

Прямые измерения энергетических спектров и элементного состава галактических космических лучей

В. И. Зацепин^a, М. И. Панасюк, А. Д. Панов, Н. В. Сокольская

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^aviza@dec1.sinp.msu.ru*

Статья поступила 23.06.2012, подписана в печать 14.07.2012.

Приведены описание и основные результаты эксперимента АТИС (Advanced Thin Ionization Calorimeter). Эксперимент АТИС явился важной ступенью в изучении галактических космических лучей прямыми методами. Такие исследования были начаты на спутниках ПРОТОН в 1960-е гг. Рассматривается вклад эксперимента АТИС в понимание происхождения и распространения галактических космических лучей.

Ключевые слова: галактические космические лучи, энергетические спектры, элементный состав.

УДК: 523.165. PACS: 95.55.Vj, 95.85.Ry.

Введение

Исследования галактических космических лучей (ГКЛ) прямыми методами являются приоритетной проблемой в НИИЯФ МГУ. Основы этого направления были заложены Д. В. Скобельцыным и С. Н. Верновым. В течение многих десятилетий, начиная с первых полетов спутников в конце 50-х гг. прошлого века, руководителем этих исследований был Н. Л. Григоров. В 60–70-е годы прошлого столетия руководимой им командой были созданы и проэкспонированы на околоземных орбитах приборы серии ПРОТОН [1]. Главным элементом этих приборов было устройство для измерения энергии, названное калориметром [2].

Калориметры ПРОТОНов содержали сцинтилляторы и несколько ядерных пробегов пассивного вещества (железа) для поглощения развивающейся в этом поглотителе лавины частиц. Для измерения заряда частиц также использовались сцинтилляторы. С помощью спектрометра ПРОТОН–4 удалось измерить спектр всех частиц ГКЛ в рекордно широком интервале энергий от 10^{11} до $2 \cdot 10^{15}$ эВ [3]. Эти измерения до сих пор остаются непревзойденным экспериментальным результатом для прямых методов. Разделение частиц по заряду оказалось, однако, более сложной задачей, так как в то время не было известно такое явление, как обратный ток частиц из калориметра. Обратный ток — это частицы, движущиеся в направлении, обратном движению первичной частицы. Эти частицы создавали дополнительный сигнал во входном сцинтилляторе, предназначенном для измерения заряда. Искажая сигнал от первичной частицы, они создавали у экспериментатора неправильное представление о ее заряде.

После того как было осознано влияние частиц обратного тока на измерение заряда первичной частицы, Н. Л. Григоров и др. осуществили новый эксперимент — СОКОЛ [4], в котором для измерения заряда был сконструирован новый детектор — направленный черенковский счетчик. Этот детектор представлял собой пластмассовый диск с окрашенной поглощающей свет верхней поверхностью. Входящая первичная частица создавала в этом детекторе черенковский свет, кото-

рый регистрировался фотоумножителем. Обратный ток создавал свет, который поглощался верхней поверхностью детектора, так как шел снизу вверх и таким образом не искажал сигнала от первичной частицы. Этот прибор дважды экспонировался в космическом пространстве [5]. Проблемы с калибровкой создали некоторую трудность при интерпретации результатов первого полета. Эти проблемы были преодолены во втором полете, в котором были получены важные результаты по спектрам и элементному составу ГКЛ, но статистика была еще недостаточна для выявления важных особенностей энергетических спектров, которые были обнаружены в дальнейших исследованиях.

Еще одним проектом, выполненным в НИИЯФ МГУ в эти годы, был баллонный эмульсионный эксперимент MUBEE (Moscow University Balloon Emulsion Experiment). Это был эксперимент, предназначенный для измерения энергетических спектров и элементного состава ГКЛ в области энергий выше 1 ТэВ. Прибор (эмульсионная камера) представлял собой стопку ядерных эмульсий и рентгеновских пленок, переслоенных пассивным материалом (свинец). Ядерные эмульсии предназначались для измерения заряда, а рентгеновские пленки — для измерения энергии первичной космической частицы по методу, разработанному незадолго до этого для наземных экспериментов [6]. Камера была размером 1×0.5 м и толщиной 20 каскадных единиц свинца. Она могла регистрировать частицы, входящие в нее, в большом диапазоне зенитных углов. Такой прибор характеризовался большой светосилой (~ 0.5 м²·стер). Камера многократно экспонировалась на баллонах в стратосфере на остаточной глубине 8–11 г/см². В течение 1975–1987 гг. было выполнено 10 стратосферных полетов с общей экспозицией 532 м²·ч·стер. Измеренный спектр протонов при энергиях выше 10 ТэВ имел значение показателя существенно выше, чем при более низких энергиях ($\gamma = 3.14 \pm 0.08$). Были измерены и спектры более тяжелых ядер, но статистика была мала [7].

Через несколько лет после MUBEE аналогичный эксперимент был начат японо-американской коллабо-

рацией JACEE (1979–1994) [8]. Полная экспозиция в серии из 12 стратосферных полетов, проходивших на глубине 3–5 г/см², составила 644 м²·ч·стер. В этом эксперименте впервые было получено указание на различие спектральных индексов протонов и ядер гелия. Было также получено указание на укрупнение спектра протонов после 70 ТэВ ($\gamma = 3.19 \pm 0.28$), но статистика была мала [9].

В 1995–1999 гг. еще один эмульсионный эксперимент был выполнен российско-японской коллаборацией RUNJOB [10]. В серии из 10 стратосферных полетов на глубине 9–11 г/см² была достигнута общая экспозиция 575 м²·ч. Были измерены спектры протонов и других ядер, но в этой работе был сделан вывод об одинаковом показателе спектров для протонов и гелия. Однако статистика снова была мала [11].

Основным недостатком эмульсионных экспериментов помимо большой трудоемкости при обработке экспериментальных данных было недостаточное зарядовое и энергетическое разрешение. Кроме того, эти эксперименты имели высокий энергетический порог (~ 1 –2 ТэВ) для измерения энергии электромагнитного каскада. Это обстоятельство не позволило пролить свет на ситуацию с энергетическим спектром протонов в области энергий ~ 1 ТэВ. Дело в том, что основным утверждением, сделанным из экспериментов серии ПРОТОН, было утверждение о том, что спектр протонов в области энергий > 0.5 ТэВ становится более крутым, чем в области меньших энергий [12]. Вскоре, однако, появилась работа [13], в которой утверждалось, что этот эффект мог быть обусловлен неучтенным влиянием обратного тока. Таким образом, вопрос об укрупнении протонного спектра и отличие его от спектров других ядер при ТэВных энергиях не был решен. В связи с этим по предложению С. Н. Вернова Н. Л. Григоровым был разработан тонкий ионизационный калориметр (ТИК). Ожидалось, что простой эксперимент, надежно и с большой статистической точностью измеряющий энерговыделение в калориметре, мог бы без измерения заряда дать ответ на вопрос, происходит ли что-то с энергетическим спектром протонов или нет. Так как протоны в этой области энергий составляют подавляющее большинство частиц, то при наличии излома в спектре протонов в спектре всех частиц должна наблюдаться ступенька [14].

Такой эксперимент был выполнен в 1993–1995 гг. сотрудниками НИИЯФ МГУ совместно с американскими учеными [15]. Результат оказался противоположным тому, который ожидался. Вместо ожидавшегося укрупнения, а затем уположения (ступеньки) в спектре всех частиц в области энергий порядка нескольких сотен ГэВ спектр становился более пологим выше 1 ТэВ. Этот эксперимент фактически показал, что никакого укрупнения спектра протонов в этой области энергий нет. Однако и этот результат не был достаточно убедительным. Требовался более прямой и более надежный эксперимент. Таким экспериментом стал международный эксперимент АТИС (advanced thin ionization calorimeter) [16].

1. Эксперимент АТИС

Основная задача эксперимента АТИС состояла в том, чтобы измерить методически надежные и статистически

обеспеченные спектры обильных ядер от протонов до железа, выполнить измерения на максимально больших высотах в стратосфере, экспонировать прибор как можно дольше (15–30 дней), чтобы получить максимально возможную статистику.

Для выполнения этих требований был разработан прибор, принципиальная схема которого показана на рис. 1. Прибор состоит из трех блоков: блока для измерения заряда, блока для измерения энергии и мишенного блока. Использование для измерения заряда направленных черенковских счетчиков, разработанных незадолго до этого для эксперимента СОКОЛ [4], привело бы к нежелательному росту продольного размера прибора и, следовательно, к уменьшению статистики для заданного времени экспозиции. По этой причине для эксперимента АТИС нами был разработан принципиально новый детектор заряда — кремниевая матрица [17], которая при достаточно хорошем разрешении имела малый продольный размер. Кремниевая матрица состоит из большого числа независимо работающих кремниевых ячеек (пикселей), фактически представляющих собой очень тонкий (толщиной 380 мкм) плоский конденсатор, на который подается напряжение ~ 100 В. Входящая в конденсатор (пиксель) частица создает в нем ионизацию, пропорциональную квадрату ее заряда.

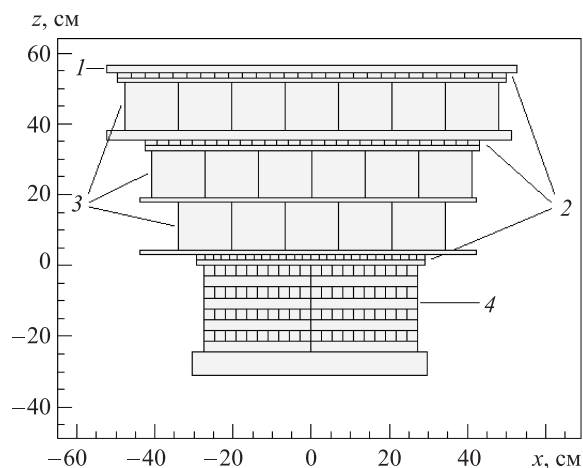


Рис. 1. Схема прибора АТИС: 1 — кремниевая матрица, 2 — сцинтилляционные детекторы, 3 — графитовая мишень, 4 — ВГО-калориметр

Для работы в условиях большого обратного тока из калориметра пиксель должен иметь небольшие размеры, чтобы иметь необходимое пространственное разрешение для определения места входа первичной частицы в спектрометр. Кремниевая матрица размером 0.95 × 1.05 м, построенная для работы в качестве детектора заряда в эксперименте АТИС, состояла из 4480 пикселей размером 1.5 × 2 см каждый, смонтированных на печатных платах. Сигналы с пикселей считывались 16-битовыми амплитудно-цифровыми преобразователями (АЦП). Кремниевая матрица являлась входным детектором спектрометра АТИС (рис. 1). Для измерения энергии был использован калориметр.

Отличительной особенностью калориметра, построенного для спектрометра АТИС, было использование

в качестве поглотителя активных сцинтилляторов из ВГО-кристаллов. Кристаллы имели форму брусков размером $2.5 \times 2.5 \times 25$ см. В спектрометре их было 320. Они были уложены в 8 слоев (в АТИС-3 и АТИС-4 было 10 слоев) по 40 кристаллов в каждом попеременно во взаимоперпендикулярных направлениях. Каждый кристалл просматривался одним фотоумножителем Hamamatsu R5611 и имел на противоположном конце отражающую зеркальную поверхность. Три диапазона усиления позволяли перекрыть необходимый интервал амплитуд (всего в калориметре было 960 каналов усиления). ВГО-кристаллы содержали в своем составе тяжелые элементы. Плотность ВГО-кристалла составляла 7.1 г/см^3 . Калориметр был тонким (порядка одного ядерного пробега) для поглощения энергии всего ядерного каскада, но толстым для поглощения энергии электромагнитного каскада, возникающего в первом ядерном взаимодействии первичной частицы в мишенном блоке спектрометра (~ 20 каскадных единиц). Полная энергия первичной частицы рассчитывалась из измеренной энергии электромагнитного каскада. Из моделирования находилась доля этой энергии от полной энергии первичного ядра. Для того чтобы как можно больше ядер провзаимодействовало до входа в калориметр, необходима мишень из легкого вещества, так как пробег до взаимодействия ядра в такой мишени меньше на единицу веса, что существенно для баллонных и спутниковых экспериментов, так как позволяет снизить вес поднимаемого спектрометра. В спектрометре АТИС мишень состояла из трех графитовых блоков, как показано на рис. 1. Под каждым блоком графита располагались бруски сцинтилляторов Bicron BC-408, каждый сечением 2×1 см, уложенных в два ряда под каждым графитовым блоком во взаимоперпендикулярных направлениях. Первые два ряда содержали 84, третий и четвертый ряды — 70, пятый и шестой — 48 брусков. Каждый брусок просматривался с двух сторон ФЭУ Hamamatsu R5611 и имел два диапазона усиления. Всего в этом блоке было 808 электронных каналов. Спектрометр АТИС три раза успешно экспонировался в баллонных полетах в Антарктиде на высоте около 37 км (АТИС-1, АТИС-2, АТИС-4). Первый полет был техническим и мы не будем его здесь рассматривать, полет АТИС-3 был неудачным: при взлете разорвалась оболочка аэростата. Наиболее надежные результаты по спектрам протонов и других ядер были получены в полете АТИС-2, выполненном в период с 29.12.02 по 18.01.03 с американской антарктической научной станции Мак-Мердо. В течение 20 сут спектрометр находился в стратосфере на высоте 36.5 ± 1.5 км. За это время было зарегистрировано несколько сотен тысяч частиц с энергией больше нескольких десятков ГэВ, прошедших через апертуру прибора.

Обработка включает следующие этапы: калибровку электронных каналов, определение заряда и энергосыделения в калориметре, построение спектра энергосыделений, переход от спектра энергосыделений к энергетическому спектру частиц данного сорта. Калибровка, т. е. переход от электрических сигналов к физическим величинам (заряд, энергосыделение), была выполнена с помощью мюонов космических лучей. Спектры сигналов, создаваемых мюонами, регистрировались в течение

нескольких дней перед стартом. Трудности, возникшие после обработки калибровочных спектров, выявили неожиданно сильную температурную зависимость электрических сигналов [18]. Установившаяся температура в полете отличалась на несколько градусов от наземной температуры, при которой были собраны калибровочные спектры. Последовавшая после этого полета проверка температурной зависимости спектрометра в тепловой камере подтвердила эту характеристику. Результаты были получены после введения соответствующей поправки.

Для определения точки входа первичной частицы в кремниевую матрицу мы поступали следующим образом. В каждом слое калориметра определялся симметризованный (относительно максимального в этом слое сигнала) центр тяжести выделенной энергии. В спектрометре было 8 слоев, что давало по четыре значения для каждой X - и Y -проекции траектории частицы. По этим данным находилась точка входа первичной частицы в кремниевую матрицу. Так как координаты траектории находились с неизбежными экспериментальными ошибками, то с ошибками определялось и место входа первичной частицы. Мы считали, что ячейка, содержащая максимальный сигнал на выделенной площадке, и была той ячейкой, через которую прошла первичная частица. Для того чтобы не пропустить ячейку, через которую прошла первичная частица, величина площадки выбиралась равной $\pm 4\sigma_x$, $\pm 4\sigma_y$, где σ_x и σ_y — абсолютные ошибки в измерении координат X и Y [19].

Рис. 2 иллюстрирует зарядовое разрешение, достигнутое с помощью кремниевой матрицы и верхнего ряда сцинтилляторов в диапазоне зарядов от протонов до железа.

Калибровка переводит электрические сигналы, выделенные в сцинтилляторах калориметра, в физические величины (в энергию, выделенную в сцинтилляторе). Полная энергия, выделенная в приборе частицей определенного заряда, определялась как сумма энергий во всех сцинтилляторах калориметра. Такие спектры обычно называются спектрами энергосыделений. Однако физический интерес представляют спектры по полной кинетической энергии космических частиц вне прибора. Для перехода от измеренного спектра энергосыделений к энергетическому спектру частиц мы использовали два метода — дифференциального сдвига и деконволюции. В первом методе энергия первичной частицы E_0 определяется по формуле $E_0 = E_d k(E_d)$, где E_d — энергосыделение в приборе, а $k(E_d)$ определялась путем моделирования по программе FLUKA [20]. Таким способом были получены спектры для ядер с зарядом $Z > 2$. Во втором методе связь между спектром первичных энергий и спектром энергосыделений находится путем численного решения обратной задачи (деконволюция) по методу Тихонова [21]. Энергетические спектры протонов и гелия были получены с большой статистикой, что позволило решить для них обратную задачу. Это было важно, так как энергетические спектры оказались не чисто степенными.

В эксперименте АТИС оказалось возможным выделить электроны, входящие в прибор. Это было сделано с помощью анализа продольного и поперечного раз-

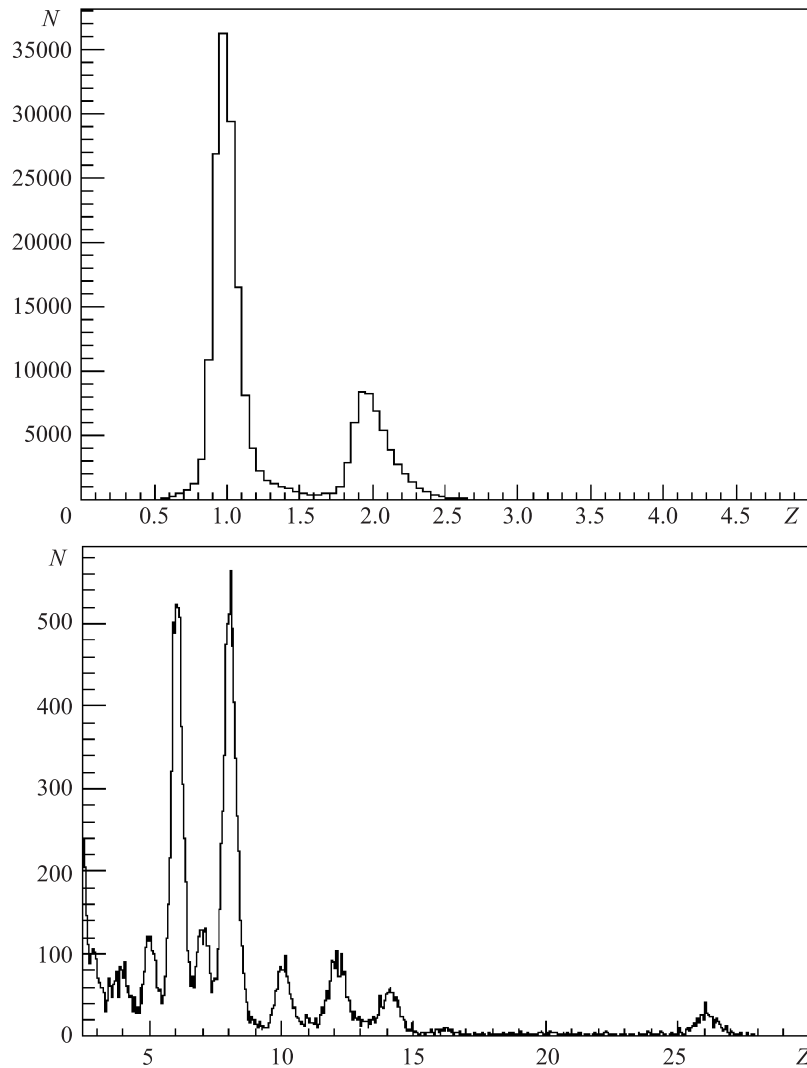


Рис. 2. Зарядовое разрешение различных групп ядер в эксперименте АТІС

вития каскада. Для электронов калориметр является толстым, т. е. почти вся энергия электрона выделяется в калориметре. Следствием этого является очень хорошее энергетическое разрешение прибора АТІС для электронов.

2. Результаты

В эксперименте АТІС были получены новые важные результаты как по спектрам протонов, гелия и более тяжелых ядер галактических космических лучей [22], так и по спектрам галактических электронов [23, 24]. Здесь мы обсудим только результаты, касающиеся спектров протонов и гелия. Мы не считаем другие результаты менее важными. Например, оказалось, что измеренный спектр электронов имеет избыток в области энергий 300–800 ГэВ, необъяснимый в рамках существующих представлений о происхождении первичных электронов. Этот результат вызвал необычную активность в научном сообществе и большое количество публикаций. Мы обсудим спектры протонов и гелия, так как эти исследования в НИИЯФ МГУ были в центре внимания в течение не одного десятилетия. Спектры протонов и гелия, полученные в эксперименте АТІС, показаны на рис. 3. Следует обратить внимание на три

важные черты этих спектров. Во-первых, видно, что в области энергий около 1 ТэВ в спектре протонов нет особенности, о которой много лет шли горячие споры. Во-вторых, уже невооруженным глазом видно, что спектры протонов и гелия имеют разную форму. Различие в средних значениях спектральных индексов равно $\delta\gamma = 0.104 \pm 0.0085$ [21]. Различие формы спектров протонов и гелия позже было надежно подтверждено в экспериментах PAMELA [25] и CREAM [26]. Третья особенность состоит в том, что протонный спектр не является чисто степенным. Он имеет уположение области энергий около 250 ГэВ и укрупнение при энергии выше 10 ТэВ. Уположение спектра протонов подтверждено в эксперименте PAMELA с большой статистической точностью. Укрупнение спектра протонов еще не подтверждено в методически надежном и статистически обеспеченном эксперименте, выполненном в области энергий 10–100 ТэВ. Однако после появления надежных данных для области энергий до 10 ТэВ стало очевидным, что интенсивность и наклоны спектров протонов, измеренные с помощью эмульсионных камер, несовместимы с экстраполяцией спектра с наклоном, измеренным в эксперименте АТІС.

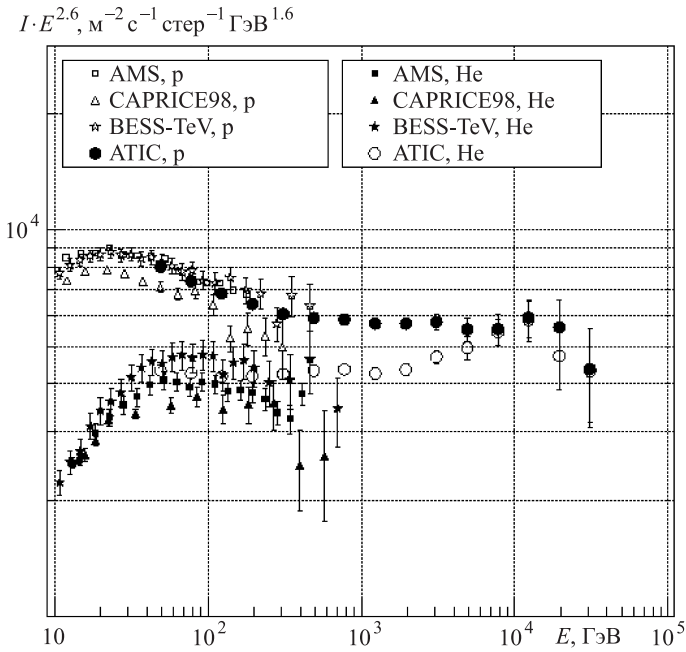


Рис. 3. Энергетические спектры протонов и гелия, известные ранее из измерений магнитными спектрометрами, и спектры, измеренные в эксперименте АТИС. Ссылки на данные в работе [22]

Измеренные в эксперименте АТИС спектры обильных ядер ГКЛ приведены на рис. 4.

3. Обсуждение спектров протонов и ядер гелия

В качестве источников космических лучей в Галактике в настоящее время рассматриваются ударные волны в остатках сверхновых. В стандартной модели считается, что спектры всех компонент должны быть степенными по импульсу с одинаковыми спектральными индексами без существенных особенностей вплоть до колена в ШАЛ. Усилия теоретиков направлены в основном на поиск параметров, при которых эти

волны могут ускорять частицы до возможно больших жесткостей. Особенности спектров при небольших энергиях до последнего времени никого не волновали. По этой причине сами экспериментаторы пытались понять, что же означают их измерения. Одной из таких попыток была феноменологическая модель [27]. В этой модели была сделана попытка понять энергетические спектры ГКЛ как результат суперпозиции спектров от трех классов источников, ускоряющих частицы до разных максимальных жесткостей и имеющих разные спектральные индексы в источниках. Значения максимальных жесткостей для трех классов источников в этой модели были $2 \cdot 10^{11}$, $5 \cdot 10^{13}$ и $3 \cdot 10^{15}$ В. Эта модель хорошо описывала спектры протонов, гелия и других ядер, измеренные прямыми методами. В области более высоких энергий, где прямые методы уже не работают, модель хорошо описывает спектр всех частиц и значение $\text{Ln}(A)$, измеренные в широких атмосферных ливнях.

Между тем современные экспериментальные данные по анизотропии космических лучей свидетельствуют о неожиданной особенности, существующей в области ТэВных энергий (рост амплитуды дипольной анизотропии с ростом энергии до ~ 10 ТэВ и дальнейшее уменьшение этой величины вплоть до нескольких сотен ТэВ). Опираясь на эти данные, мы предположили, что особенности в спектрах космических лучей и ТэВная анизотропия обусловлены одной причиной. Этой причиной, по нашему мнению, может являться влияние близкого к Солнечной системе локального источника. В работе [28] мы объяснили как особенности протонного спектра в ТэВной области энергий, а именно уположение в области ~ 250 ГэВ и последующее укрупнение в области > 10 ТэВ (рис. 5), так и анизотропию, наблюдаемую в этой области энергий. Такое объяснение не требует принадлежности предполагаемого источника к какому-нибудь особому

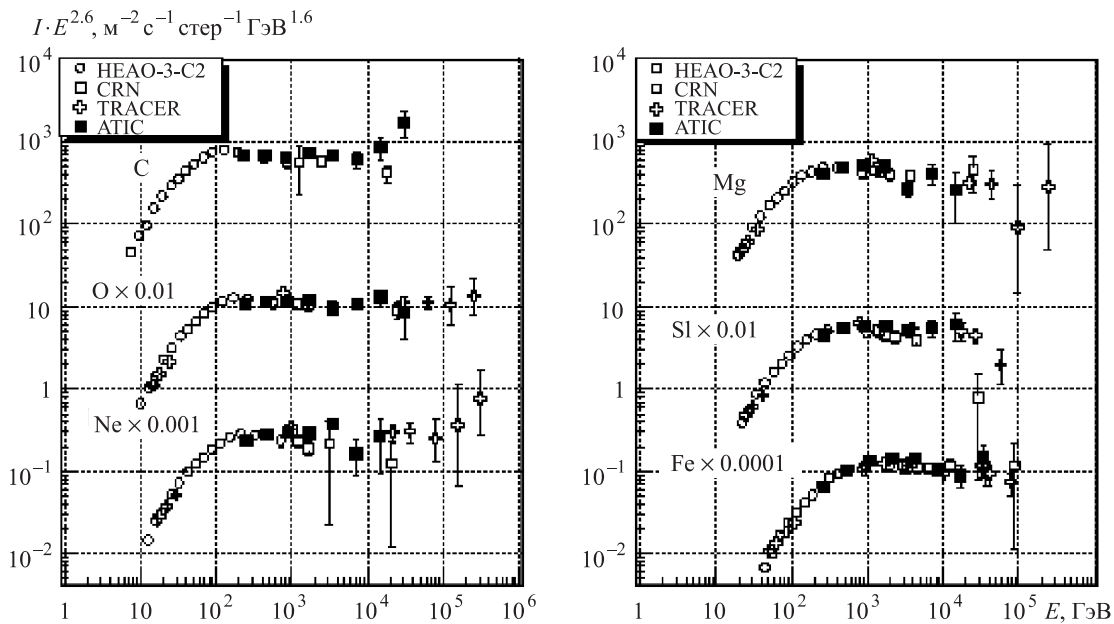


Рис. 4. Энергетические спектры обильных ядер. Ссылки на данные в работе [22]

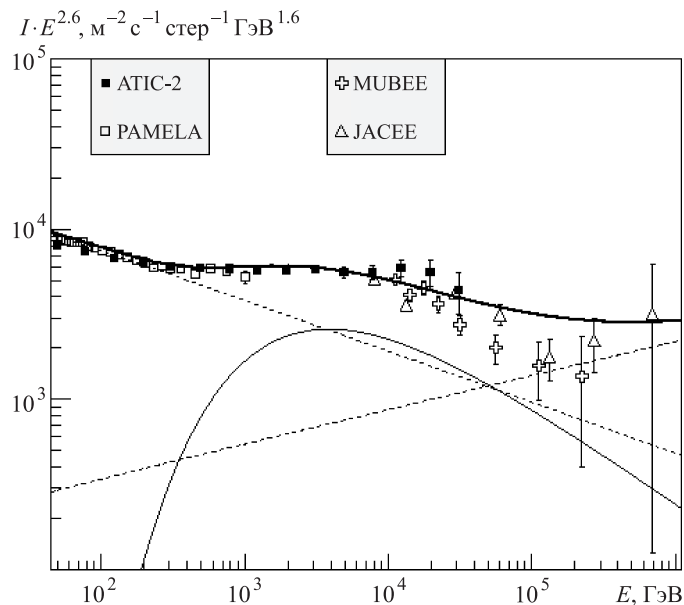


Рис. 5. Описание спектра протонов в модели с близким источником. Экспериментальные данные: ATIC-2 [22], PAMELA [25], MUBEE [7], JACEE [8]. Энергетический спектр близкого источника изображен тонкой линией на фоне двух степенных спектров (пунктиры) с разными показателями [28]

классу. Он может быть обычной сверхновой, параметры которой соответствуют существующим представлениям [29]. Надеемся, что и другие особенности, обнаруженные в прямых измерениях других ядер, будут объяснены влиянием этого близкого источника.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-02-00275).

Список литературы

1. Григоров Н.Л., Кахидзе Г.П., Рапопорт И.Д. и др. // Косм. иссл. 1967. № 5. С. 395.
2. Григоров Н.Л., Мурзин В.С., Рапопорт И.Д. // ЖЭТФ. 1958. **34**. С. 506.
3. Grigorov N.L., Rapoport I.D., Savenko I.A., Nesterov V.E. // Space Res. 1971. **XI**. P. 1391.
4. Григоров Н.Л., Вернов С.Н., Вакулов П.В. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. **49**. С. 1399.

5. Григоров Н.Л. // Ядерная физика. 1990. **51**. С. 157.
6. Аминева Т.П., Астафьев В.А., Варковицкая А.Я. и др. // Исследование мюонов сверхвысоких энергий. М., 1975.
7. Зацепин В.И., Лазарева Т.В., Сажина Г.П., Сокольская Н.В. // Ядерная физика. 1994. **57**, № 4. С. 684.
8. Burnett T.H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1983. **51**. P. 1010.
9. Asakimori K., Burnett T.H., Cherry M.L. et al. // Proc. 23rd ICRC (Calgary). V. 9. P. 21, 25.
10. Aranasenko A.V., Sukhadolskaya V.A., Derbina V.A. et al. // Astropart. Phys. 2001. **16**. P. 13.
11. Derbina V.A., Galkin V.I., Hareyama M. et al. // Ap. J. 2005. **628**. L41.
12. Grigorov N.L. et al. // Proc. 12th ICRC. Hobart, 1971. V. 5. P. 1746.
13. Ellsworth R.W., Ito A., Macfjall J. et al. // Astrophys. and Space Sci. 1977. **52**. P. 415.
14. Григоров Н.Л. // Косм. иссл. 1995. **33**, № 4. С. 339.
15. Адамс Дж., Ли Дж., Зацепин В.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 1997. **61**. С. 1181.
16. Guzik G., Adams J., Bashindzagian G.L. et al. // Proc. SPIE. 1996. V. 2806. P. 122; Guzik T.G. et al. // Adv. Space Res. 2004. **33**. P. 1763.
17. Адамс Дж., Башинджагян Г.Л., Зацепин В.И. и др. // ПТЭ. 2001. № 4. С. 38.
18. Панов А.Д., Зацепин В.И., Сокольская Н.В. и др. // ПТЭ. 2008. № 4. С. 1.
19. Zatsepin V.I., Adams J.H., Ahn H.S. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. **524**. P. 195.
20. Batkov K.E., Panov A.D., Adams J.H. et al. // Proc. 29th ICRC. Pune, 2005. **3**. P. 353.
21. Панов А.Д., Адамс Дж., Ан Х.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. **71**, № 4. С. 512.
22. Панов А.Д., Адамс Дж., Ан Х.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. **73**, № 5. С. 602.
23. Chang J., Adams J.H., Ahn H.S. et al. // Nature. 2008. **456**. P. 362.
24. Panov A.D., Zatsepin V.I., Sokolskaya N.V. et al. // ASTRA. 2011. **7**. P. 119.
25. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Science. 2011. **332**, N 6025. P. 69.
26. Yoon Y.S., Ahn H.S., Allison P.S. et al. // Astrophys. J. 2011. **728**. P. 122.
27. Zatsepin V.I., Sokolskaya N.V. // Astron. Astrophys. 2006. **458**. P. 1; Зацепин В.И., Сокольская Н.В. // ПАЖ. 2007. **33**. С. 29.
28. Zatsepin V.I., Panov A.D., Sokolskaya N.V. // arXiv:1203.6458.
29. Птушкин В.С. // Успехи физ. наук. 2007. **177:5**. С. 558.

Direct measurements of Galactic cosmic ray energy spectra and elemental composition

V. I. Zatsepin, M. I. Panasyuk, A. D. Panov, N. V. Sokolskaya^a

D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^anatalia.sokolskaya@gmail.com.

The description of the ATIC (Advanced Thin Ionization Calorimeter) experiment and its main results are presented. The ATIC experiment is an important step in Galactic cosmic ray investigations with the direct methods, that were started by the PROTON experiment in 1960s years. We consider the contribution of the ATIC experiment to an understanding of the Galactic cosmic ray origin and propagation.

Keywords: Galactic cosmic rays, energy spectra, elemental composition.

PACS: 95.55.Vj, 95.85.Ry.

Received 23 June 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2012).

Сведения об авторах

1. Зацепин Виктор Иванович — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-38-08, e-mail: vzatsepin@gmail.com.
2. Панасюк Михаил Игоревич — докт. физ.-мат. наук, профессор, директор; e-mail: panasyuk@sinp.msu.ru.
3. Панов Александр Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-58-75, e-mail: panov@dec1.sinp.msu.ru.
4. Сокольская Наталия Владимировна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-38-08, e-mail: natalia.sokolskaya@gmail.com.