

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПАМЕЛА

С. В. Борисов, М. Боецио, С. А. Воронов, А. М. Гальпер,
Д. Ерсе, А. В. Карелин, Э. Мокьютти, П. Пикоцца, О. Адриани,
Г. А. Базилевская, Р. Белотти, В. Бонвичини, Л. Бонеки, С. Боттай,
А. Бруно, А. Вакки, Э. Вануччини, Г. Васильев, Я. Ву, Л. Гришанцева,
М. П. Де Паскале, К. Де Сантис, Н. Де Симоне, В. Ди Феличе,
В. Джиллард, Д. Зампа, Н. Зампа, В. Г. Зверев, М. Казолино,
Д. Кампана, Р. Карбоне, Д. Кастелини, П. Карлсон, Ф. Кафанья,
А. Н. Квашнин, С. В. Колдашов, Л. Консилио, С. Ю. Крутьков,
А. Леонов, В. Мальвецци, Л. Марчелли, В. Менн, В. В. Михайлов,
А. Монако, Н. Мори, Н. Никонов, Д. Остерия, П. Папини, М. Пирс,
С. Б. Риччарини, М. Риччи, Л. Розетто, М. Симон, Р. Спарволи,
П. Спиллантини, Ю. И. Стожков, П. Хофверберг, Ю. Т. Юркин

Магнитный спектрометр ПАМЕЛА на борту спутника Ресурс ДК1 № 1 был выведен на околоземную орбиту 15 июня 2006 г., измерения продолжаются и в настоящее время. Научными задачами спектрометра являются изучение потоков антипротонов, протонов, позитронов, электронов и лёгких ядер в космических лучах. В данной работе представлена методика измерения спектров электронов и позитронов в диапазоне энергий от 20 до 800 ГэВ.

Ключевые слова: магнитный спектрометр ПАМЕЛА, космические лучи, высокоэнергетические позитроны и электроны.

1. Магнитный спектрометр ПАМЕЛА предназначен для проведения прецизионных измерений спектров антипротонов, позитронов, потоков электронов до энергий порядка нескольких ТэВ, а также для поиска лёгких антиядер.

Прибор состоит из следующих детекторов (см. рис. 1 сверху вниз): времяпролётная система TOF (S1, S2, S3), магнитный спектрометр, система антисовпадений (CARD,

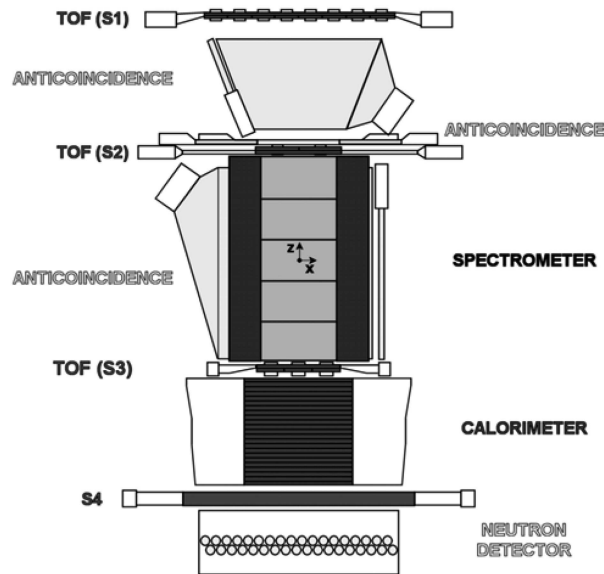


Рис. 1: Структура магнитного спектрометра ПАМЕЛА (пояснения в тексте).

SAT, CAS), электромагнитный калориметр, ливневый детектор (S4) и нейтронный детектор. Времяпролётная система состоит из 3-х двойных слоёв сцинтилляционных полос и предназначена для измерения ионизации падающей частицы, времени и направления её пролёта в приборе. Магнитный спектрометр состоит из 6-ти слоёв кремниевых микростриповых детекторов, помещённых в магнитное поле и измеряющих координату пересечения частицей плоскости детектора как в X- так и в Y-проекции. При измерении кривизны траектории частицы в магнитном поле восстанавливается её жёсткость (отношение импульса к заряду). Система антисовпадений позволяет отбрасывать события, прошедшие вне апертуры прибора. Электромагнитный позиционно-чувствительный калориметр представляет собой сборку из 22 вольфрамовых плоскостей равной толщины прослоенных кремниевыми стриповыми детекторами, стрипы в которых идут с шагом 2.4 мм и в любых двух соседних плоскостях ориентированы взаимно-перпендикулярно, что позволяет восстанавливать трёхмерную картину взаимодействия частицы с веществом калориметра. Полная толщина калориметра составляет 16.3 радиационных длины и 0.6 ядерной длины взаимодействия. Ливневый детектор представляет собой сцинтиллятор, просматриваемый 6-ю ФЭУ, он измеряет величину утечки энергии из калориметра. Нейтронный детектор предназначен для регистрации нейтронов, образующихся при взаимодействиях частицы в калориметре, что позволяет повысить разделение адронов и лептонов. Геометрический фактор прибора ПАМЕЛА составляет $21.6 \text{ см}^2\text{ср}$.

Более подробное описание как всего прибора ПАМЕЛА, так и его отдельных детекторов и условий измерений приведены в [1].

2. Постановка задачи и калориметр спектрометра ПАМЕЛА. Особый интерес для измерения в энергетическом диапазоне свыше 100 ГэВ представляет электронная компонента космических лучей, поскольку, как предполагается, вклад в спектр электронов и позитронов могут давать процессы аннигиляции частиц тёмной материи или такие астрофизические объекты как пульсары и взрывы сверхновых. Но измерение электронного спектра в данной области энергий представляется довольно трудной задачей. Такие измерения на наземных установках по измерению широких атмосферных ливней невозможны по причине отсутствия возможности выделения электронных событий на фоне протонных. Измерения же на высотных аэростатах, проводящиеся на высотах 30–40 км над поверхностью Земли, затрудняются наличием остаточной атмосферы, взаимодействия частиц с которой вносят искажения в измеряемый спектр. Таким образом, измерения высокоэнергичной электронной компоненты космических лучей лучше всего проводить в околоземном космическом пространстве.

В настоящее время такие измерения проводят 2 прибора: спектрометр ПАМЕЛА и гамма-телескоп ФЕРМИ. К достоинствам прибора ПАМЕЛА следует отнести большую толщину калориметра (16.3 радиационных длин X_0 против 8.6 X_0 у ФЕРМИ), что позволяет по калориметру ПАМЕЛА измерять энергию падающего электрона с точностью $\sim 10\%$ вплоть до нескольких ТэВ.

В спектрометре ПАМЕЛА измерение как электронной, так и других компонент космических лучей в области энергий от сотен МэВ до 200–300 ГэВ проводится с помощью магнитной трековой системы, которая обеспечивает надёжные измерения импульса частицы до нескольких сотен ГэВ (значение максимально измеряемой жёсткости составляет 740 ГэВ/с) [2]. Однако для изучения спектра в области свыше нескольких сотен ГэВ может быть использован только калориметр [3].

3. Методика идентификации электронов высоких энергий и измерение их спектра. Разработанный метод позволяет идентифицировать электроны и позитроны на фоне протонов и измерять их энергию в диапазоне от ~ 20 ГэВ до нескольких ТэВ. Разработка методики проводилась на основе расчётов Монте-Карло с использованием официального пакета моделирования коллаборации ПАМЕЛА GRAMELA [4], воспроизводящего полную геометрию спектрометра и основанного на пакете физического моделирования GEANT3 и пакете моделирования адронных взаимодействий GHEISHA.

Калориметр имеет достаточно большую толщину для того, чтобы все электроны с энергией более 20 ГэВ могли в нём развить ливень, таким образом, в дальнейшем анализе необходимо рассматривать только события, имеющие каскад в калориметре.

Полное энерговоыделение и количество сработавших стрипов в электромагнитном ливне скоррелировано с первичной энергией электрона, поэтому, наложив ограничения на эти величины, можно отбросить большую часть невзаимодействующих частиц или ливни, начавшиеся глубоко в калориметре, отождествляемые как протонные события. Теперь для оставшихся ливней, для выделения в них электронов, необходимо восстановить ось каскада, чтобы отбросить частицы, пришедшие вне апертуры спектрометра, и рассчитывать топологические параметры анализируемых ливней в калориметре. Восстановление оси производится с помощью многоитерационного метода наименьших квадратов по центрам тяжести энерговоыделений в плоскостях. Угловое разрешение улучшается с ростом первичной энергии частицы и при энергиях порядка сотен ГэВ составляет величину порядка нескольких тысячных радиана. Но и при относительно невысоких энергиях (порядка десятков ГэВ) оно составляет величину порядка сотой радиана. Для дальнейшего анализа оставляются только ливни, экстраполированная ось которых прошла на некотором, определяемом угловым разрешением для каждого конкретного события, расстоянии от стенок магнита.

Далее, так как электромагнитные каскады являются более регулярными, чем адронные, то, соответственно, точность восстановления оси ливня в первом случае оказывается лучше. А это приводит к меньшим значениям χ^2 аппроксимации оси, что позволяет подавить протоны и на этой стадии отбора.

После того, как ось каскада восстановлена, возможен расчёт параметров, характеризующих развитие ливня. Основу разделения адронных и электромагнитных каскадов составляют параметры, детально описывающие развитие ливня в первых четырёх слоях калориметра. Этими параметрами являются количество сработавших стрипов, энерговоыделение после данного слоя вольфрамового поглотителя, нарастание каскада от слоя к слою, доля энерговоыделения в цилиндре радиусом 1 стрип в кластере сработавших стрипов на восстановленной оси ливня. Для примера, на рис. 2 представлены распределения электронов и протонов по доле энерговоыделения в радиусе 1 стрип от оси ливня после первого слоя вольфрама для различных диапазонов суммарных энерговоыделений в калориметре (которое обозначено как Q_{tot} над каждой из четырёх диаграмм, диапазон указан в тысячах мип – в случае электронного ливня 1 тысяча мип примерно соответствует первичной энергии частицы 5 ГэВ). По горизонтальной оси отложено

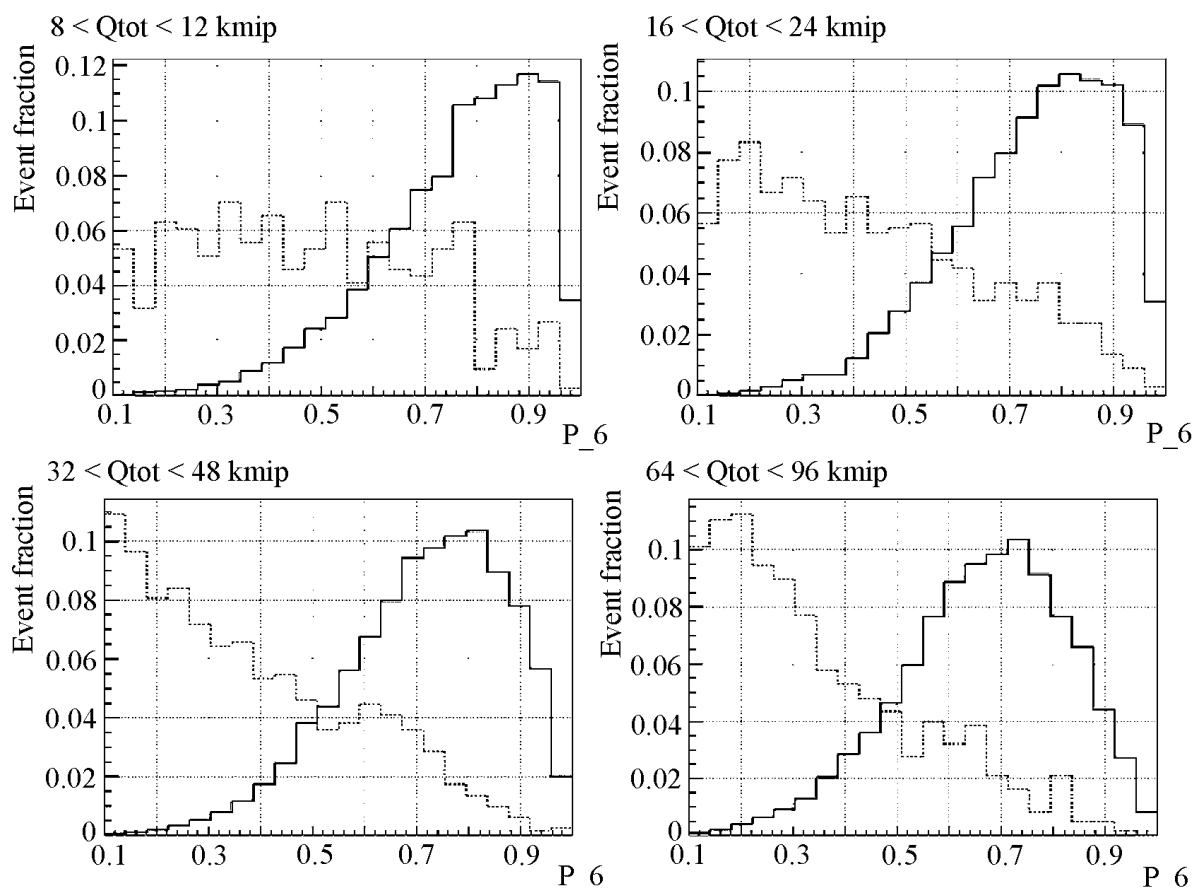


Рис. 2: Распределения электронов и протонов по доле энергосвечения для различных диапазонов суммарных энергосвечений (пояснения в тексте).

значение этого параметра, по вертикальной оси – доля событий из данного диапазона. Чёрной сплошной линией обозначены распределения для электронов, серой пунктирной – для протонов. Данный критерий убирает примерно половину адронных ливней во всём интересующем нас диапазоне энергий, при этом теряется 2–4% электронов.

Для подавления ядерной компоненты космических лучей применяются критерии, связанные с развитием, затуханием ливня и его однородностью, что позволяет добиться причёта протонов на уровне 5–10% от регистрируемого потока электронов. Расчёты также показали, что эффективность отбора электронов составляет примерно 50–60% практически во всём диапазоне энергий. Некоторое снижение эффективности до 25–30% при энергиях порядка нескольких десятков ГэВ вызвано использованием зауженной апертуры для отбора событий, определяемой пространственным разрешением в каждом конкретном случае. И в случае каскада, вызванного электроном или позитро-

ном с энергией порядка несколько десятков ГэВ разрешение оказывается таковым, что зауженная апертура оказывается примерно вдвое меньше номинальной. При энергиях же выше 100 ГэВ потери статистики за счёт использования зауженной апертуры вместо номинальной составляют величину всего порядка 10%.

Измерение энергии электронов производится по полному энергосъёмлению в калориметре. Разрешение такого метода измерения энергии составляет величину менее 10%. В случае, если ливень уместается полностью в калориметре, то зависимость между полной, выделившейся в каскаде энергией и первичной энергией является линейной, но если же часть ливня выходит за пределы физического объёма калориметра, то необходимо вводить нелинейную поправку. Оказалось, что в интересующем нас диапазоне энергий достаточно использовать полином второго порядка, что и было сделано.

После того, как отбор по картине ливня в калориметре окончен, применяется отбор по числу нейтронов в событии. Данный критерий основан на том, что развитие адронного каскада связано, как правило, с взаимодействием с ядрами вещества калориметра, которое сопровождается испусканием большого количества нейтронов. В случае электромагнитного ливня рождение нейтронов возможно только за счёт фото-ядерных реакций. В результате вероятность регистрации большого числа нейтронов в адронном ливне заметно выше, чем в электромагнитном. Количественный критерий был выработан следующим образом. Используя магнитный анализ, в полётных данных спектрометра ПАМЕЛА были отобраны электроны вплоть до энергии 180 ГэВ. Отметим, что совместное использование магнитного спектрометра и калориметра позволяет очень надёжно выделить электроны, т.к. поток адронных частиц с отрицательным зарядом (только антипротоны) на два порядка меньше потока электронов, а такой простой критерий как сравнение энергии, измеренной по магнитному спектрометру, с энергией, измеренной по калориметру, позволяет подавить адронную компоненту более чем в 10^4 раз [3]. Для отобранных таким образом электронов были построены распределения по количеству нейтронов для различных энергетических диапазонов. На основе анализа распределений был выработан критерий отбора, позволяющий сохранить 99.5% электронных событий. Максимально допустимое значение числа нейтронов в событии определяется как функция энергии: $N_{\max} = 2 + 0.04 \cdot E$, где E – энергия в ГэВ. На рис. 3(а) представлено распределение электронов, отобранных с помощью калориметрической методики, в экспериментальных данных спектрометра ПАМЕЛА, по числу нейтронов и энергии (по вертикальной оси отложено количество нейтронов в событии, по горизонтальной – энергия в ГэВ). Прямая линия на диаграмме – пороговое значе-

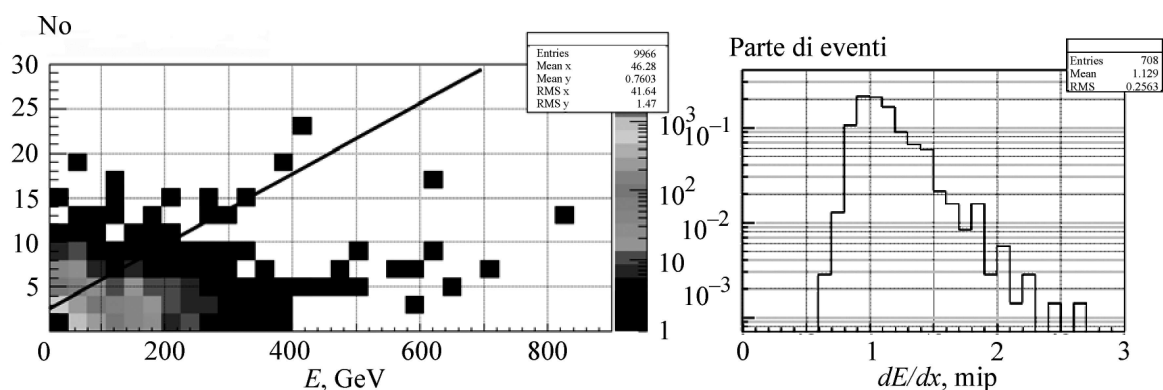


Рис. 3: (а) распределение электронов, отобранных с помощью калориметрической методики (пояснения в тексте); (б) распределение событий по среднему значению потерь энергии dE/dx для диапазона энергий от 37 до 50 ГэВ.

ние числа нейтронов. По данному порогу было отброшено 3% событий, отобранных с помощью калориметра.

Также был сделан отбор по величине ионизационных потерь в сцинтилляторах времяпролётной системы. Поскольку в составе космического излучения помимо протонов значительную долю составляют ядра (до 10%), то для исключения необходимости анализа их подавления критериями по калориметру и нейтронному детектору был введён дополнительный критерий, выработанный на основе экспериментальных данных спектрометра по измерению удельных ионизационных потерь (dE/dx) в сцинтилляционных детекторах.

Для большей эффективности критерия отбирались события по величине “обрезанного среднего” (truncated mean) измерений в S1 и S2. Данные в S3 не использовались по причине возможного влияния обратного тока каскадов при высоких энергиях. Для расчёта обрезанного среднего использовался следующий алгоритм:

1. Вычисляется среднее значение M измерений в 4-х сцинтилляторах, расположенных над магнитной трековой системой;
2. Отбрасываются измеренные величины, которые в 2 раза больше среднего значения M , и вычисляется новое среднее значение $M1$;
3. Отбрасываются измеренные величины, которые в 10 раз меньше среднего значения $M1$, и считается новое среднее значение $M2$.

Распределение событий по среднему значению потерь энергии dE/dx для диапазона энергий от 37 до 50 ГэВ, рассчитанному таким образом, представлено на рис. 3(б). Была исследована зависимость эффективности отбора частиц от значений порогов. Эффек-

тивности отбора по верхней и нижней границам отбора изучались отдельно. На основе проведённого анализа был определён оптимальный диапазон отбора электронов: от 0.5 до 2.3 мип. Эффективность отбора электронов по данному критерию составила величину более 99% независимо от энергии.

Данный критерий был применён к событиям, отобранным с помощью калориметра и нейтронного детектора. В общей сложности было отсеяно 4% событий.

4. Проверка методики. Для того, чтобы получить надёжное измерение спектра, были проведены всесторонние проверки разработанной методики, а именно: оценка остаточного загрязнения адронами с помощью магнитного анализа в диапазоне энергий до 150 ГэВ, оценка эффективности по экспериментальным данным, проверка временной стабильности работы детекторов.

Оценка остаточного загрязнения протонами была получена следующим образом: из событий, отобранных с помощью описанной методики, были отобраны частицы, имеющие надёжно аппроксимированную траекторию в магнитном спектрометре. И для таких событий была посчитана доля положительных частиц. Превышение этой доли для событий, отобранных с помощью описанной методики, над истинной долей позитронов даёт оценку загрязнения протонами. Результат такой оценки представлен на рис. 4(а): маленькие точки – доля позитронов, опубликованная в работе [5], крупные точки – зарядовое отношение для анализируемых событий. Таким образом, из анализа данных магнитного спектрометра видно, что вклад протонов в спектр электронов и позитронов составляет величину порядка нескольких процентов, причём с ростом энергии величина загрязнения не растёт.

Другая важная характеристика методики – это эффективность отбора событий. Правильность её расчёта на основе расчётов Монте–Карло была проверена при помощи магнитного анализа в диапазоне энергий до 150 ГэВ. Это было сделано следующим образом: к электронам, выделенным в полётных данных на основе магнитного анализа, были применены критерии описанной выше методики и была вычислена доля отобранных электронов для различных диапазонов энергий. Измерение энергии проводилось как по калориметру, так и по магнитному спектрометру. Аналогичная процедура была проведена в модельных данных. Результат сравнения такой оценки, полученной на основе экспериментальных и модельных данных, представлен на рис. 4(б). Квадратики и треугольники – оценка эффективности по полётным данным при измерении энергии по магнитному спектрометру и калориметру соответственно. Серые и чёрные кружочки – аналогичная оценка, полученная из модельных данных. Как можно видеть, экспери-

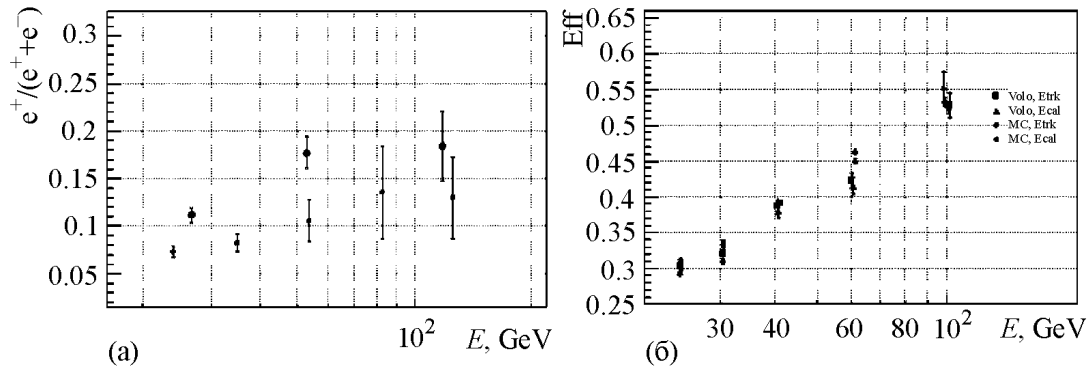


Рис. 4: (а) оценка остаточного загрязнения протонами. Маленькие точки – доля позитронов [5]; большие – зарядовое отношение; (б) эффективность отбора событий. \square – по спектрометру, \triangle – по калориметру, \circ , \bullet – соответствующие модельные данные.

ментальные и данные моделирования показывают очень хорошее совпадение.

И наконец, была проведена проверка стабильности измеряемого потока. Стабильность интегрального потока во времени при высоких энергиях будет означать стабильность работы детекторов, т.к. при высоких энергиях (свыше 20 ГэВ) временная вариация потока если и существует, то её величина пренебрежимо мала, как следует из анализа экспериментальных данных.

Для получения такой оценки весь период измерений (примерно 30 месяцев) был разбит на интервалы продолжительностью около 2-х месяцев, и для каждого такого интервала был посчитан интегральный поток электронов и позитронов. Результат такой оценки показал, что в пределах статистических ошибок поток является постоянным, что свидетельствует о стабильности работы спектрометра.

5. Результат и обсуждение. После всесторонних проверок методики по экспериментальным данным спектрометра ПАМЕЛА за 2.5 года измерений был построен суммарный электронно-позитронный спектр в диапазоне энергий от 24 до 800 ГэВ. Спектр близок к степенному с показателем -3.15 ± 0.04 , и имеет особенность при энергиях 70–200 ГэВ.

Было также проведено сравнение спектра, измеренного с помощью описанной методики, со спектрами электронов, измеренными с помощью методик, основанных на магнитном анализе. Результат сравнения показал, что спектры, измеренные разными методами в пределах погрешностей, совпадают.

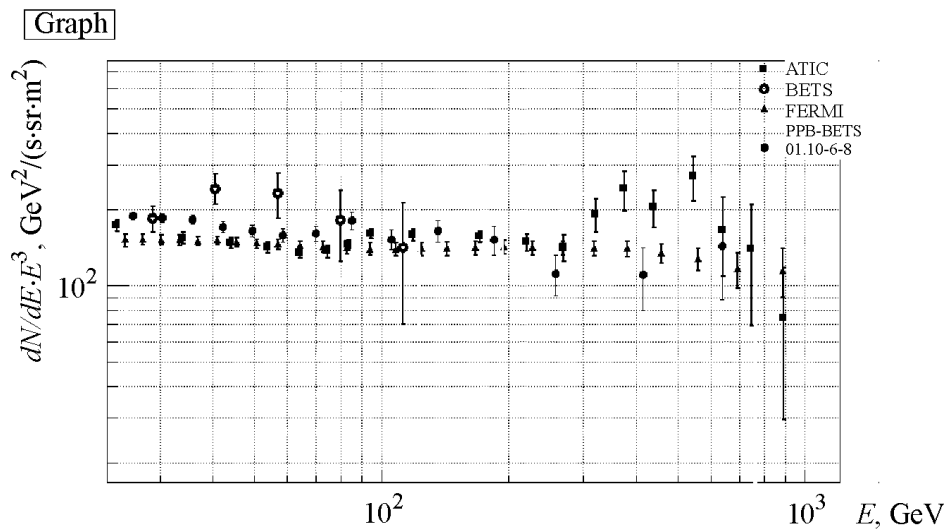


Рис. 5: Спектры, полученные в различных экспериментах.

Полученный спектр как по абсолютной величине, так и по среднему показателю во всём диапазоне (-3.15) совпадает с результатами предыдущих экспериментов (см. рис. 5 – крупные чёрные кружки – значения, полученные с помощью представленной методики, чёрные квадратики – значения электронов, измеренные в эксперименте АТИК [6], тёмно-серые полые кружки – в эксперименте БЕТС [7], светло-серые полые треугольники – в эксперименте ППБ-БЕТС [8], тёмно-серые треугольники – в эксперименте ФЕРМИ [9]).

6. Заключение. Описанный метод отбора электронов позволяет эффективно отбирать электроны высоких энергий вплоть до ~ 1 ТэВ, при этом вклад протонов составляет несколько процентов. Проведённые проверки подтвердили правильность работы методики. Получен суммарный спектр электронов и позитронов в диапазоне энергий от 24 до 800 ГэВ, который имеет степенной характер, со средним показателем -3.15 ± 0.04 , абсолютное же значение потока согласуется с результатами предыдущих экспериментов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 07-02-000922а. Выражается благодарность за помощь в проведении эксперимента НЦ ОМЗ и ЦСКБ-Прогресс.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] P. Picozza et al., *Astroparticle Physics Journal* **27**, 296 (2007).
- [2] S. Straulino, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **530**, 168 (2004).
- [3] С. В. Борисов, С. А. Воронов, А. В. Карелин, *УФН* **179**(9), 931 (2009).
- [4] A. Bruno, *Academic thesis for the degree of PHD in Physics* (Universita degli Studi di Bari, Bari, Italy, 2009).
- [5] O. Adriani et al., *Nature* **458**, 607 (2009).
- [6] J. Chang et al., *Nature* **456**, 362 (2008).
- [7] S. Torii et al., *Astroparticle Physics Journal* **559**, 973 (2001).
- [8] S. Torii et al., *Adv. Polar Upper Atmosphere Research* **20**, 52 (2006).
- [9] A. A. Abdo et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 181101 (2009).

Поступила в редакцию 6 апреля 2010 г.