Вторичное рождение антипротонов галактических космических лучей в межзвёздной среде с использованием пакета GT

А.Р. Дягилев, Р.Ф. Юлбарисов, А.Г. Майоров

Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ, Москва, Россия

39 Всероссийская конференция по космическим лучам

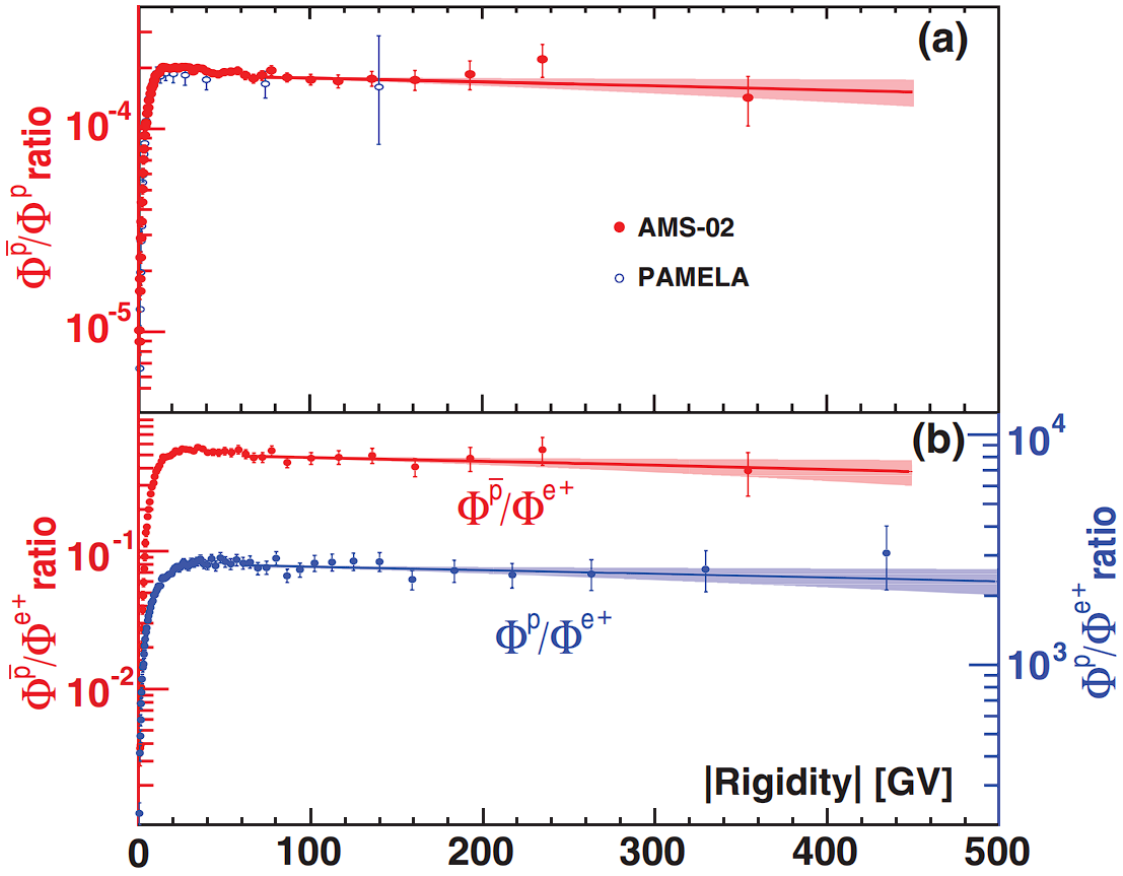
30 Июня, г. Дубна, 2026

Содержание

1. Проблема
2. Методика моделирования
3. Результаты
4. Заключение

Избыток античастиц ГКЛ

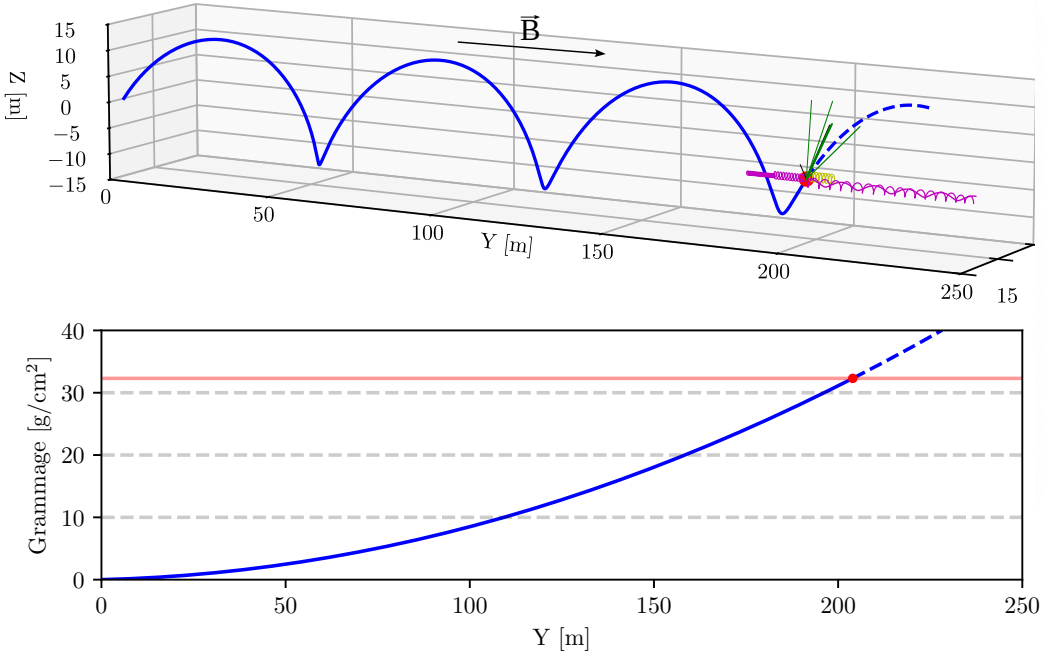
1. Особенности в экспериментальных данных AMS-02 и PAMELA в потоках $\bar{p}, e^+$;
2. Неоднозначность трактования: вторичное образование, специфические источники, темная материя;
3. Необходимо точно оценить теоретические неопределенности;

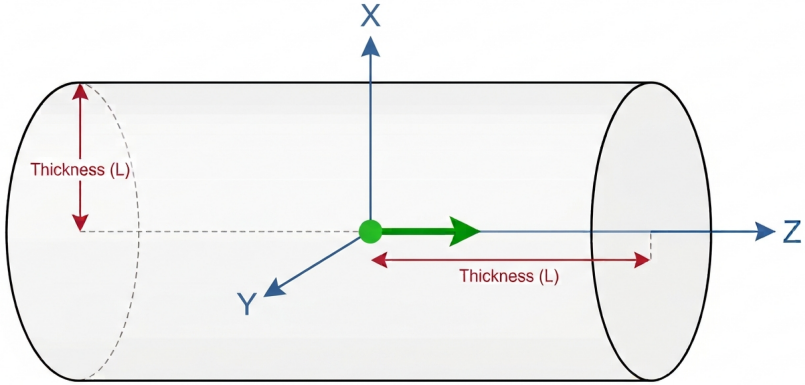


Цели работы

- Исследовать сценарий вторичного образования античастиц;
- Провести апробацию пакета программ GT в задачах галактического масштаба;
- Оценить возможность согласия с экспериментальными данными;

Моделирование взаимодействий в GT





$$n_{ISM}(H) \simeq 1 \text{ см}^{-3}$$

$$L = X/\rho$$

A. Mayorov et al. GT simulation: A numerical package for cosmic ray trajectory tracing in electromagnetic fields. Computer Physics Communications, 325:110202, 2026.

Первоначальная постановка задачи

1. Генерация первичных частиц КЛ;
2. Диффузия в магнитном поле Галактики (JF12, UF23 + турбулентное поле);
3. Взаимодействие с веществом межзвездного газа;
4. Расчет образования вторичных частиц;

Первоначальная постановка задачи

1. Генерация первичных частиц КЛ;
2. Диффузия в магнитном поле Галактики (JF12, UF23 + турбулентное поле);
3. Взаимодействие с веществом межзвездного газа;
4. Расчет образования вторичных частиц;

→

Проблемы

- Вычислительная сложность: времена удержания $\lesssim 10^8$ лет;
- Ограничения численных схем на шаг интегрирования;

Упрощенная постановка задачи

1. Генерация первичных частиц КЛ;
2. ~~Диффузия в магнитном поле Галактики (JF12, UF23 + турбулентное поле)~~;
3. Взаимодействие с веществом межзвездного газа;
4. Расчет образования вторичных частиц;

Упрощенная постановка задачи

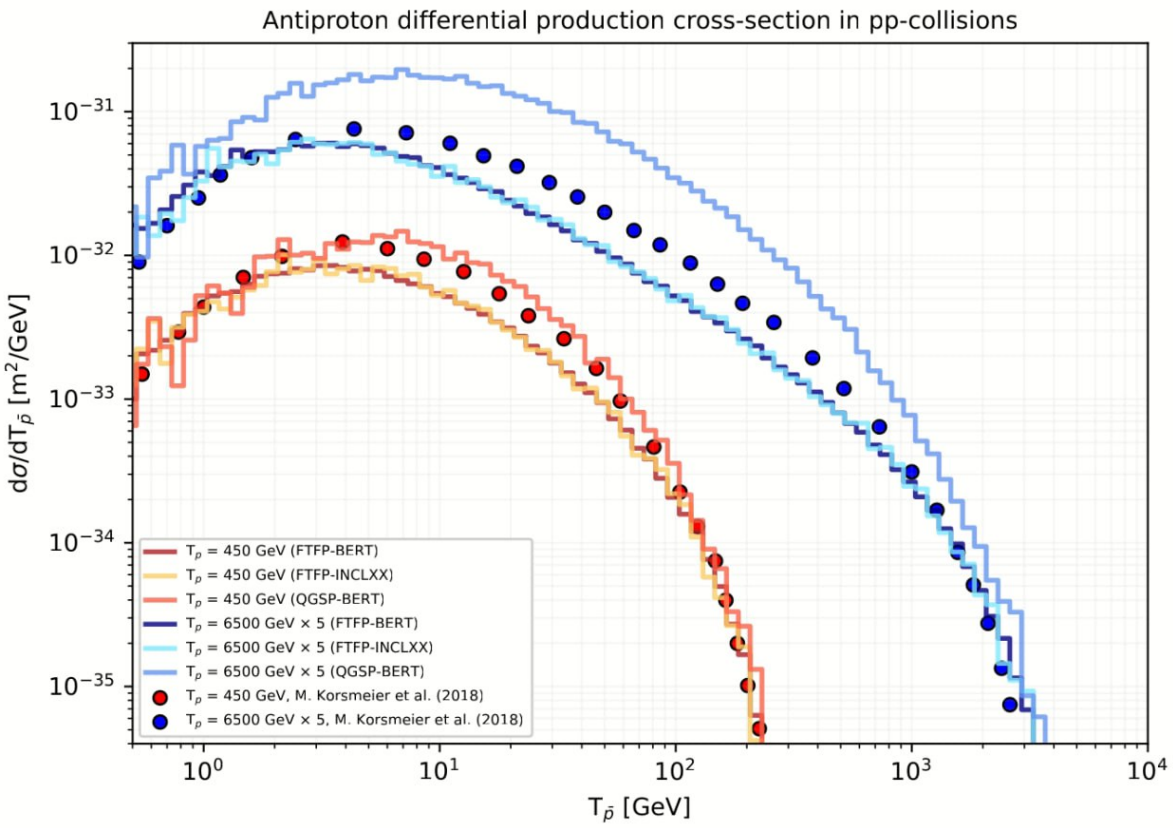
1. Генерация первичных частиц КЛ;
2. ~~Диффузия в магнитном поле Галактики (JF12, UF23 + турбулентное поле)~~; → Использование теоретических моделей пройденного количества вещества;
3. Взаимодействие с веществом межзвездного газа;
4. Расчет образования вторичных частиц;

Дифференциальное сечение рождения

$$P_{surv} = \exp\left(-L \cdot n \cdot \sigma_{prod}\right)$$

$$P_{prod} = 1 - P_{surv}$$

$$\frac{d\sigma_{prod}}{dT_{\bar{p}}}(T_{\bar{p}}) = \frac{-1}{L \cdot n \cdot P_{surv}} \frac{dP_{surv}}{dT_{\bar{p}}}$$



M. Korsmeier, et al. Production cross sections of cosmic antiprotons in the light of new data from the NA61 and LHCb experiments. Physical Review D, 97(10):103019, 2018

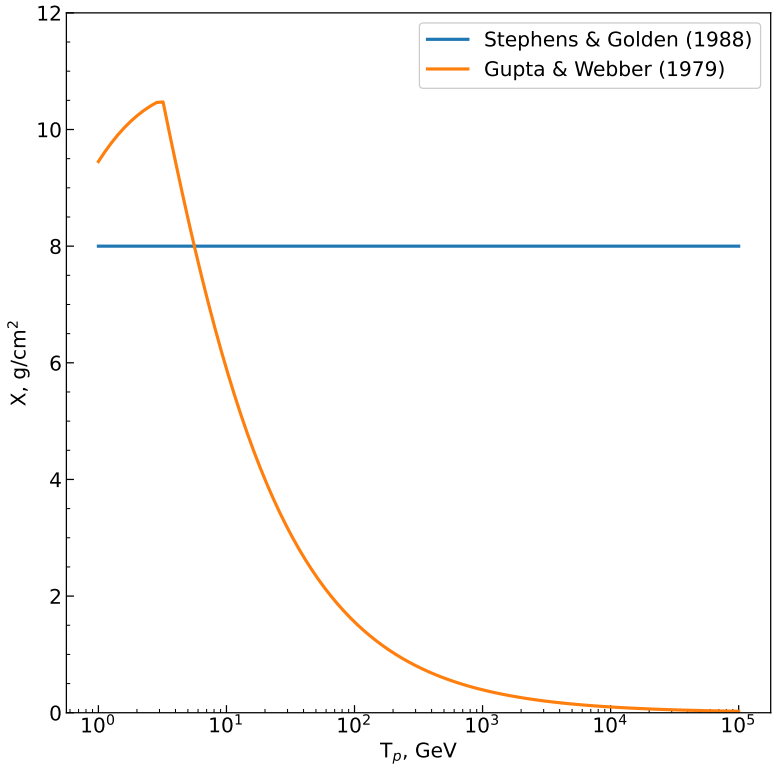
Используемые модели

Локальный межзвездный спектр:

$$J_{LIS}(T) = \frac{J_0 \cdot T^{\gamma_1}}{1 - \left(1 + \frac{A \cdot T}{M}\right)^{-2}} \cdot \left(\frac{T^{\gamma_2} + a^{\gamma_2}}{1 + a^{\gamma_2}}\right)^{\gamma_3};$$

Модели пройденного количества вещества:

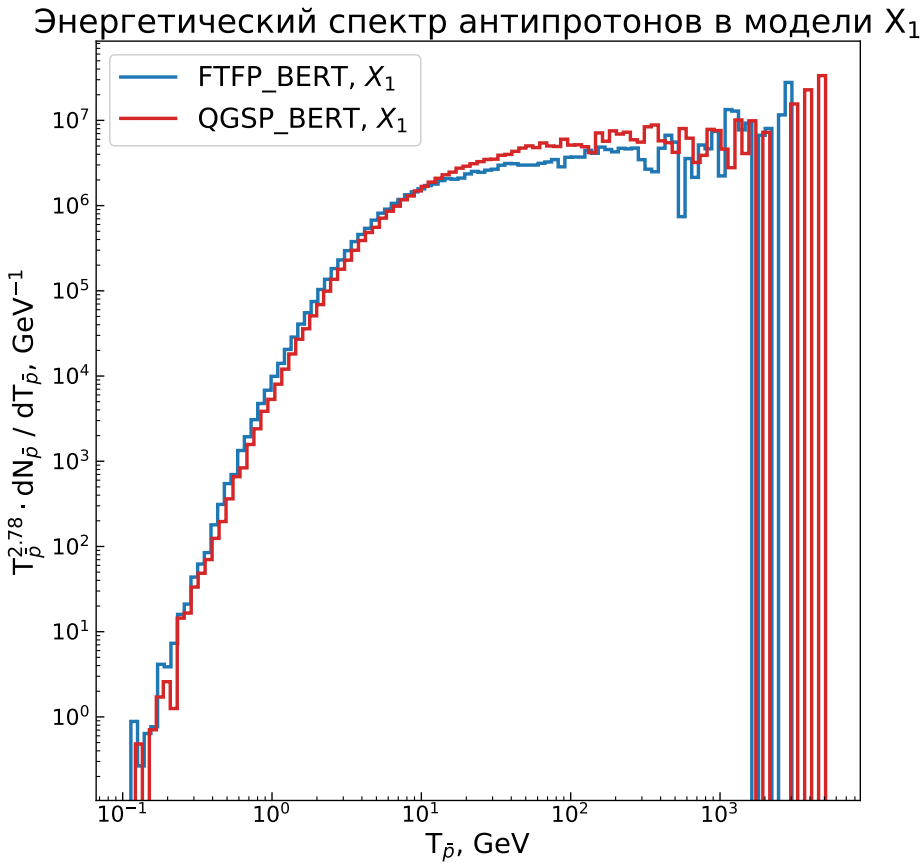
- $X_1 = 8$ г/см^2;
- $X_2(R) = \begin{cases} X_0\beta, & R \le R_0, \\ X_0\beta\left(\frac{R_0}{R}\right)^{0.6}, & R > R_0; \end{cases}$

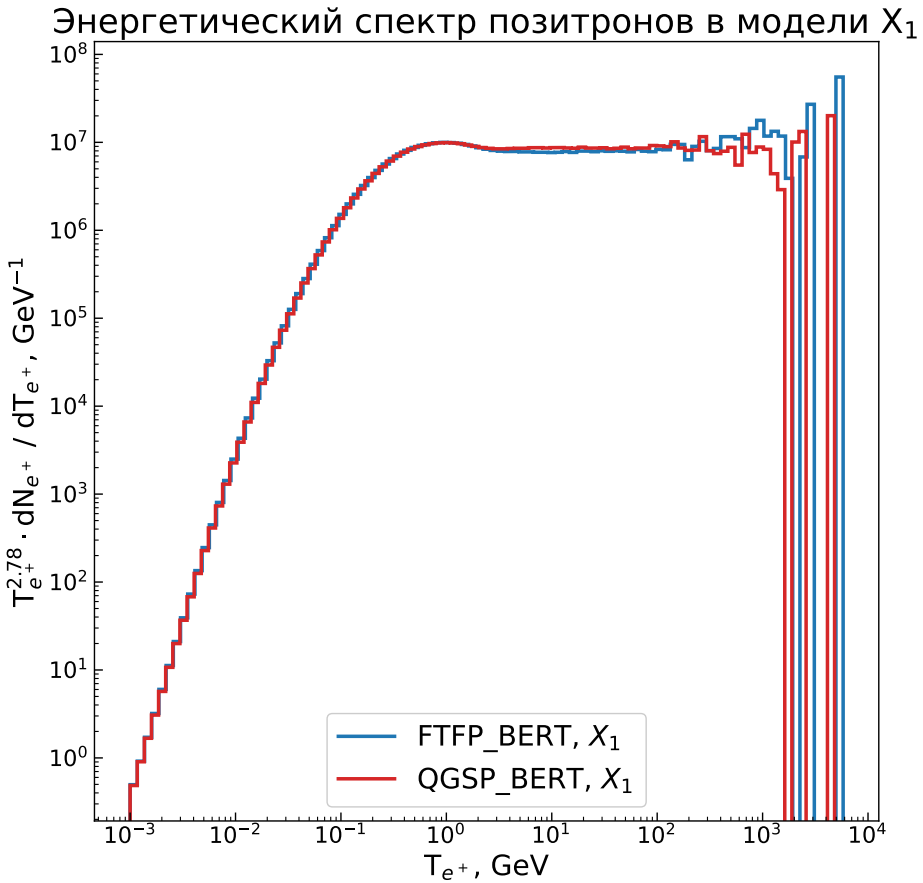


S.A. Stephens and R.L. Golden. The role of antiprotons in cosmic-ray physics. Space Science Reviews, 46(1–2), 1988

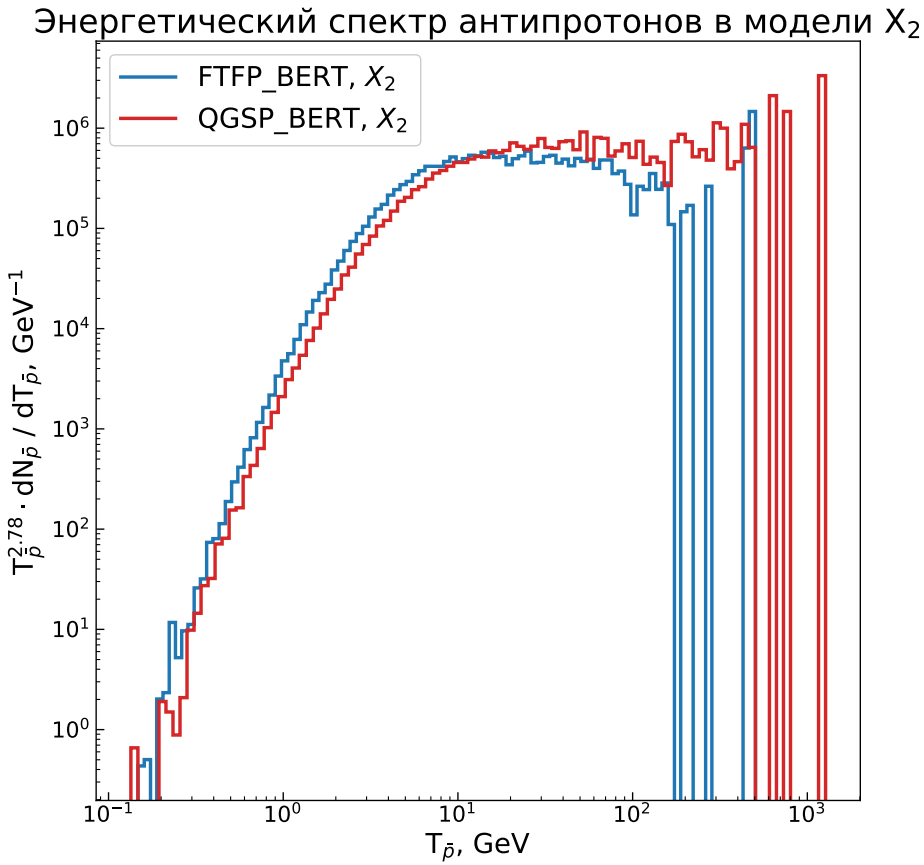
M. Gupta and W. R. Webber. The abundance of N-14 at the cosmic-ray source - a study using new fragmentation cross sections. Astrophysical Journal, 340:1124, 1989

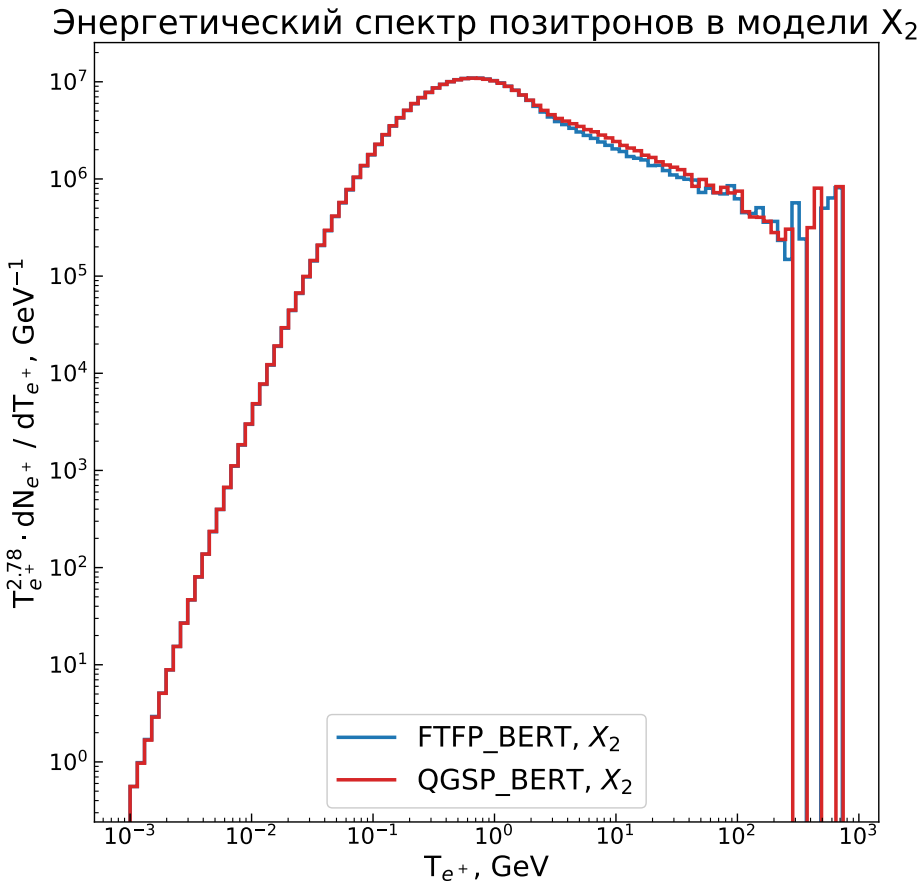
Влияние адронных моделей Geant4



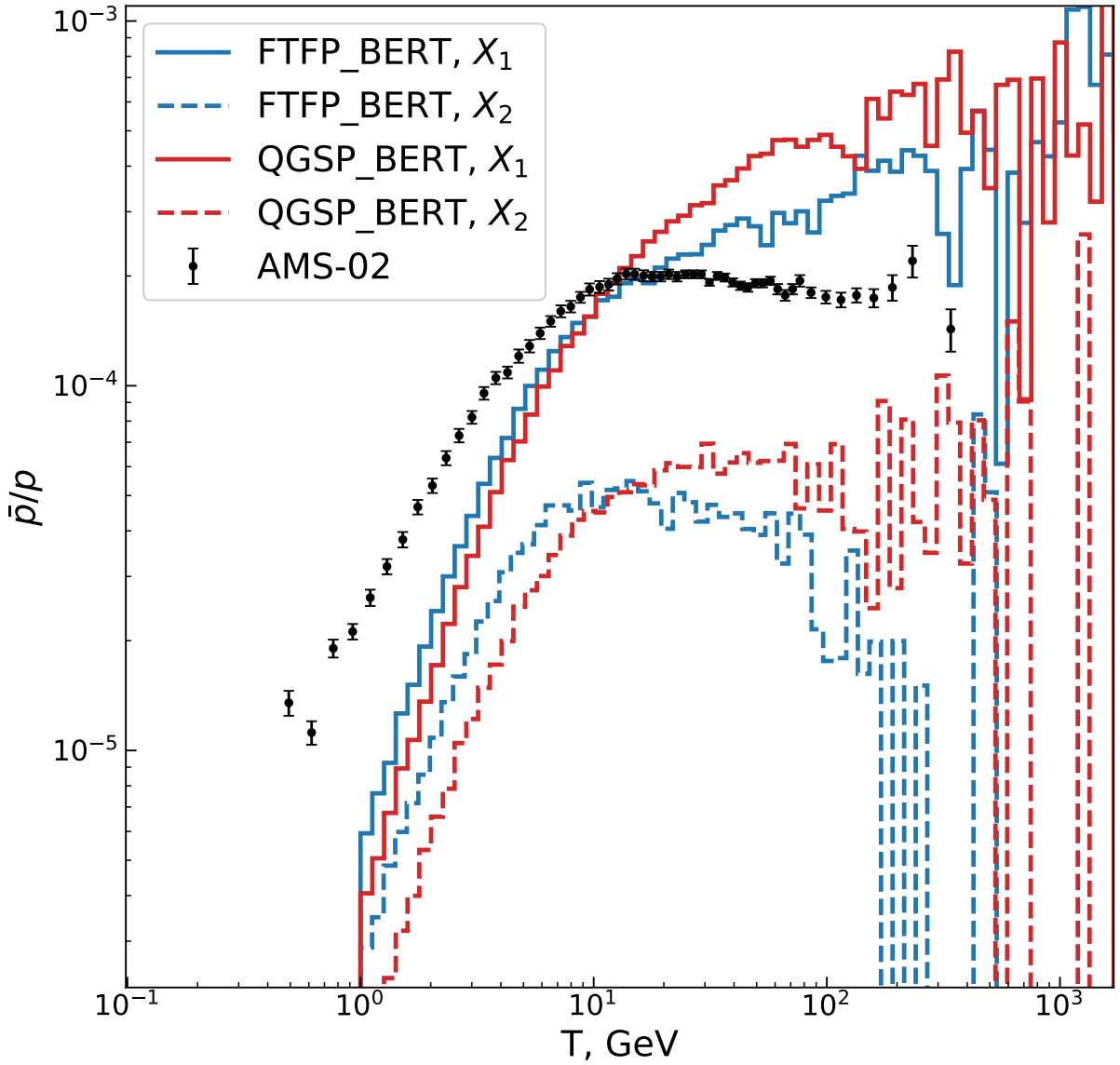


Влияние адронных моделей Geant4

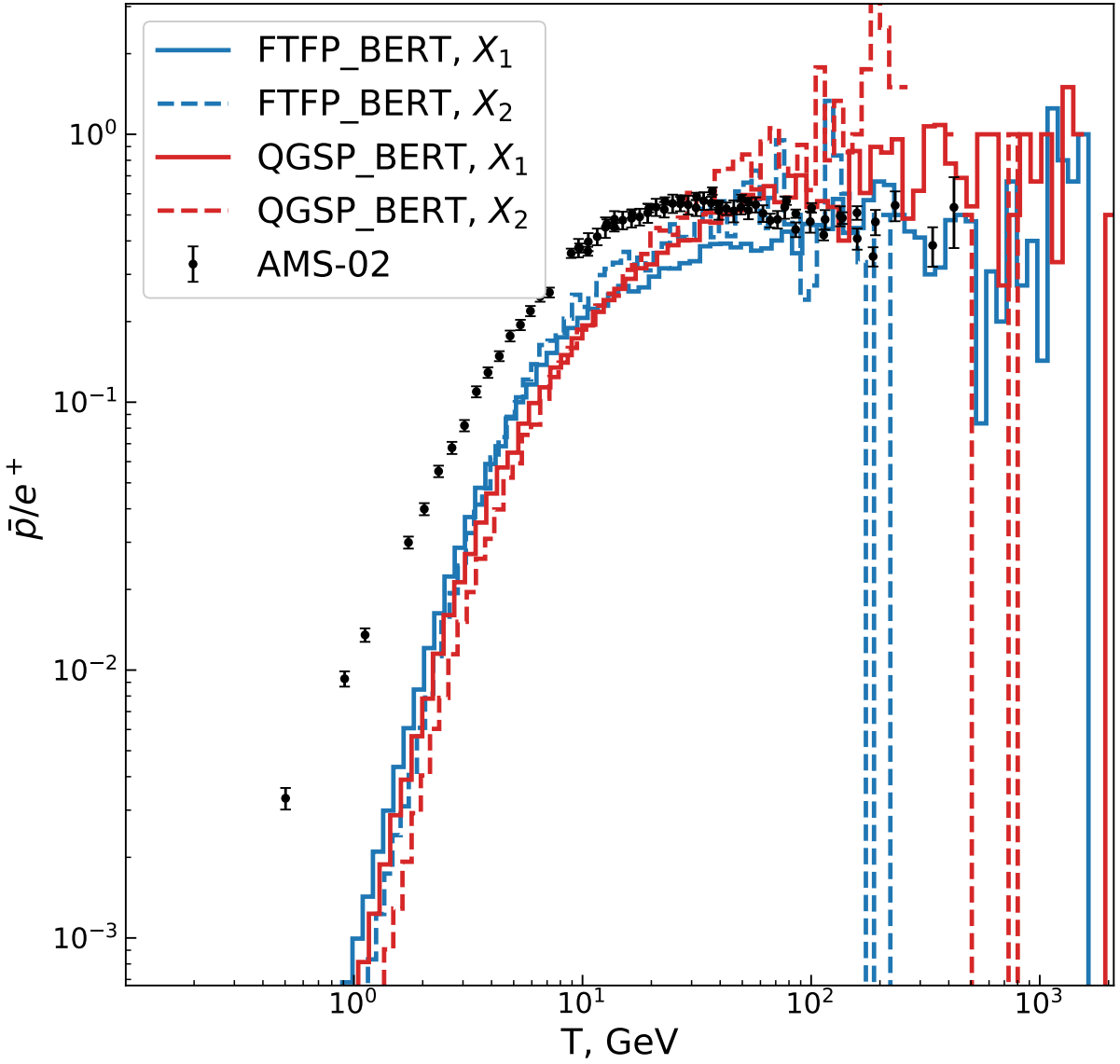




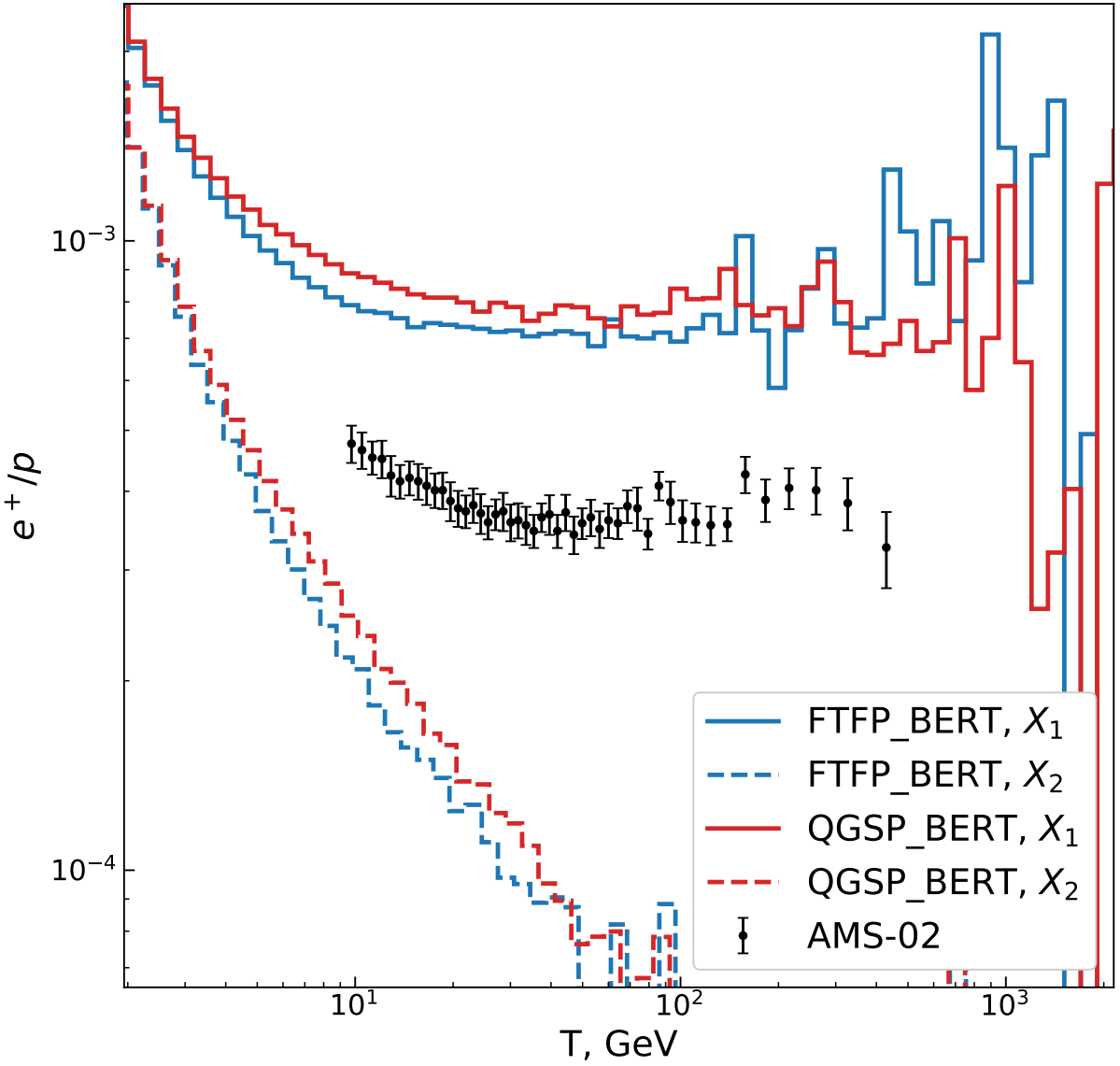
Построение отношения $\bar{p}/p$



Построение отношения $\bar{p}/e^+$



Построение отношения e^+/p



Заключение

- В рамках упрощенной модели исследовано вторичное образование антипротонов (и позитронов) в pp взаимодействиях с межзвездной средой (требуется учет $p(\mathrm{He})$ и $He(\mathrm{p})$ процессов);
- Полномасштабное моделирование в GT (учет диффузии КЛ в магнитном поле) является ресурсоемкой вычислительной задачей, запланированной к реализации;
- Показана зависимость результатов от выбора моделей (количество пройденного вещества X, адронные модели Geant4);
- Можно подобрать закон пройденного количества вещества для достижения согласия с данными;

Спасибо за внимание!

Репозиторий с исходным кодом GT