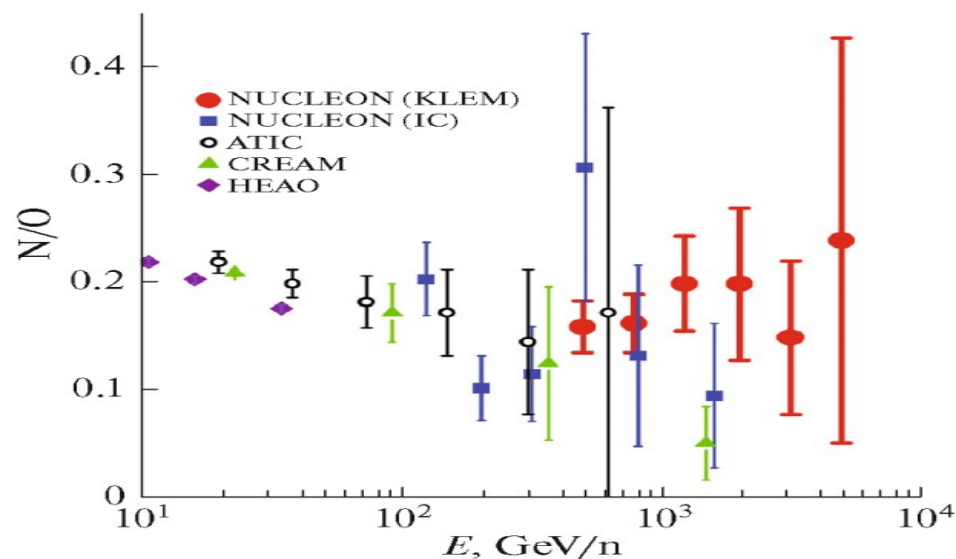
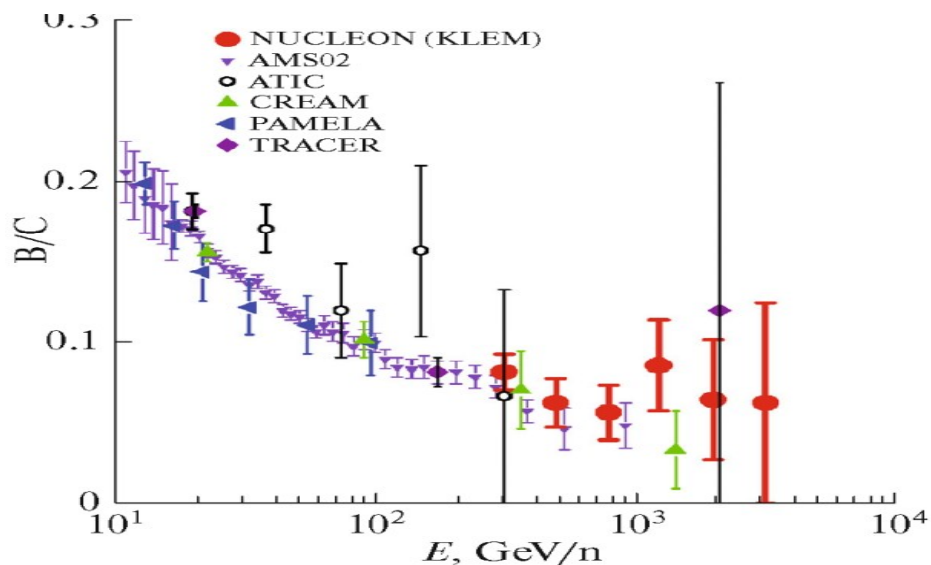
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Russia

Применение феноменологической модели



A. Turundaevskiy, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, A. Panov, and D. Podorozhny. The cosmic ray all-particles spectrum from the NUCLEON experiment in comparison with ground-based experiments data. *Advances in Space Research*, 70(9):2696–2702, 2022

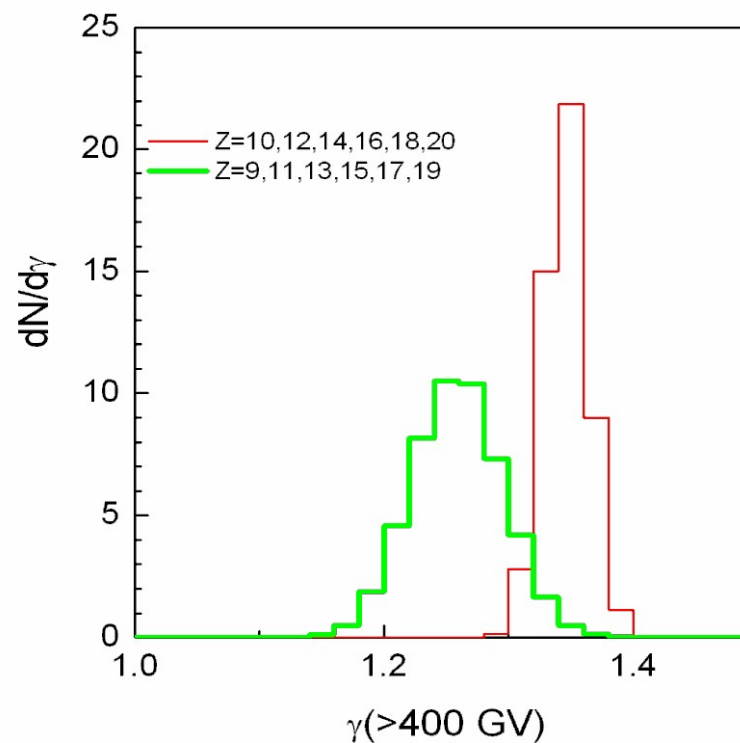
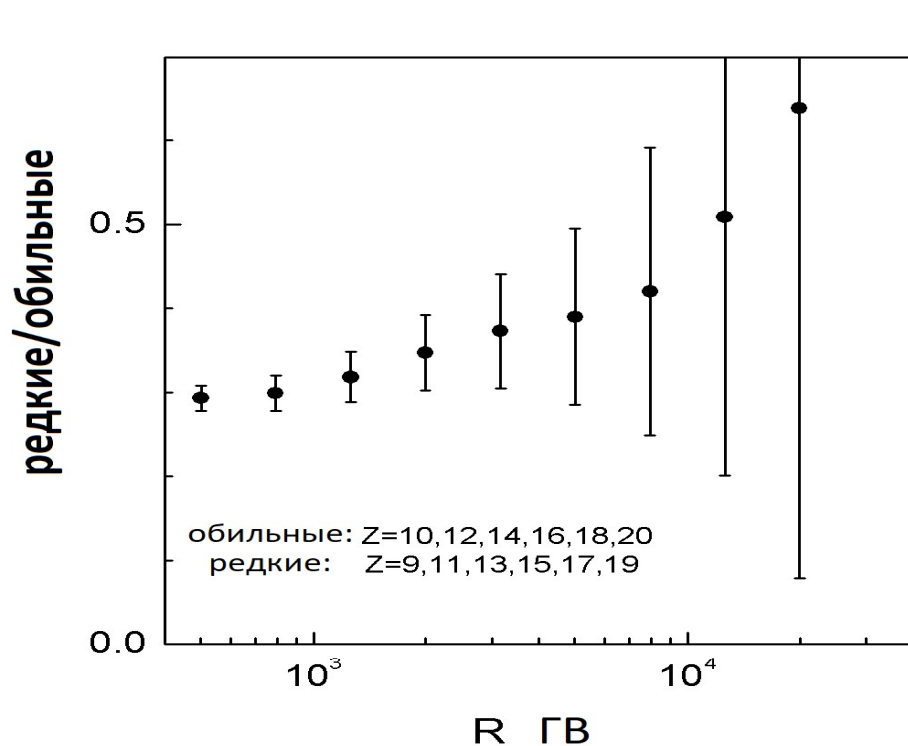
Получены спектры вторичных ядер (по современным представлениям, рожденных при фрагментации обильных ядер с галактической средой) и построены энергетические зависимости их отношений к первичным



В данных эксперимента «Нуклон» впервые обнаружено статистически обеспеченное отсутствие падения интенсивности вторичных ядер, начиная с энергетической области 1 ТэВ/нуклон. Данный факт дает подтверждение модели фрагментации обильных ядер в источниках и последующим ускорением фрагментов

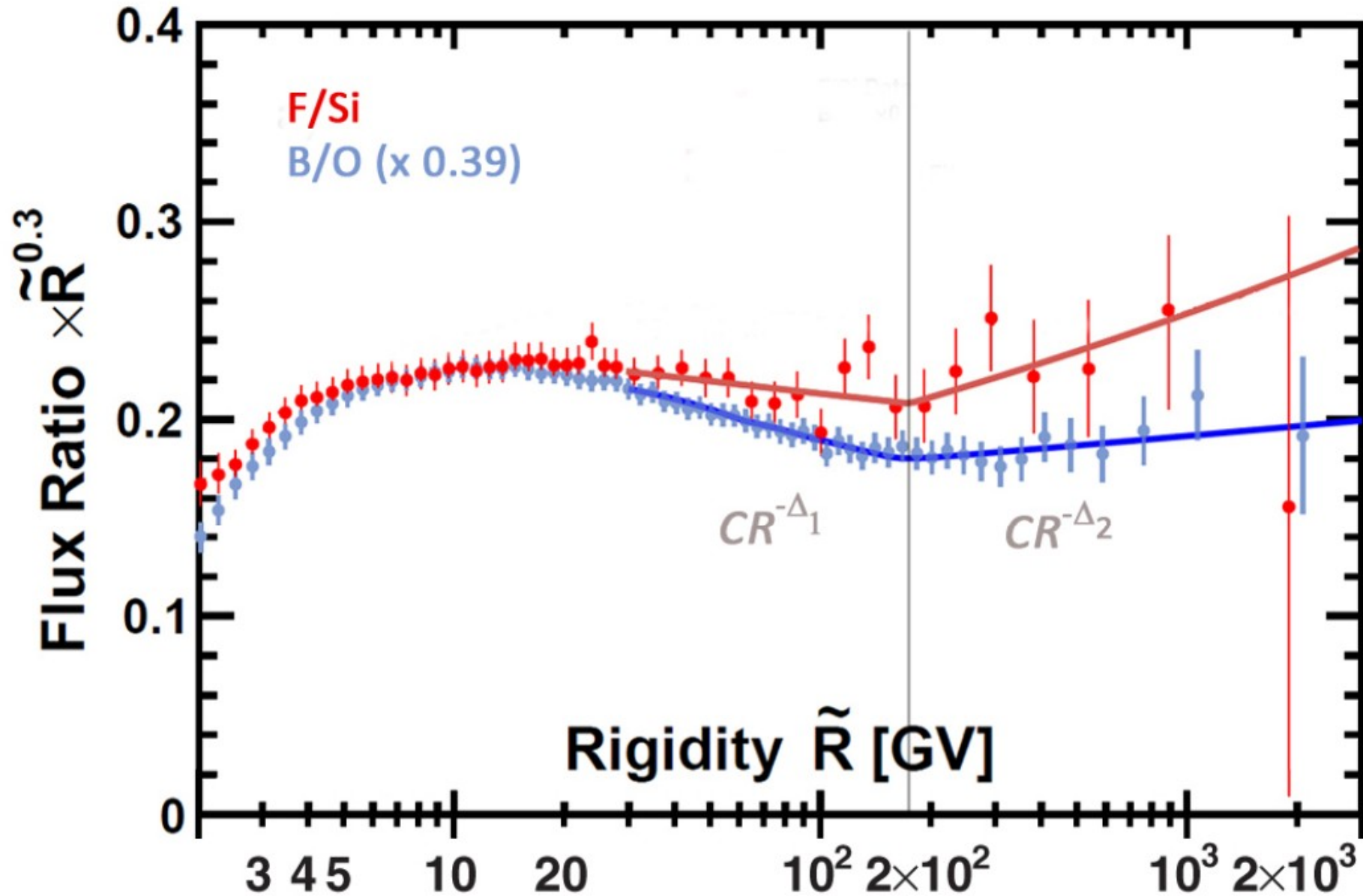
V. M. Grebenyuk, D. E. Karmanov, I. M. Kovalev, I. A. Kudryashov, A. A. Kurganov, A. D. Panov, D. M. Podorozhny, A. V. Tkachenko, A. N. Turundaevskiy, L. G. Tkachev, O. A. Vasiliev, and A. G. Voronin. Secondary cosmic rays in the NUCLEON space experiment. *Advances in Space Research*, 64(12):2559–2563, 2019.

При анализе спектров по магнитной жесткости изучался суммарный спектр редких ядер с нечетными зарядами от 9 до 19 (F, Na, Al, P, Cl, K). Построены отношения потоков нечетных и четных ядер. Спектр нечетных ядер более жесткий, чем спектр четных ($Z=10-20$) в области магнитных жесткостей 300-10000 ГВ. Показатели спектра обильных и редких ядер при пороге по магнитной жесткости 400 ГВ равны 2.34 ± 0.015 и 2.24 ± 0.025 соответственно. Таким образом, разница показателей на уровне 3.4σ



И. А. Кудряшов, А. Н. Турундаевский, Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, А. А. Курганов, А. Д. Панов, Д. М. Подорожный. Потoki и спектральные индексы редких и обильных ядер космических лучей по данным спутникового эксперимента НУКЛОН. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, 87(7):927–930, 2023

Рисунок из данных AMS02. PoS(ICRC2021)016.
AMS Highlights. J. Bedugo, *on behalf of the AMS
Collaboration*



Основные астрофизические результаты эксперимента НУКЛОН

- С хорошей статистической обеспеченностью были проведены измерения энергетических спектров протонов и обильных ядер в области 2-500 ТэВ, построены отношения ряда спектров по энергии и магнитной жесткости.
- Впервые обнаружено новое «колено» в области ~ 10 ТВ по магнитной жесткости, являющееся универсальным, т.е. наблюдаемым в спектрах протонов, гелия и более тяжелых обильных первичных ядер.
- Оказалось, что спектр ядер углерода и кислорода по магнитной жесткости заметно более мягкий, чем спектр ядер гелия.
- По результатам измерений построены отношения спектров протонов и ядер гелия как в шкале энергий на частицу, так и в шкале магнитной жесткости. Отношение спектров в энергетической шкале уменьшается с ростом энергии. Отношение потоков протонов и ядер гелия в шкале магнитной жесткости близко к постоянному начиная с области нового излома, наблюдаемого при жесткости ~ 10 ТВ.
- Построена энергетическая зависимость логарифма массового числа в области 5-500 ТэВ. На основе о новом «колене» в спектре по магнитным жесткостям построена простая феноменологическая модель, описывающая энергетический спектр всех частиц и энергетическую зависимость среднего логарифма массового числа. Данная модель экстраполируется за пределы рабочего диапазона эксперимента НУКЛОН вплоть до «колена» при 3 ПэВ и стыкуется с данными наземных экспериментов.
- При анализе спектров по магнитной жесткости изучался суммарный спектр редких ядер с нечетными зарядами от 9 до 19 (F, Na, Al, P, Cl, K). Построены отношения потоков нечетных и четных ядер. Впервые показано, что спектр нечетных ядер более жесткий, чем спектр четных ($Z=10-20$) в области магнитных жесткостей 300-10000 ГВ.
- В источнике наблюдается систематическое изменение степенного индекса (наклона спектра), что может быть интерпретировано как неполная ионизация космических лучей в момент ускорения на фронте ударной волны сверхновой.