

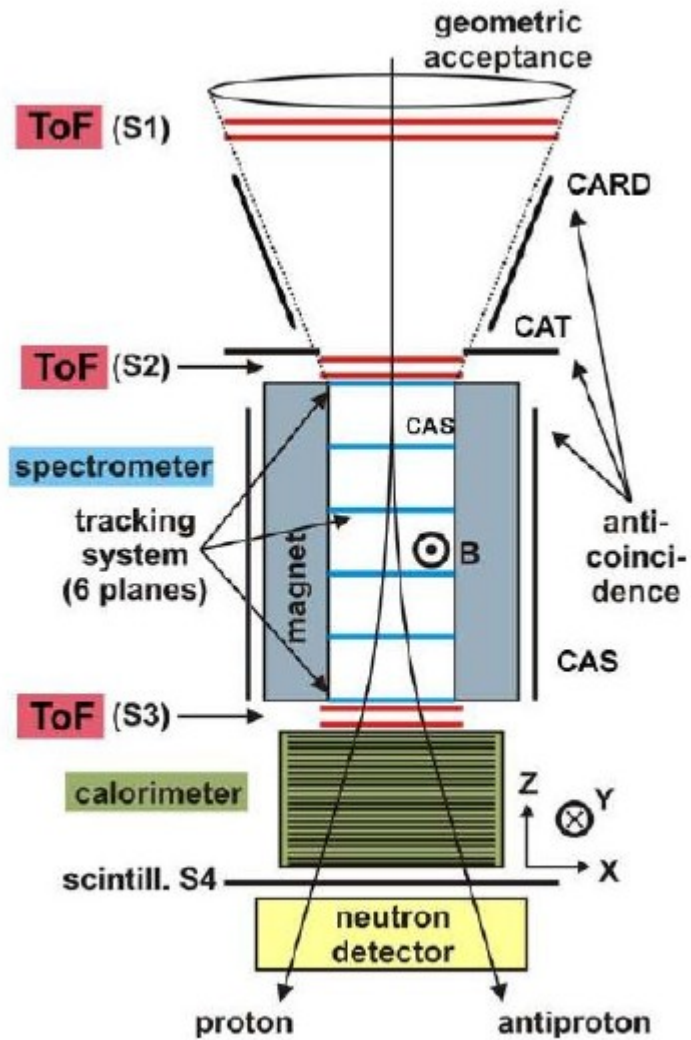
Прямые наблюдения космических лучей: современное состояние проблемы

А.Д. Панов

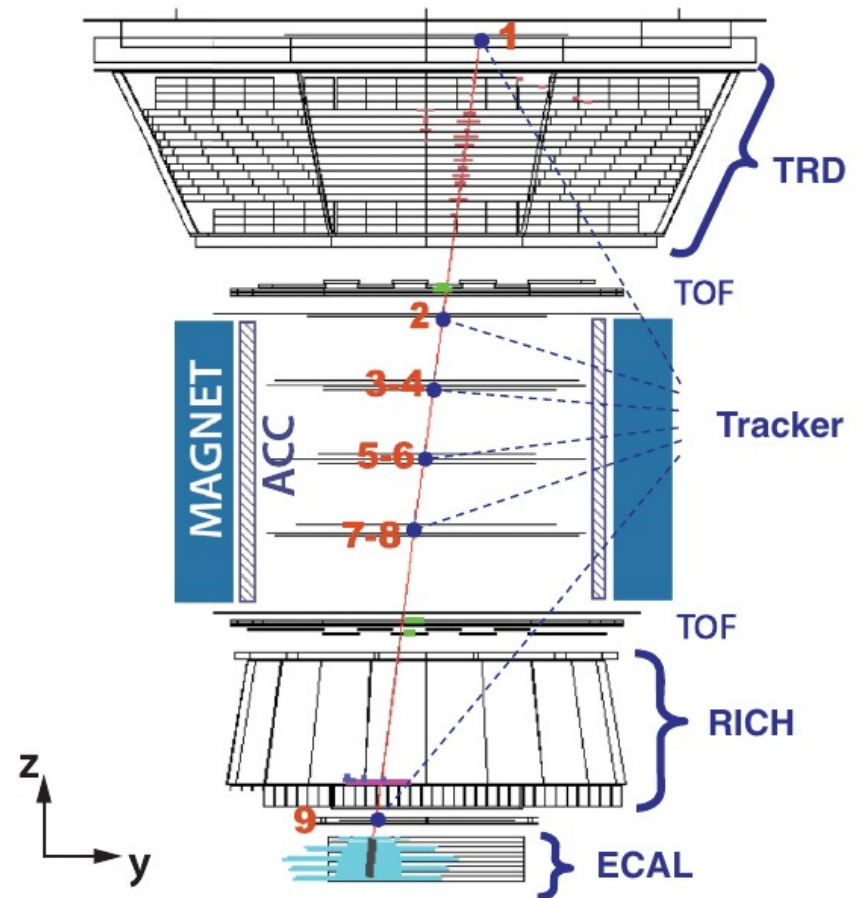
Космические лучи, прямые измерения

- 1. Адронная компонента (ядра), зарядовый состав, энергетический спектр**
- 2. Лептонная компонента (электроны, позитроны)**
- 3. Изотопный состав ядер**
- 4. Анизотропия (высокие энергии)**
- 5. Гамма кванты (гамма-спектроскопия)**

Магнитные спектрометры

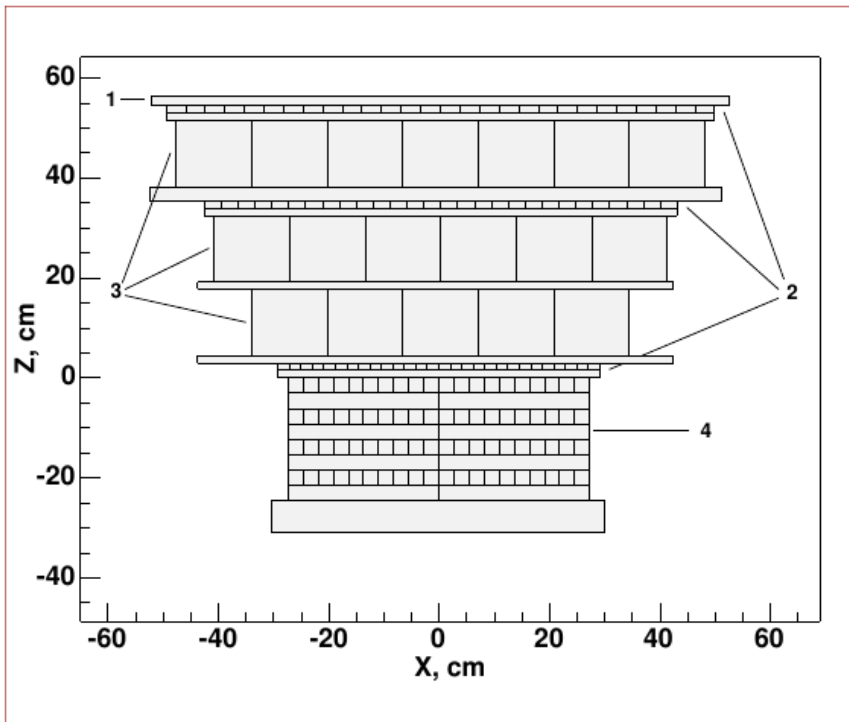


PAMELA

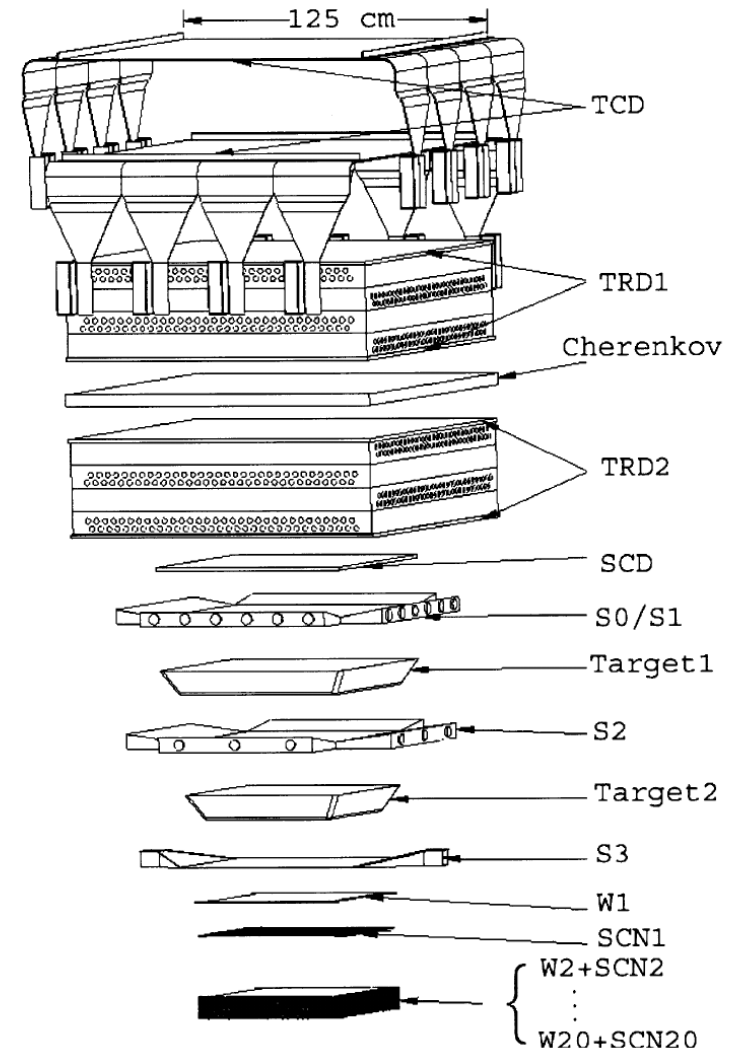


AMS-02

Калориметры (стратосферные)



ATIC



CREAM

Калориметры (космические)

The Fermi LAT

- The Large Area Telescope (LAT) is one of two instruments on the *Fermi* Gamma-ray Space Telescope
- The LAT is a pair conversion telescope

Anti-coincidence Detector (ACD)

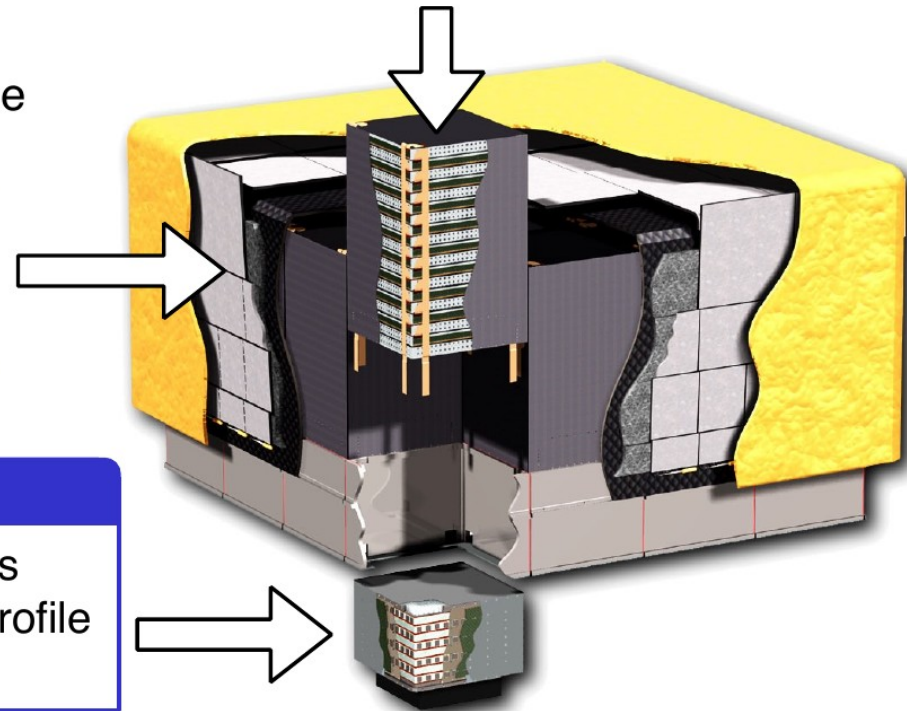
- 89 segmented plastic scintillating tiles
- Used for particle identification

Calorimeter (CAL)

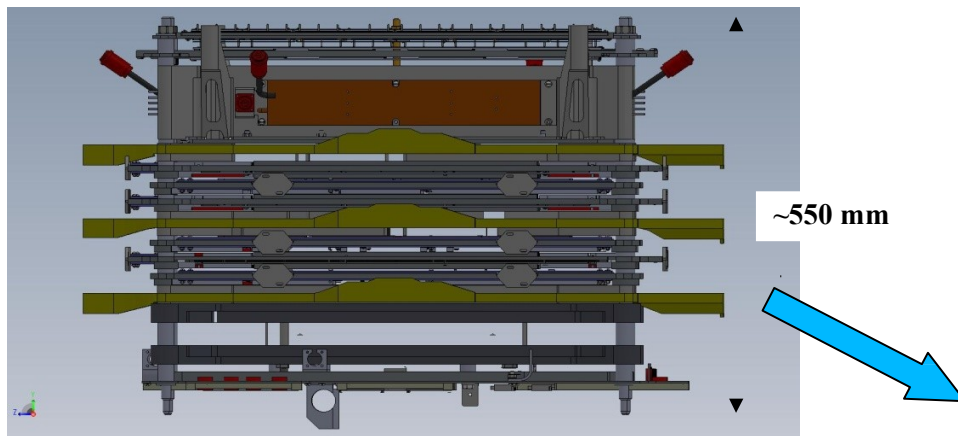
- 1536 CsI(Tl) crystals arranged in 8 layers
- Hodoscopic, image shower shape and profile
- Used for energy measurement

Tracker (TKR)

- 18 x-y layers of silicon strip detectors
- Used for direction reconstruction and particle identification

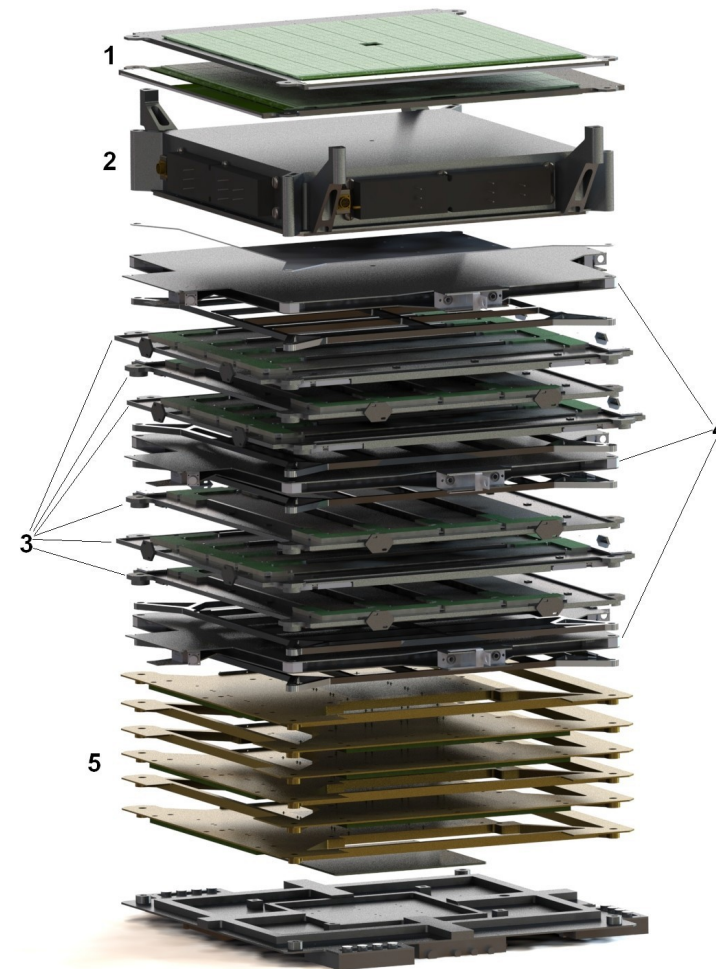


Калориметры (космические, продолжение)



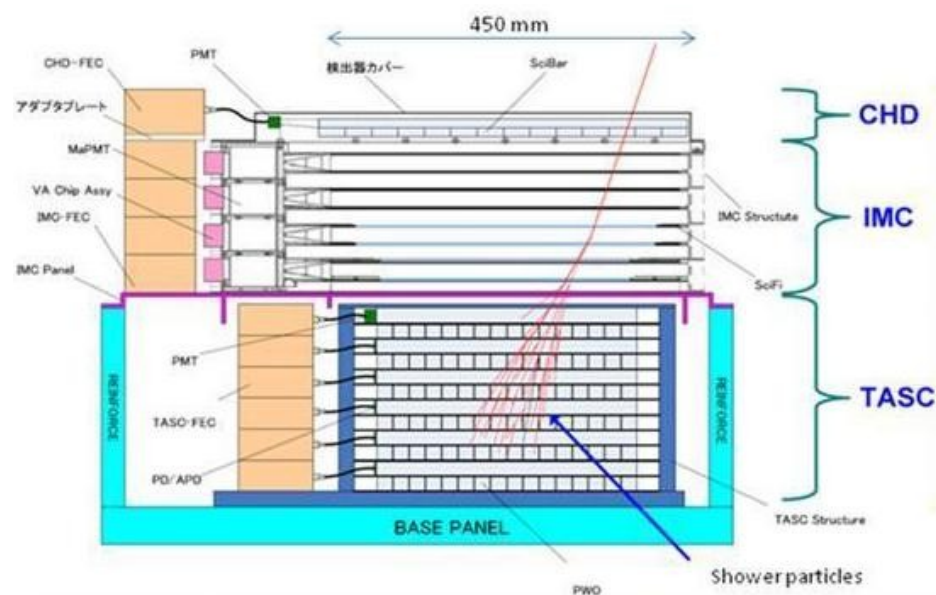
- ❖ **system of charge measurements** – four planes of pad silicon detectors ($1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$) (1);
- ❖ **tracker for KLEM energy measurement** – carbon target of 0.25 proton interaction lengths (2) and six planes of microstrip silicon detectors (0.4mm step) with tungsten between them (~2mm each, ~3 X-lengths summary) (3);
- ❖ **trigger system** – two double scintillator planes (4).

Active square 500*500
mm². Geometrical factor
0.24m²sr.

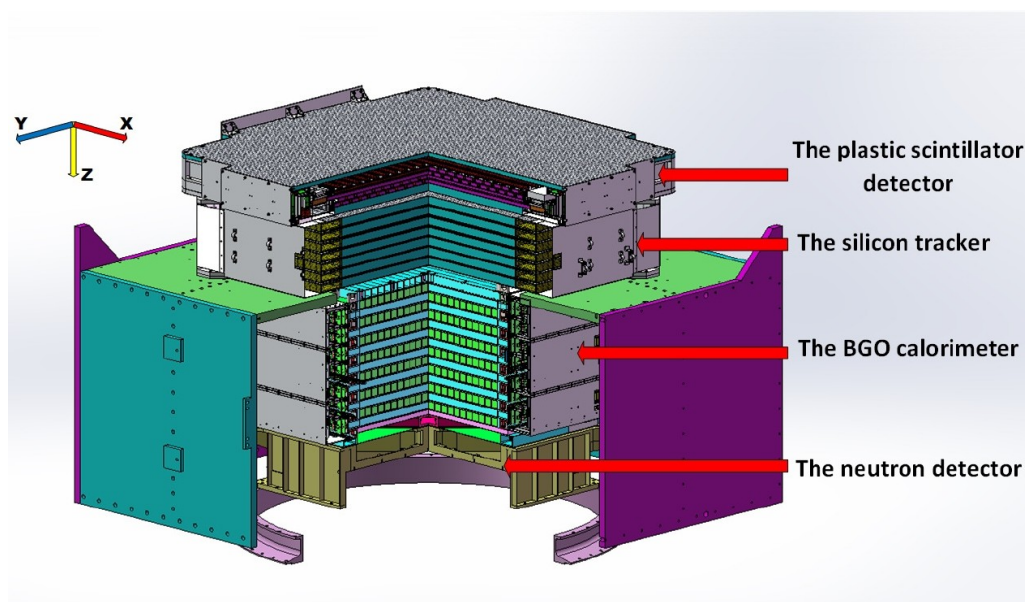


НУКЛОН

Калориметры (продолжение)

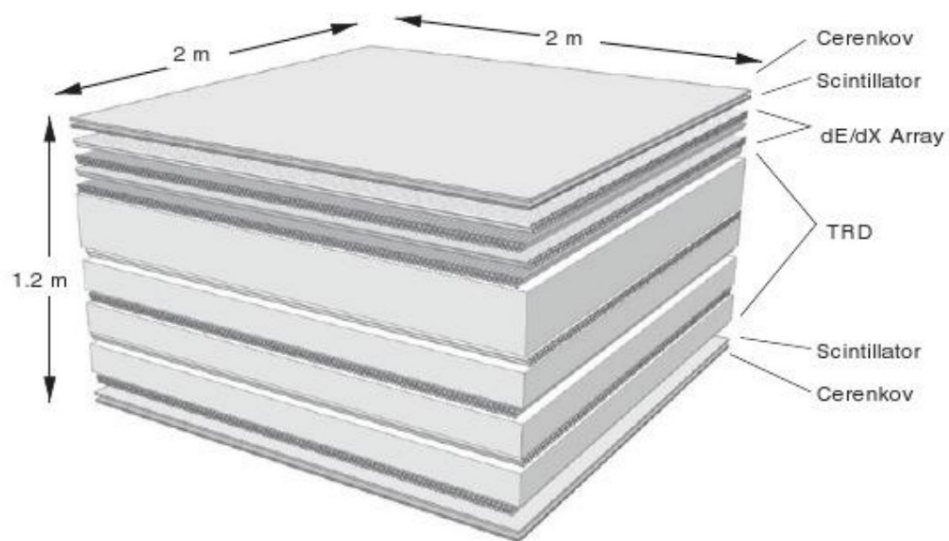


CALET

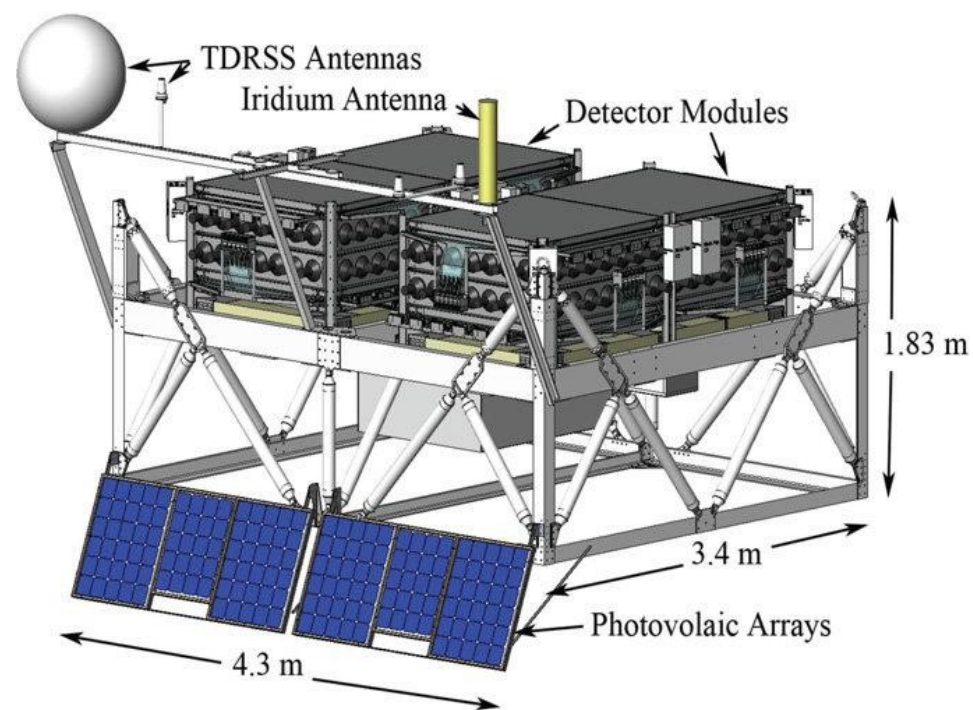


DAMPE

Черенковские/TRD спектрометры (стратосферные)



TRACER



SuperTIGER

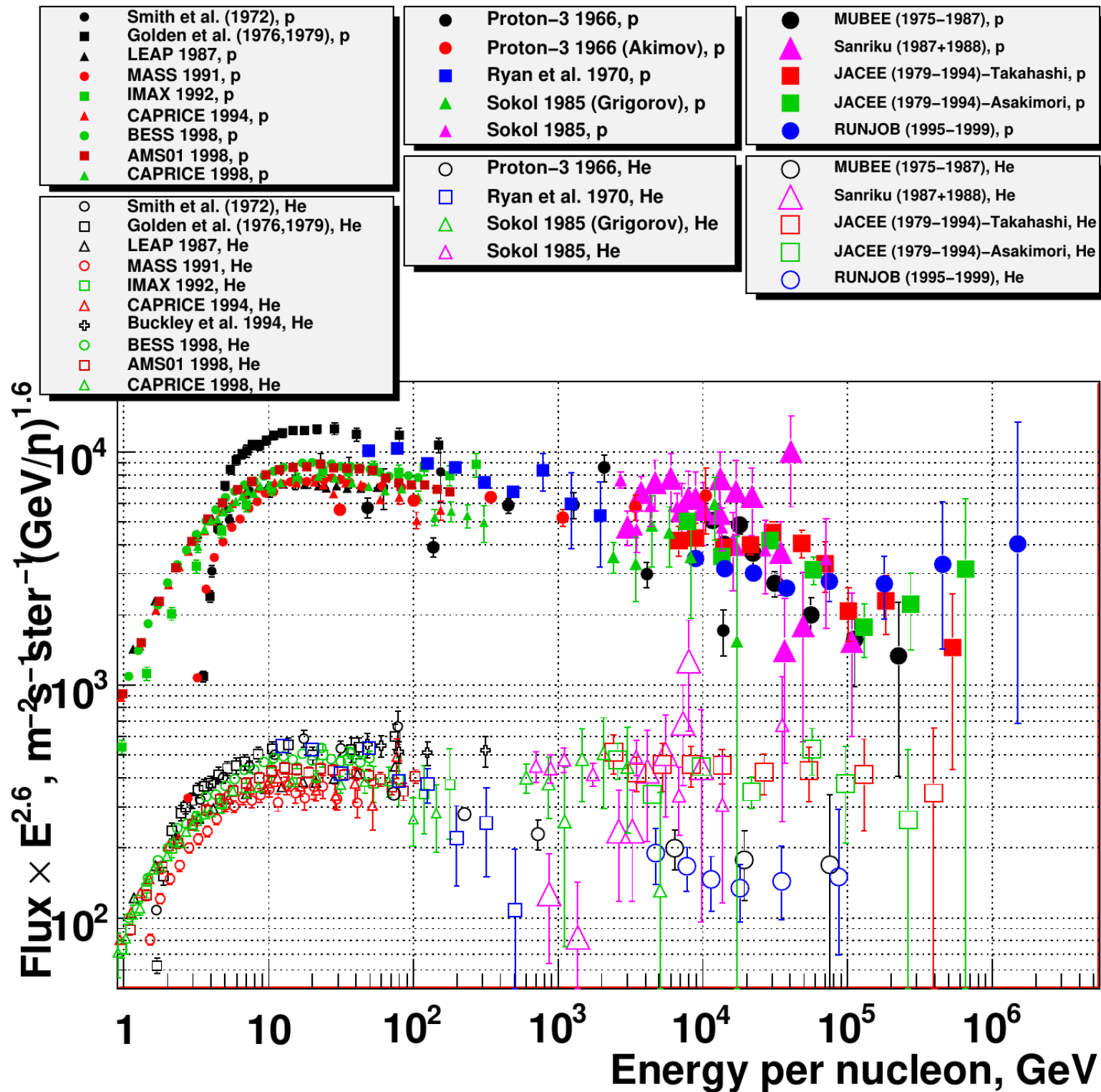
Ядра КЛ

Зарядовый состав и
спектры энергий

**Малое универсальное (?)
колесо космических лучей**

Протоны и гелий

Примерно
2000 г.



2006-2011 гг

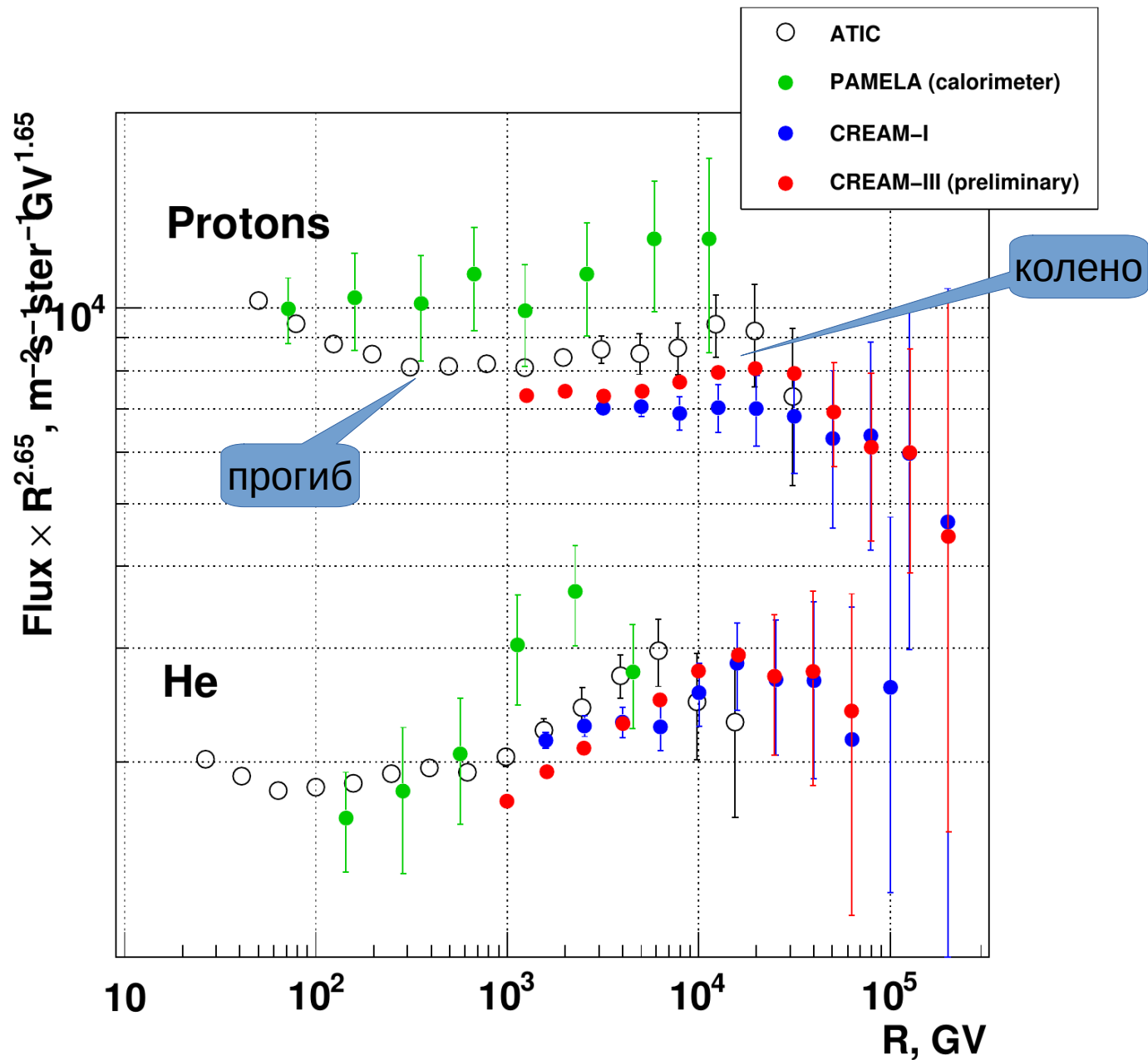
ATIC:
arXiv:astro-ph/0612377. 2006

PAMELA:
Astrophys. Space Sci. Trans.,
2011, V.7, P.235

CREAM-I:
ApJ, 2011, V. 728, id. 122

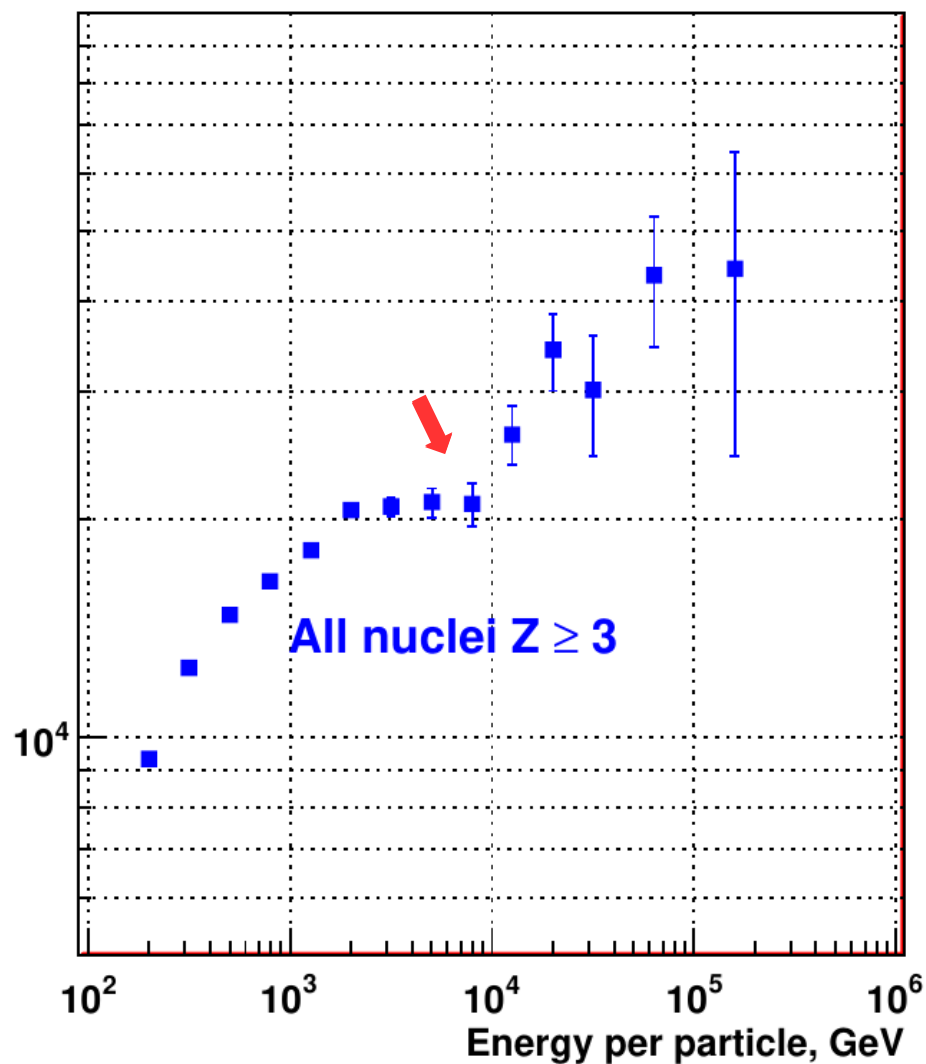
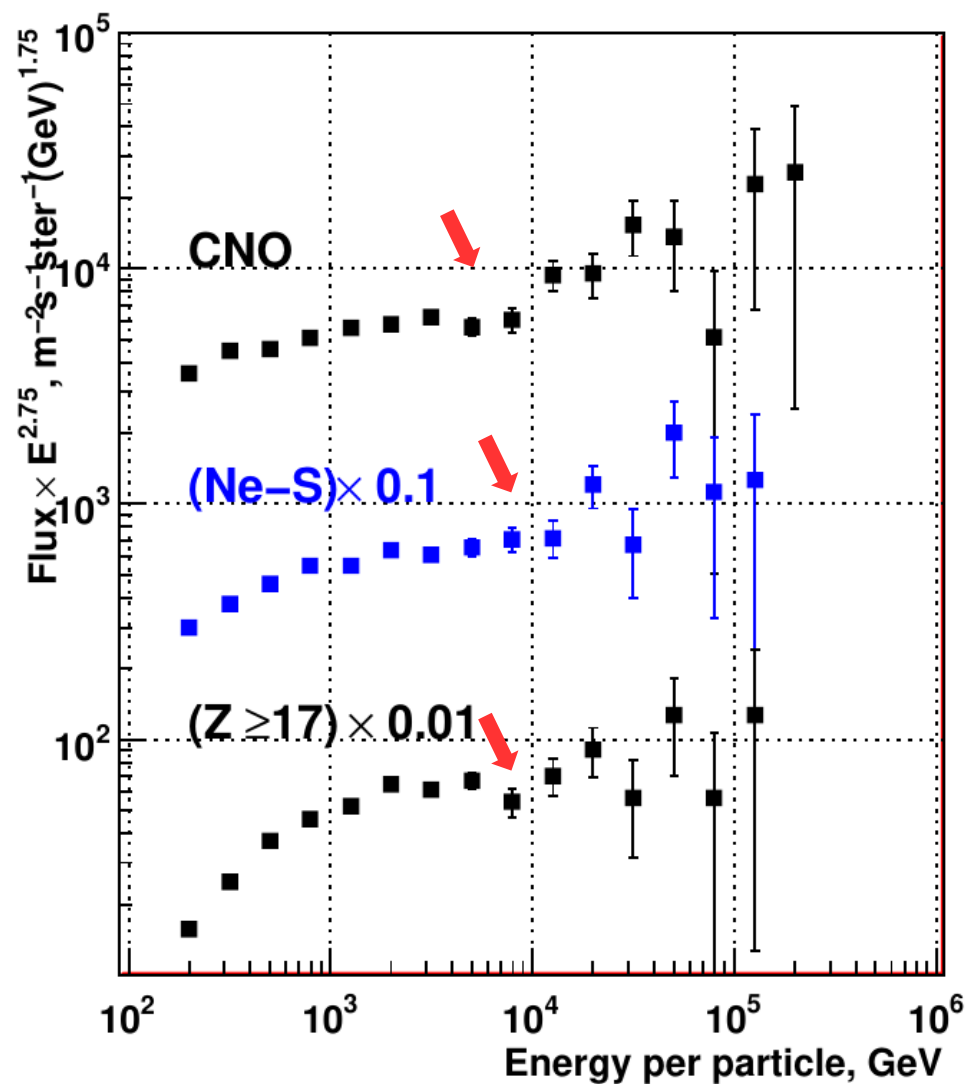
CREAM-III:
Proc. of 31st ICRC, 2009, ID0668.

Прогиб ~300 ГВ
Колено 10 ТВ?



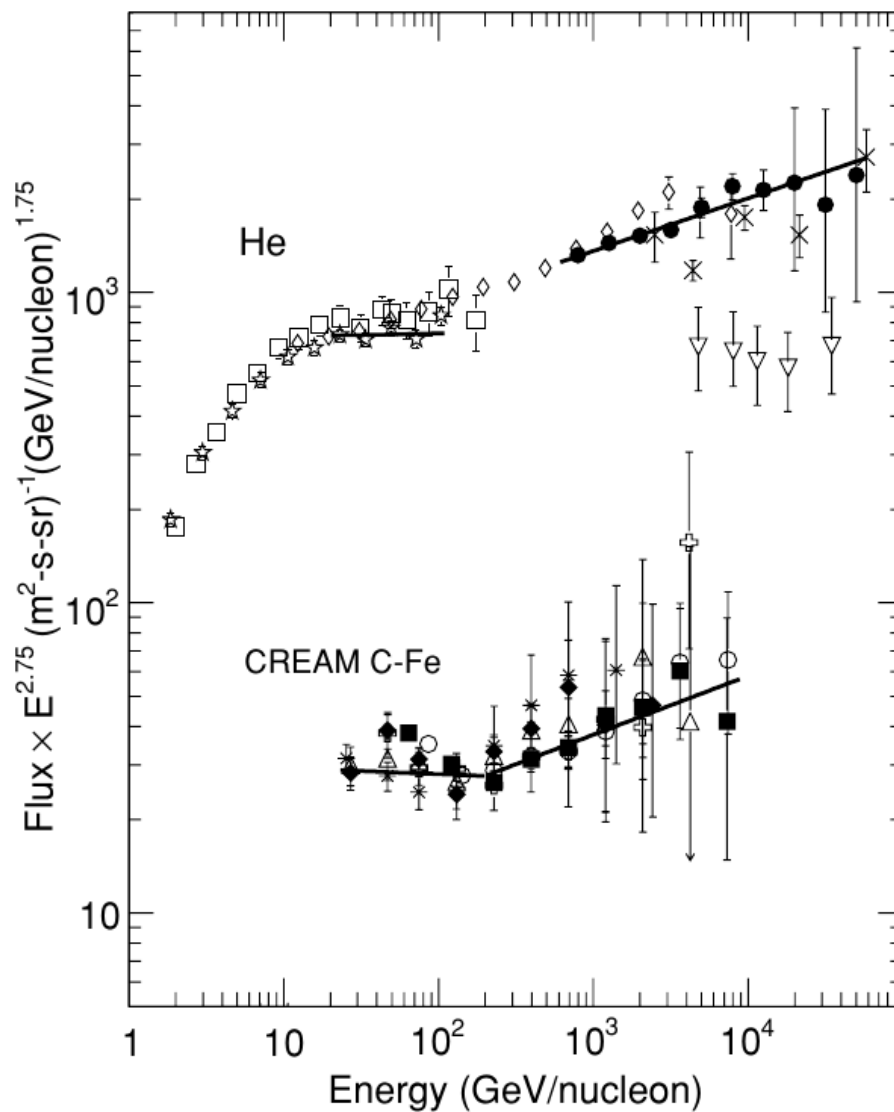
Прогиб в тяжелых ядрах при нескольких сотнях ГВ. АТЭС (2006)

arXiv:astro-ph/0612377. 2006; Изв. РАН. Сер. Физ., 71 (2007), No 4, С.512 - 515



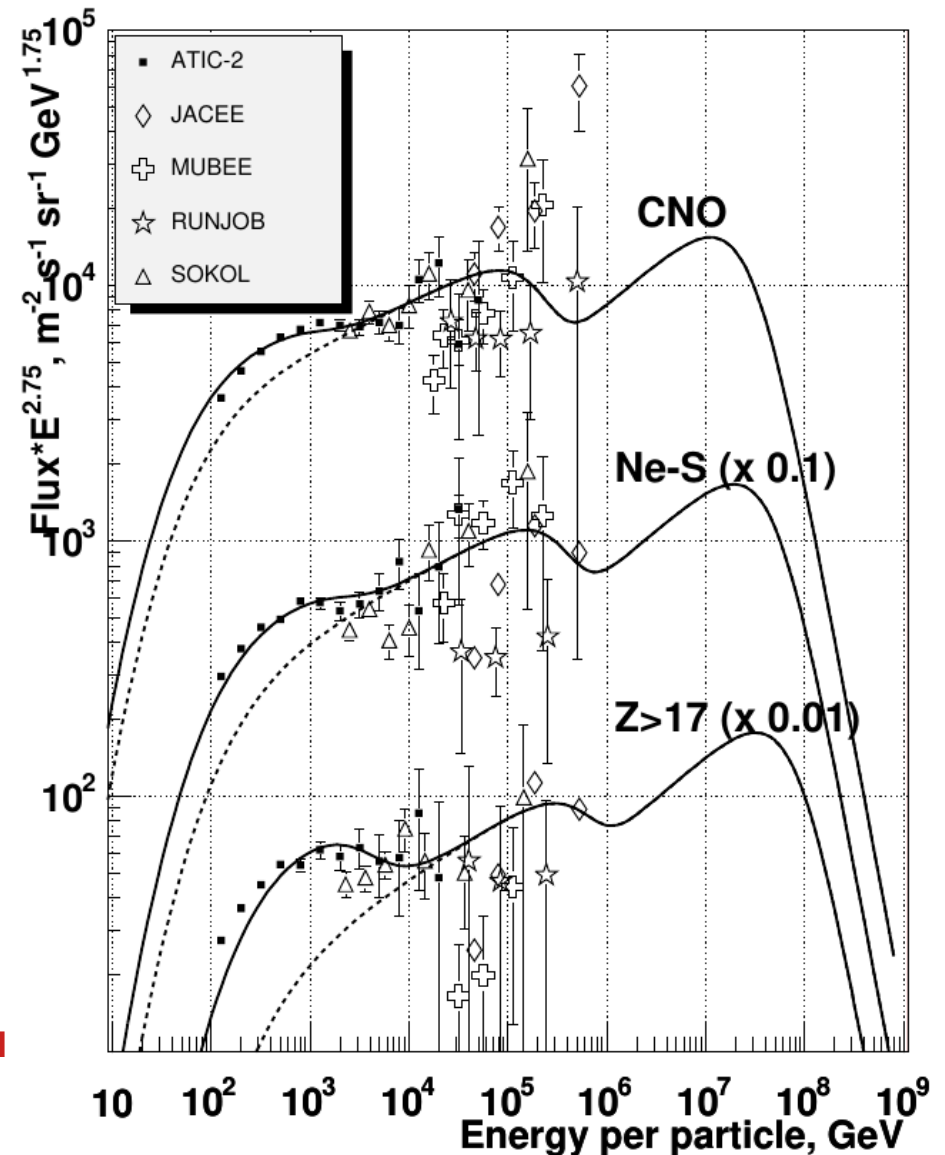
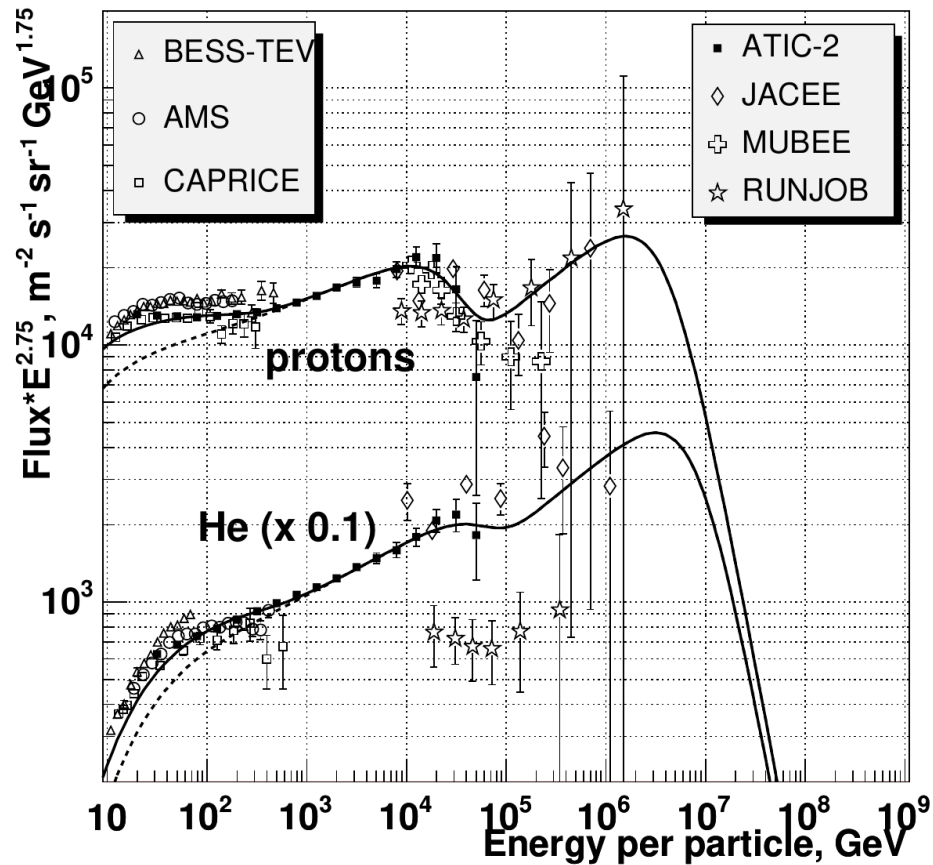
Прогиб в тяжелых ядрах при нескольких сотнях ГВ. CREAM (2010)

ApJ Lett 714 (2010) L89-L93, arXiv:1004.1123



Трехкомпонентная модель Зацепина-Сокольской (2006)

Astronomy and Astrophysics, 458(1), 2006, pp.1-5



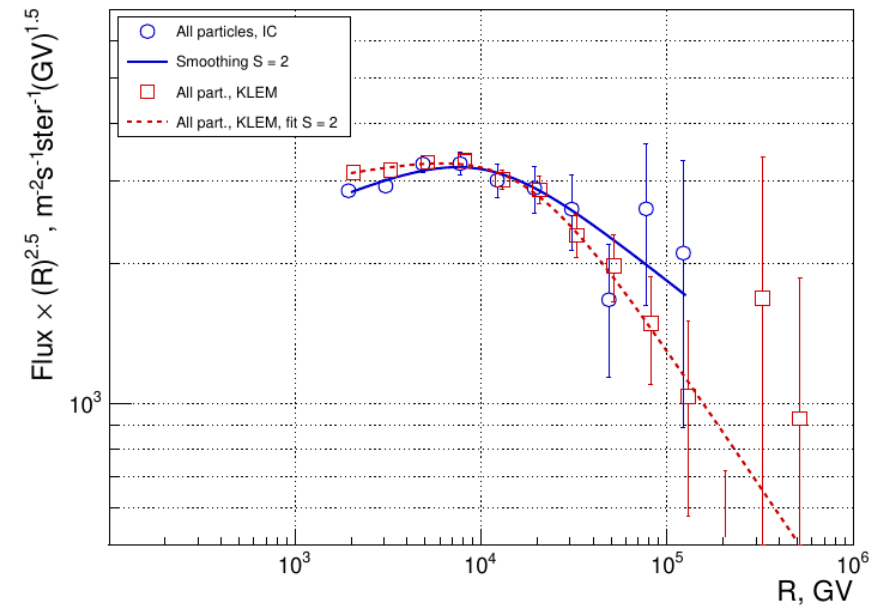
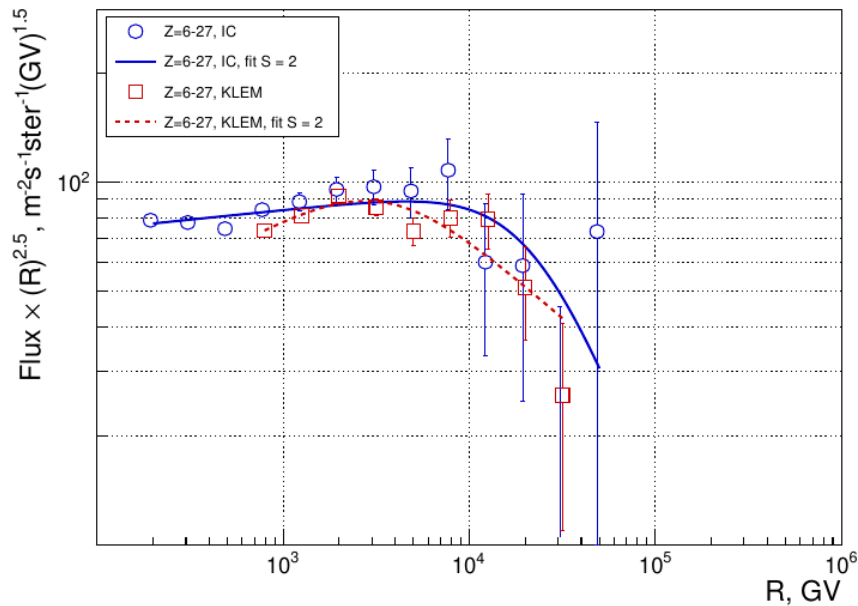
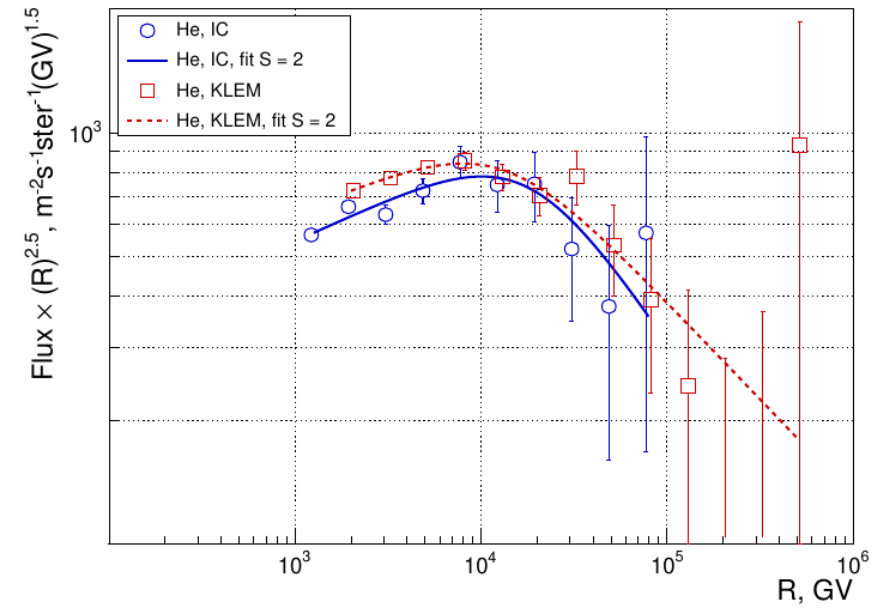
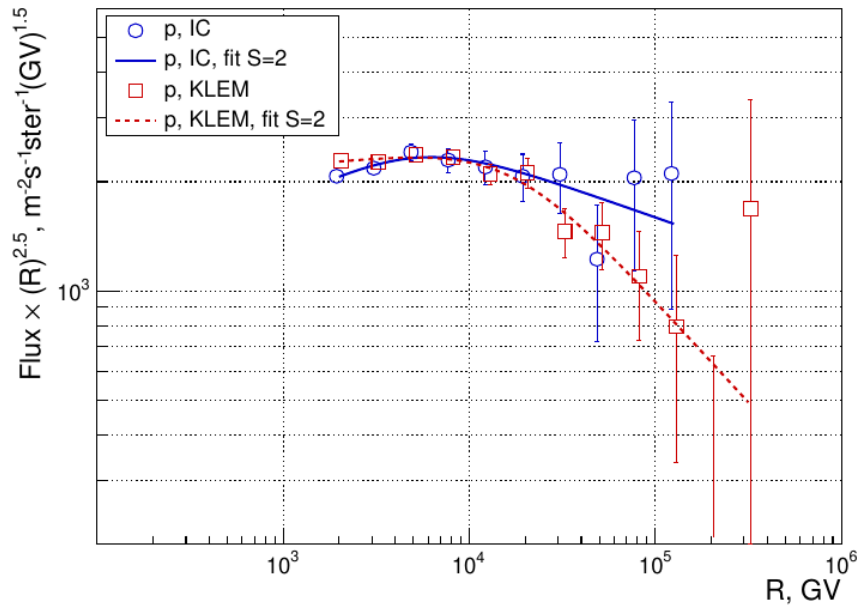
Предсказывает (или объясняет):

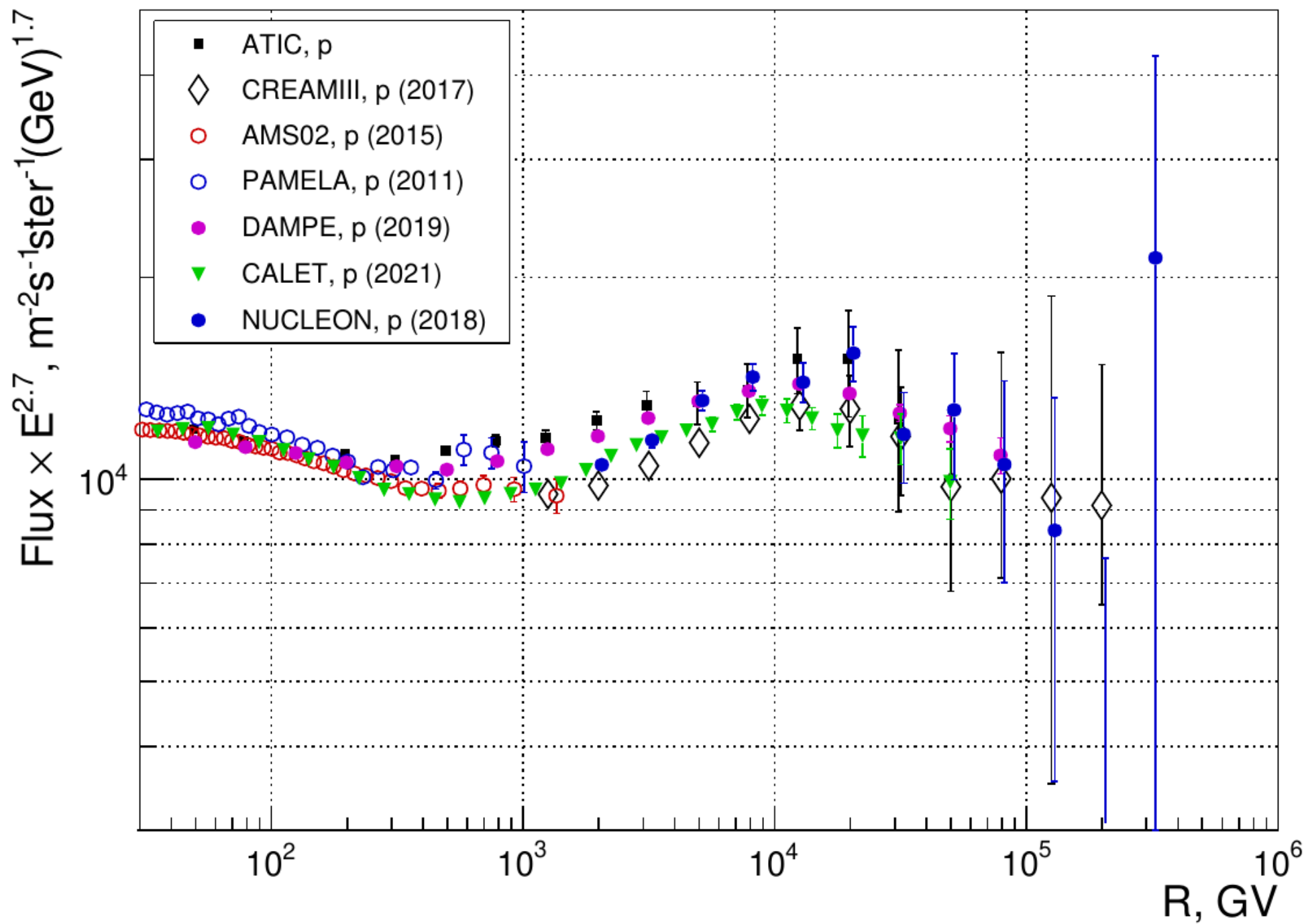
- 1. Универсальный прогиб спектров при жесткости ~ 500 ГВ**
- 2. Универсальное колено спектров при жесткости ~ 10 ТВ (для тяжелых ядер тоже!)**

Универсальное колено КЛ при жесткости ~ 10 ТВ (НУКЛОН, 2018 г.)

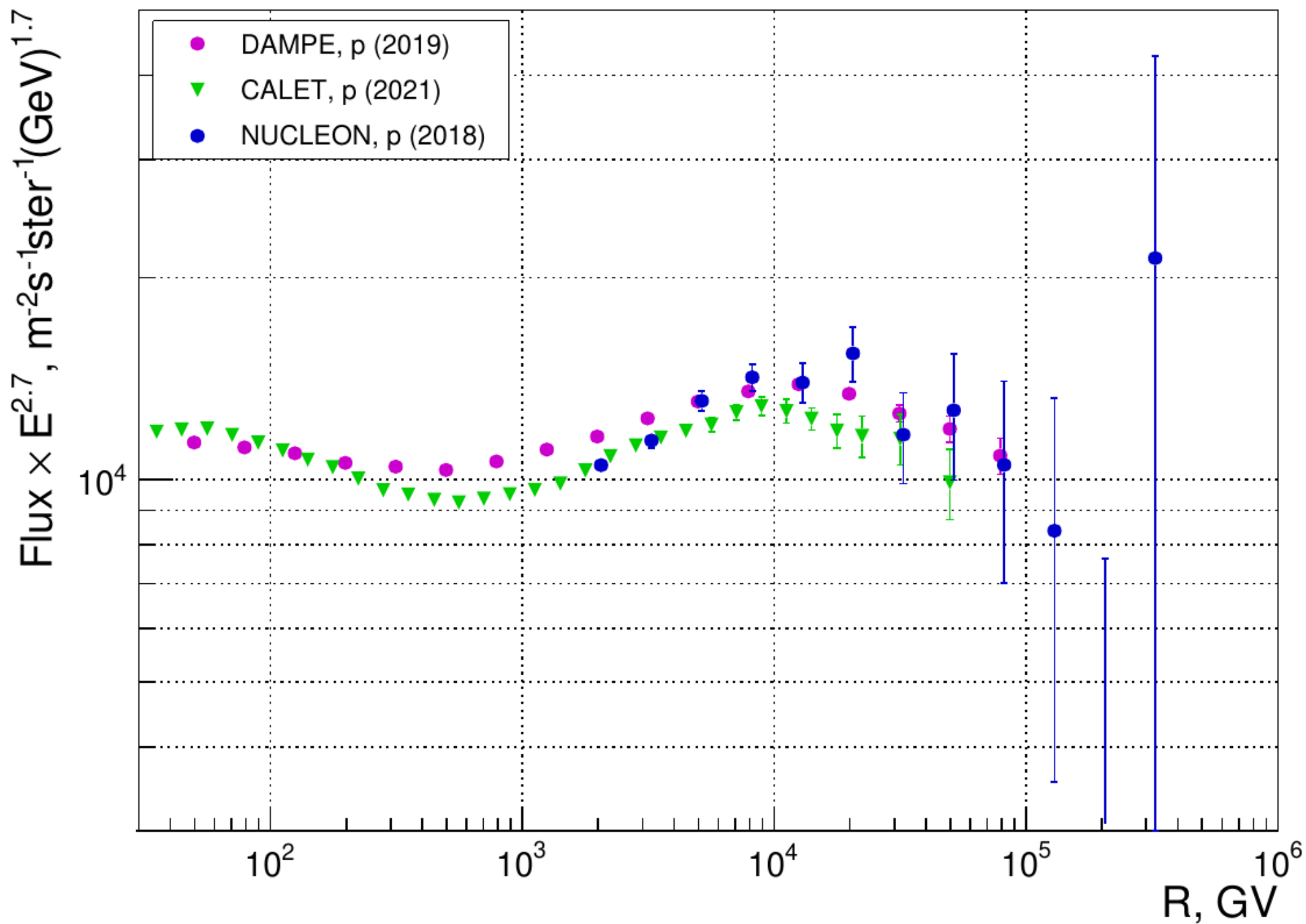
Значимость не хуже 3.9σ во всех группах ядер

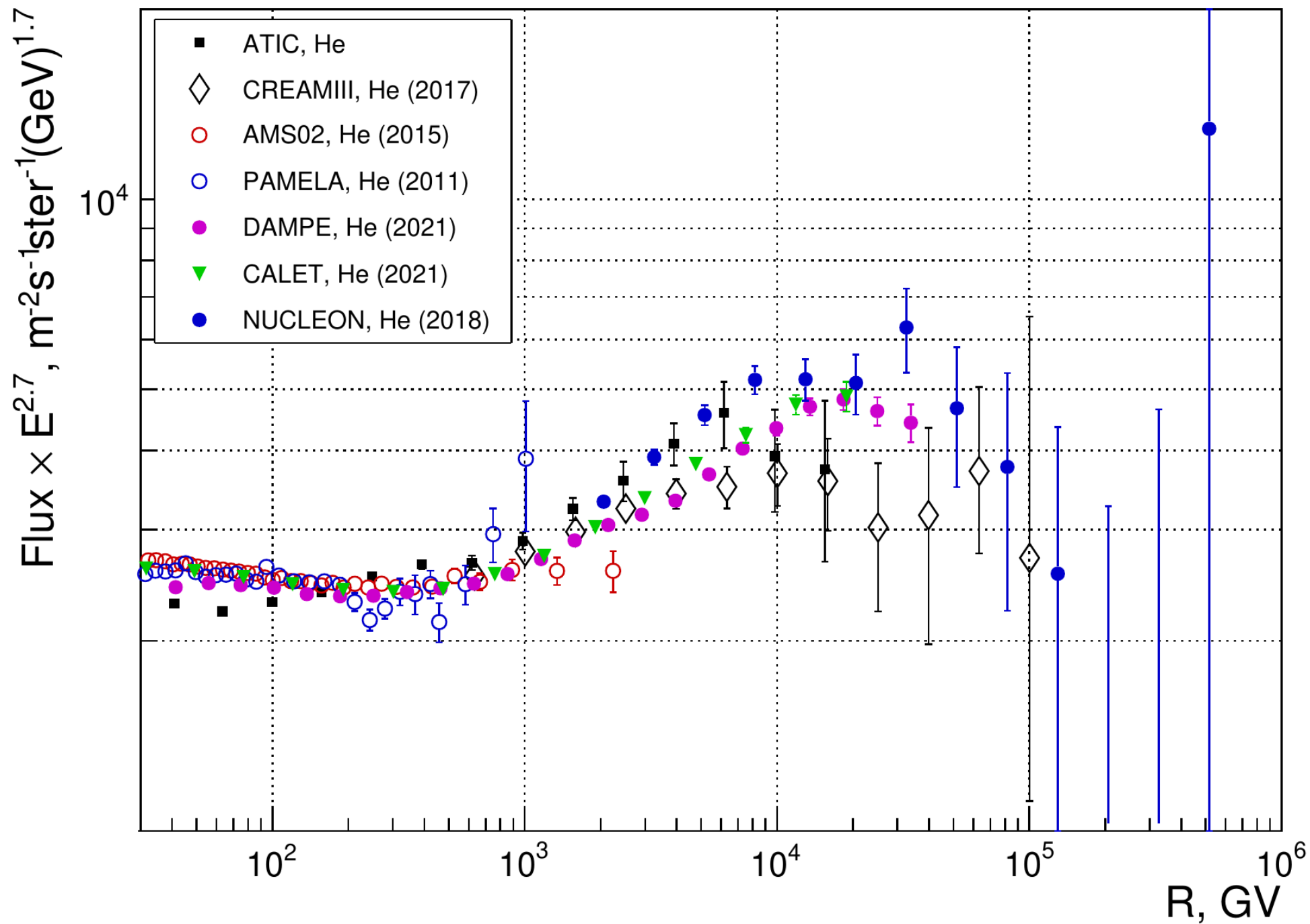
JETP Lett., 2018, 108, 5, doi: 10.1134/S0021364018130015



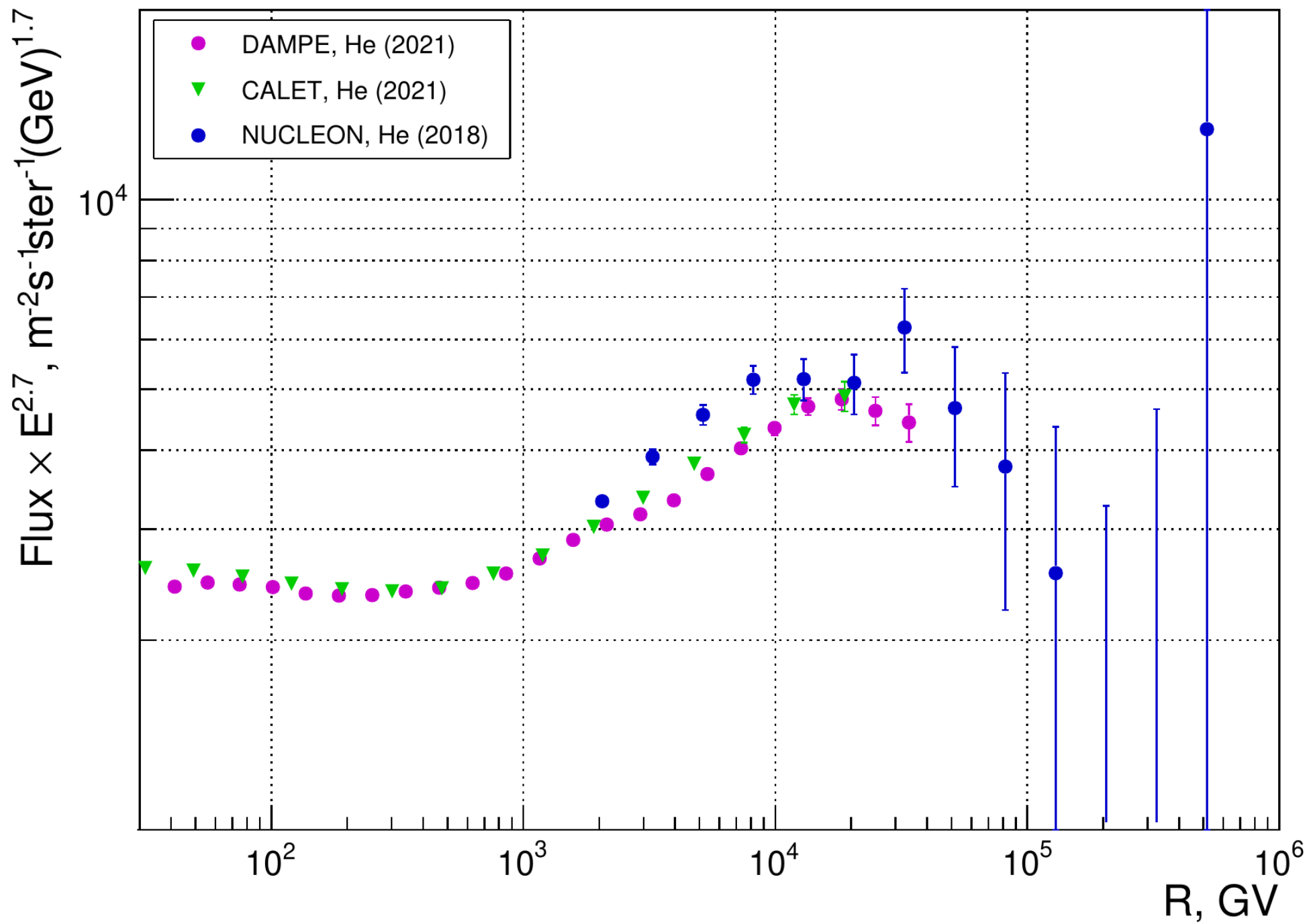


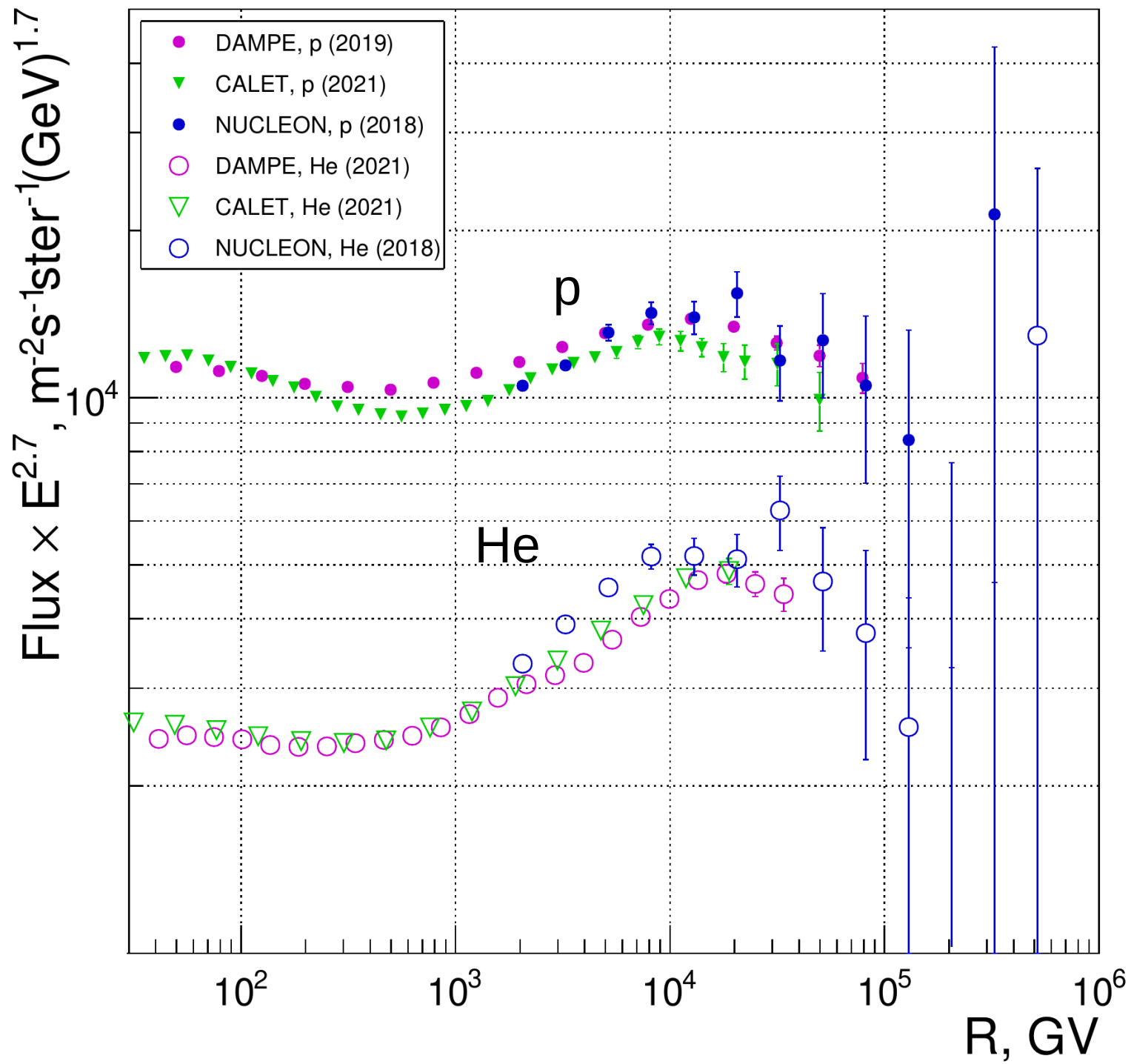
Подтверждение колена - протоны





Подтверждение колена - гелий

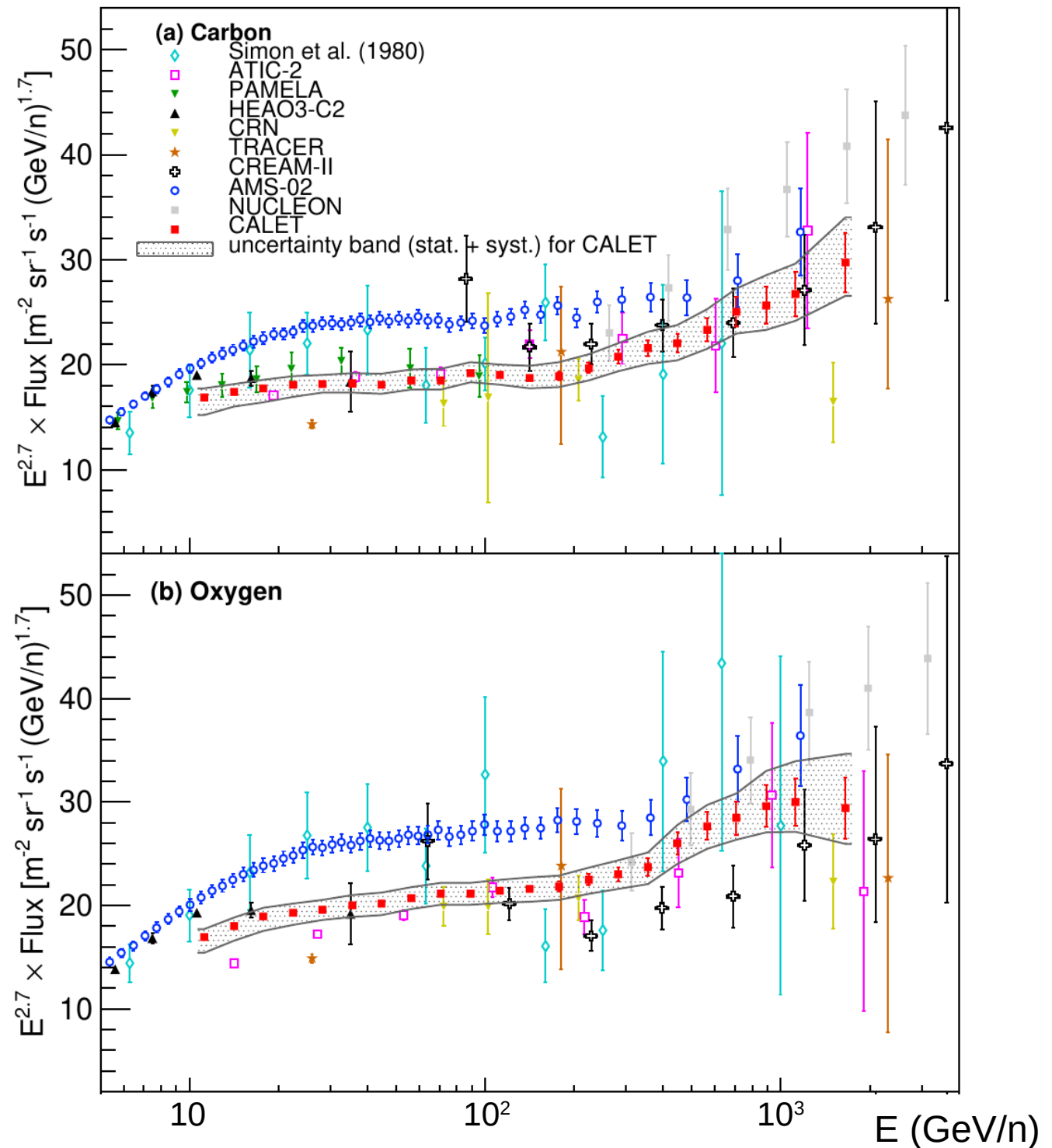




CALET
ICRC2021
PoS(ICRC2021)093

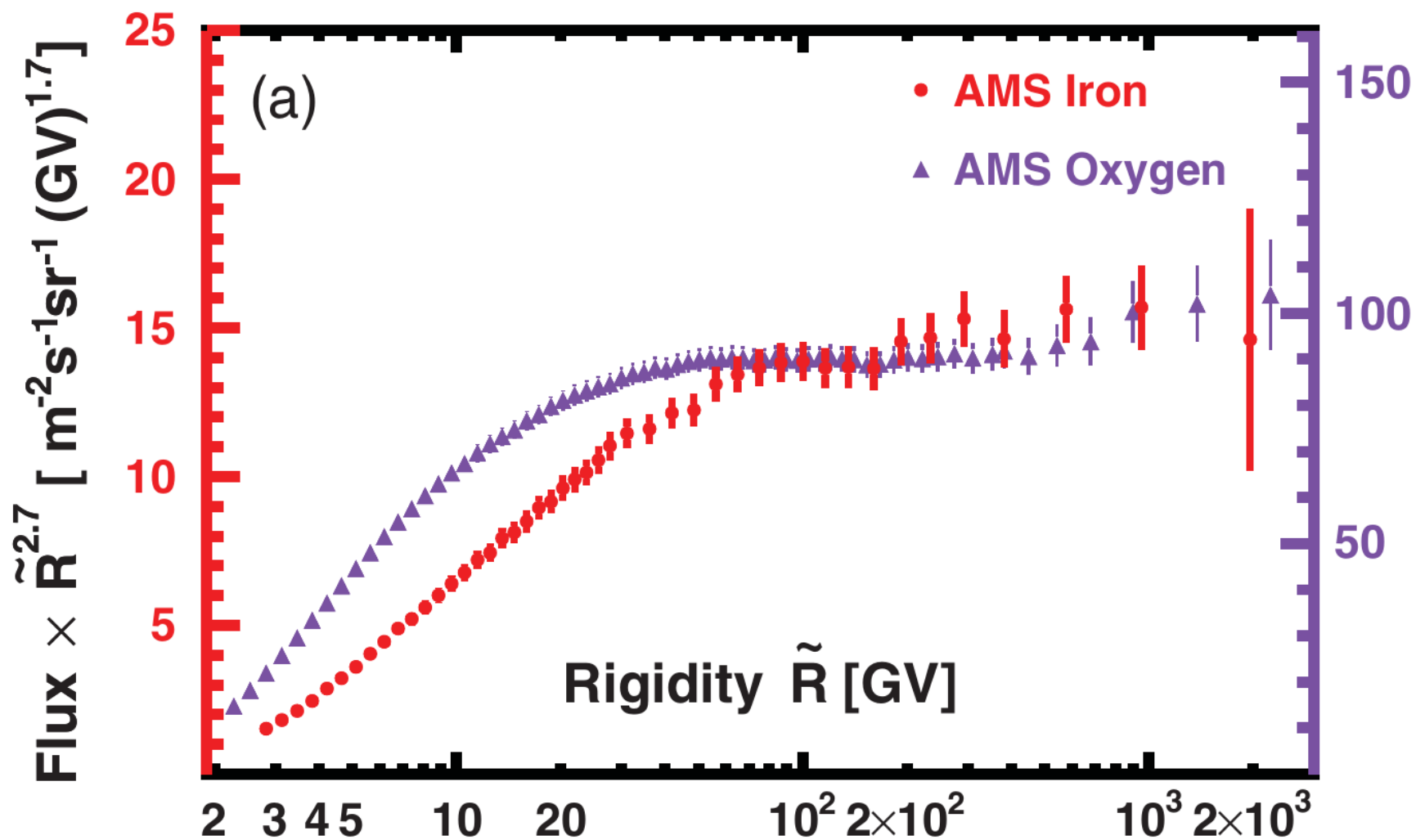
Тяжелые ядра -
данных не
хватает

Что с абсолютной
калибровкой в
AMS-02?



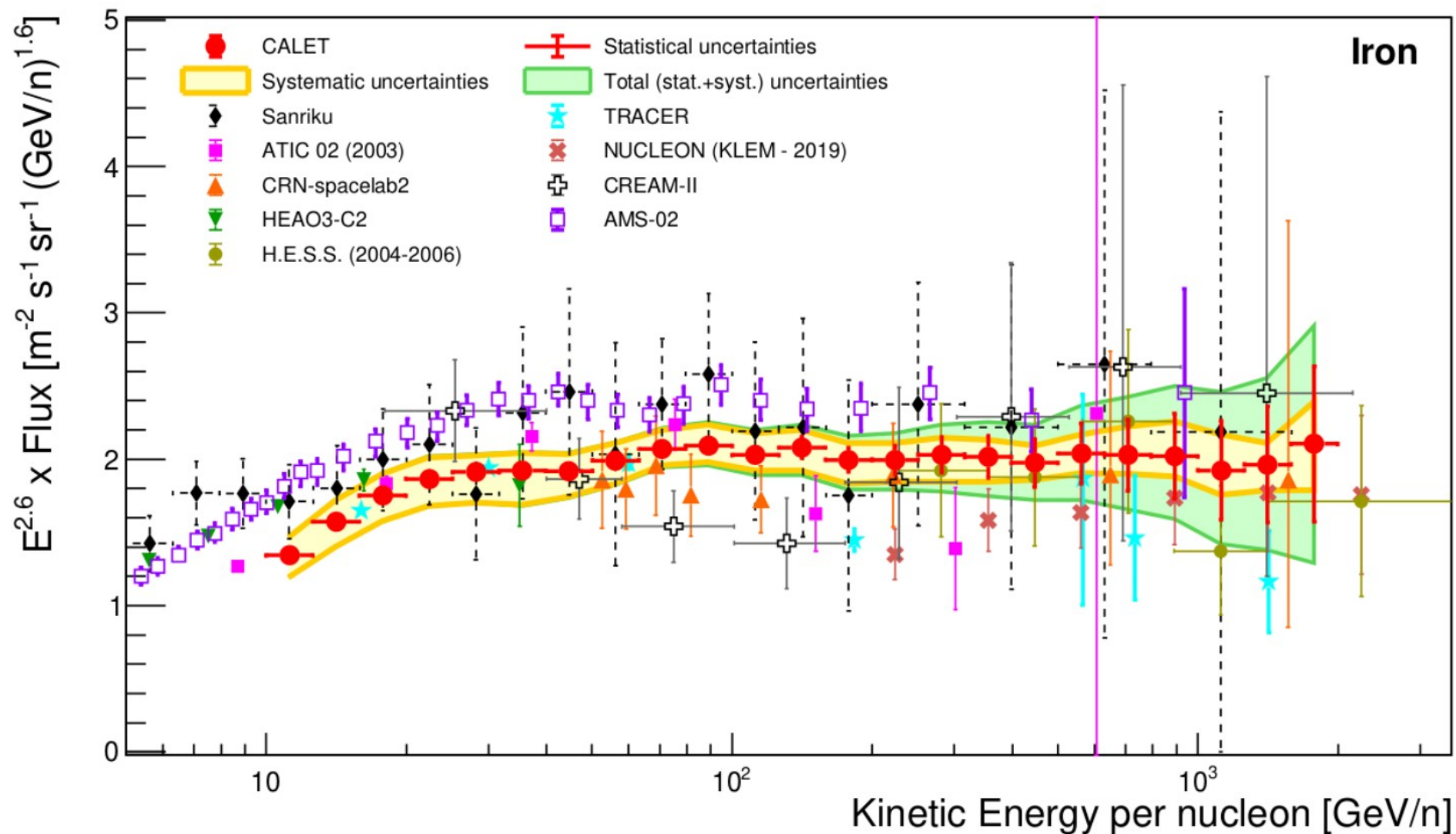
Железо и кислород, AMS-02

PHYSICAL REVIEW LETTERS 126, 041104 (2021)



Железо: CALET и другие (ICRC 2021)

PoS(ICRC2021)109



DAMPE (ICRC2021) Ядра видят, но абсолютных спектров еще нет.

PoS(ICRC2021)128

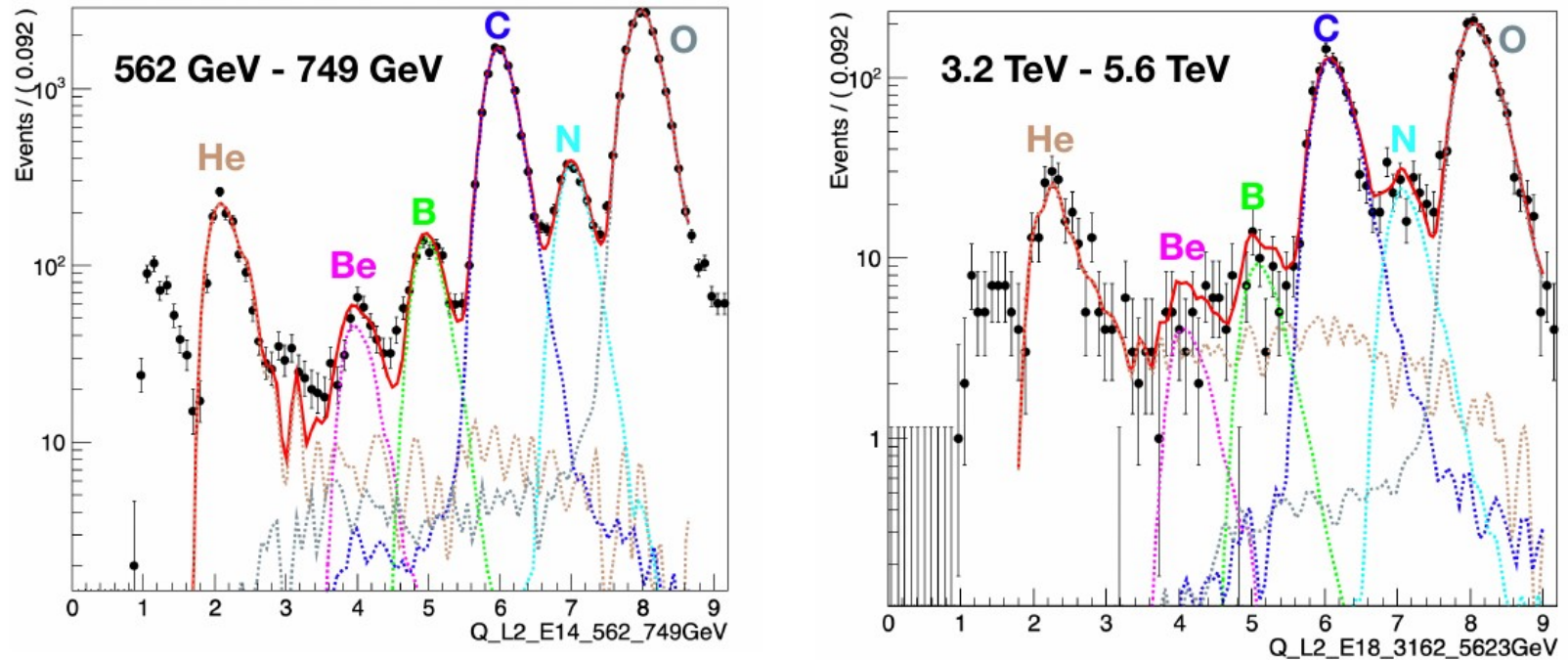
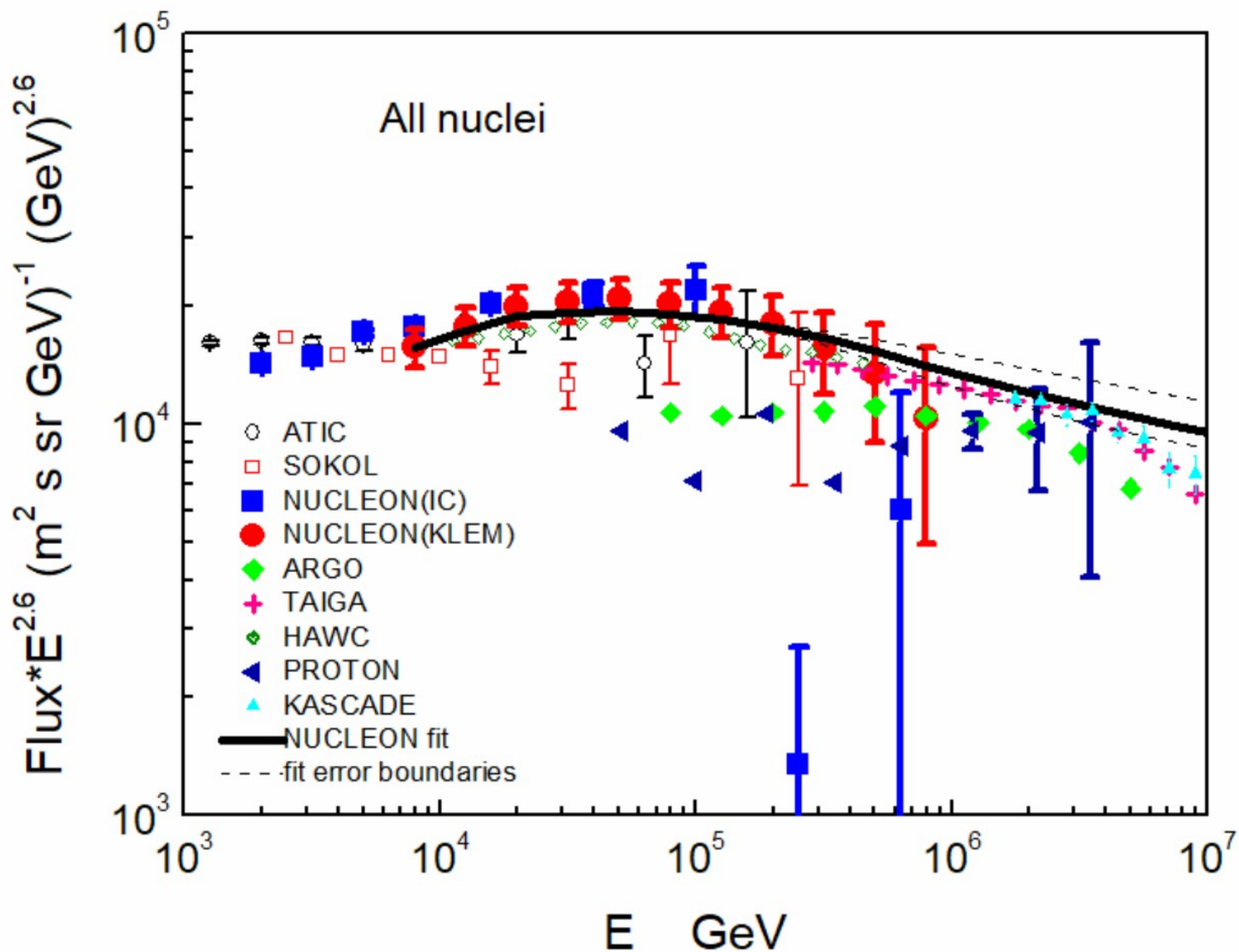


Figure 6: The results of template fit. The left one is the result for the range from 562 GeV to 749 GeV, the right one for the range from 3.2 TeV to 5.6 TeV.

Излом в ядрах вблизи 10 ТВ, обнаруженный НУКЛОНОМ (3.9σ) пока не подтвержден.

Малое универсальное колено в спектре энергий всех частиц Стыковка с данными наземных экспериментов

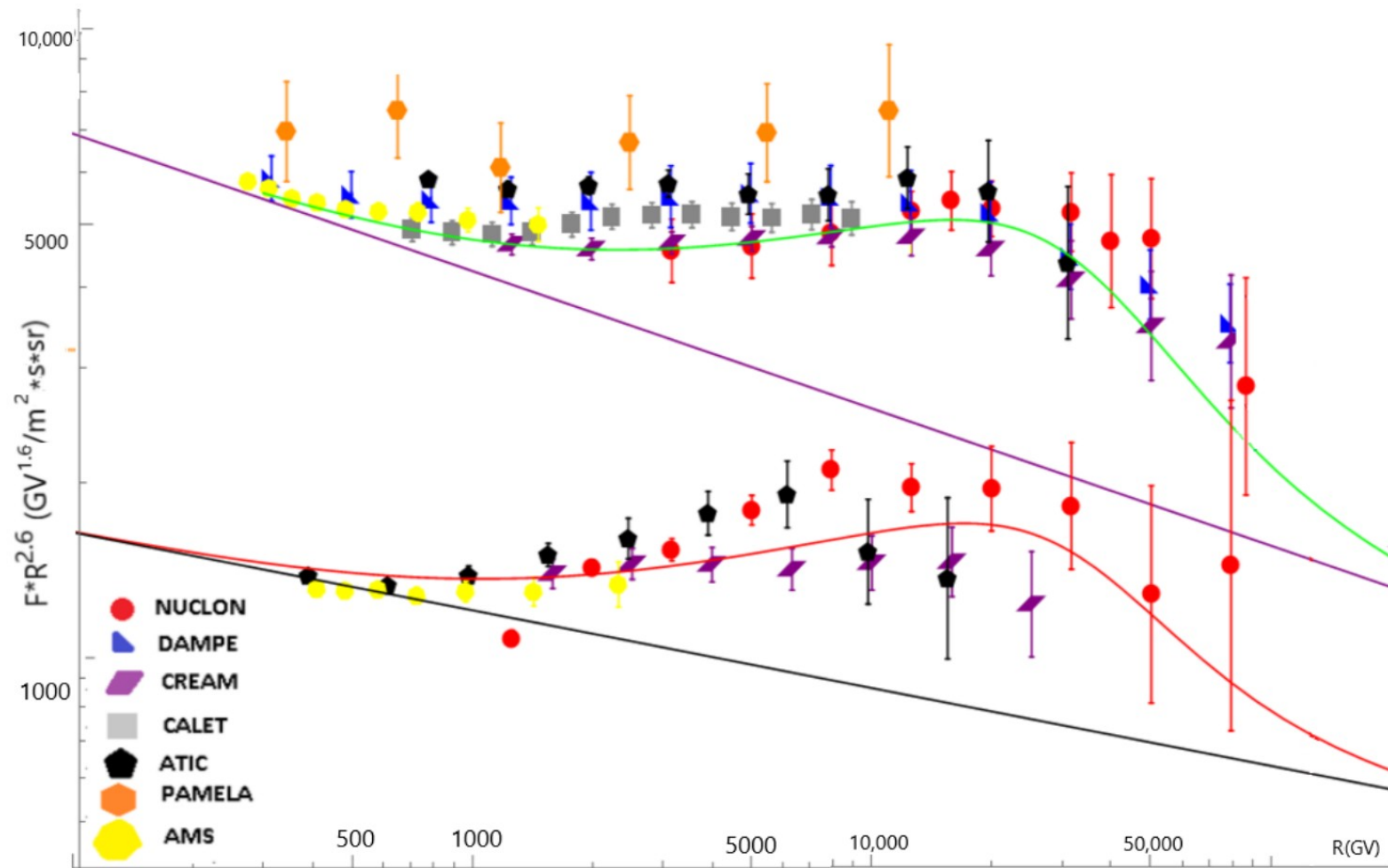
ASR, 2022 (to be published)



Interpretation of the Spectral Inhomogeneity in the 10 TV Region in Terms of a Close Source

Ilya Kudryashov ^{1,*}, Farid Gasratov ¹, Vladimir Yurovskiy ^{2,*} and Vasilii V. Latonov ³

Universe 2021, 7, 460. <https://doi.org/10.3390/universe7120460>



0.16 kpc, 3 ky, 10⁵⁰ erg

The TeV Cosmic Ray Bump: a Message from Epsilon Indi or Epsilon Eridani Star?

MIKHAIL A. MALKOV¹ AND IGOR V. MOSKALENKO²

The Astrophysical Journal 911 (2021) 151

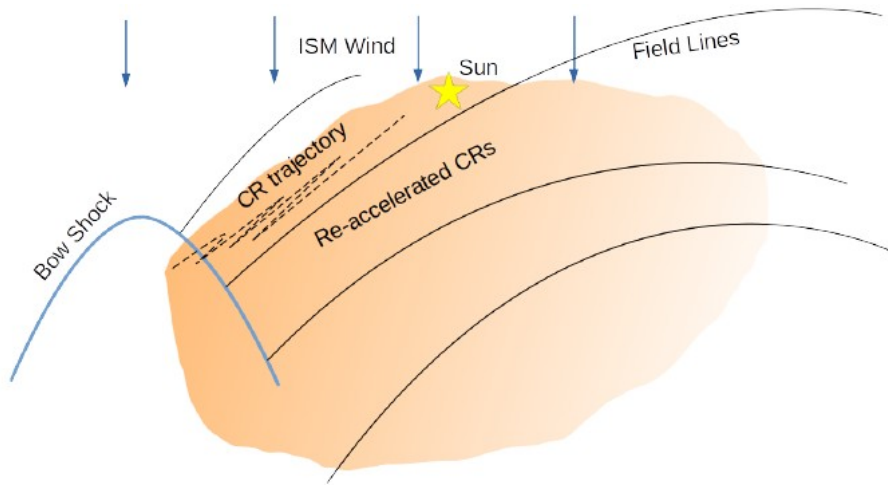


Figure 1. Schematics of a bow-shock ahead of a moving star and reaccelerated CRs, diffusing predominantly along the field lines.

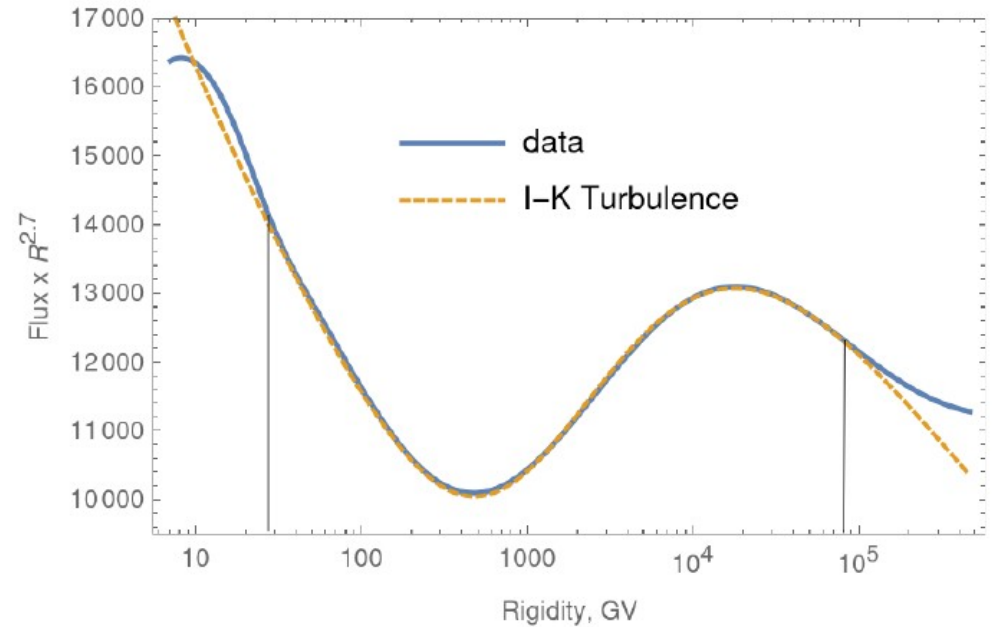
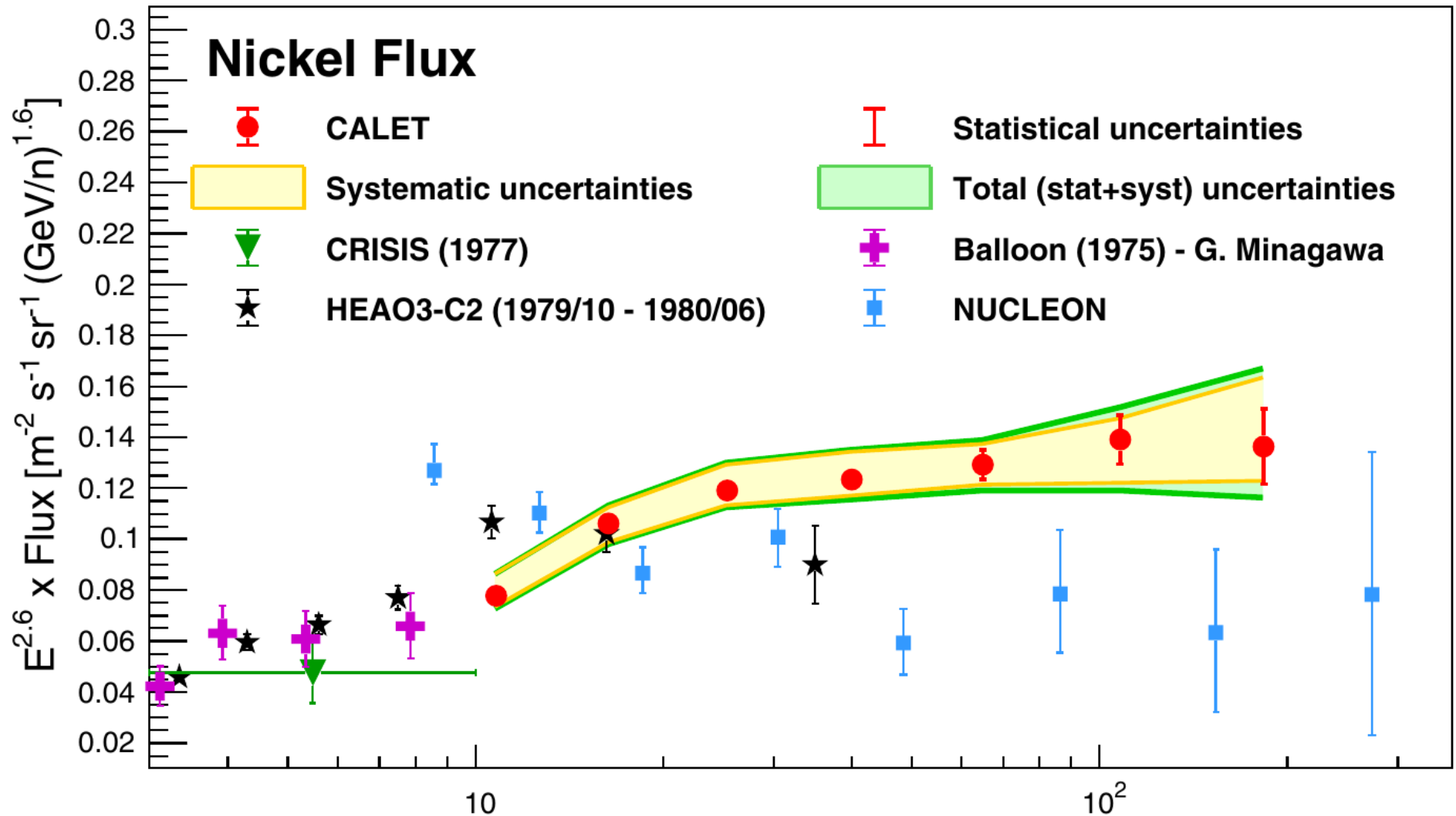


Figure 3. Fit of the diffusive shock acceleration result in Eq. (13) (dashed line) to the CR proton data compilation by [Boschini et al. \(2020b\)](#) (solid line). The region between the vertical lines is physically related to the shock acceleration in the Local Bubble and is used to calculate the relative deviation between the two curves presented in Eq. (14). Here we used $a = 0.515$, $K = 2.39$, $R_0 = 4434$ GV.

Эпсилон Индейца 3.6 пк; Эпсилон Эридана 3.2 пк.

Ni: НУКЛОН и CALET (2022)

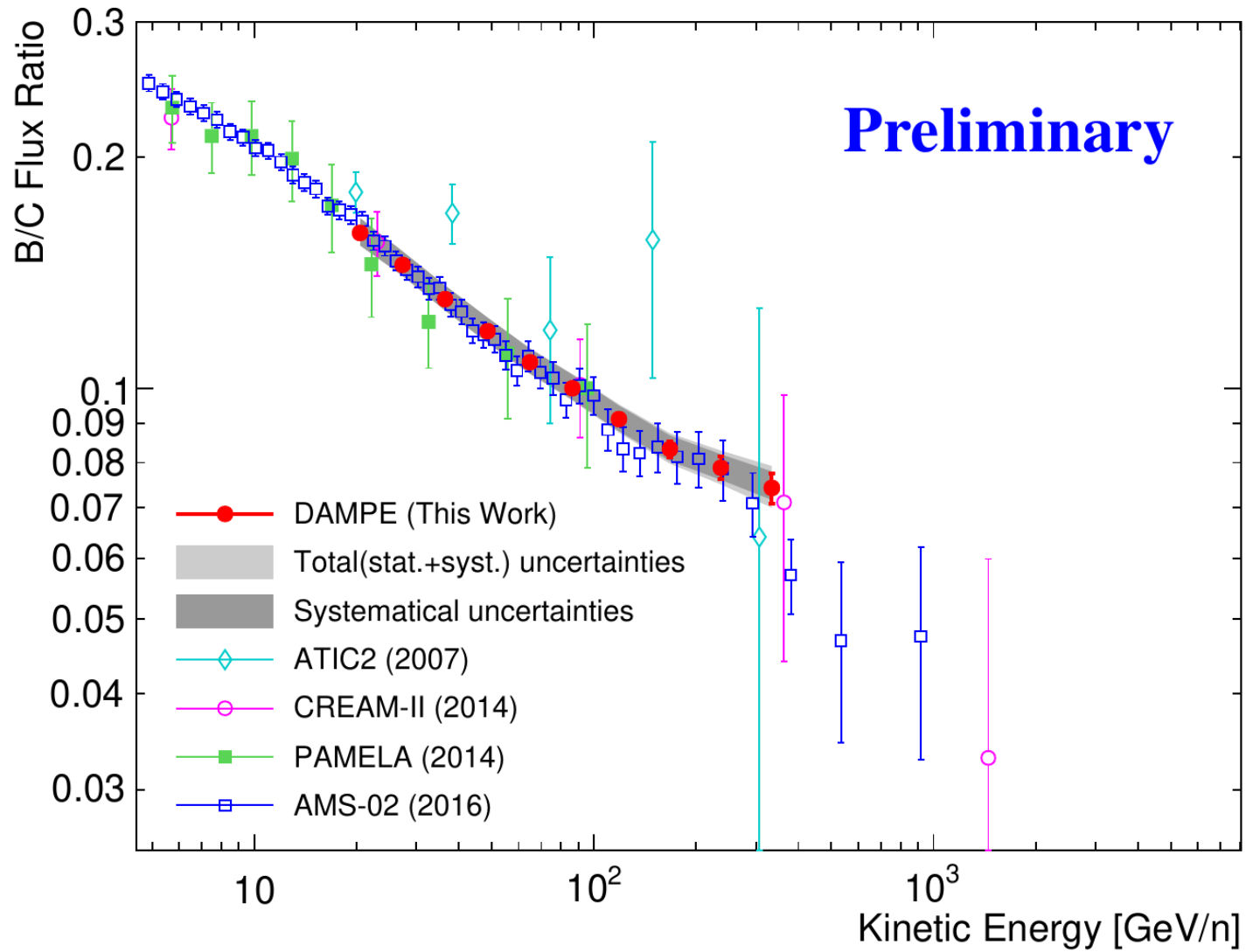
PRL 128, 131103 (2022)



Вторичные ядра

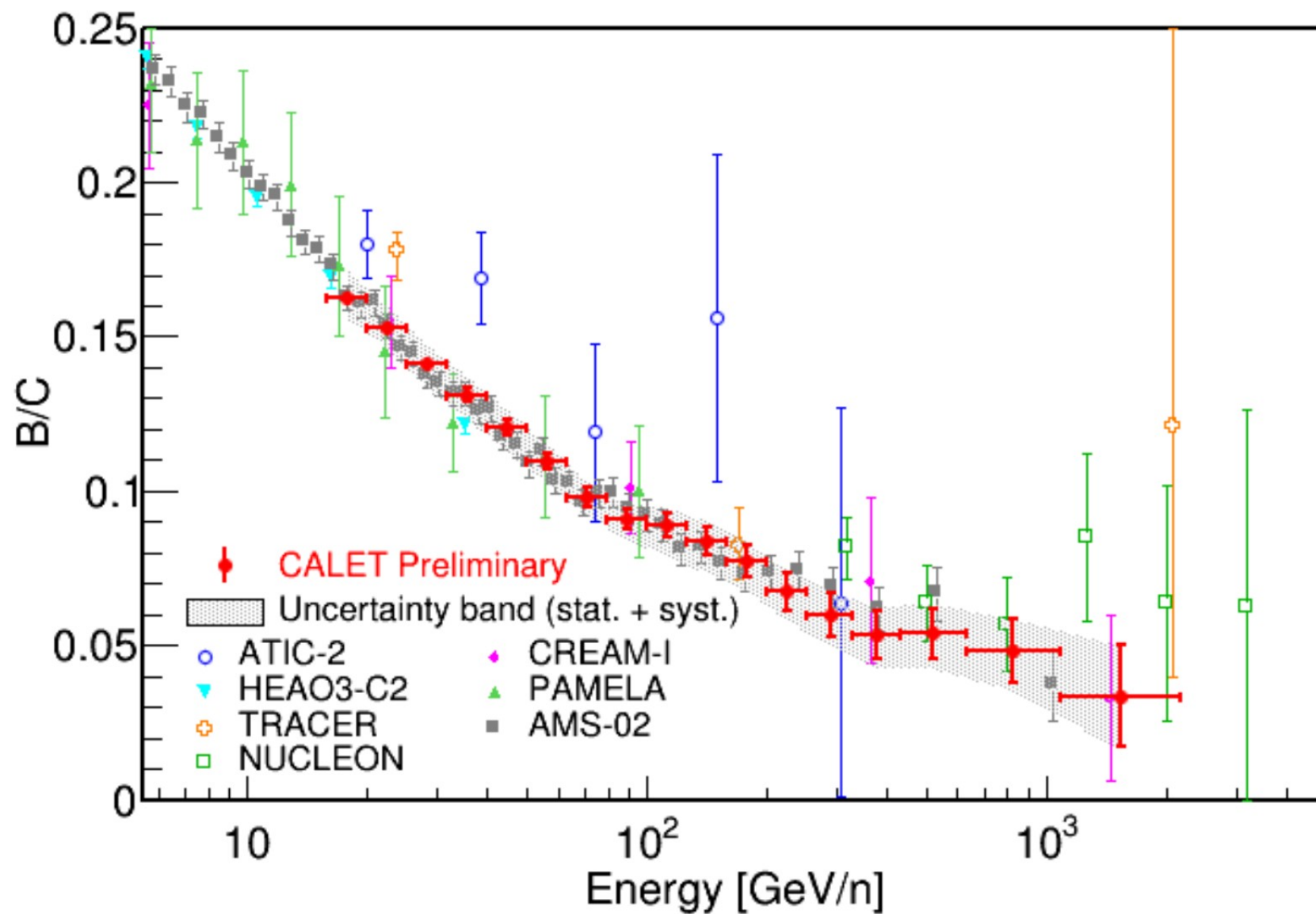
B/C DAMPE (ICRC2021)

PoS(ICRC2021)126



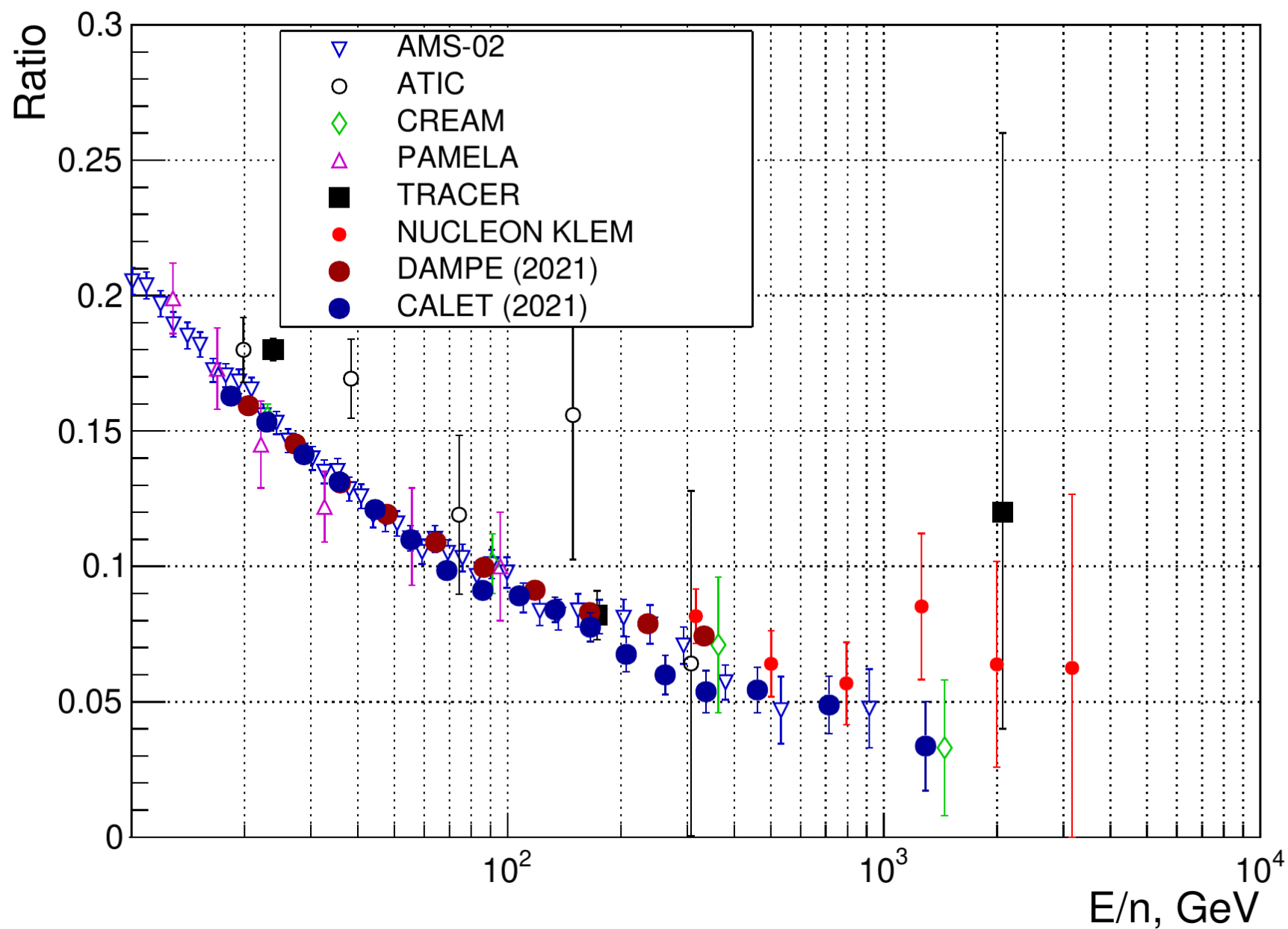
B/C CALET (ICRC 2021)

PoS(ICRC2021)010



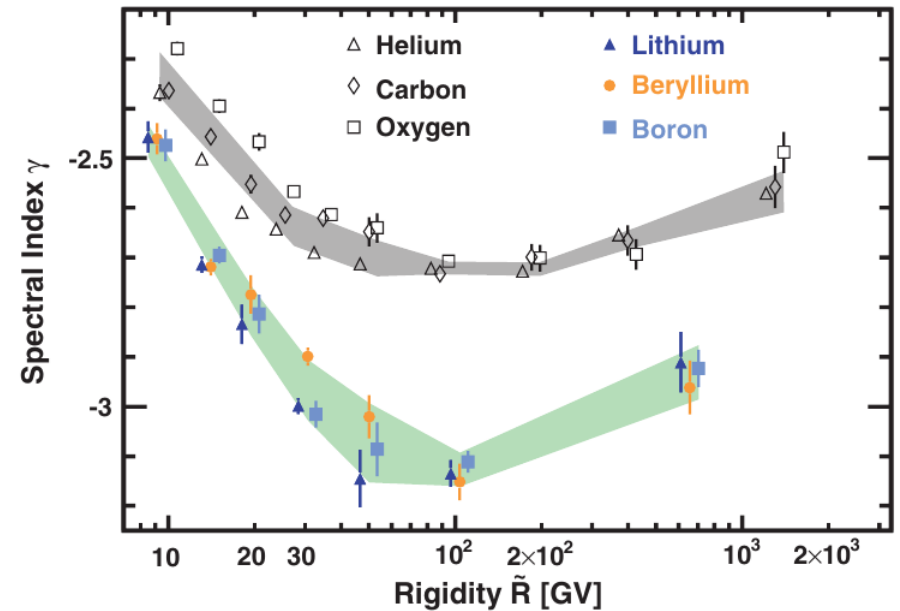
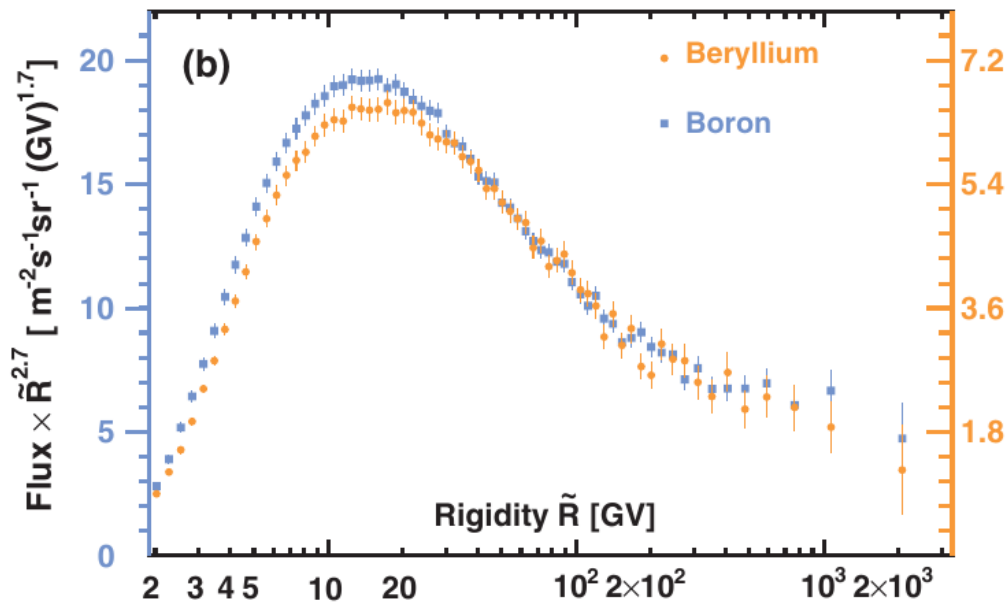
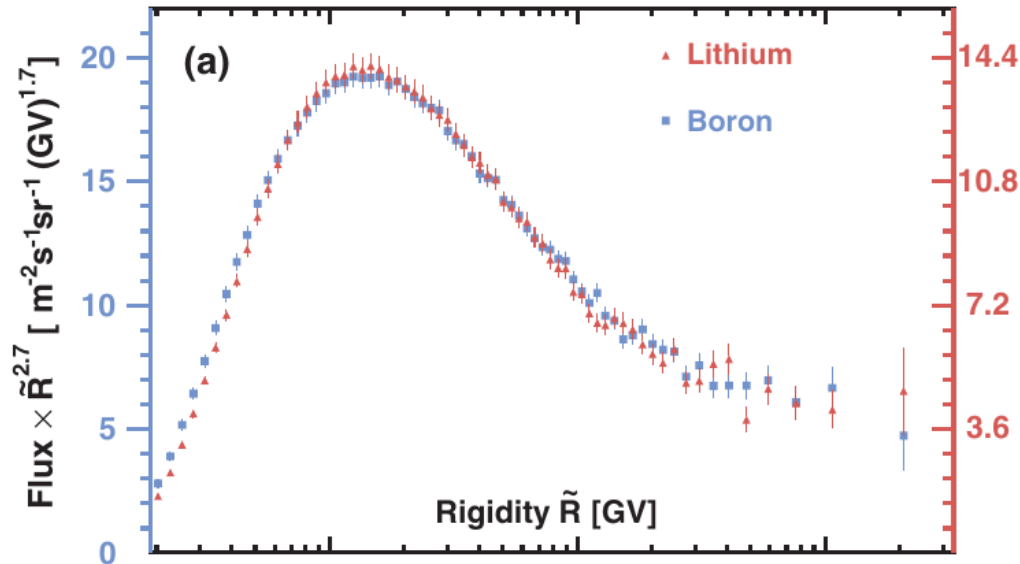
B/C — все данные

B to C ratio



Li, Be, B и первичные ядра в AMS-02 (2018)

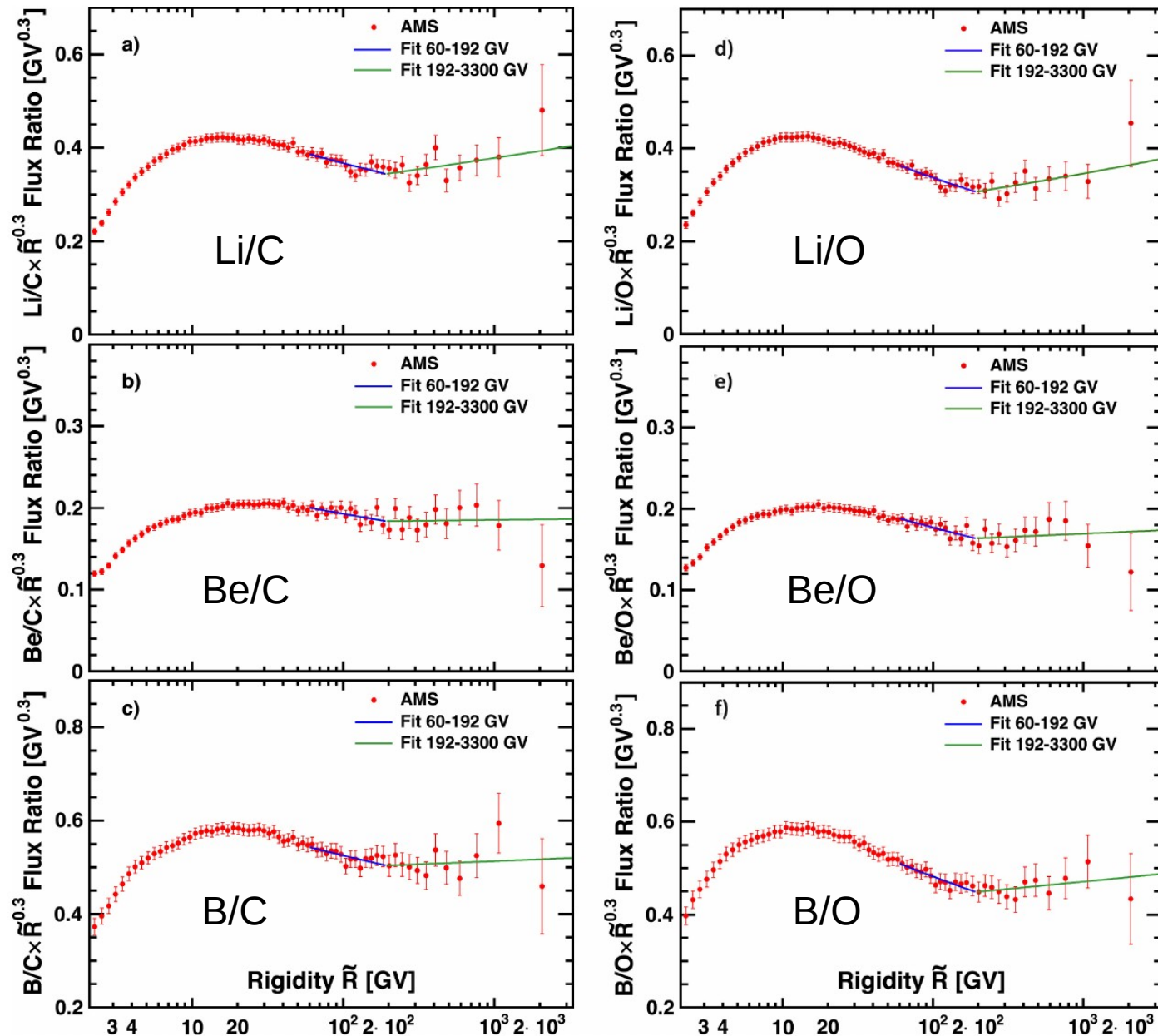
PHYSICAL REVIEW LETTERS 120, 021101 (2018)



Поведение спектрального индекса первичных и вторичных ядер резко различаются.

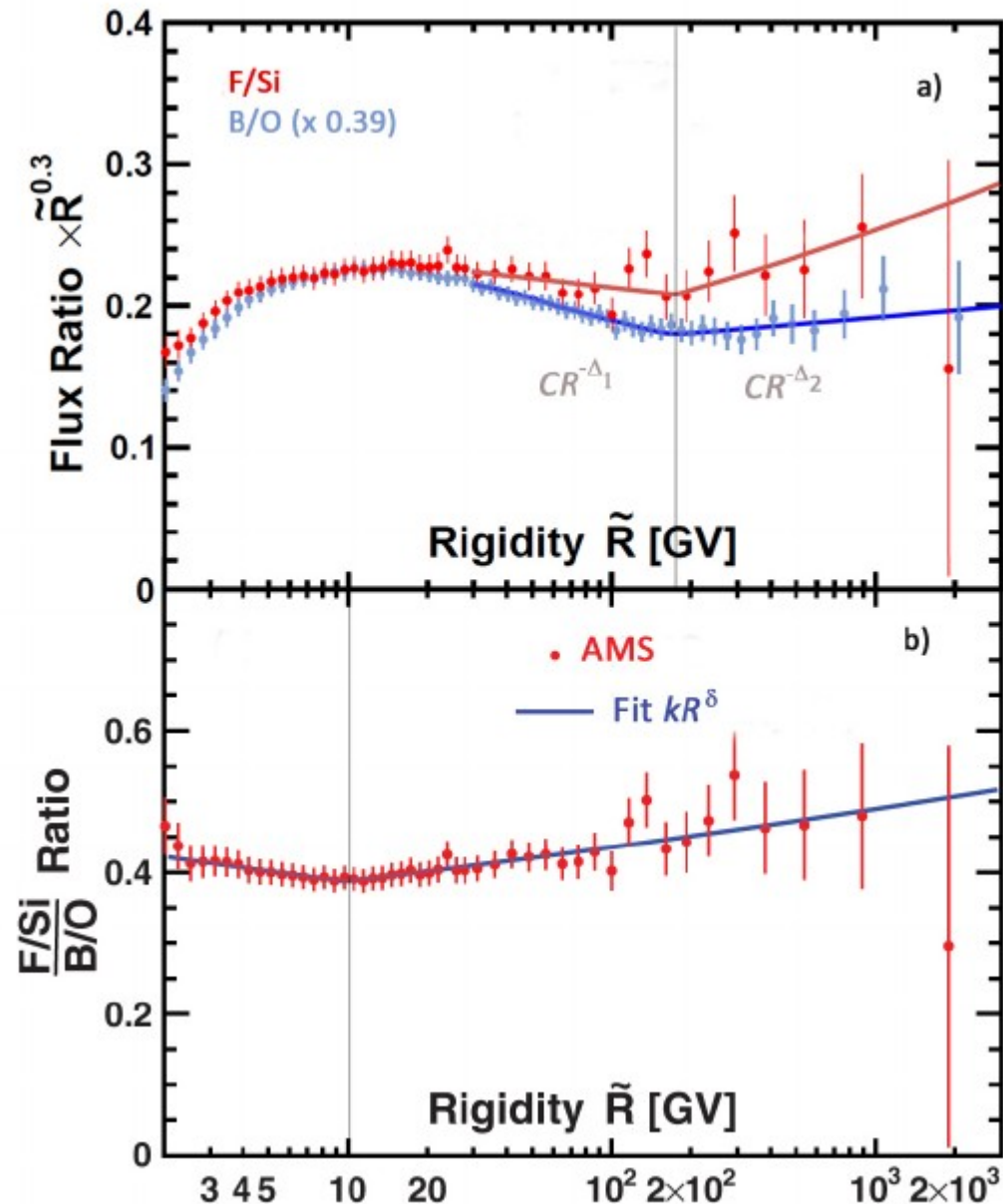
Вторичные к первичным в разных сочетаниях в AMS-02 (2021)

PoS(ICRC2021)016



Вторичные к первичным: тяжелые и легкие пары AMS-02 (2021)

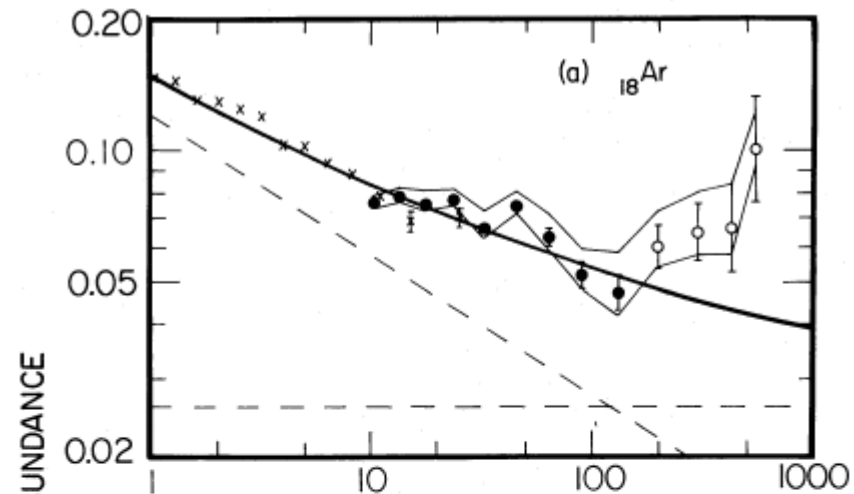
PoS(ICRC2021)016



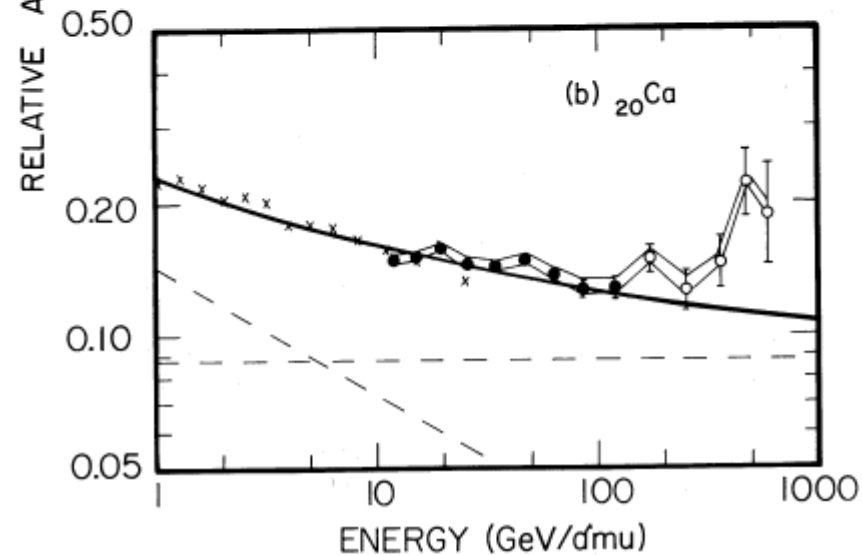
Субжелезо/железо: странные результаты HEAO-3-C3, 1985-1988

ApJ 324 (1988) 1106

Ar/Fe



Ca/Fe



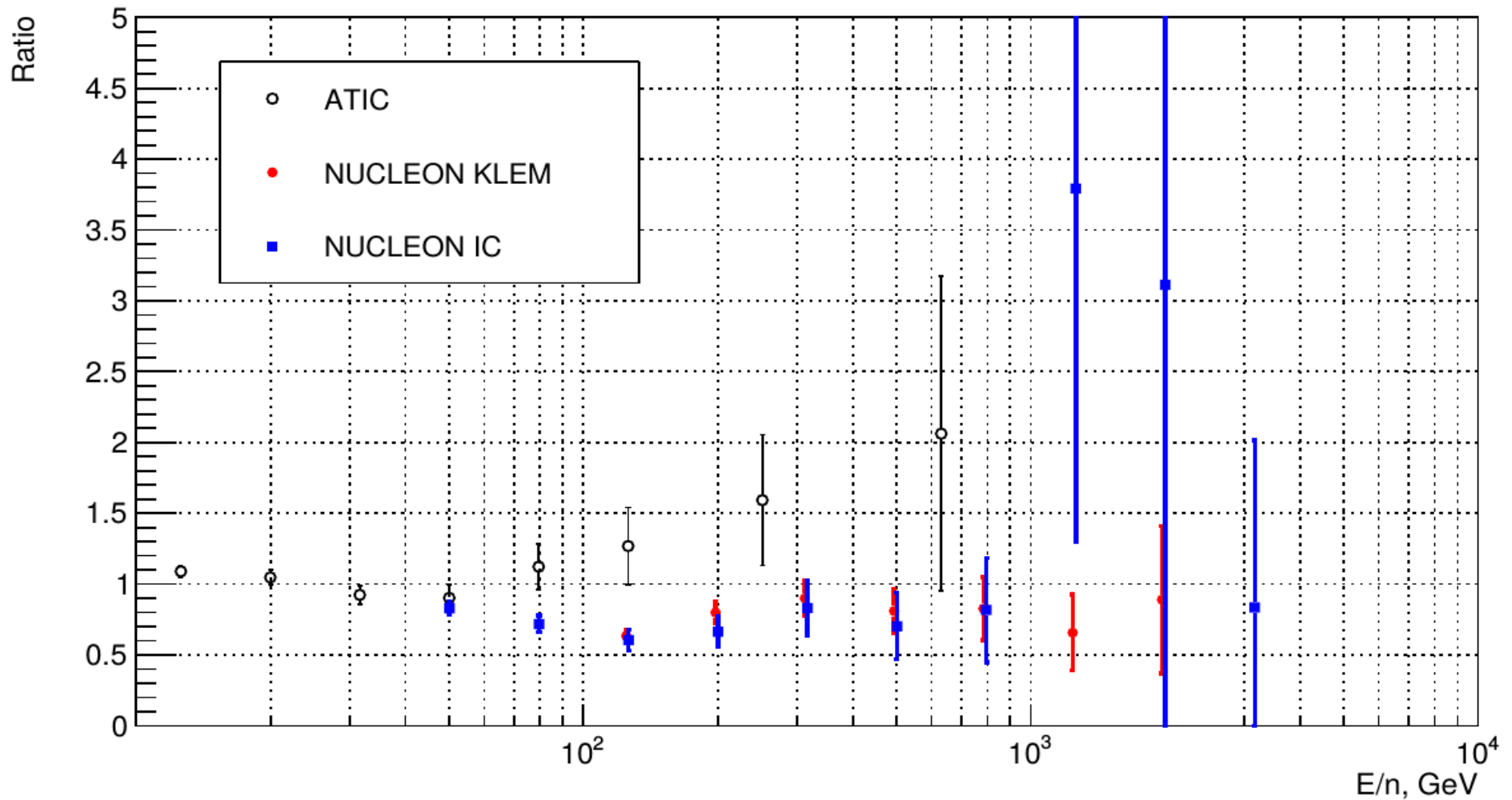
Субжелезо/железо:

Подтверждение ATIC, неоднозначные результаты НУКЛОН

ATIC: BRAS. Physics, 2013, Vol. 77, No. 5, p. 613.

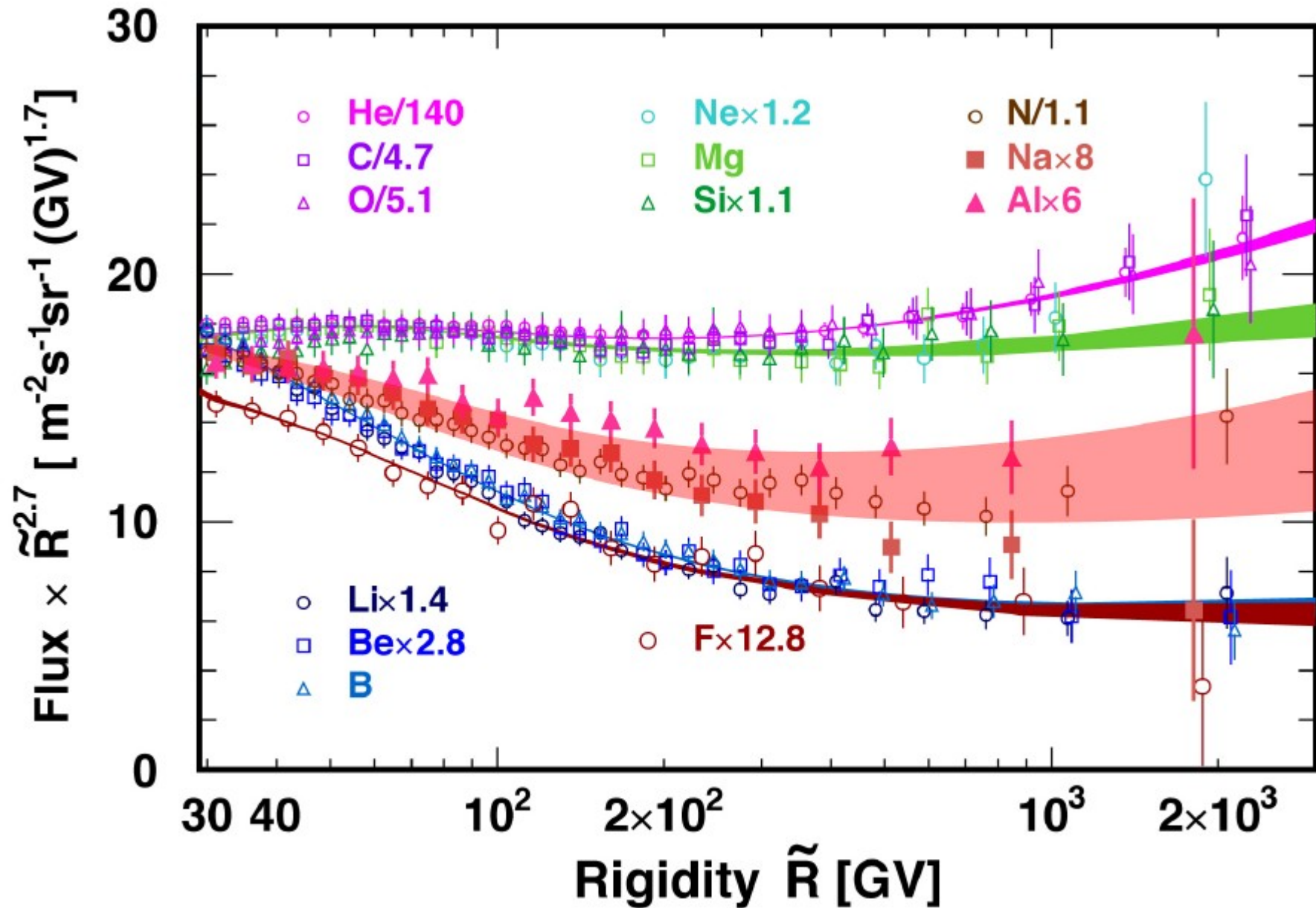
NUCLEON: ASR 2019, V.64(12), 2559

$Z=16-24/\text{Fe}$



Группы ядер: первичные, полупервичные, вторичные. AMS-02(ICRC2021)

PoS(2021)016

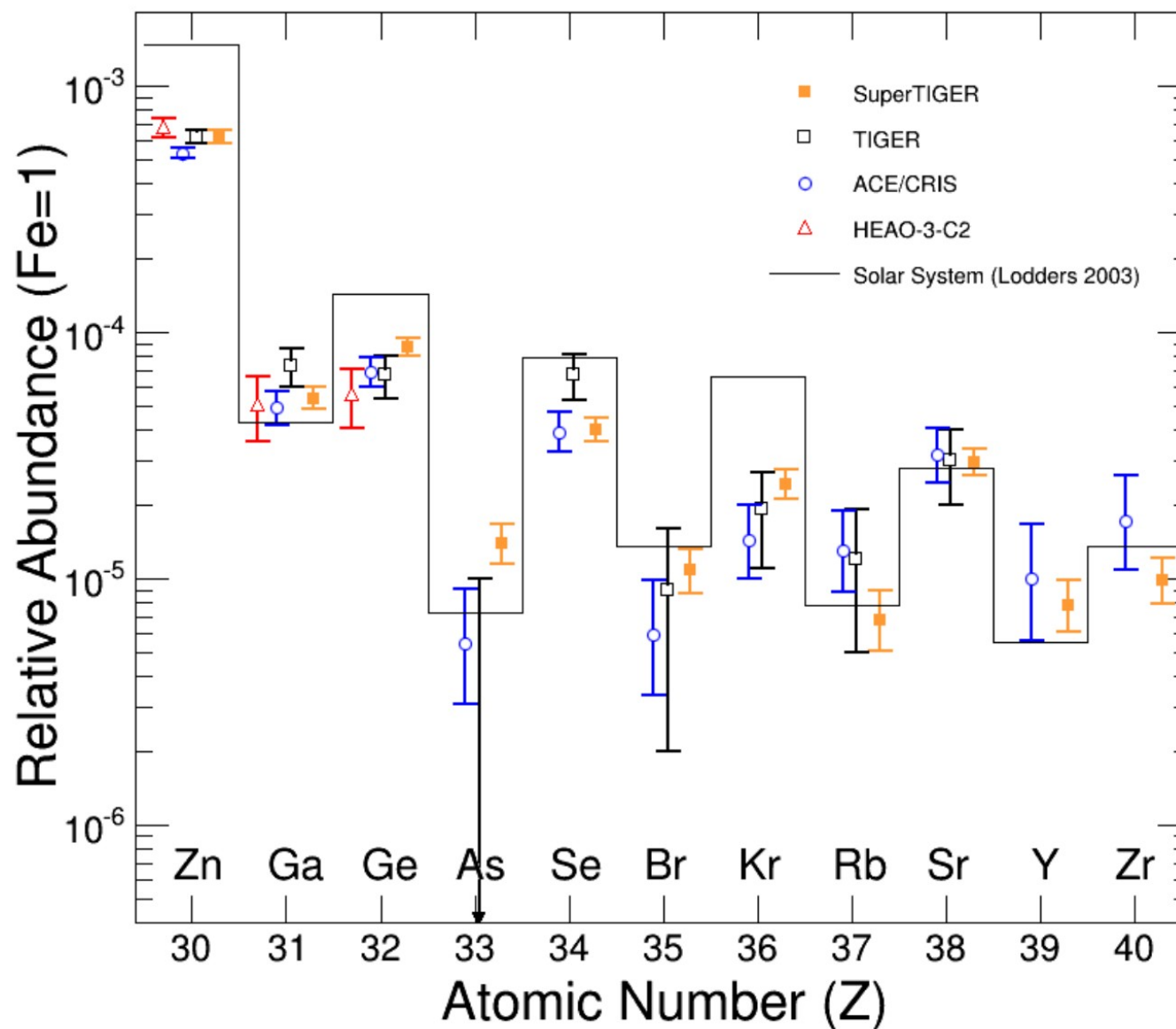


**Сверхтяжелые ядра
(тяжелее железа)**

Сверхтяжелые ядра $Z \leq 40$: SuperTIGER и другие (2016)

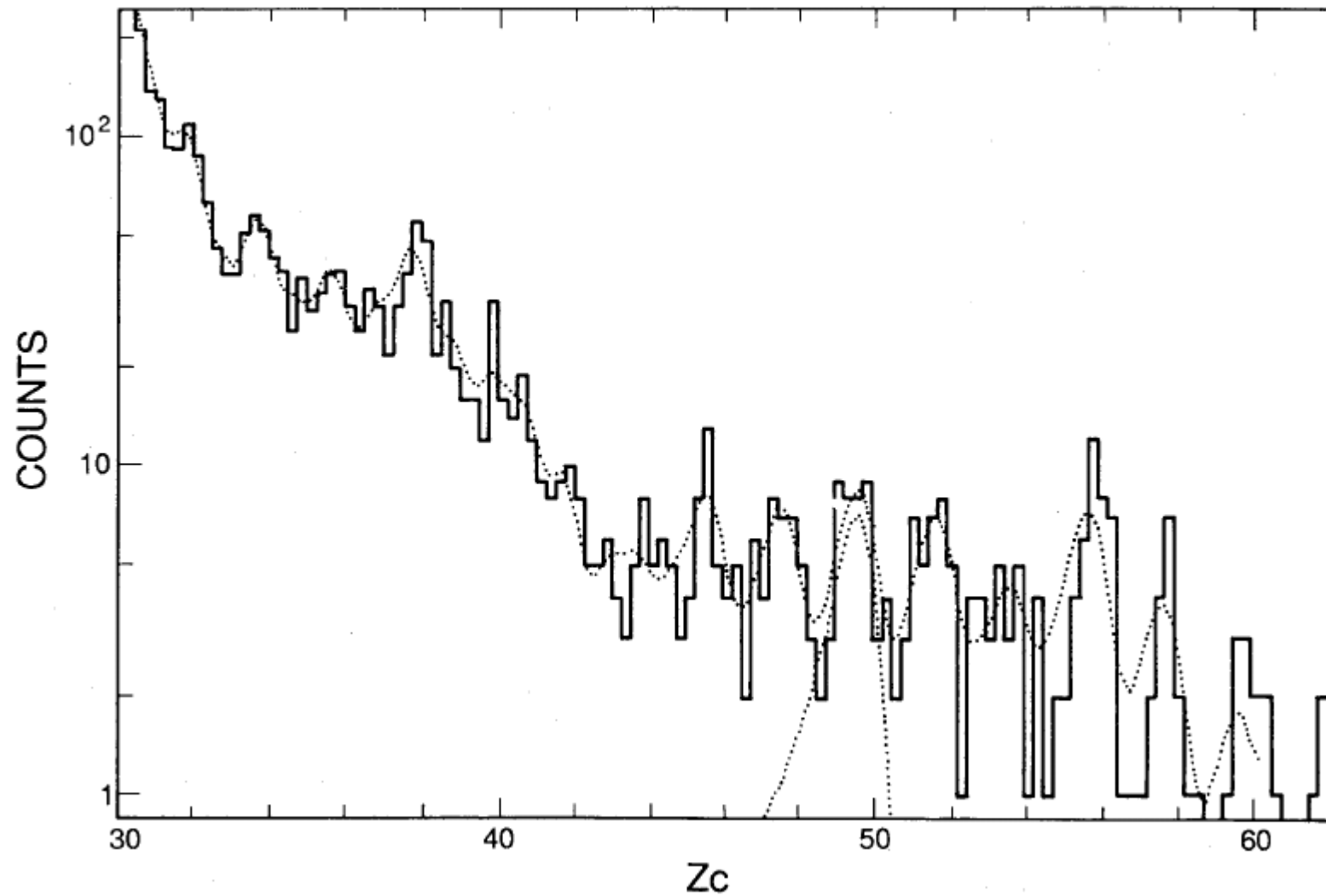
ApJ 831 (2016) 148

Нет данных HEAO-3-C3 (1989)



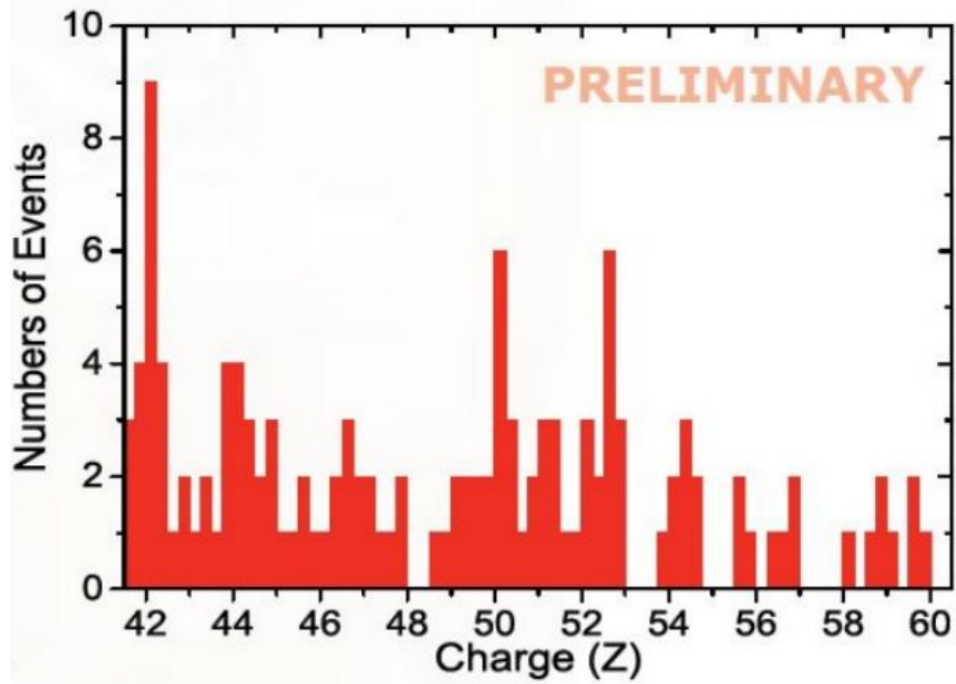
HEAO-3-C3 (1989)

ApJ 346(1989)997

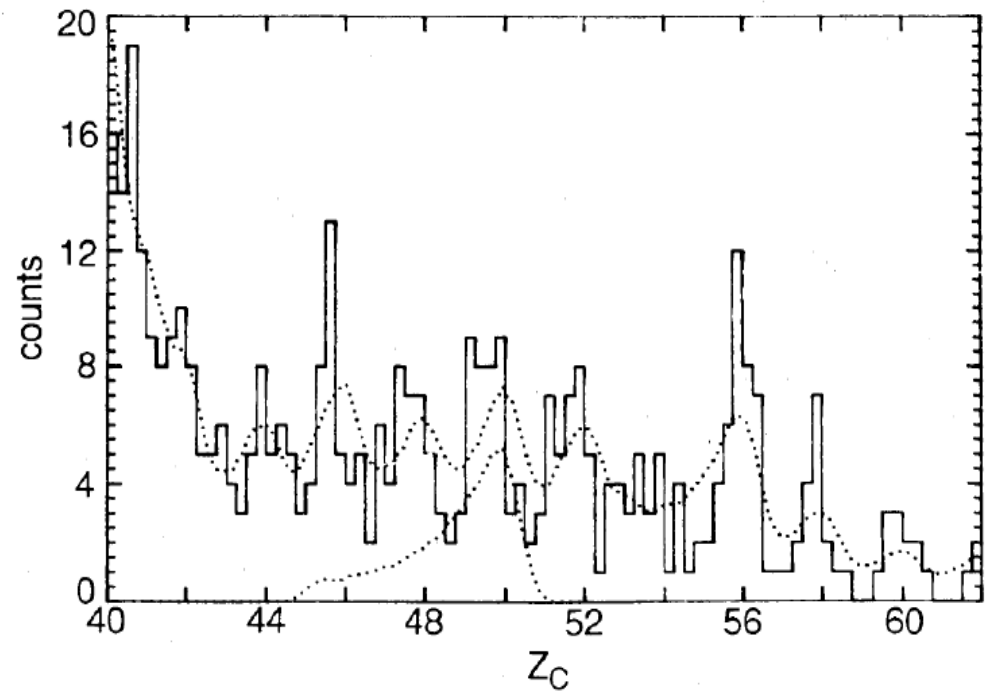


Сверхтяжелые ядра $Z > 40$: SuperTIGER (2016) и HEAO-3-C3 (1989)

ApJ 346(1989)997



SuperTIGER

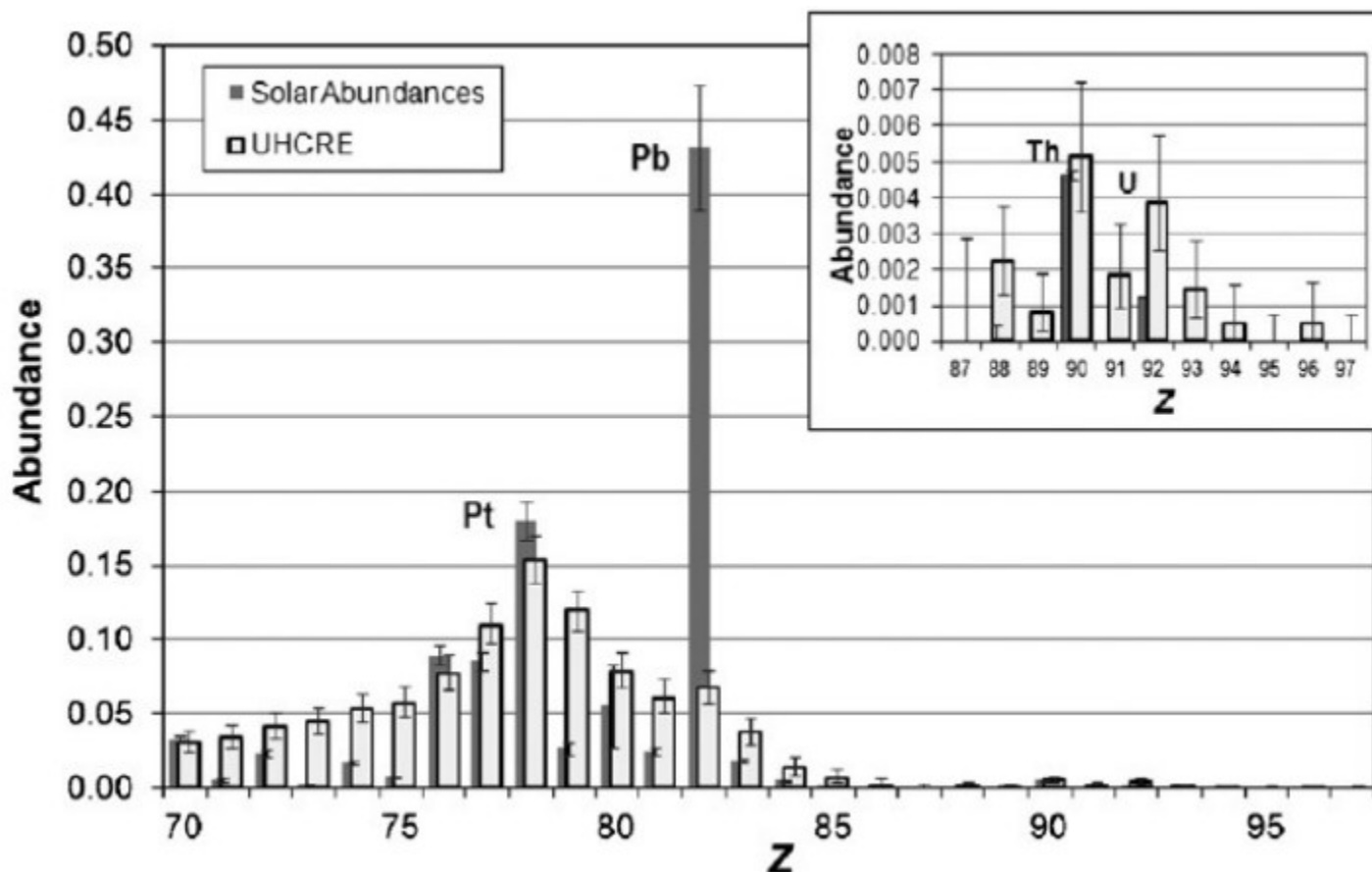


HEAO-3-C3

LDEF (2012): Актиниды и субактиниды ($Z \geq 70$)

ApJ 747(2012)40

Открытый космос, твердотельные трековые детекторы.
Экспозиция 1984-1990 гг., $\sim 20 \text{ м}^2$ стер

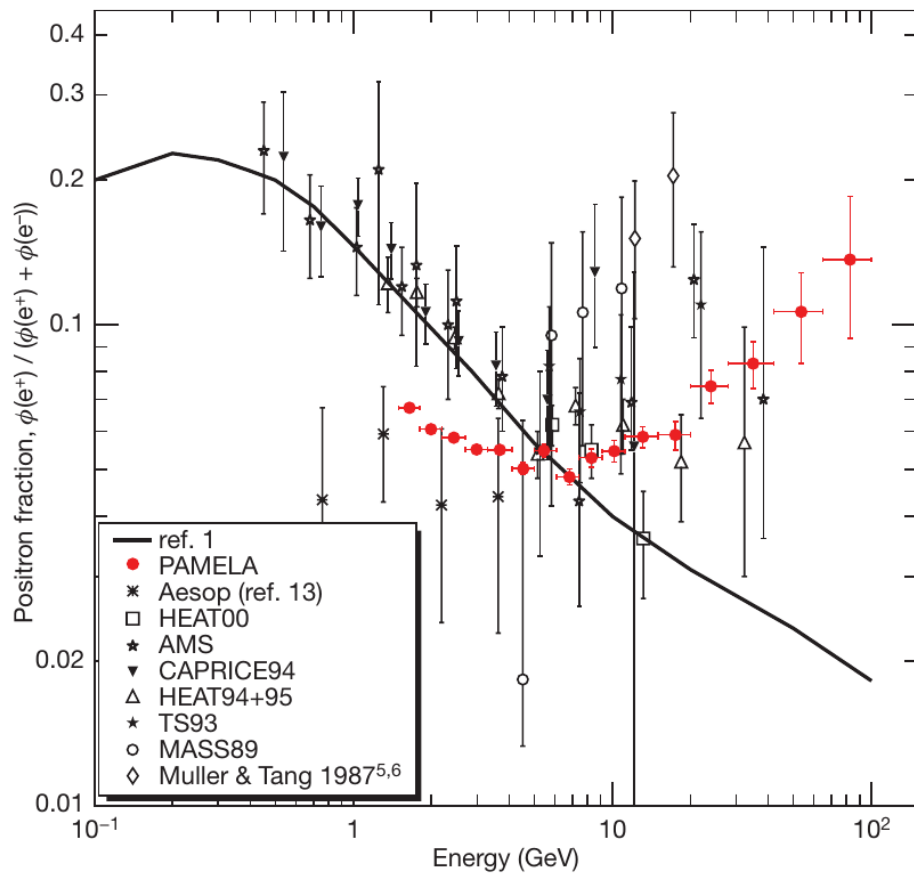


Нет измерений изотопного состава за ^{32}Ge

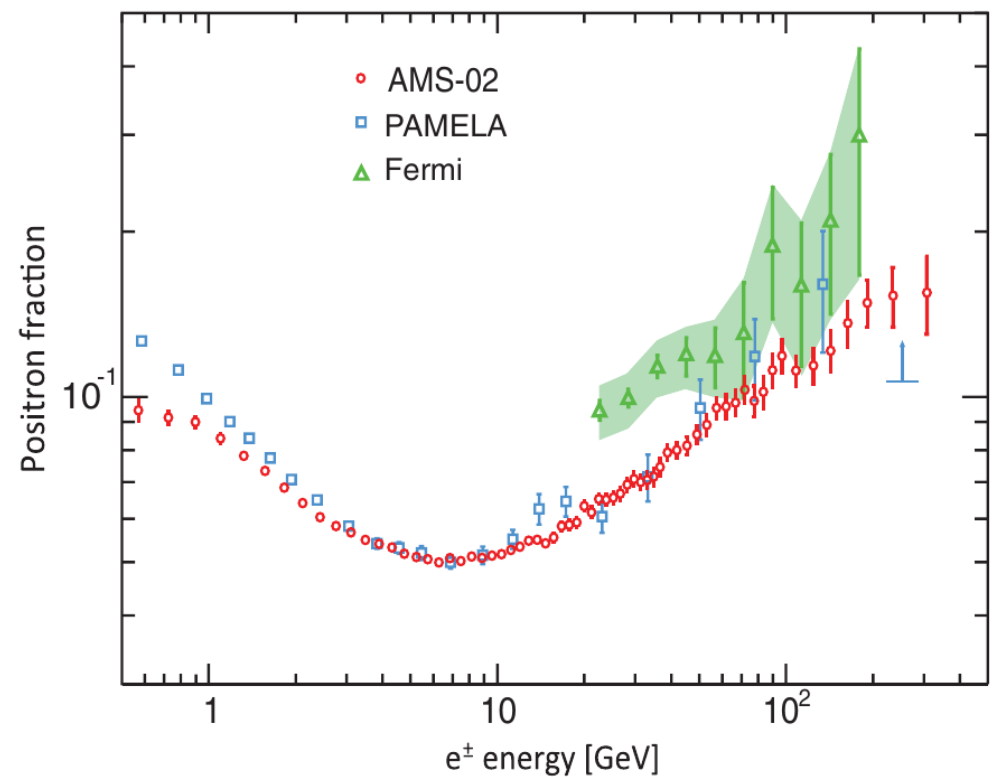
Электроны и позитроны

e^+/e^- : PAMELA, Fermi-LAT, AMS02 (2009 - 2013)

Vol 458 | 2 April 2009 | doi:10.1038/nature07942

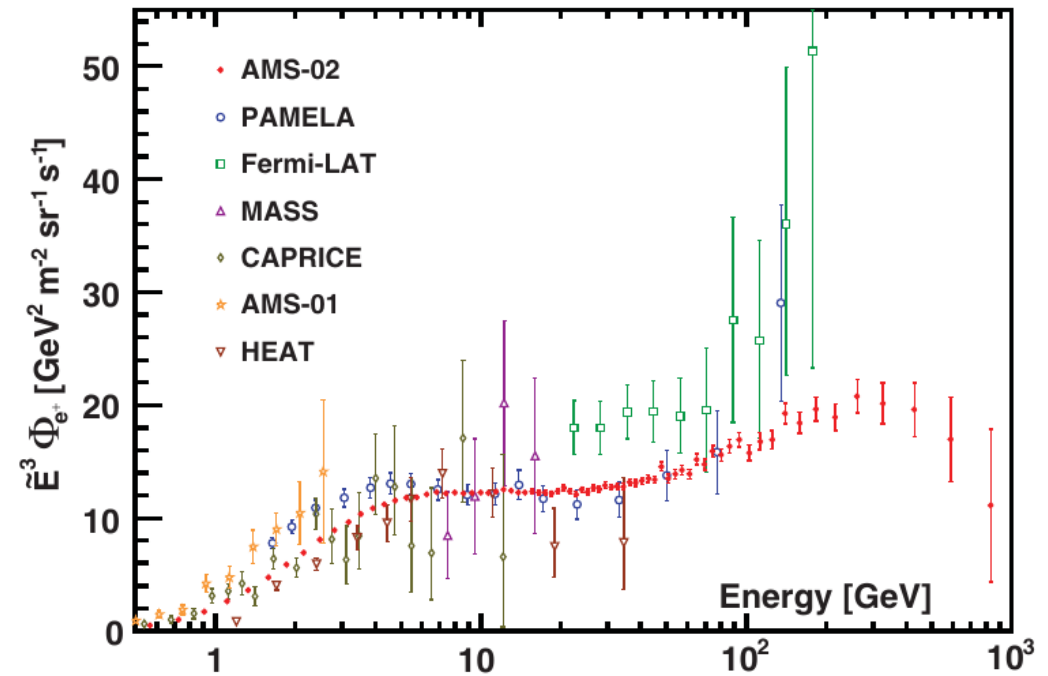
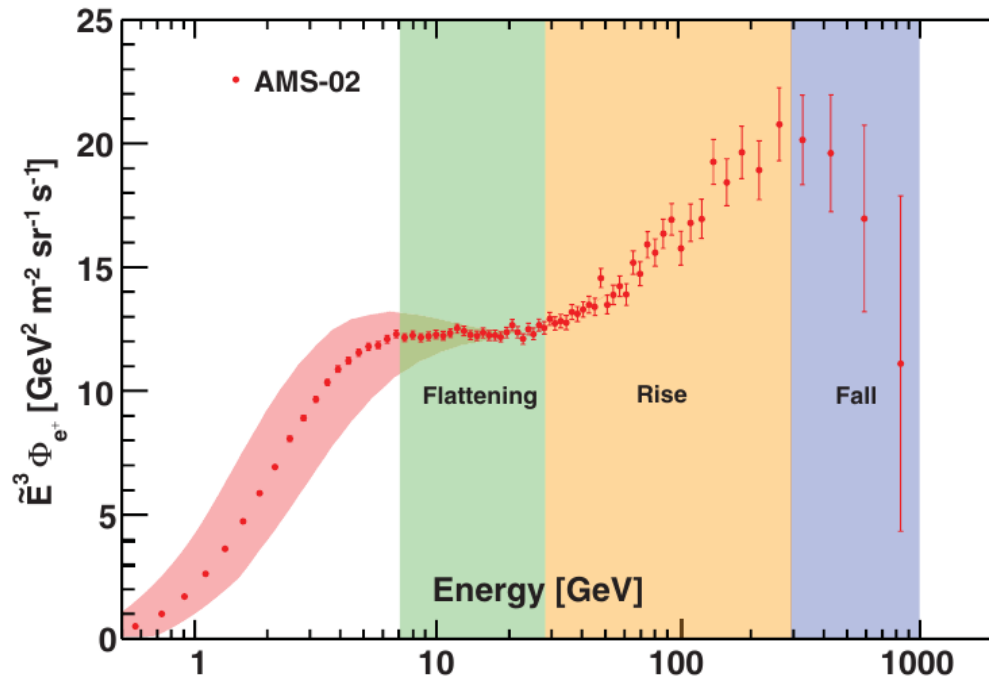


PRL 110, 141102 (2013)



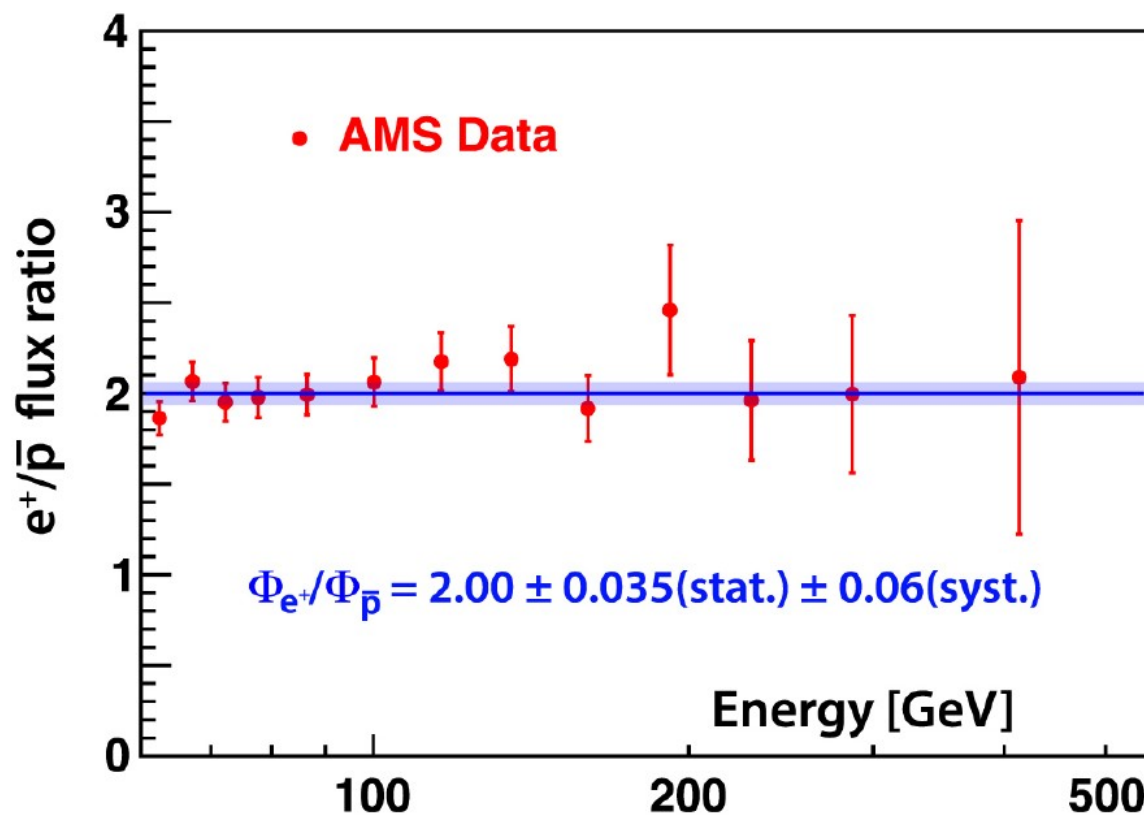
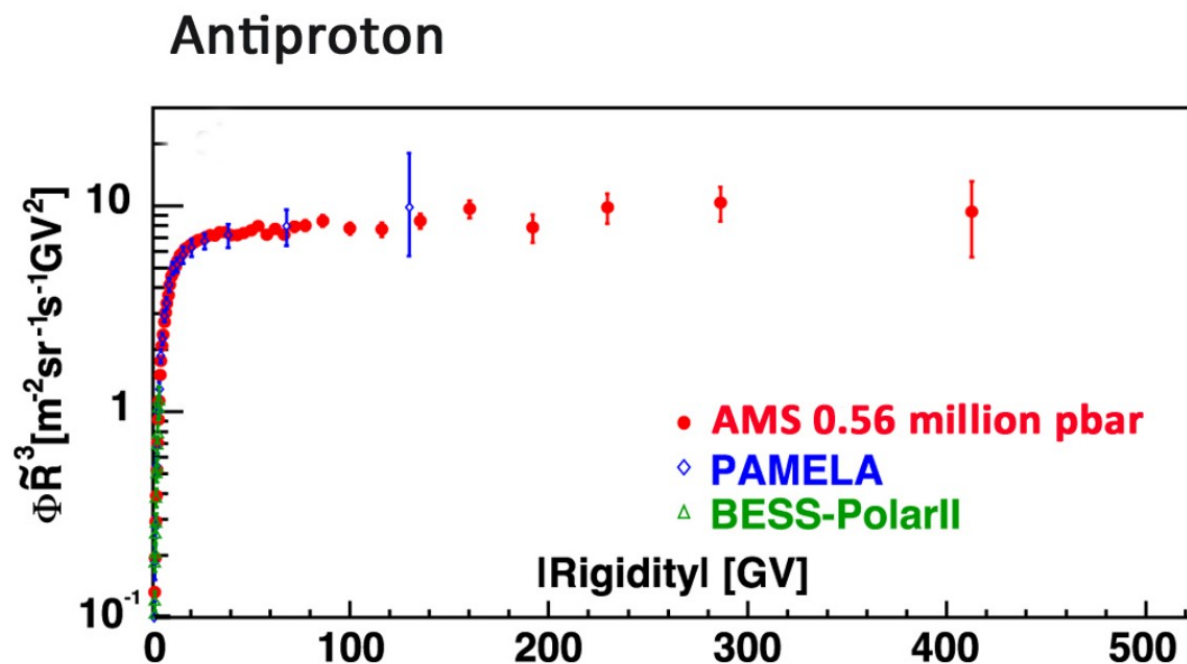
AMS-02: Загиб спектра позитронов (2019)

PHYSICAL REVIEW LETTERS 122, 041102 (2019)



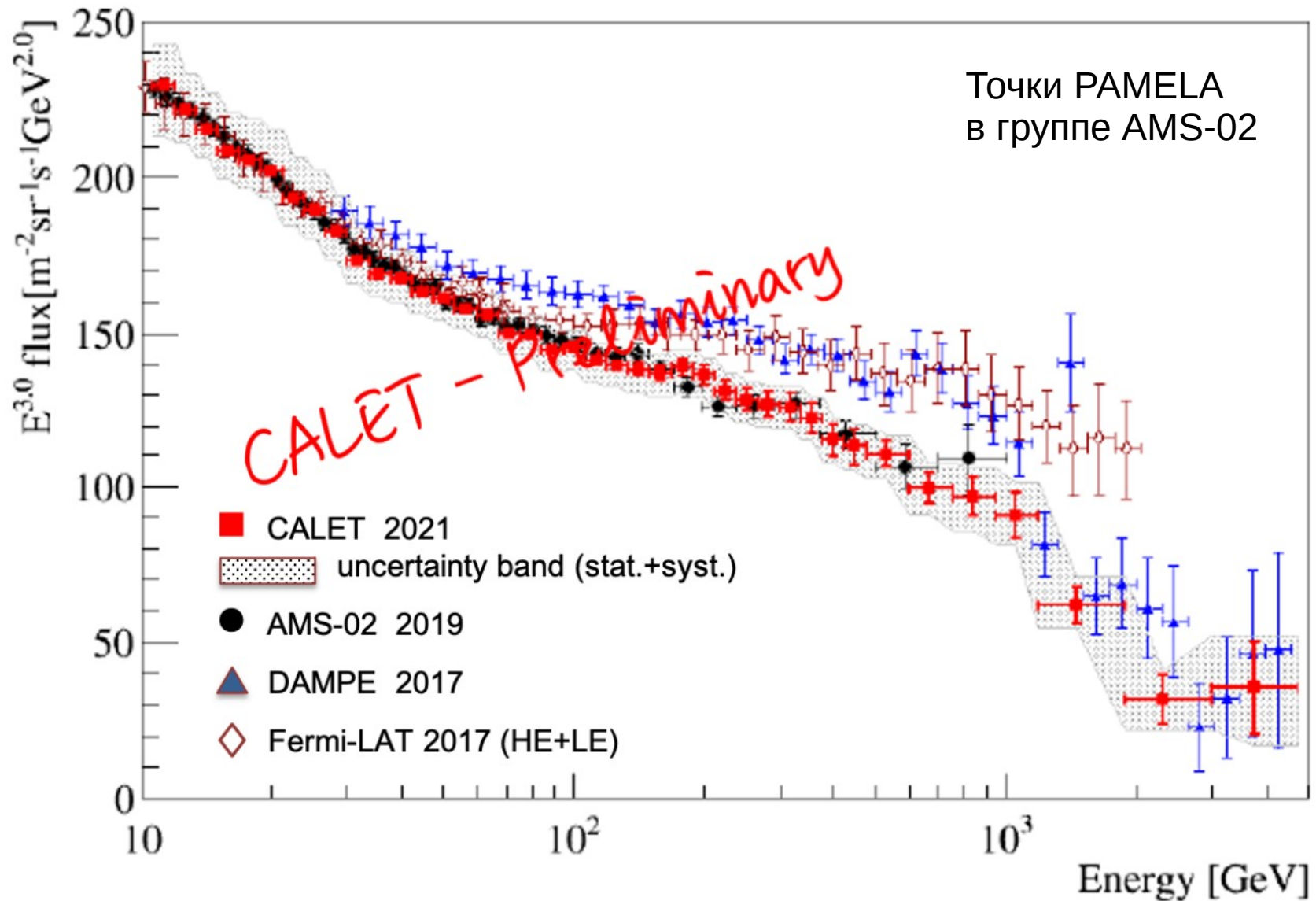
AMS-02 Антипротоны и позитроны ICRC(2021)

PoS (ICRC2021)016



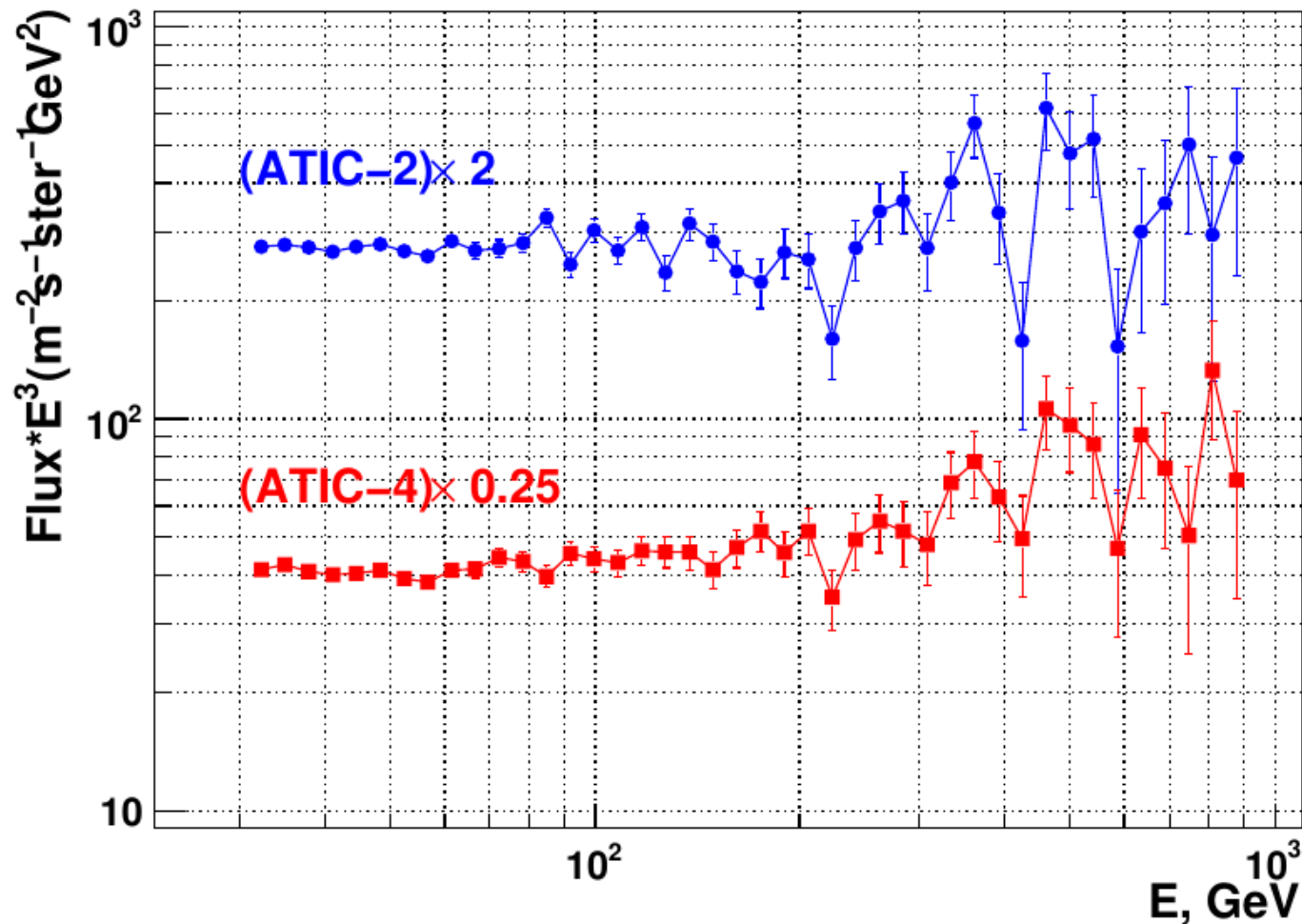
$e^- + e^+$: CALET (ICRC-2021)

PoS(ICRC2021)105



Загадка ATIC: тонкая структура спектра электронов.

Astrophys. Space Sci. Trans., 7, 119-124, 2011



Для проверки результата требуется:

1. Энергетический биннинг не грубее 8% на бин
2. Измерения в южной околополярной области.

Ни один эксперимент после ATIC это не обеспечил

Выводы:

1. Необходимо существенное увеличение статистики в сочетании с прецизионным измерением энергии для спектров ядер в диапазоне энергий от ~ 100 ГэВ до нескольких сот ТэВ на частицу для детального изучения тонкой структуры спектров в этой области энергий (ОЛВЭ).
2. Необходим выход прямых экспериментов в область колена Куликова-Христиансена (ОЛВЭ).
3. Необходимы новые эксперименты для сверхтяжелых ядер КЛ для существенного улучшения статистики зарядового спектра получения вовсе отсутствующих данных по изотопному составу (НУКЛОН-2).
4. Необходимо получение спектров электронов в существующих экспериментах с энергетическим бинингом не более 8% на точку спектра и, в особенности, для южной околополярной области неба.

СПАСИБО!