



# Поток антиядер в первичном космическом излучении

(по материалам эксперимента ПАМЕЛА)

Майоров А.Г.  
(НИЯУ МИФИ)



# Космические лучи (КЛ)



Распространение в межзвездной среде

Источники КЛ

Распространение в межзвездной среде

Гелиосфера  
Магнитосфера

Генерация

Ускорение (?)

Инжекция в межзвёздную среду



Ядерные реакции  
Рождение вторичных КЛ

Тормозное и синхротронное излучение

Распад

Доускорение



Солнечная модуляция

Геомагнитное обрезание

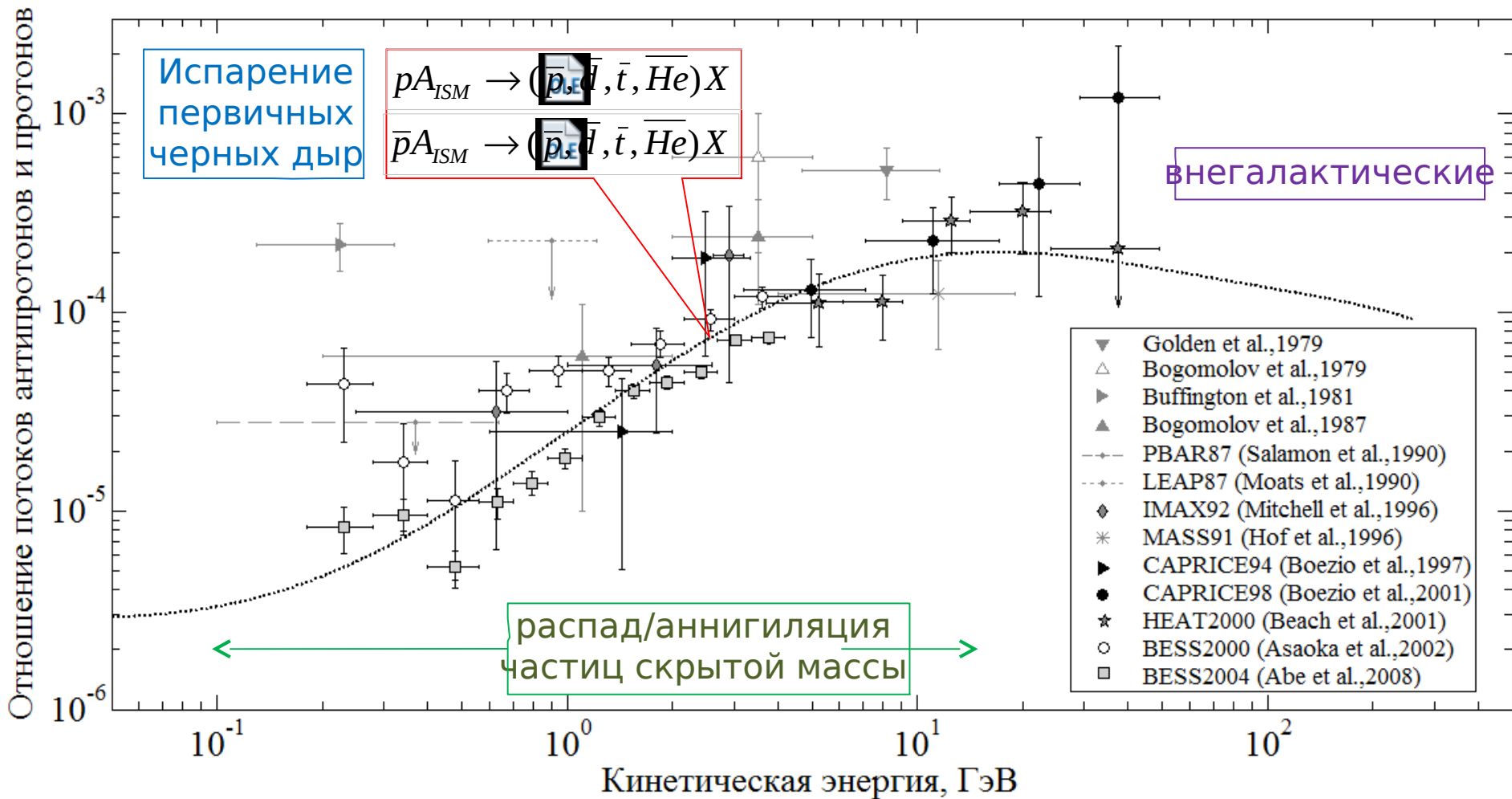


# Почему важно регистрировать антипротоны в КЛ ?



Определение потока галактических антипротонов позволяет:

- 1) изучать механизмы генерации и распространения КЛ в Галактике и гелиосфере;
- 2) исследовать экзотические источники, в т.ч., изучать природу гипотетических частиц скрытой массы.



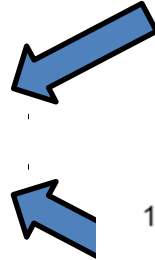
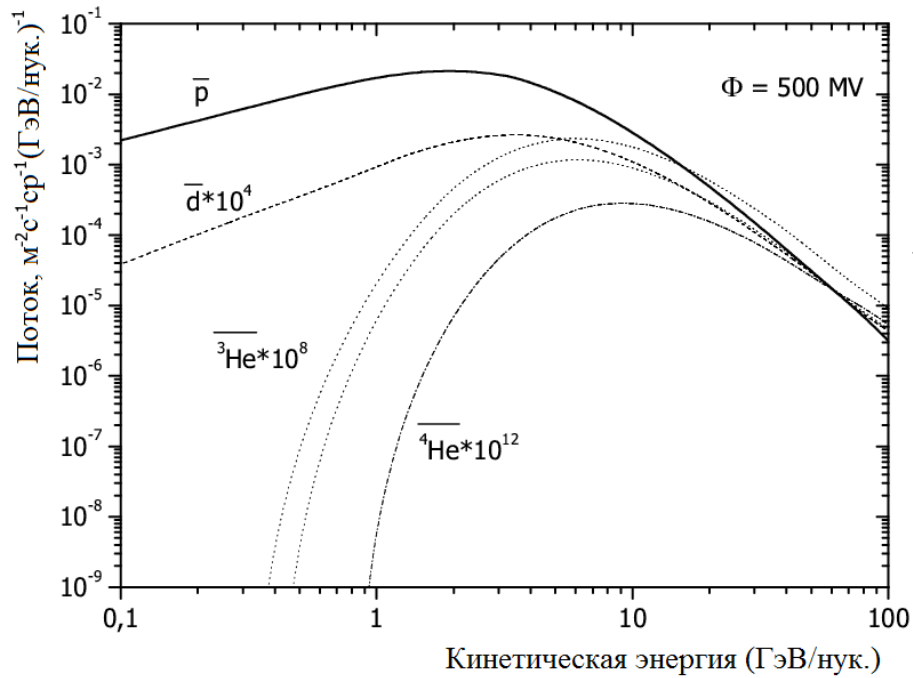


# Почему важно регистрировать анти-d и анти-He в КЛ?

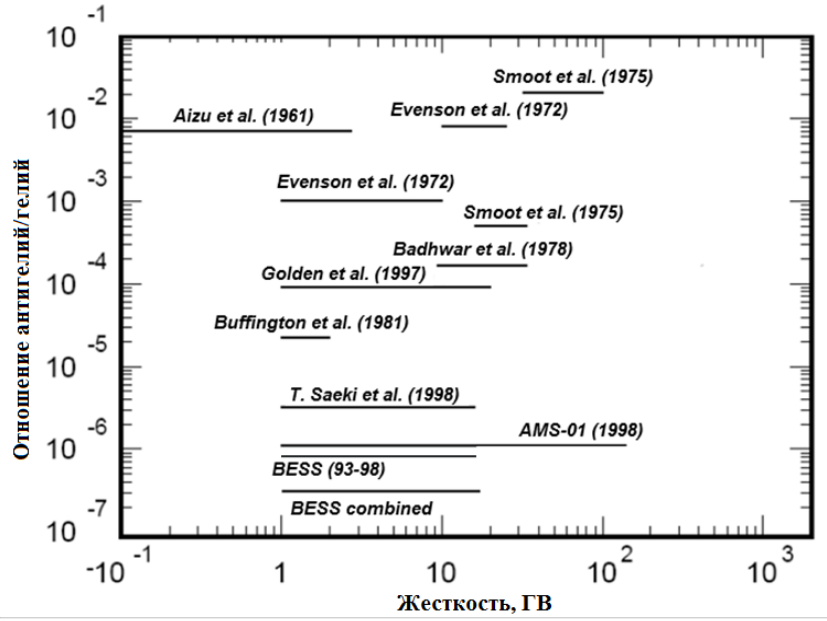
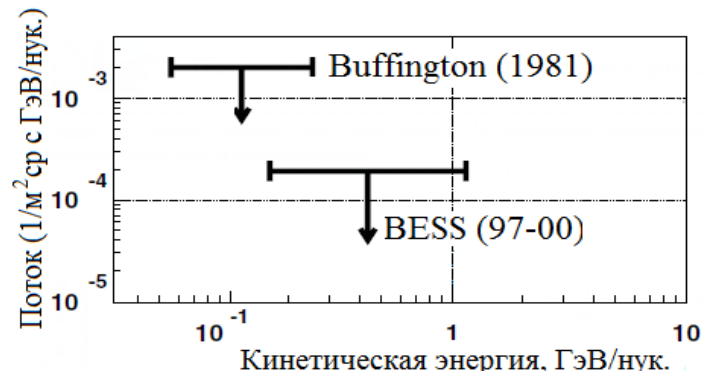


Поиск более тяжелых антиядер не менее важен, т.к. они могут (с меньшей вероятностью) рождаться теми же механизмами, что и антипротоны.

## Теоретические предсказания (только вторичное рождение)



## Экспериментальные ограничения



- Пороги рождения резко растут (7мр, 17мр, 31мр)
- Спектр  $\sim E^{-2.8}$  как у протонов
- Ионизационные потери  $\sim |Z|^2$  велики для  $|Z| > 2$



# Рождение антиядер на примере аннигиляции частиц скрытой массы (СМ)



**Новая физика**  
 Нейтралино  
 Гравитино  
 Бозоны Калуцы-Кляйна  
 ...

**PYTHIA**  
**Herwig++**  
**MadGraph**

**Стандартная модель (Адронизация)**

$q, W^+$   
 $\text{anti-}q, W^-$

**anti-p**  
**anti-p & anti-n**

**PYTHIA**  
**Herwig++**

**Механизмы слияния антинуклонов**

anti-**d** образуется, если относительный импульс антинуклонов

$$\Delta k < p_0$$

$\bar{p}$   $\bar{n}$   $p_0$

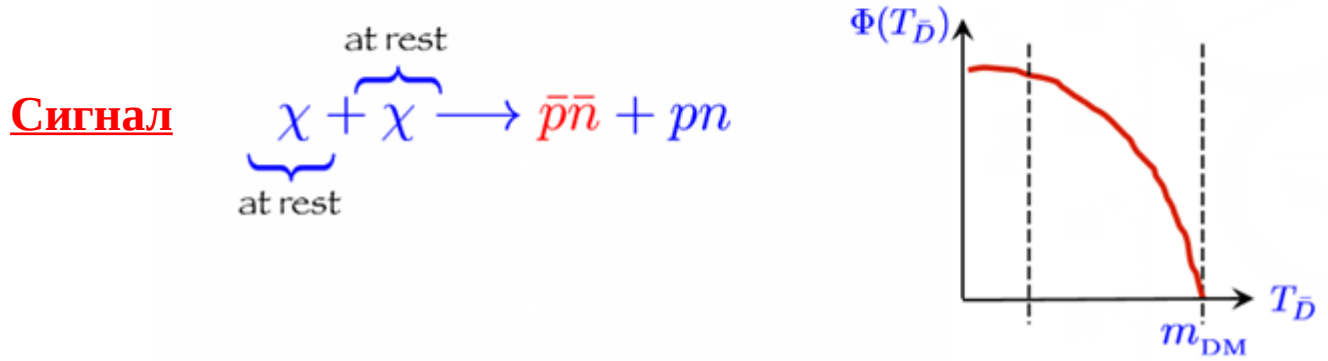
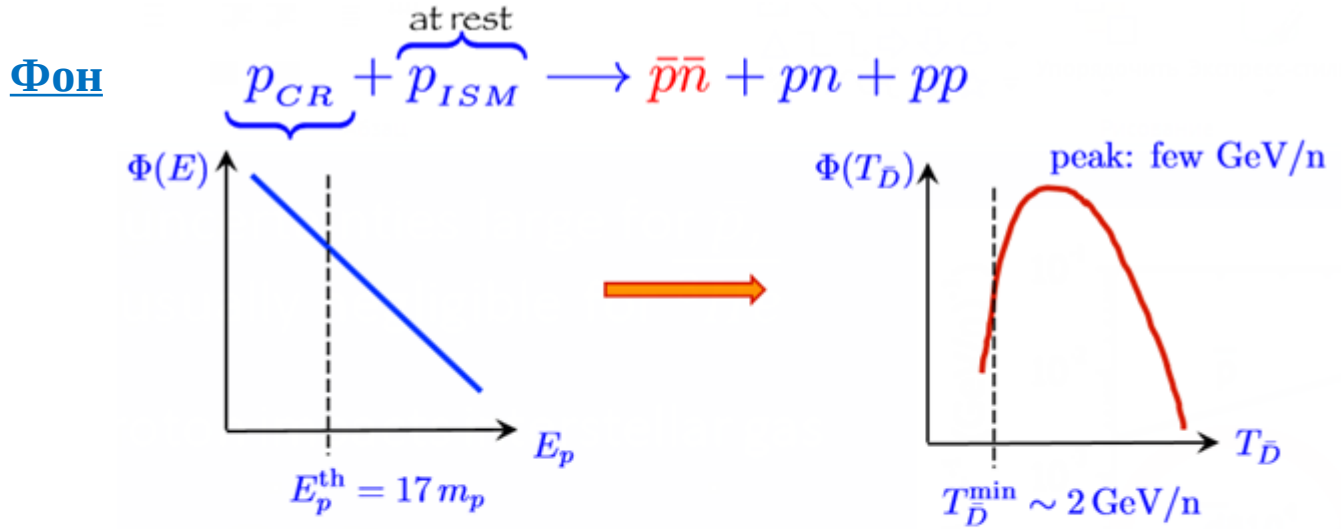
**$p_0$**  определяется по данным ускорителей  
 **$p_0 = 192 \pm 30$  МэВ для anti-**d****



# «Окно» в области низких энергий

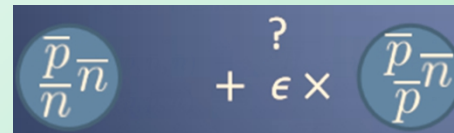
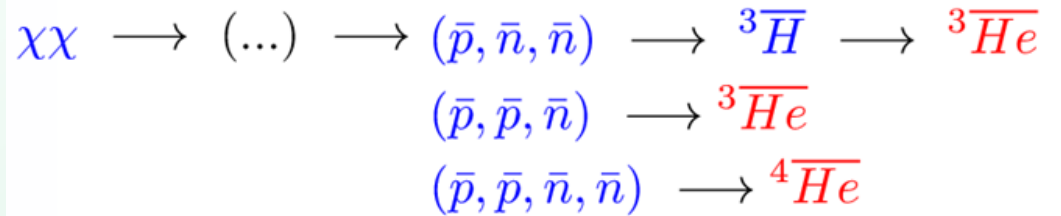
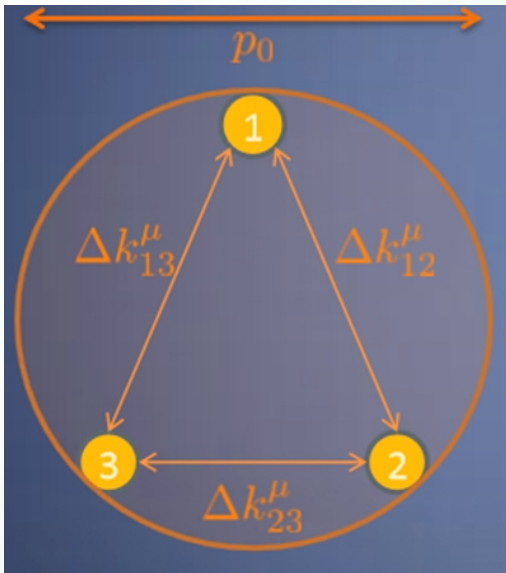


Протоны КЛ и частицы СМ имеют разные кинематику и формы спектра, следовательно, рождаемые антинейтроны также будут характеризоваться разными энергетическими распределениями.



## Механизмы слияния антинуклонов

Условие слияния  
 $\max(\Delta k) < p_0$



Анти-третий Антигелий - 3  
 ( $\tau \sim 12$  лет)

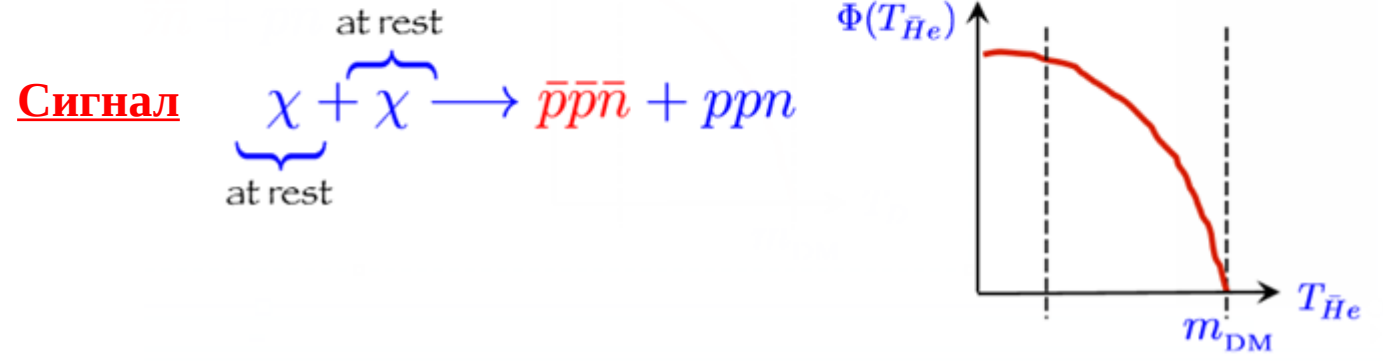
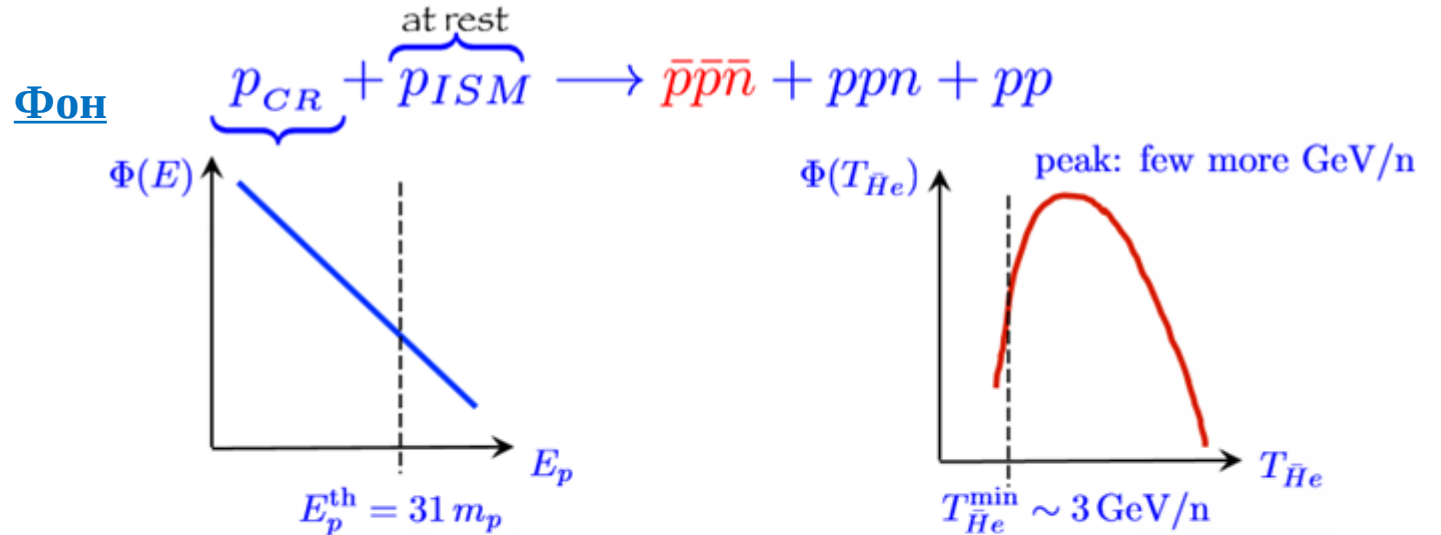
Прямых данных ускорителей нет  
 Косвенные оценки  $p_0 = 250 \pm 40$  МэВ



# «Окно» в области низких энергий



Энергетическое окно лучше выражено, чем в случае антинейтронов





## Диффузия

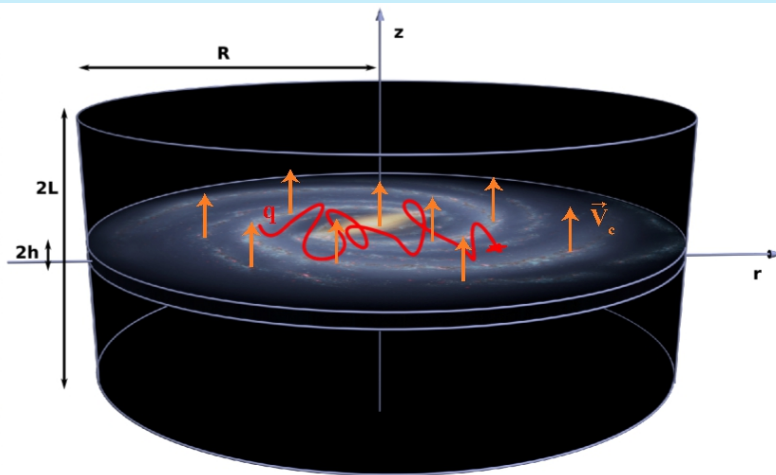
## Взаимодействия и распад

$$\frac{\partial N_i(E, z, t)}{\partial t} = D(E) \cdot \frac{\partial^2}{\partial z^2} N_i(E, z, t) - N_i(E, z, t) \left\{ \frac{1}{\tau_i^{\text{int}}(E, z)} + \frac{1}{\gamma(E)\tau_i^{\text{dec}}} \right\} + \sum_{k>i} \frac{N_k(E, z, t)}{\tau_{\text{int}}^{K \rightarrow i}(E, z)} + Q_i(E, z) - \frac{\partial}{\partial E} \left\{ \left\langle \frac{\partial E}{\partial t} \right\rangle \cdot N_i(E, z, t) \right\} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial E^2} \left\{ \left\langle \frac{\Delta E^2}{\Delta t} \right\rangle \cdot N_i(E, z, t) \right\}$$

Вторичное рождение

Функция источника

Изменение энергии: ионизация и доускорение



## Способы решения

Квази-аналитически (напр. USINE)

- Быстрый расчет,
  - Приближенное описание межзвездной среды
- Численно
- Длительный расчет
  - Детальное описание межзвездной среды

## Для аннигиляции частиц СМ

$$Q \sim \frac{1}{2} \langle \sigma v \rangle \frac{dN_{\bar{p}, \bar{d}}}{dT} \left( \frac{\rho(r, z)}{m_{DM}} \right)^2 ; \quad \rho(r, z) - \text{закон распределения СМ в Галактике}$$



## Влияние на поток частиц

- Временные вариации потока КЛ низких энергий ( $T < \sim 10$  ГэВ)
- «Зарядовая зависимость» солнечной модуляции

## Способы расчёта

- Приближение модели «силового поля»
- Решение уравнения переноса КЛ
- Решение стохастического уравнения
- Моделирование прохождения частиц через гелиосферу методом Монте-Карло



# Эксперименты по регистрации антиматерии в первичных космических лучах



## Проведённые эксперименты

- MASS-1,2 (89, 91)
- TrampSI (93)
- CAPRICE (94, 97, 98)
- HEAT (94, 95, 00)4
- IMAX (96)
- AMS-01 (98)
- BESS (93, 95, 97, 98, 00)
- BESS-TeV (02)
- BESS-Polar (04, 07/08)

## Текущие эксперименты

- PAMELA (06 – н.в.)
- AMS-02 (11 – н.в.)

## Будущие эксперименты

- GAPS (17 ?)



# КА Ресурс-ДК1 («ЦСКБ-Прогресс») Запущен на околоземную орбиту 15.06.2006



## Параметры рабочей орбиты

Наклонение, град	70
Мин. высота орбиты, км	~350 до 09.2010 ~600 после
Макс., км	600
Масса полностью собранного и заправленного КА, кг	6550
Максимальная длина КА, мм	7930
Максимальный диаметр КА, мм	2720
Площадь солнечных батарей	36
Собственная память НА «ПАМЕЛА»	2 Гб (1 соб. = 5 Кб)
Передача информации в бортовую память	8-10 раз в день
Сброс информации на наземную станцию	2-4 раза в день



Наземная станция приема:  
Научный центр оперативного мониторинга Земли  
(г. Москва)





# Спектрометр «ПАМЕЛА»



**Система антисовпадений**

- Подавление фона

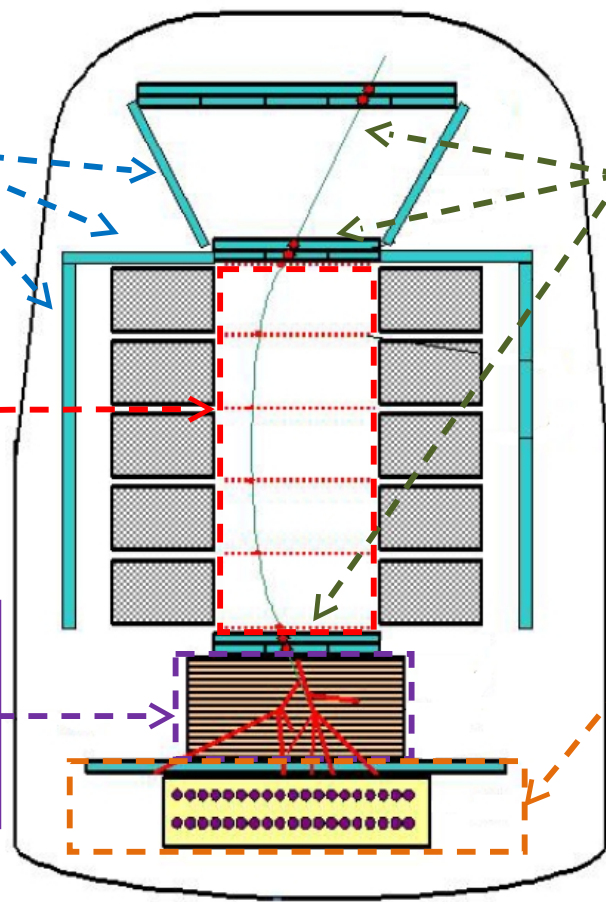
**Трековая система в магн. поле**

- Жёсткость
- Величина & знак заряда ( $\pm|Z|$ )

**Калориметр**

- Разделение  $e^+/p$ , анти- $p/e^-$
- Измерение энергии  $e^-/e^+$
- Подавление фона

**ГФ: 21.6 см<sup>2</sup> ср**  
**Масса: 470 кг**  
**Размеры: 130 · 70 · 70 смЗ**  
**Мощность: 360 Вт**



**Время-пролетная система**

- Триггер &  $\beta$
- Направление прилета
- Величина заряда ( $|Z|$ )
- Масса до  $R \sim 2ГВ$

**Магнит**

**С4 & Нейтронный детектор**

- Разделение лептонов и адронов при высоких энергиях

Энергетические диапазоны регистрации ядерной компоненты КЛ:

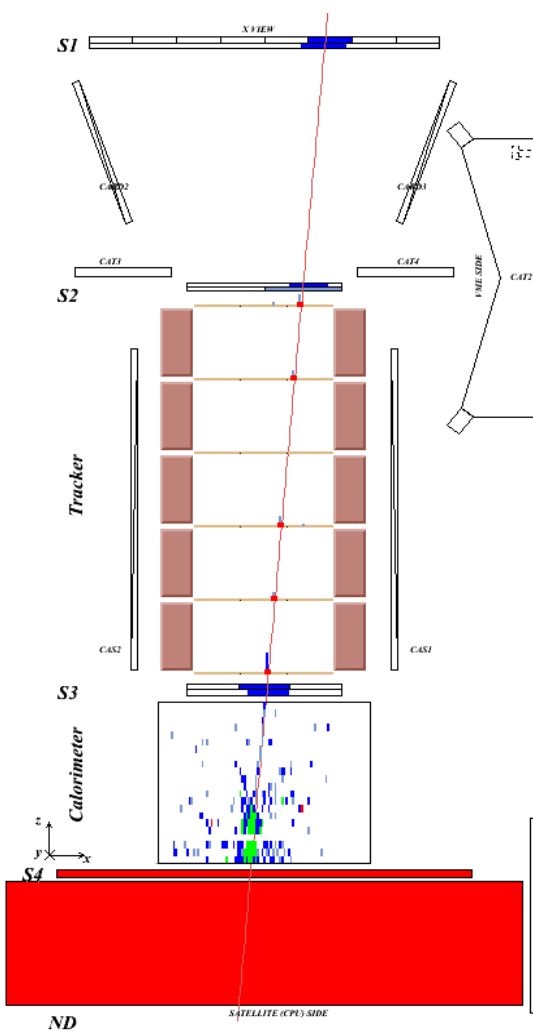
- протоны от  $\sim 80$  МэВ до  $\sim 1$  ТэВ;
- дейтроны от  $\sim 80$  МэВ/н. до  $\sim 1$  ГэВ/н.
- гелий от  $\sim 80$  МэВ до  $\sim 0.5$  ГэВ /н.



# Разделение позитронов/протонов и антипротонов/электронов



## Протон



### ВПС:

- режекция альбеда ( $\beta > 0$ )
- отбор по массе (до 2 ГВ)

### АС:

- отсутствие сигнала в верхних счетчиках

### Трекер:

- определение абсолютной величины заряда по зависимости ионизационных потерь от жёсткости
- определение знака заряда по отклонению в магнитном поле

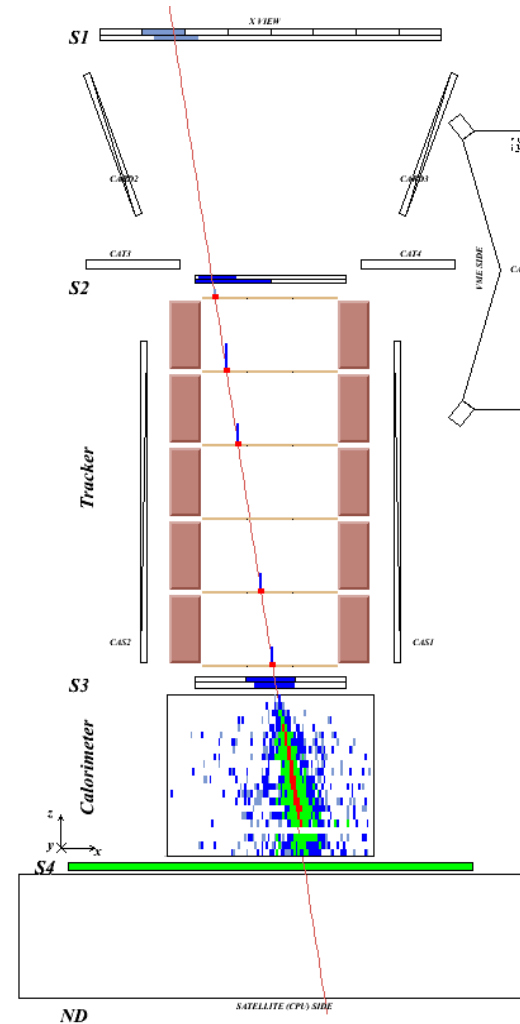
### Калориметр:

- выделение электромагнитных ливней
- определение энергии электронов и позитронов
- идентификация адронных взаимодействий

### НД:

- ограничение на число нейтронов

## Позитрон

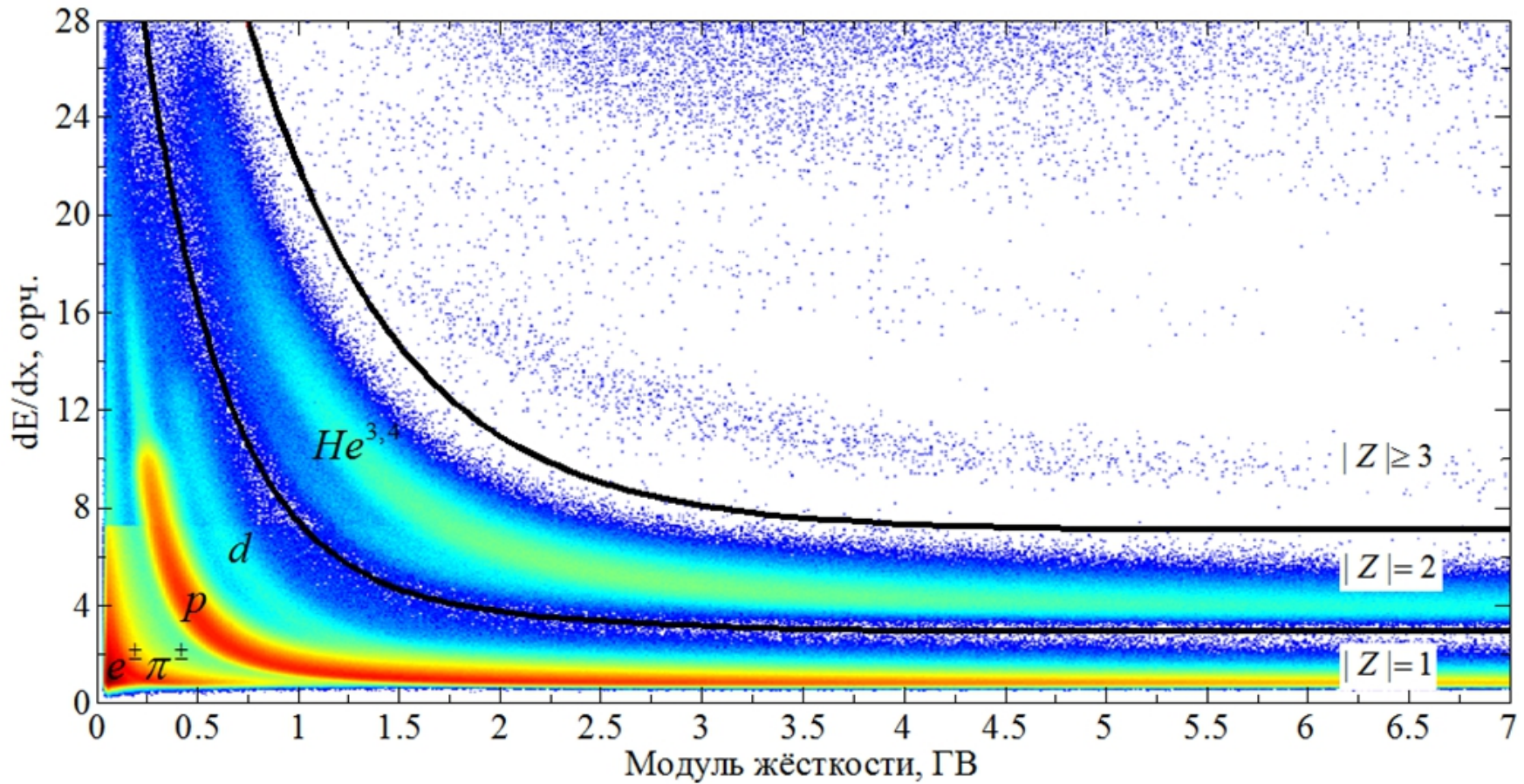




# Определение абсолютной величины заряда



Распределение средних ионизационных потерь в трековой системе в зависимости от модуля измеренной жёсткости после применения базовых критериев отбора



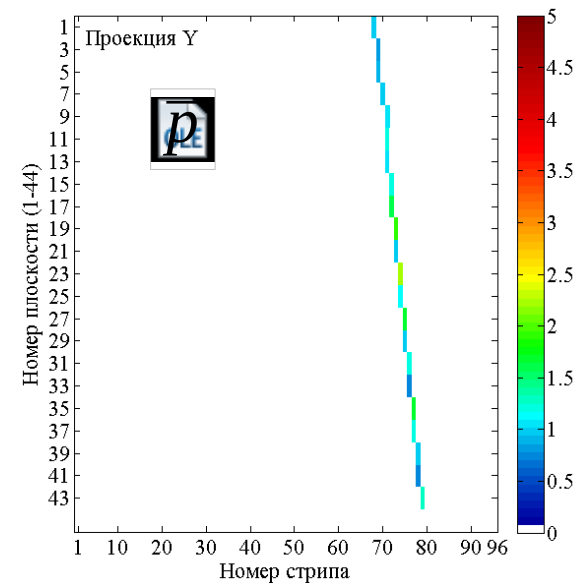
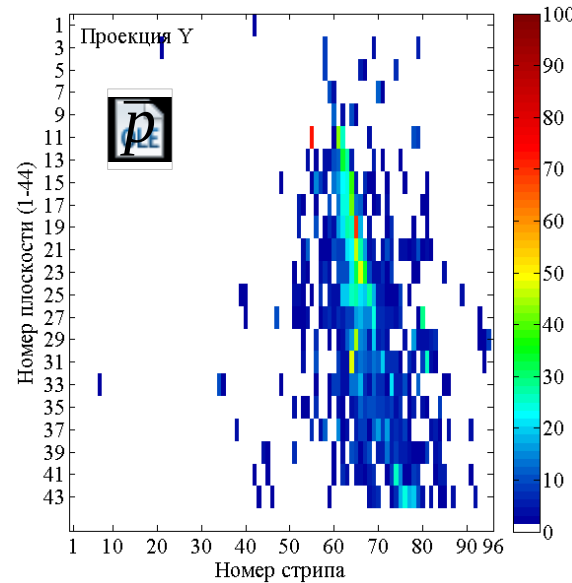
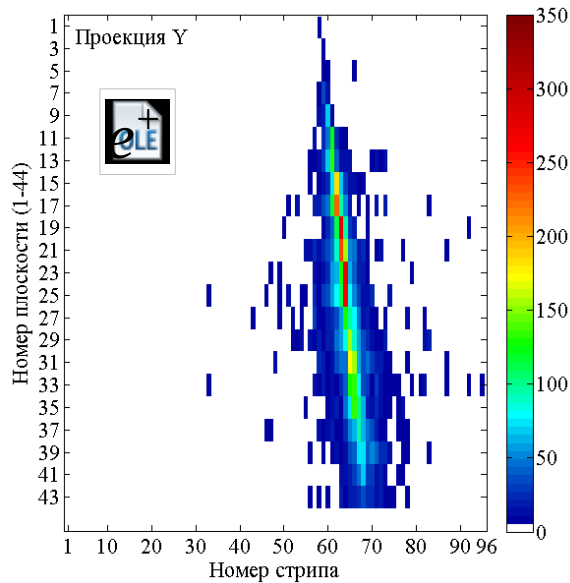
Вероятность имитации протонов ядрами гелия пренебрежимо мала.  
Вероятность имитации гелия протонами менее  $10^{-4} \div 10^{-5}$

Отличия электромагнитного и адронного ливней обусловлены разной природой образующихся при их развитии частиц.

Для описания ливней вводятся параметры, характеризующие

- продольный и боковой профили;
- топологическое развитие;
- точку начала;
- энерговыделение в различных частях ливня.

Моделирование электронов и антипротонов с энергией 100 ГэВ







# Идентификация (анти) антипротонов



Дискриминантный анализ используется для:

- (1) поиска переменных, позволяющих относить наблюдаемые объекты в одну или несколько групп;
- (2) классификации наблюдений в различные группы.

Идея методов классификации: имеется множество объектов, принадлежащих к разным известным классам по набору признаков; в нем задано конечное подмножество объектов, для которых класс известен (*обучающая выборка*). Требуется построить алгоритм, способный классифицировать произвольный объект из исходного множества (указать класс, к которому он относится).

Общая схема алгоритма:

Моделирование  
Монте-Карло  
прохождения  
позитронов и  
антипротонов  
через спектрометр

«Обучение»  
разделяющего  
алгоритма  
(четкая или  
вероятностная  
логика)

Применение  
полученного  
алгоритма к  
другой выборке  
модельных  
данных

Применение  
полученного алгоритма  
к экспериментальным  
данным

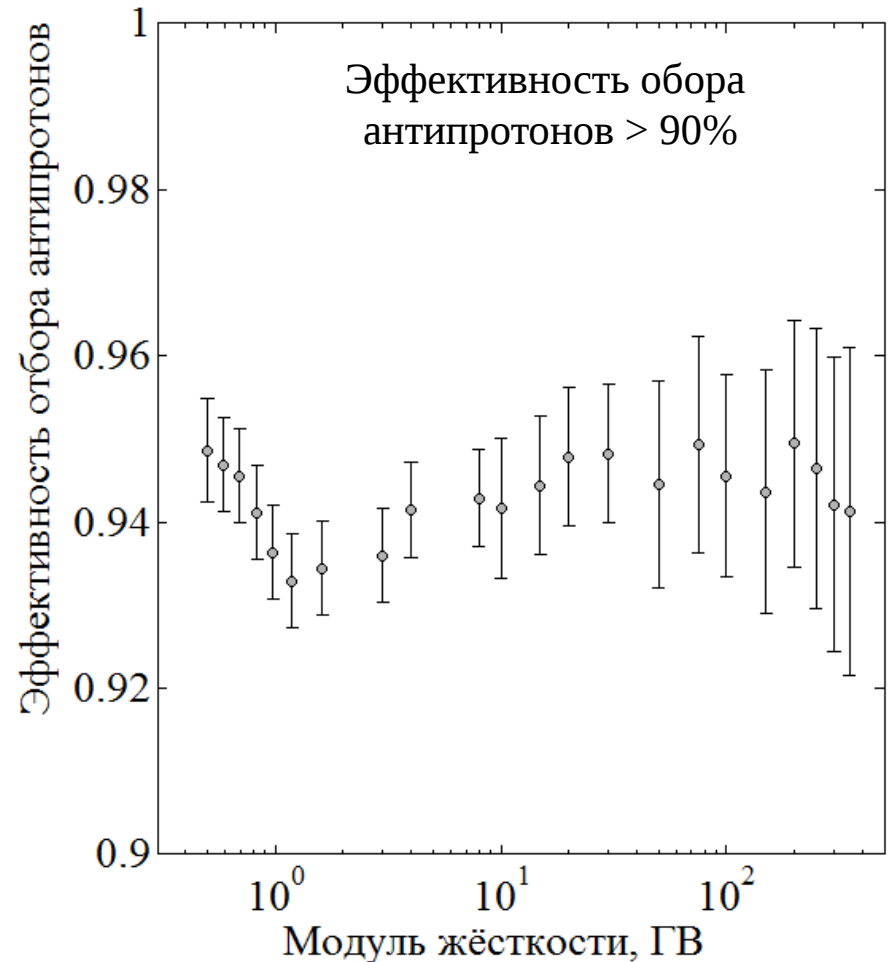
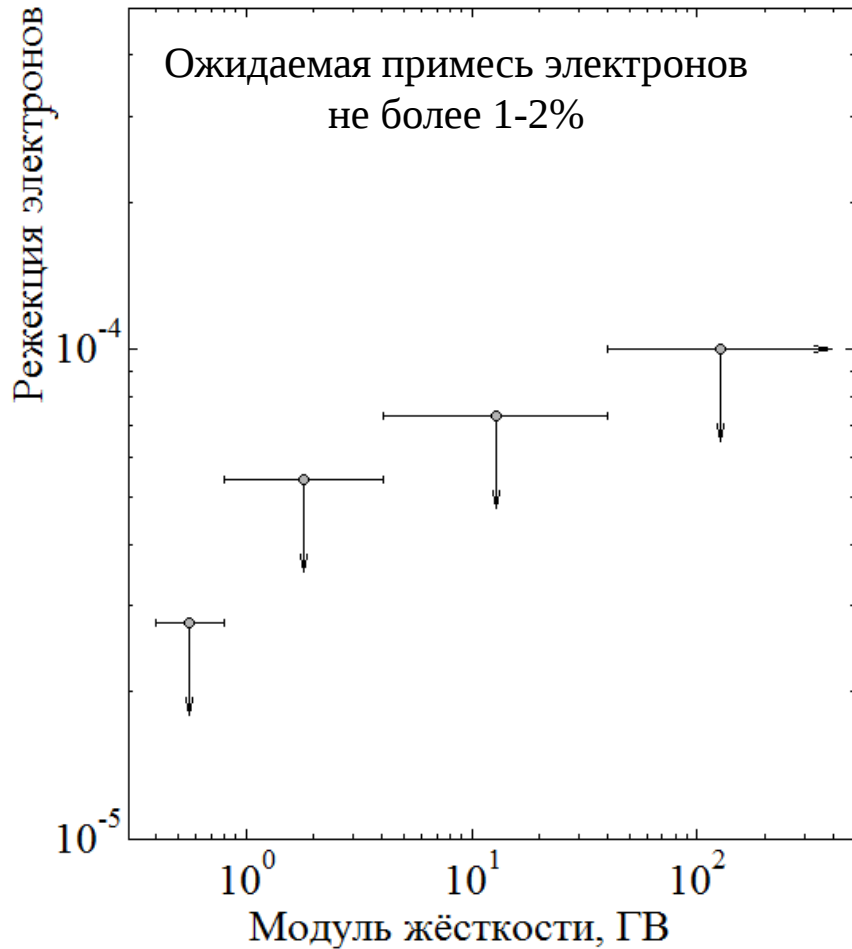
<http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stdiscan.html>



# Идентификация (анти) антипротонов



Применение построенной гиперповерхности к другой выборке данных моделирования позволяет получить коэффициент режекции электронов и эффективность отбора антипротонов



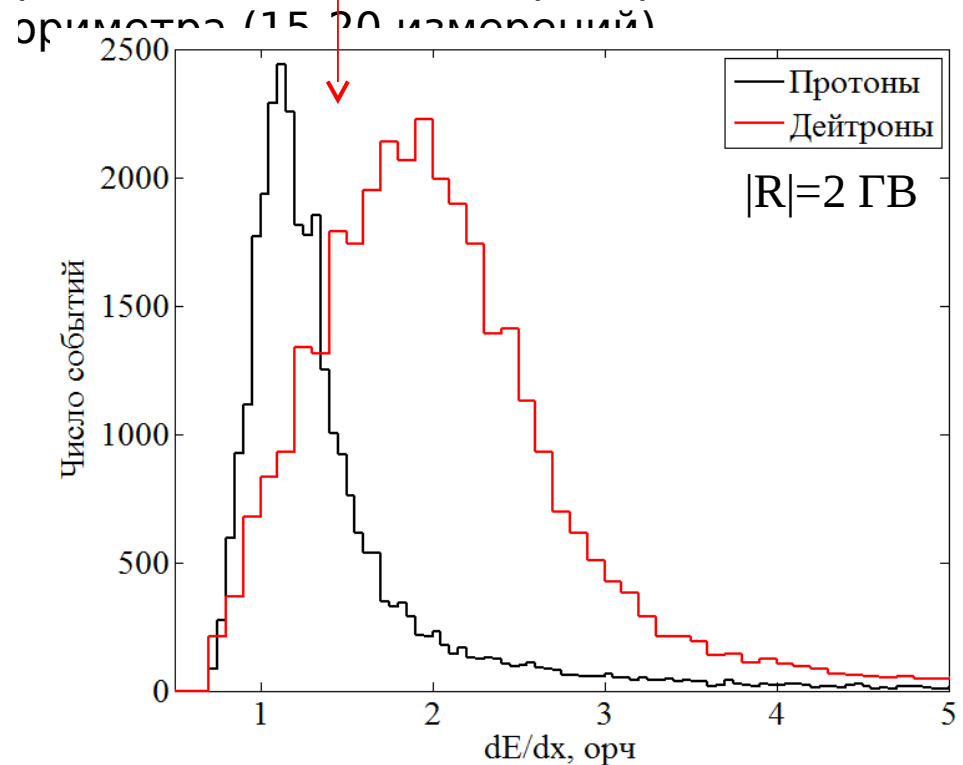
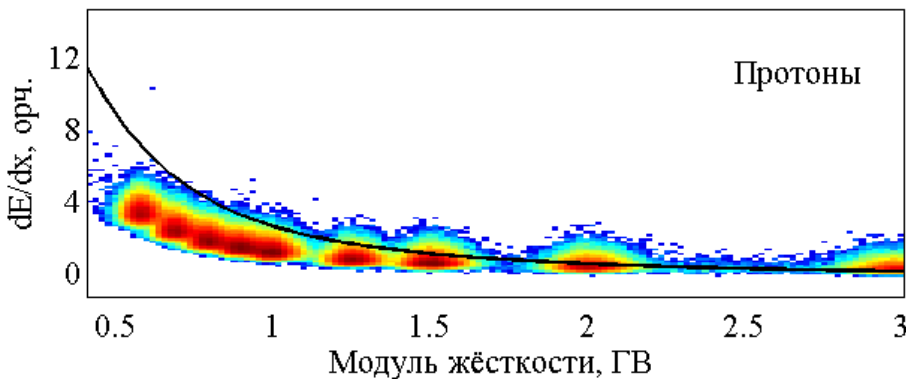
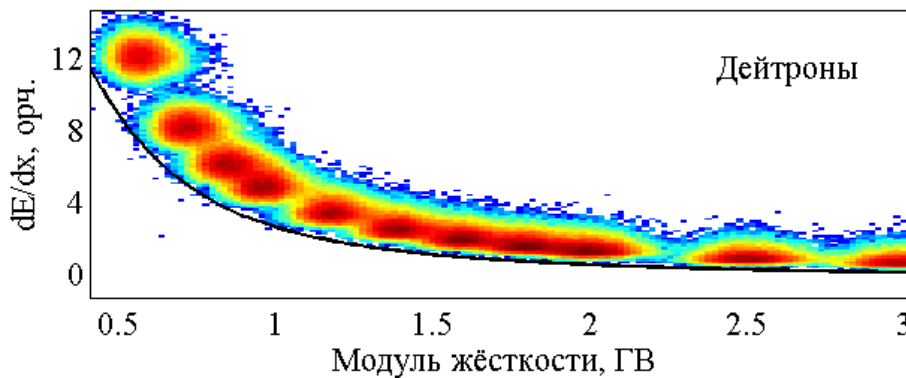


# Идентификация (анти) дейтронов



Выделение дейтронов и антидейтронов проводится в диапазоне жёсткостей от 0.4 до 3 ГВ.

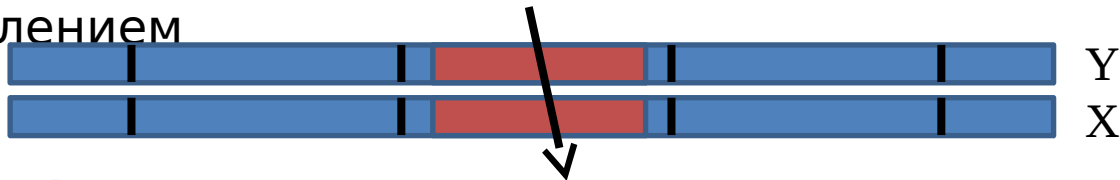
Разделение протонов/антипротонов и дейтронов/антидейтронов основано на различиях ионизационных потерь, измеряемых плоскостями трекера, счётчиками



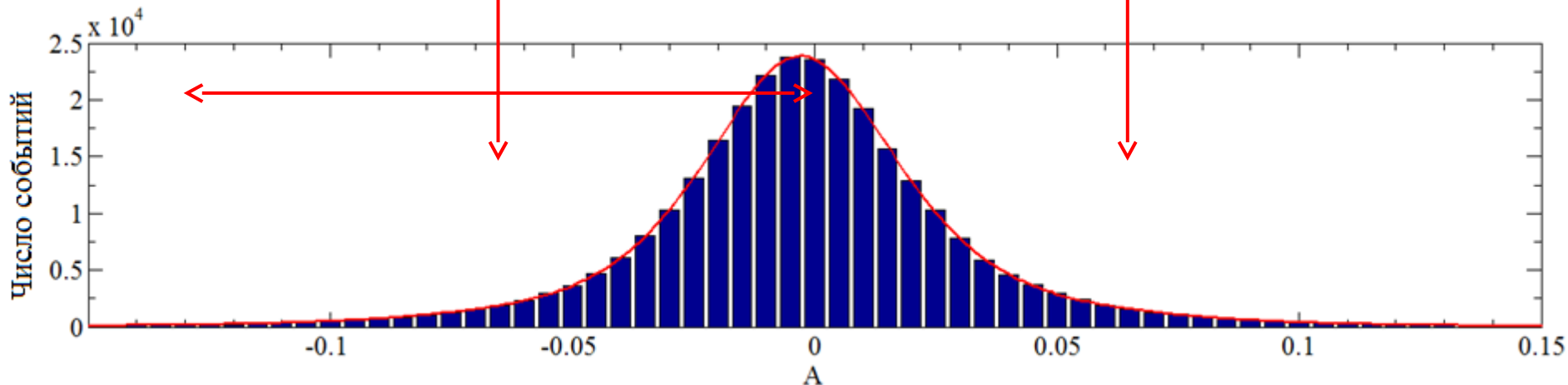
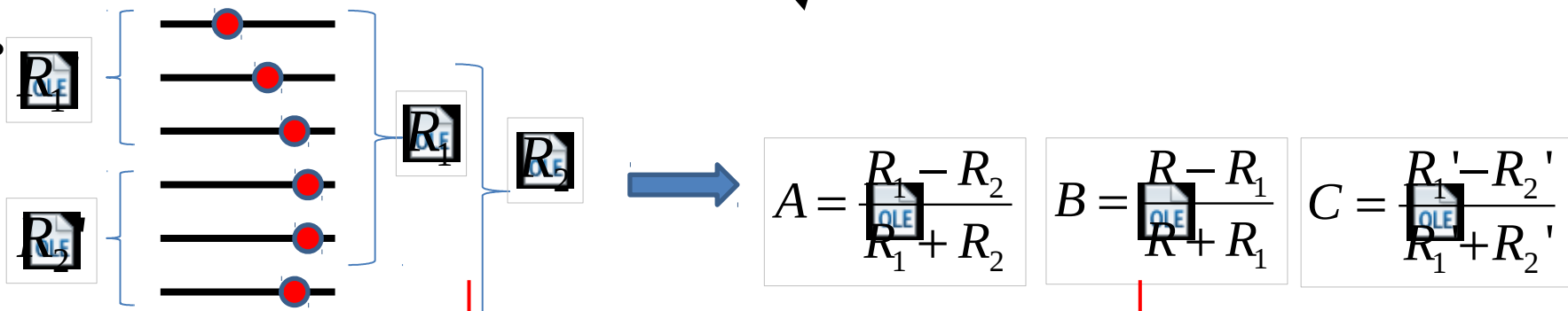
Полученная эффективность отбора дейтронов выше 95% при жёсткостях до 2 ГВ, с ростом энергии она уменьшается до 35% при 3 ГВ. Вероятность имитации антидейтрона антипротоном ниже 0.05% во всем диапазоне энергий.

## Рассеяния частиц на малые углы во внутренних плоскостях трекера

1. Восстановленная в трекаре траектория проходит через стрипы первых двух плоскостей калориметра с ненулевым энерговыделением

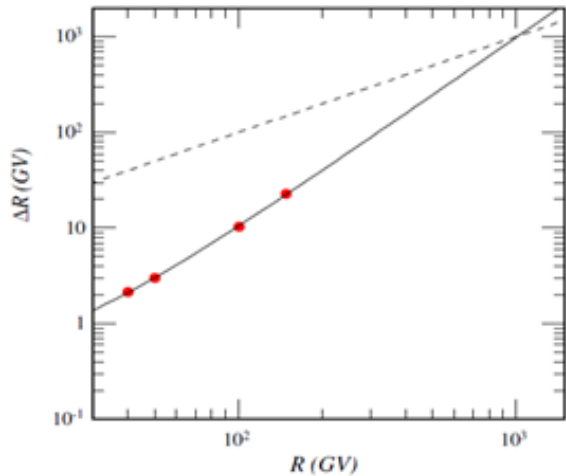
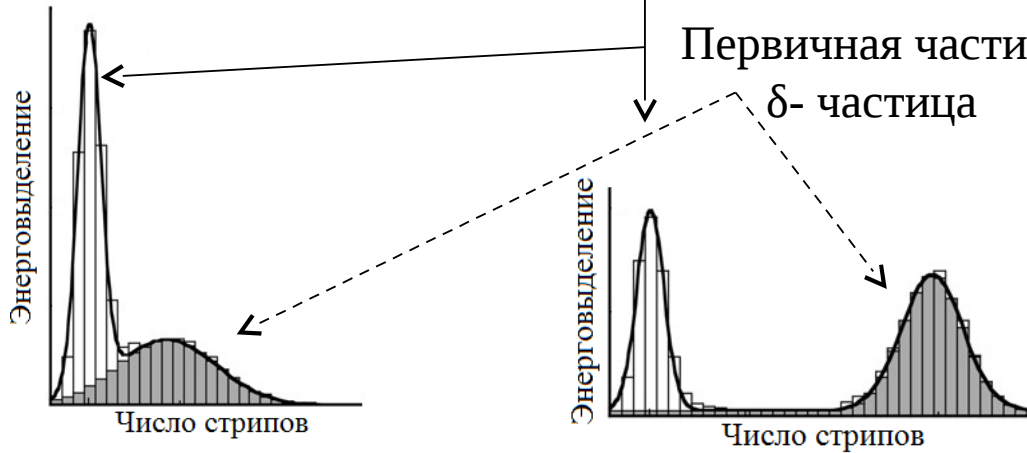


2.

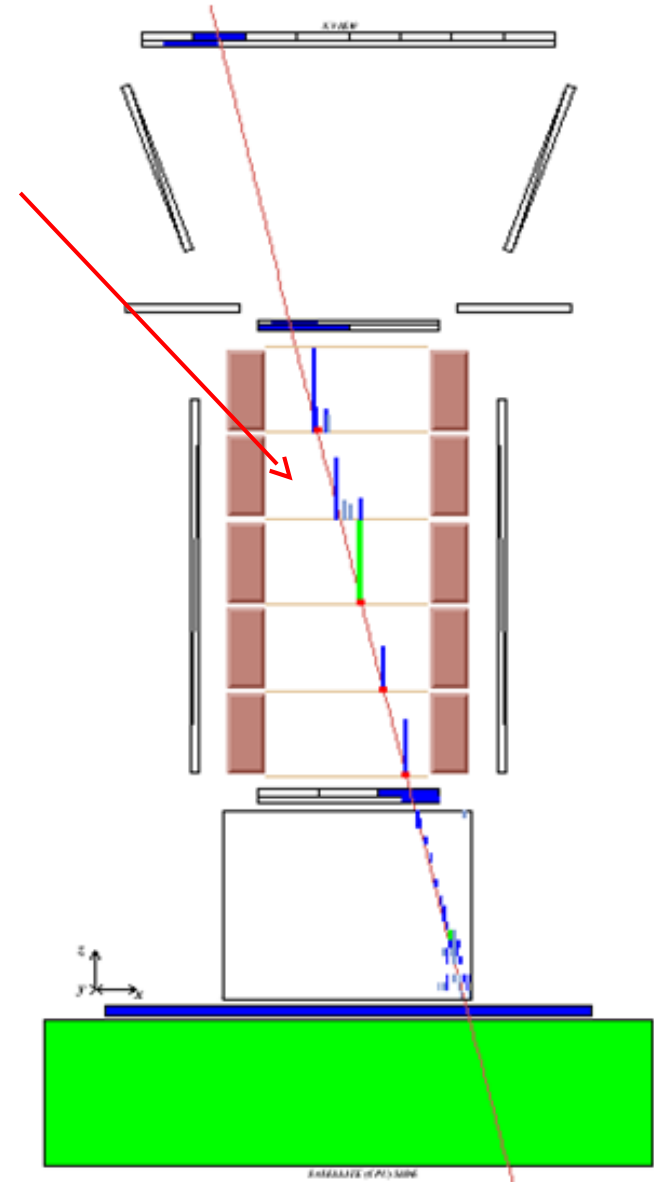


## $\delta$ -частицы или ядерные взаимодействия во внутренних плоскостях трекера

1. Число стрипов в кластерах, ассоциированном с треком (кластер – группа соседних сработавших стрипов)  $< 10$



Число кластеров, не  $< 4$ .  
 для жёсткость для  $IDR \sim 1$  ТВ).

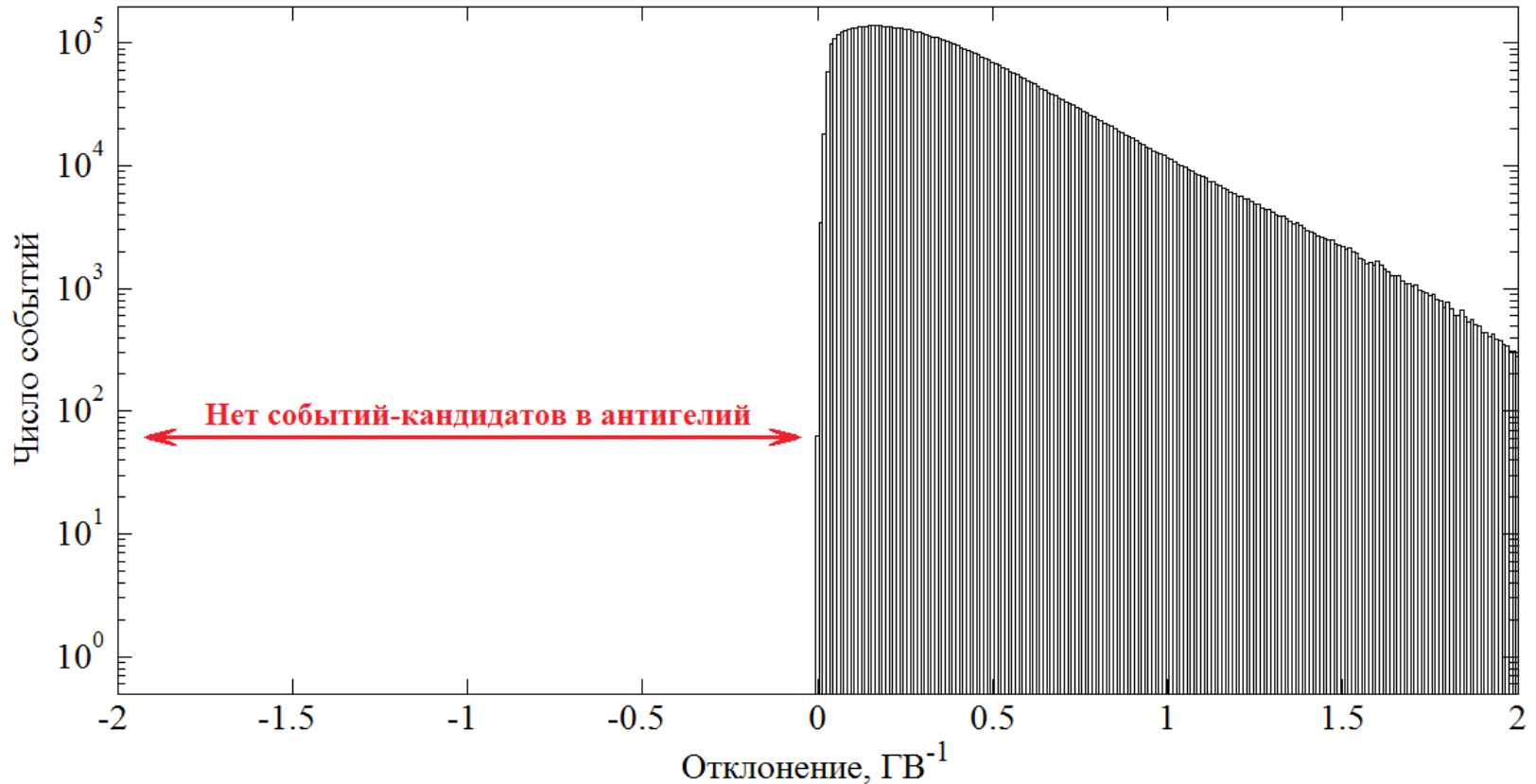




# Анти-He



Распределение событий с зарядом  $|Z|=2$  по отклонению в магнитном поле спектрометра после перечисленных критериев отбора; до жёсткости 600 ГВ событий с отрицательной жёсткостью не обнаружено.

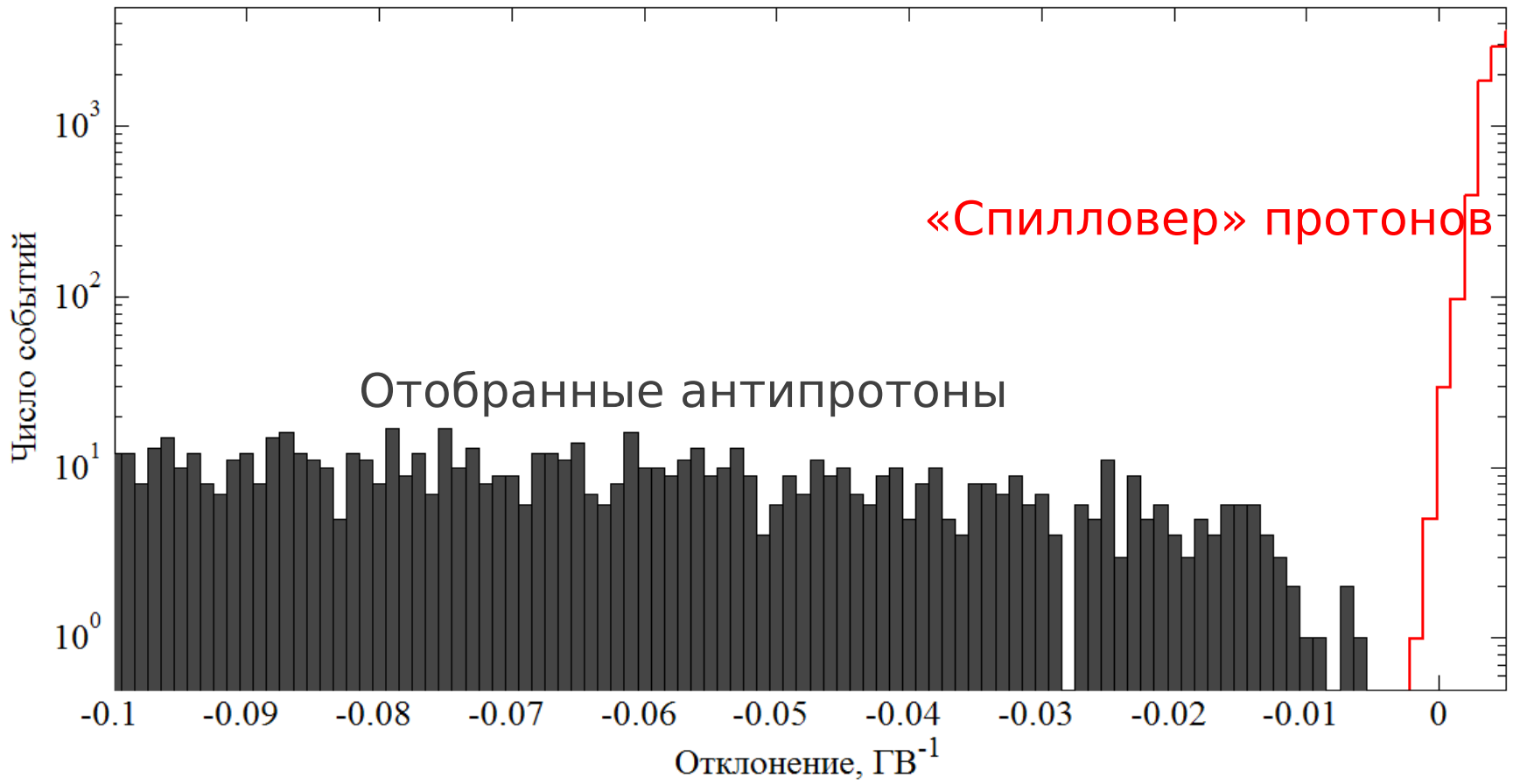




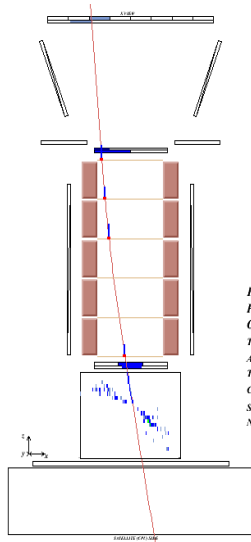
# Анти-р



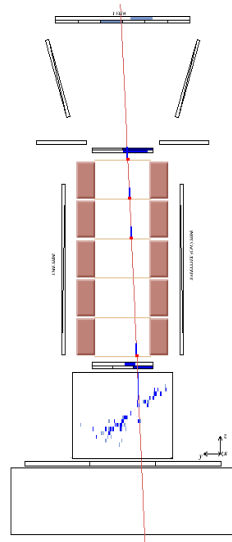
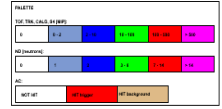
Распределение по отклонению в магнитном поле отобранных отрицательно и положительно заряженных частиц с  $|Z|=1$ ; продемонстрировано хорошее разделение выделенных антипротонов (затенённая гистограмма) и «спилловера» протонов



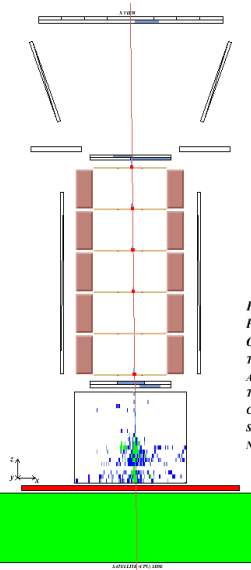
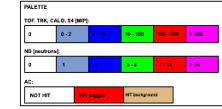
# Примеры отобранных антипротонов



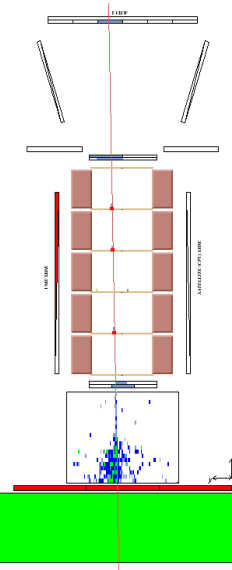
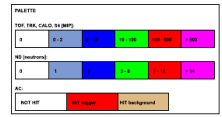
File: L2PAM060919.root - Pkt\_num: 8204265  
 Progressive number: 2169388  
 On Board Time: 366060278 [ms]  
 TRIGGER: TOF4 CALO  
 AC: CARD hit = 0 CAT hit = 0 CAS hit = 0  
 TRK: RIG = -0.632 [GV] CH2 = 796  
 CALO: NSTRIP = 146 QTOT = 479 [MIP]  
 S4: 0 [MIP] TOF:  $\beta = 0.619$   
 ND: Trig: 0 - Bckgr: upper = 3 lower = 2



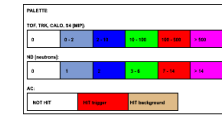
File: L2PAM081223.root - Pkt\_num: 14031726  
 Progressive number: 1223030  
 On Board Time: 643773458 [ms]  
 TRIGGER: TOF4 CALO  
 AC: CARD hit = 0 CAT hit = 0 CAS hit = 2  
 TRK: RIG = -0.757 [GV] CH2 = 162  
 CALO: NSTRIP = 74 QTOT = 292 [MIP]  
 S4: 2.27 [MIP] TOF:  $\beta = 0.585$   
 ND: Trig: 0 - Bckgr: upper = 10 lower = 10



File: L2PAM080301.root - Pkt\_num: 5164084  
 Progressive number: 1567477 - S4 trigger -  
 On Board Time: 236173691 [ms]  
 TRIGGER: TOF4 CALO  
 AC: CARD hit = 0 CAT hit = 0 CAS hit = 1  
 TRK: RIG = -106 [GV] CH2 = 0.381  
 CALO: NSTRIP = 474 QTOT = 3250 [MIP]  
 S4: 104 [MIP] TOF:  $\beta = 1.11$   
 ND: Trig: 3 - Bckgr: upper = 7 lower = 7



File: L2PAM061105.root - Pkt\_num: 3262035  
 Progressive number: 59060  
 On Board Time: 146418536 [ms]  
 TRIGGER: TOF1 CALO  
 AC: CARD hit = 0 CAT hit = 0 CAS hit = 0  
 TRK: RIG = -111 [GV] CH2 = 0.202  
 CALO: NSTRIP = 38 QTOT = 58 [MIP]  
 S4: 0 [MIP] TOF:  $\beta = 0.989$   
 ND: Trig: 0 - Bckgr: upper = 5 lower = 15





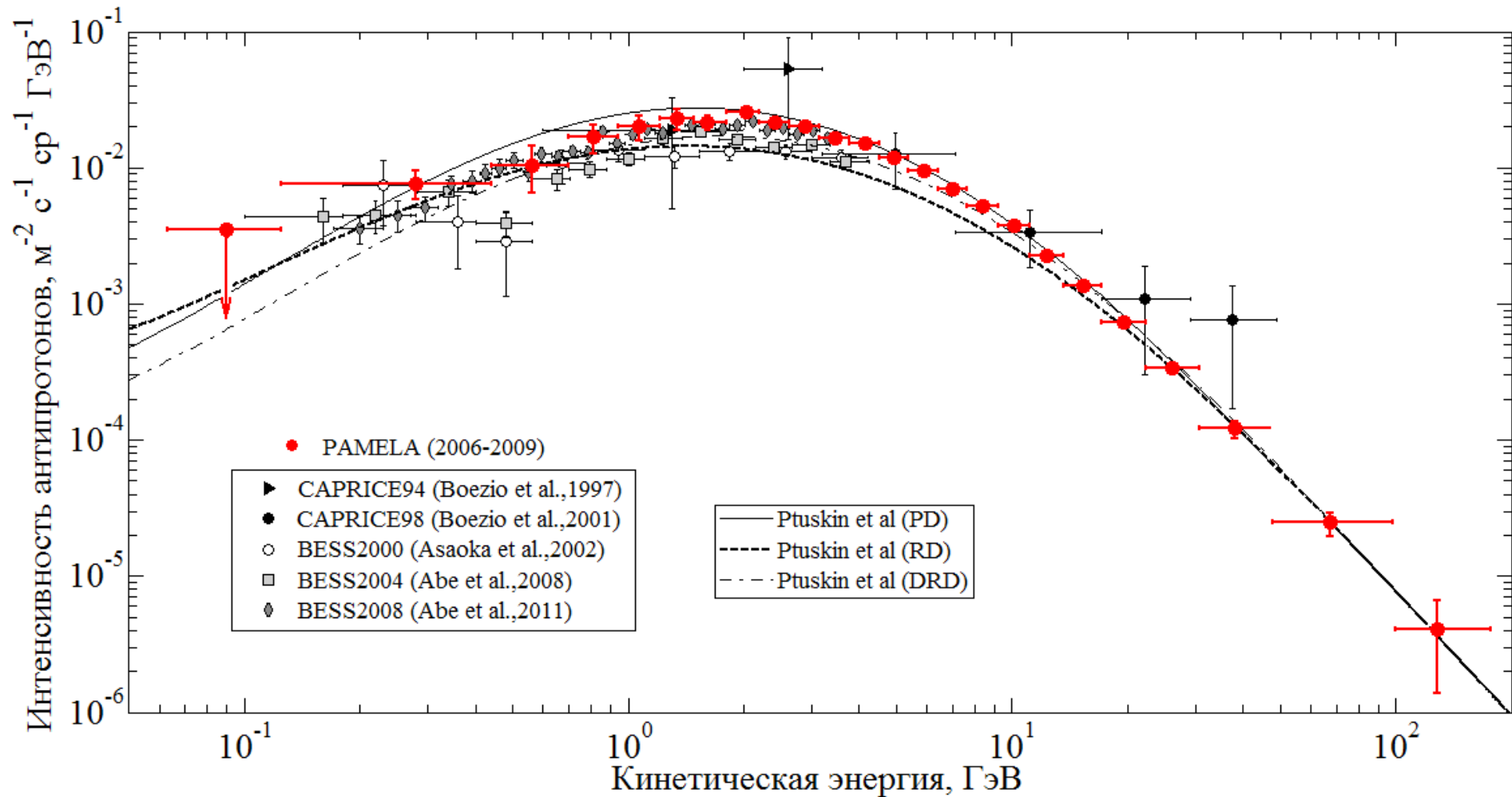


# Дифференциальный энергетический спектр антипротонов



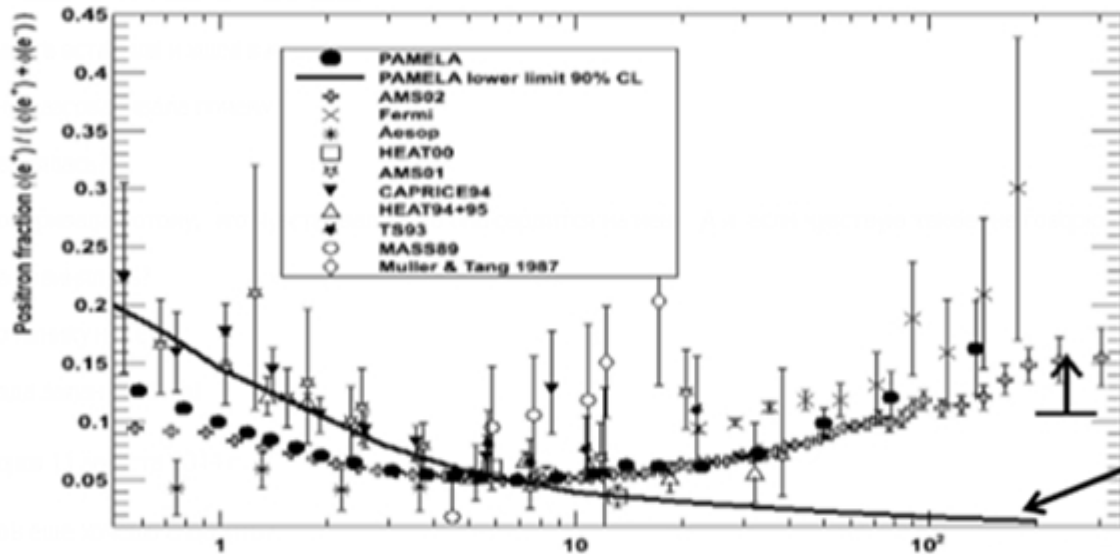
Измеренный дифференциальный энергетический спектр антипротонов

- 1) при низких энергиях находится в согласии с экспериментом BESS;
- 2) можно описать моделью вторичного происхождения антипротонов Галактике;



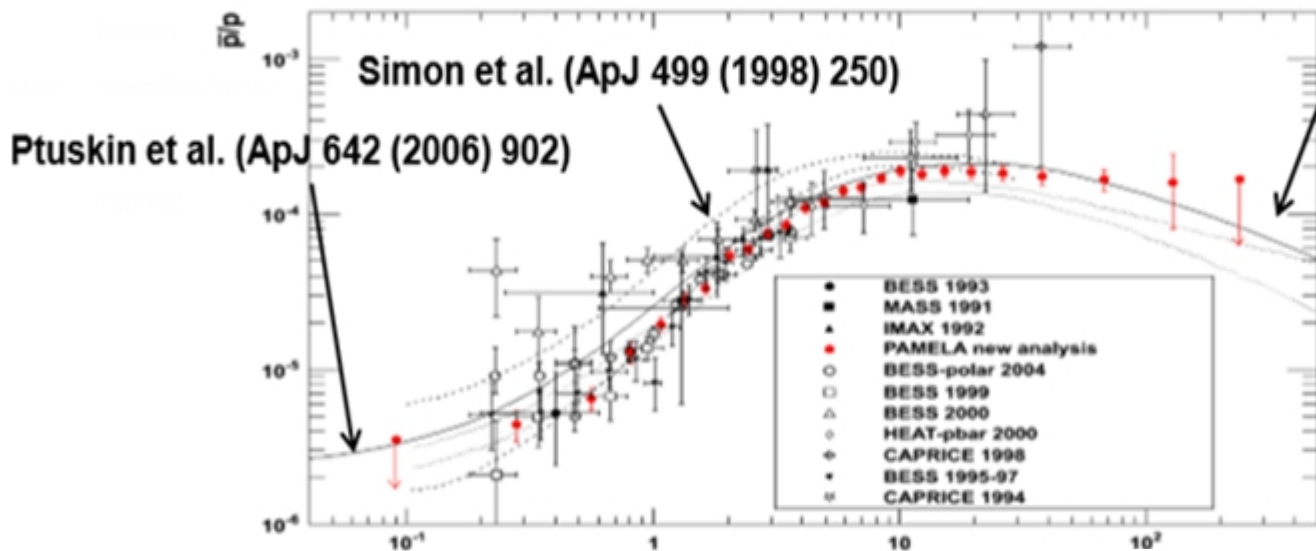


# Отношение потоков позитронов и электронов, а также антипротонов и протонов



Moskalenko & Strong, 98

Энергия, ГэВ



Donato et al.  
(PRL 102 (2009)  
071301)

Энергия, ГэВ

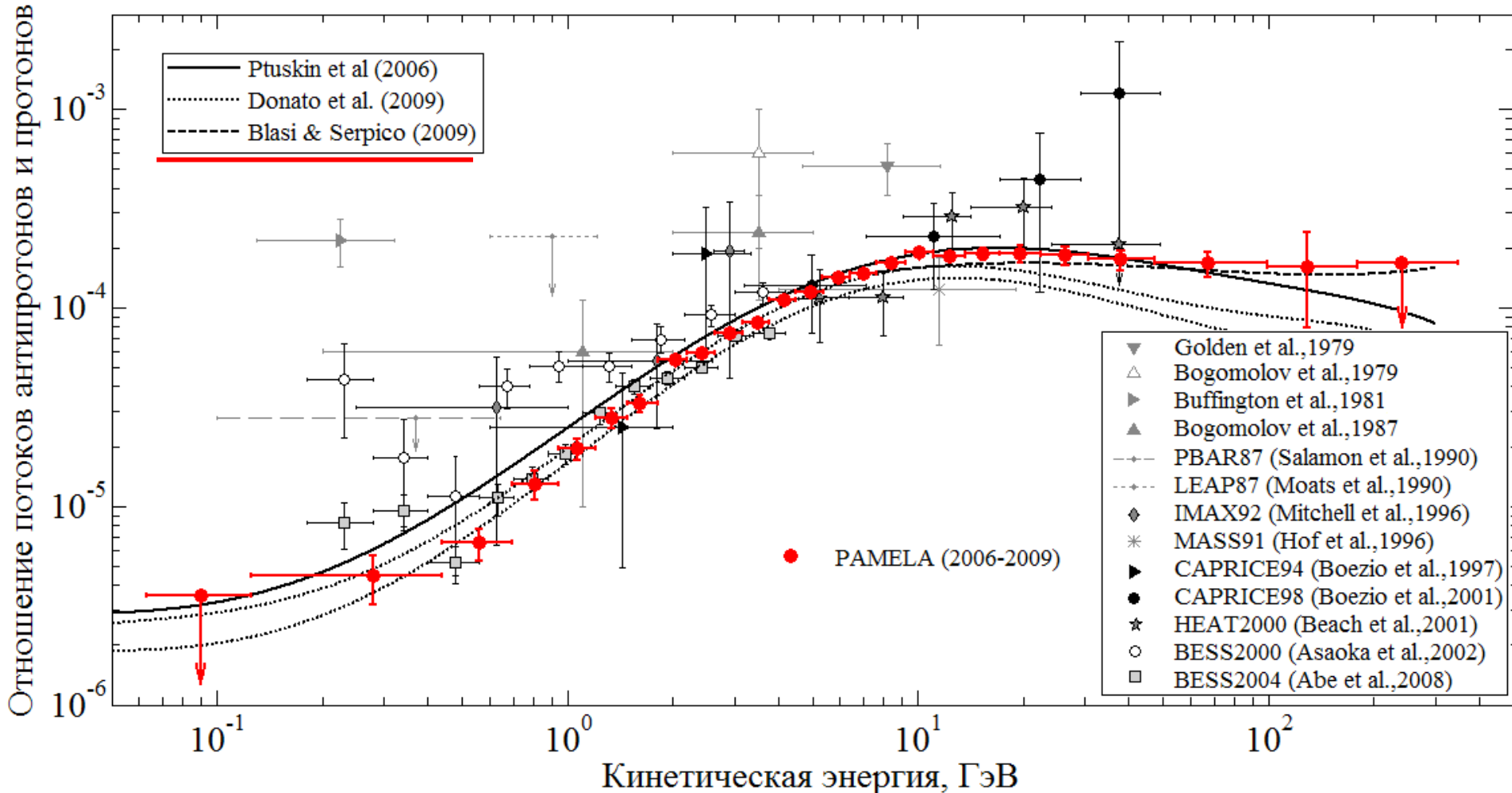


# Отношение потоков антипротонов и протонов



Отношение потоков антипротонов и протонов

- 1) при низких энергиях находится в согласии с экспериментом BESS;
- 2) можно описать моделью вторичного происхождения антипротонов Галактике; ??
- 3) не исключает присутствия антипротонов от дополнительного источника.





# Наиболее важные параметры, определяющие спектр ГКЛ



## Механизмы ускорения

Спектр инжекции в межзвездную среду  $N(R) \sim R^{-\alpha}$

## Распространение в Галактике

Диффузия  $K(R) \sim K_0 R^\delta$

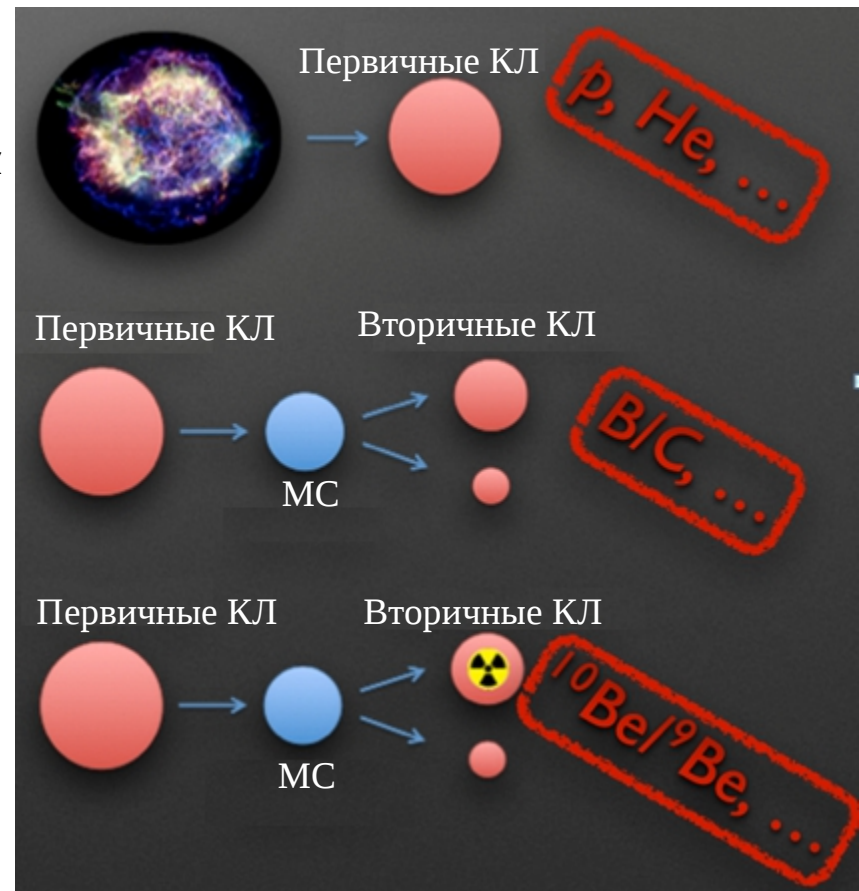
Конвекция

Доускорение

## Геометрия Галактики

Характерные размеры  $L, h$

### Тест





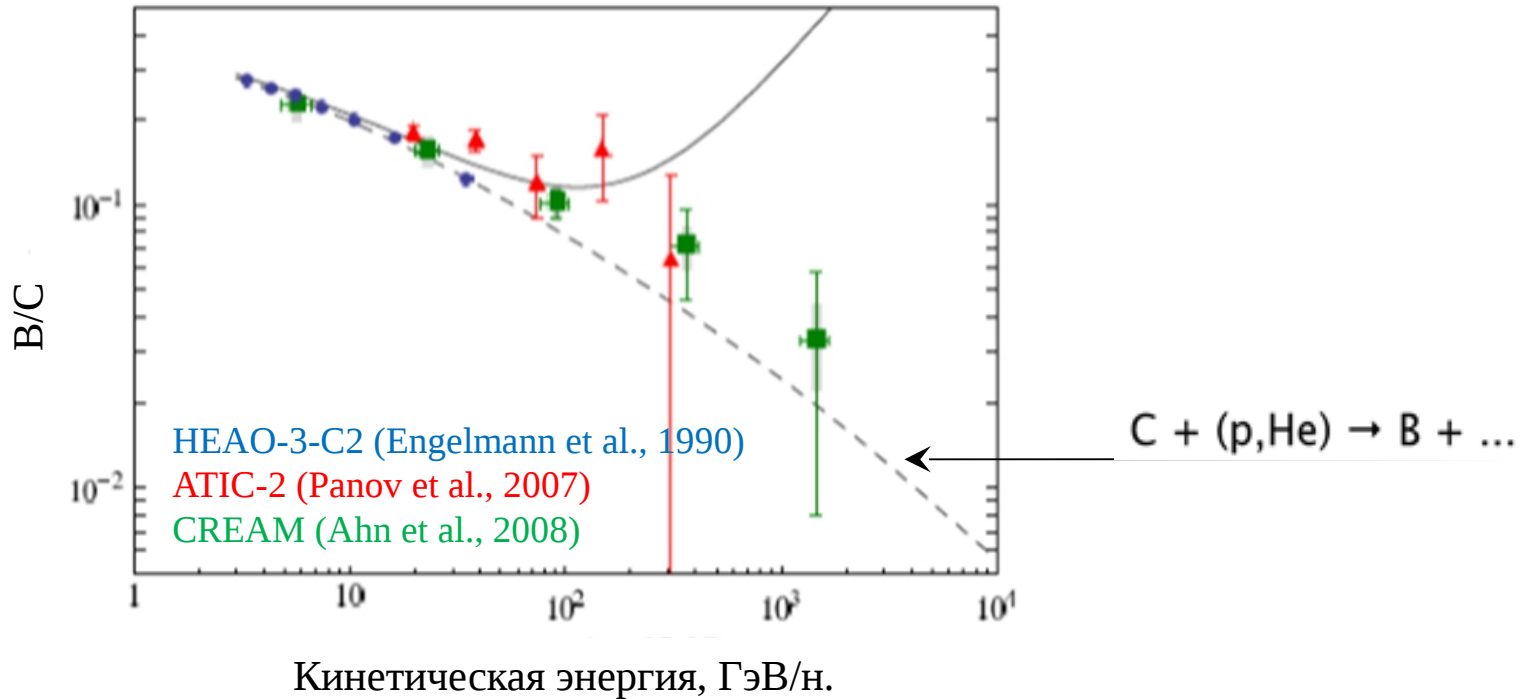
# Рождение «вторичных» в источниках



P. Blasi, PRL 103 (2009) 051104 (see also Y. Fujita et al., PRD 80 (2009) 063003, M. Ahlers et al. PRD 80 (2009) 123017) Positrons (and electrons) produced as secondaries in the sources (e.g. SNR) where CRs are accelerated.

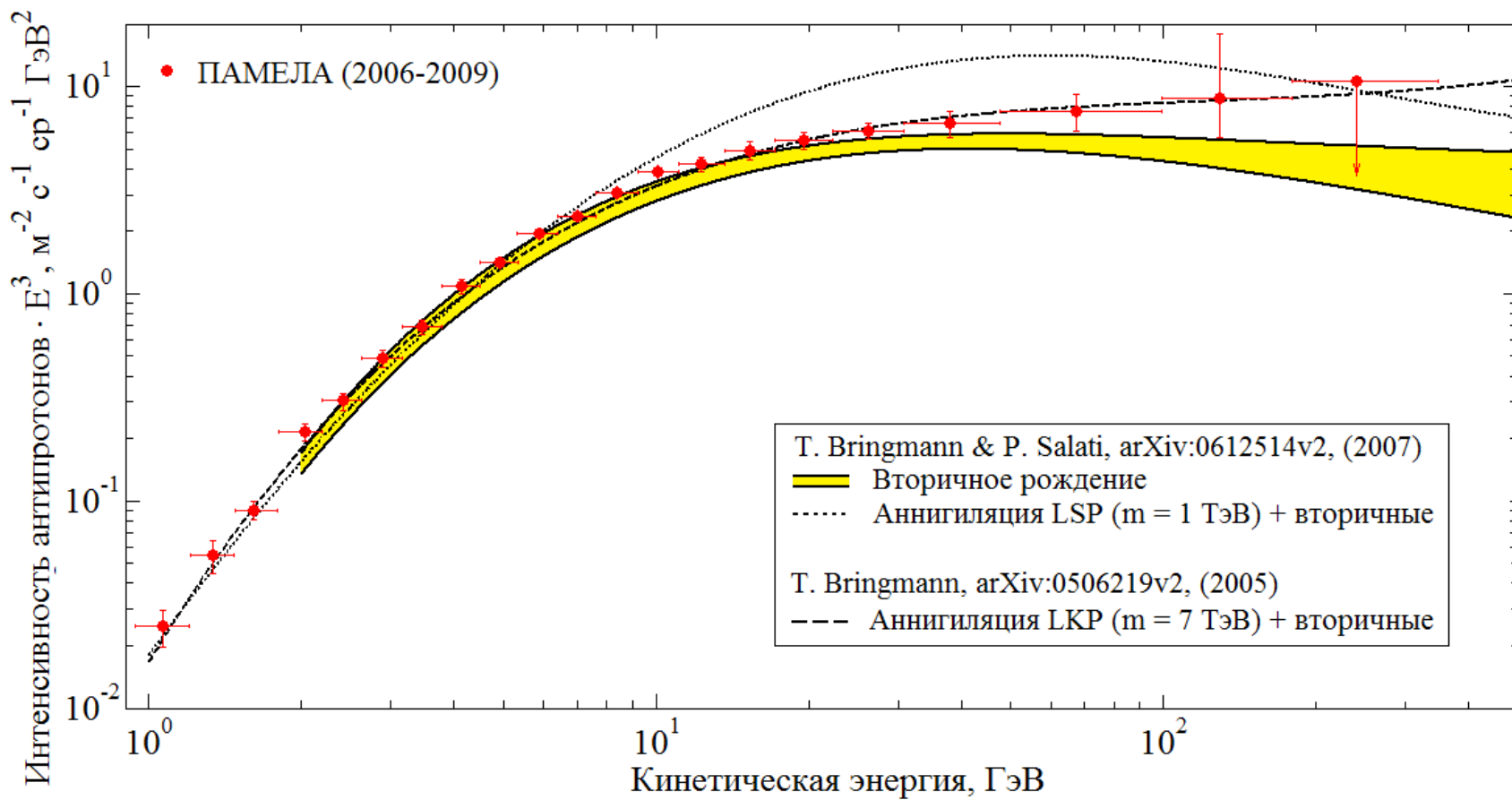
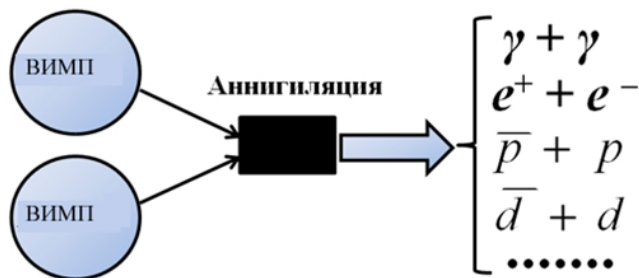
- Также рождаются ядра (антиядра), которые могут быть только вторичного происхождения
- В частности, ожидается рост отношений анти-p/p и B/C

P. Mertsch & S. Sarkar, PRL 103 (2009) 081104



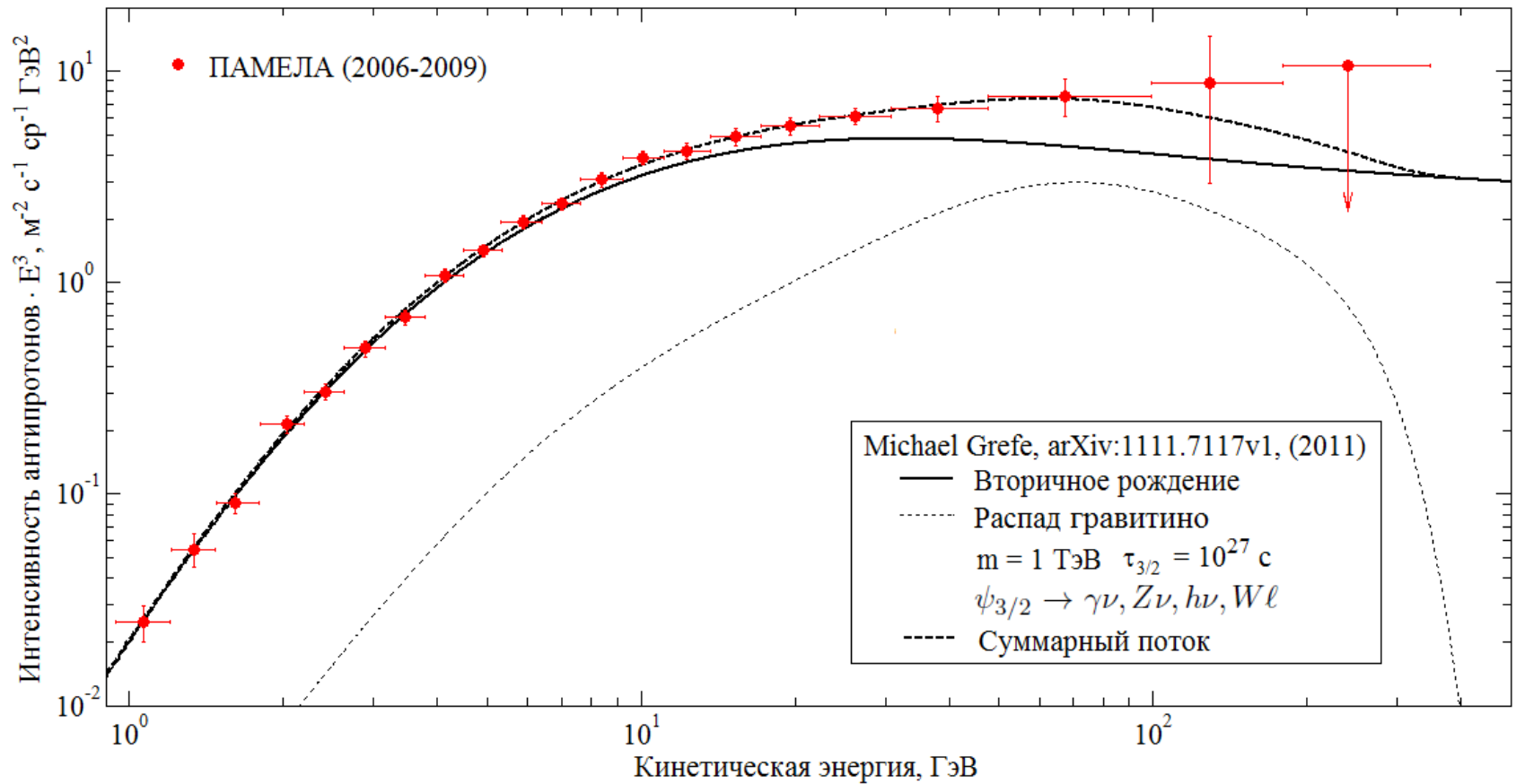
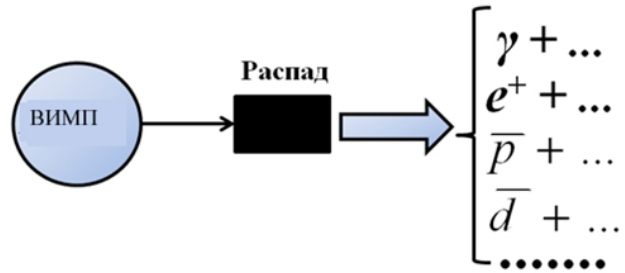


# Антипротоны высоких энергий от аннигиляции частиц скрытой массы





# Антипротоны высоких энергий от распада частиц скрытой массы

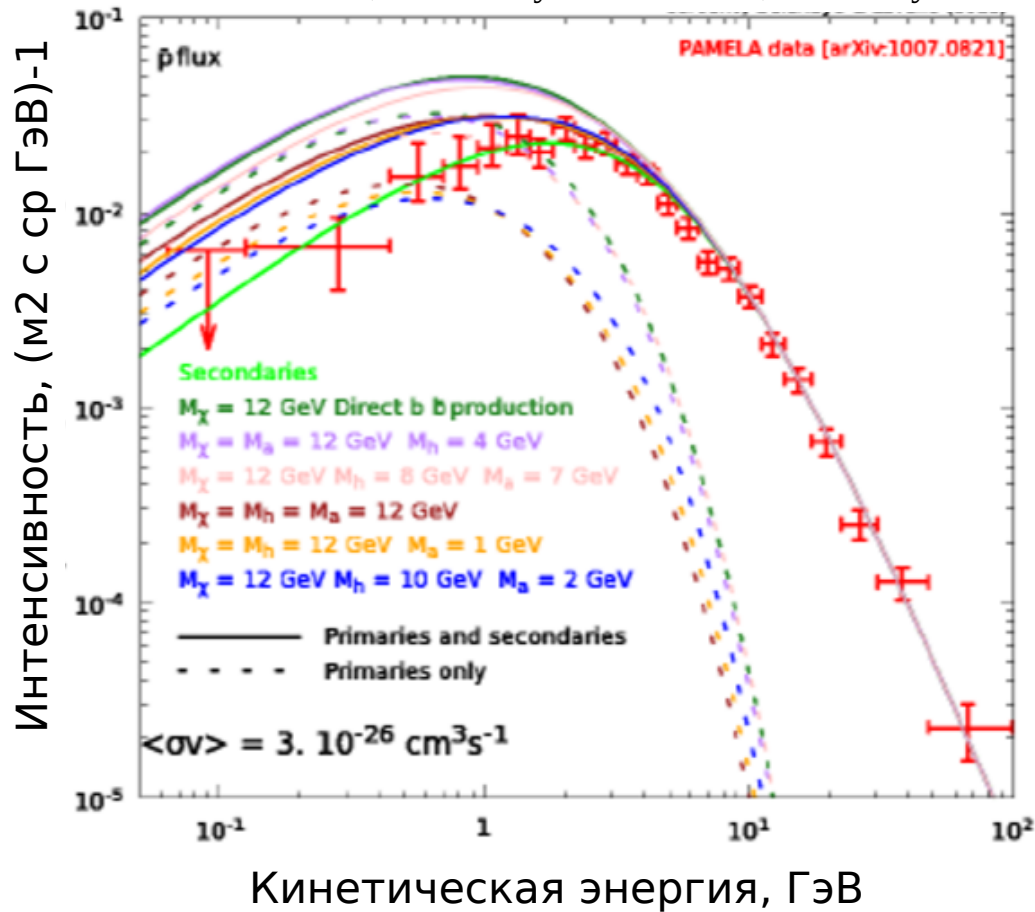




# Антипротоны низких энергий от аннигиляции частиц скрытой массы



D. G. Cerdeno, T. Delahaye & J. Lavalle, Nucl. Phys. B 854 (2012) 738



Предсказание потока антипротонов от аннигиляции WIMP с массой 12 ГэВ на состояния из 2-х бозонов разной массы с последующим распадом на кварки.

## Аналогичные работы

M. Asano, T. Bringmann & C. Weniger, Phys. Lett. B 709 (2012) 128.

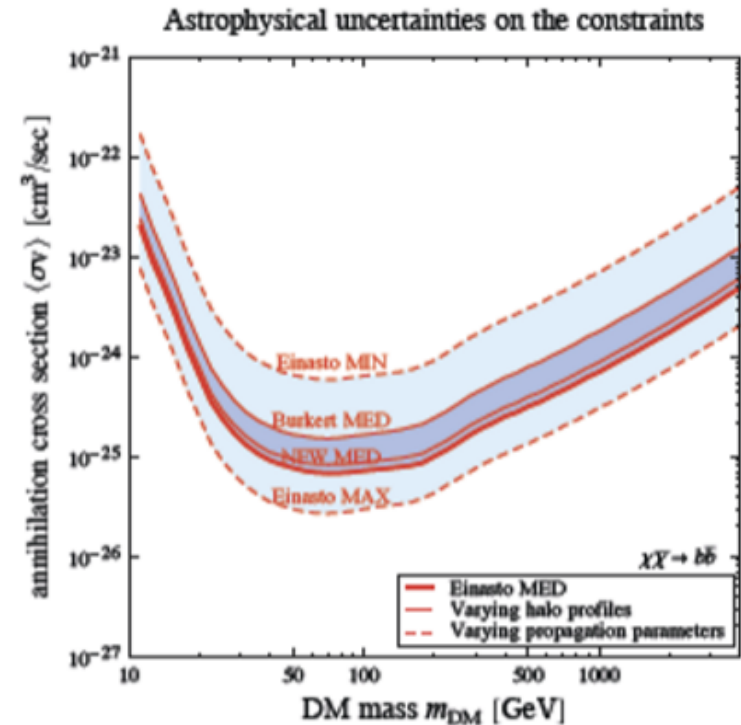
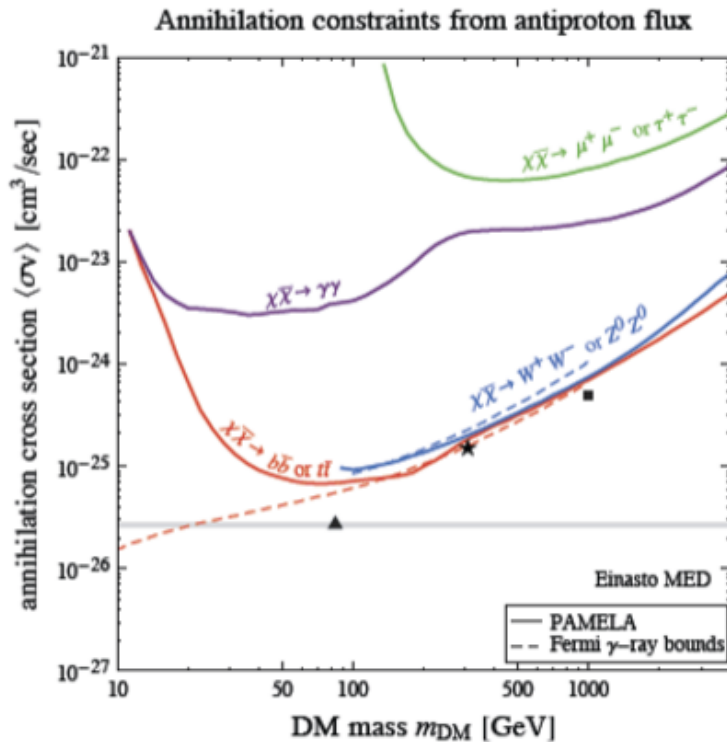
M. Garny, A. Ibarra & S. Vogl, JCAP 1204 (2012) 033

R. Kappl & M. W. Winkler, PRD 85 (2012) 123522





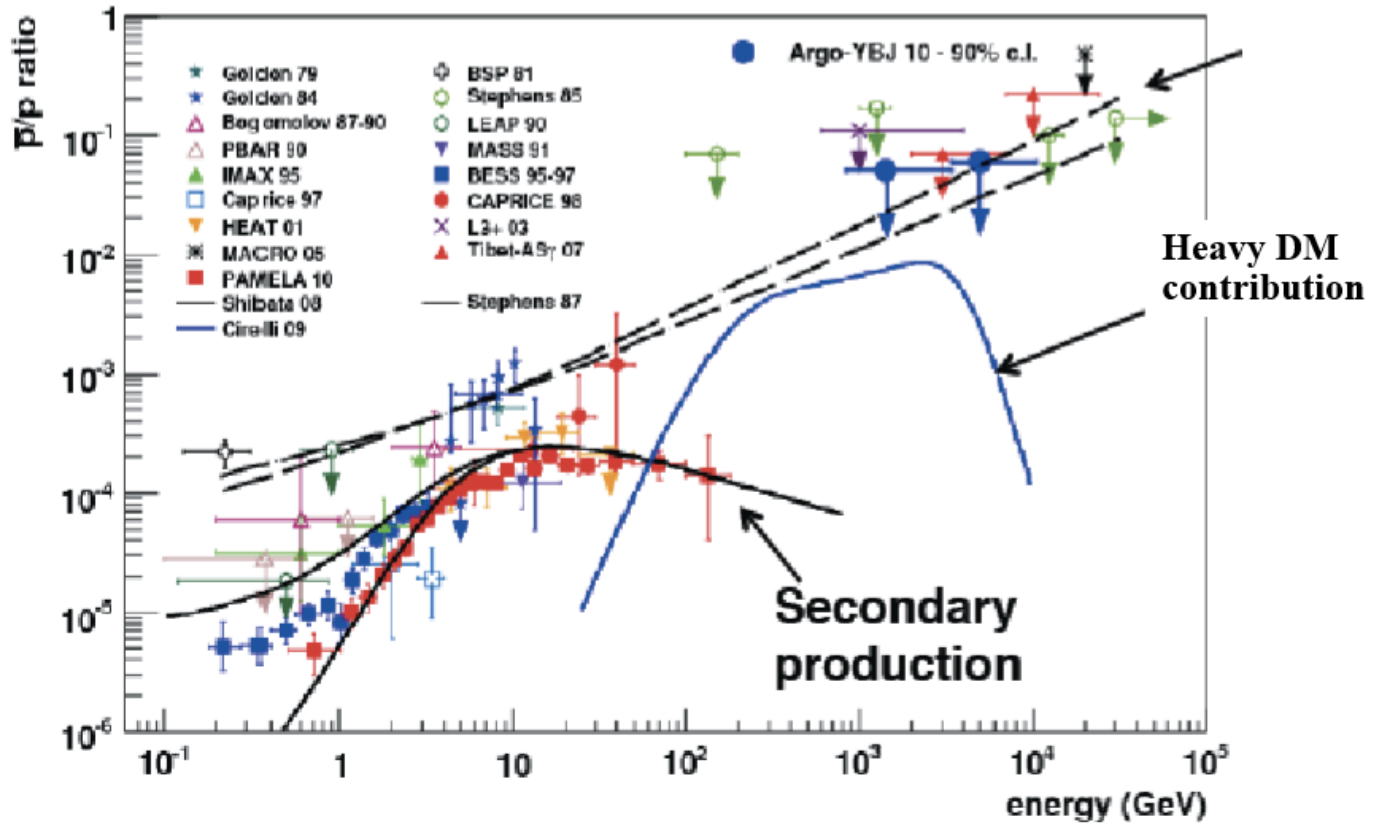
# Антипротоны низких энергий от аннигиляции частиц скрытой массы



**M. Cirelli & G. Giesen, JCAP 1304 (2013) 015, arXiv: 1301:7079**  
**“Antiprotons are a very relevant tool to constrain Dark Matter annihilation and decay, on a par with gamma rays for the hadronic channels. Current PAMELA data and especially upcoming AMS-02 data allow to probe large regions of the parameter space.”**



# Антипротоны низких энергий от аннигиляции частиц скрытой массы



G. Di Sciacio, TeVPA 2011, Stockholm (2011)



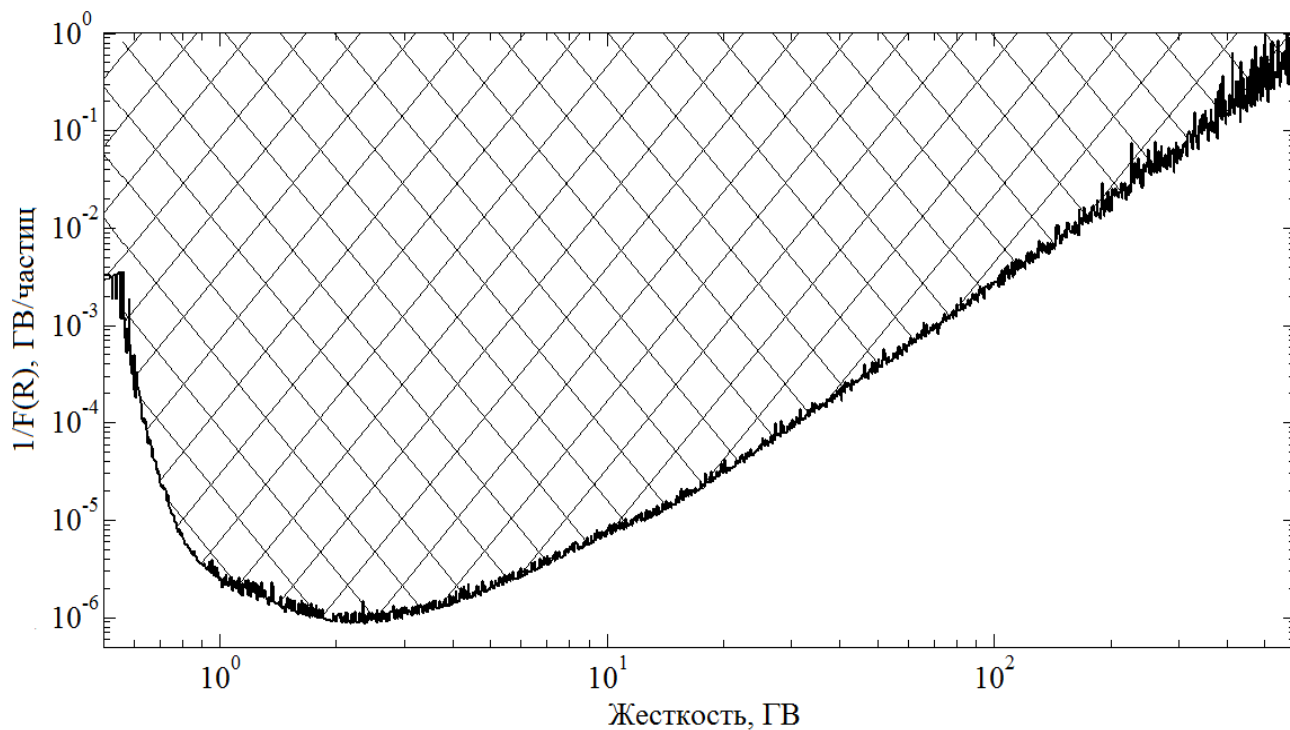
# Верхний предел на отношение потоков антигелия и гелия



В интервале жесткостей от 0.6 ГВ до 600 ГВ отобрано около 15.000.000 событий с зарядом 2 и все они имели положительную жесткость. Установлен верхний предел на отношение  $\overline{He} / He$ :

$$\frac{N_{\overline{He}}(R_1; R_2)}{N_{He}(R_1; R_2)} < \frac{3}{\int_{R_1}^{R_2} F(R) dR} \cdot \frac{3}{\int_{R_1}^{R_2} \frac{dN_{He}^1(R)}{dR} dR} \cdot \frac{\epsilon_{He}(R_1; R_2)}{\epsilon_{\overline{He}}(R_1; R_2)}$$

$$F(R) = \frac{dN_{He}^1(R)}{dR} \cdot \frac{\epsilon_{\overline{He}}(R)}{\epsilon_{He}(R)}$$



$F(R)$  - энергетическое распределение частиц с поправкой на различные эффективности регистрации гелия и антигелия, обусловленные дополнительной возможностью аннигиляции антигелия в магнитном спектрометре, которые были получены из эмпирических расчетов.

Функция  $1/F(R)$  может интерпретироваться как **дифференциальный верхний предел**.

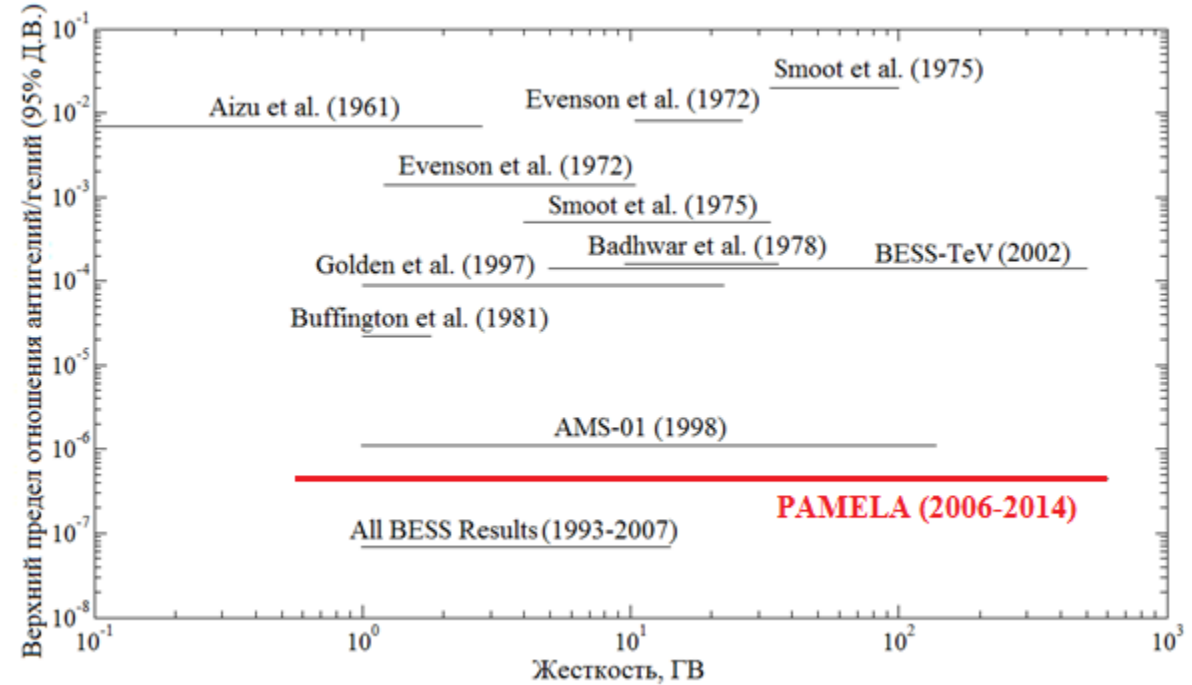
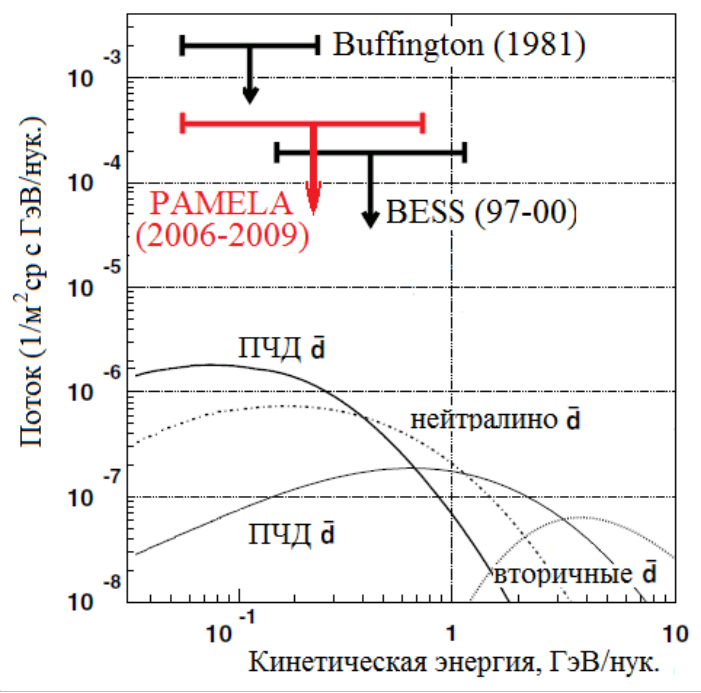


# Верхний предел на поток дейтронов и отношение потоков антигелия и гелия



Верхний предел на поток антидейтронов в современных экспериментах оказывается на несколько порядков выше

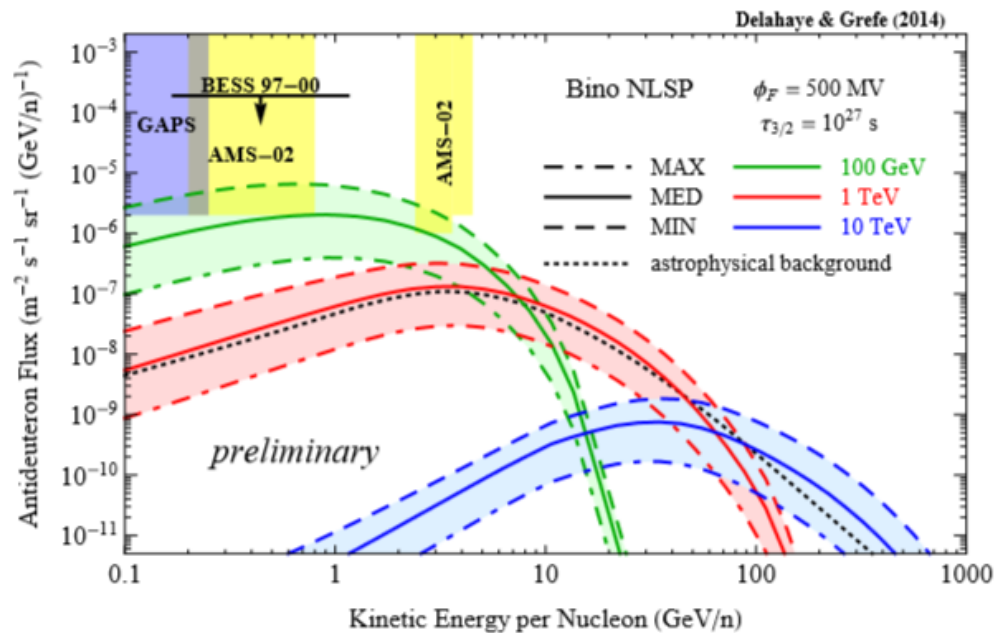
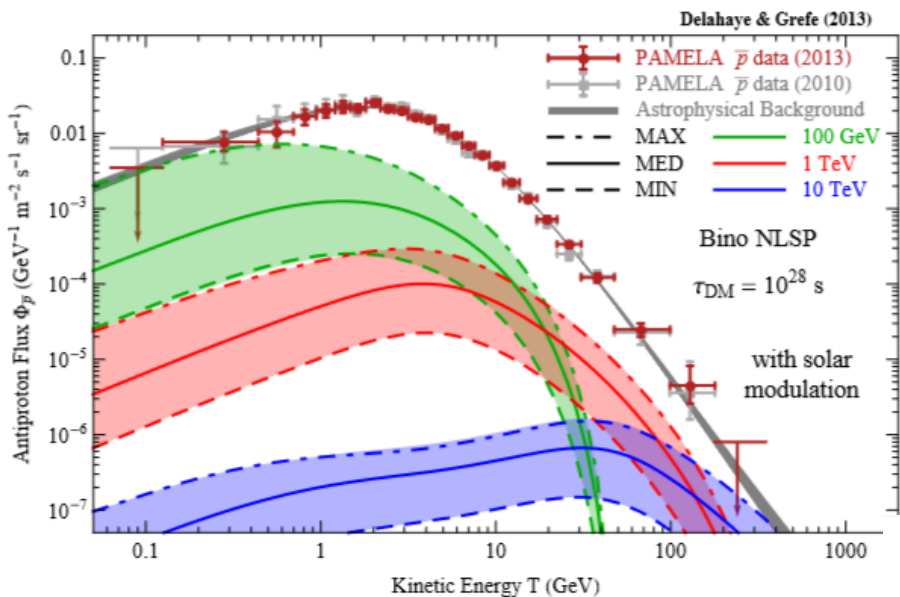
Поиск антигелия наиболее целесообразен при высоких энергиях (>20-30 ГВ), т.к. при низких энергиях поток антиядер будет ослаблен при распространении от источника через Галактику и Солнечную систему из-за малой длины свободного пробега и большого сечения аннигиляции.





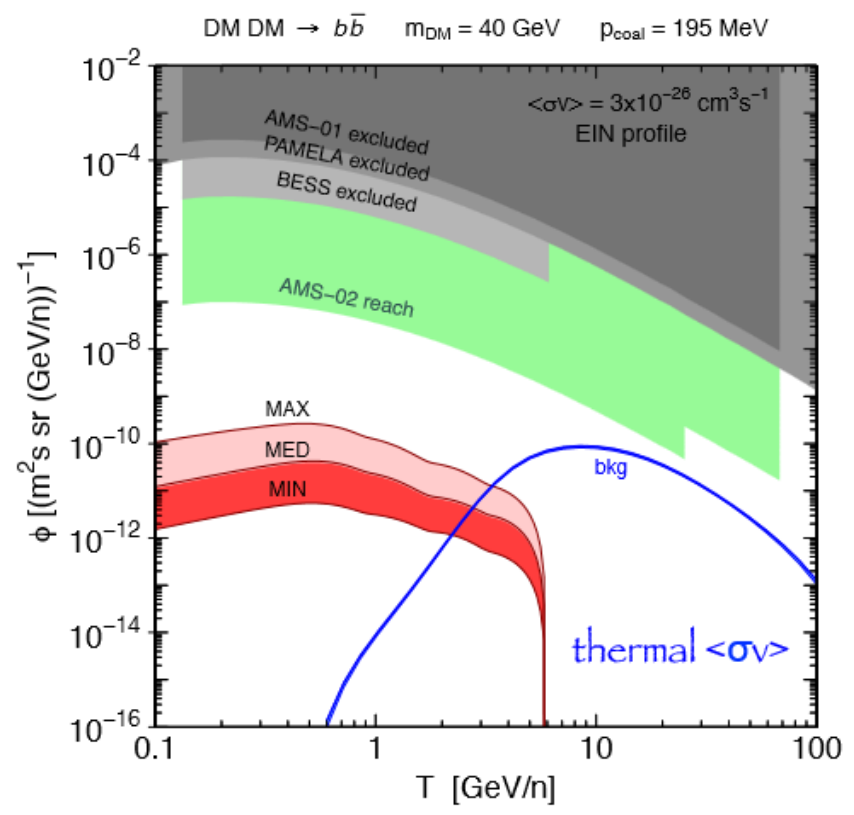
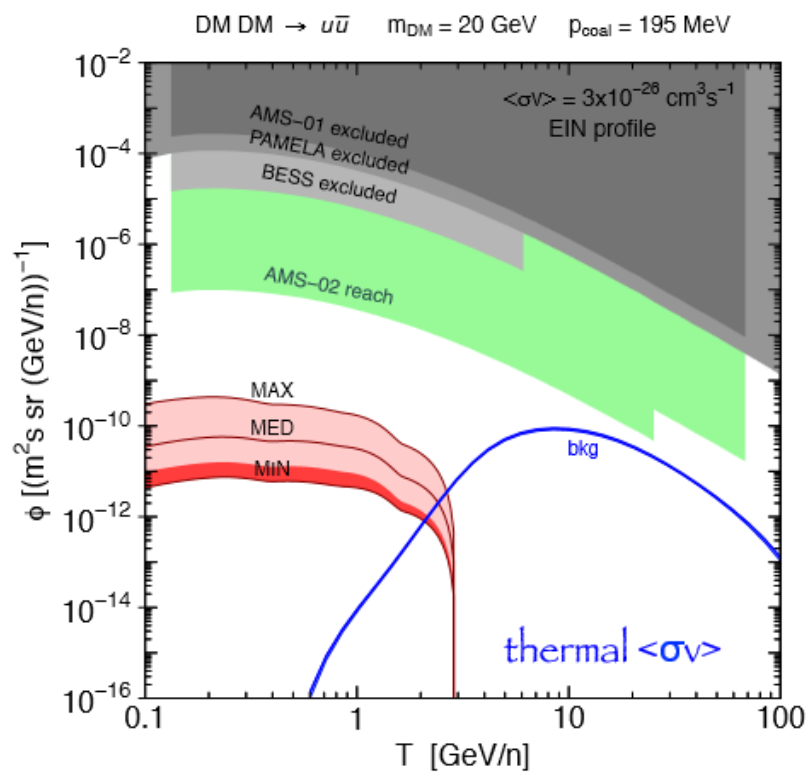
# Распад гравитино.

## Сигнал в потоках антипротонов и антидейтронов.





# Антигелий-3





# Заключение



Спасибо за внимание!

