

УДК 523.165

ЗАРЯДОВОЕ РАЗРЕШЕНИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ АТИК

© 2002 г. В. И. Зацепин¹, Дж. Х. Адамс, мл.², Х. С. Ан³, Г. Л. Башинджагян¹, К. Е. Батьков¹, Дж. З. Ванг³, Дж. П. Вефель⁴, А. Г. Воронин¹, Дж. Ву³, О. Ганел³, Д. Гранжер⁴, Р. Гунаскингха⁵, Т. Г. Гузик⁴, Дж. Изберт⁴, Г. Кейс⁴, Х. Дж. Ким⁷, К. Ц. Ким³, С. К. Ким⁷, М. Кристл², Е. Н. Кузнецов¹, С. А. Накви⁵, М. И. Панасюк¹, А. Д. Панов¹, Б. Прайс⁴, Г. А. Самсонов¹, Н. В. Сокольская¹, Э. С. Сио³, Р. Сина³, М. Стюарт⁴, А. Фазели⁵, И. Дж. Хан⁷, Дж. Чанг⁶, В. К. Х. Шмидт⁶

Баллонный эксперимент АТИК (ATIC – Advanced Thin Ionization Calorimeter) предназначен для измерения энергетических спектров галактических космических лучей с индивидуальным разрешением по заряду от протонов до железа в энергетическом интервале от ~50 ГэВ до ~100 ТэВ. Тестовый полет спектрометра АТИК состоялся в Антарктиде с 28.12.2000 до 13.01.2001. В течение полета было зарегистрировано около 25 миллионов событий. В работе рассматривается зарядовое разрешение, полученное в кремниевой матрице, являющейся детектором заряда в приборе АТИК.

ВВЕДЕНИЕ

Цель эксперимента АТИК – проведение новых измерений энергетического спектра галактических космических лучей (ГКЛ) с индивидуальным зарядовым разрешением от протонов до железа в широкой области энергий от ~50 ГэВ до ~100 ТэВ на частицу с помощью одного инструмента. Мотивация эксперимента АТИК изложена в [1]. Там же можно найти схему прибора. Предварительная информация о тестовом полете АТИКа приведена в [2–9].

СПЕКТРОМЕТР АТИК

Спектрометр состоит из полностью активного калориметра, построенного из 320 сцинтилляционных кристаллов германата висмута (BGO) размером $25 \times 2.5 \times 2.5$ см каждый. Кристаллы BGO образуют восемь рядов площадью 50×50 см², причем оси кристаллов лежат попеременно вдоль осей X и Y. Глубина калориметра по вертикали составляет 22 к.е. Над калориметром имеется мишенный блок, состоящий из трех слоев графита толщиной по 10 см. Толщина мишени составляет 3/4 пробега взаимодействия для протона. В приборе имеются три годоскопа, построенные из 202 брусков пластических сцинтилляторов толщиной 1 см и шириной 2 см. Каждый годоскоп состоит из двух взаимно перпендикулярных слоев брусков.

Годоскопы расположены над, под и внутри графитовой мишени и служат для образования триггеров для разных событий, а также для уточнения траекторий частиц, восстанавливаемых по стволам ливней в калориметре. Самым верхним детектором в приборе является детектор заряда – кремниевая матрица, построенная из 4480 независимых кремниевых ячеек размером 1.5×2 см. Конструкция матрицы и свойства кремниевых детекторов описаны в [10].

БАЛЛОННЫЙ ПОЛЕТ

АТИК был запущен в стратосферу 28 декабря 2000 г. и приземлился 13 января 2001 г., совершив полный оборот вокруг Южного полюса на высоте 37 ± 1.5 км. Объем собранной информации составил 43.5 Гбайт. Все данные были записаны на жесткий диск емкостью 50 Гбайт. Записанная информация содержала 26.1 миллионов триггеров от космических лучей, а также данные калибровки детекторов в полете и служебную информацию.

ОБРАБОТКА ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ

Система обработки данных АТИКа базируется на системе ROOT, разработанной в ЦЕРНе для анализа экспериментов в физике высоких энергий. В результате первичной обработки был создан и распространен между членами коллаборации набор файлов в формате ROOT, содержащих как первичную информацию, так и первый уровень обработки, в котором из сигналов были вычтены пьедесталы и была проведена мюонная калибровка по данным, полученным перед полетом. Для всех 4480 каналов кремниевой матрицы пьедесталы в полете измерялись каждые 6 мин, и эти величины вычитались при обработке.

¹ Институт ядерной физики им. Д.В.Скобелъцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

² Центр космических исследований Маршалла, НАСА, США.

³ Университет штата Мэриленд, США.

⁴ Университет штата Луизиана, США.

⁵ Южный университет, США.

⁶ Институт Макса Планка, Линдау, Германия.

⁷ Сеульский национальный университет, Южная Корея.

РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ В СПЕКТРОМЕТРЕ

На первом шаге траектория реконструируется по сигналам в ВГО-калориметре. Траектория описывается двумя проекциями в плоскостях XZ и YZ . Обе проекции реконструируются независимо с использованием Y -ориентированных и X -ориентированных рядов калориметра соответственно. Вычисляется энерговыделение в каждом ряду E_i , и если $E_i < 2\text{MIP}$ (MIP – минимально ионизирующая частица), то событие не рассматривается. В каждом ряду находится кристалл с максимальным энерговыделением, и если такой кристалл является крайним в ряду, то такое событие считается боковым и отбрасывается. Затем находится “симметризованный” весовой центр энерговыделения в ряду, т.е. в обе стороны от центрального кристалла рас-

сматривается число кристаллов не больше, чем до края ряда. Определяется также дисперсия координаты центра энерговыделения в каждом слое и вычисляется траектория и ее χ^2 . Затем ВГО-траектория продолжается до пересечения с плоскостью кремниевой матрицы и очерчивается область поиска первичной частицы размером $\pm 3\sigma$. Внутри области поиска для каждой ячейки кремниевой матрицы, содержащей отличный от нуля сигнал, проводится траектория через центр этой ячейки и весовые энергетические центры в калориметре, и для каждой траектории проверяется наличие сигналов в брусках сцинтилляторов, лежащих на этой траектории, во всех шести рядах. Отбор таких подтвержденных годоскопами траекторий позволяет подавить шумовые сигналы в кремниевой матрице. Наконец, выбирается подтвержденная траектория, содержащая максимальный сигнал в области поиска, и заряд первичной частицы определяется по формуле $Z = \sqrt{A \cos \theta}$, где A – сигнал в ячейке в MIP, а θ – зенитный угол траектории. Для каждого реконструированного события суммированием энерговыделений во всех кристаллах всех рядов калориметра вычисляется энерговыделение в калориметре E_d .

ПОЛЕТНАЯ КАЛИБРОВКА КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Чтобы улучшить мюонную предполетную калибровку кремниевых детекторов, было использовано полетное положение пика от ядер гелия в каждой ячейке матрицы. В качестве меры этого положения использовалось среднее значение сигналов в области от 2 до 8 MIP для всей статистики, полученной за время полета. Это среднее значение было нормировано к расчетному значению. Зарядовое разрешение после этой “гелиевой” калибровки стало значительно лучше, чем до нее.

ЗАРЯДОВОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Измерение заряда в экспериментах, где частица высокой энергии взаимодействует в приборе, осложнено обратным током из калориметра и мишени. Проблема состоит в том, что обратный ток в детектор заряда искажает сигнал, созданный первичной частицей. В эксперименте АТИК эта проблема решается высокой сегментацией детектора заряда: ячейка кремниевой матрицы имеет размер 1.5×2 см. Изучение обратного тока в кремниевую матрицу показало, что частота появления альбедного сигнала экспоненциально спадает с ростом его амплитуды. Наиболее часто появляются сигналы с амплитудой ~ 1 MIP. Сигналы с амплитудой > 2 MIP, которые, сложившись с сигналом от протона, могут быть идентифицированы как ядро гелия или более тяжелое ядро, встречаются во всей матрице с частотой < 3 на событие при $E_d > 1$ ТэВ, причем

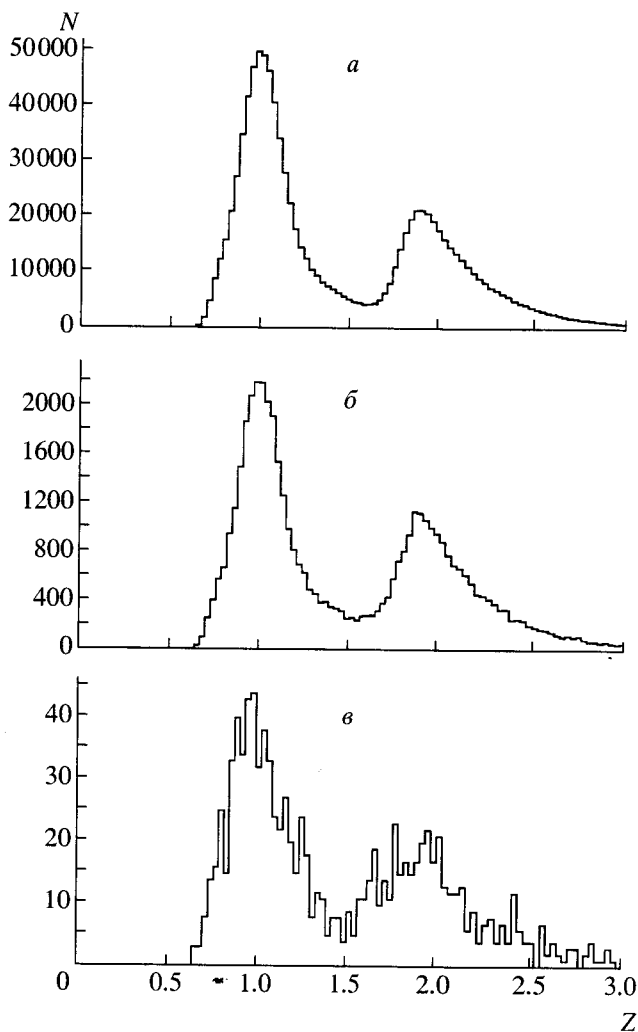


Рис. 1. Зарядовое разрешение для протонов и гелия для трех диапазонов энергий. *a* – $E_d > 15$ ТэВ, *б* – $E_d > 100$ ТэВ, *в* – $E_d > 1000$ ТэВ (в среднем энерговыделение E_d для протонов и гелия составляет $\sim 40\%$ от их первичной энергии).

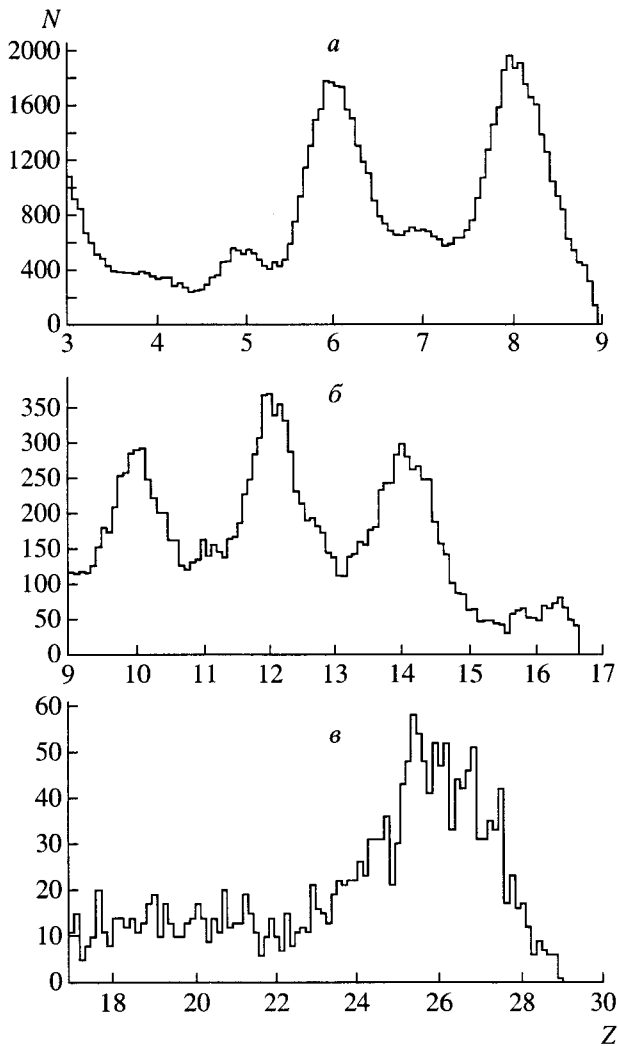


Рис. 2. Зарядовое разрешение для трех диапазонов зарядов ядер Z .

пространственное распределение этих сигналов очень широкое. Так как матрица состоит из 4480 ячеек, вероятность попадания альбедной частицы в ячейку с первичной частицей мала ($<0.1\%$). Основная проблема при реконструкции события состоит в правильном нахождении ячейки с первичной частицей. Вероятность попадания альбедной частицы с сигналом $>3 \text{ MIP}$, которая может быть

принята за ядро гелия или более тяжелое ядро, в круг поиска составляет $<2\%$ для $E_d > 1 \text{ ТэВ}$.

Полученное зарядовое разрешение для протонов и гелия для трех диапазонов энерговыделений ($>15 \text{ ГэВ}$, $>100 \text{ ГэВ}$ и $>1000 \text{ ГэВ}$) приведено на рис. 1. Видно, что протоны и гелий разрешаются хорошо. Для более тяжелых ядер обратный ток в АТИКе уже не может испортить зарядовое разрешение. Зарядовые разрешения для $Z > 3$ приведены на рис. 2. Эти распределения приведены для энергий, при которых ядра являются релятивистскими. Хорошо видны пики от четных ядер. Однако менее обильные нечетные ядра не разрешены. Достигнутое разрешение пока хуже ожидавшегося. Дальнейший прогресс может быть связан с учетом нелинейностей в электронных каналах кремниевой матрицы и с учетом изменения их характеристик в течение полета. Эти изменения контролировались в полете калибровочными измерениями, проводимыми каждый час, но введение соответствующих поправок еще не выполнено.

С Российской стороны работа поддержана РФФИ (грант № 02-02-16545), в США – грантами НАСА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зацепин В.И., Адамс Дж.Х., мл., Ан Х.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65. № 3. С. 426.
2. Wefel J.P. for the ATIC collaboration // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. V. 6. P. 2111.
3. Seo E.S. for the ATIC collaboration // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. V. 5. P. 1601.
4. Zatsepin V.I. for the ATIC collaboration // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. V. 5. P. 1605.
5. Fazely A.R., Gunasingha R. for the ATIC collaboration // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. V. 5. P. 1595.
6. Adams J.H., Jr., for the ATIC collaboration // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. V. 5. P. 1599.
7. Ahn H.S. for the ATIC collaboration // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. V. 6. P. 2119.
8. Isbert J. for the ATIC collaboration // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. V. 6. P. 2123.
9. Adams J.H., Jr., for the ATIC collaboration // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. V. 6. P. 2127.
10. Адамс Дж.Х., мл., Башинджагян Г.Л., Зацепин В.И. и др. // ПТЭ. 2001. № 4. С. 38.