

**ОСЕННЯЯ ШКОЛА «ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АДРОНОВ  
ПРИ СВЕРХУСКОРИТЕЛЬНЫХ ЭНЕРГИЯХ»**

**(Нор-Амберд, АрмССР, 25 сентября—2 октября 1988 г.)**

Осенние школы по физике взаимодействия адронов при сверхускорительных энергиях, организуемые Ереванским физическим институтом в Нор-Амберде (ЕрФИ), становятся традиционными. Они возникли как продолжение известных Нор-Амбердских школ А. И. Алиханьяна в 60-х годах и в связи со строительством на высокогорной станции Арагац комплекса

АНИ для изучения космических лучей сверхвысоких энергий, создаваемого совместно ЕрФИ и ФИАН СССР. К началу открытия школы накануне пуска находится установка «Макет АНИ» площадью  $220 \text{ м}^2$ , близка к завершению часть установки площадью  $120 \text{ м}^2$  для регистрации под землей ливневых мюонов, строится наземный ионизационный калориметр площадью  $1600 \text{ м}^2$ . Всё это участники школы смогли увидеть во время экскурсии на высокогорную станцию Арагац.

Организаторы нынешней школы решили посвятить ее проблемам гамма-астрономии. Школа собрала более 70 лекторов и слушателей. Открывая ее, директор Ереванского физического института А. Ц. Амадуни указал на большое место гамма-астрономии в рамках АНИ и выразил надежду, что несмотря на напряженную обстановку в Ереване, свидетелями которой стали многие приезжие участники школы, работа школы пройдет нормально. Забегая вперед, надо сказать, что эти надежды оправдались.

На школе были заслушаны несколько обзорных лекций. Лекция Б. И. Лучкова (МИФИ), открывающая научную программу школы, была посвящена гамма-астрономии в области энергий  $10^8$ — $10^{10}$  эВ. Этот интервал сейчас является наиболее важным разделом наблюдательной гамма-астрономии с хорошо отработанной методикой, важными астрофизическими результатами и перспективой будущих экспериментов. Здесь используется полетная аппаратура, устанавливаемая на высотных баллонах и спутниках, успешно применяется техника искровых камер. Среди результатов изучения диффузного гамма-излучения были отмечены сведения о соотношении атомарного и молекулярного водорода в разных частях Галактики, о составе холодных газовых облаков в созвездиях Ориона и Змееносца. Получены первые данные о градиенте космических лучей (к. л.) в Галактике. Оказалось, что интенсивность к. л. сравнительно слабо изменяется по радиусу  $R$  в галактическом диске, уменьшаясь не более чем в 2 раза при переходе от  $R \approx 5$  кпк к  $R \approx 15$  кпк. Неменьший интерес представляет изучение дискретных источников гамма-квантов. Среди открытых на спутнике COS-B двадцати пяти источников отождествлены только четыре. Природа остальных источников не ясна. Для уточнения местоположения этих источников и поиска новых готовятся эксперименты на орбитальных станциях: советско-французский эксперимент «Гамма» (1989 г.) и американский эксперимент GRO (1990—1991 гг.).

В обзорной лекции С. И. Никольский (ФИАН СССР) высказал точку зрения, что еще рано говорить о гамма-астрономии сверхвысоких энергий. Пока еще идут поиски методов надежного разделения гамма- и адронных ливней. Что может принести такое разделение, демонстрирует недавний результат, полученный Т. Уиксом и др. на зеркальном телескопе Уиппльской обсерватории. Применяв разделение гамма- и адронных ливней по форме их черенковской вспышки, там надежно разделили переменный гамма-компонент от пульсара Краба и постоянный — от его облака.

Известные и предполагаемые интенсивности потоков гамма-квантов сверхвысоких энергий, по-видимому, исключают применение зеркальных телескопов для исследования источников при энергиях выше  $\sim 10^{13}$  эВ, а также для поиска неизвестных источников. Необходимы всепогодные и всепогодные установки с широким углом обзора и эффективным подавлением фона от космических лучей. Рассматривая перспективы применения сцинтилляционных детекторов в таких установках, С. И. Никольский основывал свои выводы в значительной степени на результатах исследования гамма-ливней на Тянь-Шане. Был поднят вопрос о целесообразности детектирования в ливнях на горах как мюонов, так и адронов сравнительно низких энергий  $\gtrsim 1$  ГэВ для надежной идентификации гамма-ливней. Таким детектором могли бы служить сцинтилляторы под поглотителем толщиной 200—300 г/см<sup>2</sup>. Для успешной работы в гамма-астрономии сверхвысоких энергий нужны установки с площадью более  $10^5 \text{ м}^2$  на высотах 3—5 км над уровнем

моря, угловым разрешением не менее  $1^\circ$  и подавлением фона от адронных ливней не менее чем в  $\sim 100$  раз.

В обзоре Ф. А. Агаронява (ЕрФИ) рассматривались вместе проблемы гамма- и нейтринной астрономии сверхвысоких энергий. Это объединение естественно в связи с одинаковостью источников, механизмов образования и близостью методов регистрации гамма- и нейтринного излучений. Обсуждались возможные источники — космические ускорители протонов и ядер, а также механизмы ускорения частиц до сверхвысоких энергий. Рассматривались механизмы генерации и распространения нейтрино и гамма-квантов, возникающих при взаимодействии ускоренных протонов и ядер с окружающей тепловой плазмой и фотонным полем. Указывалось на важность генерации электронно-фотонных ливней, инициированных гамма-квантами в радиационно-доминированной плазме с точки зрения формирования спектров фотонов сверхвысоких энергий. Обсуждалось  $\gamma/P$ -отношение в области чернотельного обрезания спектров к. л. ( $E > 5 \cdot 10^{19}$  эВ) и указывалось, что при определенных предположениях об энергетической плотности радифона и магнитного поля в межгалактической среде вклад гамма-квантов может стать доминирующим. Тогда можно объяснить расхождение между данными по ШАЛ предельно высоких энергий («Мушиный глаз» и «Хавера-Парк»).

Обзор В. А. Догеля (ФИАН) был посвящен диффузному гамма-излучению. Результаты наблюдений указывают на то, что излучение галактического диска обусловлено взаимодействием к. л. с газом и свидетельствуют в пользу галактического происхождения к. л. с энергией  $\sim 10^9$  эВ. Слабый градиент интенсивности к. л. в Галактике и отсутствие корреляции этой интенсивности с плотностью источников удовлетворительно объясняется в модели с галактическим гало, обеспечивающим эффективное «перемешивание» к. л.

Интересной для гамма-астрономии является проблема объяснения природы неотожествленных гамма-источников, обнаруженных на спутнике COS-B. Обсуждались модели, в которых эти источники связываются с облаками межзвездного газа. Рассмотрены различные модели ускорения к. л. в облаках, что может объяснить также и сравнительно высокую интенсивность космических антипротонов и наблюдаемое повышение доли позитронов в электронно-позитронной компоненте к. л.

В докладе С. И. Григорьевой (ИЯИ АН СССР) приводился обзор экспериментальных и теоретических работ, связанных с областью энергий  $> 10^{17}$  эВ. Особое внимание уделено работам, посвященным дифференциальным энергетическим спектрам к. л. Показано, что взаимодействие протонов с реликтовым излучением приводит к появлению особенностей в этом спектре в форме «горба», обусловленного рождением  $e^+e^-$ -пар, затем — «провала» от тех же  $e^+e^-$ -пар, фотопионного «горба» и чернотельного обрезания, следующих друг за другом по мере возрастания энергии.

Явления, сопровождающие прохождение высокоэнергетичного гамма-излучения через фотонное поле, рассмотрены в докладе В. В. Сизова (НИИЯФ МГУ). Процессы фоторождения электронно-позитронных пар и обратного комптон-эффекта приводят к возникновению электронно-фотонных каскадов, многократно увеличивающих глубину проникновения гамма-излучения по сравнению с процессом «чистого» поглощения.

Каскадный процесс прохождения гамма-квантов с энергией  $E \geq 10^{19}$  эВ в геомагнитном поле земли рассмотрен в докладе Б. Л. Каневского (НИИЯФ МГУ). Вычислен спектр частиц в каскаде на границе атмосферы. Взаимодействие электронов и фотонов сверхвысоких энергий с магнитным полем Земли приводит к каскадному процессу и распределению энергии первичного гамма-кванта между частицами с энергией порядка  $10^{16}$  —  $10^{19}$  эВ, что сильно уменьшает эффект Ландау—Померанчука при развитии каскада в атмосфере.

Обнаружение ливней с энергией  $\sim 10^{20}$  эВ в первичном космическом излучении на установке Хавера-Парк может служить указанием на присут-

ствии гамма-квантов в первичном космическом излучении в области чернотельного обрезания.

Возможная роль фотоядерного механизма генерации космических гамма-квантов сверхвысоких энергий обсуждалась в докладе В. В. Балашова (НИИЯФ МГУ). Проведен анализ относительного вклада фотоядерного, фотомезонного и других известных механизмов генерации космических гамма-квантов применительно к диффузному межгалактическому фону и некоторым из известных дискретных источников, в том числе с учетом доли ядер железа в первичных космических лучах. Показано, что наиболее существенное влияние фотоядерного механизма на спектр космических гамма-квантов ожидается: для диффузного гамма-излучения — в интервале  $10^{16}$  —  $10^{18}$  эВ, для гамма-излучения от дискретных источников типа Лебедь X-3 — в районе  $10^{12}$  —  $10^{14}$  эВ.

По-прежнему привлекают внимание мюонные аномалии в ливнях от точечных источников типа Лебедь X-3, указания на которые получены в некоторых экспериментах. В докладе А. Ю. Ходжамиряна (ЕрФИ) рассмотрен вопрос о том, какие новые частицы могли бы инициировать эти ливни. Предложен класс моделей частиц, которые могли бы объяснить экспериментальные данные по этим аномалиям.

Формирование диффузного гамма-излучения в межгалактической среде обсуждалось в докладе В. В. Варданяна (ЕрФИ). Получено решение кинетического уравнения для космических лучей, взаимодействующих с реликтовым излучением. Показано, что формируемый этими гамма-квантами спектр фотонов сверхвысоких энергий может оказаться существенным в области энергии «чернотельного обрезания» спектра к.л. Это осуществляется в случае, если плотность энергии радиофотонов во Вселенной не превосходит величины  $\sim 10^{-13}$  эВ/см<sup>3</sup>. В рамках этой модели можно объяснить расхождение между данными установок «Мушиный глаз» и «Хавера-Парк» по широким атмосферным ливням (ШАЛ) предельно высоких энергий.

Экспериментальные возможности исследования взаимодействий фотонов сверхвысоких энергий как диффузного происхождения, так и от дискретных источников типа Лебедь X-3 рассматривались в докладе В. В. Саакяна (ЕрФИ). Обсуждались экспериментальные возможности изучения адронов и мюонов высоких энергий в гамма-ливнях с помощью установок типа АНИ и «ДЮМАНД».

В докладе А. М. Атояна (ЕрФИ) была предложена модель, согласно которой наблюдаемые в составе космических лучей позитроны высоких энергий ( $E \gtrsim 10$  ГэВ) обязаны своим происхождением взаимодействию гамма-квантов с оптическим и ультрафиолетовым излучением непосредственно в окрестности локальных источников, ответственных за диффузное космическое гамма-излучение с  $E_\gamma \gtrsim 10^{15}$  эВ.

Большой интерес участников школы вызвали доклады, в которых были приведены результаты последних экспериментов по гамма-астрономии и физике космических лучей высоких энергий.

Г. Б. Христиансен (НИИЯФ МГУ) рассмотрел результаты исследования бинарных систем методами ШАЛ при энергиях выше  $10^4$  эВ. Исследования источника Лебедь X-3, проведенные в течение последних нескольких лет во многих странах, по-видимому, показали существенную переменность этого источника. Разброс данных по интенсивности, достигающий фактора 3—5, связан не только с изменением самой интенсивности в различные периоды наблюдений, но и с различными методами определения первичной энергии к.л. на различных установках. На установке ШАЛ МГУ с 1984 г. по 1988 г. наряду с Лебедем X-3 изучались и другие бинарные системы в этом созвездии: Лебедь X-1 и Лебедь X-2. Было замечено, что Лебедь X-1 проявлял повышенную активность в период 1985—1986 гг. В докладе отмечалась большая, с точки зрения гамма-природы регистрируемого излучения, плотность мюонного сопровождения ШАЛ, попадающих в ячейку Лебеда X-1.

Более подробно результаты измерений на установке МГУ были рассмотрены в докладе Г. В. Куликова. За весь период наблюдения избыточный поток ливней с  $s \geq 1,3$  от источников Лебедь X-1, Лебедь X-3 и Геркулес X-1 оказался на уровне  $\sim 2,5\sigma$ . Наряду с этим выявлены периоды повышенной активности источников Лебедь X-1, Лебедь X-3 и Лебедь X-2. Для Лебеда X-1 и для старых ливней обнаружен избыточный поток как в прямом потоке ( $4,2\sigma$ ), так и при фазовом анализе с периодом 5, 6 суток ( $\sim 6\sigma$ ) в период наблюдений 16.10.85 — 9.9.86. Что касается источников Лебедь X-3 и Лебедь X-2, то избыточный поток для них в ливнях с  $s \geq 1,3$  наблюдался только при фазовом анализе: с периодом 34 дня для источника Лебедь X-3 на уровне  $3,8\sigma$  (время наблюдения 1.11.84 — 23.6.85) и с периодом 9,8 суток для источника Лебедь X-2 на уровне  $4,4\sigma$  (время наблюдения 18.1.86—8.6.86). Причем фаза максимума излучения источника Лебедь X-2 соответствует периастру этой двойной системы.

В докладе Г. С. Мартирояна (ЕрФИ) приводятся результаты поиска адронных групп в направлении источника Лебедь X-3 по данным установки ПИОН за 1984—1985 гг. Данные 1985 г. указывают на статически значимый избыток в ячейке с размерами  $30^\circ \times 30^\circ$ , охватывающей координаты Лебеда X-3. Наблюдаемый эффект усиливается с увеличением числа адронов в группе. Фазовый анализ с периодом  $P_0 = 4,8$  ч показывает наличие статически значимого пика в фазовом интервале 0,20—0,25.

Два доклада Г. В. Лупенко (НИИЯФ МГУ) и А. И. Рутковского (НИИЯФ МГУ) были посвящены результатам поиска гамма-излучения от сверхновой (СН) 1987 А в экспериментах, проведенных на орбитальных комплексах «Космос-1870», «Салют-1686» в 1987—1988 гг. В качестве детекторов использовались кристаллические сцинтилляторы NaI (Тl) и CsI, окруженные активной антисовпадательной защитой из пластика. Гамма-спектрометр на комплексе «Космос-1870» регистрировал гамма-кванты в диапазоне  $E = 0,4 - 7$  МэВ, а на «Салюте-7» и «Космос-1686» — в диапазоне 1,5 — 64 МэВ. Как известно, до последнего времени не было однозначного ответа на вопрос о зарядовом составе первичного космического излучения при энергиях  $\geq 1$  ТэВ, что связано с методическими трудностями измерений в этой области энергий. Наиболее дискуссионным является вопрос об уменьшении доли протонов в этой области энергий, поставленный еще в 60-е годы экспериментами на спутниках серии «Протон».

Для исследования этой проблемы в 1984 — 1986 гг. в НИИЯФ МГУ были осуществлены два эксперимента по изучению первичного космического излучения с энергией  $10^{12} - 10^{14}$  эВ при помощи аппаратуры «Сокол», установленной на борту ИСЗ «Космос-1543» и «Космос-1713». Результаты этих измерений были сообщены в докладе Л. А. Хейна (НИИЯФ МГУ). Экспериментальный материал составил около  $\sim 2 \cdot 10^4$  событий, в том числе  $\sim 2 \times 10^3$  событий, использованных для дальнейшего анализа, который показал, что зарядовый состав ПКИ не претерпевает резких изменений, по крайней мере, до энергий  $\sim 20$  ТэВ. При этом доля протонов составляет 35—40 %. В статистически обеспеченном диапазоне энергий 2 — 20 ТэВ показатели спектров всех зарядовых компонент находятся в пределах  $1,7 \pm 0,1$ .

Результаты эксперимента UA7 на коллайдере ЦЕРН по измерению инклюзивных спектров фотонов в  $p\bar{p}$ -столкновениях при  $s^{1/2} = 630$  ГэВ и его следствия для физики взаимодействия частиц и астрофизики были проанализированы в докладе А. Д. Ерлыкина (ФИАН). Было обращено внимание на значительный (в  $\sim 1,5$  раза) рост среднего поперечного импульса фрагментационных фотонов в интервале энергий  $s^{1/2} = 53-630$  ГэВ. Вопреки выводам авторов UA7 утверждается, что данные этого эксперимента с учетом области малых  $p_t < 0,1$  ГэВ/с свидетельствуют в пользу нарушения скейлинга.

Парциальный коэффициент неупругости  $K_{\gamma}^{p\bar{p}}$  ( $s^{1/2} = 630$  ГэВ) равен  $0,193 \pm 0,004$ . Получена оценка количества вещества  $z$ , проходимого косми-

ческими лучами в Галактике при энергии  $\sim 5 \cdot 10^{14}$  эВ в предположении, что электромагнитные ливни, зарегистрированные на Тянь-Шане, происходят от диффузного гамма-излучения:  $1,87 \pm 0,78$  г см<sup>-2</sup>. Полученная большая величина  $z$ , а также ряд других аргументов свидетельствуют в пользу того, что обнаруженные на Тянь-Шане электромагнитные ливни не являются продуктом диффузного гамма-излучения, а происходят от неотожествленных дискретных источников.

Большое внимание на школе было уделено методическим вопросам гамма-астрономии: разделению электромагнитных и ядерных ливней, новым конструкциям детекторов, проектируемым и создающимся установкам.

Как было отмечено в докладе В. Г. Сенициной (ФИАН), в настоящее время происходит переход от эпизодических экспериментов в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий к систематическим исследованиям небесной среды. Поиск и исследование локальных источников гамма-квантов с энергией  $10^{12} - 10^{14}$  эВ путем регистрации электронно-фотонных ливней в атмосфере ведется в условиях много большего по потоку, практически изотропного фона от первичных протонов и ядер.

Зеркальная телескопическая система «Гамма» создана в 1987 г. на тяньшаньской высокогорной научной станции ФИАН как полномасштабный макет установки «Шалон» (последняя будет иметь систему автоматического «гидирования» источников).

В докладе В. И. Галкина (НИИЯФ МГУ) рассматривались задачи разделения электромагнитных и ядерных ливней по их временным характеристикам с помощью широкоугольных и быстрых детекторов или по угловым характеристикам матрицами узкоугольных и медленных детекторов. Расчеты проводились методом математического моделирования применительно к установкам типа АНИ, расположенным на уровне гор. Показано, что использование многомерных критериев отбора позволяет в 4–5 раз обогатить исходную совокупность событий гамма-ливнями, если известна энергия первичных частиц. Однако и этот результат пока что получен без учета возможных экспериментальных ошибок.

Сходные вопросы отбора гамма-ливней по угловым характеристикам черенковского излучения применительно к зеркальным детекторам КраО и Уиппской обсерватории рассматривались в докладе А. К. Конопелько (АГУ). Анализировалась эффективность параметров ориентации и формы пятна.

В докладе Р. А. Антонова (НИИЯФ МГУ) предлагалась идея установки для поиска источников гамма-квантов в области  $(1-3) \cdot 10^{12}$  эВ с угловой апертурой  $\sim 1$  ср и точностью определения направления на источник  $0,2 - 0,3^\circ$ . Такая установка могла бы сочетать исследования заранее выбранных источников при хорошем отношении сигнал/фон с поиском неизвестных объектов в широком участке неба. Предложенная методика основана на широко используемом определении направления ливня путем измерения относительных запаздываний импульсов в нескольких ( $\geq 3$ ) широко разнесенных ( $\sim 150$  м) детекторах. Однако в отличие от обычных сцинтилляционных детекторов заряженных частиц предлагалось использовать детекторы черенковского света.

В возникшей после этого доклада дискуссии С. И. Никольский заметил, что хорошая угловая точность на установках подобного типа может быть получена только при локации оси ливня с точностью  $\lesssim 20$  м, для чего трех детекторов, разнесенных на 150 м, явно недостаточно. Необходимы как минимум 19 зеркал на этой площади, что по сложности и стоимости уже сравнимо со сцинтилляционными установками. Более высокий порог последних в значительной степени компенсируется круглосуточным характером их работы.

В последние годы внимание космиков все больше обращается в сторону водных детекторов с целью их использования в гамма-астрономии. Обсуждались возможности установки ДЮМАНД в этом направлении, разрабаты-

вается проект ГРАНД. На школе этим вопросам был посвящен доклад А. А. Петрухина (МИФИ). Типичный водный детектор для гамма-астрономии представляет собой объемную сетку из ФЭУ, помещенную в воду на глубину до нескольких десятков метров. Такая сетка может регистрировать отдельно электроны, адроны и мюоны ШАЛ. В этом, а также в меньшей глубине погружения ее существенное преимущество перед ДЮМАНДОМ, регистрирующим только мюоны. Перед наземными установками ее преимущества заключаются в одинаковости всех детекторов, независимости условий регистрации от места попадания оси ливня, возможности измерения полной энергии компонент ШАЛ. А. А. Петрухин описал прототип такого водного детектора под названием НЕВОД, созданный в МИФИ.

Для подводных черепковских детекторов мюонов в докладе В. А. Царева (ФИАН) была предложена светофокусирующая система — отражатель параболического типа (ОПТ). Черепковский детектор, состоящий из ОПТ и ФЭУ, помещенного в его фокусе, обладает рядом полезных черт: для пучка мюонов, движущихся в воде параллельно оси ОПТ, увеличивается светосбор, улучшается отношение сигнал/фон.

В докладе Д. И. Минасяна (ФИАН) рассказывалось о технологии изготовления таких ОПТ и результате проверки свойств предложенного детектора в пучке электронного ускорителя ФИАН. Проверка подтвердила целесообразность использования ОПТ в таких водных черепковских детекторах.

В докладе О. И. Савуна (НИИЯФ МГУ) приведены данные об устройстве и характеристиках сцинтилляционного детектора для установки ШАЛ на станции «Баксан». В докладах В. М. Каткова и А. Б. Номероцкого (ИЯФ СОАН) предлагалось использовать свойства монокристаллов для детектирования сверхжестких фотонов от локальных источников и рассказывалось об использовании стримерных трубок в координатных детекторах большой площади. Еще один проект полетного прибора с названием ГАММА-400 предлагался в докладе М. И. Фрадкина (ФИАН). Этот гамма-телескоп нацелен на работу в необследованном еще интервале энергий 1–400 ГэВ, сшивающем области внеатмосферных и наземных исследований.

Проектам больших наземных гамма-астрономических установок, создаваемых за рубежом и в нашей стране для работы в области энергий  $10^4$  —  $10^{15}$  эВ, было уделено внимание в уже упоминавшемся докладе Г. Б. Христиансена. Были отмечены основные особенности установок Чикагского (США) и Гейдельбергского (ФРГ) университетов, Ла-Пальма и Карлсруэ (ФРГ), установок THEMISTOCLE во Франции, ШАЛ-1000 в СССР. Общими чертами для них являются: большая плотность наземных детекторов заряженных частиц, большая светосила, большая площадь мюонных детекторов, улучшенная угловая точность.

О создающейся в составе комплекса АНИ гамма-астрономической установке ГАММА рассказал Р. М. Мартиросов (ЕрФИ). Ее особенностью является большая площадь подземных мюонных детекторов ( $\sim 300$  м<sup>2</sup> на первом этапе), хорошие точности определения параметров ливней, большая высота (3250 м над уровнем моря) и соответственно возможность работать при более низких первичных энергиях.

Реализация всех запланированных в стране проектов является первоочередной задачей, так как в развитии гамма-астрономии, как и в физике высоких энергий, ощущается отставание отечественной экспериментальной базы. Это чувствовалось и в недостатке новых экспериментальных результатов, доложенных на школе, и в преобладании теоретических докладов.

В заключение Э. А. Мамиджян подытожил работу школы и затронул вопросы организации будущих школ. Оргкомитет решил провести следующую школу в 1990 г. с привлечением зарубежных крупных специалистов со следующей тематикой — новая физика в к.л. при тэраэлектрон-вольных энергиях.

*А. Д. Ерлыкин, Э. А. Мамиджян, В. А. Царев*