

УДК 523.165

СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА АТИК

© 2001 г. В. И. Зацепин¹, Дж. Х. Адамс мл.³, Х. С. Ан⁴, Дж. Ампе³, Г. Л. Башинджагян¹, Д. Вагнер³, Дж. З. Ванг⁴, Дж. П. Вефель², А. Г. Воронин¹, Дж. Ву⁴, О. Ганел⁴, Р. Гоулд², Д. Гранжер², Р. Гунасингха⁶, Т. Г. Гузик², А. Зигура², Дж. Изберг², Г. Кейс², Т. Кара⁴, Х. Дж. Ким⁷, К. Ц. Ким⁴, С. К. Ким⁷, Е. Н. Кузнецов¹, И. Квон⁷, Т. Лемчик², М. И. Панасюк¹, А. Д. Панов¹, Б. Прайс², Г. А. Самсонов¹, Н. В. Сокольская¹, М. Сен², Э. С. Сио⁴, Р. Сина⁴, М. Стюарт², А. Топтыгин⁴, С. Убре², А. Фазели⁶, И. Дж. Хан⁷, Дж. Чанг⁵, В. К. Х. Шмидт⁵, С. Эллисон²

Коллаборация АТИК построила спектрометр для измерения энергетических спектров ГКЛ с индивидуальным разрешением по заряду от протонов до никеля в энергетическом интервале от ~50 ГэВ до ~10¹⁴ эВ. В сентябре 1999 г. АТИК был прокалиброван в ЦЕРНе и в настоящее время полностью готов к работе. Первый длительный полет вокруг Южного полюса предполагается осуществить в декабре 2000 г.

ВВЕДЕНИЕ

Цель эксперимента АТИК – проведение новых измерений энергетического спектра ГКЛ с индивидуальным зарядовым разрешением от протонов до никеля в широкой области энергии от ~50 ГэВ до ~10¹⁴ эВ на частицу с помощью одного инструмента. Анализ существующих данных показывает, что наиболее распространенные компоненты Н и He, по-видимому, имеют разные энергетические спектры [1]. Выше ~50 ТэВ протоны, по-видимому, менее обильны. В работе [2] было даже утверждение о возможном изломе в протонном спектре при энергии ~2 ТэВ. Более тяжелые ядра группы CNO обнаруживают менее крутые, чем у He, спектры, и их экстраполяция к более высоким энергиям приводит к заключению о доминировании тяжелых ядер в составе ГКЛ [3, 4]. Однако ошибки такой экстраполяции велики, и это делает ее ненадежной. Необходимы более точные измерения, и это является главной задачей эксперимента АТИК.

Примерно 15 лет назад теоретики разработали модель диффузионного ускорения частиц ударными волнами в окрестностях взрывающихся сверхновых, которая естественным образом объясняет существенные свойства наиболее энергичных частиц в Галактике. Наиболее естественно эта модель предсказывает максимально достижимую энергию $E = Z \cdot 10^{14}$ эВ, где Z есть заряд частицы [5]. Это означает, что состав должен начать изменяться в об-

ласти ~10¹⁴ эВ, так как это предельная энергия для протонов.

Однако изменения предполагаемой топологии магнитных полей, силы поля или характеристик среды, внутри которой взрываются сверхновые, приводят к другим оценкам максимальной энергии ускоренных частиц [6]. Важно иметь надежные прямые измерения до возможно более высоких энергий, чтобы ограничить параметры модели. Из наземных измерений спектра “всех частиц” следует, что существуют частицы с энергиями до 10²⁰ эВ и, возможно, даже выше. Это сразу ставит другой вопрос, а именно: если “ускорители” около сверхновых обрезают максимальную энергию, как предсказывает теория, то каков источник (и механизм ускорения) для частиц еще более высоких энергий? Исследования около предела ускорения сверхновыми могли бы дать ключ для ответа на этот вопрос.

Давно известно, что энергетический спектр космических лучей в области энергий выше 10¹⁶ эВ более крутой, чем в области энергий ниже 10¹⁴ эВ. Определяется эта структура механизмами ускорения, распространения или удержания – остается одним из главных вопросов, на которые пока нет ответа. Одна из идей состоит в том, что такие частицы (>10¹⁶ эВ) могут быть доускорены коллективным действием ударных волн нескольких сверхновых. Так как все компоненты должны приходиться от того же самого класса источников, спектры всех элементов должны быть одинаковыми по магнитной жесткости. Если предварительные заключения из анализа существующих данных будут подтверждены, то такая модель должна быть исключена.

Другая точка зрения предполагает, что если предками Сверхновых были массивные звезды с

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

²Университет штата Луизиана, США.

³Военно-морская исследовательская лаборатория, США.

⁴Университет штата Мэриленд, США.

⁵Институт Макса Планка, Линдау, ФРГ.

⁶Южный университет, США.

⁷Сеульский национальный университет, Южная Корея.

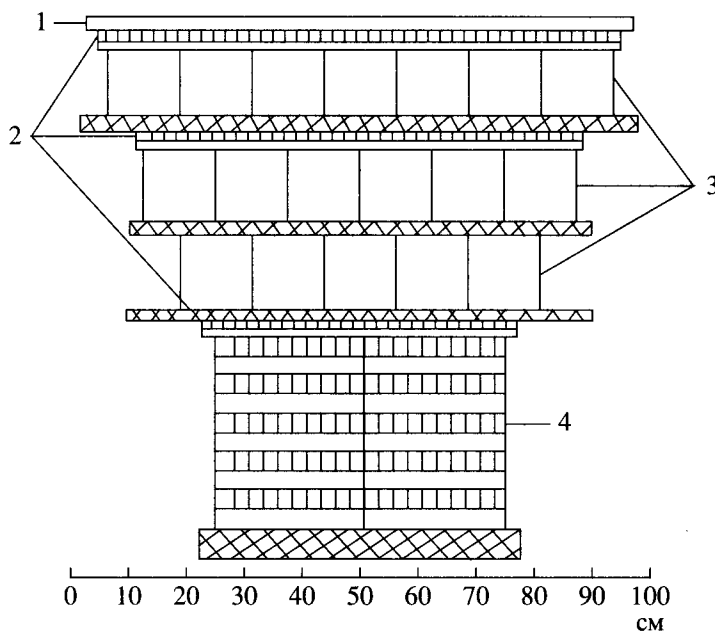


Рис. 1. Схема спектрометра АТИК: 1 – кремниевая матрица, 2 – сцинтилляторы, 3 – графитовая мишень, 4 – ВГО-калориметр.

сильным ветром, то взрыв происходил в среде, заполненной этим ветром. В этой ситуации можно ожидать, что скорость ускорения будет определяться прежде всего магнитным полем ветра, которое может быть выше, чем в межзвездной среде. Следовательно, скорость ускорения будет выше и частицы могут достичь более высоких энергий [7]. Стремление внести вклад в решение этих проблем было и остается главной побудительной причиной для проекта АТИК.

С описанной ниже конструкцией АТИК мы ожидаем получить статистически значимые измерения ГКЛ до $5 \cdot 10^{13}$ эВ уже в первом полете. Однако для продвижения к $\sim 10^{14}$ эВ потребуется от трех до пяти длительных (более 10 дней) баллонных экспозиций, и АТИК сконструирован с расчетом на такую серию полетов.

СОСТАВ ДЕТЕКТОРОВ

Спектрометр, схематически изображенный на рис. 1, состоит из полностью активного калориметра, построенного из 400 сцинтилляционных кристаллов германата висмута (ВГО) размером $25 \times 2.5 \times 2.5$ см. Над калориметром имеется блок мишени, состоящий из трех слоев графита толщиной по 10 см. Толщина мишени составляет $3/4\lambda_p$ (пробега взаимодействия протона). Падающая частица взаимодействует в графите, но развитие ливня происходит в основном в ВГО-калориметре, так как графитовая мишень содержит всего 1.2 каскадных единицы (к.е.). Полная глубина по вертикали составляет 22 к.е.

В приборе имеются три сцинтилляционных детектора, построенных из 202 брусков пластиковых сцинтилляторов толщиной 1 см и шириной 2 см. Каждый детектор состоит из двух взаимно перпендикулярных слоев брусков. Детекторы 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.

Самый верхний детектор в приборе – это кремниевая матрица: детектор для измерения заряда. В калориметре всегда имеются альбедные частицы, летящие в заднюю полусферу, которые могут исказить измеряемый заряд. Для решения этой проблемы детектор для измерения заряда построен из 4480 независимых кремниевых ячеек размером 1.5×2 см. Инструмент будет работать внутри герметичной гондолы при давлении, близком к атмосферному, и будет использовать солнечные батареи. Так как АТИК предназначен для многократного использования, он построен с учетом легкой разборки в полевых условиях для возвращения основных элементов спектрометра.

СЧИТЫВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Электроника считывания использует коммерческие электронные платы, которые были сконструированы, разработаны и отлажены в течение нескольких прошлых лет и проверены в ЦЕРНе. Схема считывания изображена на рис. 2а и включает следующие блоки: DIM, который обеспечивает связь между DCU-компьютером и цепочкой считывания сигнала; ACLB, который взаимодей-

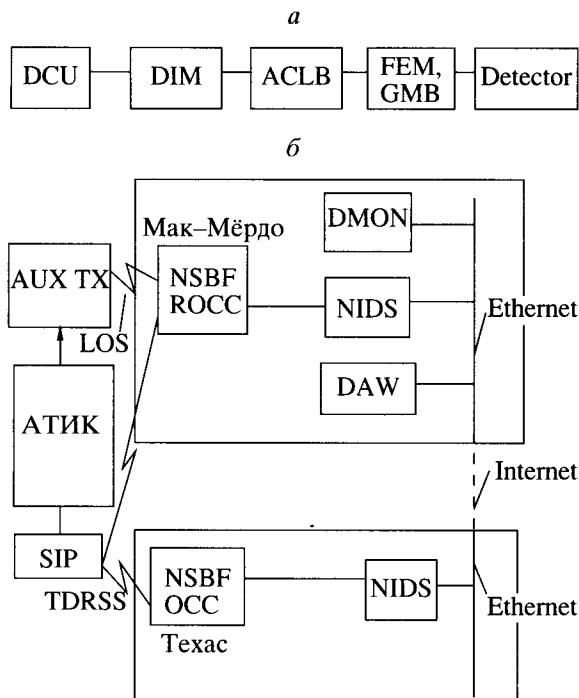


Рис. 2. Система сбора данных. *а* – схема считывающей электроники детекторов АТИК; *б* – схема взаимодействия полетной и наземной систем сбора данных. Аббревиатуры: FEM – Front End Module; GMB – Grandmother Board; ACLB – ASIC Control Logic Board; DIM – Detector Interface Module; DCU – Detector Control Unit; NSBF – National Scientific Ballon Facility; OCC – Operation Control Center; ROCC – Remote Operation Control Center; SIP – Support Instrument Package; DMON – Data Monitor; NIDS – NSBF Interface and Disk System; DAW – Data Analysis Workstation; LOS – Line of Sight, Aux TX – Auxiliary Transmitter.

ствует с триггерной логикой, контролирует считывание сигналов с детекторов и обеспечивает спарсификацию данных (т.е. прореживание потока данных путем отсеки шумов), и FEM, который использует ASIC-чипы для чтения и оцифровки детекторных сигналов, включает светоизлучающие и зарядовые импульсные калибровочные устройства и устройства, которые формируют триггерные сигналы. Для кремниевой матрицы работа FEM-электроники разделена между «материнскими платами», которые включают разработанные для АТИК-эксперимента CR-1 ASIC-чипы и «grandmother boards», которые включают 16-битовые мультиплексируемые АЦП.

В ЦЕРНе для чтения АТИК-детекторов были использованы прототипы полетных модулей DIM, ACLB, FEM и электроники кремниевой матрицы вместе с первоначальным вариантом программного обеспечения. Церновская обстановка была сложнее полетной. Однако прибор уверенно работал при скорости счета ~ 70 Гц со средней величиной записи ~ 2 кбайт. Кроме того, в этих условиях были обнаружены и исправлены неко-

торые аппаратные и программные ошибки, которые иначе не могли быть обнаружены до первого тестового полета АТИК. В результате мы теперь уверены, что электроника считывания готова к полету.

БОРТОВАЯ СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ

Полетная система сбора данных и управления спектрометром контролирует полетные операции, включая прием и обработку получаемых с Земли команд, сбор и архивирование бортовых данных, передачу на Землю части зарегистрированных событий от ГКЛ и информации о состоянии спектрометра. Она состоит из четырех модулей, предназначенных для конкретных контрольных операций, таких как контроль системы питания и параметров окружающей среды внутри гондолы, архивирование собранных данных и телеметрия, контроль работы детекторов, полетный контроль. Все модули работают под управлением операционной системы в реальном времени QNX, которая работает в стандарте POSIX.

Программное обеспечение различных модулей взаимодействует внутри гондолы через внутреннюю сеть ETHERNET, используя посылку сообщений по схеме клиент – сервер. Программное обеспечение запускается «событиями», где под событиями понимаются триггеры от частиц, временные запреты, команды и сообщения. В течение полета скорость счета событий будет ограничена 50 Гц, которая дает оценку объема информации ~ 50 Гбайт за один околополюсный полет. Информация будет записываться на борту на 50-гигабайтный жесткий диск. Небольшая часть данных может быть также передана на Землю со скоростью ~ 4 кбайт/с, когда будет доступна связь через систему спутников TDRSS. Наземная система состоит из трех основных компонент (рис. 2б): NIDS, DMON и DAW. NIDS обеспечивает первичное взаимодействие как с наземной управляющей системой для посылки команд и приема статусной информации о спектрометре, расположенной в штате Техас, так и с выносным центром управления, расположенным в Мак-Мёрдо в Антарктиде.

Сразу после старта и в течение первых суток полета АТИК будет управляться из центра NSBF ROCC. В течение этого периода LOS-телеметрия (связь в пределах видимости) позволит передать на Землю значительную часть данных, проанализировать и оценить характеристики и конфигурацию спектрометра. Если изменения будут необходимы, то соответствующие команды будут посланы немедленно. Мониторинг этих данных практически в реальном времени будет производиться в DMON, и он-лайн-анализ будет осуществляться DAW. Обмен данными между NIDS и DAW или DMON обеспечивается RPC (Remote Procedure Call) интерфейсом. В то время как NIDS будет

персональным компьютером, работающим под управлением операционной системой QNX, RPC-клиенты доступны большинству платформ. Таким образом, институты, входящие в АТИК-коллораацию, могут взаимодействовать с DMON/DAW на любой платформе, которая для них наиболее удобна. Еще до потери LOS-связи управление будет передано NSBF OCC, где идентичный NIDS в Техасе будет использован в остальной период полета. Кроме того, NIDS-модули будут взаимодействовать через Интернет между Техасом и Мак-Мёрдо. Это позволит осуществлять мониторинг спектрометра в обоих местах и обеспечивать дублирование.

СТАТУС

В августе 1999 г. вариант прибора, близкий к полетному, был доставлен в ЦЕРН, где в сентябре в течение 50 ч экспонировался на пучках частиц высокой энергии. Использовались пучки электронов 100, 150 и 300 ГэВ, протонов 150 и 375 ГэВ и π -мезонов 150 ГэВ. Частицы падали под углами 0, 15 и 30° к нормали. Менялось также положение пучков относительно центра калориметра так, чтобы они проходили через несколько точек каждого квадранта калориметра. Несколько специальных сеансов проведено для изучения отклика триггерной логики на частицы, входящие сбоку, а также для проверки влияния взаимодействия выше кремниевой матрицы на зарядовое разрешение. В настоящее время значительная часть информации из этого набора данных еще не обработана, но некоторые важные параметры уже получены. Энергетическое разрешение для электронов 150 ГэВ составило 1,9%, а средний профиль электронного каскада хорошо

совпадает с результатами моделирования. Среднее энерговыделение для протонов составляет ~40% от энергии частицы и линейно растет с энергией. Энергетическое разрешение для протонов составляет ~35% и не зависит от энергии в исследованном энергетическом диапазоне. В черновской калибровке калориметр состоял из 10 слоев VGO. В антарктических полетах число слоев будет восемь (из-за ограничений по весу) и ожидается, что разрешение составит ~40%. Другие детали эксперимента содержатся в [8–10].

С Российской стороны работа была поддержана Министерством науки и технологий РФ и Российским фондом фундаментальных исследований (грант 99-02-16246).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Swordy S.P. et al.* // Proc. 24th ICRC. Rome. 1995. V. 2. P. 652.
2. *Григоров Н.Л., Нестеров В.Е., Рапопорт И.Д. и др.* // ЯФ. 1970. Т. 11. С. 1058.
3. *Зацепин В.И., Лазарева Т.В., Сажина Г.П., Сокольская Н.В.* // ЯФ. 1994. Т. 57. С. 684.
4. *Takahashi Y.* // Nuclear Phys. B (Proc. Suppl.). 1998. V. 60. P. 83.
5. *Lagage P.O., Cesarsky C.J.* // Astron. Astrophys. 1983. V. 118. P. 223.
6. *Ellison D.C. et al.* // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1994. V. 106. P. 780.
7. *Bierman P.L.* // Proc. 23d ICRC. Calgary. 1993. Invited Rapp. and Highlight Papers. P. 45.
8. *Gizik T.G.* for the ATIC Collaboration // Proc. 26th ICRC. Salt Lake City. 1999. V. 5. P. 9.
9. *Ganel O. et al* for the ATIC Collaboration // Ibid. P. 453.
10. *Adams J.H., Jr. et al* for the ATIC Collaboration // Ibid. P. 76.

ПРИМЕЧАНИЕ ПРИ КОРРЕКТУРЕ

Первый шестнадцатисуточный полет спектрометра АТИК был проведен в Антарктиде с 28 декабря 2000 года по 13 января 2001 года.