

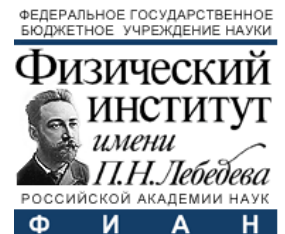
# Распространение космических лучей в гало Галактики с учетом возбужденных ими волн

**Д.О. Чернышов (ФИАН)**

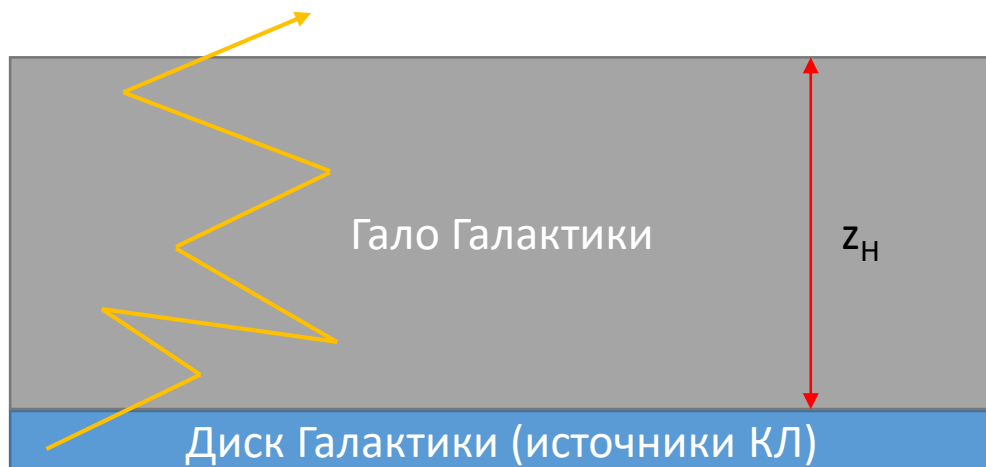
В.А. Догель (ФИАН), А.В. Ивлев (МРЕ), С.М. Ко (NSU)



ВККЛ - 2020



# “Классическое” гало



Гинзбург (1953)  
Гизбург & Сыроватский (1964)  
Syrovatskii (1959)  
Bulanov et al. (1972, 1976)  
Ptuskin (1972, 1974)  
Ginzburg et al. (1973)  
Bulanov and Dogel (1974)  
Hillas (1975)  
Jokipii (1966)  
Jokipii and Parker (1967)  
Gleeson and Webb (1974)  
Owens and Jokipii (1977)  
Lerche and Schlickeiser (1982)

.....

- По соотношению  $V/C$ ,  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  мы знаем характерное время жизни КЛ в Галактике
- При Колмогоровском спектре турбулентности размер гало не зависит от энергии  $\rightarrow 1 - 12$  кпк

(GALPROP, Moskalenko & Strong, 1998)

# Самосогласованная задача



НЕТ заранее заданного масштаба:  
Dogel' et al. (1993, 1994)

.....  
Evoli et al. (2018)

- Рассмотрим задачу, когда источники турбулентности находятся в диске, откуда волны уходят в гало
- КЛ рассеиваются на волнах и усиливают/гасят их
- Размер гало определяется физическими процессами, а не задан заранее
- Обязательно ДВА уравнения!

# Уравнения - турбулентность

$$\frac{\partial}{\partial z}(v_A W) - \frac{dv_A}{dz} \frac{\partial(kW)}{\partial k} = 2\Gamma W \quad W(k) \Big|_{z=0} = W_0 k^{-5/3}$$

Распространение  
волн

Адиабатическое  
расширение

неустойчивость

Турбулентность диска

- Рассматриваем распространение волн от диска Галактики с учетом их возбуждения КЛ
- В падающей плотности возникает «красное смещение» турбулентности – обратно каскаду

# Уравнения - КЛ

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( v_A N - D \frac{\partial N}{\partial z} \right) - \frac{1}{3} \frac{dv_A}{dz} \frac{\partial(pN)}{\partial p} = Q_0 p^{-2.3} \delta(z)$$

Конвекция + диффузия

Адиабатическое  
расширение

Источники в диске

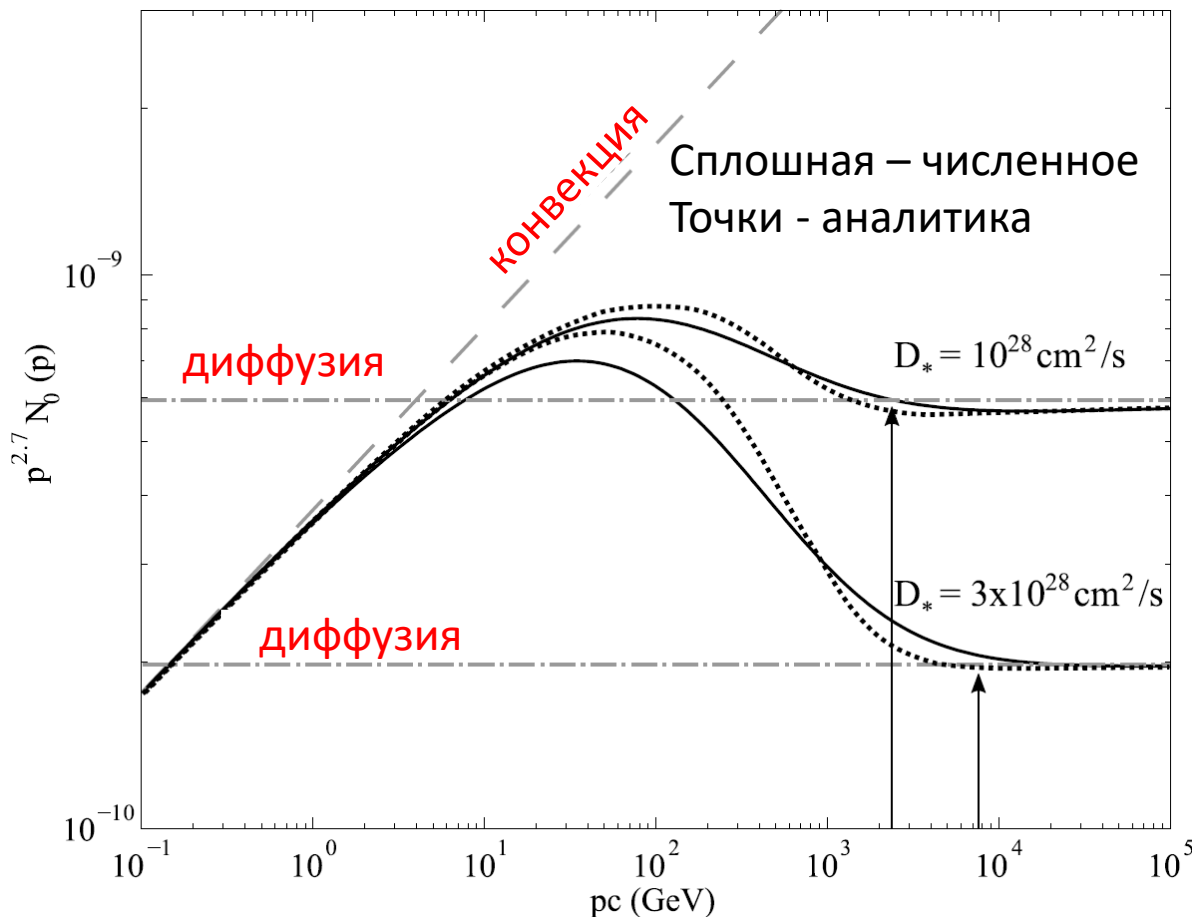
- Волны распространяются только в одном направлении – конвекция с альфвеновской скоростью
- Коэффициент диффузии определяется спектром турбулентности (см. предыдущий слайд)

# Упрощающие предположения



- 1D задача – нет поперечной диффузии. Только альфвеновские волны вдоль поля
- Нет источников турбулентности в гало => нет встречных волн (только от диска) => нет каскада
- Магнитное поле не меняется (характерный масштаб задачи меньше 5 кпк)
- Для аналитических решений считаем, что плотность экспоненциально падает с высотой

# Решение системы уравнений



$$n = n_0 e^{-z/z_n}$$

- Малые энергии – конвекция доминирует (гало нет!)

- Большие энергии – нет самовозбуждения, доминирует адиабатическое расширение волн

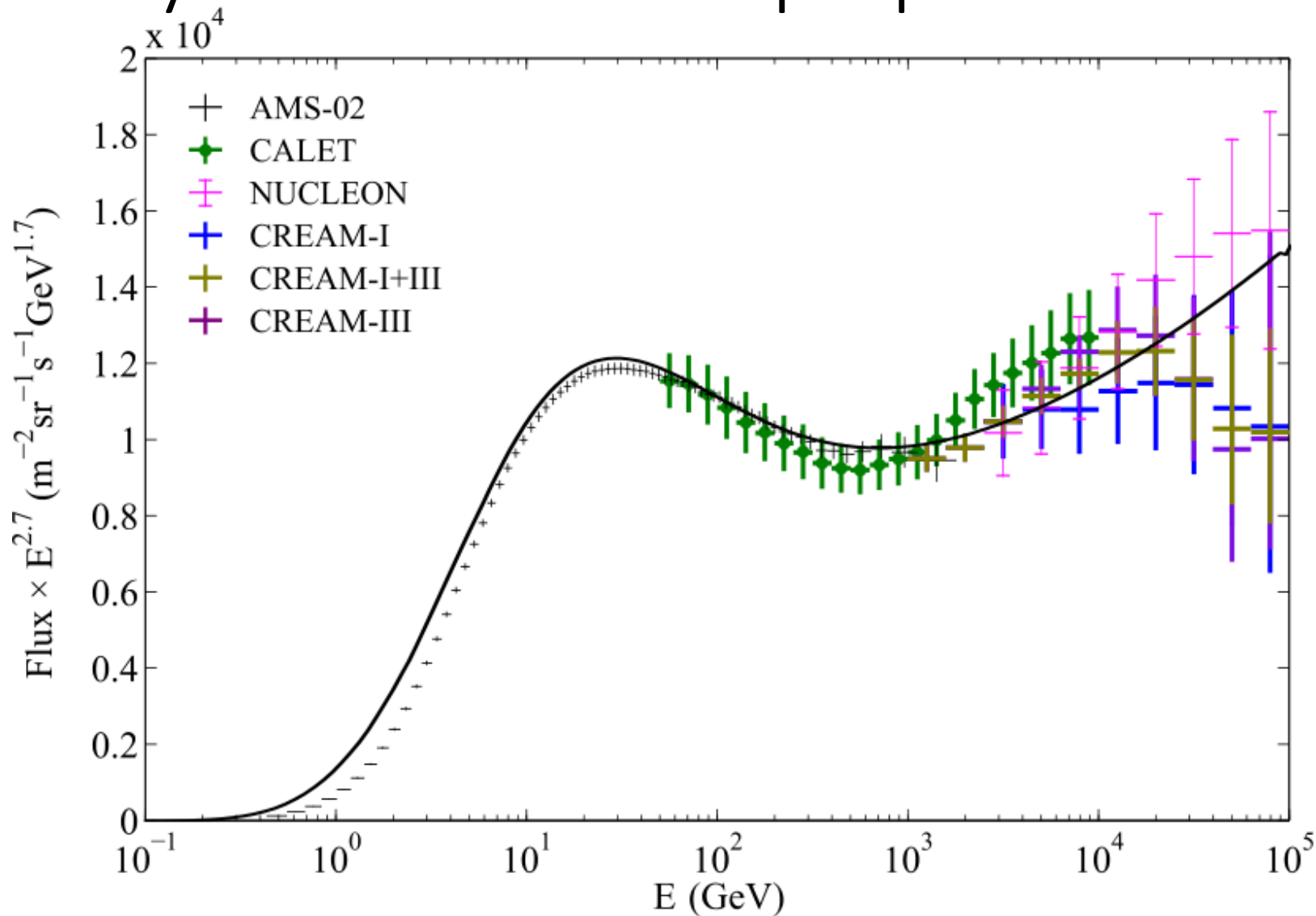
$$D \propto e^{-\alpha z/z_n} p^{2-\beta}$$

$$N \propto e^{-\beta z/2z_n} p^{-\gamma-\beta+2}$$

Решение совпадает со статическим гало!

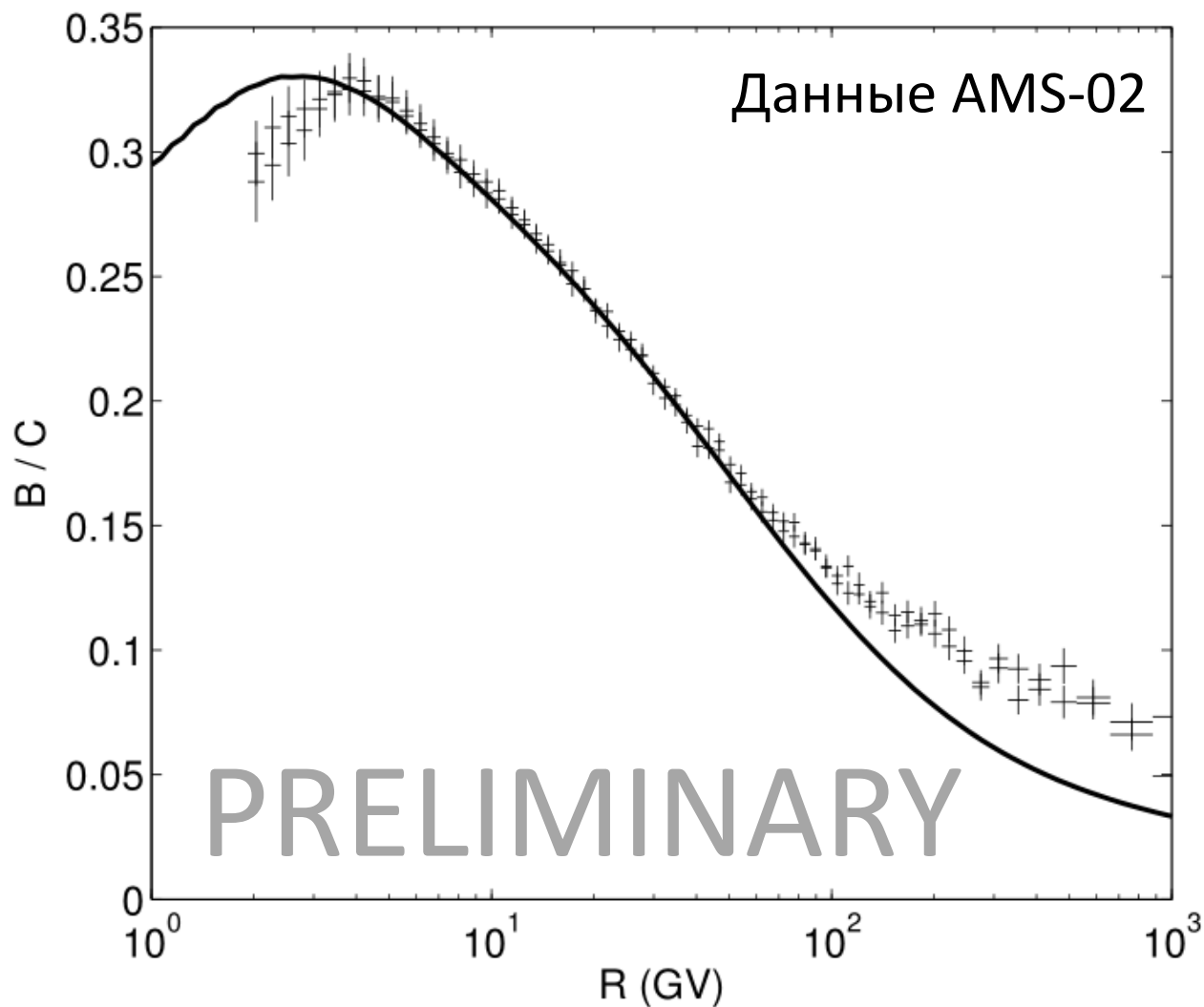
На промежуточных энергиях – перегиб (конвекция уже слаба, но есть возбуждение [ср. с Evoli+ 2018]). Размер гало зависит от энергии!

# Результаты – спектр протонов

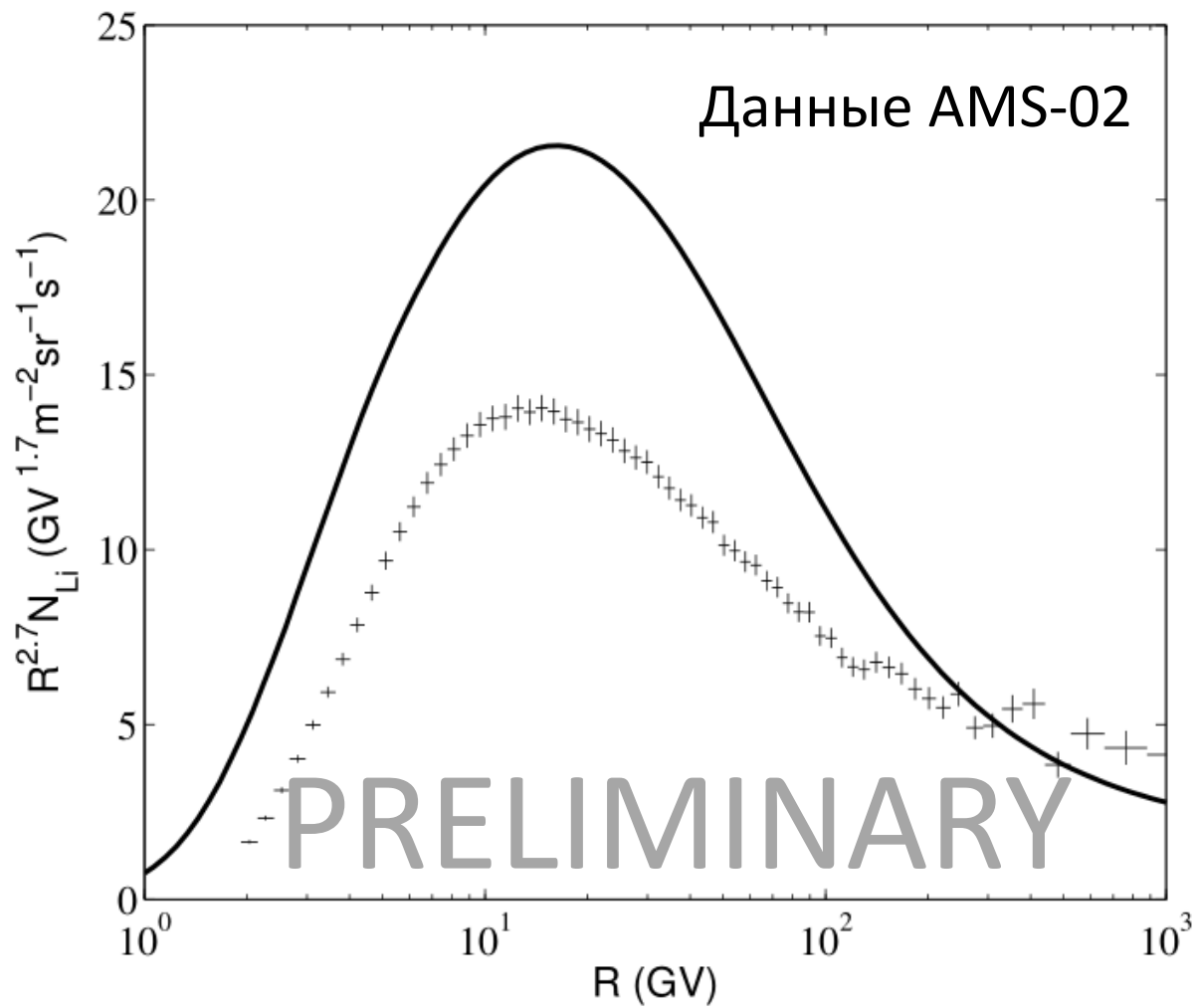




# Результаты – В/С



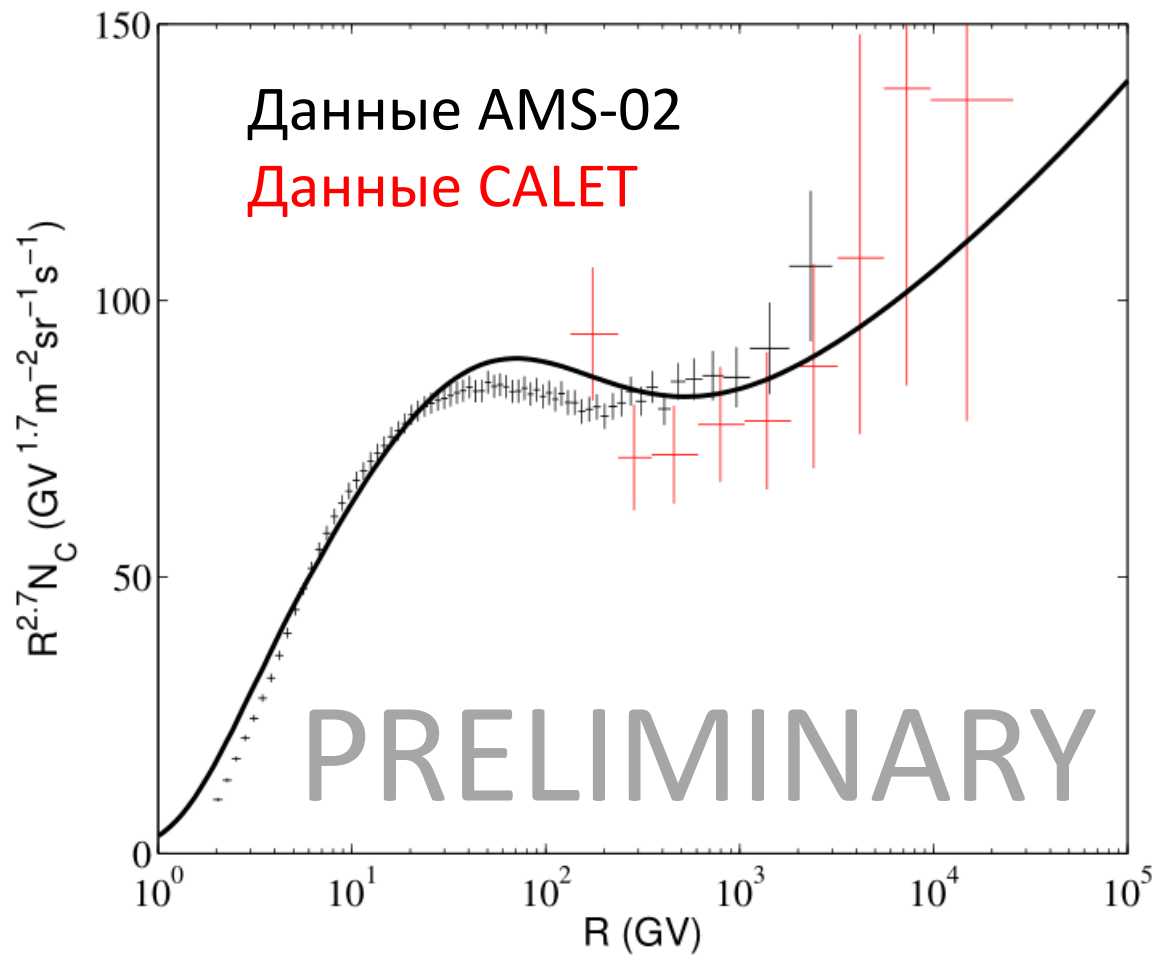
# Результаты – Li



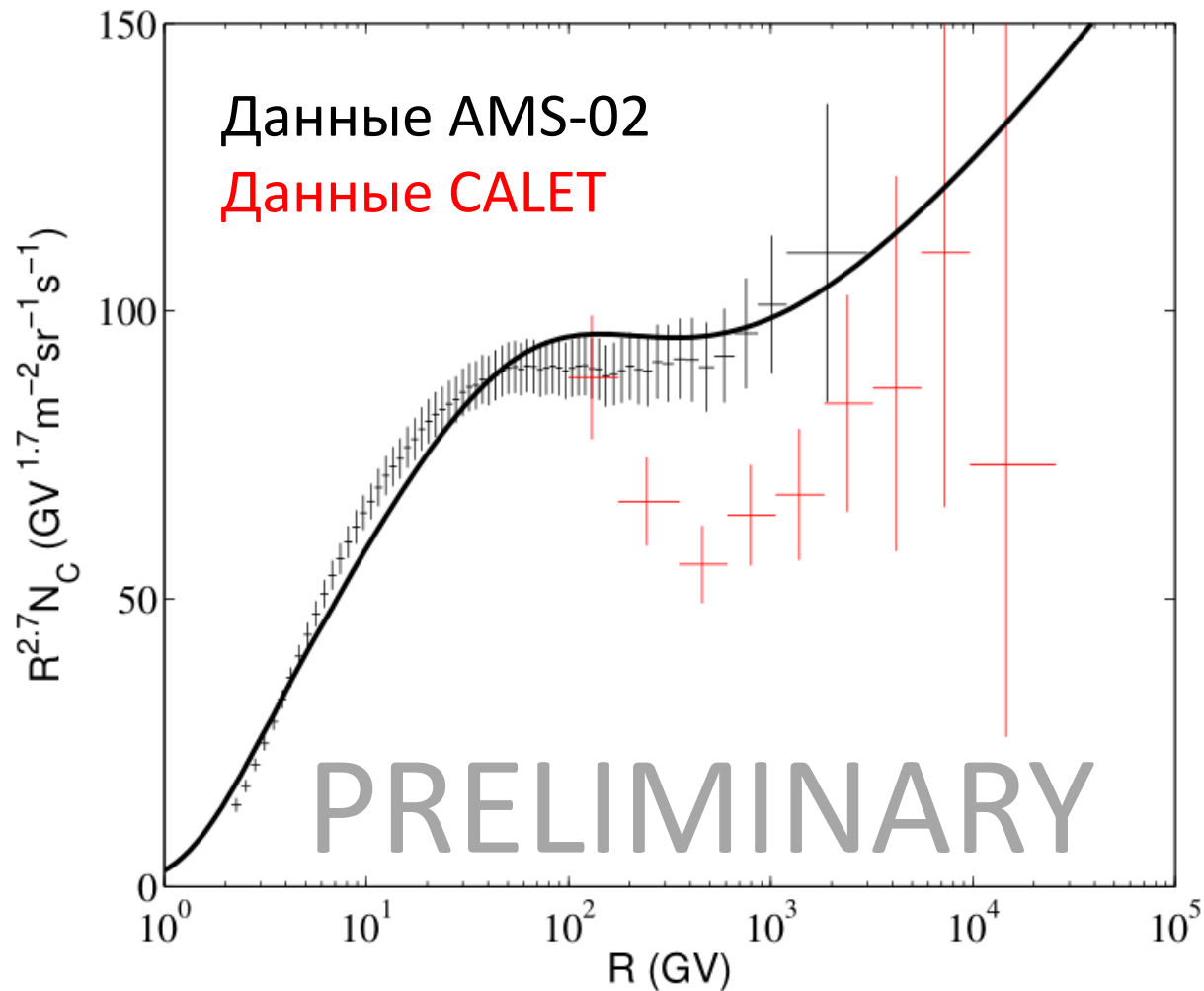
# Выводы

- Мы предлагаем самосогласованную модель формирования гало КЛ за счет самовозбужденной турбулентности
- Размер гало определяется параметрами СРЕДЫ – характерным размером газового гало
- Модель описывает особенность в спектре протонов (по аналогии с Evoli 2018+), а также вторичные изотопы
- Есть избыток частиц на низких энергиях
- Есть избыток лития и вторичного азота

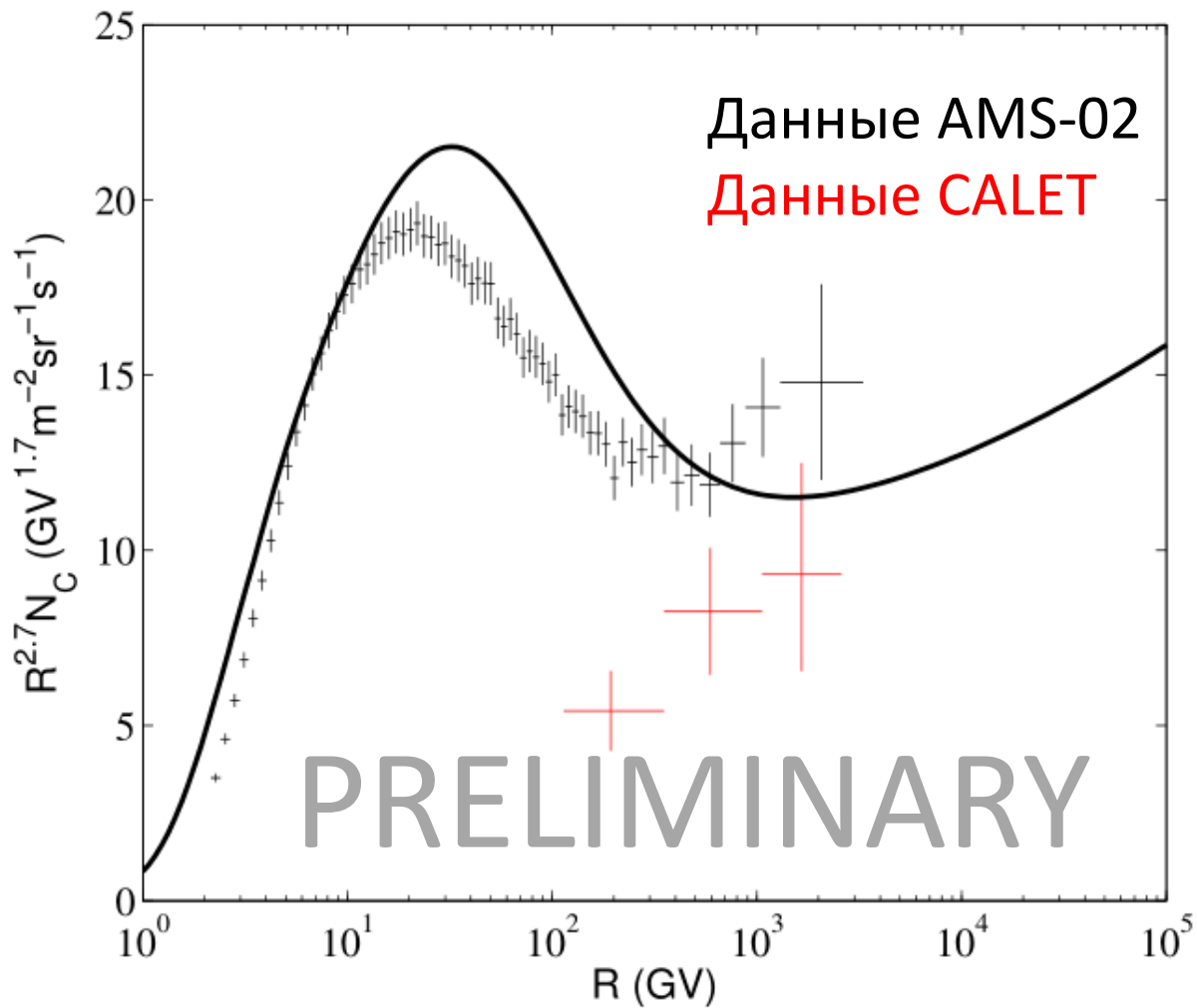
# Доп. слайд: спектр углерода



# Доп. слайд: спектр кислорода



# Доп. слайд: спектр азота



# Доп. слайд: $^{10}\text{Be} / ^9\text{Be}$

