

УДК 524.1

## ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРА ЭЛЕКТРОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ АТИС-2 И АТИС-4

© 2011 г. А. Д. Панов<sup>1</sup>, Дж. Х. Адамс, мл.<sup>2</sup>, Х. С. Ан<sup>3</sup>, Г. Л. Башинджагян<sup>1</sup>, Дж. В. Ватгс<sup>2</sup>,  
Дж. П. Вефель<sup>4</sup>, Дж. Ву<sup>3</sup>, Т. Г. Гузик<sup>4</sup>, В. И. Зацепин<sup>1</sup>, И. Изберг<sup>4</sup>, К. Ц. Ким<sup>3</sup>, М. Кристл<sup>2</sup>,  
Е. Н. Кузнецов<sup>1</sup>, М. И. Панасюк<sup>1</sup>, Е. Б. Постников<sup>1</sup>, Э. С. Сио<sup>3</sup>, Н. В. Сокольская<sup>1</sup>, Дж. Чанг<sup>5</sup>

*E-mail: panov@dec1.sinp.msu.ru*

Первые результаты измерений спектра электронов в баллонном эксперименте АТИС в диапазоне энергий от 20 ГэВ до 3 ТэВ [1] обнаружили существенную аномалию в виде широкого пика в диапазоне энергий 300–800 ГэВ. В настоящей работе проведена обработка экспериментальных данных, полностью независимая от предыдущей публикации, и анализ электронного спектра с использованием других критериев селекции электронов. Новый независимый анализ, в главном подтвердив результаты предыдущей работы, показал, что спектр в области аномалии распадается на несколько узких пиков. Полученный спектр электронов сравнивается со спектром из работы [1] и со спектром электронов эксперимента Fermi/LAT.

### ВВЕДЕНИЕ

АТИС (Advanced Thin Ionization Calorimeter) – это баллонный спектрометр, который был разработан для измерения энергетических спектров ядер первичных космических лучей от протонов до железа с поэлементным разделением по заряду. АТИС совершил три удачных полета вокруг Южного Полюса в 2000–2001 гг. (АТИС-1), 2002–2003 гг. (АТИС-2) и 2007–2008 гг. (АТИС-4). Полет АТИС-1 являлся тестовым, и в этой статье обсуждаться не будет. Спектрометр АТИС состоит из полностью активного ВГО-калориметра; углеродной мишени с встроенными в нее сцинтилляционными годоскопами; кремниевой матрицы, которая используется как основной детектор заряда первичной частицы. Калориметр представлен восемью слоями кристаллов ВГО в АТИС-2 и десятью такими же слоями в АТИС-4. Детали конструкции прибора и процедуры калибровки описаны в [2–4]. Было показано, что спектрометр АТИС способен измерять не только спектры ядерной компоненты космических лучей, но и суммарный спектр электронов и позитронов [5] (ниже такой спектр называется просто электронным спектром). Для выделения электронов из значительно более высокого фона протонов и других ядер используются отличия в развитии ливня в приборе для электронов и для ядер. Спектр электронов, измеренный с помощью спектрометра

АТИС таким способом, был опубликован в [1]. Наиболее заметной деталью опубликованного спектра оказалась “аномалия”, имеющая форму широкого пика в области приблизительно от 300 до 800 ГэВ. Уже в [1] была рассмотрена возможная связь этой “аномалии АТИС” как с вкладом близких источников электронов вроде пульсаров или остатков сверхновых, так и с распадом или аннигиляцией частиц темной материи с массой 600–700 ГэВ. Эти возможности вызвали чрезвычайное широкое обсуждение в литературе.

Так как результат, полученный в [1], исключительно важен, он должен быть проверен и воспроизведен на том же спектрометре АТИС альтернативными способами. Решение именно этой задачи было основной целью данной работы, которая проведена полностью независимо от предыдущих работ [5, 1] в группе НИИЯФ МГУ коллаборации АТИС, начиная с процедур низкого уровня, относящихся к калибровке прибора, и вплоть до получения конечных результатов.

### 1. ФИЛЬТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВХОДНОГО ПОТОКА ЧАСТИЦ

Для того чтобы отличить электроны от протонов во входящем в спектрометр потоке частиц, строятся специальные электронные фильтры, описывающие форму каскадной кривой в приборе в продольном и поперечном направлениях так, чтобы они принимали сильно различающиеся значения для “типичных” электронов и “типичных” протонов. В отличие от [5, 1], где был использован один фильтр, мы построили пять различных фильтров, чтобы обеспечить возможность перекрестной проверки результатов и

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

<sup>2</sup> Центр космических исследований им. Маршалла, США.

<sup>3</sup> Университет шт. Мэриленд, США.

<sup>4</sup> Университет шт. Луизиана, США.

<sup>5</sup> Обсерватория Перпл Маунтин, Китайская академия наук.

оценку их методической надежности. В различных фильтрах используются разные наборы базовых параметров для описания формы ливня и разные математические идеи для построения значений фильтра из этих параметров. Приводимые ниже результаты относятся только к одному из фильтров, который называется Chi, но подтверждаются также другими фильтрами. Базовыми параметрами для построения фильтра Chi являются относительные энерговыделения в слоях калориметра  $C_l = E_l/E$  ( $l$  – номер слоя) и величины среднеквадратичной ширины ливня в слоях  $R_l$ . Значение фильтра Chi вычисляется по формуле  $Chi = \sqrt{[\sum_{l=0}^3 ((R_l - \bar{R}_l)/\sigma_l^R)^2 + \sum_{l=4}^7 ((F_l - \bar{F}_l)/\sigma_l^F)^2]}/8$ , где  $F_l = R_l \sqrt{C_l}$ , а средние значения и дисперсии величин  $R_l$  и  $F_l$  вычислены для падающих электронов симуляцией каскадов с использованием системы FLUKA [6]. Распределение значений фильтра Chi для однозарядных частиц после специального предварительного отбора событий по энерговыделениям в слоях калориметра показано на рис. 1.

## 2. ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРА ЭЛЕКТРОНОВ

Для электронов калориметр спектрометра АТИС фактически является толстым (18 к.е. для АТИС-2 и 22 к.е. для АТИС-4), поэтому энергия электрона на входе прибора легко определяется по полному энерговыделению в калориметре. Как показали тестовые измерения на пучке электронов в ЦЕРН [7] и как подтверждает симуляция, для электронов спектрометр АТИС имеет очень высокое энергетическое разрешение. Разрешение слабо зависит от энергии, и в терминах половины ширины линии на половине высоты в области энергий 200–600 ГэВ составляет не более 3%. Высокое разрешение позволяет исследовать спектр электронов на предмет наличия в нем структуры на масштабе 0.1–0.2 декады по энергии. Существенно, что для обнаружения такой структуры нет нужды изучать “абсолютный” спектр электронов, полученный после вычитания протонного фона (см. рис. 1), и после коррекции рассеяния электронов в остаточной атмосфере. Как фон, так и рассеяние электронов в атмосфере не могут привести к появлению короткопериодической структуры в спектре электронов (это было явно показано симуляцией).

Спектры электронов без атмосферных поправок и без вычитания протонного фона в области от 30 до 900 ГэВ с шагом 0.035 декады по энергии, измеренные в экспериментах АТИС-2 и АТИС-4, приведены на рис. 2. В области энергий от 200 до 600 ГэВ легко различаются структуры, которые хорошо воспроизводятся в обоих эксперимен-

тах – АТИС-2 и АТИС-4. В области энергий ниже 200 ГэВ никакой воспроизводящейся структуры не видно, а для области более 600 ГэВ трудно сделать определенные выводы из-за недостатка статистики.

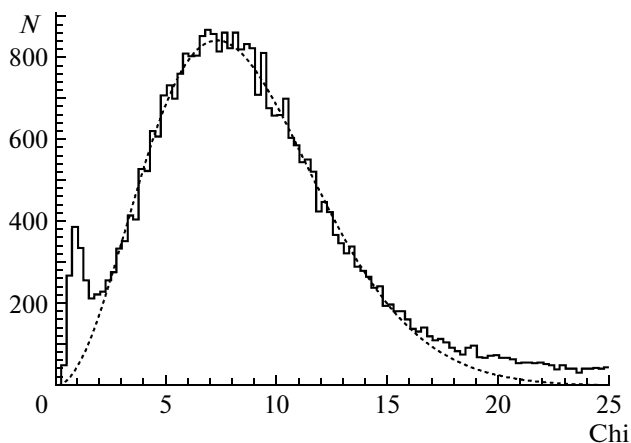
Статистическая значимость обнаруженной тонкой структуры была определена по двум различным факторам: во-первых, статистическая значимость корреляции (сходства) структуры спектров, измеренных отдельно в полетах АТИС-2 и АТИС-4; во-вторых, статистическая значимость наличия неслучайной структуры по обычному критерию  $\chi^2$  для суммарного спектра АТИС-2 + АТИС-4. Было найдено, что статистическая значимость для корреляции составляет  $(99.69^{+0.10}_{-0.07})\%$ , по критерию  $\chi^2$  –  $(99.68^{+0.07}_{-0.05})\%$ . Высокая статистическая значимость практически исключает случайный характер обнаруженной тонкой структуры.

Был проведен ряд тестов с целью исключения также и методических причин возникновения обнаруженной структуры. Изучалась статистика протонных фонов в области значений фильтра, свободной от электронного сигнала. Признаки структуры не обнаружены. Изучались различные электронные фильтры – все фильтры дают подобную структуру. Исследовались спектры электронов для разных телесных углов и разных периодов времени эксперимента. Тонкая структура воспроизводится во всех случаях. Таким образом, признаки того, что обнаруженная тонкая структура может быть вызвана методическим эффектом, не найдены.

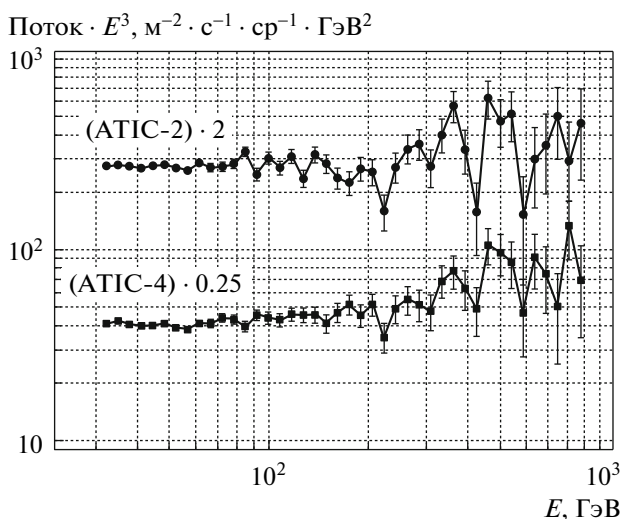
Если существование тонкой структуры подтвердится независимыми экспериментами, то ее наиболее вероятным источником будут близкие остатки сверхновых и/или пульсары, но не распад или аннигиляция частиц темной материи. Структура, аналогичная наблюдаемой, была предсказана в [8], где специально подчеркнуто, что подобная структура может быть использована как признак, по которому можно понять разницу между аннигиляцией или распадом частиц темной материи и другими источниками электронов, вроде близлежащих пульсаров. Темная материя не может быть источником структуры, представленной несколькими узкими пиками [8].

## 3. СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ ПОСЛЕ ВЫЧИТАНИЯ ПРОТОННОГО ФОНА И АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ

Спектр, приведенный на рис. 2, не дает основы для сравнения с результатами других экспериментов, так как он не дает правильной абсолютной интенсивности потока электронов. Для получения правильной абсолютной интенсивности из



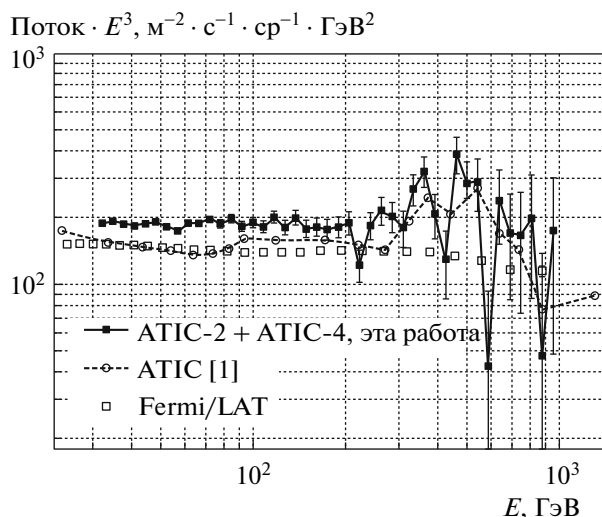
**Рис. 1.** Распределение значений фильтра Chi для одноположенных частиц (АТИС-2, диапазон энергосвечения 100–200 ГэВ). Узкий пик слева соответствует электронам, широкий пик – протонам, пунктиром показана аппроксимация протонного распределения для вычитания протонного фона (см. раздел 3).



**Рис. 2.** Спектр электронов на входе в прибор без вычитания протонного фона, измеренный в экспериментах АТИС-2 и АТИС-4.

спектра должен быть вычтен фон протонов, спектр должен быть откорректирован на рассеяние электронов в остаточной атмосфере (мы будем пренебрегать фоном вторичных атмосферных электронов от адронной компоненты космических лучей, так как он мал [9]).

В нашей предыдущей работе [10] было показано, что процедура вычитания протонного фона, основанная на симуляции протонных каскадов в приборе, приводит к неустойчивому результату: неизбежные малые ошибки в симуляции ведут к большим ошибкам в электронном сигнале. В данной работе мы реализовали методику, независи-



**Рис. 3.** Спектр электронов АТИС-2 + АТИС-4 настоящей работы после вычитания протонного фона и коррекции атмосферы, спектр АТИС работы [1] и результаты эксперимента Fermi/LAT [11]. В спектре АТИС [1] не показаны экспериментальные ошибки, чтобы упростить рисунок.

мую от симуляции. Она основана на аппроксимации протонной части экспериментального графика распределения значений электронного фильтра, которая ясно видна на экспериментальной кривой (см. рис. 1), простыми функциями и интерполяцией этих функций к началу координат через область, где чистый протонный фон не виден под электронным пиком. Масштаб возможной методической ошибки, связанной с вычитанием фона, определен сравнением результатов для разных типов функций.

Атмосферные поправки были вычислены на основе симуляции рассеяния первичных электронов в атмосфере. Как и предполагалось в нашей статье [10], в реконструированную энергию первичного электрона на входе в спектрометр не требуется вносить поправок для вычисления энергии на входе в атмосферу, так как из-за малых углов рассеяния электрон регистрируется вместе с вторичными гамма-квантами, которые несут с собой энергию, потерянную электроном. Однако эти же кванты могут исказить форму каскада в приборе, что приводит к некоторой дополнительной неэффективности при фильтрации электронов, которая была учтена.

На рис. 3 показан абсолютный спектр электронов, полученный в настоящей работе, усреднением результатов АТИС-2 и АТИС-4, вместе с результатами АТИС-2 работы [1] и результатами космического спектрометра Fermi/LAT [11]. Коридор возможных систематических ошибок для спектра АТИС настоящей работы меняется от  $+15\%$  для  $-16\%$

энергии 40 ГэВ до  $\begin{matrix} +57\% \\ -46\% \end{matrix}$  при 700 ГэВ и связан при малых энергиях в основном с неопределенностью в эффективности регистрации, а при больших энергиях — с ошибками вычитания фонов. Систематические ошибки не могут привести к существенному искажению формы спектра. Видно, что наши результаты подтверждают существование “аномалии АТЭС”, но эта аномалия имеет тонкую структуру. В области до 200 ГэВ наш спектр совпадает по форме со спектром FERMI/LAT. Различие в абсолютных интенсивностях не выходит за пределы систематических ошибок экспериментов. Вопрос о реальности тонкой структуры при энергиях выше 200 ГэВ требует дальнейшего экспериментального изучения.

Работа поддержана РФФИ, грант № 08-02-00238.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chang J. et al.* // Nature. 2008. V. 456. P. 362.
2. *Guzik T.G. et al.* // Adv. Space Res. 2004. V. 33. P. 1763.
3. *Zatsepin V.I. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 2004. V. 524. P. 195.
4. *Панов А.Д. и др.* // ПТЭ. 2008. № 4. С. 17.
5. *Chang J. et al.* // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 431.
6. *Battistoni G. et al.* // AIP Conf. Proc. 2007. V. 896. P. 31.
7. *Ganel O. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 2005. V. 552. P. 409.
8. *Malyshev D., Cholis I., Gelfand J.* // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. 063005.
9. *Nishimura J. et al.* // Ap. J. 1980. V. 238. P. 394.
10. *Panov A.D. et al.* // Proc. 31st ICRC. Lodz. 2009. <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc0356/pdf>.
11. *Abdo A.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. 181101.