

УДК 539.12

## ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В АРМЕНИИ

А.А. ЧИЛИНГАРЯН<sup>1</sup>, Р.Г. МИРЗОЯН<sup>2</sup>, М.З. ЗАЗЯН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ереванский физический институт им. А.И. Алиханяна, Армения,

<sup>2</sup>Институт Физики им. Макса Планка, Мюнхен, Германия

(Поступила в редакцию 9 марта 2009 г.)

Исследования космических лучей в Армении начались в 1934 году, когда группа из Ленинградского физико-технического института вместе с Н.М. Кочаряном провели на горе Арагац измерения восточно-западной асимметрии космического излучения. Работа вызвала широкий резонанс и в 1942 г. братья Алиханяны организовали научную экспедицию на Арагац. С тех пор физики изучают потоки космических лучей на горе Арагац с помощью различных детекторов частиц – масс-спектрометров, калориметров, детекторов переходного излучения, огромных установок, регистрирующих протоны и ядра, ускоренные в результате сильнейших вспышек в Галактике. В настоящее время ведутся исследования с помощью сети детекторов частиц, расположенных в Армении и за рубежом, а также детекторов Центра Исследования Космической Погоды на Арагаце и в Ереване.

### 1. Введение

Исследование частиц сверхвысоких энергий, падающих на земную атмосферу, позволяет получить обширную информацию о наиболее энергетических процессах во Вселенной. Протоны и ядра, ускоренные в остатках сверхновых звезд, вблизи сверхмассивных черных дыр, в других звездных системах, а также на Солнце (так называемые Галактические и Солнечные космические лучи: ГКЛ и СКЛ) достигают Земли и приносят информацию о своих источниках. Эти “первичные” космические лучи (КЛ) были открыты почти 100 лет тому назад благодаря ионизационному эффекту рожденных ими вторичных потоков (ливней частиц), образованных при взаимодействиях с земной атмосферой. Для детектирования космических лучей над землей, на поверхности земли, под землей и под водой развиты многообразные экспериментальные подходы, основанные на разных физических процессах взаимодействия КЛ с атмосферой (множественное рождение частиц, флюоресценция, излучение черенковского света в атмосфере и в воде, излучение акустических и радиоволн). В космических экспериментах, начавшихся после запуска первого спутника 4 октября 1957 г., непосредственно зарегистрировали космические лучи и подтвердили, что наша ближайшая звезда, Солнце, является ускорителем частиц.

Прямые измерения потоков частиц детекторами, установленными на борту спутников и межпланетных станций, обеспечивают отличное зарядовое и энергетическое разрешение, однако из-за ограниченной грузоподъемности космических аппаратов и слабого потока высокоэнергичных КЛ измерения возможны лишь в области энергий от кэВ до 10 ГэВ. В области энергий выше 10 ГэВ в настоящее время и в ближайшем будущем, несмотря на присущую косвенным методам неопределенность, основанную на использовании численных методов и техники моделирования, только наземные установки, регистрирующие ливни вторичных частиц, могут дать информацию об энергии и типе первичной частицы.



Рис.1. Арагацкая научная станция (высота 3200 м над уровнем моря).



Рис.2. Нор-Амбердская научная станция (2000 м над уровнем моря).

Гора Арагац, наивысшая точка современной Армении, идеально подходит для исследования потоков КЛ. Научные станции Ереванского физического института (ЕрФИ) им. А.И. Алиханяна Арагац и Нор-Амберд расположены на склоне горы Арагац на высотах 3200 и 2000 метров, соответственно (см. рис.1 и 2). Научная биография горы восходит к 1934 г., когда группа сотрудников

Ленинградского физико-технического института вместе с Н.М. Кочаряном (впоследствии первым деканом физического факультета ЕГУ) провели измерения восточно-западной асимметрии космического излучения [1]. Работа вызвала широкий резонанс, и в 1942 г. братья Артем и Абрам Алиханяны (см. рис.3) организовали экспедицию на Арагац. С тех пор, несмотря ни на какие трудности, связанные со Второй мировой войной, отсутствием финансирования, электричества, горючего, экспедиции не прерывались ни на один год.



Рис.3. Абрам Алиханов (слева) и Артем Алиханян.

В 40-е и 50-е годы космические лучи были единственным источником знаний о природе и свойствах элементарных частиц. Исследования космических лучей открывали новые направления физики, которые в дальнейшем были объединены общим названием “физика и астрофизика высоких энергий” и “Космическая погода”. Наиболее важные даты и достижения по исследованию космических лучей на Арагаце следующие:

- 1942 – первая экспедиция на Арагац;
- 1943 – основание Физико-математического института при Ереванском государственном университете, в настоящее время – Ереванский физический институт им. А.И. Алиханяна;
- 1945–1955 – создание Арагацкой высокогорной станции. Эксперименты на Арагаце с масс-спектрометром Алиханяна–Алиханова: исследование состава вторичных КЛ (энергии  $<100$  ГэВ), изучение “третьей” компоненты в КЛ, наблюдение частиц с массой, промежуточной между  $\mu$ -мезоном и протоном;
- 1957 – создание ионизационного калориметра, регистрация частиц с энергиями до 50 ТэВ;
- 1960 – основание Нор-Амбердской высокогорной научной станции;
- 1970 – модернизация широкоазорной искровой камеры;

- 1975 – эксперимент МЮОН: измерение энергетического спектра и зарядового отношения горизонтального мюонного потока;
- 1975 – запуск нейтронного супермонитора 18NM64;
- 1977 – эксперимент ПИОН: измерение энергетических спектров пионов и протонов;
- 1981 –1989 – начало эксперимента АНИ: создание установок МАКЕТ-АНИ и ГАММА для измерения спектра космических лучей в области “колена” ( $10^{14} - 10^{16}$  эВ);
- 1989 – 1992 – разработка и испытание системы атмосферных черенковских телескопов, использование многомерных методов анализа для выделения сигналов от точечных источников  $\gamma$ -квантов;
- 1993 – 1996 – создание новой методики многомерного корреляционного анализа данных детекторов широких атмосферных ливней (ШАЛ), обработка данных эксперимента KASCADE, классификация первичных ядер по 3 группам;
- 1996 – 1997 – возобновление изучения вариаций КЛ на Арагаце: создание солнечного нейтронного телескопа и восстановление Нор-Амбердского нейтронного монитора;
- 2000 – основание Арагацкого центра космической погоды (АЦКП) для исследований в области солнечной физики и космической погоды; измерение вторичных потоков космических лучей; подключение больших наземных установок для регистрации потоков вторичного космического излучения;
- 2003 – регистрация беспрецедентной серии энергетичных солнечных событий одновременно в потоках низкоэнергичных заряженных частиц, нейтронов и высокоэнергичных мюонов в сентябре – октябре;
- 2004 – измерение спектров тяжелой и легкой составляющих галактических космических лучей, наблюдение “колена” в спектрах легких ядер и отсутствие “колена” в спектрах тяжелых ядер;
- 2005 – измерения наиболее энергичных протонов в СКЛ (GLE 70 от 20 января; регистрация солнечных протонов с энергией  $E > 20$  ГэВ);
- 2007 – начало создания всемирной сети детекторов SEVAN (Space Environmental Viewing and Analysis Network) – детекторов частиц нового типа для мониторинга геофизических параметров.

## 2. Масс-спектроскопический период исследований на горе Арагац

История арагацкой науки делится на несколько этапов. Первый – масс-спектрометрический длился около 15 лет. Созданный Алиханянами уникальный прибор – магнитный спектрометр принес фундаментальные, не согласующиеся с сложившимися представлениями результаты: наличие протонов в космических лучах [2] и “экзотические” узкие ливни [3]. Господствующая тогда точка зрения заключалась в том, что КЛ имеют электромагнитное происхождение [4]. Поэтому наличие в КЛ протонов резко противоречило этой гипотезе. Узкие ливни по

своей природе отличались от обычных широких атмосферных ливней (ливней Оже) и также не могли быть электромагнитного происхождения из-за большой проникающей способности. Впоследствии узкие ливни всесторонне были изучены на Арагацком ионизационном калориметре [5]. На магнитном спектрометре Алиханяна–Алиханова Н.М. Кочаряном [6] были получены энергетические спектры мюонов и протонов, вошедшие в общеизвестный каталог О.К. Аллкофера по космическим лучам.

Масс-спектрометрическая методика позволяла измерять отклонение заряженной частицы в сильном магнитном поле с одновременным измерением пробега частиц, т.е. проводить их анализ по массам. Этим методом были получены первые указания на существование частиц с массами, промежуточными между массой  $\mu$ -мезона и протона. Впоследствии оказалось, что из множества пиков в распределении масс только некоторые ( $\pi$ -мезоны, протоны, дейтроны и  $K$ -мезоны) оказались “истинными” частицами, остальные, в том числе так называемые варитроны [7] – частицы с массами тяжелее  $\mu$ -мезона, “открытые” в ходе арагацких исследований, были артефактами, то есть флуктуациями в распределении масс. Эти “ошибочные” частицы не позволили закрепить приоритет в открытии новых частиц за арагацкими физиками. Нобелевскую премию за открытие  $\pi$ -мезона получил Пауэлл. Тем не менее, дискуссия в научной литературе по варитронам стимулировала проведение многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. Идея братьев Алиханянов о многообразии элементарных частиц завладела умами физиков всего мира. Тогда “Арагац” и утвердил себя одним из важнейших центров физики космических лучей.

Следует отметить, что определение достоверности пиков в одно- и двумерных распределениях и поныне является одной из самых важных и сложных методических задач в физике и астрофизике высоких энергий. И в наши дни многие группы, использующие сложные математические методы, не могут избежать ошибок и заявляют об открытиях, основываясь на ложных пиках (см., например, дискуссию по поводу “открытия” пентакварков в [8]).

### **3. Калориметрические измерения на горе Арагац**

Второй этап исследований на Арагаце – калориметрический, охватывает период с 1958 по 1970 гг. В 1958 г. за необычайно короткий срок, в полтора года группой ученых Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ (НИИЯФ) и ЕрФИ (руководитель Н.Л. Григоров) был создан первый и долгие годы крупнейший в мире ионизационный калориметр. На нем впервые были получены прямые экспериментальные указания на рост эффективного сечения неупругого взаимодействия адронов с легкими ядрами при возрастании энергии. Впоследствии это было подтверждено прямыми измерениями на спутниках “Протон” [9] и ускорительными экспериментами. На этом же приборе был получен еще один интересный результат относительно закономерности множественного рождения высокоэнергичных пионов [10], в дальнейшем, в 1990

году, утвержденный как открытие. Авторы – Х.П. Бабаян (зам. директора ЕрФИ в 1956–1969 гг.), Н.Л. Григоров, Э.А. Мамиджаниян (руководитель отдела космических лучей ЕрФИ в 1969–1992 гг.) и В.Я. Шестоперов. Было экспериментально доказано существование событий, когда в акте взаимодействия рождается небольшое число  $\pi^0$ -мезонов, которые “уносят” практически всю энергию первичной частицы, столкнувшейся с ядром атмосферы.

Вошедшая в строй в 1960 г. станция в Нор-Амберде на высоте 2000 м над уровнем моря (см. рис.2) позволила значительно расширить экспериментальную базу для исследования адронов высоких энергий космического излучения и их взаимодействий с различными ядрами на уникальной установке, где впервые была осуществлена совместная работа ионизационного калориметра с широкозасорными искровыми камерами (зав. лабораторией Г.А. Марикиан в 1960–1986 гг.). В исследованиях на армянских высокогорных станциях теперь уже принимают участие не только физики из различных научных центров Союза и Восточной Европы. Там стремятся побывать и поработать ученые из США, Франции, Японии, Великобритании. Разработанный в Нор-Амберде метод искровых камер различных конфигураций, отличающийся своей экономичностью и простотой изготовления, нашел применение и в других лабораториях. А.И. Алиханян и Т.Л. Асатиани (сотрудник ЕрФИ с 1943, зав. лабораторией ЕрФИ в 1960–1987 гг., ведущий научный сотрудник по настоящее время) за разработку искровых камер удостоились Ленинской премии совместно с группой русских и грузинских физиков.

В 1968–1969 гг. арагацкий калориметр был дополнен системой пропорциональных счетчиков. На этой установке Э.А. Мамиджанияном с сотрудниками [11] были измерены характеристики нейтронной компоненты космического излучения на высотах гор.

Усилиями Х.П. Бабаяна на обеих станциях были внедрены новые детекторы – нейтронные супермониторы, которые в “новейшей” истории Арагаца послужили основой для создания уникального центра по мониторингу космических лучей.

#### **4. Астрофизика высоких энергий**

На следующем этапе (1970–1980 гг.) эксперименты ПИОН [12] и МЮОН [13] ставили своей целью измерение потоков первичных и вторичных космических лучей, а также некоторых феноменологических характеристик сильного взаимодействия. Руководили ими, соответственно, В.В. Авакян (начальник станции Арагац в 1963–1993 гг.) и Т.Л. Асатиани. ПИОН – уникальный прибор [14], сочетающий разнообразные детекторы частиц. Система детектирования переходного излучения, созданная под руководством А.А. Оганесяна (руководитель лаборатории ЕрФИ в 1978–1996 гг.), позволяла достаточно точно разделять протоны и  $\pi$ -мезоны. Мюонный магнитный спектрометр для исследования окологоризонтальных мюонов высоких энергий

был оснащен многонитяными и широкоазорными искровыми камерами, что дало возможность расширить область достоверного измерения импульса мюонов до  $\sim 2.5$  ТэВ/с. Оба эксперимента использовали для накопления и обработки данных самые современные вычислительные методы и машины. Энергии мюонов вычислялись с помощью одной из первых советских вычислительных машин М220, эксперимент ПИОН для накопления данных использовал первый армянский миникомпьютер НАИРИ-2.

В 70–80 годах прошлого столетия стало ясно, что для получения ответов на основополагающие проблемы астрофизики высоких энергий необходимы установки, охватывающие существенно большие площади и использующие как можно больше разных независимых методик регистрации. Этим требованиям соответствовал эксперимент АНИ [15], позволяющий наиболее полно и точно регистрировать электронно-фотонную, адронную и мюонную компоненты ШАЛ с помощью системы наземных сцинтилляторов; взаимодействия адронов ШАЛ в крупнейшем калориметре (площадью  $1600 \text{ м}^2$ ), высокоэнергичные мюоны с помощью подземных мюонных детекторов и большого магнитного спектрометра (площадь  $40 \text{ м}^2$ ). Планирование и строительство комплекса АНИ велось совместно с Физическим институтом имени П.Н. Лебедева АН СССР под эгидой Министерства среднего машиностроения СССР (в настоящее время Федеральное агентство атомной энергии России). Руководили экспериментом С.И. Никольский (директор Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН) и Э.А. Мамиджян.

Из-за развала СССР и наступившего вслед за ним экономического коллапса строительство комплекса АНИ не было завершено, но два детектора – МАКЕТ-АНИ, руководитель эксперимента Г. Овсепян (подробнее см. [16]) и ГАММА, руководитель эксперимента Р. Мартиросов (подробнее см. [17]) работают до сих пор. После опубликования завершающих статей установка МАКЕТ-АНИ прекратила регистрацию частиц высоких энергий в 2007 г. Сцинтилляторы теперь используются для мониторинга меняющихся потоков низкоэнергичных заряженных частиц КЛ. Установка ГАММА является базовой в исследовании галактических космических лучей высоких энергий. Для определения возможных источников космических лучей необходимо измерение энергетических спектров различных групп первичных ядер, то есть необходима классификация первичных ядер по информации о составе ШАЛ. Эта крайне сложная задача стала возможной благодаря методике многомерного непараметрического анализа, созданной в ЕрФИ в 1989 г. под руководством А.А. Чилингаряна (руководитель Отделения физики космических лучей с 1993 г.).

Анализ данных ШАЛ с использованием байесовского метода и метода искусственных нейронных сетей [18,19], позволил получить энергетические спектры легких и тяжелых ядер в эксперименте МАКЕТ-АНИ и 3 спектра, соответствующие группам легких, промежуточных и тяжелых ядер по данным эксперимента KASCADE [20]. Данные МАКЕТ-АНИ показывают [21,22], что энергетический спектр легких ядер (в основном протонов и ядер гелия) резко меняется при энергиях  $3 \times 10^{15}$  эВ, тогда как спектр тяжелых ядер не меняется

вплоть до  $\sim 3 \times 10^{16}$  эВ (см. рис.4). Мировые данные подтверждают этот результат. В эксперименте KASCADE точка излома с ростом массового номера смещается в сторону высоких энергий [23]. В эксперименте HEGRA [24] также было зарегистрировано укрупнение спектра легких ядер. В эксперименте EAS-TOP [25] группа легких ядер демонстрирует четкий излом. Таким образом, данные ШАЛ свидетельствуют о зависящем от заряда механизме ускорения КЛ, что согласуется с моделью ударного ускорения в взрывных волнах Сверхновых звезд. Новые исследования с помощью орбитальных гамма-обсерваторий и наземных атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) также указывают на остатки Сверхновых как на основные источники космических лучей.

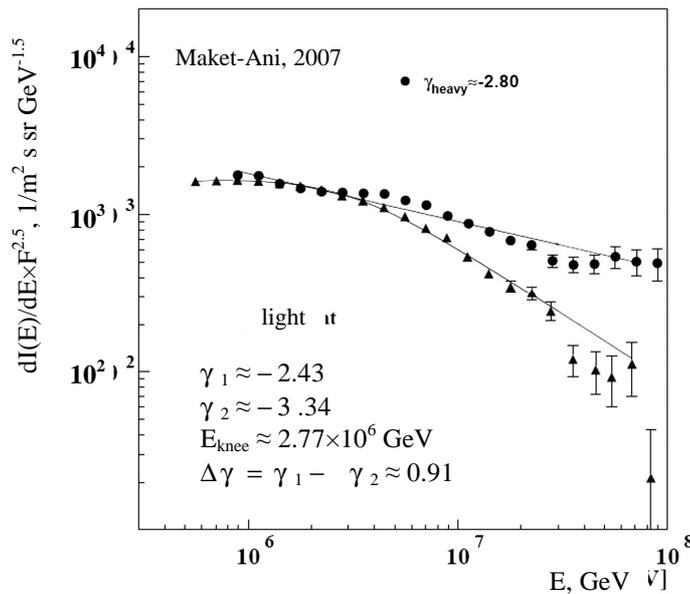


Рис.4. Дифференциальные спектры легких и тяжелых групп ядер первичного потока, измеренные на установке МАКЕТ-АНИ.

Прямые указания на шоковое ускорение в остатках Сверхновых можно получить при совместной регистрации молодых остатков сверхновых в рентгеновских и  $\gamma$ -лучах. Для того, чтобы проверить, что остаток Сверхновой RX J1713.7-3946 является эффективным протонным ускорителем, Учияма с коллегами [26] включили в анализ информацию по широкополосному рентгеновскому спектру (от 0.4 до 40 кэВ), измеренному с помощью спутника Сузаку [27] и по данным высокоэнергичных (превышающих 10 ТэВ)  $\gamma$ -лучей, измеренным с АЧТ HESS [28]. Они опровергли гипотезу об обратном комптоновском рассеянии как источнике зарегистрированных высокоэнергичных  $\gamma$ -квантов и, принимая во внимание ТэВ-кэВ-овую корреляцию, подтвердили адронное происхождение зарегистрированных  $\gamma$ -квантов. Таким образом, анализ изображения остатка сверхновой с рентгеновской обсерватории Чандра и рентгеновских спектров со спутника Сузаку совместно со спектром высокоэнергичных  $\gamma$ -лучей, измеренным с

помощью атмосферного черенковского телескопа HESS, дает очень сильный аргумент в пользу ускорения протонов и ядер с энергиями 1 ПэВ и выше в оболочках остатков Сверхновых звезд.

Армянские физики внесли значительный вклад в развитие техники АЧТ. Первые системы АЧТ на канарских островах (HEGRA) с последующими большими АЧТ HESS в Намибии и MAGIC на Канарах были разработаны и запущены международной коллаборацией с участием армянских физиков.

В 1985 году были начаты работы по разработке и конструкции первой системы АЧТ для эксперимента АНИ на Арагаце. Телескоп включал в себя мозаичный отражатель диаметром 3 м и проекционную камеру в фокальной плоскости, состоящую из 37 фтоэлектронных преобразователей FEU-130. В Ереванском физическом институте были также изготовлены высококачественные оптические зеркала с кварцевым покрытием, экваториальные монтировки телескопов и электроника. Руководителями группы по изучению гамма-излучения были Ф. Агаронян и Р. Мирзоян. Группа начала измерения сигналов космических лучей на станции Нор-Амберд и калибровку телескопа для первых измерений сигналов от Крабовидной туманности, но эксперименты были остановлены из-за развала Советского Союза. К счастью, армянские ученые совместно с немецким физиком О. Алкоффером подготовили проект по установке той же системы АЧТ на новом детекторе космических лучей HEGRA (High-Energy Cosmic Ray Astronomy) на Канарских островах (Лас Пальмас). Уже готовую аппаратуру и материалы для создания 5 телескопов были посланы из Армении через Германию в Лас Пальмас и в 1991 г. была начата сборка системы телескопов. В 1992 г. первый телескоп начал измерения гамма-квантов от Крабовидной туманности [29]. Это было первым существенным подтверждением открытия, сделанного на 10-метровом телескопе Whipple в Аризоне, США. В 1993 г. был построен второй телескоп, который работал в стерео моде с первым. В дальнейшем к системе было добавлено еще 4 телескопа. Телескопы HEGRA работали до 2002 г. и зарегистрировали множество гамма-источников. Армянские физики внесли значительный вклад в эксперимент HEGRA как благодаря своей лидирующей роли в создании техники АЧТ, так и теоретическим работам на переднем крае гамма-астрономии.

После завершения эксперимента HEGRA астрофизики коллаборации продолжили строительство новых усовершенствованных приборов. Уже в 1994 году Р. Мирзояном был предложен телескоп MAGIC диаметром 17 м для исследования гамма-излучения с энергией от 30 ГэВ до 30 ТэВ. Была сформирована международная коллаборация, которая в 1998 г. стала официальным проектом в Институте физики им. Макса Планка в Мюнхене. ЕрФИ, а также несколько институтов Германии, Испании и Финляндии стали членами коллаборации MAGIC. В 2001–2003 гг. был построен первый телескоп, который начал работать с 2004 г. Второй телескоп, построенный на расстоянии 85 м от первого, начнет работать в 2009 г.

Другие участники коллаборации HEGRA продолжают исследования с помощью телескопов диаметром 10 м с усовершенствованной оптикой и электроникой. Установка, состоящая из 4 телескопов диаметром 10 м, HESS, предложенная в 1997 г. Ф. Агароньяном, построена международной коллаборацией (преимущественно физиками из Германии и Франции) в Намибии в 2001–2003 гг. Ученые из ЕрФИ также стали членами эксперимента HESS. Коллаборация HESS намерена дополнить установку большим телескопом диаметром 28 м. За 3-4 года число наблюдаемых источников гамма-квантов выросло от ~20 до более 80, большое количество интересных публикаций (в настоящий момент более 70) появилось в рецензируемых журналах, в том числе в таких известных, как “Science” и “Nature”. Ожидается, что совместная работа обоих телескопов повысит число наблюдаемых источников до ~100 в течение ближайших 2–3 лет.

## **5. Солнечная физика и исследования космической погоды**

Космические лучи ускоряются не только в глубинах Галактики, но и нашей ближайшей звездой, Солнцем. Сильные солнечные вспышки иногда ускоряют частицы в области МэВ–ГэВ до интенсивностей, превышающих полный галактический поток, достигающий земной атмосферы. Солнечные частицы взаимодействуют с магнитосферой, ионосферой и атмосферой, влияя таким образом на околоземную среду, резко меняя “космическую” погоду, серьезно воздействуя на космические и наземные технологии. Космические бури могут причинить вред космонавтам и оказывать чрезмерное радиационное воздействие на экипаж самолетов. Космическая погода меняется очень быстро, интенсивность рентгеновского излучения и частиц высоких энергий может сильно возрасти в считанные секунды. Протоны и ядра, пронизывая микроскопические электронные устройства, создают дополнительные токи и меняют состояние электронных устройств, генерируя ложные команды и повреждая бортовые системы управления. Потоки электронов, проходя через атмосферу, создают полярное сияние и индуцируют электрический ток на поверхности проводников, что вызывает коррозию трубопроводов и выводит из строя трансформаторы на электроподстанциях. Наша цивилизация сильно зависит от космических технологий, включая телекоммуникации, навигацию, предупреждение стихийных бедствий, прогноз погоды, системы военного назначения и т.д. По этой причине исследования в области космической погоды привлекают все больше и больше ученых. В конце прошлого столетия США, Канада, Европа и Япония приняли национальные программы по изучению космической погоды и созданию надежной службы предупреждения. Физики Отдела космических лучей ЕрФИ также вносят свой вклад в решение этой важной задачи.

Начиная с 1996 г. в Отделе космических лучей были разработаны разнообразные детекторы для измерения потоков вторичного космического излучения. В 1996 г. вновь начал работать первый детектор – Нор-Амбердский

нейтронный монитор 18NM64. Аналогичный детектор начал измерения на Арагацкой научной станции осенью 2000 г. Солнечный нейтронный телескоп (СНТ, [30]) приведен в действие на горе Арагац с 1997 г. в составе мировой сети, координируемой лабораторией Солнечно-Земных связей Нагойского Университета. В дополнение к прямой цели детектирования нейтронных потоков от Солнца, СНТ имеет возможность детектирования потоков заряженных частиц (преимущественно мюонов и электронов) и измерения направления падающих мюонов. Другая система наблюдения основана на сцинтилляционных детекторах установок для регистрации Широких атмосферных ливней (ШАЛ) – МАКЕТ-АНИ и ГАММА, расположенных на горе Арагац. Система наблюдения заряженной компоненты на Нор-Амбердской научной станции работает с 2002 года. Система сбора данных была модернизирована в 2005 г. Была разработана современная электроника для обеспечения работы объединенной системы нейтрон-мюонных детекторов, а также для измерения параметров окружающей среды (температура, давление, влажность). Современная система сбора данных, и прецизионная система синхронизации времени являются ключевыми составляющими новых установок на горе Арагац. Информация о меняющихся потоках вторичных частиц, измеряемых с помощью сотен регистрирующих каналов, используется для изучения эффектов солнечной модуляции во время сильных солнечных вспышек.

Детекторы Арагацкого Центра Космической погоды (АЦКП, [31,32]) действующие с 2000 г., зарегистрировали все значительные солнечные события завершившегося в 2009 г. 23-го цикла солнечной активности. Одним из наиболее значимых результатов, полученных недавно на Арагаце, является обнаружение протонов высоких энергий (выше 20 ГэВ), ускоренных на Солнце во время крупнейшего Наземного Возрастания (НВ) интенсивности космических лучей 20 января 2005 г. [33,34]. Во время фазы восстановления Форбуш понижения около западного края Солнца произошла длительная вспышка рентгеновского излучения (солнечные координаты: 14N, 67W). Начало солнечной вспышки X7.1 было в 06:36 часов и максимальный поток рентгеновского излучения – в 7:01. Наибыстрое, относительно начала рентгеновского излучения, НВ 23-го цикла было зарегистрировано детекторами на борту космических аппаратов и наземными детекторами через несколько минут после начала вспышки. НВ началось в 6:48; нейтронным монитором, расположенным на Южном полюсе, была зарегистрирована максимальная амплитуда в 5000% (наибольшее превышение, когда-либо зарегистрированное нейтронными мониторами). Мониторы АЦКП зарегистрировали значительное превышение скорости счета в 7:00 – 8:00 UT. С 7:02 до 7:04 UT Арагацкий многоканальный мюонный монитор (АМММ) зарегистрировал пик значимостью  $\sim 4\sigma$ . Впервые было зарегистрировано значительное превышение мюонов с энергиями  $>5$  ГэВ, совпадающее с НВ, зарегистрированным мировой сетью нейтронных мониторов. Подробный статистический анализ пика [35] подтвердил неслучайную природу зарегистрированного превышения. Это короткое превышение (см. рис.5) в

точности совпадает по времени с пиком, полученным Тибетским нейтронным монитором [36], Тибетским солнечным нейтронным телескопом [37] и Баксанской наземной установкой [38]. Другая наземная установка GRAND, расположенная в западной полусфере, зарегистрировала НВ примерно на 10 минут раньше [39].

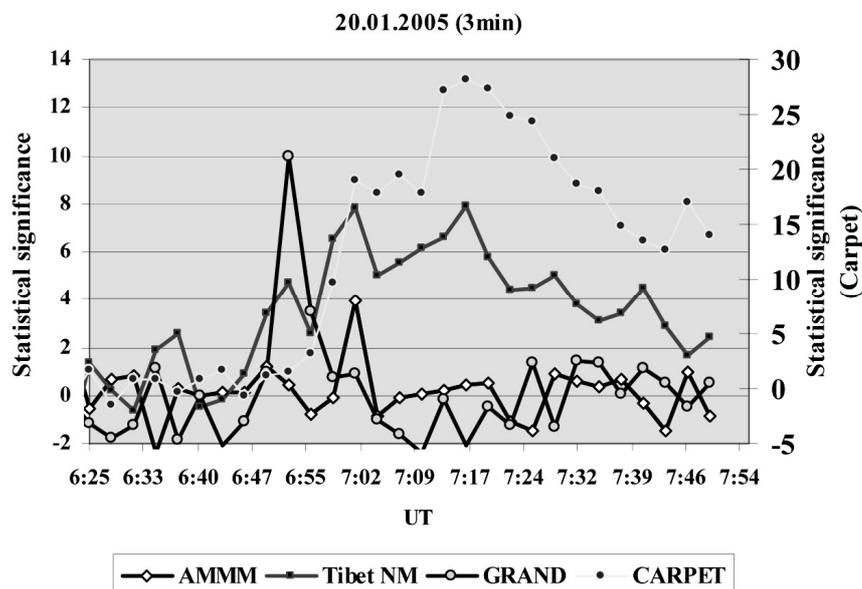


Рис.5. Временные ряды мюонных детекторов и нейтронных мониторов, зарегистрировавших GLE 20 января 2005 года. Пик в 7:02 был зарегистрирован также установкой CARPET (наиболее вероятная энергия ~10 ГэВ), Тибетским нейтронным монитором (наиболее вероятная энергия ~13 ГэВ) и AMMM (наиболее вероятная энергия >20 ГэВ).

Дифференциальные энергетические спектры протонов Солнечных космических лучей в 7:02–7:04 UT, измеренные спектрометрами на борту космических спутников и наземными детекторами частиц, имеют разброс в 3 порядка от 10 МэВ до 20 ГэВ и демонстрируют очень резкий излом при 700–800 МэВ. Энергетический спектр остается очень жестким вплоть до ~800 МэВ (с показателем спектра ~ -1) и достигает десятков ГэВ с показателем спектра ~ -5 ÷ -6.

## 6. Учебный центр космической погоды Отдела космических лучей

Артем Исаакович Алиханян, 100-летие со дня рождения которого отмечалось 9 июля 2008 года на Нор-Амбердской станции, был не только блестящим ученым, но и искусным педагогом. В начале 60-х, когда международные контакты ограничивались правительством, он инициировал знаменитые Нор-Амбердские школы, на которых обсуждались самые современные проблемы физики высоких энергий и элементарных частиц. На

них съезжались выдающиеся ученые и совсем молодые исследователи из разных стран. Это было “ноу-хау” 20-ого века – первый в мировой науке пример привлечения научной молодежи к фундаментальным исследованиям по физике и астрофизике высоких энергий. Эта традиция продолжается и в наши дни. Для обучения студентов в Отделе космических лучей создан учебный центр, где читаются лекции по предметам астрофизика высоких энергий, моделирование физических процессов, прикладная электроника. В специально оборудованных классах студентам предоставлена возможность изучать солнечные события, знакомиться с работой детекторов частиц и системой сбора информации.

В ОКЛ был разработан информационный продукт: Интерактивная Сеть Визуализации Данных (DVIN) для Арагацкого Центра Космической Погоды. Целью этого продукта является визуализация научной информации о радиационной обстановке на Земле, вызванной сильными солнечными бурями. На Всемирном конгрессе по информационному сообществу в Женеве в 2003 г. DVIN был объявлен лучшим в мире проектом в категории “электронная наука”. 10 июня 2005 г. модернизированный DVIN2 был объявлен победителем всеармянского конкурса “Маштоц 1600” за лучшее информационное содержание сайта. Конкурс был посвящен 1600-ой годовщине армянского алфавита, созданного Месропом Маштоцем.

Отдел космических лучей ежегодно организует международные симпозиумы по исследованиям в области Солнечной физики и Космических лучей. Так, с 26 по 30 сентября 2005 года 75 ученых и студентов из одиннадцати стран участвовали во второй конференции по Экстремальным Солнечным Событиям. Доклады, представленные во время конференции, содержали новые данные о последствиях мощных солнечных взрывов, об энергетических спектрах протонов, ускоренных на солнце, об анизотропии потоков ионов в околоземном пространстве. Эта информация необходима для тестирования моделей ускорения и транспорта “солнечных” частиц, а также для ранней диагностики солнечных бурь. Участники конференции ознакомились с функционированием мониторов АЦКП, с особенностями научных и конструктивных решений армянских физиков, использованных при создании Центра Космической Погоды. С 28 сентября по 3 октября 2008 г. в Нор-Амберде проходил Международный симпозиум по Предсказанию радиационных и геомагнитных бурь с помощью сети детекторов частиц (FORGES-2008, см. подробности в [40]).

## **7. Планы на будущее**

Сегодня Арагац – современный научный центр с развитой научной и технической инфраструктурой, которая постоянно модернизируется. Современные компьютеры посылают информацию о надвигающихся солнечных бурях в Ереванский вычислительный центр, а оттуда – коллегам по мировым научным сетям. Современная наука немыслима без широкого научного сотрудничества. Это особенно важно для физики космических лучей, в которой данные детекторов, расположенных на разных долготах и широтах,

объединяются для построения модели солнечно-земных связей. Арагацкий и Нор-Амбердский нейтронные мониторы интегрированы в мировую сеть нейтронных мониторов, солнечных нейтронных телескопов и мюонных детекторов.

Недавно 12 европейских стран решили сформировать совместную базу данных нейтронных мониторов (БДНМ), при поддержке европейской программы FP7. Совместный проект по мюонным детекторам в настоящее время выполняется в рамках сотрудничества с Германией, Швейцарией и Израилем. Отдел космических лучей выступил инициатором создания новой мировой сети детекторов частиц, названной SEVAN "Space Environment Viewing and Analysis Network" [41,42]. Комитет Организации Объединенных наций по космическим исследованиям рекомендовал этот проект к исполнению в рамках Международного Гелиофизического года. Целью сети SEVAN является развитие фундаментальных исследований по ускорению частиц в окрестностях Солнца и создания службы оповещения о катастрофических солнечных бурях. Детекторы нового типа будут одновременно измерять меняющиеся потоки вторичных космических лучей. Первые модули SEVANA проходят проверку в Арагацком Центре Космической Погоды в Армении, а также в Хорватии и Болгарии. В 2009 г. добавятся детекторы в Словакии и Индии. Исследовательские группы из этих стран участвовали в тренинге по работе детекторов и анализу данных во время симпозиума FORGES-2008.

Основная детектирующая единица сети SEVAN (см. рис.6) собрана из стандартных блоков ( $50 \times 50 \times 5$  м<sup>3</sup>) пластических сцинтилляторов. Между двумя идентичными слоями сцинтилляторов размерами в  $100 \times 100 \times 5$  см<sup>3</sup> (собранные из 4 стандартных блоков) расположены два свинцовых поглотителя размерами в  $100 \times 100 \times 5$  см<sup>3</sup> и толстый сцинтилляционный блок размерами в  $50 \times 50 \times 25$  см<sup>3</sup> (5 стандартных блоков). Светонепроницаемый кожух и фотоэлектронный умножитель расположены сверху, снизу и в промежуточном слое детектора. Входящие нейтральные частицы подвергаются ядерным реакциям в толстом (25 см) пластическом сцинтилляторе и рождают протоны и другие заряженные частицы. В верхнем 5 см-овом тонком сцинтилляторе эффективно регистрируются заряженные частицы; однако, там недостаточно вещества для ядерных взаимодействий нейтральных частиц. При прохождении нейтральной частицей верхнего тонкого (5 см) сцинтиллятора обычно сигнал не возникает. Отсутствие сигнала в верхних сцинтилляторах, совпадающее с сигналом в промежуточном сцинтиляторе, указывает на регистрацию нейтральной частицы. Совпадение сигналов с верхних и нижних сцинтилляторов указывает на прохождение высокоэнергичного мюона. Основанная на микроконтроллерах электроника и система предварительного анализа и записи данных обеспечивают регистрацию и хранение всех логических комбинаций сигналов для последующего off-line анализа и выработки on-line предупреждений об опасных состояниях космической погоды.

Сеть гибридных детекторов частиц для измерения нейтральных и заряженных потоков имеет следующие преимущества по сравнению с

существующими сетями детекторов, измеряющих вторичные космические лучи определенного типа:

- Увеличивается статистическая точность измерений;
- Исследуются разные частицы первичного космического излучения с жесткостями от 7 ГВ до 20 ГВ;
- Восстанавливаются спектры СКЛ и определяются положения изломов спектров;
- Классифицируются НВ события от “нейтронов” и “протонов”;
- Оцениваются и анализируются корреляционные матрицы различных потоков;
- Значительно увеличивается надежность предсказания космической погоды благодаря тому, что, в отличие от существующих сетей нейтронных мониторов и мюонных телескопов, регистрирующих один поток частиц, данная сеть регистрирует потоки частиц 3 типов.

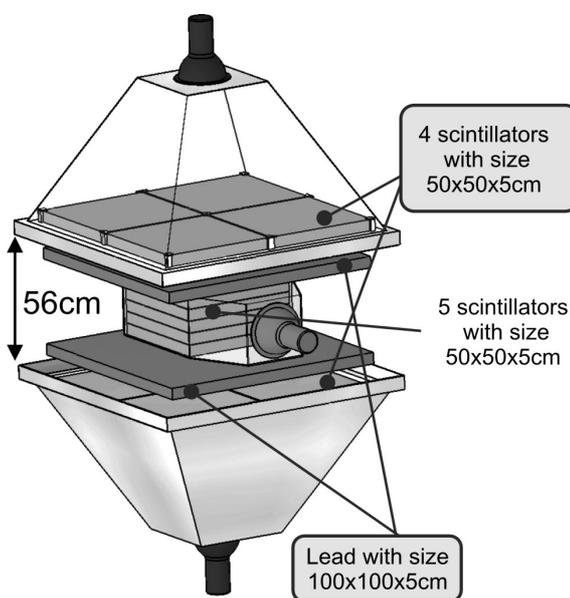


Рис.6. Схема основной модели сети SEVAN.

Новым направлением в астрофизических исследованиях является наблюдение небесных объектов одновременно на нескольких длинах волн (радио, оптическом, рентгеновском и гамма-диапазонах). Разнообразие дополняющих друг друга измерений дает достаточно информации для создания и проверки моделей происхождения галактик, взрывов сверхновых, сопутствующих выбросов гамма-излучения и, наконец, эволюции самой Вселенной. Дополнительная информация о частицах высоких энергий, поступающих в Солнечную систему, значительно обогащает информацию о наиболее энергетичных процессах во Вселенной.

Суммируя ситуацию с исследованиями спектров космических лучей в энергетическом интервале от  $10^4$  до  $10^{20}$  эВ можно заключить:

- Область низких энергий (кэВ – десятки ТэВ) достаточно хорошо изучена спектрометрами, расположенными на борту спутников, космических станций и воздушных шаров;
- Область излома спектров (от  $10^{14}$  до  $10^{17}$  эВ) была исследована за последние 40 лет с помощью наземных установок, покрывающих тысячи квадратных метров;
- Область сверхвысоких энергий (выше  $10^{19}$  эВ) после первых исследований на установках Haverah Park, Volcano-Ranch, Yakutsk, AGASA и HIGHRES досконально изучается в обсерватории AUGER-South, достоверность данных с которой будет подкреплена большим количеством наблюдений в ближайшее десятилетие.

Эта картина содержит 2 очевидных пробела в достаточно хорошо установленных областях  $10^{13}$ – $10^{14}$  эВ и  $10^{17}$ – $10^{19}$  эВ. Если первый пробел может быть заполнен с помощью планируемых долгосрочных баллонных экспериментов и экспериментами на космических станциях, то второй может быть заполнен с помощью установок в несколько квадратных километров.

Недавно физики Отдела космических лучей подготовили проект большой ШАЛовской установки, основной научной целью которой является измерение парциальных энергетических спектров космических лучей в плохо исследованной области энергий  $10^{17}$ – $10^{19}$  эВ. Проект предполагает создание большой установки для исследования указанной области энергий, используя уже действующие детекторы на склоне горы Арагац, а также установив новые гибридные детекторы частиц, измеряющие нейтральную и заряженную компоненту КЛ. Основной физической задачей является определение вклада сверхгалактических КЛ для получения последовательного описания всего спектра Галактических космических лучей после излома.

Энергетическая область  $10^{17}$ – $10^{19}$  эВ все еще плохо изучена и природа сверхгалактического происхождения космических лучей все еще остается тайной. Для измерения парциальных энергетических спектров (т.е. спектров “легких” и “тяжелых” ядер) необходимы большие площади для детектирования ШАЛ (по крайней мере – в несколько квадратных километров). Оптимальная высота для измерения максимального числа частиц ШАЛ ~2000 метров от уровня моря. На этих высотах ШАЛ с энергией  $10^{18}$  эВ рождает  $6 \times 10^8$  электронов. Поэтому, учитывая очень суровые климатические условия на Арагаце на высоте 3200 м над уровнем моря, мы предлагаем строить новую большую ШАЛ-овскую установку в районе Нор-Амберда и Бюракана. Мы планируем использовать новый гибридный детектор частиц, измеряющий электронную, мюонную и нейтронную компоненту ШАЛ на двух участках, расположенных на расстоянии ~3.5 км друг от друга, на территории Нор-Амбердской научной станции и в поселке Антарут. Задачами проекта являются:

- Разработка детекторов нового поколения для измерения нейтральных и заряженных потоков КЛ и определения их направления;

- Создание сети детекторов для продолжительной регистрации космических лучей в области  $10^{17}$ – $10^{19}$  эВ;
- Определение области излома тяжелых ядер;
- Поиск точечных источников космических лучей;
- Исследование “тонкой структуры” парциальных энергетических спектров;
- Сопоставление полученных результатов с данными по наблюдению рентгеновского и гамма-излучения, а также данных, полученных с помощью оптических телескопов.

Две сети детекторов частиц будут сформированы вокруг центральной части гибридных детекторов в  $\sim 20$  м<sup>2</sup>. Каждая установка будет пополняться по мере комплектования и сборки новых модулей. Третий участок будет сформирован детекторами ШАЛ-овских установок МАКЕТ-АНИ и ГАММА на Арагацкой станции. Полная площадь всех трех участков составляет  $\sim 0.35$  км<sup>2</sup>, что позволит регистрировать первичные частицы с энергиями вплоть до нескольких единиц  $10^{17}$  эВ (триггерные условия и соответствующая площадь для регистрации оси ШАЛ будут получены с помощью моделирования методом Монте-Карло). Большие события, запускающие 2 установки из 3-х, будут указывать на первичные энергии свыше  $10^{19}$  эВ. Площадь для регистрации оси ШАЛ будет составлять  $\sim 15$  км<sup>2</sup> и  $75$  км<sup>2</sup> соответственно для кругов радиусом 2 и 5 километров. Сборка модулей и их тестирование были начаты в 2008 году; при наличии финансирования к 2011 г. новая ШАЛовская установка будет оборудована достаточным числом модулей для расширения исследуемой области энергий до  $10^{18}$  эВ.

Исследование космических лучей в области энергий  $10^{17}$ – $10^{19}$  эВ является продолжением исследований в области  $10^{14}$ – $10^{17}$  эВ установками МАКЕТ-АНИ и ГАММА, что позволит получить парциальные энергетические спектры в области, простирающейся на 5 порядков, где сосредоточены почти все значительные особенности энергетических спектров. Ни одна действующая или планируемая наземная установка не охватывает эту очень важную и большую область: энергетический предел KASCADE  $\sim 10^{18}$  эВ, эксперименты HighRes и Auger начинаются с  $5 \times 10^{18}$  эВ. Поэтому предлагаемая установка даст уникальную информацию, расширяя хорошо исследованную область высоких энергий до загадочных сверхвысоких энергий.

## 8. Заключение

Коллектив Отделения физики космических лучей насчитывает около 80 человек, работающих на высокогорных станциях Арагац и Нор-Амберд и в центре анализа физической информации в Ереване. В коллективе много молодежи – студенты и недавние выпускники вузов. Научные исследования на Арагаце развиваются и армянские физики продолжают работу над разрешением загадок Вселенной.

Мы выражаем благодарность всем бывшим и настоящим сотрудникам Отдела космических лучей за их самоотверженную работу на горе Арагац, а также нашим коллегам из различных научных центров и всем, кто нас поддерживал.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Н.М.Кочарян.** Ереванский государственный университет. Научные труды, **12**, 23 (1940).
2. **A.I.Alikhanian, A.I.Alikhanov, S.Nikitin.** J. Phys., **9**, 175 (1945).
3. **A.I.Alikhanian, A.I.Alikhanov.** J. Phys., **9**, 167 (1945).
4. **C.D.Anderson, S.H.Neddermeyer.** Phys. Rev., **51**, 884 (1937).
5. **Н.Л.Григоров, В.С.Мурзин, И.Д.Рапопорт.** ЖЭТФ, **34**, 506 (1958).
6. **Н.М.Кочарян, Г.С.Саакян, З.А.Киракосян.** ЖЭТФ, **35**, 1335 (1958).
7. **А.И.Алиханян, А.И.Алиханов.** ЖЭТФ, **21**, 1023 (1951).
8. **C.Seife.** Science, **306**, 1281 (2004).
9. **Н.Л.Григоров, В.Е.Нестеров.** ЯФ, **11**, 1058 (1970).
10. **Kh.P.Babayan, N.L.Grigorov, E.A.Mamidjanian, et al.** Izv. AN SSSR, ser. fiz., **30**, 1652 (1965).
11. **М.О.Азарян, М.З.Зазян, Э.А.Мамиджян.** ЯФ, **26**, 141 (1997).
12. **В.В.Авакян, Э.А.Мамиджян, А.Г.Оганесян.** Изв. АН СССР, сер. физ., **40**, 1058 (1978).
13. **Т.Л.Асатиани, А.А.Чилингарян и др.** Изв. АН СССР, сер. физ., **45**, 323 (1980).
14. **А.И.Алиханян, В.В.Авакян, Э.А.Мамиджян.** Изв. АН СССР, сер. физ., **38**, 1993 (1974).
15. **Т.В.Данилова, А.М.Дунаевский, А.Д.Ерлыкин, и др.** Изв. АН СССР, сер. физ., **17**, 129 (1982).
16. **В.В.Авакян, Е.Б.Базаров, и др.** ВАНТ, серия Техника физического эксперимента, **5(31)**, 1 (1986).
17. **A.P.Garyaka, R.M.Martirosov, et al.** J. Phys. G: Nucl. Part., **28**, 231 (2002).
18. **A.A.Chilingarian.** Computer Physics Communications, **54**, 381 (1989).
19. **A.Chilingarian.** Neuricomputing, **6**, 497 (1994).
20. **T.Antoni, W.D.Apel, F.Badea, et al.** Nucl. Instr. Meth. A, **513**, 490 (2003).
21. **A.Chilingarian, G.Gharagozyan, G.Hovsepyan, et al.** Astroph. Journal, **603**, L23 (2004)
22. **A.A.Chilingarian, G.G.Hovsepyan, L.G.Melkumyan, et al.** Astropart. Phys., **28**, 58 (2007).
23. **T.Antoni, W.D.Apel, F.Badea, et al.** Astropart. Phys., **24**, 1 (2005).
24. **D.Horns, A.Rohring.** Proc. of the 27th ICRC, Hamburg, **1**, 1091 (2001).
25. **M.Aglietta, B.Alessandro, P.Antonioli, et al.** Astropart. Phys., **20**, 641 (2004).
26. **Y.Uchiyama, F.Aharonyan, T.Tanaka, et al.** Nature, letters, **449/4**, 10.1038/nature 06210 (2007).
27. **T.Takahashi, T.Tanaka, Y.Uchiyama, et al.** arXiv: 0708.2002v1 [astro-ph], 2002.
28. **F.A.Aharonyan, A.G.Akhperjanian, A.R.Bazer-Bachi, et al.** Astron. Astrophys., **464**, 235 (2007).
29. **R.Mirzoyan et al.** Nucl. Instr. Meth. A, **351**, 513 (1994)
30. **A.Chilingarian, L.Melkumyan, G.Hovsepyan, A.Reymers.** Nucl. Instr. Meth. A, **574**, 255 (2007)
31. **A.Chilingarian, K.Avagyan, V.Babayan, et al.** J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **29**, 939 (2003).

32. **A.A.Chilingarian, K. Arakelyan, K. Avagyan, et al.** Nucl. Instr. Meth. A, **543**, 483 (2005).
33. **N.K.Bostanjyan, A.A Chilingarian, G. Karapetyan, et al.** Advances in Space Research, **39**, 1456 (2007).
34. **A.A.Chilingarian, A.E.Reymers.** Astropart. Phys., **27**, 465 (2007).
35. **A.A.Chilingarian.** Advances in Space Research, doi: 10.1016/j.asr.2008.10.005 (2008).
36. **H.Miyasaka, E.Takahashi, et al.** Proc. of 29<sup>th</sup> ICRC, Pune, India, **1**, 241 (2005).
37. **F.R.Zhu, Y.Q.Tang, Y.Zhang, et al.** Proc. of the 29th ICRC, Pune, India, **1**, 185 (2005).
38. **S.N.Karpov, Z.M.Karpova, et al.** Proc. 29th ICRC, Pune, India, **1**, 193 (2005).
39. **C.D'Andrea, J.Poirier.** Geophys. Res. Lett. **32**, L14102, doi:10.1029/2005GL023336 (2005).
40. **A.A.Chilingarian.** Workshop, Space Research today, **173**, 125 (2008).
41. **A.A.Chilingarian, A.Reymers.** Ann. Geophys., **26**, 249 (2008).
42. **A.A.Chilingarian, K.Avakyan, K.Arakelyan, et al.** Earth, Moon, and Planets, DOI: 10.1007/s11038-008-9288-1 (2009).

ՏԻԵԶԵՐԱԿԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ  
ՀԱՅԱՍՏԱՆՈՒՄ

Ա.Ա. ՉԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ, Ռ.Գ. ՄԻՐԶՈՅԱՆ, Մ.Զ. ԶԱԶՅԱՆ

Արագած սարի վրա հետազոտությունները սկսեցին անցկացվել 1943 թ., երբ մի խումբ գիտնականներ Լենինգրադի Ֆիզիկա-Տեխնիկական ինստիտուտից Ն.Մ Քոչարյանի հետ համատեղ անցկացրեցին տիեզերական ճառագայման ասիմետրիայի չափումներ: Աշխատանքը լայն արձագանք գտավ, և 1942 թ. Ալիխանյան եղբայրները գիտական արշավախումբ կազմակերպեցին դեպի Արագած: Այդ ժամանակից ի վեր ֆիզիկոսներն Արագած սարի վրա կատարում են տիեզերական ճառագայթների հոսքերի ուսումնասիրություններ զանազան մասնիկներ գրանցող դետեկտորների միջոցով: Ներկայումս կատարվում են Տիեզերական Եղանակի հետազոտություններ Հայաստանում և արտասահմանում տեղադրված մասնիկ-ներ գրանցող դետեկտորների ցանցի, ինչպես նաև Արագածի և Երևանի Տիեզերական Եղանակի Ուսումնասիրության կենտրոնների դետեկտորների միջոցով:

COSMIC RAY RESEARCH IN ARMENIA

A.A. CHILINGARIAN, R.G. MIRZOYAN, M.Z. ZAZYAN

Cosmic Ray research on Mt. Aragats began in 1934 with the measurements of east-west anisotropy by the group from Leningrad Physical-Technical Institute and Norair Kocharyan from Yerevan State University. Stimulated by the results of their experiments in 1942 Artem and Abram Alikhanian brothers organized a scientific expedition to Aragats. Since that time physicists were studying Cosmic Ray fluxes on Mt. Aragats with various particle detectors: mass spectrometers, calorimeters, transition radiation detectors, and huge particle detector arrays registering protons and nuclei accelerated in most violent explosions in Galaxy. Latest activities at Mt. Aragats include Space Weather research with networks of particle detectors located in Armenia and abroad, and detectors of Space Education center in Yerevan.