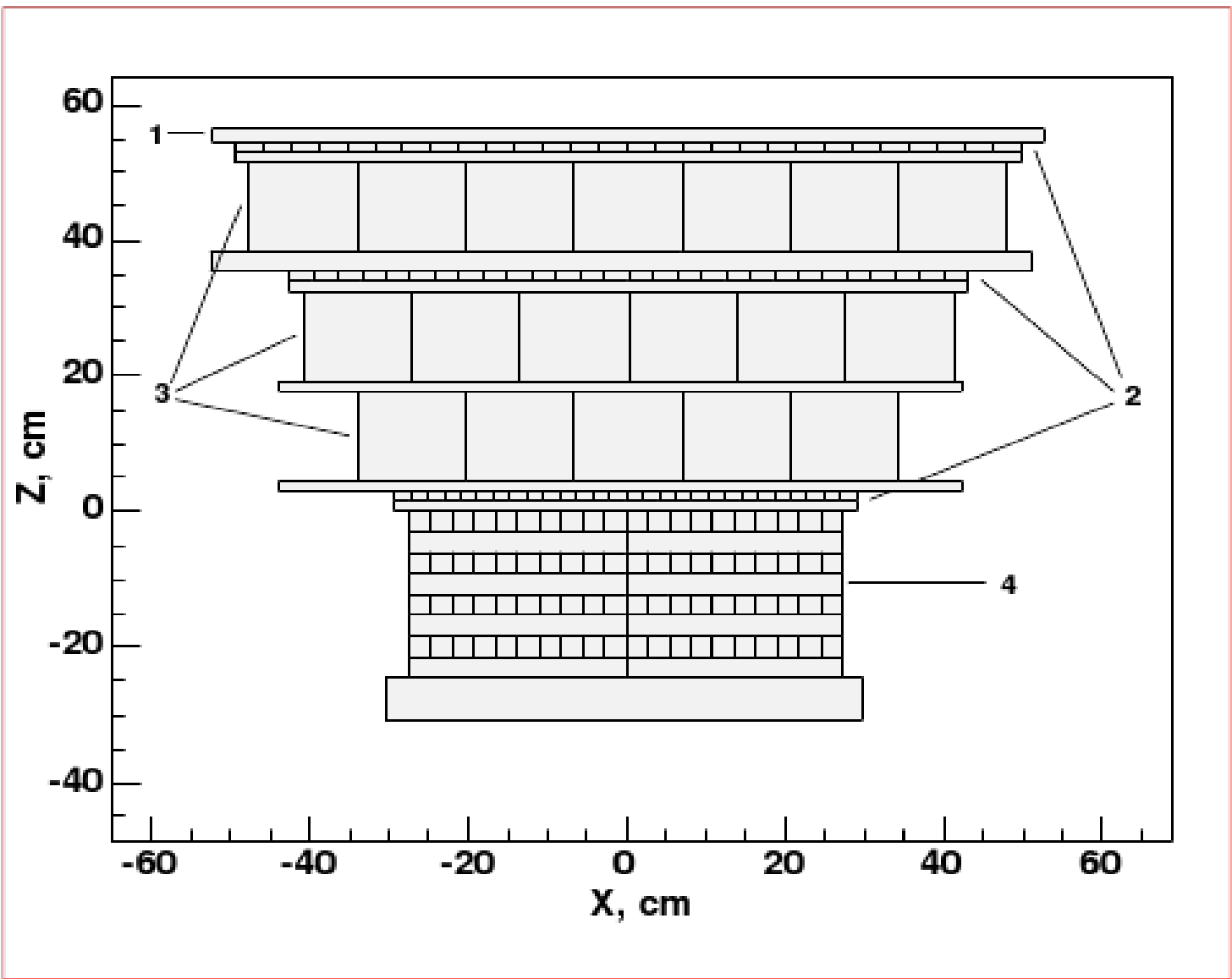
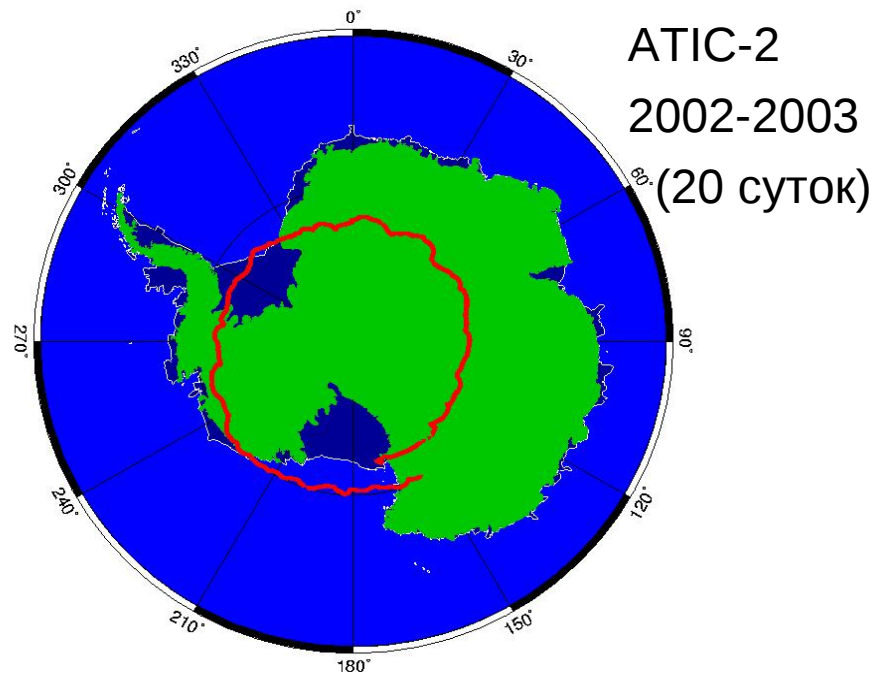


**Эксперимент АТИК.
Пульсары против тёмной
материи**

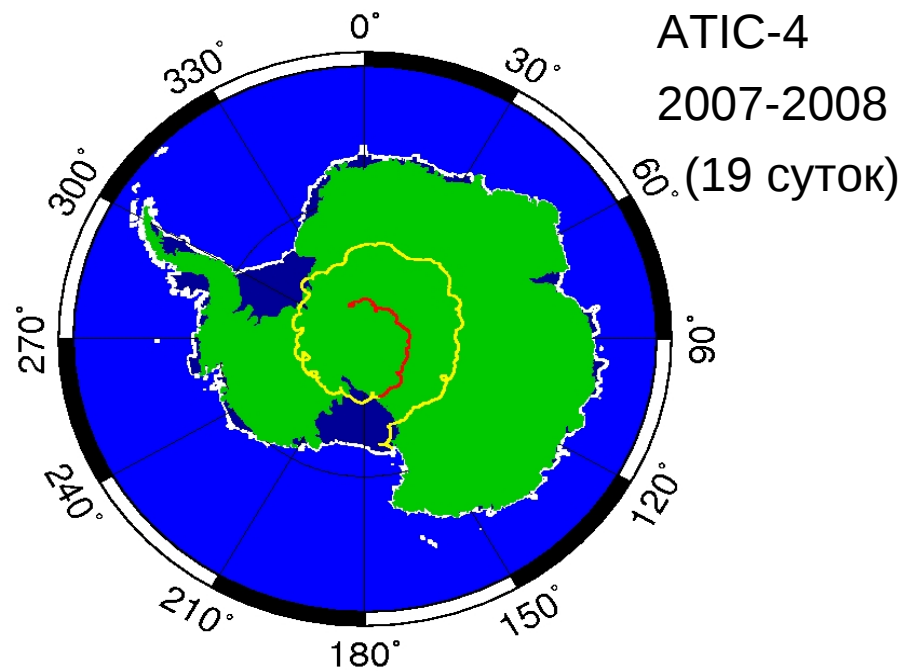
**В.И. Зацепин
НИИЯФ МГУ**



АТІС на старті

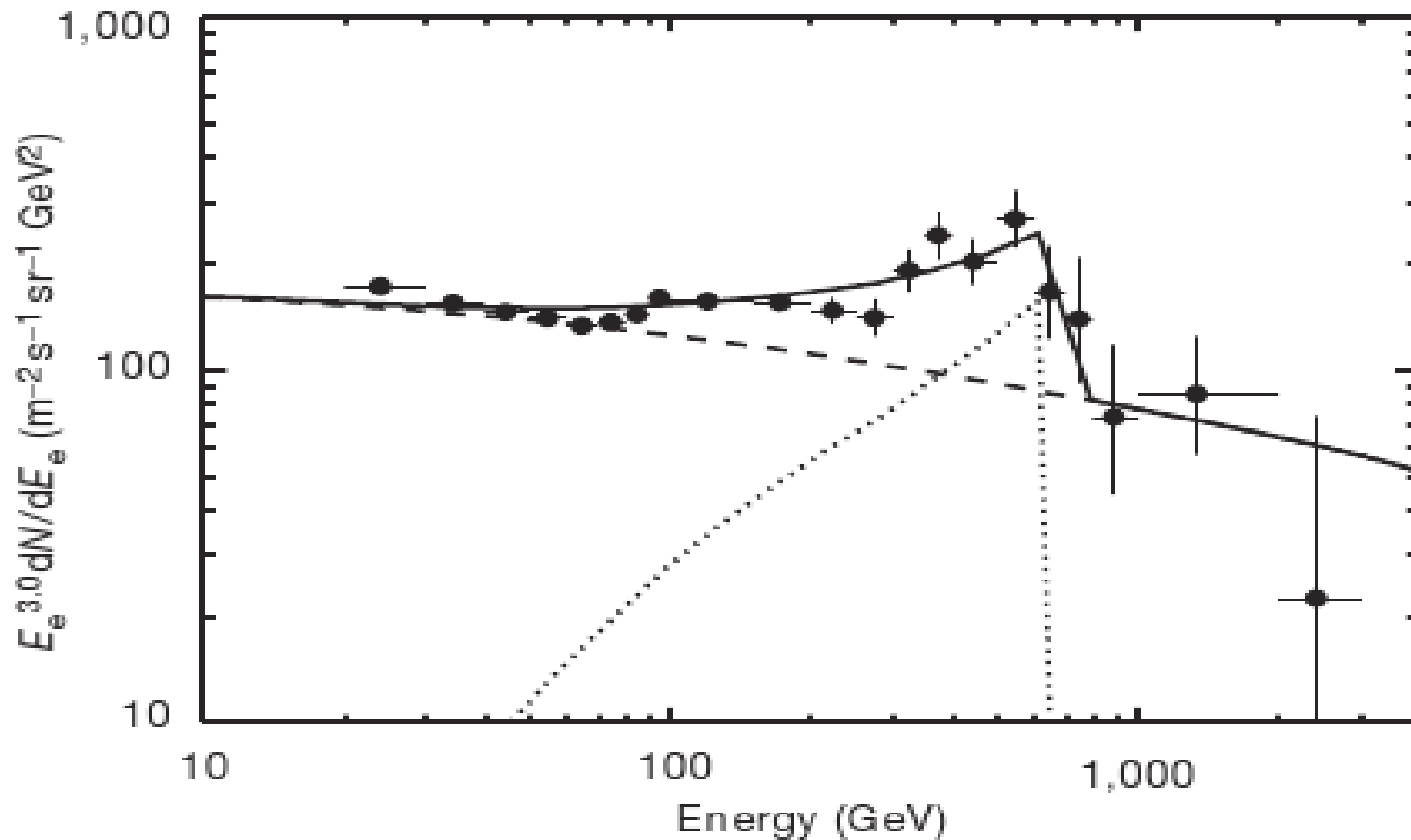


GMT Jan 14 19:30 LDB_Antarctica_ATIC



GMT 2008 Jan 16 19:45:00 LDB_Antarctica_2007-2008_ATIC

Обработка данных АТИКа была выполнена Чангом (J. Chang, J. H. Adams Jr, H. S. Ahn et al. An excess of cosmic ray electrons at energies of 300–800 GeV. Nature V.456 (2008), P.362-365). Результат, показанный на рисунке, состоит в том, что в области энергий >200 GeV имеется избыток интенсивности над ожидаемым из существующих представлений. Была даже сделана попытка проинтерпретировать этот результат как вклад частиц Калуцы-Клейна с массой 600 GeV.



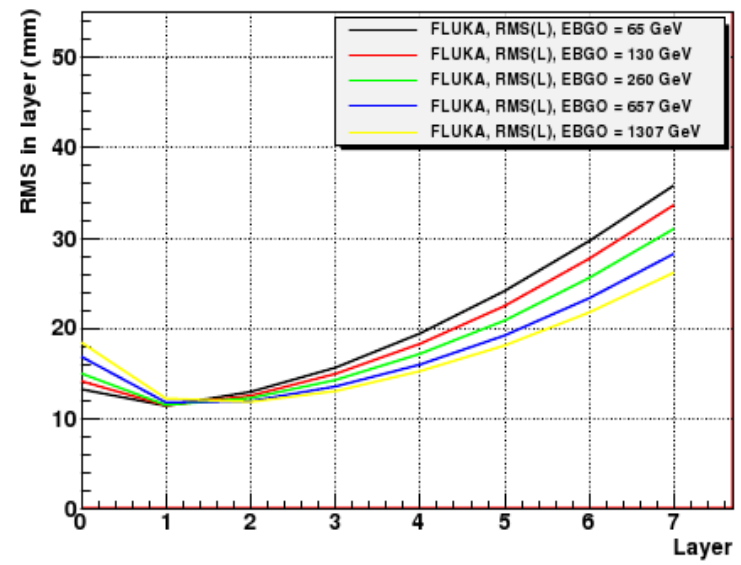
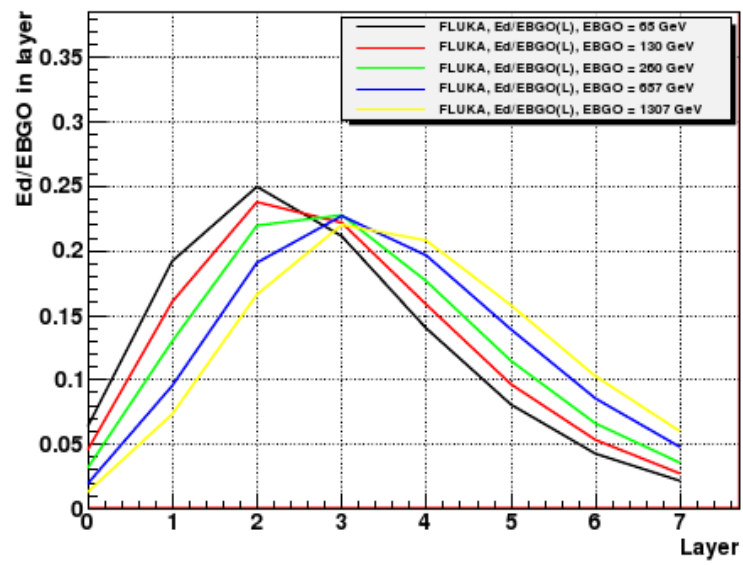
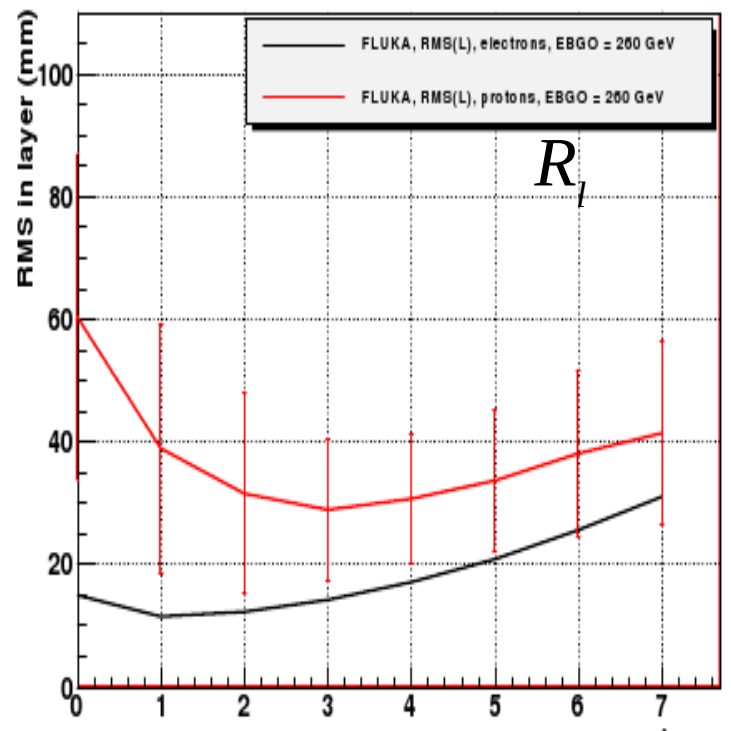
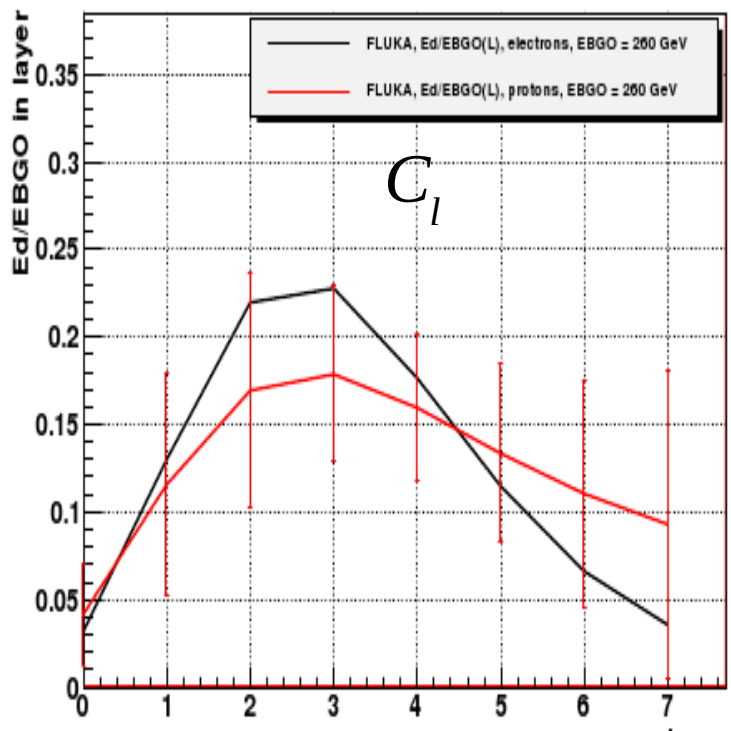
Недавно коллаборация PAMELA опубликовала результаты, которые показали, что доля позитронов относительно полного потока электронов и позитронов в области энергий выше 10 ГэВ растёт с энергией, тогда как ожидалось уменьшение этой доли. Вскоре появились результаты эксперимента FERMI/LAT, в котором с высокой статистической точностью был измерен суммарный энергетический спектр электронов и позитронов в области энергий от 30 до 800 ГэВ, и также было обнаружено несогласие с существующими представлениями, и данные HESS о резком обрыве интенсивности выше ~ 1 ТэВ. Вместе с данными АТИК эти результаты были восприняты научным сообществом как указание на присутствие неизвестного ранее источника электронов и позитронов высокой энергии.

Так как одним из таких источников могли быть гипотетические частицы тёмной материи, то эти результаты вызвали большой интерес научной общественности. В результате появился большой поток препринтов и статей в журналах, пытавшихся согласованно объяснить эти результаты за счёт аннигиляции или распада таких частиц.

В связи с таким большим вниманием к этой проблеме группа АТИК НИИЯФ МГУ предприняла переобработку данных, опубликованных (от имени коллаборации АТИК) в NATURE (2008), чтобы проверить не были ли допущены какие-нибудь ошибки в этой обработке. В ходе этой работы мы подтвердили существование «бампа» .

Кроме того, в нашей обработке мы учли высокое энергетическое разрешение АТИКа для электронов (2%) и обнаружили новое, пропущенное ранее явление – некоторую структуру в спектре. Здесь мы расскажем о результатах этой переобработки.

Следует напомнить, что АТИК был сконструирован для измерения протонов и других ядер, а не для электронов. По этой причине трекер АТИКа хуже, чем в PAMELA и FERMI/LAT. Однако АТИК имел более толстый калориметр по сравнению с этими инструментами. Это обусловило лучшее энергетическое разрешение нашего спектрометра. И это было нами использовано. Наша обработка была основана практически только на использовании различия каскадных кривых и ширины ливней, создаваемых при одинаковом энерговыделении электронами и протонами. Это предопределило выбор наших фильтров. В некоторых наших фильтрах мы использовали различный вклад частиц обратного тока из калориметра в сигналы сцинтиляционных счётчиков в мишенном блоке спектрометра. Мы получили одинаковый ответ независимо от использованных фильтров.



Использованные параметры

$$R_l^2 = \frac{\sum_i E_l^i (X_i - X_l^c)^2}{\sum_i E_l^i}$$

C - каскадная кривая

F-параметр:

$$C_l = E_l / E_{BGO}$$

$$F_l = R_l \sqrt{C_l}$$

Фильтр Чанга

$$\mathbf{K}_{Ch} = \mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_1 + \mathbf{F}_7 + \mathbf{F}_8$$

Некоторые фильтры НИИЯФ МГУ

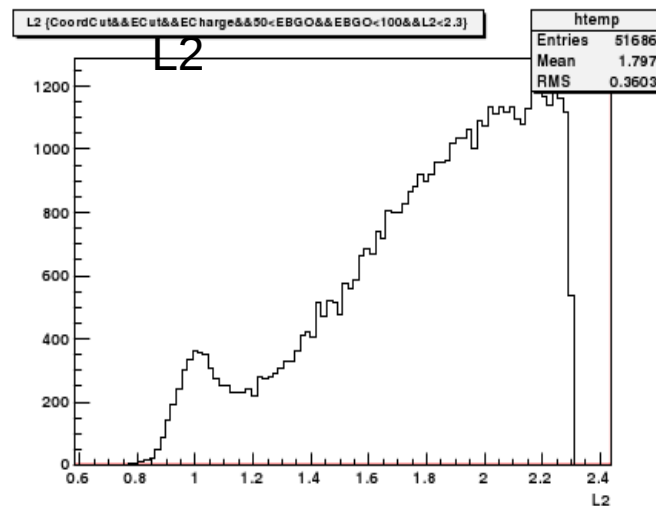
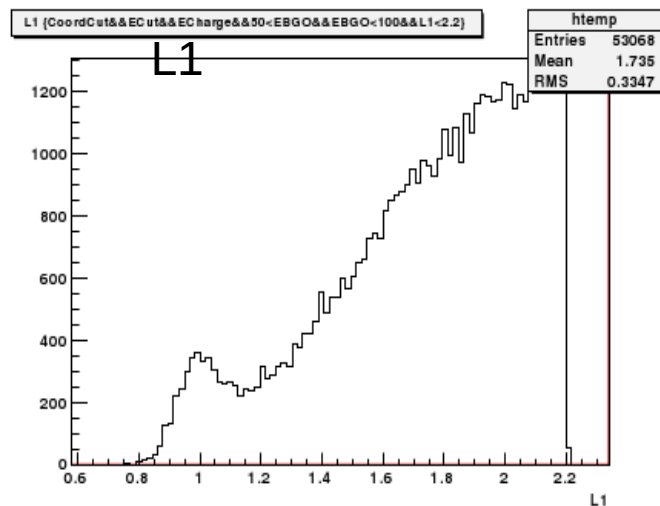
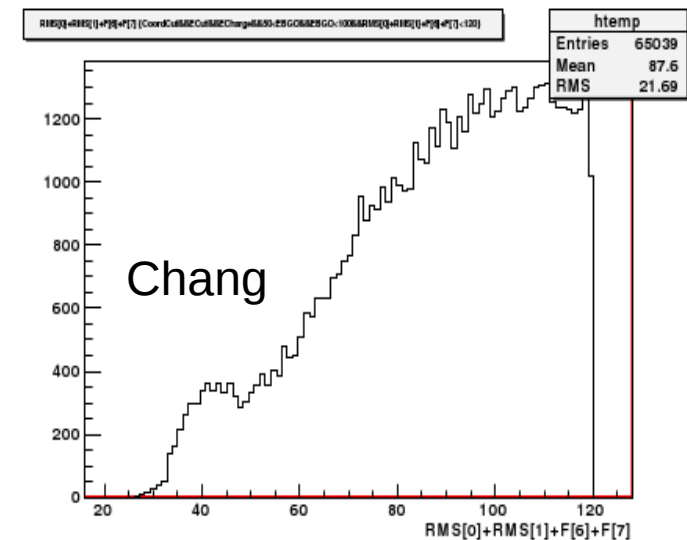
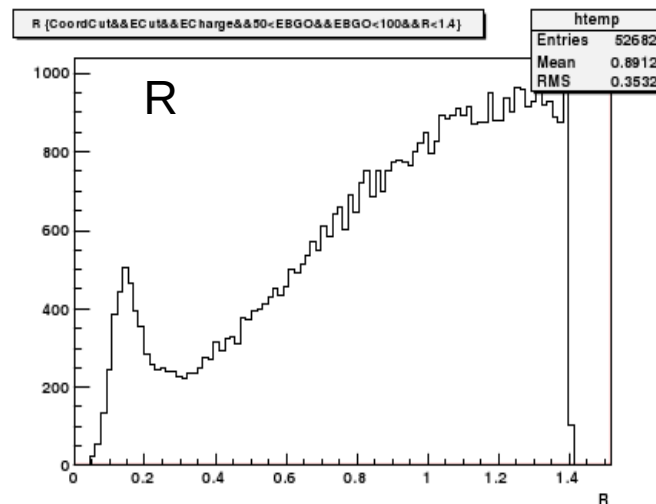
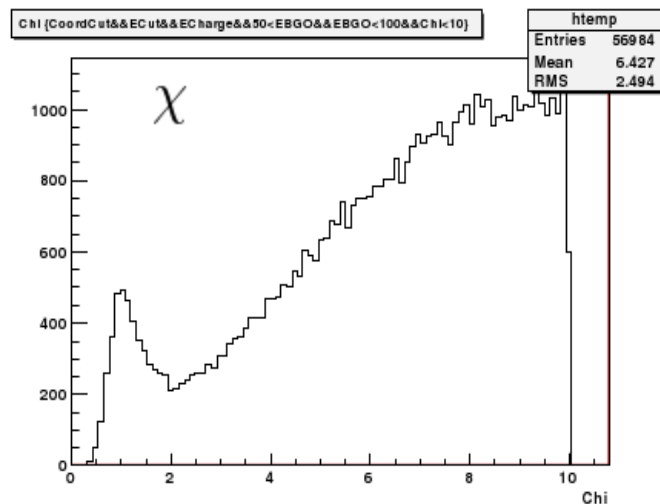
$$\chi = \sqrt{\frac{1}{8} \left[\sum_{l=0}^3 \left(\frac{R_l - \bar{R}_l}{\sigma_l^R} \right)^2 + \sum_{l=4}^7 \left(\frac{F_l - \bar{F}_l}{\sigma_l^F} \right)^2 \right]}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{8} \left[\sum_{l=0}^3 \left(\frac{R_l - \bar{R}_l}{\bar{R}_l} \right)^2 + \sum_{l=4}^7 \left(\frac{F_l - \bar{F}_l}{\bar{F}_l} \right)^2 \right]}$$

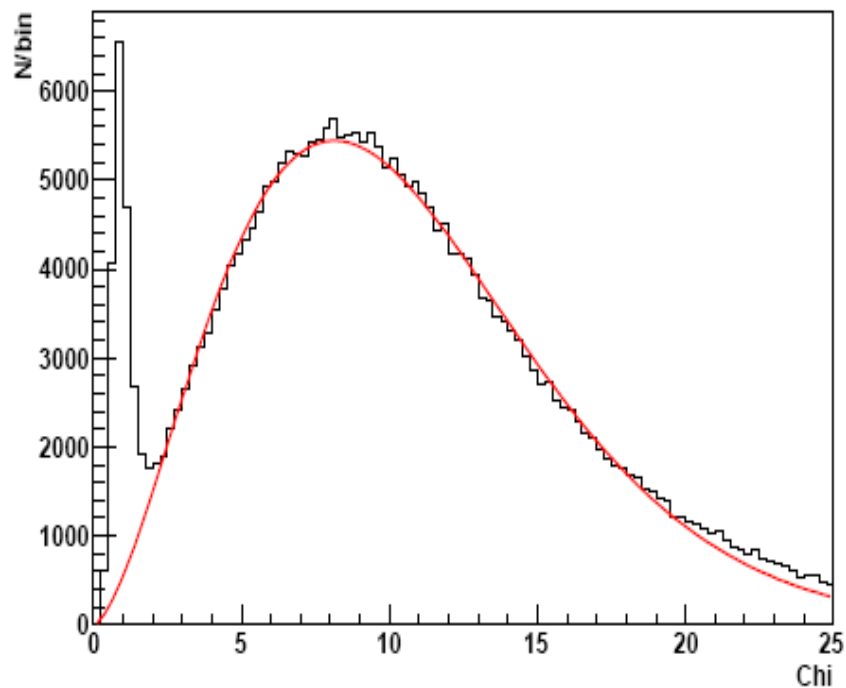
$$L1 = \frac{1}{8} \left[\sum_{l=0}^3 \frac{R_l}{\bar{R}_l} + \sum_{l=4}^7 \frac{F_l}{\bar{F}_l} \right]$$

$$L2 = \sqrt{\frac{1}{8} \left[\sum_{l=0}^3 \left(\frac{R_l}{\bar{R}_l} \right)^2 + \sum_{l=4}^7 \left(\frac{F_l}{\bar{F}_l} \right)^2 \right]}$$

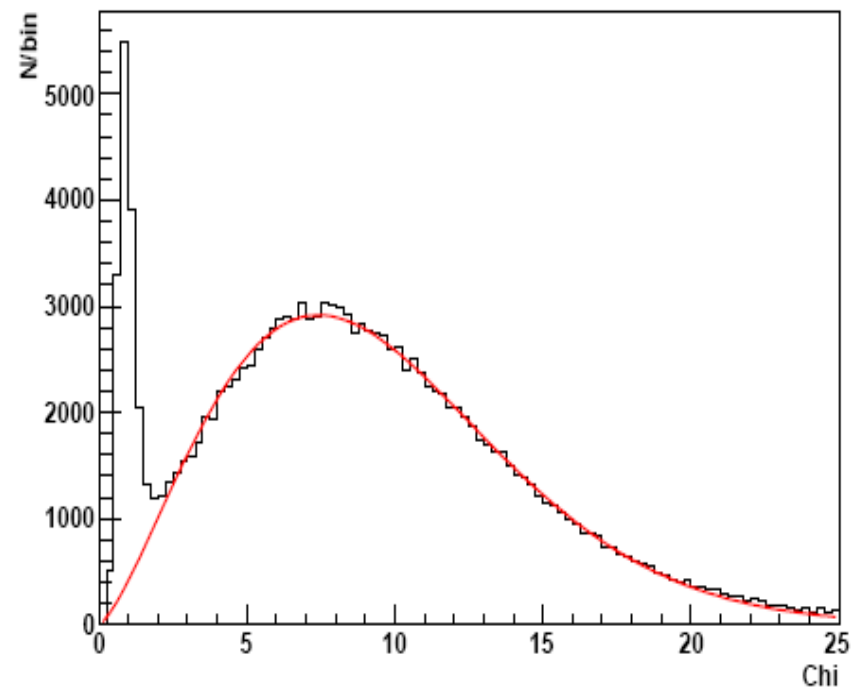
Как разные фильтры выделяют электроны из полётных данных ($E_{\text{BGO}} = 50\text{-}100 \text{ GeV}$). (без предварительного отбора)



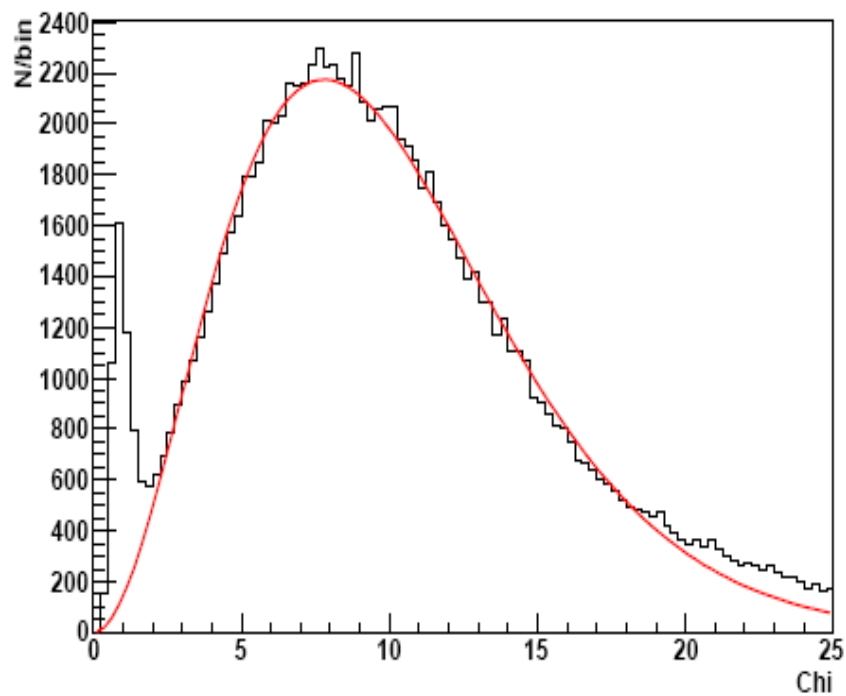
ATIC-2, 25-50GeV, Gauss, $p=1.57$, $\chi^2 = 2.67246$



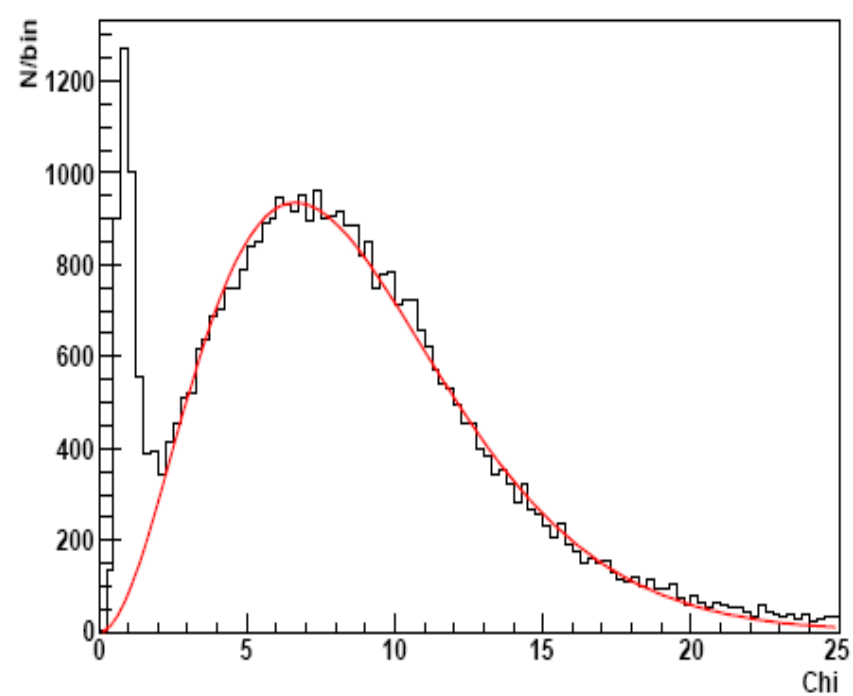
ATIC-4, 25-50GeV, Gauss, $p=1.36$, $\chi^2 = 1.68983$



ATIC-2, 50-100GeV, Gauss, $p=2.00$, $\chi^2 = 2.18283$

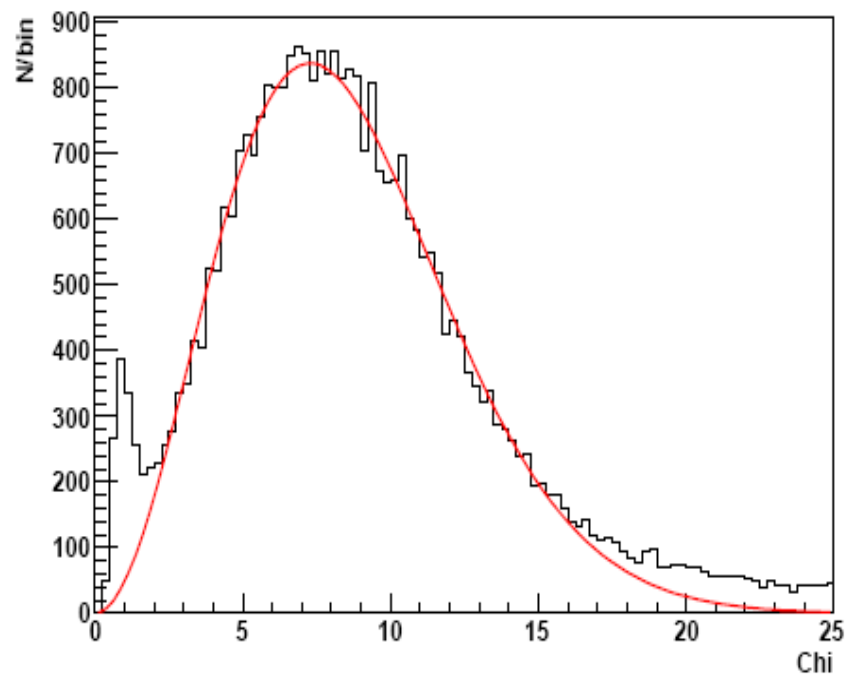


ATIC-4, 50-100GeV, Gauss, $p=2.00$, $\chi^2 = 1.54292$



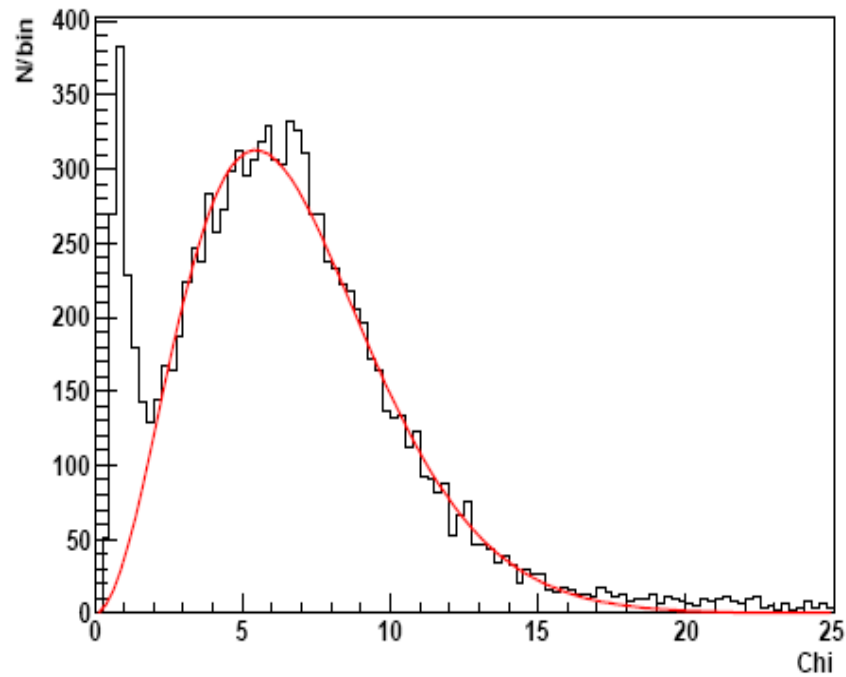
CHI

ATIC-2, 100-200GeV, Gauss, p=2.00, $\chi^2 = 1.45285$

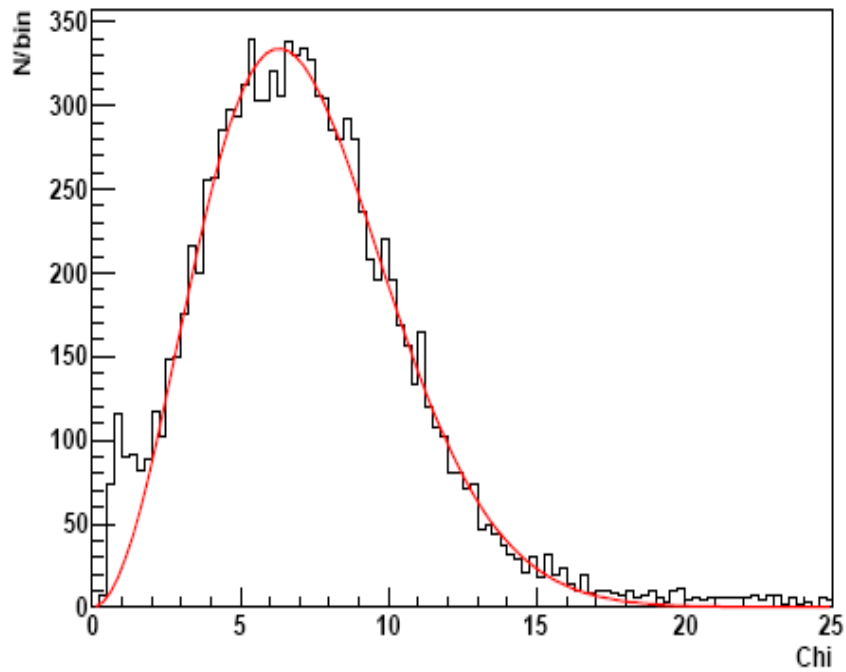


CHI

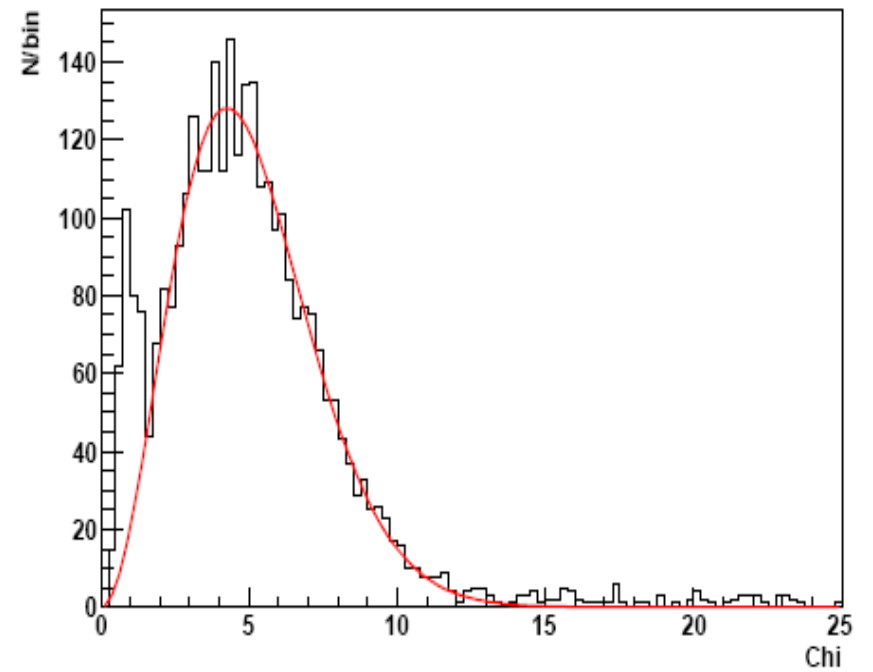
ATIC-4, 100-200GeV, Gauss, p=2.00, $\chi^2 = 1.18903$



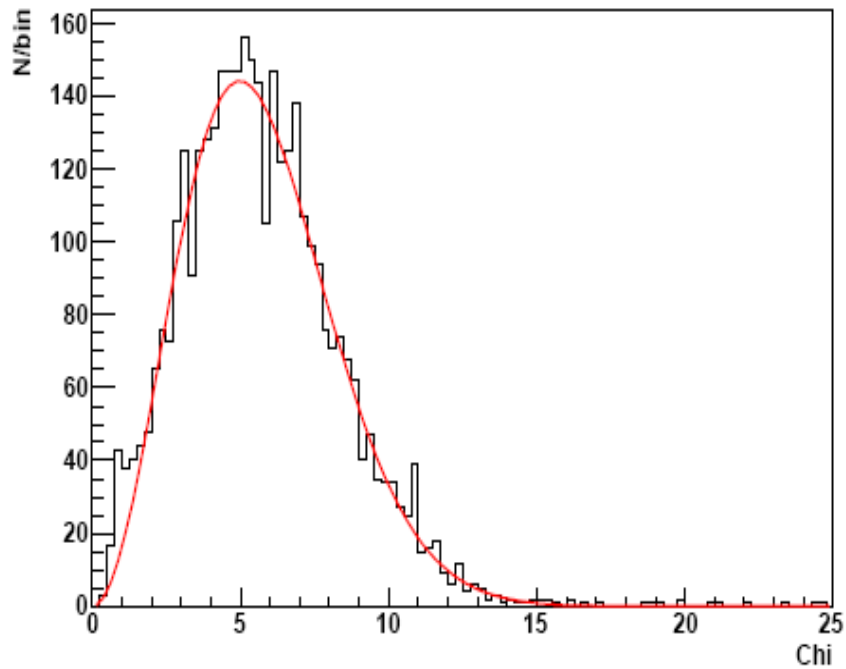
ATIC-2, 200-400GeV, Gauss, $p=2.00$, $\chi^2 = 1.0729$



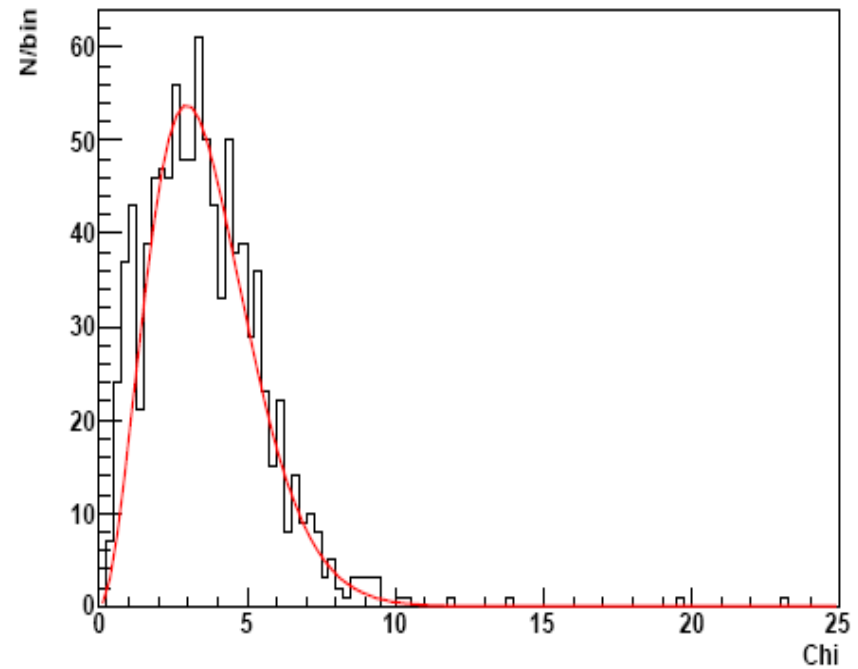
ATIC-4, 200-400GeV, Gauss, $p=2.00$, $\chi^2 = 0.728497$



ATIC-2, 400-900GeV, Gauss, $p=2.00$, $\chi^2 = 1.19597$



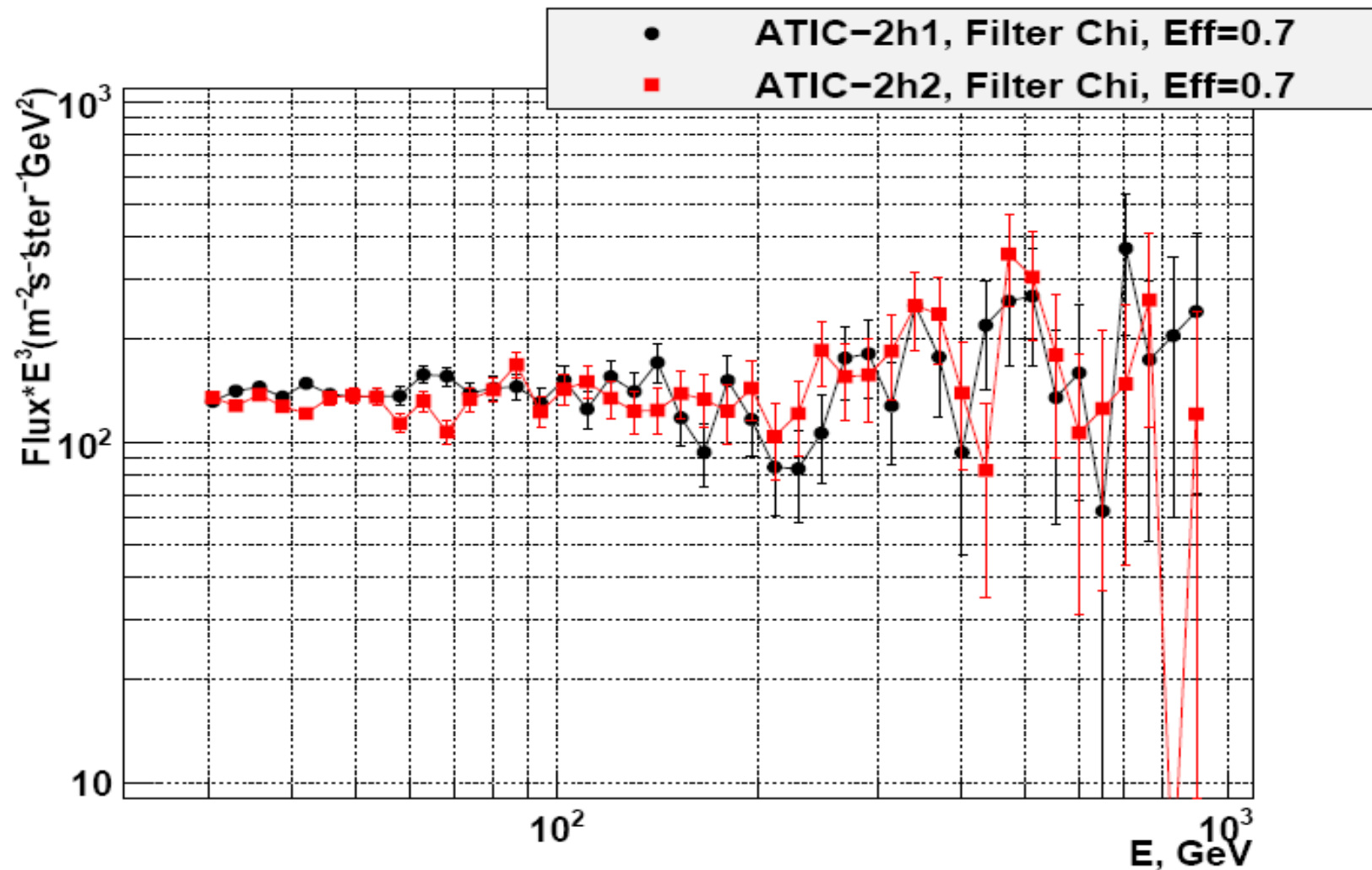
ATIC-4, 400-900GeV, Gauss, $p=2.00$, $\chi^2 = 0.972179$



В АТИК-2 в области энергий >200 GeV наблюдается необычная структура.

Стабильна ли она ?

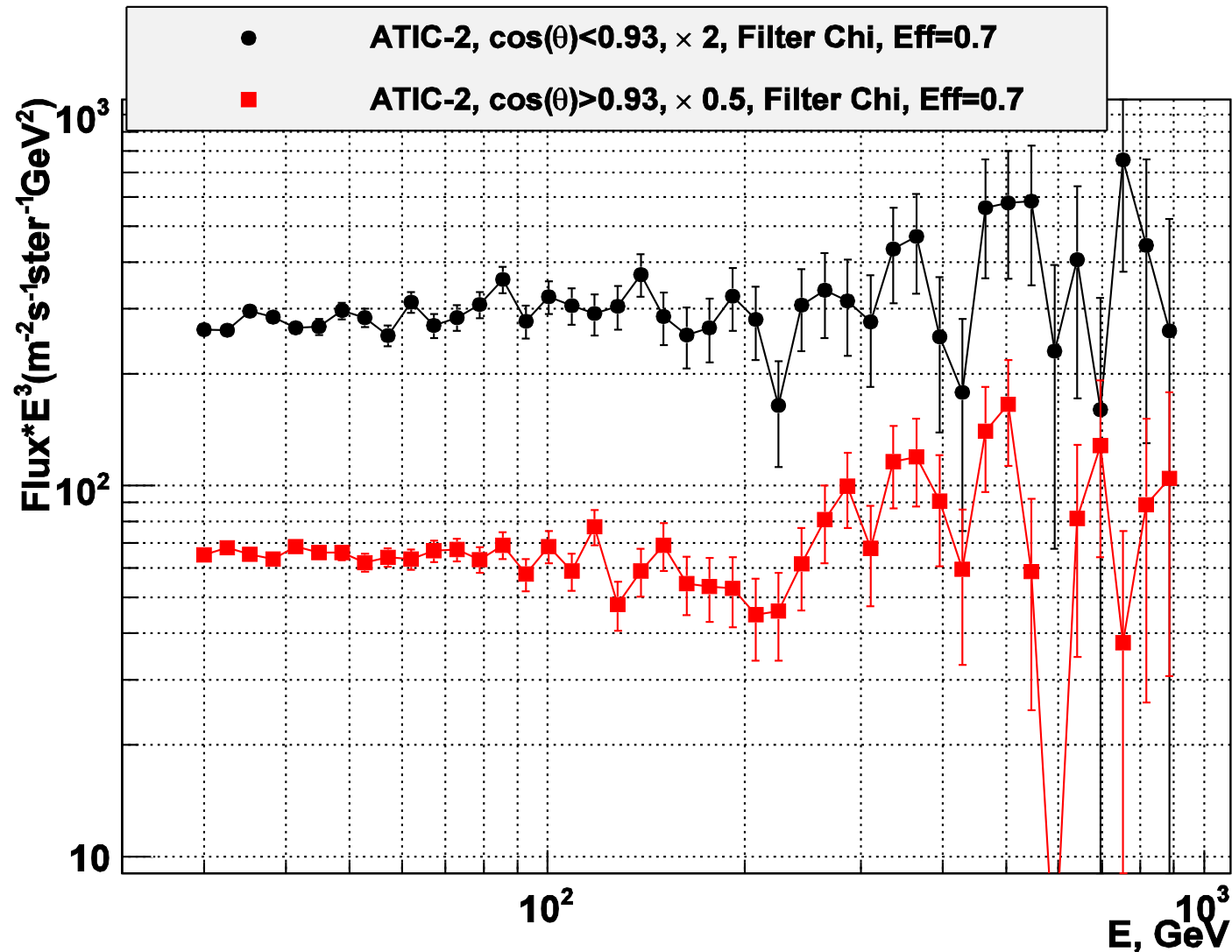
Сравнение двух половин полёта показывает, что прибор работал стабильно во времени (в области низких энергий интенсивности совпадают). Структура в области высоких энергий существует в обеих половинах.



Сохраняется ли эта структура в разных угловых диапазонах?

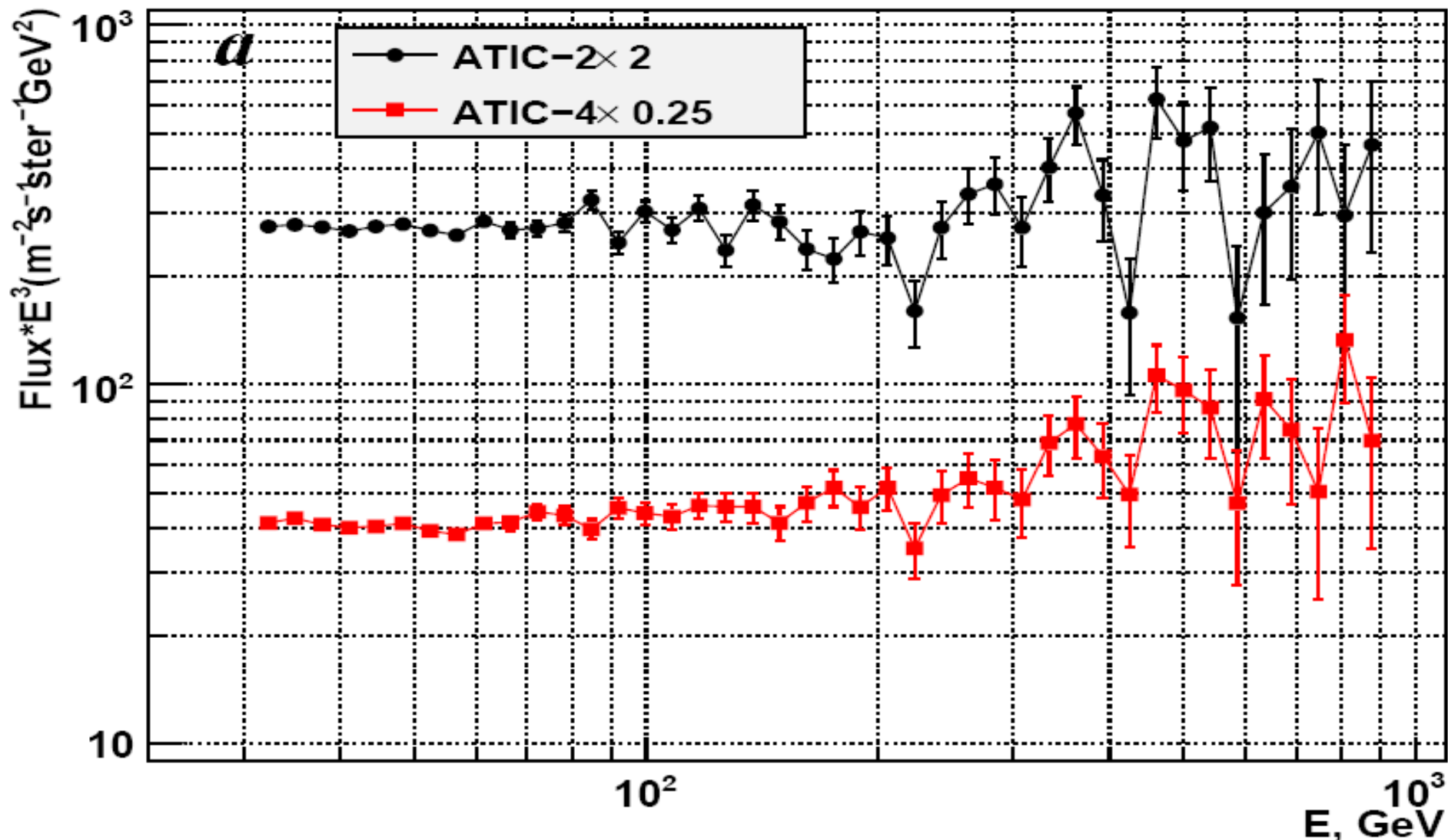
Полёт АТИК-2 ,был разбит на два одинаковых массива по углам.

Видим, что структура и в этом случае сохранилась.

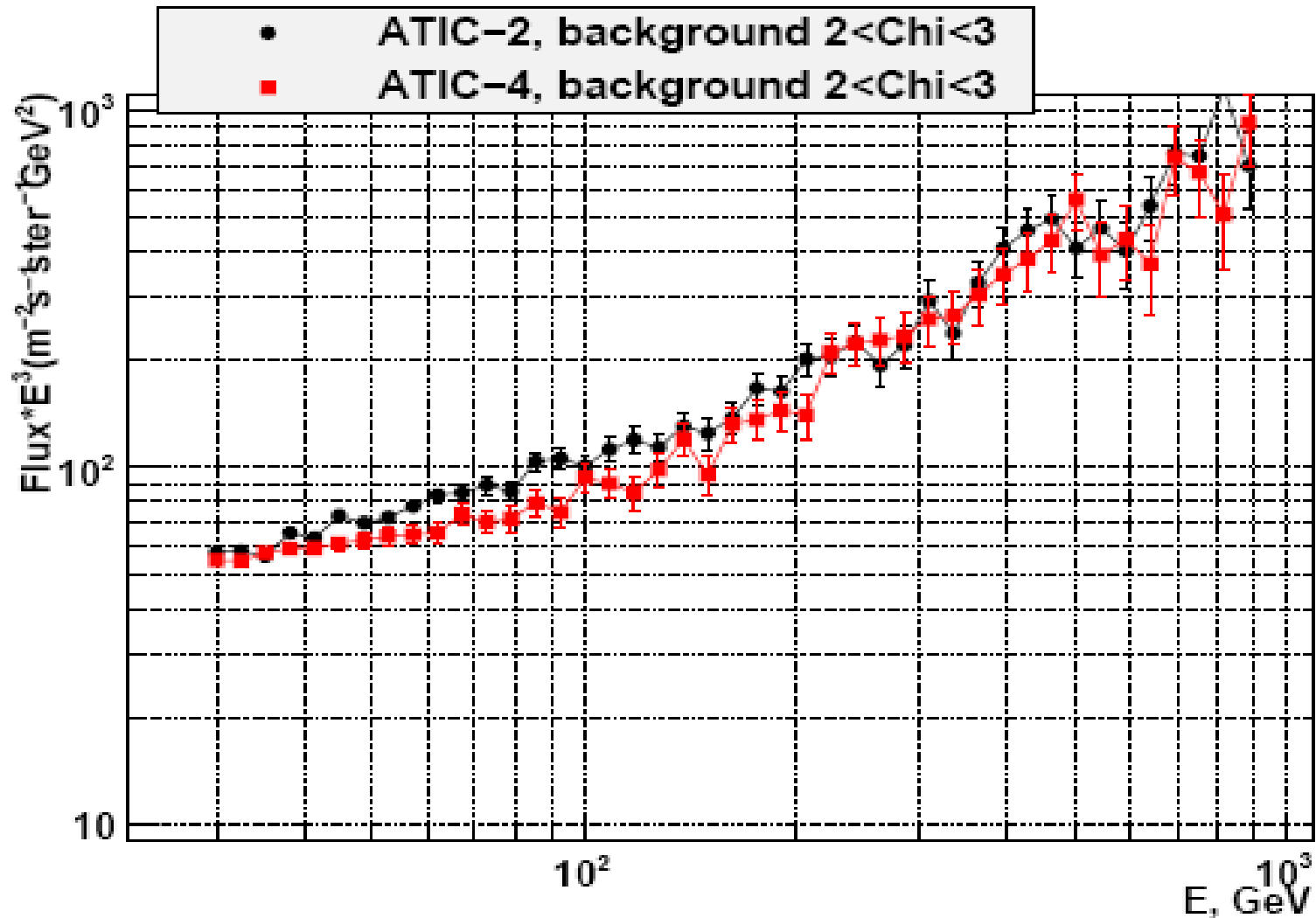


Не наблюдается ли она только в полёте АТИК-2 ?

В новом полёте АТИК-4 в области энергий >200 GeV снова видим похожую структуру.



Не является ли эта структура методической?
Похоже, что нет, так как на протонной выборке этой
особенности не видно.



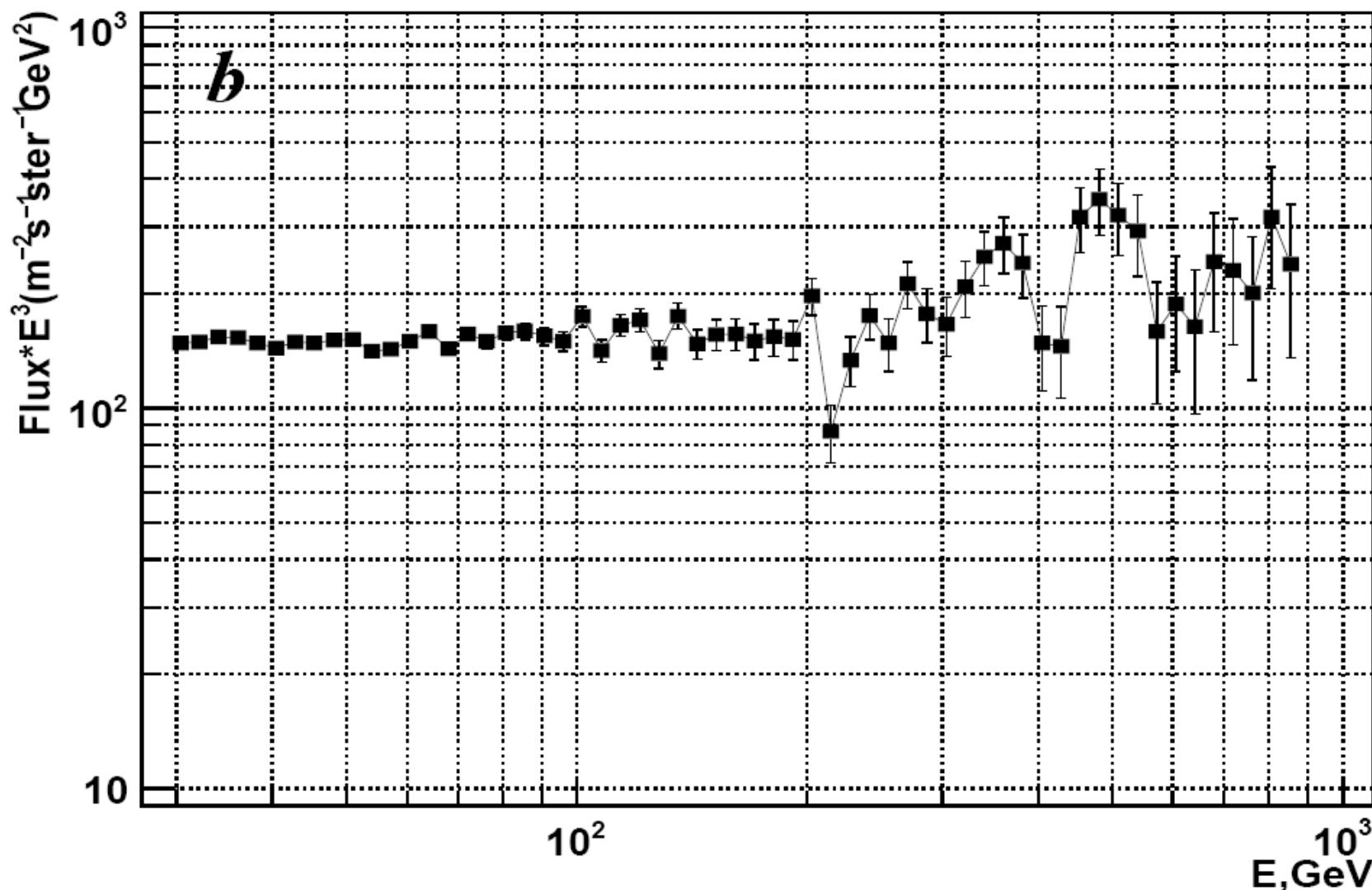
Не связана ли эта особенность спектра со свойствами фильтров?

Мы проверили 6 фильтров. При отборах по всем фильтрам эта особенность сохраняется.

Похоже, что эта особенность не является методической.

Суммарный спектр АТИК-2 + АТИК-4

(до введения поправок на остаточную атмосферу и до вычитания фона от ядер)



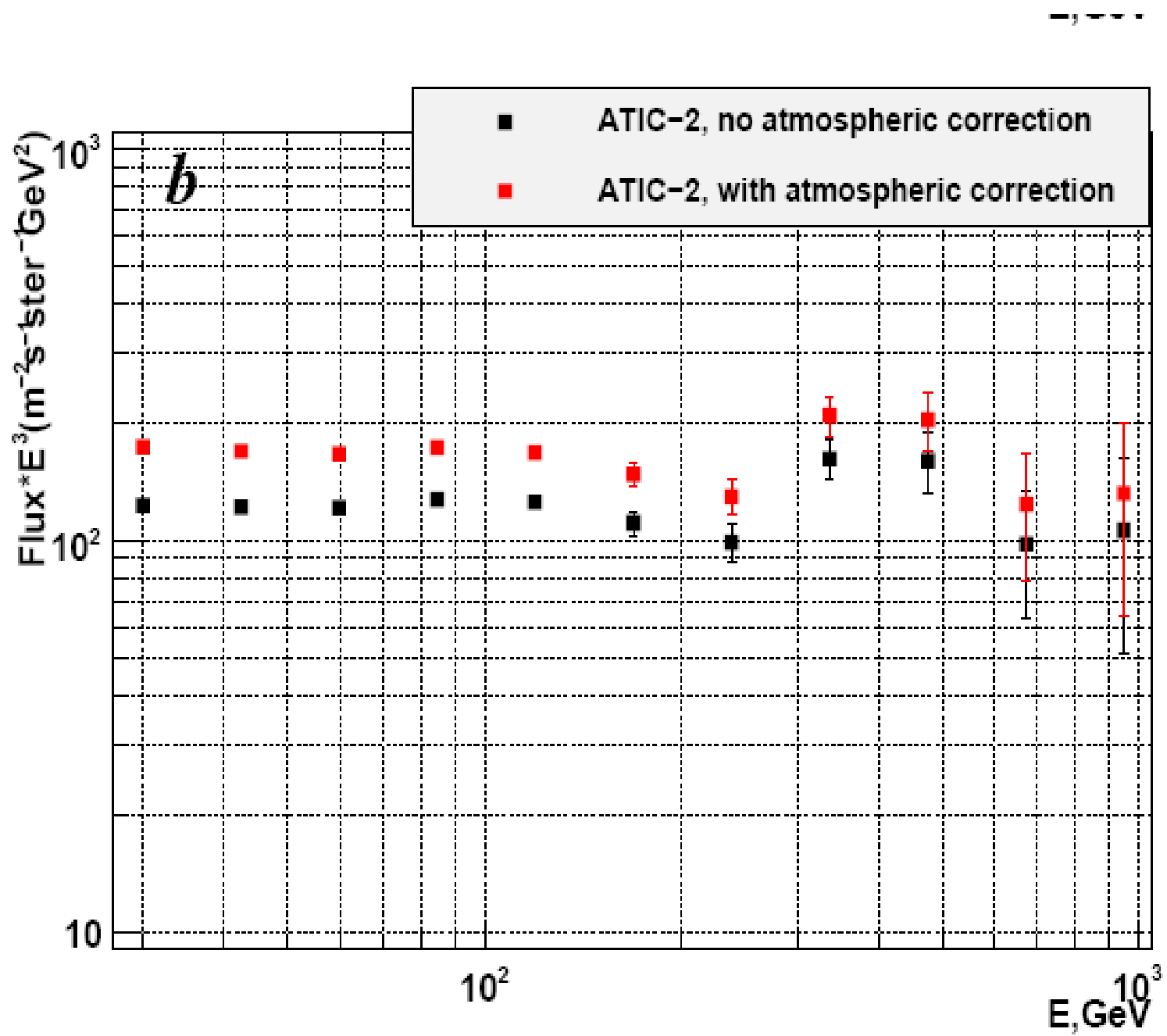
С какой вероятностью эта особенность может появиться случайно?

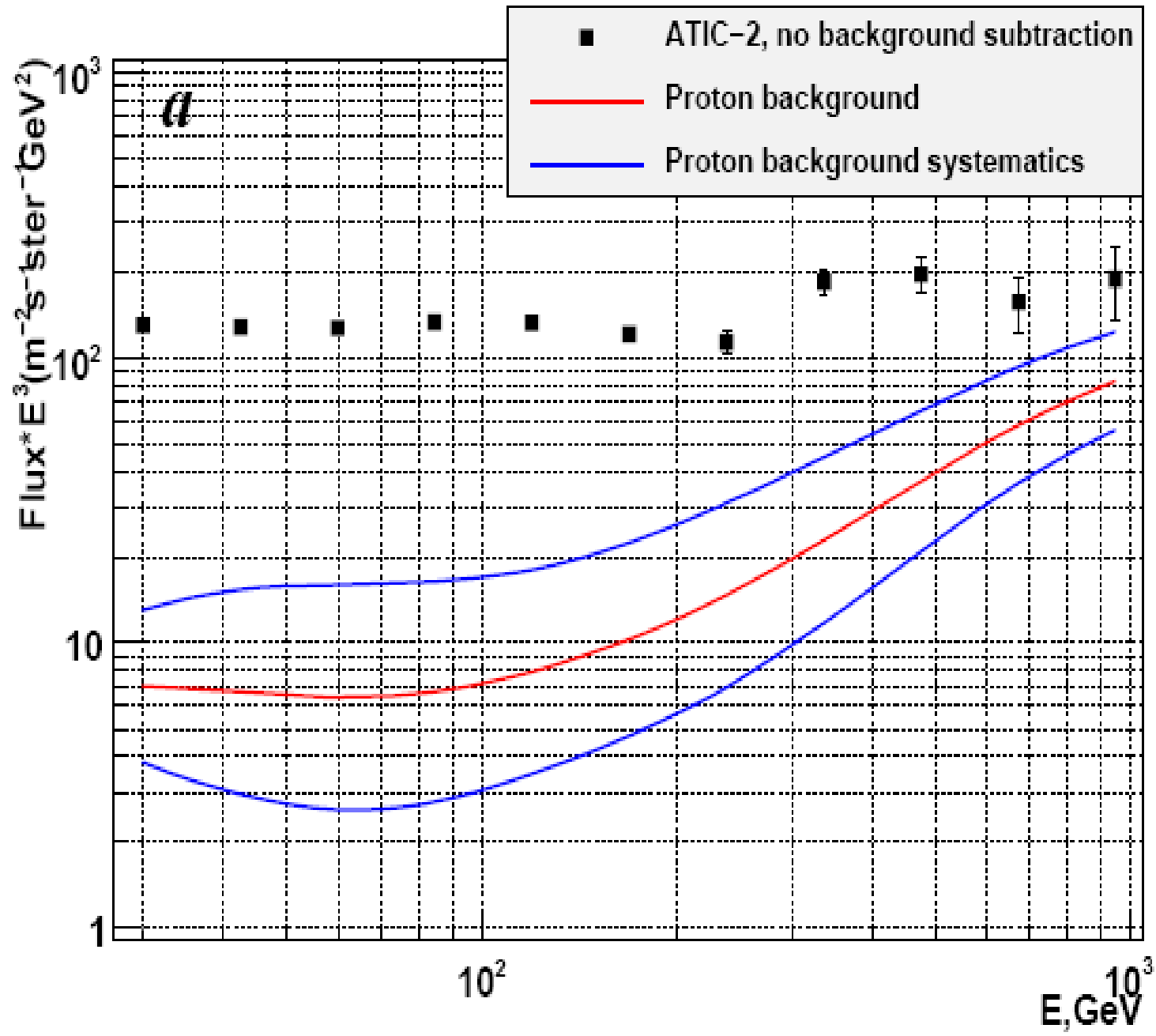
1. Для оценки значимости по корреляции двух полётов (АТИК-2 и АТИК-4) мы вводим величину

$$C_{\chi^2} = \frac{1}{N} \sum_i \frac{(x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sigma_{\bar{x}_i} \sigma_{\bar{y}_i}}.$$

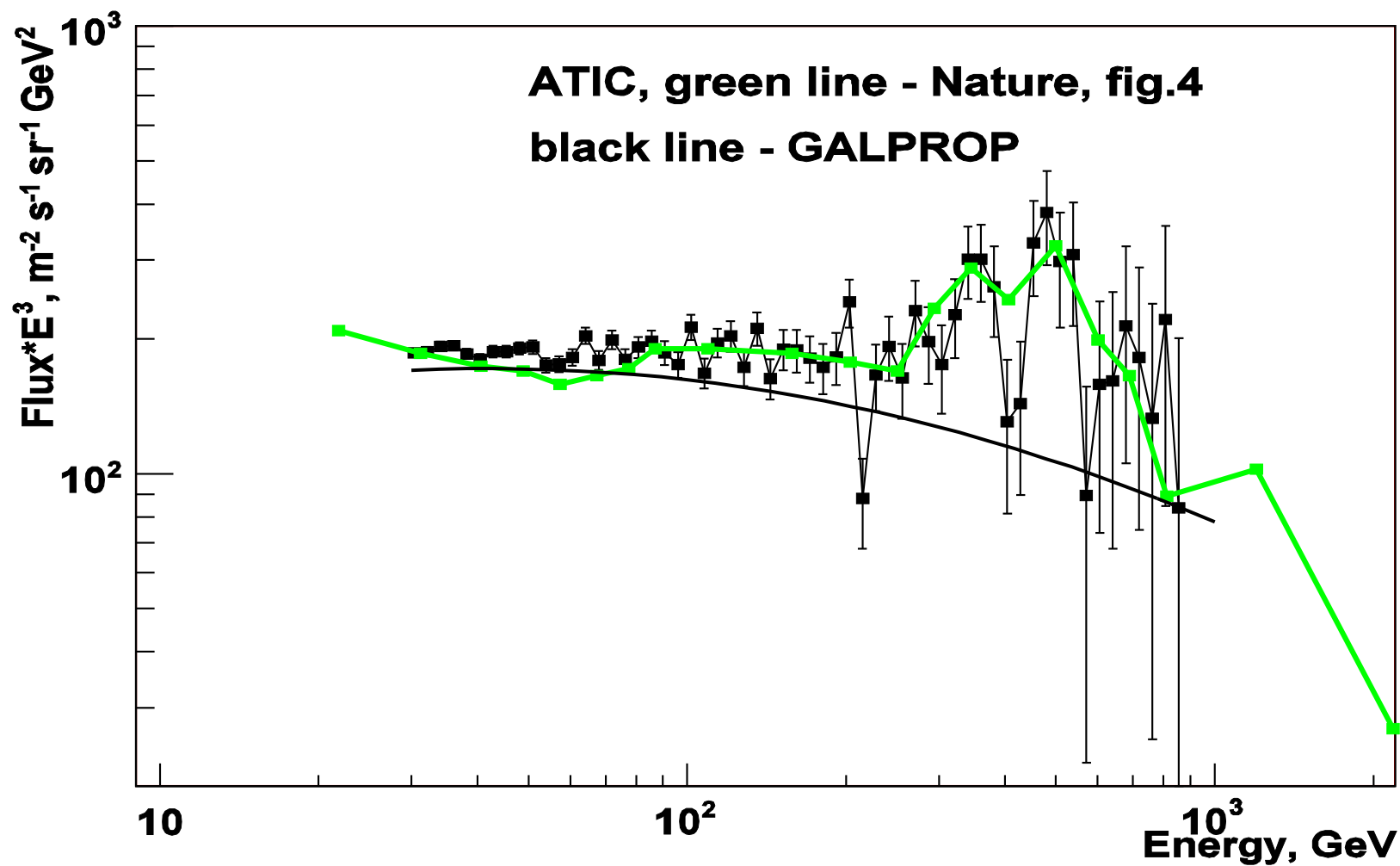
- Таким образом, обработка в НИИЯФ МГУ подтвердила существование «бампа», обнаруженного в первой обработке данных АТИКа, опубликованной в NATURE (2008).
- Эта обработка показала, что «бамп» является не плавной, а сильно изрезанной функцией энергии .
- Эта особенность воспроизводится всеми шестью использованными в обработке фильтрами.

Эта особенность – скорее всего не методическая и не случайная.

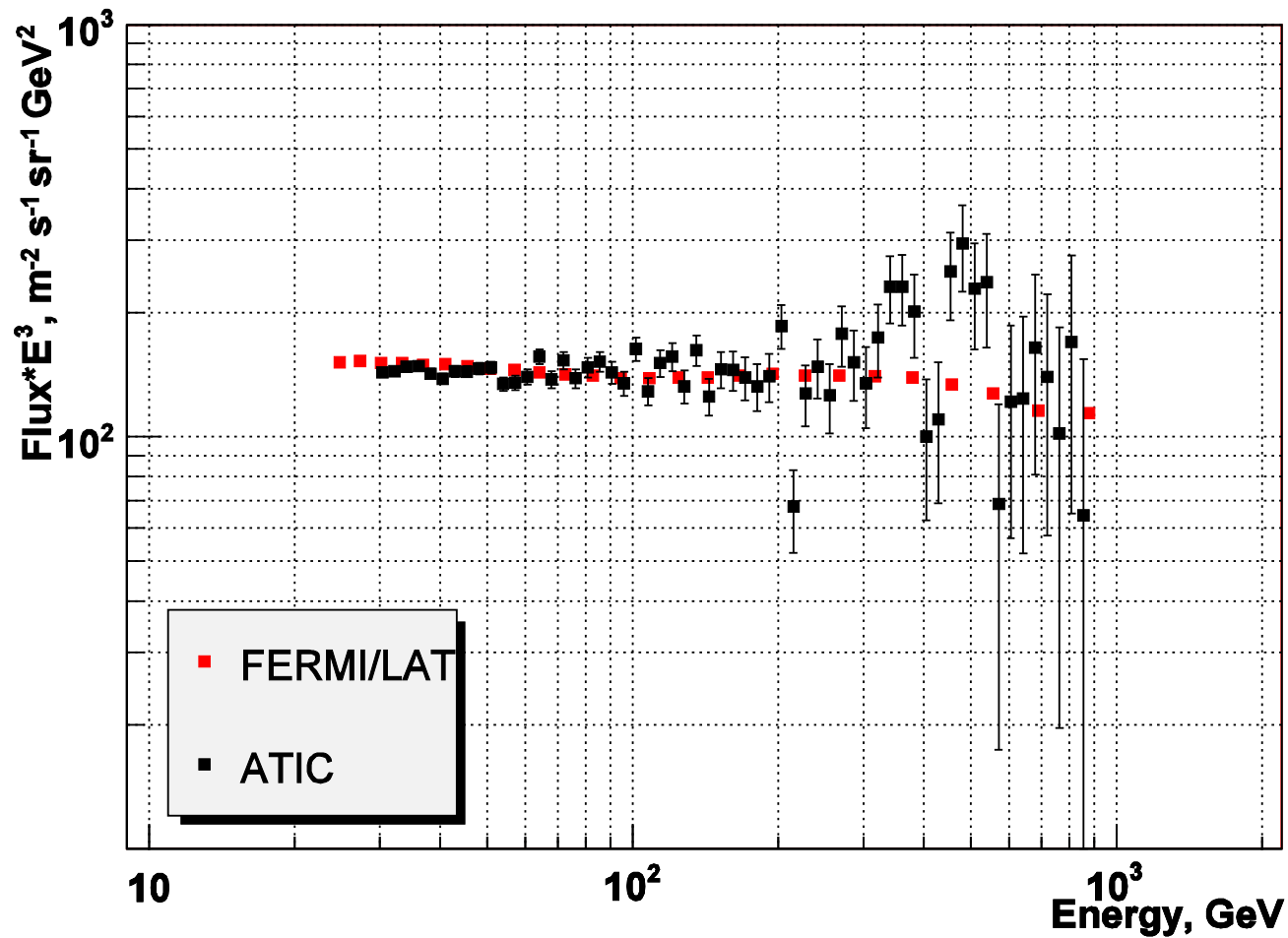




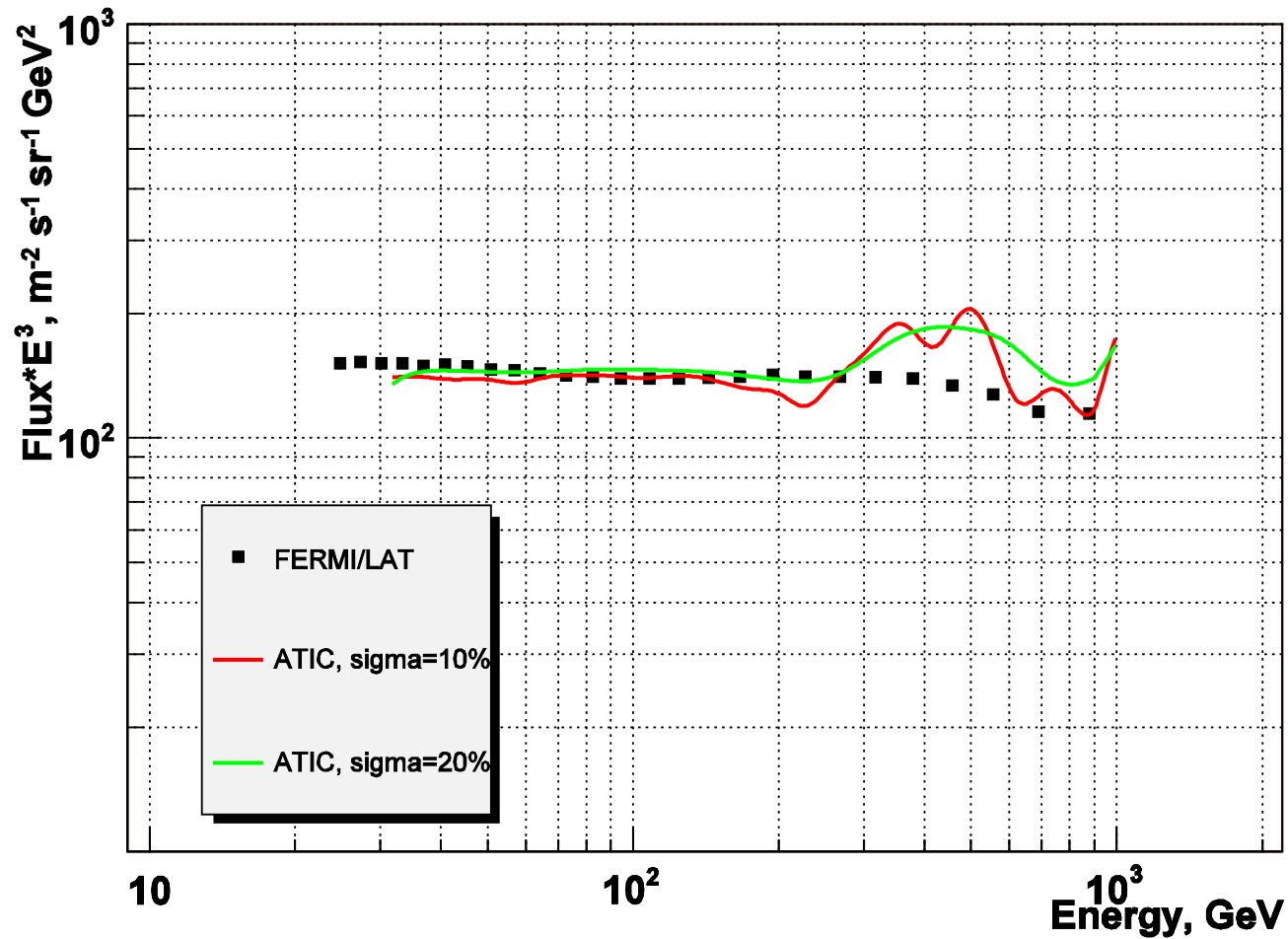
Видим, что и в новой обработке также имеется «бамп»



Сравнение нашего спектра электронов АТИК после учета протонного фона и остаточной атмосферы со спектром FERMIL/LAT



Как должен выглядеть спектр АТИК в приборе с худшим энергетическим разрешением



Сравнение данных АТИК и FERMI/LAT с учётом энергетического разрешения этих спектрометров свидетельствует о некотором различии спектров электронов ГКЛ в области энергий > 250 ГэВ. Причина этого различия пока неизвестна.

Следует заметить, что ни АТИК, ни FERMI/LAT не были сконструированы для прецизионного измерения энергетического спектра галактических электронов, которые составляют очень незначительную часть потока ГКЛ. Ожидалось, что спектр электронов должен дать важную информацию в области энергий > 1 ТэВ. Но никто не ожидал, что это случится уже в области энергий > 100 ГэВ. Тем не менее это случилось. Таким образом, обозначена очень важная проблема.

Для решения этой проблемы необходимо выполнить прецизионные измерения электронного спектра со специально для этой задачи построенным спектрометром. Существующие измерения не закрыли эту проблему.

**Ввиду необычности этого результата, мы
предприняли ещё одну обработку данных АТИКа,
используя дискриминантный метод для разделения
электронных и протонных событий .**

Дискриминантный анализ

– многомерный статистический метод

$$\text{Фильтр: } D^2(\vec{x}) = (\vec{x} - \vec{\mu}_1)^T S_1^{-1} (\vec{x} - \vec{\mu}_1) - (\vec{x} - \vec{\mu}_2)^T S_2^{-1} (\vec{x} - \vec{\mu}_2)$$

$\vec{x} = \lg \{ \text{EBGO}_1 / \text{EBGO}, \dots, \text{EBGO}_N / \text{EBGO}, \text{rms}_1 / (1\text{mm}), \dots, \text{rms}_N / (1\text{mm}) \}^T$ (N – число слоев BGO)

$\vec{\mu}_1, S_1$ – вектор средних значений и ковариационная матрица вектора \vec{x} , вычисленные в симуляции по **электронам**

$\vec{\mu}_2, S_2$ – то же самое по **протонам**

S_1^{-1}, S_2^{-1} – обратные матрицы к S_1 и S_2 , вычисленные методом регуляризации

$$\text{Одномерный аналог фильтра: } D^2(x) = (x - \mu_1)^2 / \sigma_1^2 - (x - \mu_2)^2 / \sigma_2^2$$

Модификация фильтра к задаче сепарации электронов: в симуляции определена и введена в формулу фильтра энергозависимость $\vec{\mu}_1$ и $\vec{\mu}_2$: $\vec{\mu}_1 = \vec{\mu}_1(\text{EBGO}), \vec{\mu}_2 = \vec{\mu}_2(\text{EBGO})$.

Согласно симуляции, максимум фильтра, построенного для электронов, делит электроны приблизительно пополам (мода совпадает с медианой).

Максимум фильтра для электронов можно определять из эксперимента.

Его значения для разных энергий аппроксимируем гладкой кривой.

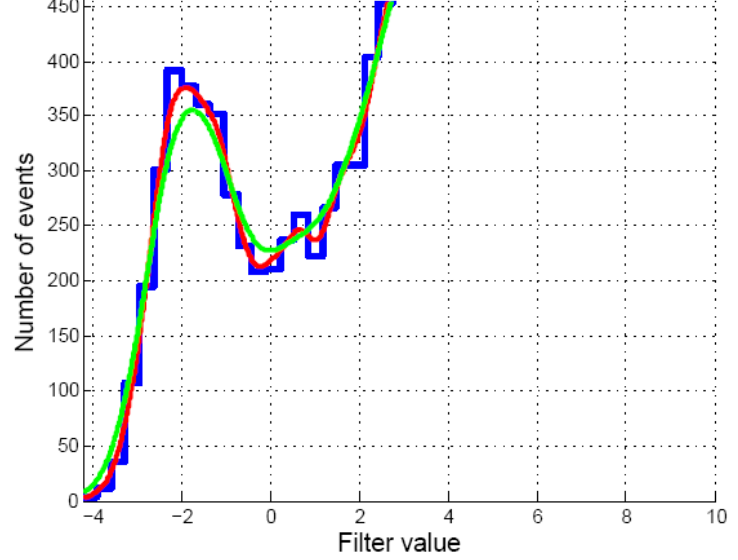
Найденное под этой пороговой кривой число электронов умножим на 2 (мода \approx медиана)

Выделение электронов методом дискриминантного анализа

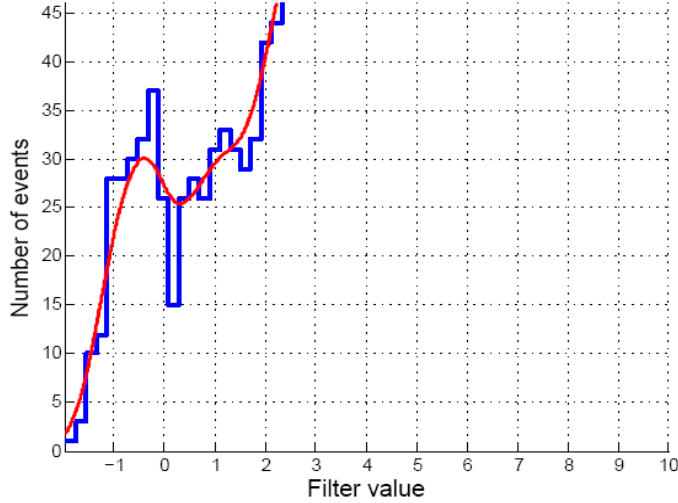
Filter distribution (ATIC-II), EBGO 50 – 100 GeV, 155492 events



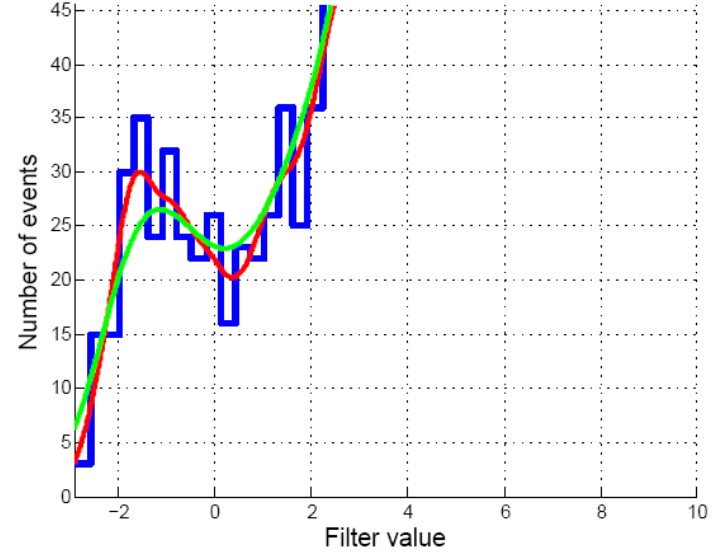
Filter distribution (ATIC-IV), EBGO 50 – 100 GeV, 121931 events



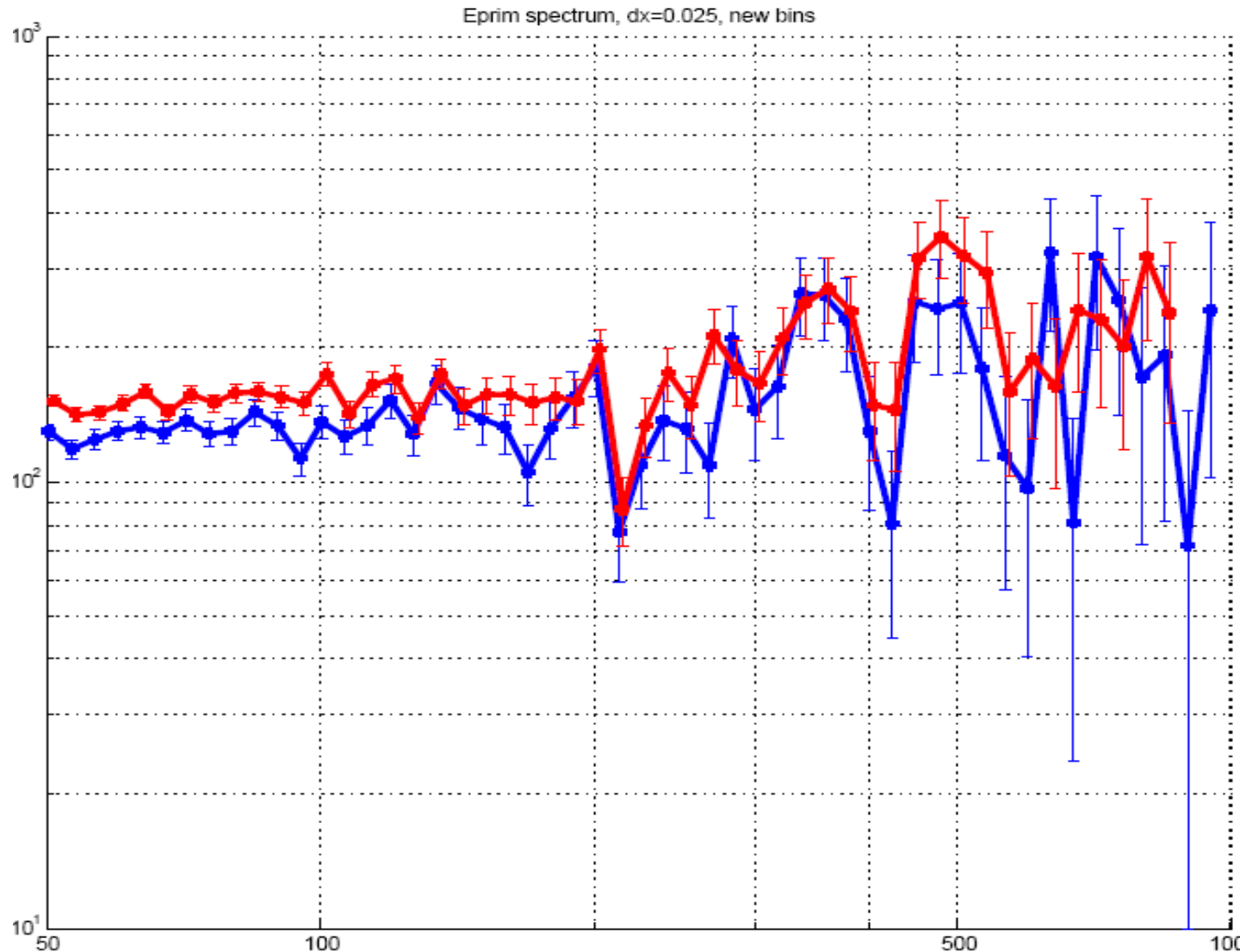
Filter distribution (ATIC-II), EBGO 200 – 400 GeV, 14056 events



Filter distribution (ATIC-IV), EBGO 200 – 400 GeV, 8754 events

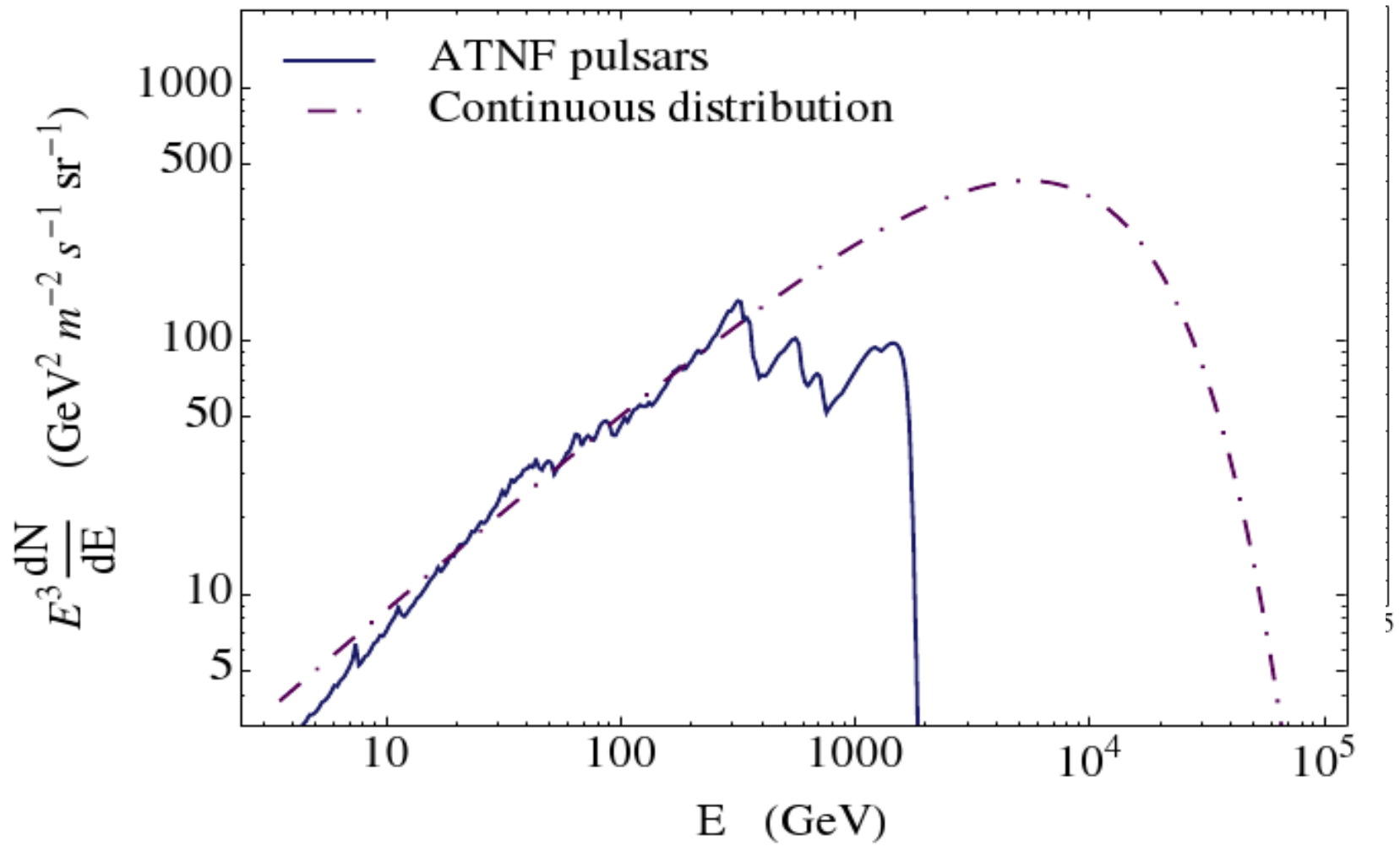


АТИК-2 + АТИК-4. Сравнение результатов двух обработок в НИИЯФ МГУ. Красная кривая – фильтр χ . Синяя кривая – дискриминантный метод . Сравнение результатов до вычитания фона и поправки на атмосферу. Видно, что разные методы обнаруживают в данных АТИКа одинаковую структуру в диапазоне 200-600 ГэВ..



- Таким образом, в полётах спектрометра АТИК наблюдается некоторый избыток в энергетическом спектре галактических электронов в области энергий >200 ГэВ, не ожидавшийся ранее.
- Кроме того, этот избыток имеет тонкую структуру.
- Эта структура есть в данных всех экспозиций спектрометра АТИК. Она не является методической. Вероятность её случайной природы по корреляции в двух полётах спектрометра АТИК $\sim 0.5\%$; по другой оценке, по методу χ^2 , $<1.5\%$
- Если эта структура будет подтверждена в дальнейшем, то она, по-видимому, не совместима с интерпретацией электронного спектра в рамках тёмной материи, так как в этом случае в электронном спектре будут присутствовать электроны всех возрастов, и суммарный спектр должен быть плавным.

Наиболее вероятным источником этого избытка является небольшое число близких пульсаров. По крайней мере такой характер спектра предсказан в работе Dmitry Malyshev et al (Phys.Rev D 80, 063005, 2009)



Выводы

- 1. В результате независимой переобработки данных АТИКа подтверждено существование аномалии (бампа) в спектре электронов в области энергий 200-600 GeV .**
- 2. При более детальном изучении электронного спектра (в более узких энергетических бинах, допускаемых статистикой и энергетическим разрешением прибора) в области аномалии обнаружена тонкая структура этого спектра.**
- 3. Наиболее вероятно, что спектр электронов в АТИКе можно объяснить вкладом ближайших пульсаров как это было предсказано в статье D.Malyshev et al (2009). Привлечения тёмной материи не требуется.**
- 4. Имеется различие с данными FERMI/LAT в области энергий >250 ГэВ. Причина пока неизвестна**

Спасибо за внимание