



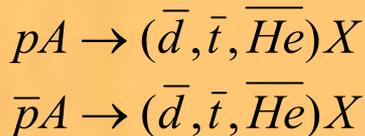
Институт Космофизики

Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ»

# Методика выделения антиядер в эксперименте PAMELA

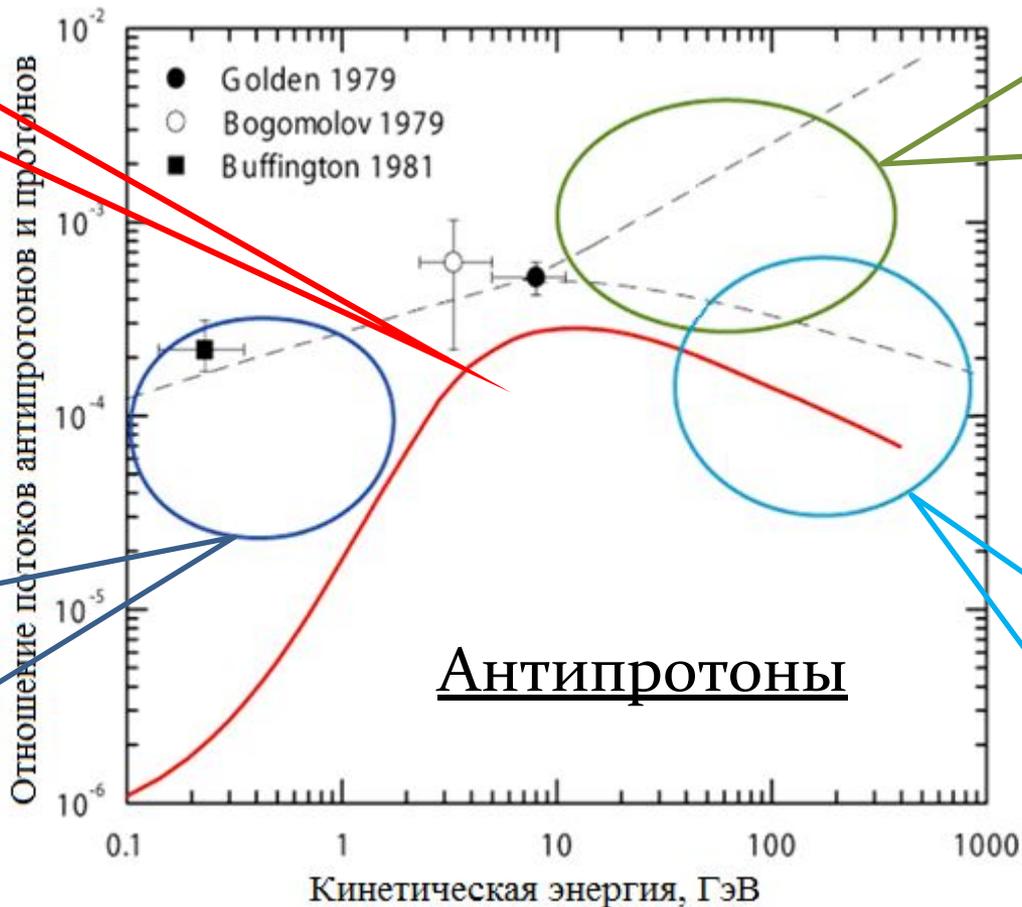
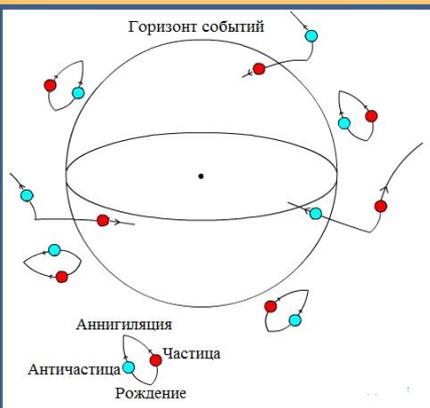
А.М. Гальпер, А.Г. Майоров  
*от коллаборации PAMELA*

# Источники антиядер в космических лучах



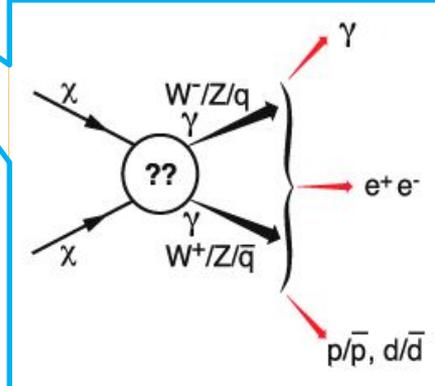
Вторичное рождение

Испарение ПЧД



Домены антивещества: антигалактики, шаровые скопления антизвёзд и др.

Скрытая масса



Важно искать и антиядра с зарядом  $|Z| > 1$ , например, антигелий, т.к расчетное отношение анти-He/He в случае его вторичного происхождения  $\sim 10^{-12} - 10^{-14}$

# Научная аппаратура PAMELA

Запущена 15 <sup>ИЮНЯ</sup> 2006 г. на ИСЗ Ресурс-ДК1



## Время-пролётная система

### Система сцинтилляционных счётчиков

- Формирование триггера и определение направления прилёта частиц
- Определение массы при энергиях менее 1.5 ГэВ
- Измерение ионизационных потерь и определение абсолютной величины заряда  $|Z|$

## Система антисовпадений

### Сцинтилляционные экраны

- Исключение из анализа событий вне апертуры пробора
- Исключение взаимодействующих в контейнере событий

## Электромагнитный калориметр

### W/Si позиционно-чувствительный ( $16.3 X_0$ , $0.6 \lambda_I$ )

- Разделение  $e^+/p$ ,  $anti-p/e^-$
- Измерение энергии  $e^-/e^+$

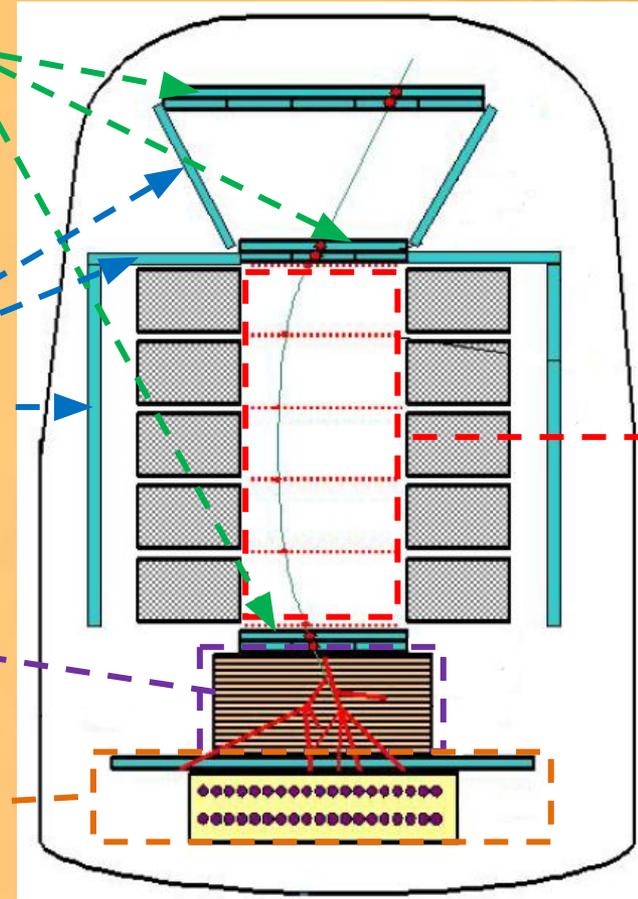
## Детектор утечки ливня и нейтронный детектор

Разделение электронов и адронов при высоких энергиях

## Матнитный спектрометр

### Микростриповая кремниевая трековая система + постоянный магнит (5 секций)

- Измерение жёсткости  $R$  и определение импульса  $p$  ( $R = pc/|Ze|$ )
- Измерение ионизационных потерь и определение абсолютной величины заряда  $|Z|$
- Определение знака заряда (разделение частиц и античастиц)



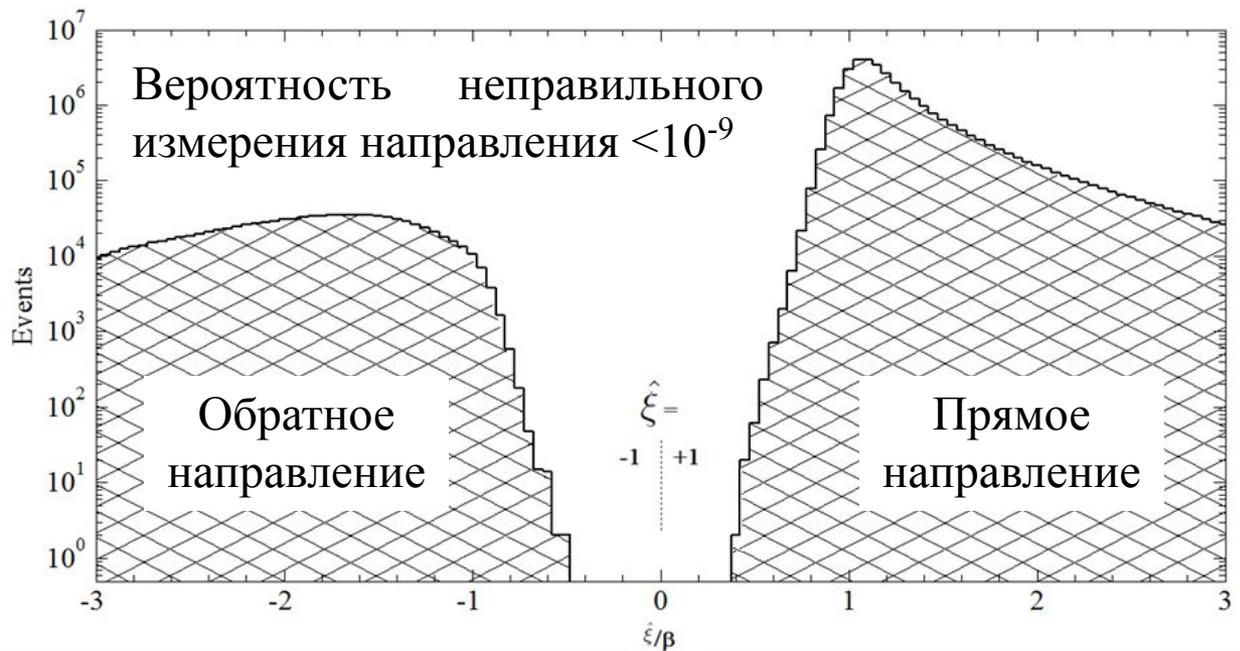
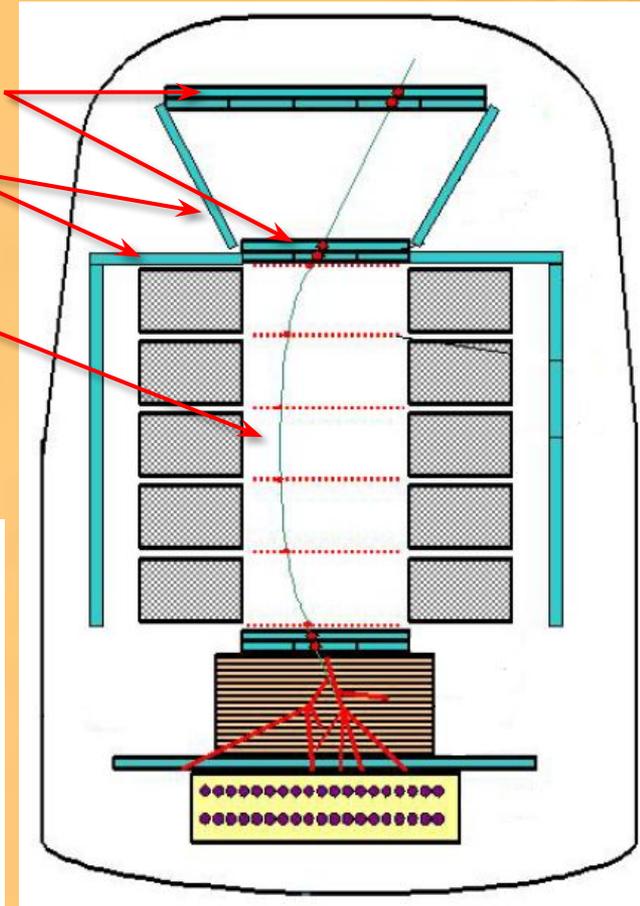
ГФ: 21.6 см<sup>2</sup> ср  
Масса: 470 кг  
Размеры: 130 · 70 · 70 см<sup>3</sup>

# Базовый отбор



Выделение событий, для которых можно измерить жёсткость и скорость:

- Не более 1го срабатывания в верхних счетчиках ВПС
- Отсутствие сигнала в верхних счетчиках АС
- Идентифицирована только 1 траектория в трекаре
- Траектория не касается магнита



Определение направления прилёта частиц

□  $\beta > 0$

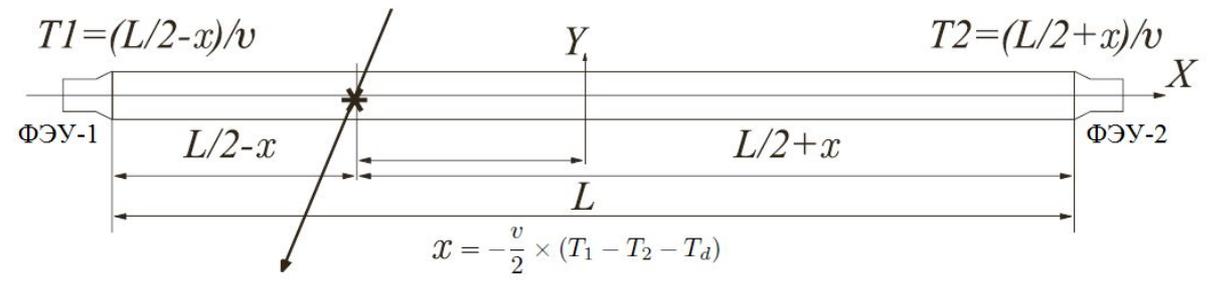


# События с неправильно измеренной жесткостью

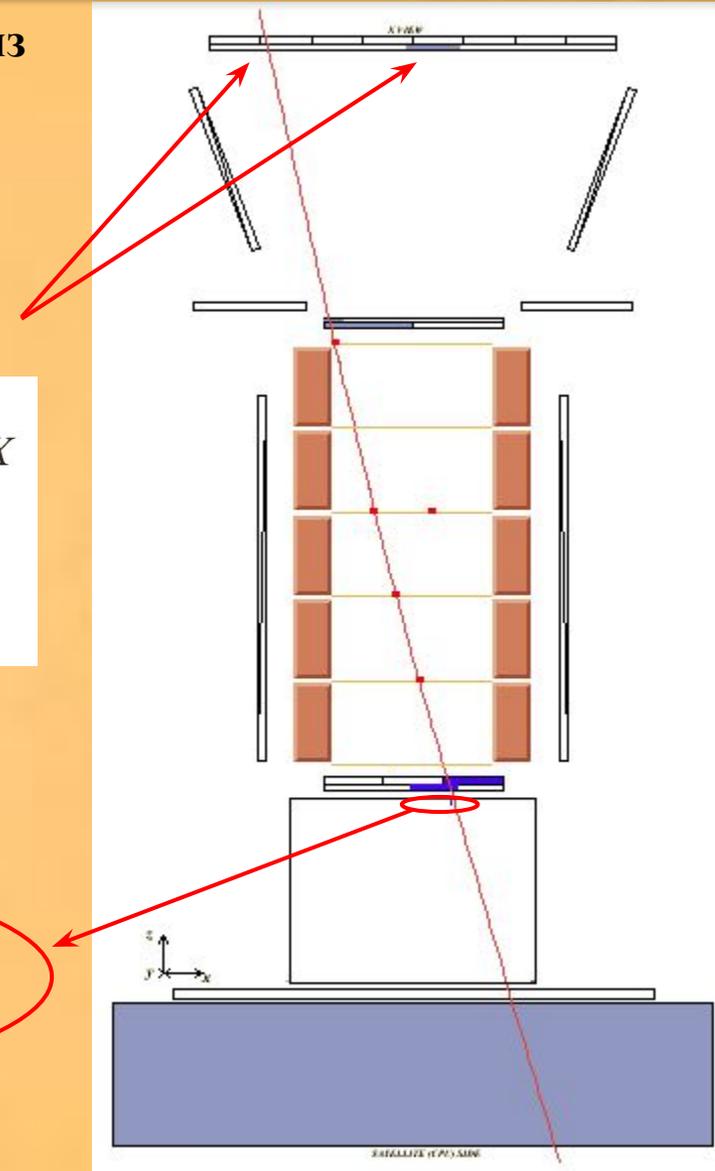
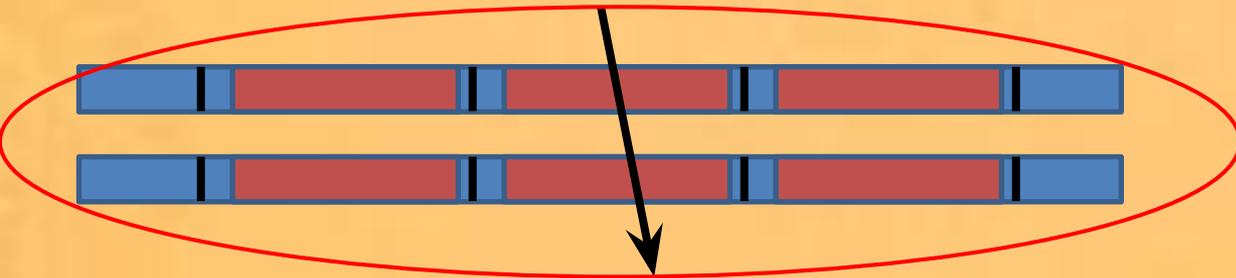
**Причина:** рассеяния на стенке магнита или в одной из внутренних плоскостей трекера

**Критерии отбора:**

1. Координата пересечения верхнего счетчика ВПС траектории, восстановленной по трекеру, соответствует измеренной при помощи самого счетчика.



2. Трек, восстановленный по трекеру, проходит через полосы калориметра с ненулевым энерговыделением



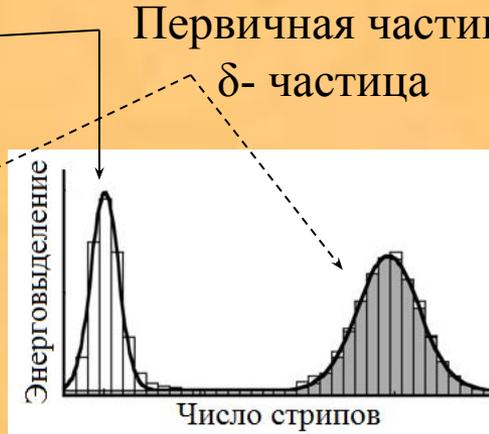
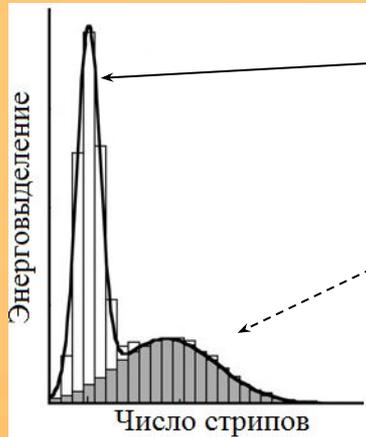


# События с неправильно измеренной жесткостью

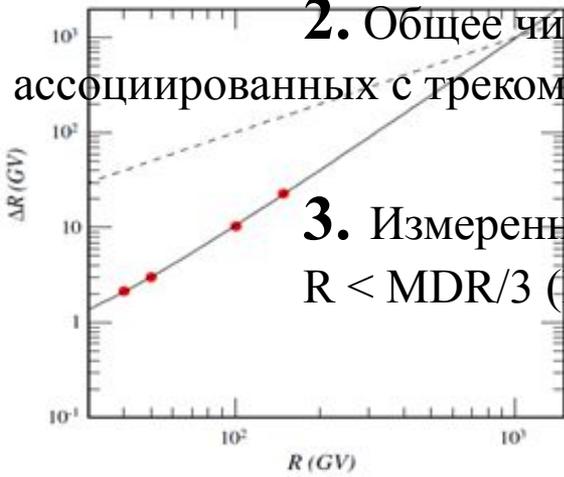
**Причина:**  $\delta$ -частицы или ядерные взаимодействия во внутренних плоскостях трекера

**Критерии отбора:**

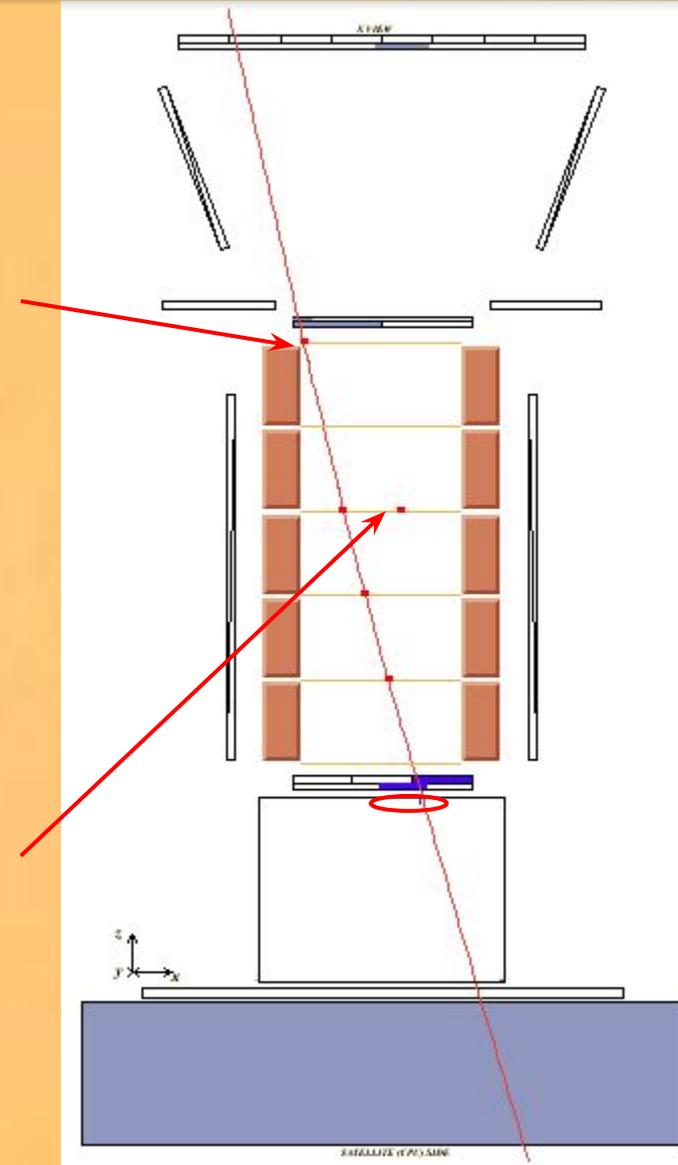
**1.** Число стрипов в кластерах, ассоциированном с треком (кластер – группа соседних сработавших стрипов)  $< 10$



**2.** Общее число кластеров, не ассоциированных с треком  $< 4$ .



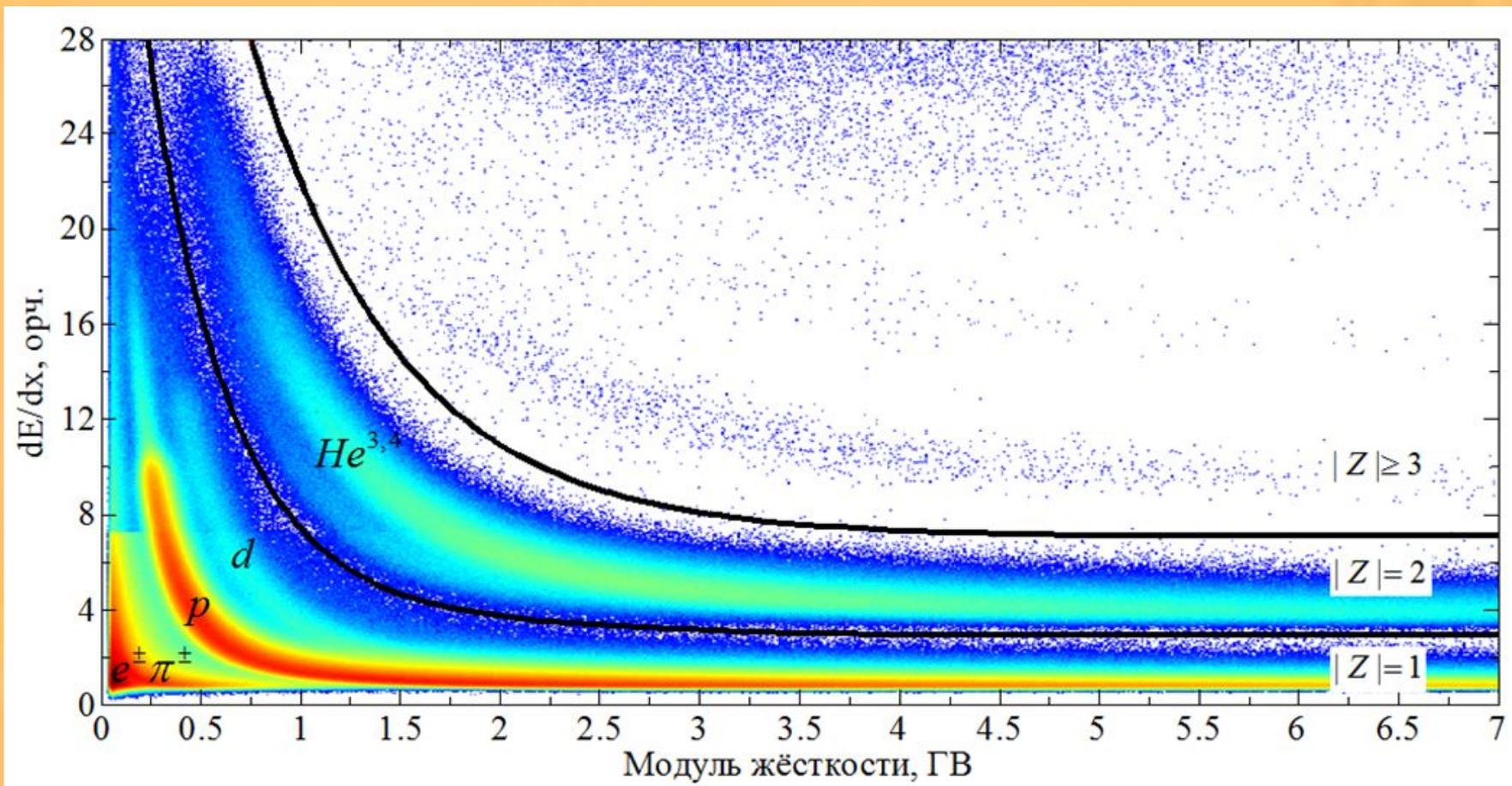
**3.** Измеренная жёсткость  $R < MDR/3$  ( $MDR \sim 1$  ТВ).



# Абсолютная величина заряда



Распределение средних ионизационных потерь в треке в зависимости от измеренной жёсткости после предыдущий отборов



Вероятность имитации протонов ядрами гелия менее  $10^{-7 \div -8}$

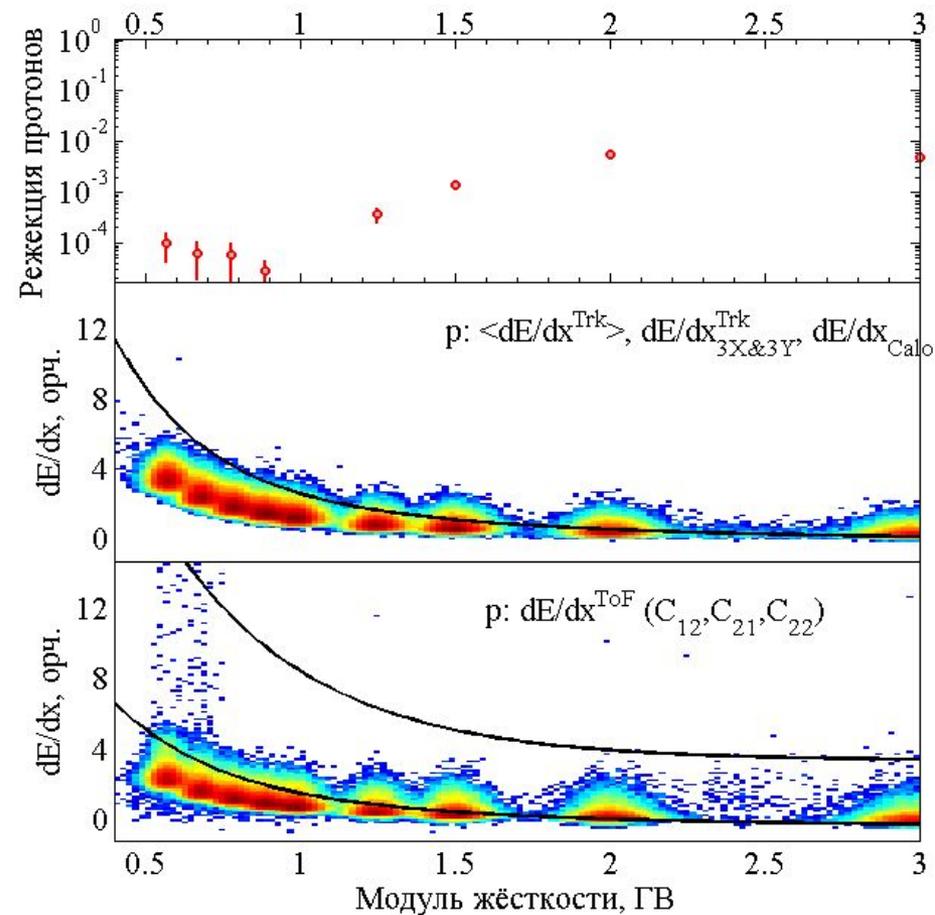
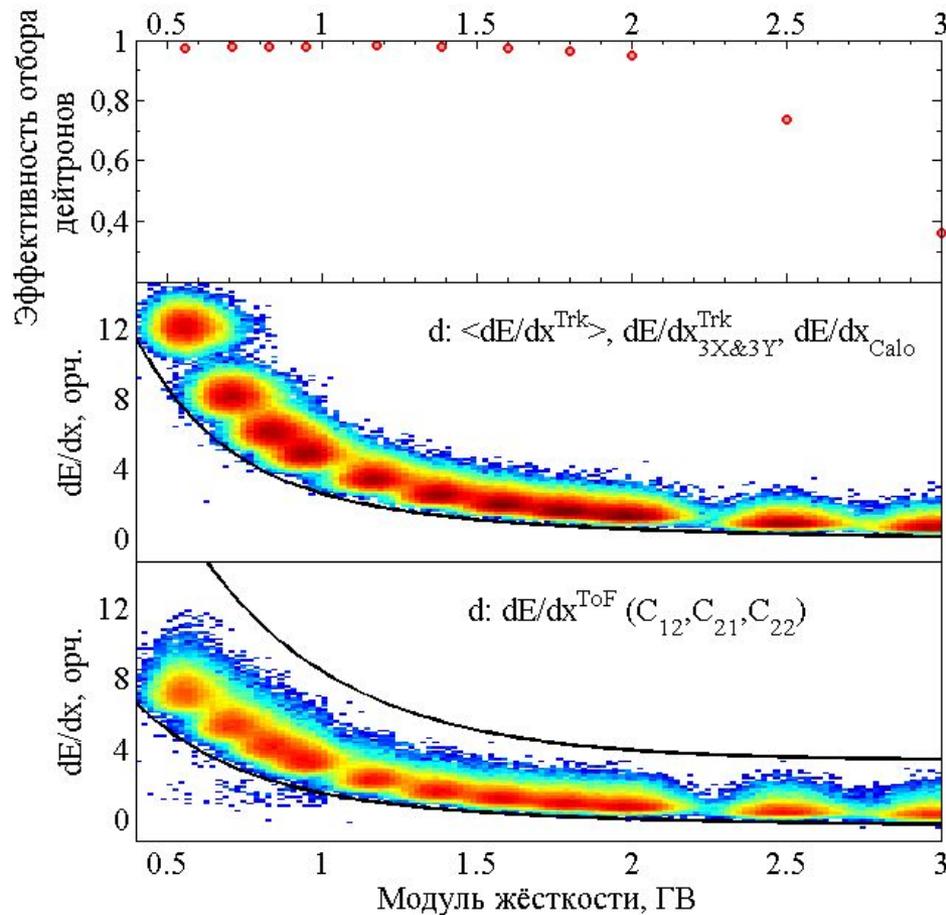
Вероятность имитации гелия протонами менее  $10^{-6}$

# Выделение дейтронов на фоне протонов



Ионизационные потери дейтронов в исследуемом диапазоне энергий систематически выше протонов. Алгоритм разделения частиц основан на многократных измерениях этой величины различными детекторами.

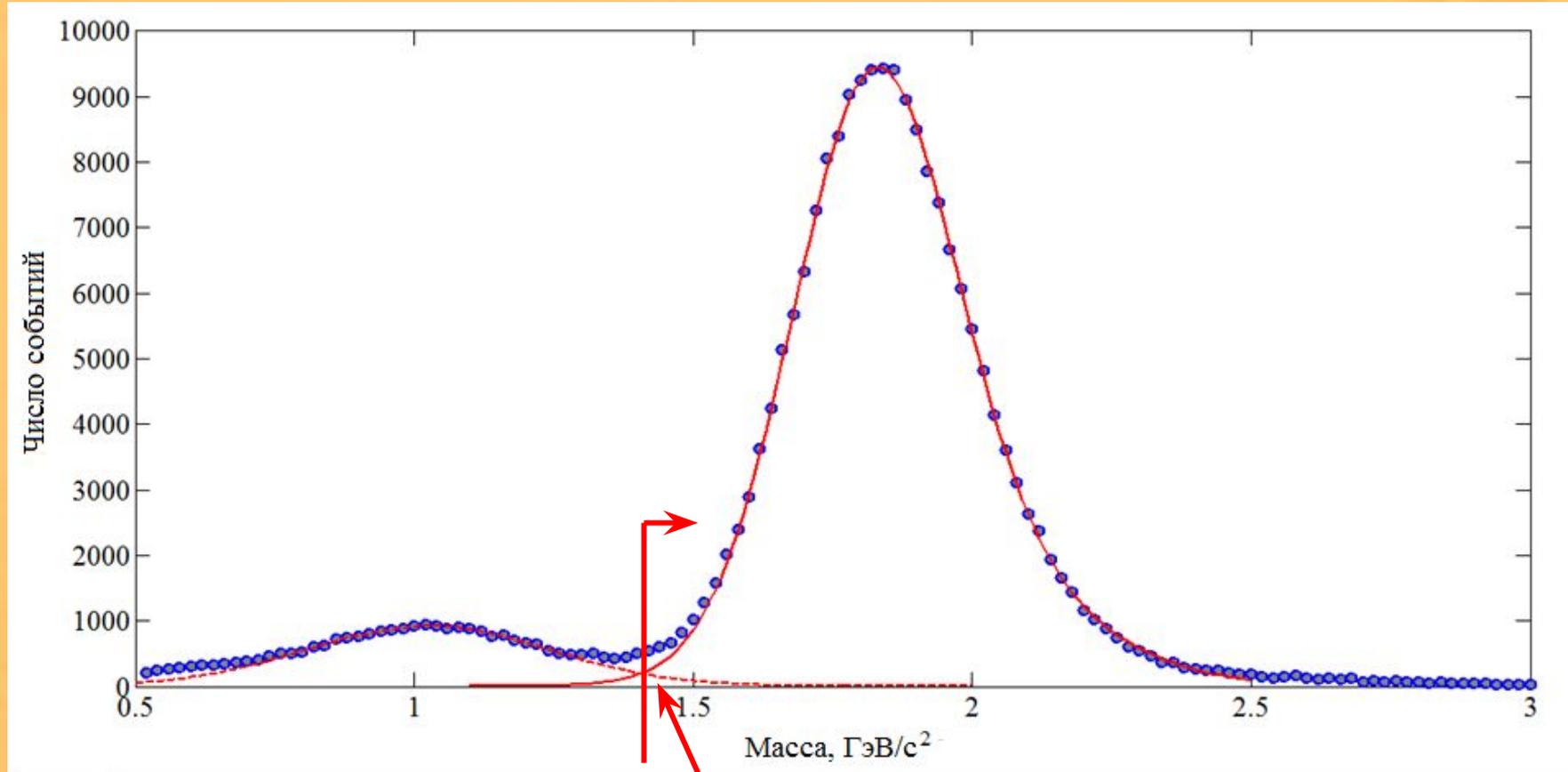
Построение границ p-d на основе моделирования:



# Оценка вклада протонов в дейтроны



Массовое распределение отобранных событий.



Оценённый фон протонов вычтен  
из окончательной выборки

# Многомерный анализ: классификация на основе теоремы Байеса



**Идея:** пусть имеется набор переменных (называемых предикторами), измеренных для различных, но заведомо известных классов. Если измерить значения предикторов вновь, можно определить, к какому классу относятся новые измерения.

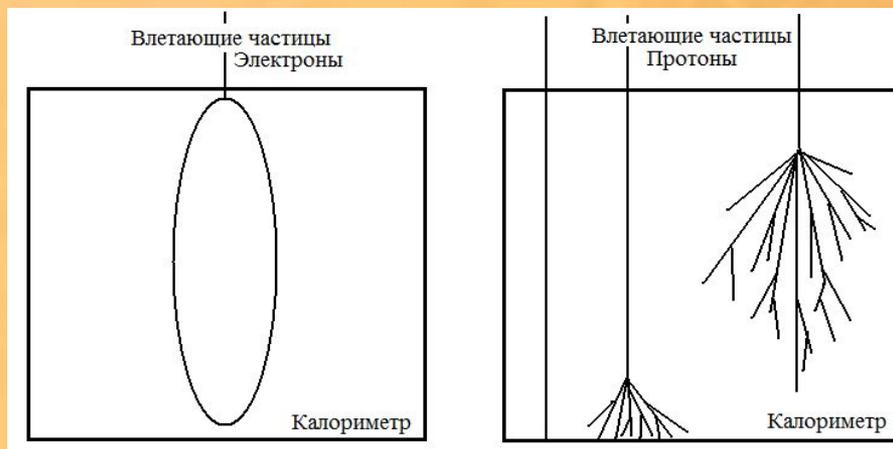
Моделирование Монте-Карло взаимодействия электронов и антипротонов с калориметром

«Обучение» разделяющего алгоритма используя набор предикторов

Применение полученного алгоритма к экспериментальным данным

Выбор предикторов основан на различиях в топологии взаимодействия лептонов и адронов в калориметре:

ширина и длина ливня, энергосодержание в различных его частях, максимальное энергосодержание в калориметре и т.д. + многократные измерения ионизационных потерь для  $R < 2.0$  ГВ



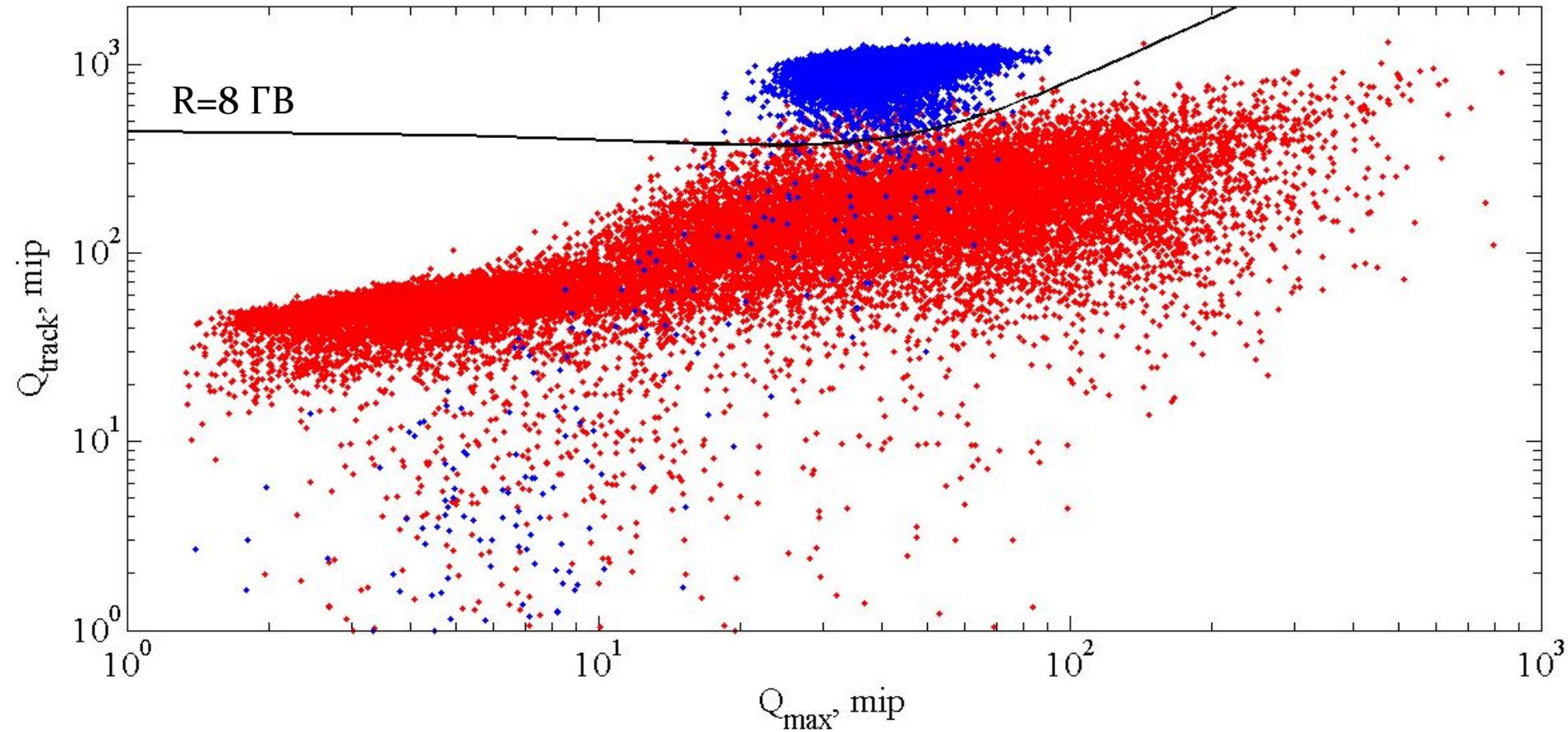
Преимущество метода: может использоваться для обучения алгоритмов и определения параметров, необходимых для классификации на малой статистике.

# Пример: классификация с 2мя предикторами:

$$Q_{track} \text{ vs } Q_{max}$$



Два предиктора разделяются кривой в 2х мерном пространстве



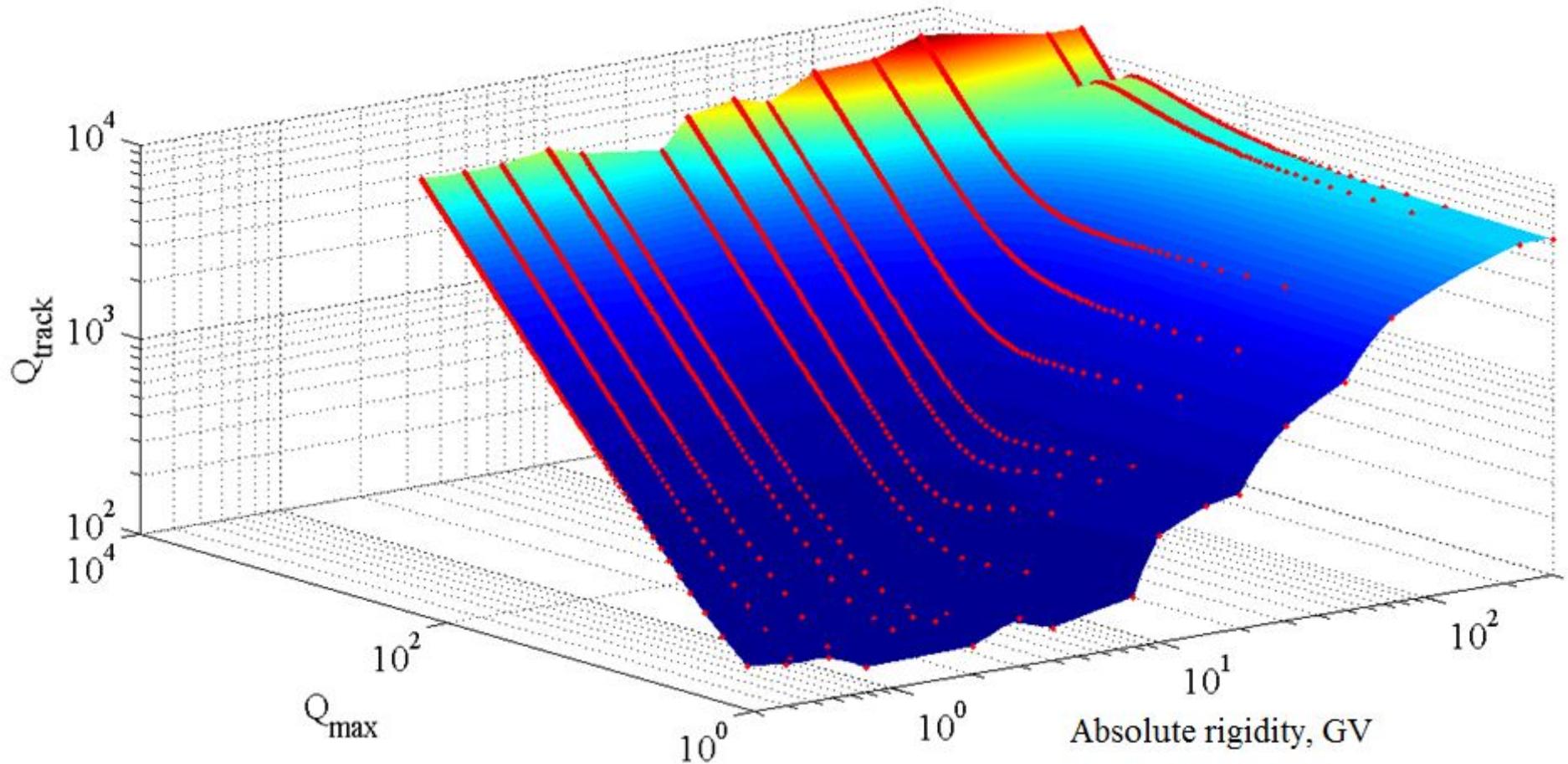
Красные точки - антипротоны; синие точки - электроны.

# Пример: классификация с 2мя предикторами:

$$Q_{track} \text{ vs } Q_{max} \text{ vs } R$$

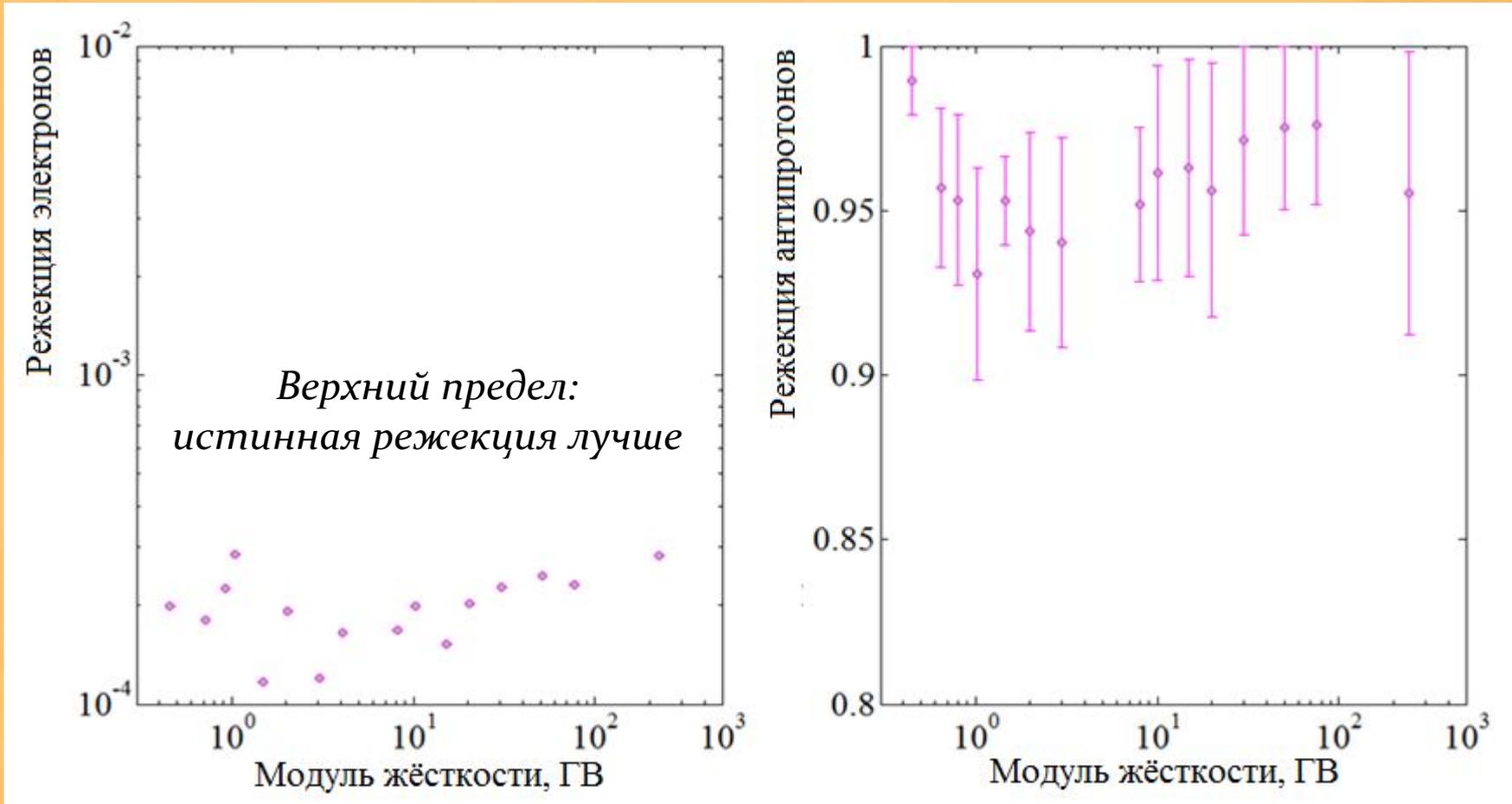


Зависимость от энергии добавляет дополнительную размерность



$N$  предикторов разделяются  $(N+1)$ -гиперповерхностью

# Режекция электронов



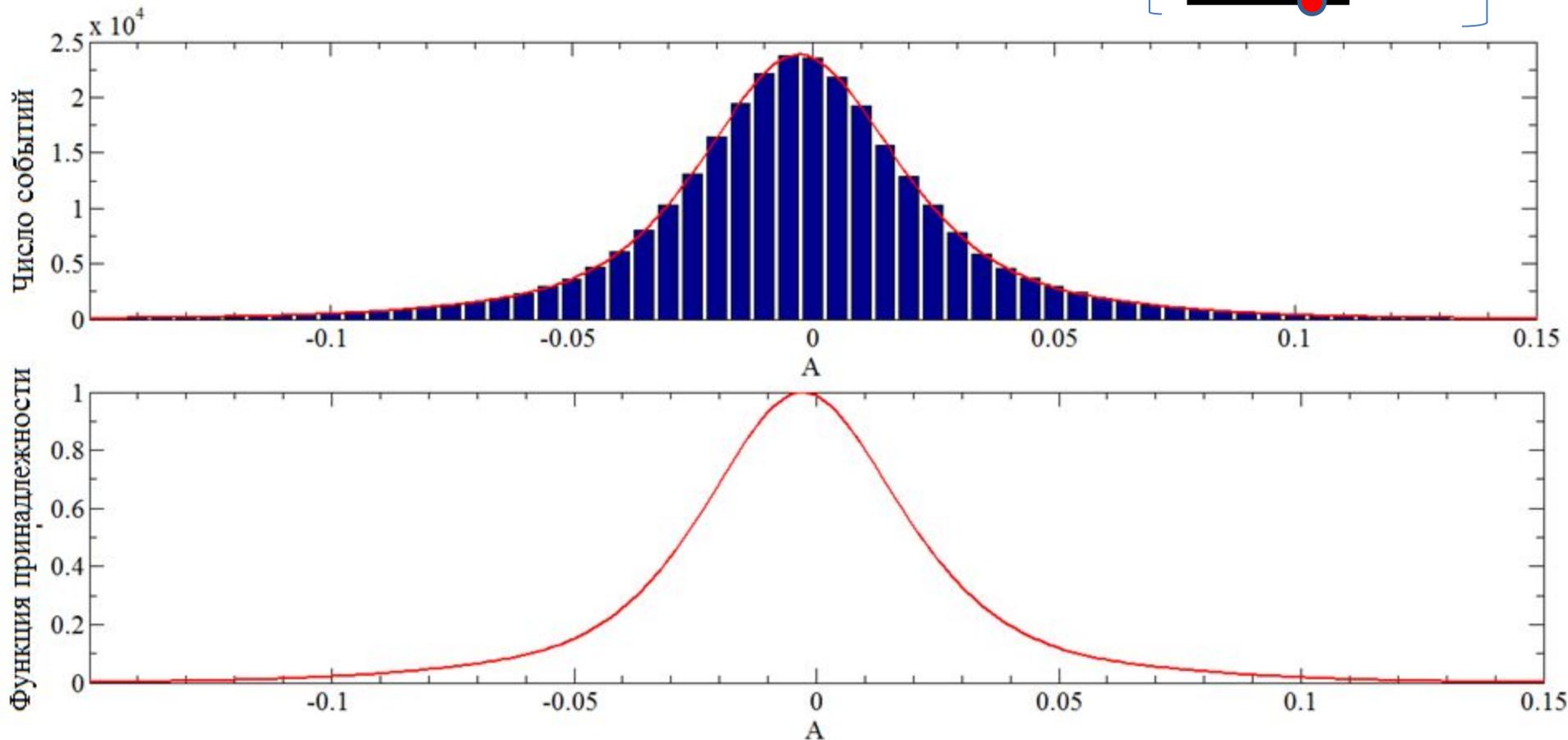
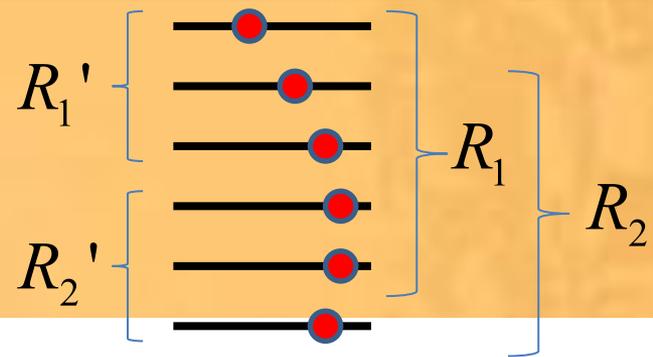
Фон  $\pi$ -мезонов подавлен отбором по калориметру, верхними ограничениями на  $dE/dx$  в  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ , ограничением числа синглетов ( $<5$ ) & из отбором по массе.

# Рассеяние на малые углы, приводящие к ошибке в знаке заряда

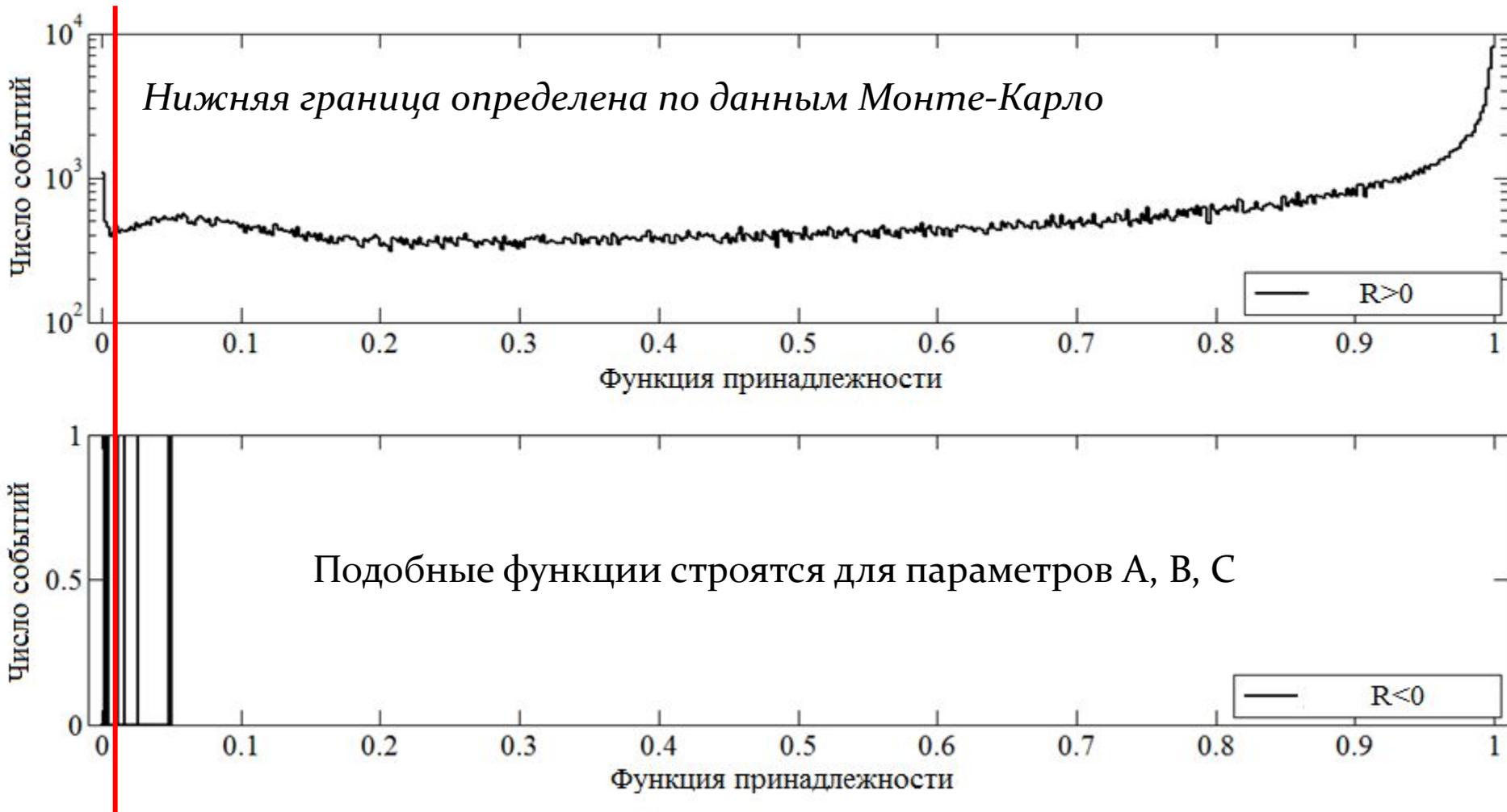


Идентификация рассеяний на малые углы основана на использовании нечёткой логики.

$$A = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \quad B = \frac{R - R_1}{R + R_1} \quad C = \frac{R_1' - R_2'}{R_1' + R_2'}$$

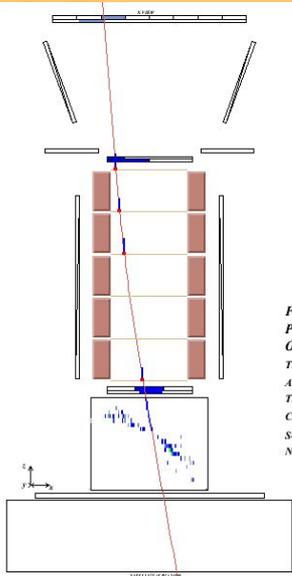


# Рассеяние на малые углы, приводящие к ошибке в знаке заряда

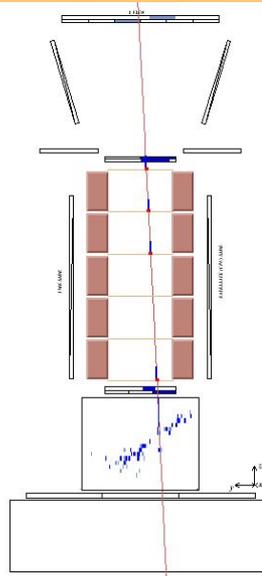
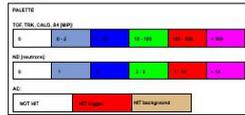


Алгоритм использован при выделении антипротонов и антидейтронов

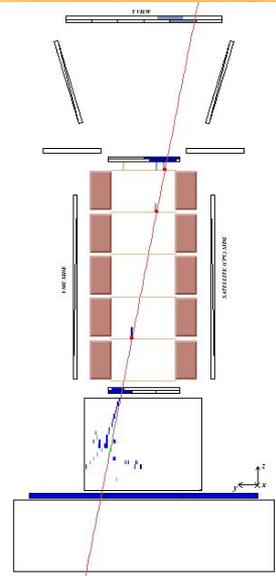
# Примеры отобранных антипротонов



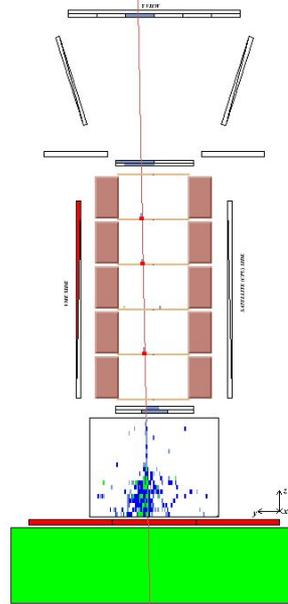
File: L2PAM060919.root - Pkt\_num: 8204265  
 Progressive number: 2169388  
 On Board Time: 366060278 [ms]  
 TRIGGER: TOF1 CALO  
 AC: CARD hit = 0 CAT hit = 0 CAS hit = 0  
 TRK: RIG = -0.632 [GV] CHI2 = 796  
 CALO: NSTRIP = 146 QTOT = 479 [MIP]  
 S4: 0 [MIP] TOF:  $\beta = 0.619$   
 ND: Trig: 0 - Bckgr: upper = 3 lower = 2



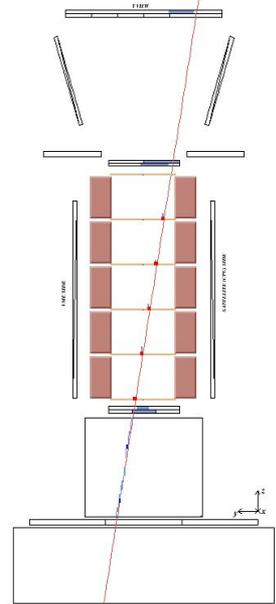
File: L2PAM081223.root - Pkt\_num: 14031726  
 Progressive number: 1223030  
 On Board Time: 643773458 [ms]  
 TRIGGER: TOF4 CALO  
 AC: CARD hit = 0 CAT hit = 0 CAS hit = 2  
 TRK: RIG = -0.757 [GV] CHI2 = 162  
 CALO: NSTRIP = 74 QTOT = 292 [MIP]  
 S4: 2.27 [MIP] TOF:  $\beta = 0.585$   
 ND: Trig: 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] CHI2 = 0.381  
 CALO: NSTRIP = 474 QTOT = 3250 [MIP]  
 S4: 104 [MIP] TOF:  $\beta = 1.11$   
 ND: Trig: 3 - Bckgr: upper = 7 lower = 7



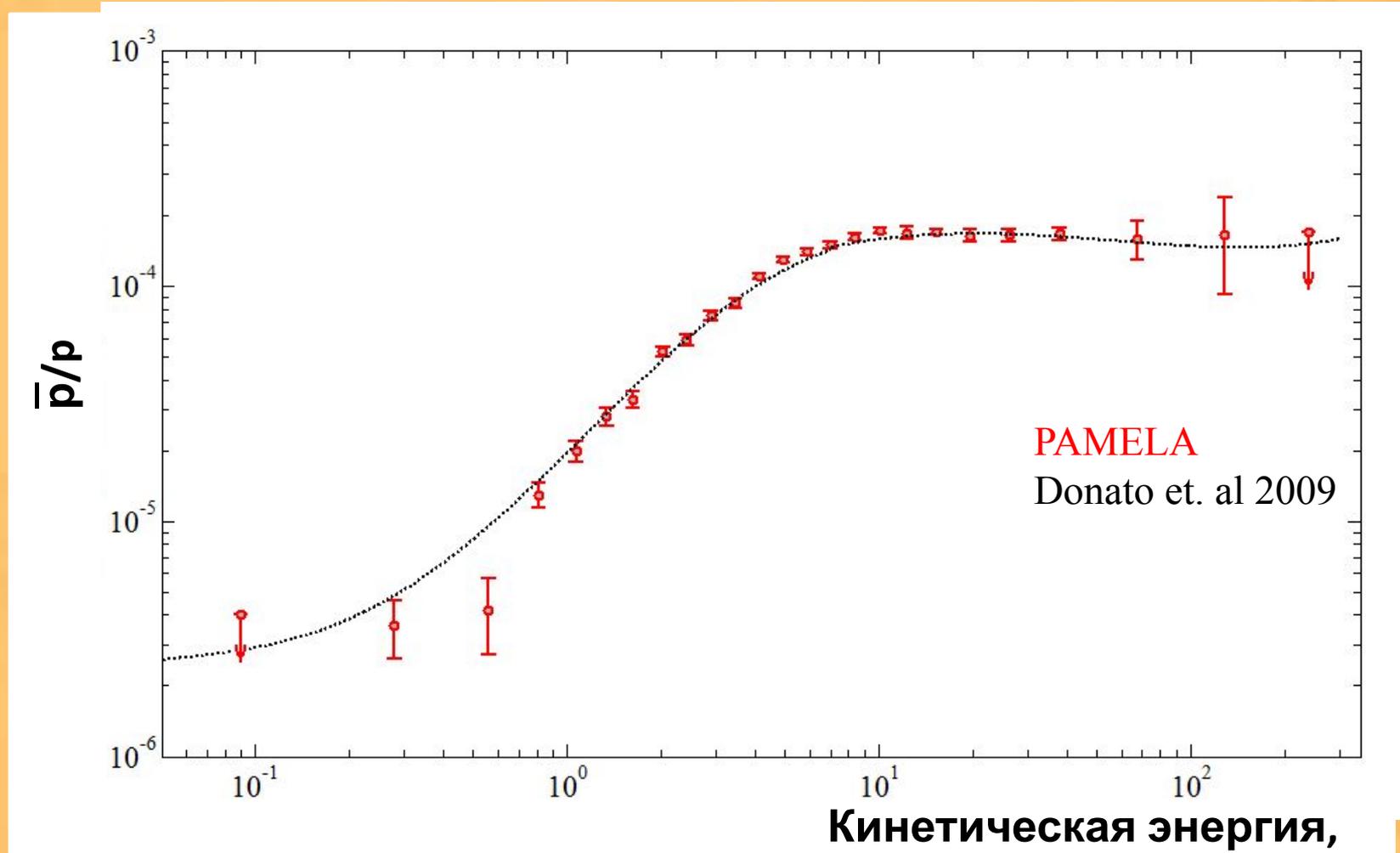
File: L2PAM061105.root - Pkt\_num: 3262035  
 Progressive number: 59060  
 On Board Time: 146418536 [ms]  
 TRIGGER: TOF1 CALO  
 AC: CARD hit = 0 CAT hit = 0 CAS hit = 0  
 TRK: RIG = -111 [GV] CHI2 = 0.202  
 CALO: NSTRIP = 38 QTOT = 58 [MIP]  
 S4: 0 [MIP] TOF:  $\beta = 0.989$   
 ND: Trig: 0 - Bckgr: upper = 5 lower = 15



# Измеренное отношение потоков антипротонов и протонов



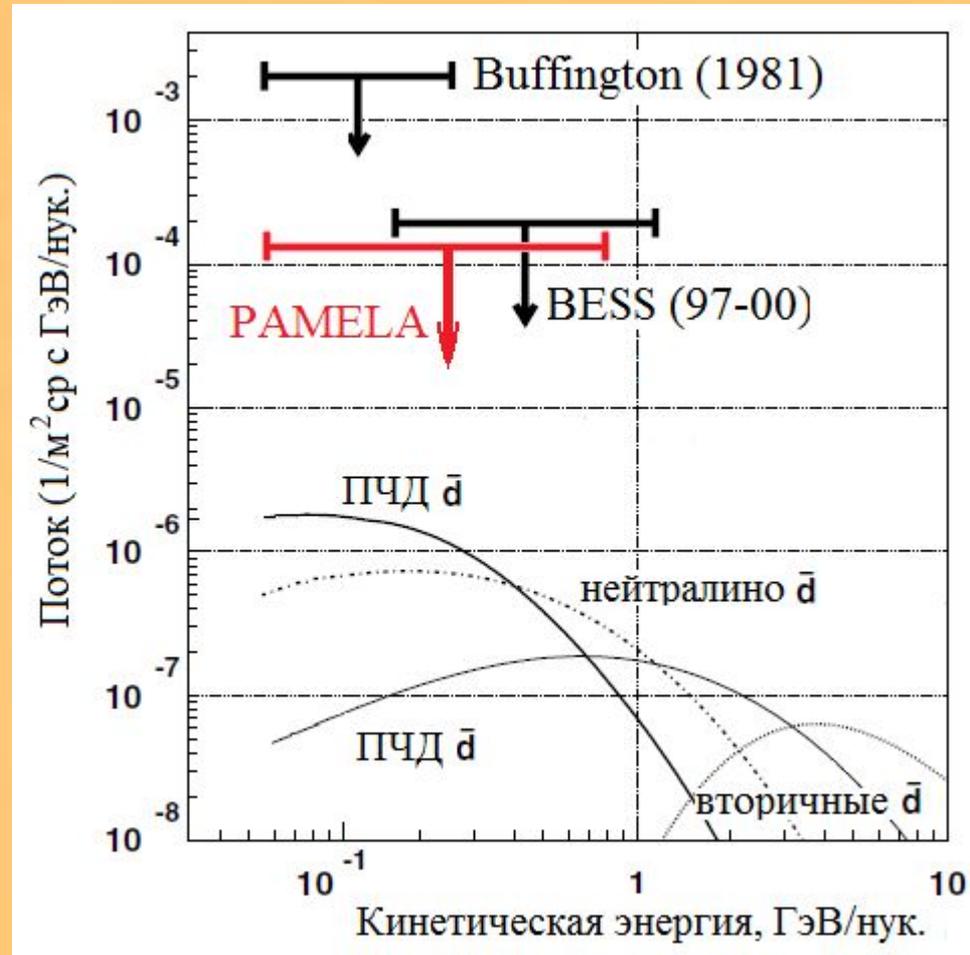
Измеренное отношение хорошо согласуется с моделью вторичного происхождения антипротонов в реакциях взаимодействия галактических космических лучей с межзвёздной средой



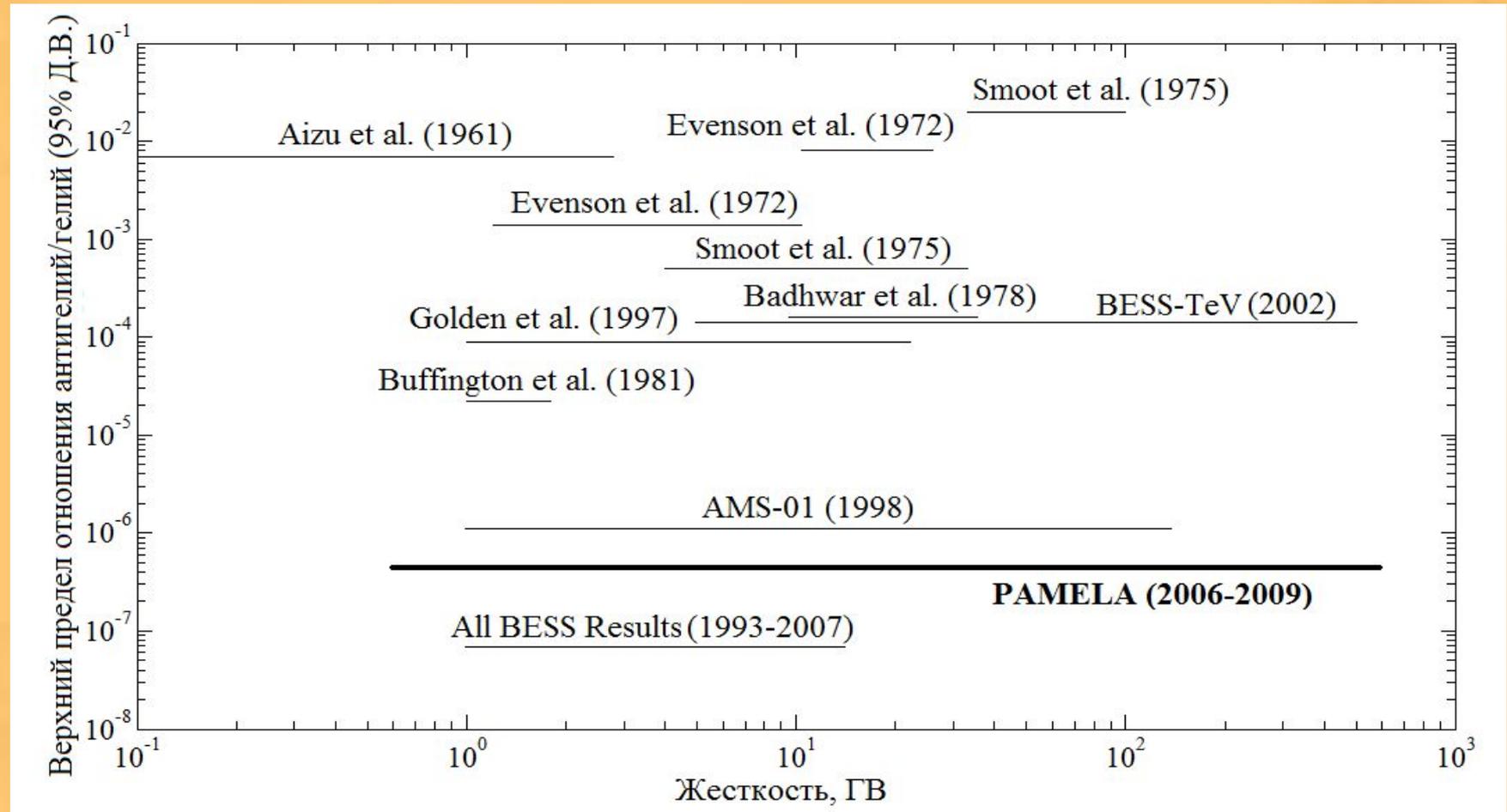
# Верхний предел на поток антидейтронов



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



# Верхний предел на отношение потоков антигелия и гелия



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.

# Заключение

На основании данных, накопленных при проведении эксперимента PAMELA с июня 2006 г. до декабря 2009 г. получено:

- отношение потока антипротонов к потоку протонов, которое хорошо согласуется с моделями вторичного образования и распространения античастиц в Галактике;
- впервые проведены поиски антиядер дейтронов и гелия в потоках первичных космических лучей (при отсутствии остаточной атмосферы, в которой возможно их образование) и установлены верхние пределы на поток антидейтронов и на отношение потока антигелия к потоку гелия.

## Благодарю за внимание