

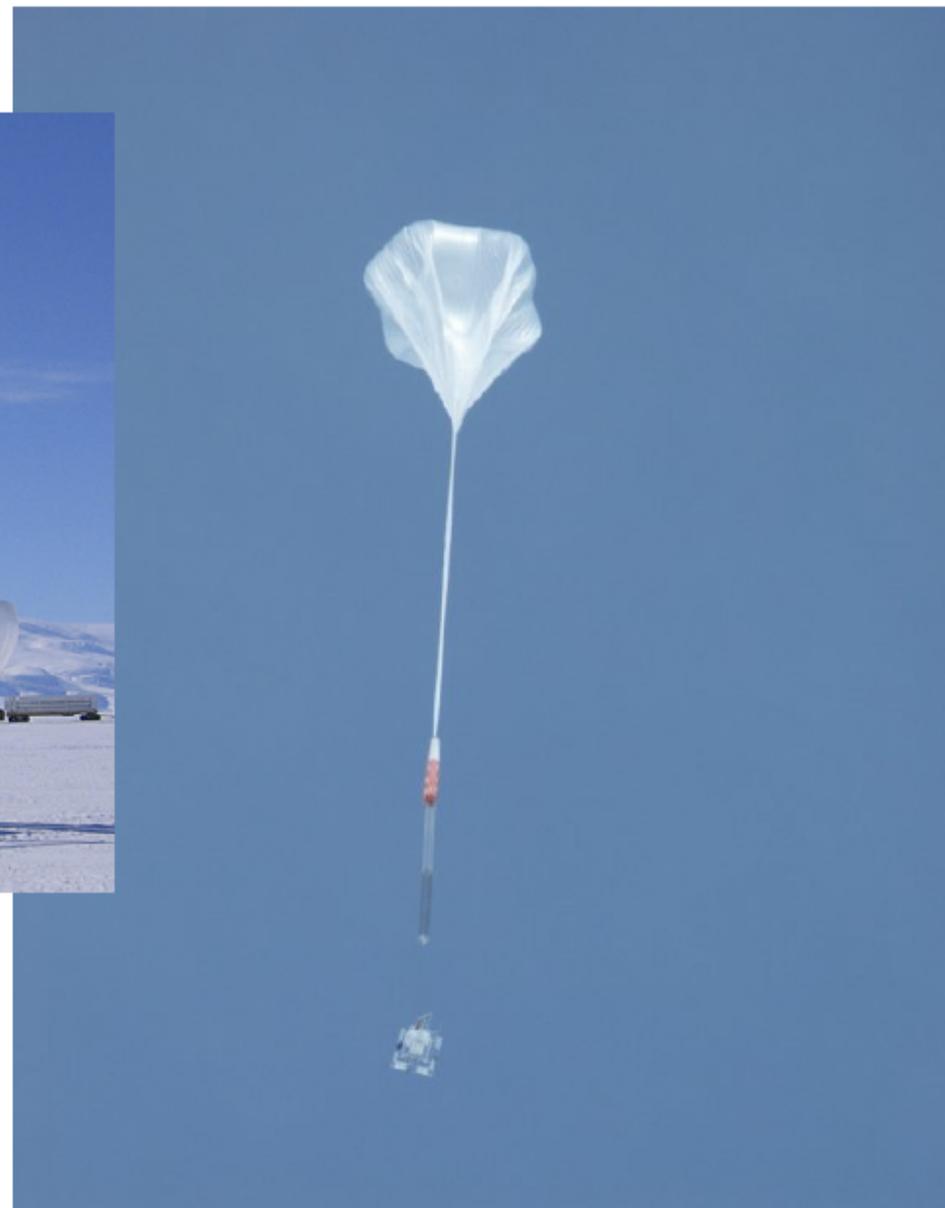
# **Спектры обильных ядер в источниках по данным эксперимента АТЭС.**

А.Д. Панов, В.И. Зацепин, Н.В. Сокольская.

# Спектрометр АТІС

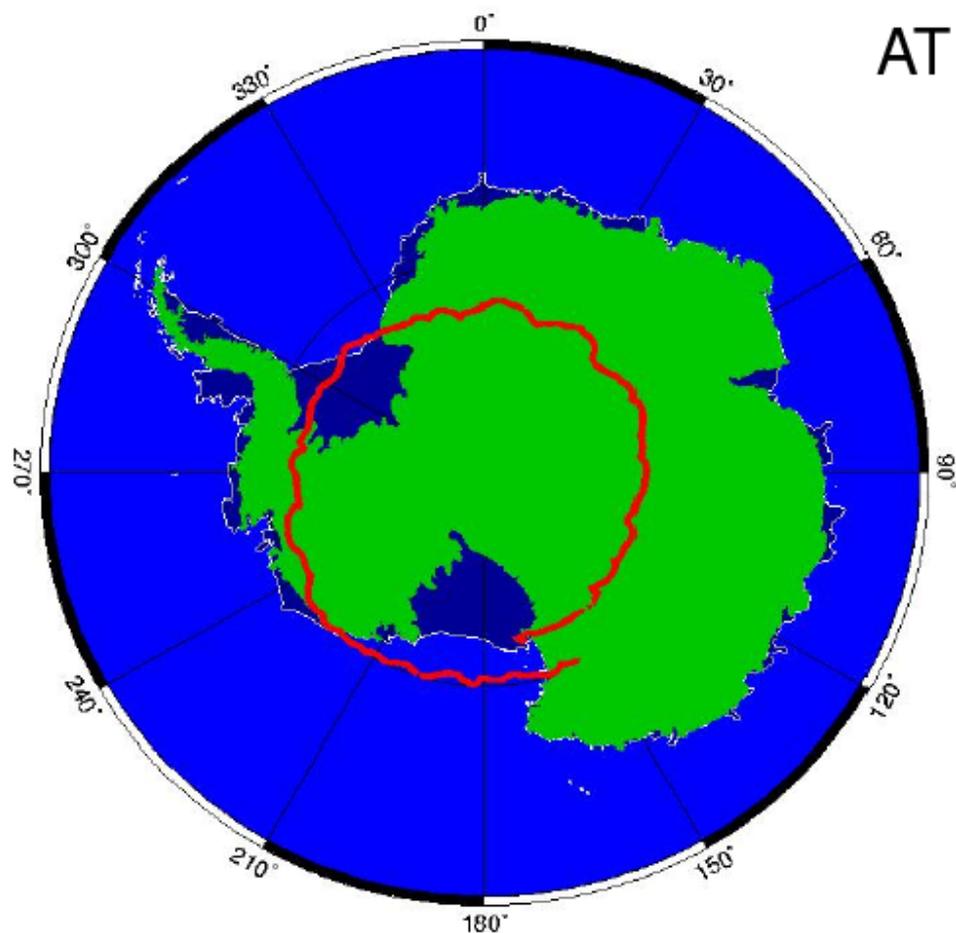


**На старте**



**В полете**

# Полеты АТІС



АТІС-2

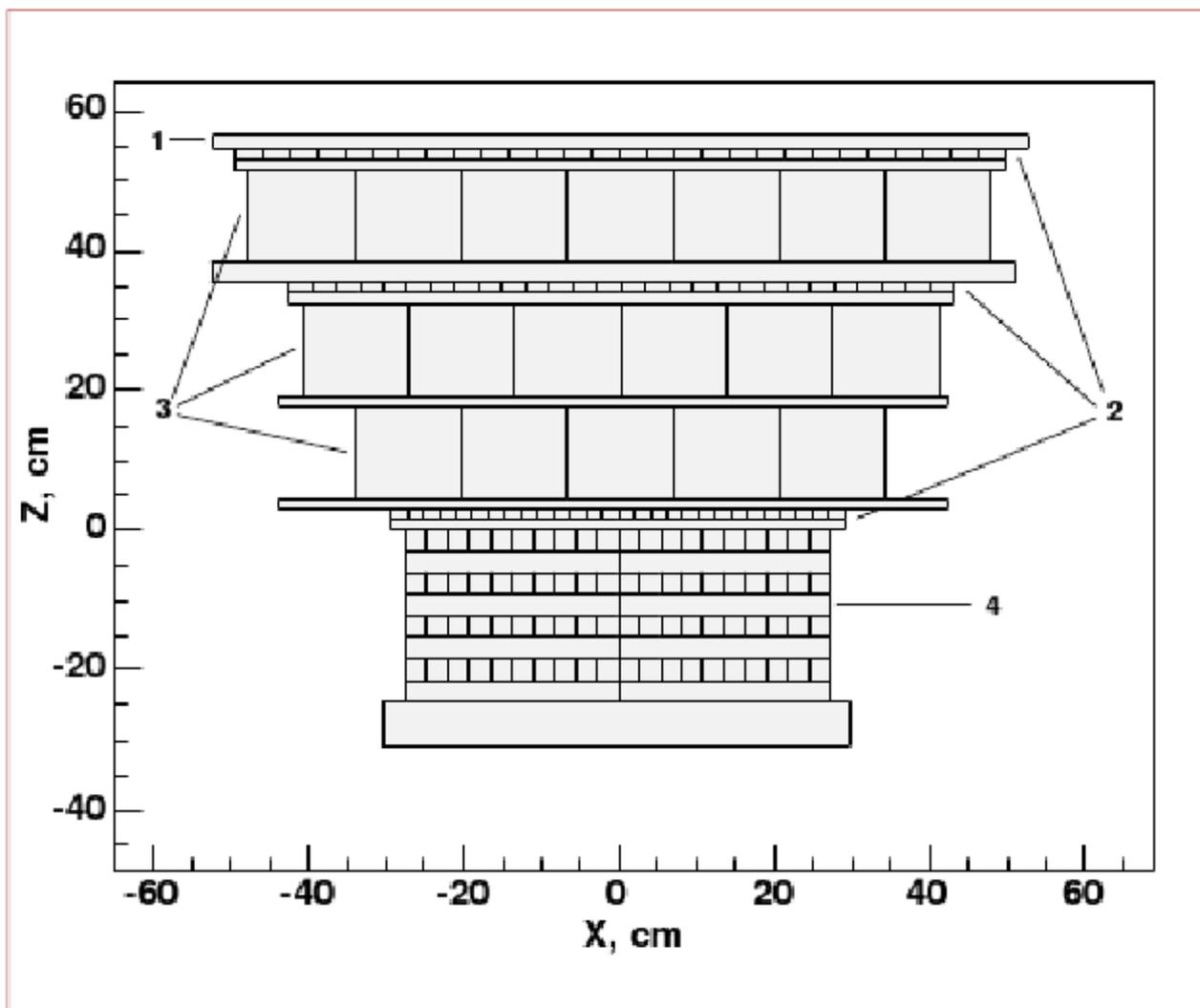
АТІС-1 28.12.2000–13.01.2001

АТІС-2 29.12.2002–18.01.2003

АТІС-3 2005 - неудачно

АТІС-4 26.12.2007–15.01.2008

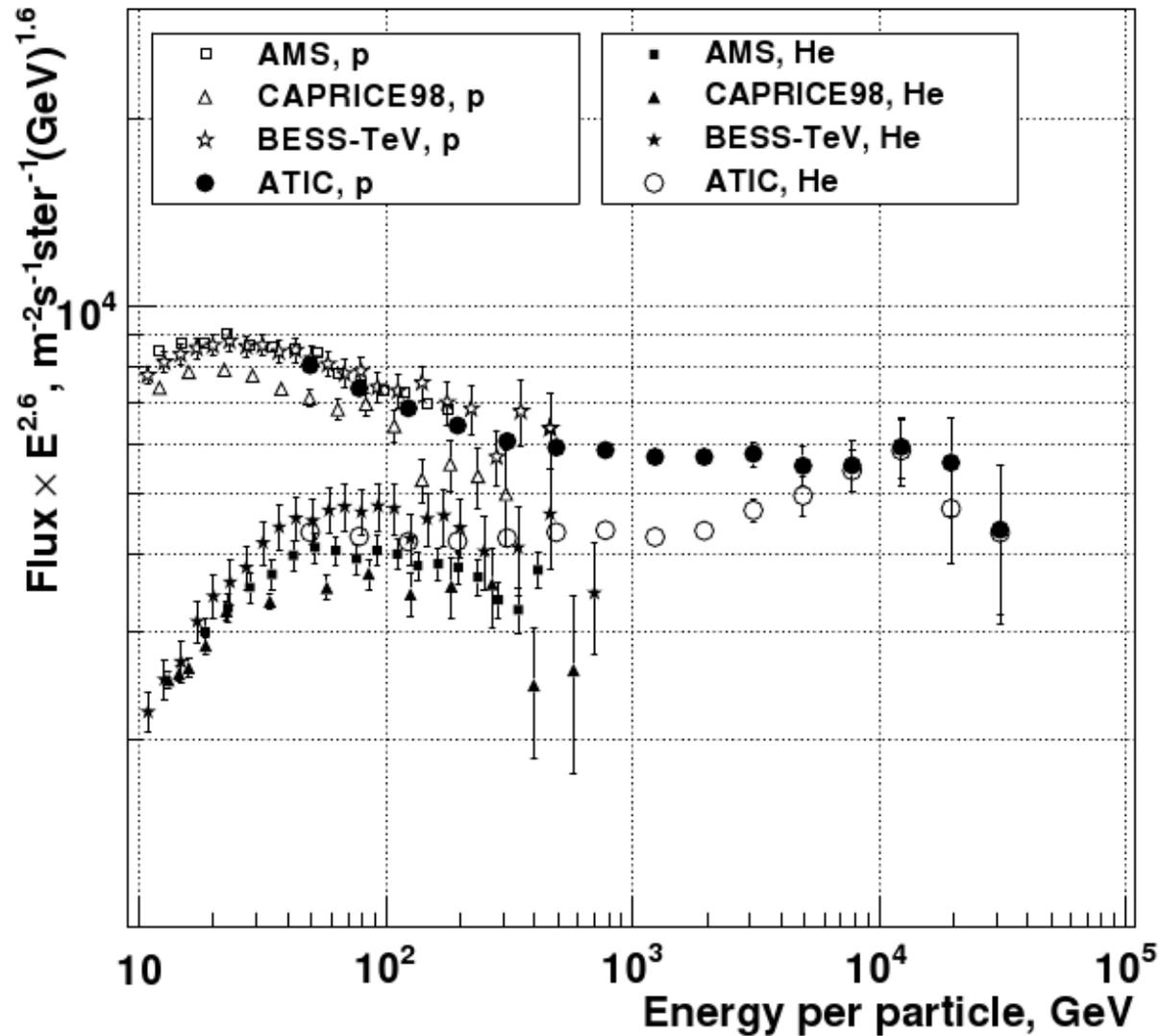
# Спектрометр АТІС



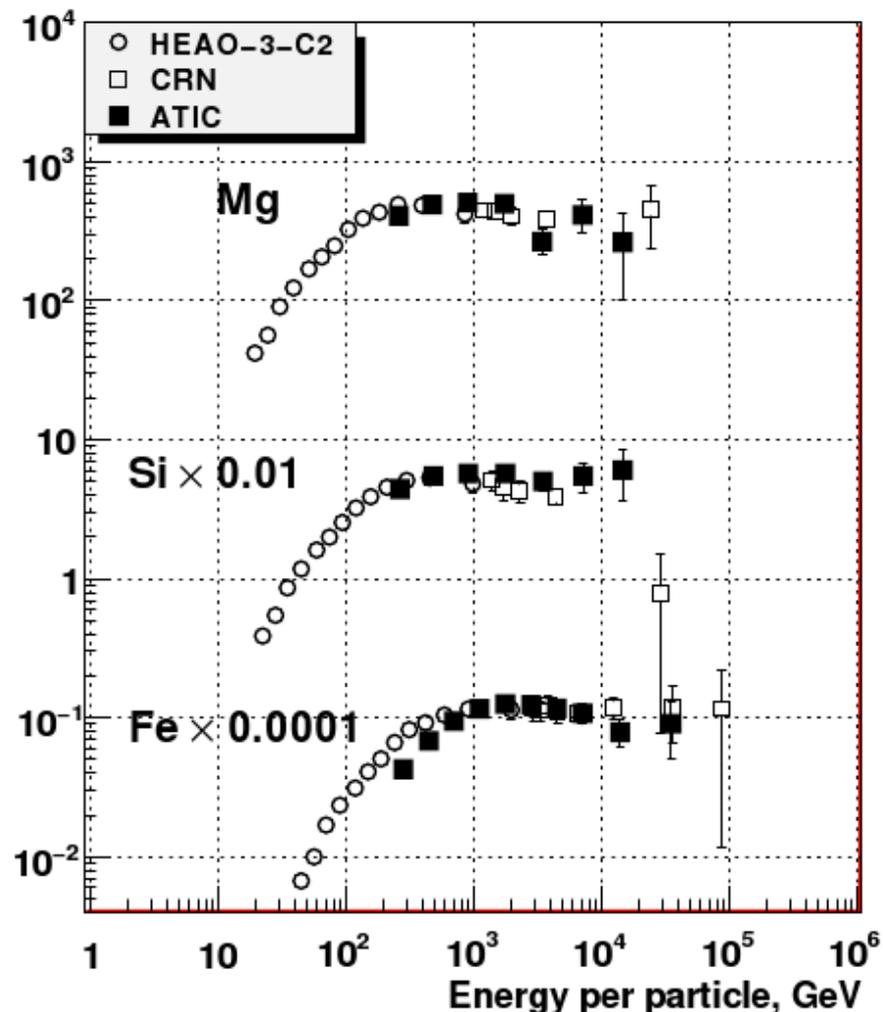
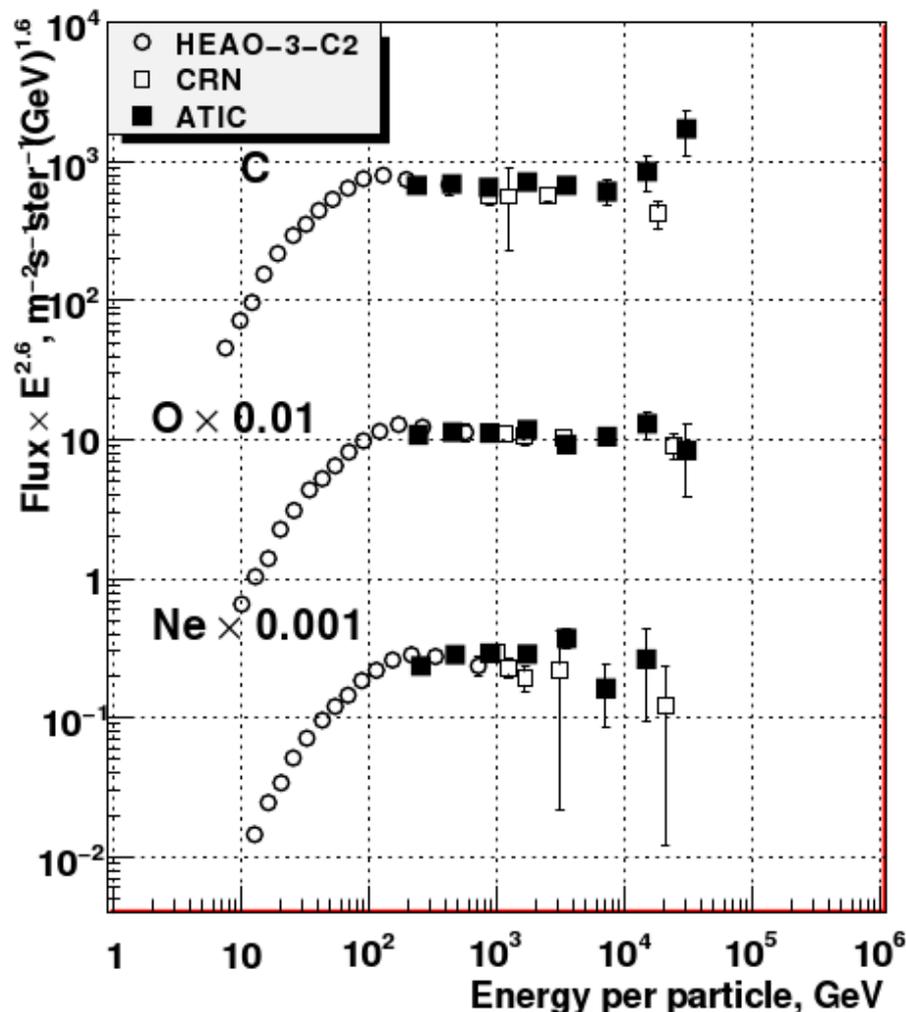
Ядра от протонов до железа,  
50 GeV — 100 TeV  
Геомфактор  $\sim 0.2 \text{ м}^2 \text{ стер}$

- 1 — Кремниевая матрица  
4480 пикселей  
 $1.5 \times 2 \text{ см}^2$
- 2 — Сцинтилляционный  
калориметр. 6 слоев,  
стрипы  $1 \times 2 \text{ см}^2$
- 3 — Графитовая мишень  
 $0.7 \lambda_p, 1.4X_0$
- 4 — BGO-калориметр  
8 слоев по  
40 кристаллов  
 $2.5 \times 2.5 \times 25 \text{ см}^3$   
 $1.1 \lambda_p, 18X_0$

# Результаты ATIC по спектрам обильных ядер: протоны и гелий (энергия на частицу)



# Результаты ATIC по спектрам обильных ядер: тяжелые ядра (энергия на частицу)



Все спектры измерены в одном эксперименте по единой методике  
 $\Rightarrow$  сравнение спектров методически очень надежно

## Спектры жесткости обильных ядер в источнике

- $M(E) \Rightarrow M(R)$  - тривиальное преобразование  
 $M(R) = \hat{P}Q(R)$  - интегральный оператор  
 $Q(R) = \hat{P}^{-1}M(R)$  - решение интегрального уравнения

### Модель (приближение) leaky-box для обильных ядер

$$M(R) = \frac{1}{\rho v} \frac{1}{1/\lambda_{esc}(R) + 1/\lambda_N} Q(R)$$

$$Q(R) = \rho v \left( \frac{1}{\lambda_{esc}(R)} + \frac{1}{\lambda_N} \right) M(R)$$

$\lambda_{esc}(R) = 34.1 R^{-0.6}$  J.J. Engelmann, et al. A&A, 233(1990)96  
HEAO-3-C2, эксперимент, В/С

$\lambda_{esc}(R) = 4.2(R/R_0)^{-1/3}[1 + (R/R_0)^{-2/3}]$ ,  $R_0 = 5.5$  ГВ

J. L. Osborne, V. S. Ptuskin, Sov. Astron. Lett. V.14(2), 1988, P.132-134  
аппроксимация аналитического решения ур-я диффузии  
с доускорением и колмогоровской турбулентностью

# Аппроксимация численных решений GALPROP моделью leaky-box

V. Ptuskin, O. Strelnikova and L. Sveshnikova. *Astropart. Phys.* 31(2009)284

$$\lambda_{esc}(R) = 19\beta^3(R/3 \text{ ГВ})^{-0.6}, \quad R > 3 \text{ ГВ}$$

Простейшая степенная модель (plain model)

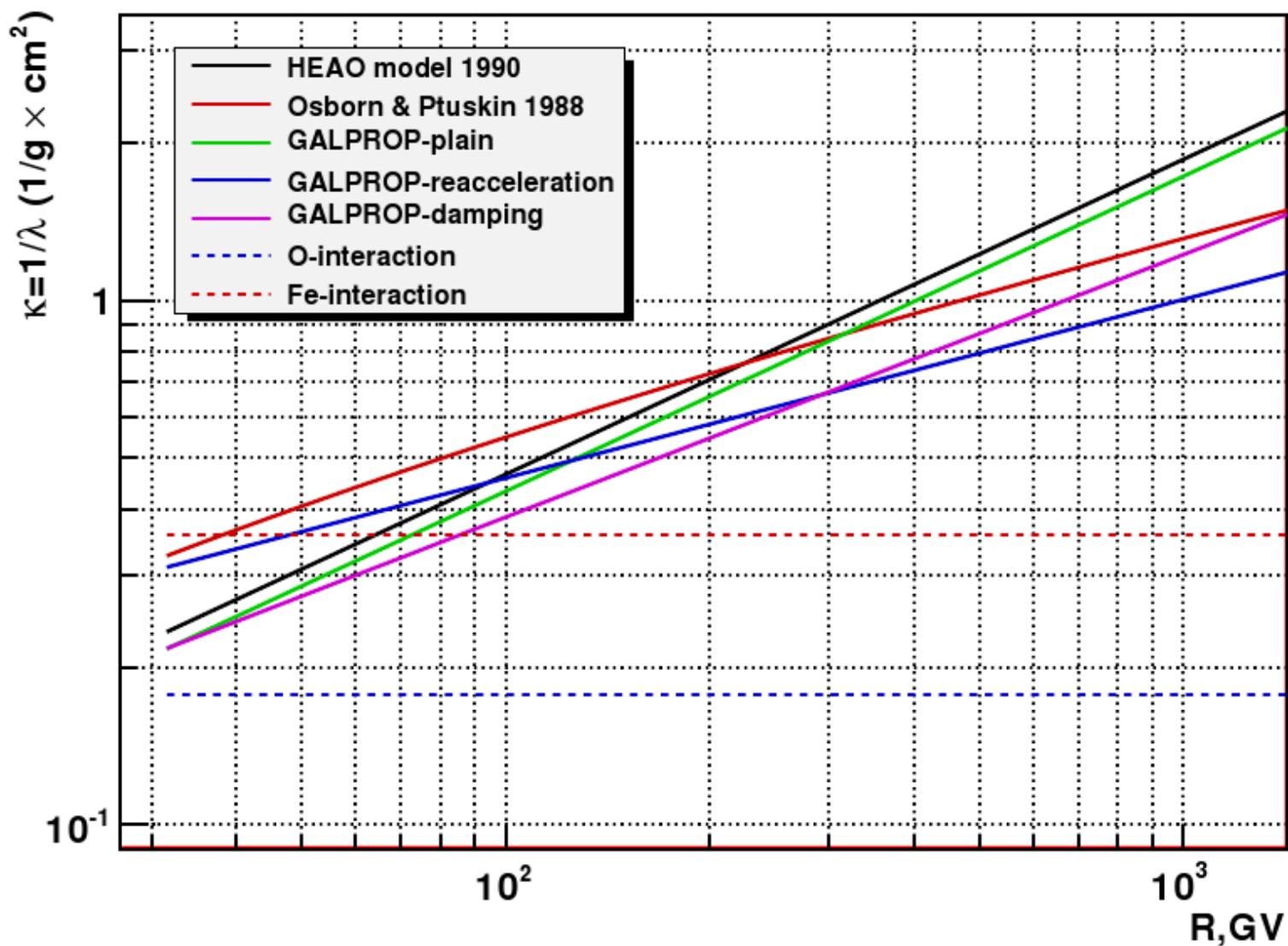
$$\lambda_{esc}(R) = 7.2\beta^3(R/3 \text{ ГВ})^{-0.34}, \quad R > 40 \text{ ГВ}$$

Модель с доускорением (reacceleration model)

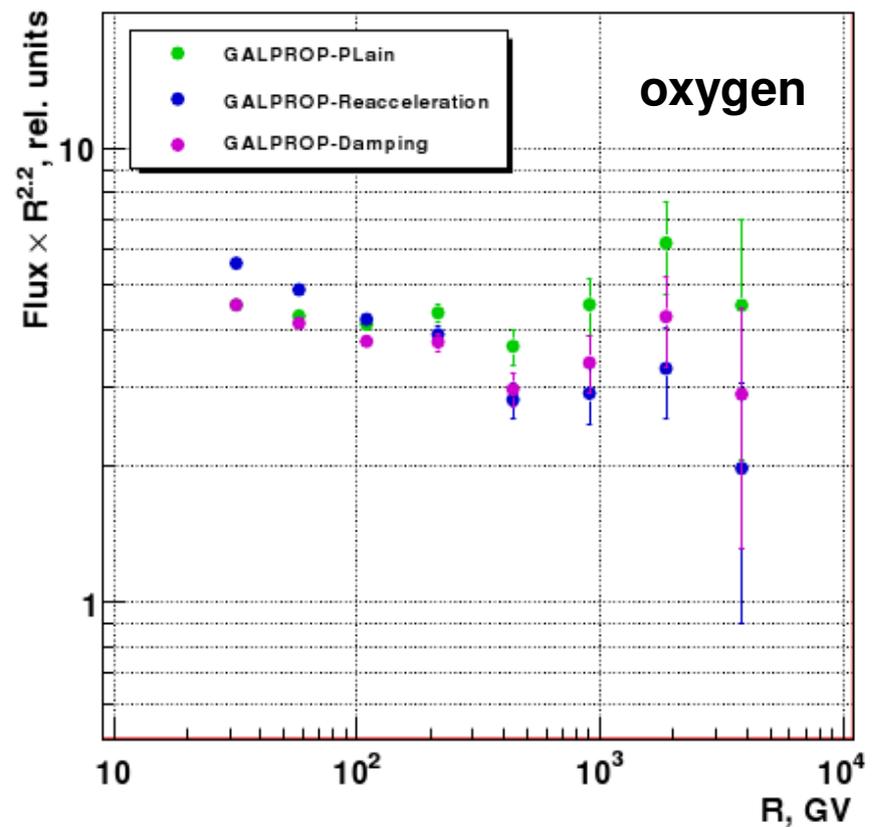
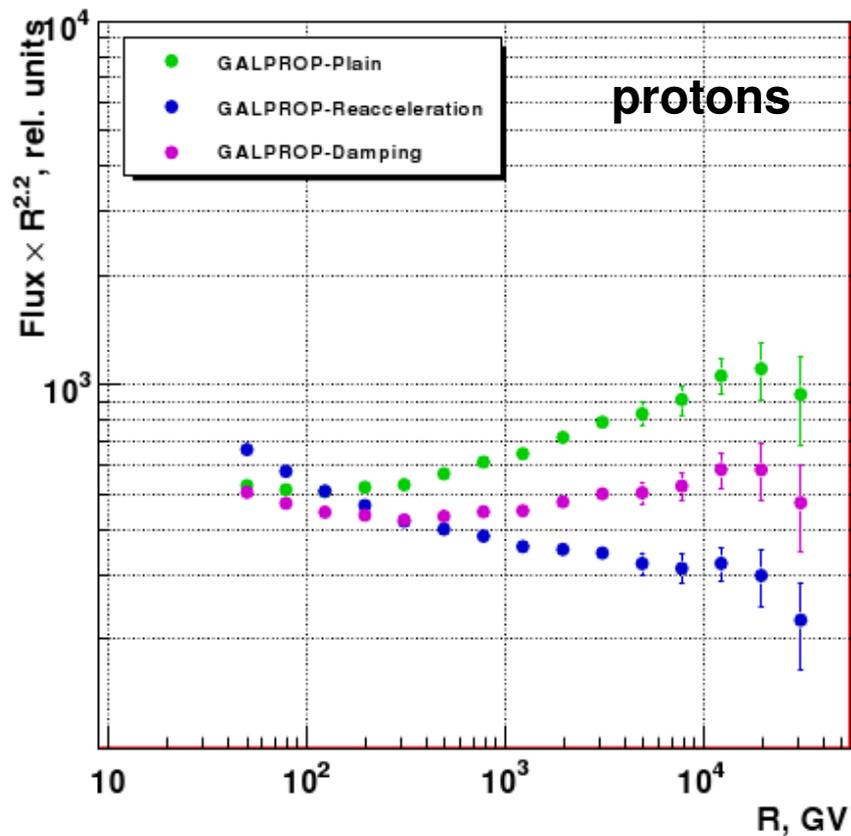
$$\lambda_{esc}(R) = 13\beta^3(R/3 \text{ ГВ})^{-0.5}, \quad R > 10 \text{ ГВ}$$

Нелинейная модель с демпфированием (damping model)

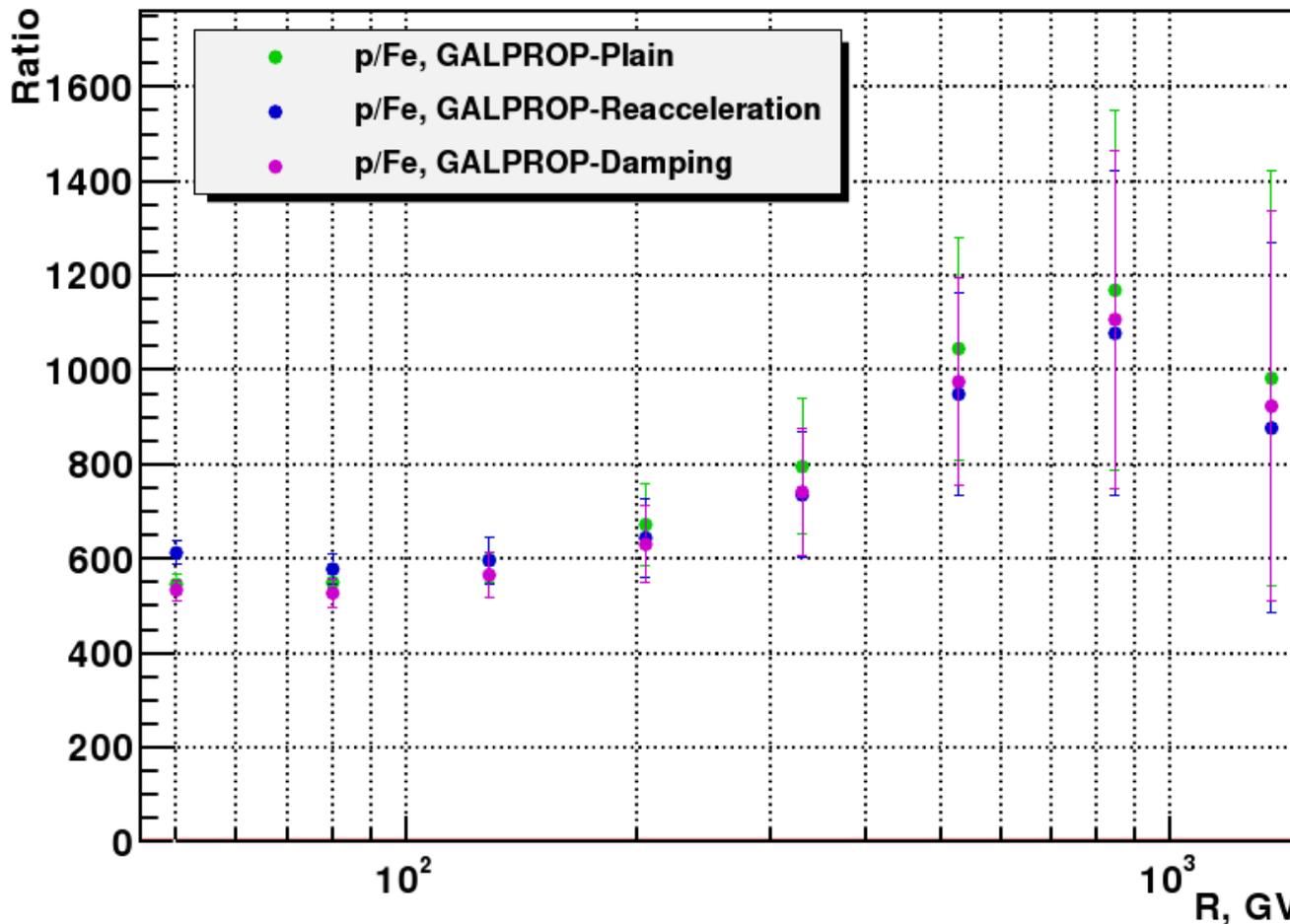
# Разные модели распространения



# Результат для первичного спектра жесткости СИЛЬНО ЗАВИСИТ ОТ МОДЕЛИ



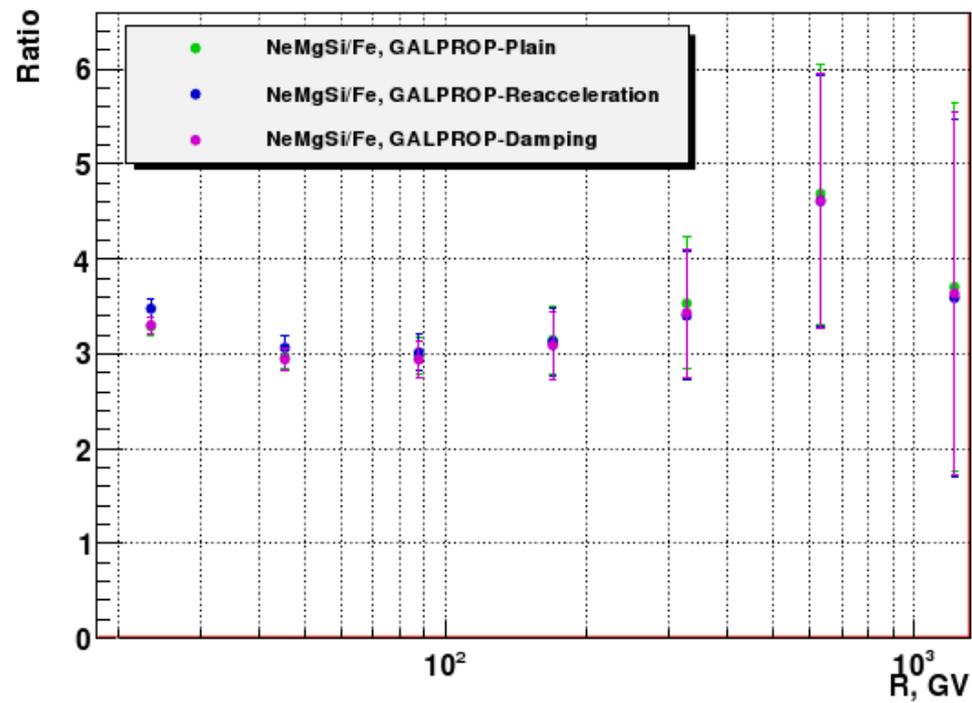
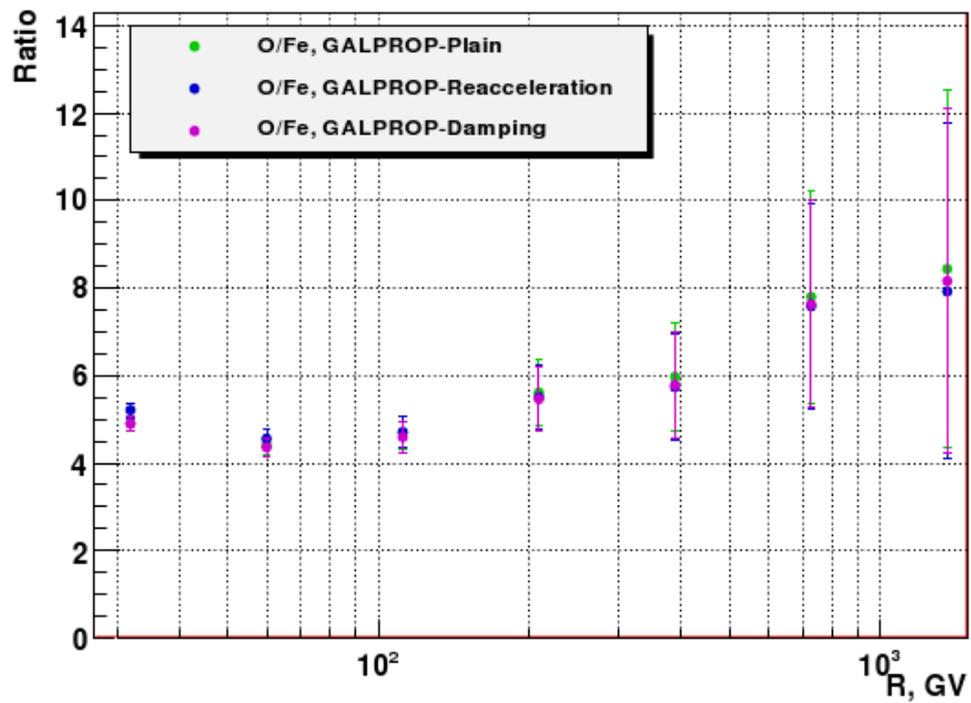
# Сравнение формы спектров жесткости в источнике является почти модельно-независимым



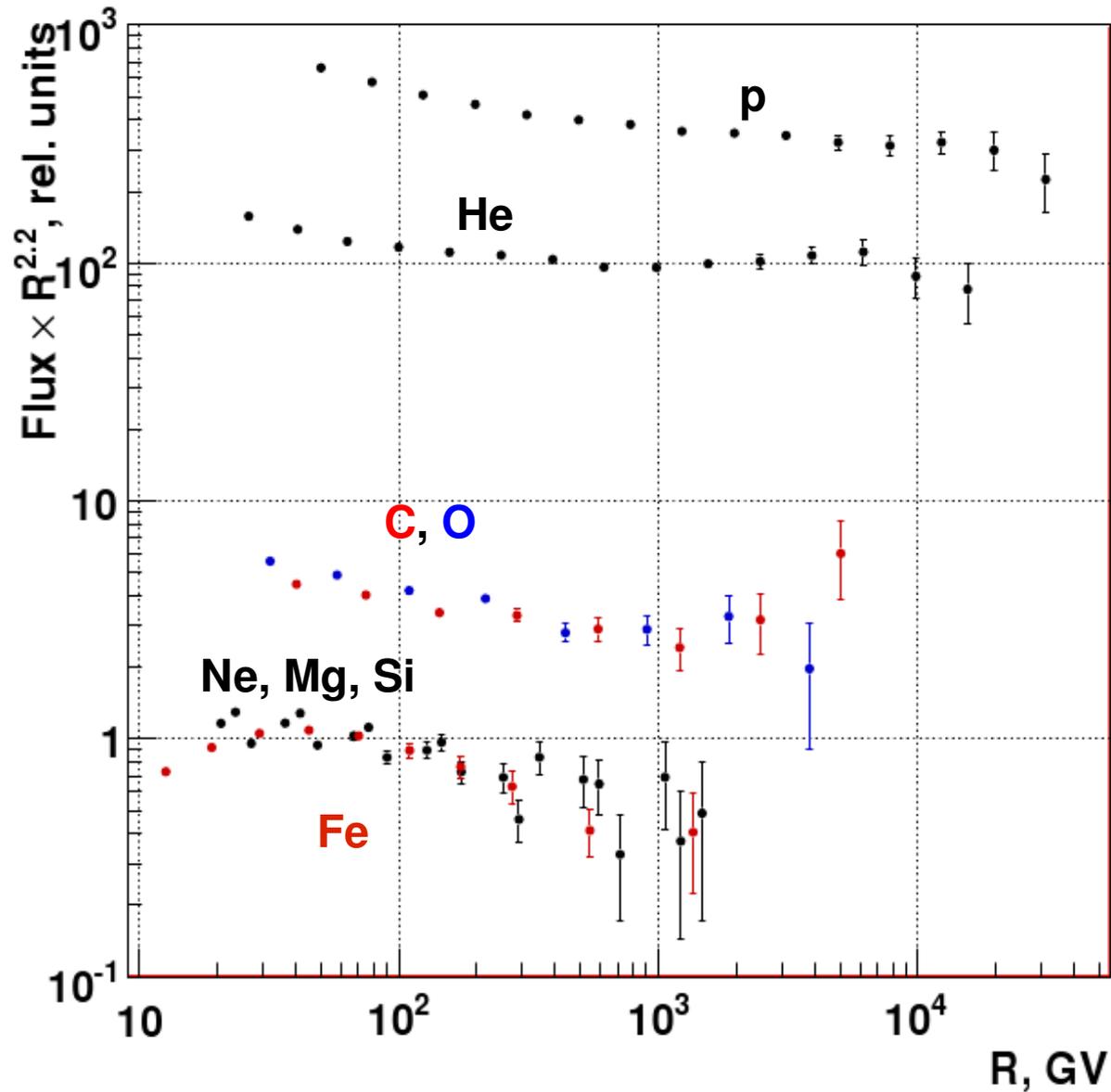
Отличие формы отношения от константы не является статистически значимым по критерию  $\chi^2$

**Отношение p/Fe наиболее модельно зависимо по сравнению с другими парами**

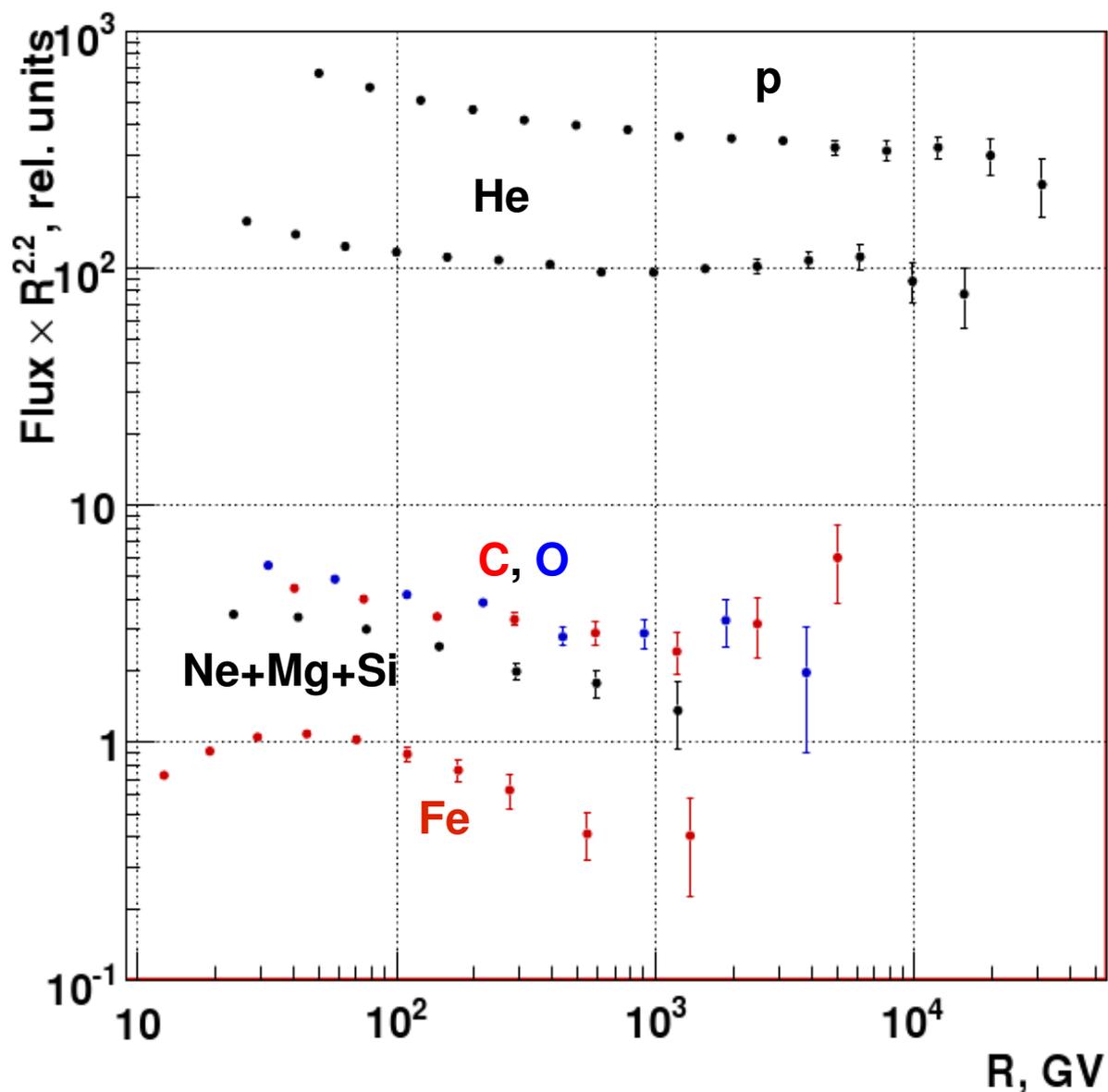
# Чем меньше разница зарядов, тем слабее модельная зависимость отношения



# Спектры p, He, C, O, Ne, Mg, Si, Fe в источнике в модели GALPROP-Reacceleration

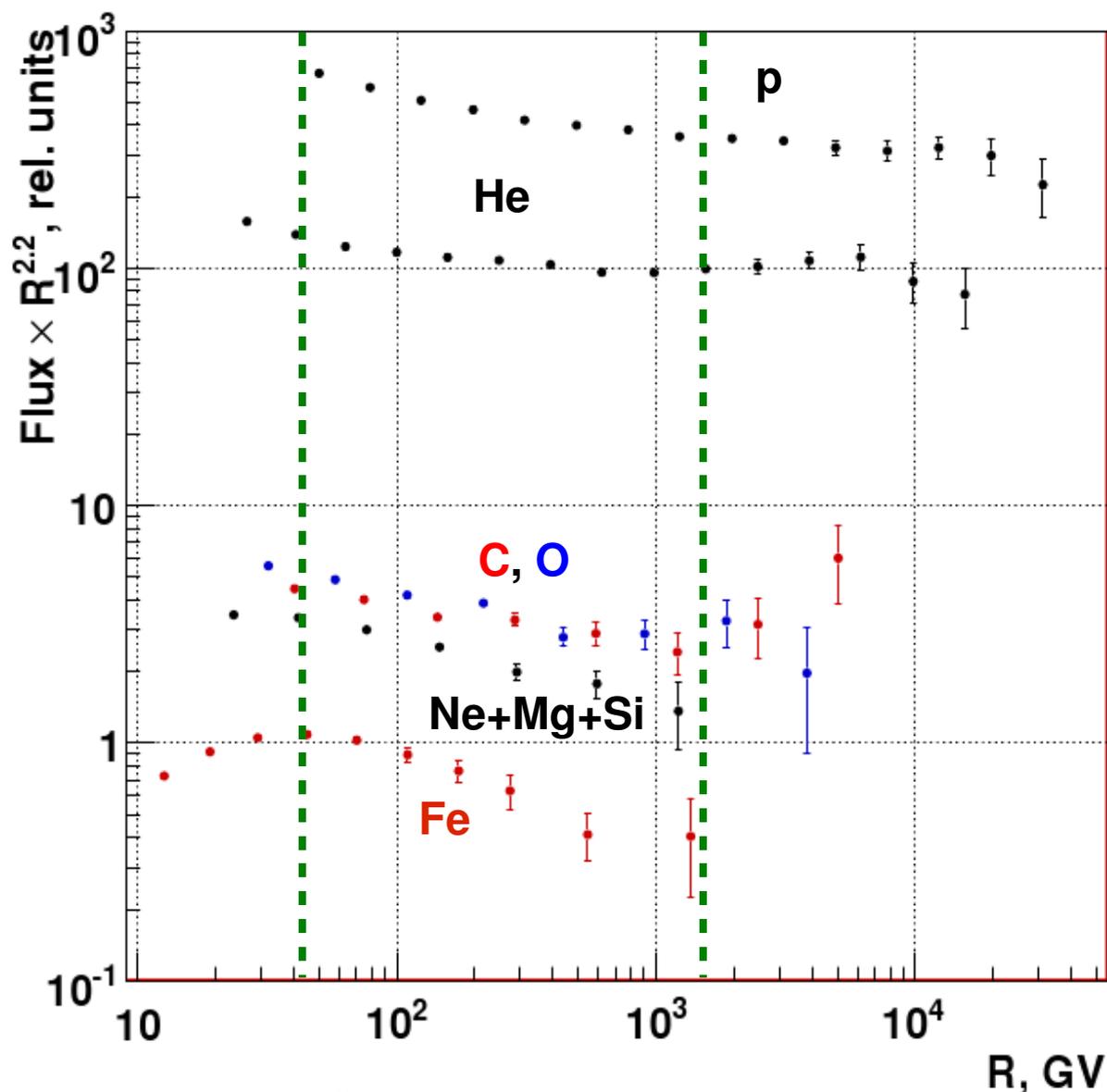


# Спектры p, He, C, O, Ne, Mg, Si, Fe в источнике в модели GALPROP-Reacceleration. Ne, Mg, Si объединены



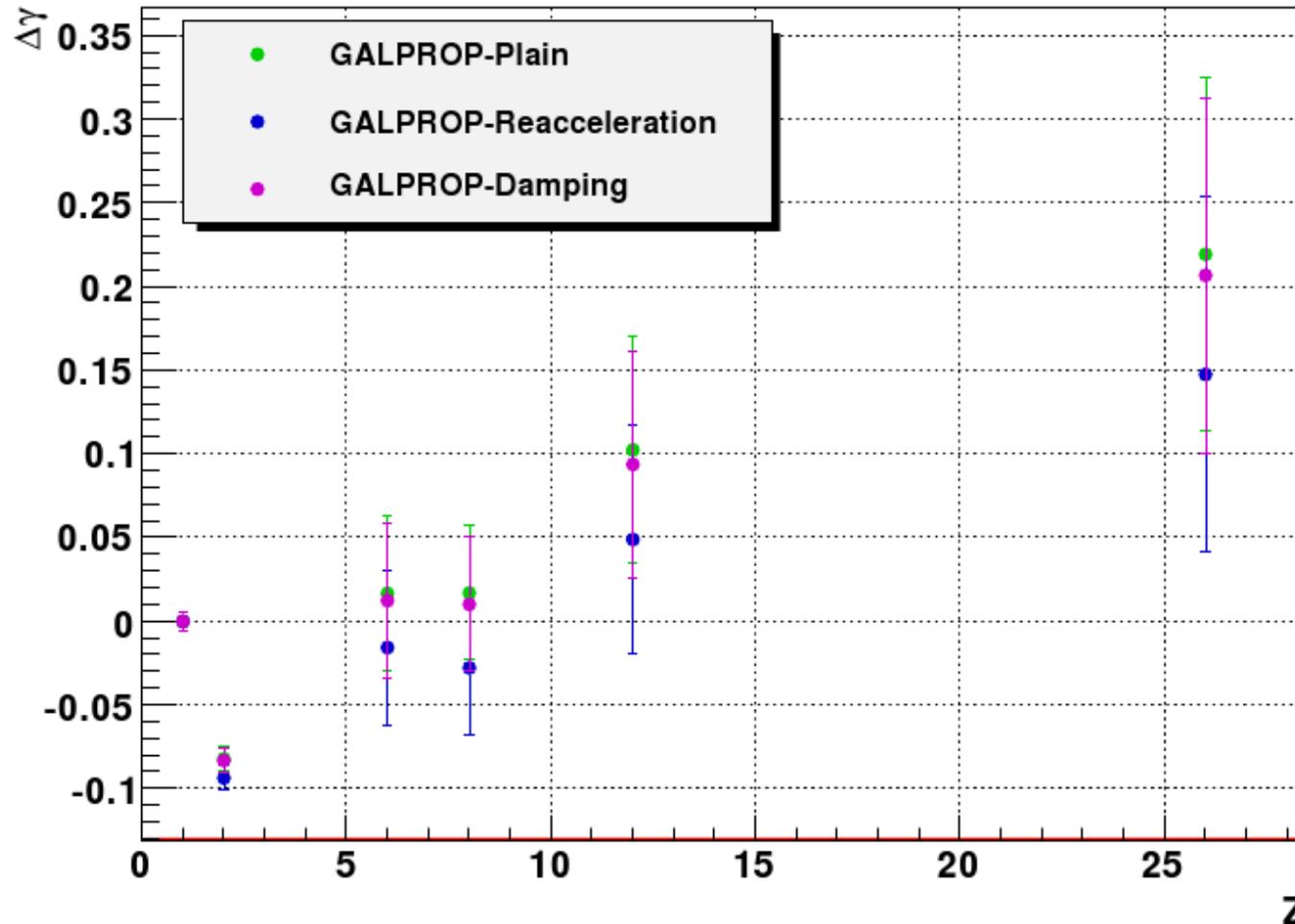
Всего имеется  $6 \times (6-1)/2 = 15$  отношений спектров

# Спектры p, He, C, O, Ne, Mg, Si, Fe в источнике в модели GALPROP-Reacceleration. Ne, Mg, Si объединены



Общий диапазон магнитной жесткости для сравнения наклонов спектров  
50-1350 ГВ

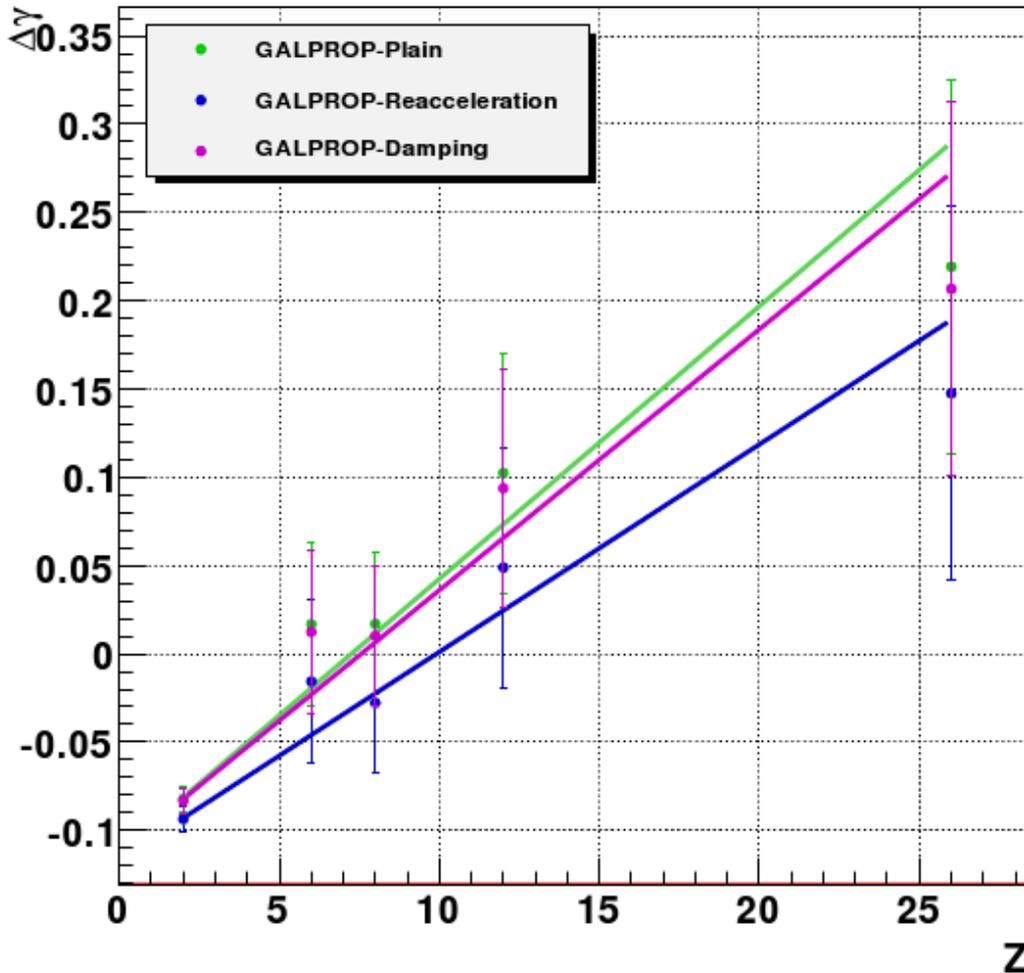
# Показатели степеней спектров (крутизна) относительно протонов имеют слабую модельную зависимость



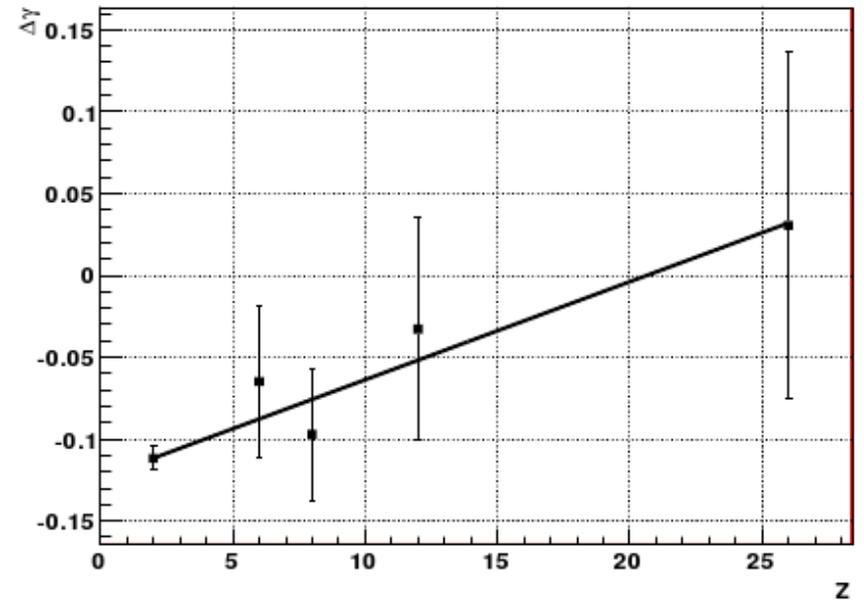
1. Спектры протонов и гелия имеют достоверно разные наклоны в источниках, результат модельно независим, статистическая значимость очень высока.

$$\Delta\gamma \approx 0.09 \pm 0.1, \text{ для } 50 \text{ ГВ} < R < 1350 \text{ ГВ}$$

# Тренд в показателях спектров для ядер от гелия до железа



В наблюдаемых спектрах жесткости статистически значимого тренда нет

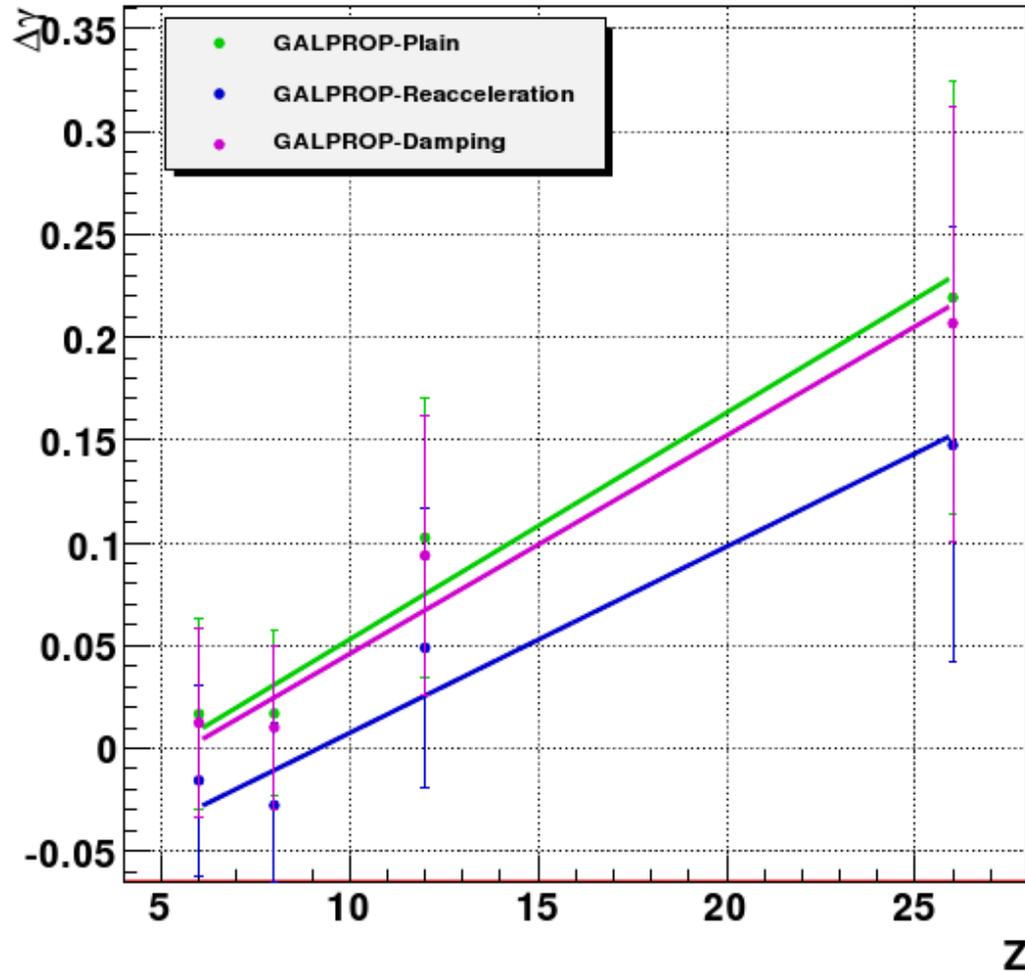


$$k = (5.99 \pm 3.19) \times 10^{-3} \approx 1.9\sigma$$

2. Имеется достоверный тренд в зависимости спектрально индекса от заряда для ядер от He до Fe: от  $3.7\sigma$  до  $4.8\sigma$  (в зависимости от модели).

**Проблема: Есть ли физический смысл в объединении He и тяжелых ядер?**

# Тренд в показателях спектров для ядер от углерода до железа



3. Статистическая значимость тренда в группе ядер от С до Fe составляет от  $1.63\sigma$  до  $1.99\sigma$  (в зависимости от модели):  
Имеется указание на существование тренда, надо проверить.

## Обсуждение

Три разных (основных) типа источника или (и) три существенно разные пространственно-временные области в источниках (гетерогенность) могут отвечать за ускорение трех групп ядер:

1. **Протоны** — Сверхновые типа 1a, ускорение на переднем фронте ударной волны в невозмущенной межзвездной среде, обогащенной водородом
2. **Гелий** — Звезды Вольфа-Райе, ускорение в межзвездной среде, сильно обогащенной гелием звездного ветра.
3. **Тяжелые ядра от углерода до железа** — Взрывы сверхновых типа 1c, когда оболочка предсверхновой обеднена не только водородом, но и гелием (в оболочке остаются одни тяжелые элементы). Ускорение вещества оболочек предсверхновой на обратной ударной волне

**Спасибо за внимание!**