


Препринт ВФИ 1301(87)-90

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՏԻՏՈՒՏ  
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
YEREVAN PHYSICS INSTITUTE



Ջ. Ա. ՄԱՄԻԺՅԱՆ, Տ. Ի. ՆԻԿՈԼՅՍԿԻ

ИССЛЕДОВАНИЕ АДРОНИЗАЦИИ КВАРКОВ В  
ЭКСПЕРИМЕНТЕ АНИ

ЦНИИ атоминформ  
ЕРЕВАН-1990

Նախնատիպ ԵրՃԻ-1301(87)-90

**Է.Ա.ՄԱՄԻՉԱՄՅԱՆ, Ա.Ի.ՆԻԿՈՒՍԿԻ**

**ՔԱՆԿՆԵՐԻ ՀԱԳՐՈՆԻՉԱՑՄԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՆԻ  
ԳԻՏԱՓՈՐՁՈՒՄ**

Նկարագրված է ԱՆԻ փորձարարական համալիրի կարգավիճակը: Քննարկված է համալիրի վրա դրված գիտական ուսումնասիրությունների ծրագրի արդիականությունը 90-ական թվականներին:

Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտ

Երևան 1990



Preprint YERPHI-1301(87)-90

E.A. MAMIJANIAN, S.I. NIKOLSKI

QUARK HADRONIZATION INVESTIGATIONS  
IN THE "ANI" EXPERIMENT

The status of the ANI experiment is described. The urgency of the research programs to be realized at the complex in the 90-ies is considered.

Yerevan Physics Institute  
Yerevan 1990

Препринт ЕФИ I30I(87)-90

Э.А.МАМИДЖАНЫН, С.И.НИКОЛЬСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ АДРОНИЗАЦИИ КВАРКОВ В  
ЭКСПЕРИМЕНТЕ АНИ

Описывается статус экспериментального комплекса АНИ.

Рассматривается актуальность программы научных исследований на комплексе в 90-ые годы.

Ереванский физический институт

Ереван 1990

## ВВЕДЕНИЕ

Предложение о создании комплекса экспериментальных установок на г.Арагац для исследований космических лучей в области энергий  $10^{15}$ - $10^{18}$  эВ (проект "АНИ") было высказано еще в 1979г.

[1]. Подробное изложение физического проекта "АНИ" и его обоснование опубликовано в 1982г. [2]. С тех пор прошло много лет и, хотя область энергий и круг проблем, на который нацеливался проект "АНИ", остаются по-прежнему актуальными для экспериментального исследования, многое из намеченного ранее целесообразно рассмотреть вновь, возможно иначе расставив акценты и приоритет различных экспериментов, а также дополнив новыми.

На г.Арагац выполнена значительная часть строительно-монтажных работ, но намеченный ранее срок пуска в эксплуатацию всего комплекса по множеству обстоятельств задерживается. Это сократило время экспериментальных исследований, опережающих эксперименты на встречных протон-антипротонных пучках  $8 \times 8$  ТэВ и  $20 \times 20$  ТэВ, и повысило интерес к нуклон-ядерным неупругим столкновениям, что требует как более детальных изме-

рений, так и надежной идентификации протонов и различных ядер в первичном космическом излучении.

За истекшее десятилетие реализации проекта "АНИ" резко повысился интерес к астрофизике сверхвысоких энергий и одним из первых экспериментов на комплексе "АНИ" намечается измерение диффузного потока гамма-квантов с энергией  $10^{14}$ - $10^{15}$  эВ. По мере накопления статистики из различных областей космического пространства и отработки методических вопросов объектом поиска станут локальные гамма-источники. В публикациях [1,2] возможности исследований первичного гамма-излучения вообще не обсуждались.

Для практического развития методов сочетания в едином эксперименте рентгеноэмульсионных камер с ионизационными и сцинтилляционными детекторами на Арагацкой и Тянь-Шаньской горных станциях были созданы установки Макет АНИ [3] и АДРОН [4] с эффективными площадями 240 и 160 м<sup>2</sup>, соответственно, для изучения каскадов высокой энергии и стволов ШАЛ с первичной энергией  $E_0 \geq 10^3$  ТэВ. Интересной задачей для установки Макет АНИ помимо моделирования центральной наземной части АНИ является исследование характеристик многоствольных ливней, рожденных в результате жестких процессов генерации адронных струй в первичных актах взаимодействия. Как показывают теоретические оценки [5], критерии отбора событий на уровне наблюдения составляют  $\Delta R > 5$  м,  $X_{стр.} > 0,1$ ,  $E_0 > 10^3$  ТэВ, где  $\Delta R$  - пространственное расхождение стволов, соответствующих поперечным импульсам струй  $P_{стр.} > 50$  ТэВ и значению псевдо-быстрот  $\eta > 1$  (на ускорителе достигнуто значение  $|\eta| < 1,1$ )  $X_{стр.}$  - переменная Фейнмана. Относительная частота регистрации таких событий на этой установке составляет около 1%, что при

времени экспозиции  $\sim 0,5$  лет позволяет почувствовать значения 50–100 мб для сечения рождения жестких струй в  $pp$  взаимодействиях. Кроме этого установка позволяет идентифицировать зарядовый состав родительских адронов струй по наличию (или отсутствию) выделенных кластеров ионизации в адронном блоке установки. Реализация данной методики исследования струйных процессов рождения в эксперименте АНИ значительно увеличит достоверность измерения сечения жестких процессов при  $p_{\perp} > 50$  ГэВ/с на основе более полного анализа адронного и мюонного компонентов ШАЛ.

За несколько лет эксплуатации установки АДРОН было показано, что область энергий нуклон-ядерных столкновений выше  $10^{16}$  эВ не является "великой пустыней", где для описания неупругих адрон-ядерных столкновений можно ограничиться экстраполяцией характеристик неупругих столкновений и процесса множественного рождения вторичных адронов, изученных на ускорителях при меньших энергиях [6]. Если, как это сейчас предполагается, резкие изменения во фрагментационной части разлетающихся частиц при возрастании энергии сталкивающихся нуклонов до  $10^{16}$ – $10^{17}$  эВ связаны с фундаментальным пространственно-временным параметром обесцвечивания кварков в процессе их адронизации, то это может стать новым этапом в физике элементарных частиц. Во всяком случае резкие изменения энергетического спектра вторичных адронов в области энергии налетающих протонов  $\gtrsim 10^{16}$  эВ требуют для однозначных выводов об энергетическом спектре первичных космических лучей большей информации о стволах широких атмосферных ливней хотя бы в области энергий, доступной для комплекса "АНИ". Без экспериментального исследования, каким частицам передана энергия первичного протона вместо нуклонов

и пионов фрагментационной области множественной генерации. Так как нужны не только данные о нуклон-нуклонных столкновениях, но и о ядро-ядерных взаимодействиях для первичных ядер с энергией выше  $10^{17}$  эВ, то ускорительные данные о таких неупругих столкновениях будут получены не так скоро. Собственная информация из экспериментов с разнесенными по площади детекторами электронов и мюонов типа ШАД-1000 не позволяет получать однозначные характеристики начальных актов образования широких атмосферных ливней. Это явствует из вывода работы [7], где на основе анализа экспериментальных данных Якутской установки ШАД утверждает применимость модели кварк-глюонных струн для описания широких атмосферных ливней с первичной энергией до  $10^{19}$  эВ.

Предлагаемое здесь обоснование экспериментального комплекса "АНИ" учитывает современное состояние различных проблем физики космических лучей и высоких энергий и является попыткой показать:

- взаимосвязь ядернофизических и астрофизических аспектов исследований космических лучей и гамма-излучения сверхвысоких энергий;

- соответствие астрофизических и космофизических возможностей комплекса "АНИ" современным задачам экспериментального исследования космических лучей и гамма-излучения сверхвысоких энергий, а также возможности развития комплекса;

- целесообразность экспериментального исследования неупругих столкновений адронов и ядер в космических лучах сверхвысокой энергии, опережающего эксперименты на коллайдерах LHC и SSC;

- необходимость новых исследований энергетического спектра

и ядерного состава космических лучей в интервале энергий  $10^{15}$ - $10^{18}$  эВ, предваряющих измерения на "ШАЛ-1000";

I. Экспериментальные проблемы исследования первичного гамма-излучения сверхвысокой энергии.

Гамма-излучение высокой и сверхвысокой энергии по своему происхождению связано с космическими лучами. Локальные источники гамма-квантов представляют собой области ускорения и концентрации космических лучей. Диффузное гамма-излучение обусловлено либо многими неизвестными и слабыми локальными источниками, либо результатом взаимодействий космических лучей с межзвездным газом в нашей Галактике, определяя тем самым область распространения Галактических космических лучей.

Таким образом, в отличие от "безадресных" космических лучей гамма-излучение связывает процессы ускорения и взаимодействия протонов и ядер высокой и сверхвысокой энергии с различными астрофизическими объектами и областями космического пространства.

Диффузный поток и локальные источники гамма-квантов высокой энергии ( $10^8$ - $10^{10}$  эВ) наблюдаемы с помощью аппаратуры, устанавливаемой на искусственных спутниках Земли. Однако область энергий гамма-квантов выше  $10^{12}$  эВ - область сверхвысоких энергий - из-за малой интенсивности оказывается недоступной для исследований за пределами атмосферы. Наблюдения в глубине атмосферы по каскадным ливням связаны с дополнительными трудностями вследствие большого фона от космических лучей. Разделение широких атмосферных ливней от протонов и ядер космических лучей и ливней от первичных гамма-квантов в глубине атмосферы может осуществляться по различию их состава. В среднем, в ливнях от гамма-квантов содержится в 40-100 раз меньше

адронов и мюонов, чем в ливнях от космических лучей.

Единственная до настоящего времени экспериментальная оценка диффузного потока гамма-квантов сверхвысокой энергии была получена в работе [8], в которой широкие атмосферные ливни от первичных гамма-квантов выделялись из общего потока ливней как по отсутствию в ливне мюонов, так и по отсутствию в стволе ливня адронов. Рассматривались лишь случаи, когда прохождение ствола ливня через калориметр подтверждалось наличием в верхней части калориметра электронно-фотонного компонента ствола. Первый критерий (см. рис. 1а) оказался недостаточным для исключения всех случаев регистрации ливней, образованных протонами космического излучения из-за недостаточной площади детекторов мюонов. На рис. 1б показано, что значительная часть "безмюонных" ливней (косые и прямые крестики) содержит адроны в стволе ливня. Таким образом требование отсутствия адронного компонента в стволе ливня оказалось определяющим для величины диффузного потока гамма-квантов с энергией выше 400 ТэВ, которая составляет  $\sim 4 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . Эту величину следует считать верхним пределом для диффузного потока не столько из осторожности к полученным впервые данным, сколько из-за соотношения этого потока и диффузного потока гамма-квантов с энергией выше  $10^6$  эВ. Энергетический спектр в этом интервале энергий  $F(>E_\gamma) = 10^{-6} (E_\gamma / 1 \text{ ТэВ})^{-1,15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$  не соответствует ожидаемому для диффузного потока от взаимодействия космических лучей с межзвездным газом, а подобен показателю энергетического спектра от локальных источников гамма-квантов.

Таким образом эксперимент, нацеленный на исследование диффузного гамма-излучения, должен последовательно решать две

задачи: выделения из во много раз большего потока частиц той же энергии первичных гамма-квантов и выделения гамма-квантов от локальных известных и неизвестных источников из истинно диффузного потока. Последняя задача потребует длительных измерений и дополнительных исследований. Во-первых, в диффузном потоке гамма-квантов всегда могут остаться гамма-кванты от неизвестных внегалактических источников. Во-вторых, при неразличимости для наземных установок первичных гамма-квантов и электронов нужны экспериментальные данные об энергетическом спектре электронов в области энергий  $10^2-10^3$  ТэВ. По современным данным [9] энергетический спектр электронов в области энергий 10-50 ГэВ может быть представлен как  $F(>E) = 3,4 \cdot 10^{-2} (E/1 \text{ ГэВ})^{-2,2}$ , что при экстраполяции на большие энергии приводит к изотропным потокам электронов, превышающим ожидаемые для истинно диффузного потока гамма-квантов при энергиях  $1-10^3$  ТэВ.

Эксперимент "Гамма" на г.Арагац предполагается начать в 1992 году, как первый эксперимент комплекса АНИ. Целью первого года эксперимента является измерение в полосе склонений  $10^\circ-75^\circ$  потока первичных гамма-квантов с энергией  $E_\gamma \geq 500$  ТэВ путем выделения в общем потоке широких атмосферных ливней с известным числом электронов и положением оси ливня в пространстве "безмюонных" ливней. Площадь мюонных детекторов составит  $\sim 200 \text{ м}^2$  (рис.2), что вчетверо превосходит площадь детекторов в эксперименте [8]. Это позволяет надеяться на уточнение результатов указанных измерений, используя лишь мюонный критерий разделения ливней, вызванных первичными протонами и гамма-квантами. Детекторы электронно-фотонного компонента ливня, равно-

мерно размещенные на площади  $\sim 7 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ , позволят для всех ливней с осью, проходящей в пределах контролируемой спинтилляционных детекторами площади, определять с ошибкой  $\leq 20\%$  полное число электронов в ливне, а значит и энергию первичной частицы. Направление прихода ливня измеряется по относительному запаздыванию электронов в разнесенных по площади спинтилляционных детекторах с ошибкой  $\leq 3^\circ$ .

Здесь следует отметить два обстоятельства. Информация, накапливаемая в этом эксперименте, является частью информации, заносимой в банк данных систематически во всех последующих экспериментах. Уже эти данные могут быть использованы для анализа, например, энергетического спектра и ядерного состава первичного космического излучения в районе "излома" спектра. Вторым обстоятельством является то, что уже на этом начальном этапе исследования эксперимент "Гамма" сопоставим с лучшими имеющимися гамма-астрономическими установками для соответствующего энергетического интервала.

Рассмотрим результативность эксперимента "Гамма", предположив, что примененный критерий обеспечит выделение потока гамма-квантов с энергией  $E_\gamma \geq 500 \text{ ТэВ}$  и интенсивность  $\sim 1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ст}^{-1}$ , в соответствии с данными работы [6]. Это означает, что будут получены данные об энергии и направлении прихода  $\sim 10^3$  гамма-квантов в интервале склонений, соответствующем географическому положению г.Арагац ( $10^\circ - 60^\circ$ ) или в угле  $\sim 10^\circ$  космического обзора  $\sim 1 \text{ ср} \approx 1,3 \cdot 10^3$  квантов. Выделение гамма-квантов из неясных локальных источников может быть достигнуто с помощью статистически незначимому избытку логарифмически усредненных данных. Однако величина мощности гамма-квантов

угла определяется не только угловым разрешением установки, но и статистикой событий. При числе ливней  $N$  в угле обзора  $\sim I$  ср величину ячейки телесного угла целесообразно выбирать так, чтобы  $N\theta^2 = \bar{n} > I$ . Это условие связано с тем, что значимый избыток потока от локального источника гамма-квантов в малой ячейке телесного угла определяется как  $n_i - \bar{n} \geq \alpha\sqrt{\bar{n}}$ . Уменьшение  $\bar{n}$  по сравнению с  $I$  неэффективно под корнем, а увеличение при этом числа ячеек в анализируемом статистическом множестве ведет к увеличению коэффициента  $\alpha$  - числа стандартных отклонений для статистически значимого избытка потока гамма-квантов.

На начальном этапе измерений аппаратурная величина  $\theta^2 = 0,002$  и ожидаемое  $\bar{n}$  равно 2,6 для ливней по числу электронов соответствующих энергии гамма-квантов  $E_\gamma \geq 500$  ТэВ. Как следует из приведенных выше соотношений неизвестные локальные источники при интенсивности потока гамма-квантов более  $3 \cdot 10^{-15}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$  для энергии гамма-квантов  $E_\gamma \geq 500$  ТэВ могут быть обнаружены на установке "Гамма" после одного года наблюдений. Такая чувствительность установки "Гамма" при поиске неизвестных источников гамма-квантов или для определения интенсивности потока от известных либо предполагаемых источников превышает чувствительности, достигнутые на эксплуатирующихся в настоящее время установках в СССР и других странах.

3. Актуальность новых экспериментальных исследований по изучению адронных взаимодействий в космических лучах в области энергий  $10^4 - 10^5$  ТэВ.

В настоящее время при исследовании адронных взаимодействий и инициируемых ими каскадных лавин получены серьезные данные на значительные изменения процессов адронизации при

неупругих столкновениях нуклонов и ядер в области энергий налетающих нуклонов и ядер  $10^4$ - $10^5$  ТэВ [11]. Суть явлений и их интерпретацию лучше пояснить в кратком обсуждении выполненных измерений на установке "Адрон" [4] при макетировании работы экспериментального комплекса "АНИ" в части сочетания в одном эксперименте таких разных методов исследования как рентгено-эмульсионные камеры и ионизационные детекторы, регистрирующие широкие атмосферные ливни. Гамма-кванты регистрировались с помощью рентгеноэмульсионной камеры общей площадью  $\sim 160 \text{ м}^2$ , аналогичной использовавшимся в эксперименте "Памир" [10]. Аппаратура для измерений характеристик широких атмосферных ливней позволяла в радиусе  $\sim 20$  м вокруг центра рентгеноэмульсионных камер определять положения оси и полное число электронов в ливнях.

Одна из задач макетирования комплекса "АНИ" заключалась в выяснении области энергий первичных частиц для совместного эффективного использования методов исследования широких атмосферных ливней и рентгеноэмульсионных камер. На рис. 3 а в дифференциальных равнологарифмических интервалах показаны зависимости числа ливней и числа семейств гамма-квантов с различным значением минимальной величины суммарной энергии гамма-квантов в семействе  $\sum E_{\gamma}$  от полного числа электронов  $N$  на уровне наблюдения. Следует иметь в виду, что в рентгеновских камерах гамма-кванты с энергией ниже 2 ТэВ регистрируются неэффективно и, соответственно, не включаются в анализ. Из рисунка следует, что при числе электронов в ливне на уровне наблюдения  $N < 3 \cdot 10^6$  семейства гамма-квантов с суммарной энергией  $E_{\gamma} \geq 10$  ТэВ регистрируются в небольшой части широких атмосферных

ливней, тем меньшей чем меньше  $N$ , а значит и энергия первичной частицы. В этом случае появление семейства гамма-квантов в рентгеноэмульсионной камере является результатом взаимодействия адрона высокой энергии вблизи уровня наблюдения (энергия гамма-квантов не успела деградировать в каскадном процессе), а число таких адронов в ливнях с  $N < 3 \cdot 10^6$  значительно меньше единицы. При этом энергетический спектр семейств гамма-квантов непосредственно отражает энергетический спектр адронов над уровнем наблюдения. При числе электронов в ливне  $N > 3 \cdot 10^6$  число адронов в стволе ливня возрастает. Семейства гамма-квантов от взаимодействия различных адронов перемешиваются, становясь систематически измеряемым электронно-фотонным компонентом стволов широких атмосферных ливней. Генетически связанный со всем развитием широкого атмосферного ливня электронно-фотонный компонент ствола имеет энергию, приблизительно пропорциональную энергии первичной частицы, вызвавшей ливень. На рис. 3 б видно, что поток энергии, несомой электронно-фотонным компонентом ствола ливней (в круге радиусом 1 м) приблизительно пропорционален энергии первичной частицы и составляет величину  $\sum E_{\gamma} \approx 0,1 E_0$ . Средняя энергия, несомая семействами гамма-квантов высокой энергии в стволах ливней, также пропорциональна первичной энергии ливня кроме области энергий  $10^4 - 3 \cdot 10^4$  ТэВ, где соотношение между энергией первичной частицы и средней энергией семейств гамма-квантов в стволе ливня изменяется в  $\sim 3$  раза с  $\langle \sum E_{\gamma} (E_0 \leq 10^4 \text{ ТэВ}) \rangle \approx 1,2 \cdot 10^{-2} E_0$  до  $\langle \sum E_{\gamma} (E \geq 3 \cdot 10^4 \text{ ТэВ}) \rangle \approx 4 \cdot 10^{-3} E_0$ . Это резкое уменьшение высокоэнергичных гамма-квантов и электронов в ливнях с числом частиц  $N = 10^7 - 2 \cdot 10^7$  видно и по числу гамма-

квантов  $N_\gamma$  с энергией  $E_\gamma \geq 2$  ТэВ и, особенно, с энергией  $E_\gamma \geq 20$  ТэВ (рис.36). Резкое изменение энергетического спектра электронно-фотонного компонента широкого атмосферного ливня при переходе от первичных частиц с энергией  $E_0 \geq 10^4$  ТэВ к ливням от первичных частиц с энергией  $E_0 \geq 2 \cdot 10^4$  ТэВ особенно нагляден при масштабноминвариантном представлении энергетического спектра электронов и гамма-квантов в относительных величинах энергии  $E_\gamma / E_0$ . Он имеет единый масштабно-инвариантный вид в широком интервале энергий первичных частиц от 300 ТэВ до  $10^4$  ТэВ. При больших энергиях первичных частиц поток гамма-квантов высокой энергии относительно меньше и их спектр отличается от единого масштабно-инвариантного спектра гамма-квантов в ливнях от первичных частиц меньшей энергии отсутствием частиц из фрагментационной области генерации вторичных адронов, которые из-за каскадного процесса при прохождении через атмосферу распространяются на область значений  $\chi = \frac{E_\gamma}{E_0} \geq 10^{-3}$ . Отсутствие фрагментационной части спектра не связано со статистической необеспеченностью экспериментальных данных. При сохранении фрагментационной части спектра должны быть наблюдаемы гамма-кванты с  $\chi = E_\gamma / E_0 \geq 10^{-2}$ . На опыте при  $E_\gamma / E_0 \approx 10^{-3}$  наблюдается менее 0,2 гамма-кванта при двух ожидаемых на каждый зарегистрированный ливень.

При интерпретации этого нового экспериментального результата следует отметить, что энергетический порог  $\sim 10^4$  ТэВ для изменения процесса множественной генерации предсказывался на основании гипотетического объяснения экспериментальных данных о нуклон-ядерных взаимодействиях при энергиях 20-30 ТэВ у налетающего нуклона [11]. Обнаруженные резкие изменения

спектрального распределения протонов в глубине атмосферы или отношения потоков энергии в различных компонентах ливня (рис.5) требовали для своего объяснения каких-то предположений об энергетическом пороге для изменений характеристик неупругих столкновений первичных частиц с ядрами атомов воздуха в первых столкновениях. Резкие изменения характеристик множественной генерации адронов при неупругих столкновениях с эффективным сечением, не очень сильно отличающимся от полного, столь же трудны для интерпретации в области энергий в несколько десятков ТэВ, как и в области энергий  $\sim 10^4$  ТэВ. При поиске объяснения следует также учесть, что коллайдер уже перекрыл эту энергетическую область и не обнаружил каких-то новых пороговых явлений. Возможное объяснение было найдено в том, что в столкновениях первичных протонов космических лучей с ядрами атомов воздуха проявляется пространственно-временной масштаб адронизации кварков. Столкновения налетающего нуклона с нуклонами ядра являются действительно последовательными, если за время между столкновениями (в системе координат налетающего нуклона) процесс адронизации кварков после первого столкновения закончился. В противном случае мы должны рассматривать коллективное взаимодействие кварков и глюонов всех трех сталкивающихся нуклонов.

Время между последовательными столкновениями нуклона с нуклонами налетающего ядра  $\Delta t = \frac{l}{c\gamma}$ , где  $c$  и  $\gamma$  - скорость света и лоренц-фактор налетающего ядра, а  $l$  - расстояние между нуклонами в ядре, заключенное в пределах между характерными размерами нуклона и ядра  $(2,6 - 6) 10^{-13}$  см.

Если отмеченный выше энергетический порог  $\sim 20$  ТэВ для изменений характеристик нуклон-ядерных неупругих столкновений связывать с масштабом адронизации кварков, то  $\gamma \simeq 2 \cdot 10^4$ , и  $\Delta t = (5 - 10) \cdot 10^{-28}$  с, и соответственно, длина адронизации  $\Delta X = (1,5 - 3) \cdot 10^{-17}$  см.

Наличие пространственно-временного масштаба адронизации кварков должно существенно отразиться на процессе множественного рождения адронов в нуклон-нуклонных столкновениях при соответствующей энергии ( $\sqrt{s} > 2$  ТэВ). Это может быть следствием того, что пространственный масштаб адронизации обесцвечивания кварка  $\Delta X \simeq (1,5 - 3) \cdot 10^{-17}$  окажется сравнимым с линейным размером области конфаймента двух сталкивающихся нуклонов в системе их центра инерции. Это может быть следствием того, что энергия двух сталкивающихся нуклонов превосходит энергию, необходимую для рождения тяжелых частиц:  $M = \frac{\hbar}{\lambda c} = 0,66 - 1,6$  ТэВ/с<sup>2</sup>. Факт предсказания важен не сам по себе, а тем, что он подтверждает предпочтительность такой интерпретации наблюдаемых существенных изменений процесса множественного рождения адронов в области энергий выше  $10^4$  ТэВ. Вместе с тем предлагаемое объяснение нового явления позволяет наметить задачи для дальнейшего экспериментального поиска.

Естественно, что необходима при этом детальная информация о вторичных частицах во фрагментационной области. Такая информация особенно важна с точки зрения наличия, или отсутствия нуклонов и пионов.

Отсутствие нуклонов и пионов во фрагментационной области при  $E_0 > 10^4$  ТэВ выдвигает на первое место проблему, как перераспределяется энергия при неупругом столкновении первичных протонов с энергией выше  $10^4$  ТэВ. Суть вопроса об энергии фрагментационных частиц сводится к последствиям нарушения процесса обесцвечивания кварков первичного протона, не участвовавших непосредственно во взаимодействии с кварками нуклонами. Нарушение процесса адронизации исключает энергию этих кварков, составляющую  $\sim 0,5$  от энергии первичного протона, из суммарной энергии вторичных адронов. Появляются ли при этом свободные кварки или образуются тяжелые цветные частицы? Сколь-либо определенных экспериментальных указаний на это нет, но проверить предположение, что энергия непровазимодействовавших кварков перераспределена между адронами, образовавшимися в пионизационной области генерации вторичных частиц, невозможно в космических лучах сверхвысокой энергии, так как энергия первичной частицы до взаимодействия не определяется.

Рассмотрим указания на существование в потоке космических лучей в глубине атмосферы каких-либо неизвестных частиц, эффективное сечение которых для взаимодействия с ядрами атомов воздуха с генерацией  $J^0$ -мезонов по крайней мере на порядок меньше, чем у адронов. В противном случае, при эффективном сечении для образования  $J^0$ -мезонов, близких к величине сечения, обычной для адрон-ядерного столкновения, эти новые частицы в стволах широких атмосферных ливней по своим проявлениям были бы неотличимы от нуклонов и пионов и гамма-кванты с энергией выше  $E_\gamma / E_0 \geq 10^{-2}$  в стволах не исчезали. Возможно на существование частиц с эффективным сечением, меньшим чем нуклон-ядер-

ное, указывают эксперименты по исследованиям "длиннопробежного" компонента [12,13]. Поиск случаев проноса энергии адронами в стволах широких атмосферных ливней на большие глубины калориметра привел в область энергии адронного компонента ствола ливня порядка  $\sim 300$  ТэВ, как область с аномальными по поглощению адронными каскадами. Энергия адронного компонента ствола ливня, как и частота появления таких событий, соответствуют первичным энергиям  $\approx 10^4$  ТэВ. Частицы, поглощающиеся в свинце, значительно медленнее нуклонов и пионов, наблюдались и в экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами [14]. По интенсивности потока эти события также могут быть отнесены к первичным частицам энергий  $\approx 10^4$  ТэВ.

Если возможное образование новых частиц с эффективным сечением для генерации адронов, значительно меньшим протон-ядерного, непосредственно связано с исчезновением адронов во фрагментационной области множественной генерации, то явление "гало", также наблюдаемое в области при энергиях первичных частиц выше  $10^4$  ТэВ, находится в значительно менее понятном отношении к отсутствию генерации адронов во фрагментационной области и к интерпретации этого явления. Дело в том, что свойства этого явления имеют несколько необычный характер. Под названием "гало" имеется в виду наблюдаемые в рентгеноэмульсионных камерах диффузные пятна потемнения площадью от нескольких  $\text{см}^2$  до нескольких десятков  $\text{см}^2$ , как правило, вместе с семейством гамма-квантов высокой энергии. Причиной такого диффузного потемнения может являться прохождение через камеру большого числа электронов и гамма-квантов с энергией, недостаточной для образования видимого потемнения от каждой отдельной

частицы. Отдельные случаи, наблюдавшиеся и в рентгеновских пленках и в ядерных эмульсиях, подтверждают такую интерпретацию. Однако значительная доля событий обладает рядом особенностей. В большей части событий пространственное распределение потемнения, отражающее пространственное распределение электронов, не соответствует обычной схеме образования электронно-фотонных каскадов - генерации гамма-квантов через распад

$\pi^0$ -мезонов со свойственными этим процессам величинам поперечного импульса. Выдвигались гипотезы о фэйрболах с поперечными импульсами вторичных  $\pi^0$ -мезонов в несколько десятков МэВ/с [15]. С другой стороны оцениваемые высоты образования и развития каскада требуют для своего согласования значительного числа начальных гамма-квантов. В некоторых экспериментах отмечалось быстрое развитие электронно-фотонного каскада в тонких фильтрах [16].

### 3. Возможности "АНИ" в исследованиях адронных взаимодействий космических лучей с энергией выше $10^4$ ТэВ.

Как следует из предыдущего раздела, эффективность исследования неупругих столкновений при сверхвысокой энергии в космических лучах связана с возможностью экспериментально определять в адрон-электронных каскадах в глубине атмосферы энергию и природу частиц при энергиях, превышающих среднюю энергию вторичных адронов из первых актов каскада. На создаваемом комплексе "АНИ" это определяется набором спектрометрической аппаратуры в центральной части установки. На рис.6 дан ее схематический разрез, с аппаратурой первой очереди.

Главной особенностью комплекса "АНИ" будет сочетание ионизационного калориметра с рентгеноэмульсионной камерой и установки для регистрации широкого атмосферного ливня. Инфор-

мационная эффективность такого сочетания обоснована на макетных установках. Следует иметь в виду, что площадь рентгеноэмульсионной камеры "АНИ" в 10 раз больше площади камеры макетных установок. Это позволит получать около  $10^3$  адрон-электронных каскадов в год, образовавшихся в результате неупругих столкновений первичных протонов космических лучей с энергией выше  $10^4$  ТэВ, т.е. без генерации вторичных адронов во фрагментационной области. Благодаря калориметру и рентгеноэмульсионным камерам будет получена весьма полная информация об адронном компоненте таких каскадов: полный поток энергии адронного компонента в стволе широкого атмосферного ливня, энергетический спектр адронов в области энергий  $> 10$  ТэВ, пробег поглощения адронных каскадов. Опираясь на экспериментальные данные [12], можно ожидать за год измерений  $\sim 10^3$  аномально "длинных" адронных каскадов. Корреляция таких каскадов с каскадами, генерированными первичными протонами с энергией выше  $10^4$  ТэВ, без нуклонов и пионов во фрагментационной области может показать, каким частицам передается до 50% энергии первичного протона. Вместе с тем такая корреляция будет означать, что частицы, ответственные за пронос энергии на большие глубины калориметра, относительно стабильны, образовались в тех же особых "безфрагментационных" актах за счет энергии фрагментационной области и имеют существенно меньшее эффективное сечение для неупругих столкновений с ядрами с большими потерями энергии. Случай их взаимодействия в нижней части на выходе из калориметра, позволяют оценить нижний предел значения массы таких частиц по их запаздыванию относительно фронта широкого атмосферного ливня и энерговыделения. Оценка нижнего предела массы,

а не значения массы частицы до измеренной величине запаздывания, то есть величине лоренц-фактора вызвана тем, что не известны ни полная энергия частицы на уровне наблюдения, ни изменение этой энергии на предполагаемом ее пути через атмосферу. Методические ограничения на измеряемую величину времени запаздывания составляют несколько наносекунд, откуда область измеряемых лоренц-факторов ограничена  $\gamma < 10^3$ . Для наиболее актуальной области энергии первичных частиц  $E_0 \geq 2 \cdot 10^4$  ТэВ это означает, что измеримы лишь массы частиц, вылетающих в системе центра инерции в обратном направлении по отношению к направлению первичного протона.

Следующей возможностью выяснения каналов передачи энергии во вторичные частицы в неупругих столкновениях первичных протонов с энергией выше  $10^4$  ТэВ является изучение структуры ствола ливня с помощью магнитного спектрометра в подземной лаборатории, расположенной под ионизационным калориметром и дополнительным поглотителем из бетона и грунта толщиной  $\sim 40$ м водного эквивалента. Конструкция электромагнита позволяет иметь до  $40 \text{ м}^2$  аппаратуры, регистрирующей прохождение мюонов и их отклонение в магнитном поле. Ожидаемое значение максимальной измеряемой энергии мюонов по отклонению в магнитном поле 2-3 ТэВ. Число стволов широких атмосферных ливней от первичных неупругих столкновений с  $E_0 > 2 \cdot 10^4$  ТэВ, когда не генерируются вторичные адроны во фрагментационной области энергии, составит более 10 в год.

В предыдущих публикациях [1,2] по проекту "АНИ" обращалось внимание на ранее развитые методы приблизительного определения типа первичной частицы: протон;  $\alpha$  -частица;

ядра углерода, азота и кислорода; ядра, содержащие 18-32 нуклона и ядра группы железа. Обнаруженное резкое изменение характеристик акта потребует дополнительных исследований для проверки и обоснования методов определения природы первичных частиц. Проблемы исследования энергетического спектра и ядерного состава первичных космических лучей будут обсуждаться в следующем разделе. Здесь следует остановиться на методе выделения из потока космических лучей первичных протонов по их прохождению через атмосферу с малыми потерями энергии [1?]. В масштабах комплекса "АНИ" это позволит проверить раньше экспериментов по исследованию первичных космических лучей на космических аппаратах энергетический спектр первичных протонов вплоть до энергий  $\sim 10^3$  ТэВ. Однако более существенны исследования протон-ядерных неупругих столкновений в интервале 10-1000 ТэВ, интервале энергий, не исследуемом на ускорителях, по крайней мере до 2000 года.

Выше уже отмечалось, что в интервале энергий 20-50 ТэВ характеристики неупругих столкновений протон-ядро имеют небольшое изменение с достаточно выраженным энергетическим порогом. Если это действительно связано с пространственно-временным масштабом адронизации, то с энергией  $\sim 20-30$  ТэВ можно изучать кварк-глюонные коллективные взаимодействия с начальным числом кварков  $\geq 9$ . Данный эксперимент ведется с первичными протонами известной энергии. Выборка протонов осуществляется благодаря условию, что на образование широкого атмосферного ливня в атмосфере до глубины  $\sim 700$  г/см<sup>2</sup> растратено менее  $3E_n$ , где  $E_n$  - энергия адрона в калориметре или в атмосфере на высоте менее 1 км над калориметром. Это

условие эффективно исключает регистрацию адронов от  $\alpha$ -частиц и более тяжелых ядер в глубине атмосферы, так как энергия одного из нуклонов  $\alpha$ -частицы, прошедшего через атмосферу без взаимодействий или с малыми потерями, и энергия, растроченная остальными нуклонами ядра в атмосфере на образование широкого атмосферного ливня, различаются в 3 и более раз. Энергия первичного протона определяется как сумма энергии адрона  $E_A$  и энергии  $E_{\Delta}$ , затраченной на образование ливня.

В эксперименте [17] недостаточно обеспеченный статистический материал не позволил провести детальный анализ таких событий. На калориметре "АИИ" за 1 год наблюдений будет получено  $\sim 4 \cdot 10^4$  событий, образованных первичными протонами с энергией выше 20 ТэВ, и более  $1,5 \cdot 10^3$  случаев с энергией выше 100 ТэВ. Возможны различные варианты анализа: распределение величин потери энергии в атмосфере первичным протоном в интервале  $E_{\Delta} = (0,05 - 0,1) E_0$ , распределение потерь энергии нуклонов во взаимодействиях с ядром свинца, распределение потерь энергии при столкновении с ядром атома углерода, энергетический спектр вторичных адронов во фрагментационной области, корреляция таких взаимодействий с образованием мюонов высокой энергии. В целом, статистически и информационно объем экспериментальных данных о нуклон-ядерных взаимодействиях в области энергий  $10-10^3$  ТэВ будет несравнимо большим и по сравнению как с уже полученным, так и с другими будущими экспериментами по исследованию космических лучей. Можно предполагать, что более детальные характеристики изменений неупругих столкновений нуклонов с ядрами при энергиях 20-30 ТэВ будут способствовать лучшему пониманию особенностей нуклон-нуклонных столкновений

в области энергий  $\approx 10^4$  ТэВ.

#### 4. Энергетический спектр и ядерный состав первичного космического излучения.

Интенсивность первичного космического излучения такова, что в ближайшие десятилетия нельзя надеяться на исследования на космических аппаратах энергетического спектра и ядерного состава космического излучения непосредственно за пределами атмосферы при энергиях, превышающих  $3 \cdot 10^3$  ТэВ. Случайно или не совсем случайно эта энергия характерна "изломом" в энергетическом спектре и весьма актуальна для детального исследования состава космических лучей. Изучение первичного космического излучения в энергетической области  $10^4$ - $10^8$  ТэВ ведется почти исключительно путем наблюдения широких атмосферных ливней, то есть вторичного явления. В этом случае необходимо достаточно полное знание основных процессов образования, развития и поглощения каскадного ливня, чтобы по его характеристикам судить об энергии и природе первичной частицы.

Энергетический спектр суммарного потока космических лучей до его "излома" в области энергий  $10^3$ - $10^4$  ТэВ исследован как с помощью широких атмосферных ливней, так и калориметрическим методом на искусственных спутниках Земли. Основное достоинство метода широких атмосферных ливней связано с возможностью регистрации большого числа электронов, мюонов, фотонов черенковской вспышки в атмосфере относительно небольшими детекторами, разнесенными по большой площади регистрации ливня. Связь между наблюдаемым числом частиц и энергией первичной частицы может быть рассчитана, если достаточно полно известны характеристики неупругих столкновений адронов с ядрами в широком интервале энергий адронов от минимальных для рождения  $\pi^0$ -ме-

зонов до максимальных, соответствующих энергии первичных частиц, инициирующих наблюдаемые ливни. Так как без экстраполяций и предположений здесь не обойтись, то более надежен экспериментальный способ установления связи между каким-либо измеряемым параметром ливня и энергией первичной частицы, определяемой калориметрическим способом, путем измерения величины потоков энергии, несомой всеми компонентами ливня на уровне измерения, и энергии, потерянной электронами ливня над уровнем наблюдения [18]. Последняя определяется экспериментально по величине потока черенковского света из атмосферы над уровнем наблюдения. Ускользающая при таком квазикалориметрическом методе энергия нейтрино надежно оценивается по потоку мюонов, так как подавляющая часть потока нейтрино образуется в  $\pi$ - $\mu$  распадах, а поток мюонов и несомая ими энергия измеряются на опыте. Каскад адронных взаимодействий в атмосфере и малая вероятность распада пионов высокой энергии приводят к тому, что при сохранении с ростом энергии первичных протонов и ядер приблизительной масштабной инвариантности процессов множественного рождения адронов как по своему составу, так и по энергетическому распределению, основная (> 70%) доля энергии первичной частицы, образовавшей широкий атмосферный ливень, расходуется электронами в атмосфере на ионизацию. На рис. 7 приведено сопоставление непосредственных калориметрических измерений за пределами атмосферы [19] с квазикалориметрическими определениями энергии первичных частиц, образовавших широкий атмосферный ливень [18, 20, 21].

В области энергий космических лучей выше  $3 \cdot 10^3$  ТэВ калориметрические измерения энергий первичных частиц за пределами

атмосферы пока что и, по-видимому, в ближайшие два десятка лет, не выполнимы. Если была бы уверенность, что масштабная инвариантность в процессах, связанных с неупругими столкновениями адронов и ядер, качественно, сохраняется, то квазикалориметрический подход к регистрации широких атмосферных ливней был бы наиболее точным и надежным методом исследования энергетического спектра первичного космического излучения как в уже освоенной области энергий (рис. 7), так и на новых крупномасштабных установках типа "ШАЛ-1000". Однако в выполненных до настоящего времени экспериментах по исследованию различных компонентов широких атмосферных ливней от первичных частиц с энергией выше  $10^4$ - $10^5$  ТэВ не были исследованы стволы широких атмосферных ливней. Предполагалось, что и по составу частиц и по относительному потоку энергии стволы ливней и первичной энергией выше  $10^4$  ТэВ подобны экспериментально исследованным стволам ливней при меньших энергиях первичных частиц. Это предположение конечно подтверждалось и расчетами, но опираться в предположении либо приблизительного скейлинга для моделей неупругих столкновений адронов с ядрами, либо предполагалось увеличение коэффициента неупругости до единицы, то есть полная ионизация энергии первичной частицы космического излучения.

Было показано отсутствие пионов и нуклонов во фрагментационной области генерации вторичных адронов при энергиях первичных протонов выше  $10^4$  ТэВ. Если "исчезнувшая" энергия фрагментационных вторичных адронов не передана в ионизацию, а уносится струями мюонов или любыми другими частицами, имеющими не менее чем на порядок меньшее эффективное сечение для неупругих взаимодействий с ядрами атомов воздуха, то энергетиче-

ческий спектр космических лучей, определенный как в квазикалориметрических измерениях, так и путем моделирования широких атмосферных ливней, существенно искажен. На рис. 7 показано, что дает учет энергии, теряемой во фрагментационной области только первичных нуклон-ядерных взаимодействий (штрих-пунктир) и последующих пион-ядерных столкновений (сплошная прямая). Следует отметить, что возможность объяснения "излома" в спектре широких атмосферных ливней особенностями элементарного акта неупругих нуклон-ядерных столкновений, а не изломом в энергетическом спектре космических лучей не исключалась и ранее [21]. Здесь же следует заметить, что результаты экспериментов "Адрон" [4] ставят под сомнение обоснованность проекта "ШАЛ-1000" до получения более полных экспериментальных данных о неупругих нуклон-нуклонных и адрон-ядерных столкновениях в области энергий выше  $2 \cdot 10^4$  ТэВ на встречных пучках или в космических лучах.

По проблеме ядерного состава космических лучей неопределенность экспериментальных выводов вызывает острые дискуссии при всех энергиях первичных частиц выше 10 ТэВ. Уже в интервале энергий 1-100 ТэВ в некоторых экспериментальных работах [22,23] утверждается уменьшение доли протонов в потоке первичного космического излучения. В то же время в пределах статистических ошибок в экспериментах [24] с рентгеноэмульсионными камерами получено либо неизменность доли протонов вплоть до энергий  $\approx 10^3$  ТэВ, либо лишь небольшое ее уменьшение. Все упомянутые выше работы выполнены за пределами атмосферы или в стратосфере. В принципе, по весовым характеристикам аппаратуры, исследования за пределами атмосферы ядерного состава космических лучей в интервале 10-10<sup>3</sup> ТэВ возможны и весьма

актуальны, но это будет наивысшей энергией, исследованной на искусственных спутниках в ближайшие 20-30 лет, а область энергий выше  $3 \cdot 10^3$  ТэВ в этот период останется доступной лишь методам широких атмосферных ливней. В экспериментах [25] было показано, что состав первичного космического излучения постоянен в интервале энергий первичных частиц  $10^3$ - $10^5$  ТэВ и мало отличается от ядерного состава космических лучей при энергии частиц выше 1 ТэВ. Постоянство состава первичного космического излучения в области изменения энергетического спектра представляется весьма затруднительным для объяснения. Если излом в энергетическом спектре вблизи энергии  $3 \cdot 10^3$  ТэВ связан с диффузией космических лучей в Галактике, то первичные космические лучи с энергией выше области излома должны содержать значительно больше средних и тяжелых ядер по сравнению с протонами, чем в области энергий ниже излома. Если изменение энергетического спектра вызвано дополнительными потерями энергии протонов и фрагментацией ядер в местах ускорения или распространения космических лучей, то следует ожидать уменьшение доли ядер в потоке космических лучей и увеличение доли протонов [26]. Изменение показателя энергетического спектра и постоянство ядерного состава космических лучей в одном и том же энергетическом интервале вряд ли совместимы и более вероятно, что либо один, либо другой экспериментальный результат в чем-то ошибочен.

Исследования на комплексе "АНИ" уже на первом этапе в ходе эксперимента "Гамма" позволят повторить с большей статистикой и с лучшей методической точностью исследования флуктуаций потока мюонов, явившиеся экспериментальной основой для

выводов работы [25] о постоянстве ядерного состава в области энергий  $10^3$ - $10^5$  ТэВ. В дальнейшем будут исследоваться корреляционные связи между различными компонентами ливня. Потоки частиц или энергии различных компонентов широкого атмосферного ливня или потоки частиц одного и того же компонента на разных расстояниях от оси ливня могут быть аппроксимированы в своей зависимости от энергии первичных частиц как  $E_0^\alpha$ , где величина  $\alpha$  может быть различной для разных компонентов. Во всех случаях, когда отношение двух величин потоков частиц или несомой ими энергии  $\frac{A_1}{A_2} \sim E_0^{\alpha_1 - \alpha_2}$  имеет разность  $\alpha_1 - \alpha_2 \neq 0$ , величина этого отношения для каждого отдельного широкого атмосферного ливня зависит от природы первичной частицы. В частности комплекс "АНИ" позволит исследовать корреляционные отношения следующих величин: полное число электронов, полное число мюонов, энергию электронно-фотонного компонента ствола ливня, поток электронов на малых ( $< 20$  м) и на больших ( $> 100$ м) расстояниях от оси ливня.

##### 5. Заключение.

Объединение разнесенной по площади  $\sim 10^5 \text{ м}^2$  установки для исследования широких атмосферных ливней с центральным спектрометрическим комплексом для изучения стволов широких атмосферных ливней является основой комплекса "АНИ". Первоочередная программа физических и астрофизических исследований на комплексе "АНИ" нацелена на основные проблемы физики и астрофизики высоких энергий. Адронные взаимодействия в области энергий выше  $10^4$  ТэВ будут приоритетными на ускорителях ближайшего десятилетия. В космических лучах получены весомые данные о новых явлениях в этой области энергий. Необходимо продолжение

и существенное развитие этих работ тем более, что изменения процесса множественного рождения касаются прежде всего фрагментационной области и, возможно, при малых поперечных импульсах, что для исследований на встречных пучках затруднительно и зачастую не предусматривается.

Энергетический спектр космических лучей в области предельно высоких энергий ( $\approx 10^8$  ТэВ) не может быть исследован без детального изучения стволов широких атмосферных ливней с первичной энергией  $\approx 10^5$  ТэВ, учитывающего отсутствие генерации адронов во фрагментационной области при энергии налетающих нуклонов  $\sim 2 \cdot 10^4$  ТэВ. Без таких экспериментов нужно будет ждать достаточно полных данных о нуклон-нуклонных и ядро-ядерных взаимодействиях, выполненных на ускорителях при соответствующих энергиях.

Проблема исследования ядерного состава космических лучей в экспериментах, подобных "ШАЛ-1000", не может быть решена без разработки однозначных методов экспериментального определения состава первичного космического излучения в области энергий  $10^3$ - $10^5$  ТэВ, где возможно сопоставление с внеатмосферными измерениями, и где, либо отсутствует "излом" в энергетическом спектре космических лучей, либо нынешние методы анализа не позволяют заметить изменений состава, заведомо превышающих статистическую ошибку эксперимента.

Первая очередь комплекса "АНИ" (рис.2 и 6) явится хорошей базой для дальнейшего развития исследований в области энергий космических лучей  $10^3$ - $10^6$  ТэВ и гамма-астрономии в области энергий  $10^2$ - $10^3$  ТэВ. Неизбежность этого этапа исследований следует из двух обстоятельств. Нельзя надеяться изучить неиз-

вестные процессы взаимодействия, энергию и природу первичных частиц в области энергий выше  $10^5$  ТэВ, наблюдая лишь фотоны, электроны и мюоны с энергией ниже 1 ТэВ. С другой стороны предистория каскадной лавины в глубине атмосферы более полно восстанавливается по пространственным характеристикам каскада на периферии ливня. Отсюда необходимость совмещения в одном эксперименте спектрометрических измерений энергии в центральной части ливня с широким разнесением детекторов ливневых частиц. Опубликованные до сих пор в мировой литературе предложения и проекты экспериментальных установок для исследований космических лучей в области энергий  $10^4$ - $10^7$  ТэВ уступают комплексу "АНИ" по своим возможностям исследования космических лучей и их взаимодействий с ядрами атомов воздуха (см., например проект [27] ).

Многолетние измерения и многообразие исследований означает, что создаваемый экспериментальный комплекс должен быть подготовлен для своего дальнейшего развития, в том числе для задач до сих пор не предвиденных, а возникших вновь, как следствие проводимого эксперимента. В проекте комплекса возможность такого развития была предусмотрена, в том числе в его конструкции.

В частности, конструкция ионизационного калориметра содержит два не заполненных аппаратурой промежутка высотой 2м каждый: первый из них находится под гамма-блоком, поглощающим основной поток электронно-фотонного компонента ствола ливня, приходящий из атмосферы и, второй, под всей толщей вещества калориметра, в большей части случаев поглощающего адронный компонент ливня.

Использование верхнего промежутка в настоящее время определено. Нельзя исключить, что появится необходимость замены рентгеноэмульсионной камеры для регистрации адронов, размещаемой непосредственно под этим резервным объемом, на 2-3 адронные рентгеноэмульсионные камеры друг под другом. Имеется также предложение разместить в верхнем промежутке нейтронные счетчики для создания уникального монитора, который позволит изучать кратковременные флуктуации космических лучей с энергией  $\sim 10$  ГэВ. В комплексе "АНИ" такой нейтронный детектор может также дать возможность поиска неизвестных локальных источников гамма-квантов в интервале энергий 10-100 ТэВ, как широких атмосферных ливней без мюонов и адронов, наблюдаемых по фиксированному направлению.

Наличие незаполненного пространства под калориметром будет частично использовано для размещения сцинтилляционных счетчиков, измеряющих с точностью до нескольких наносекунд запаздывание каскадов высокой энергии, образующихся в нижней части ионизационного калориметра. Актуальность таких измерений упоминалось выше.

В подземной лаборатории сохранен резерв пространства для сооружения там парметра, предназначенного для исследования энергетического спектра мюонов космических лучей и групп мюонов в стволах широких атмосферных ливней. Эти проблемы пока что не обеспечены экспериментальными установками. Актуальность парметра с площадью  $\geq 200 \text{ м}^2$  может существенно возрасти после обнаружения на магнитном спектрометре каких-либо новых явлений или частиц с пробегами для взаимодействий на порядок-два большими, чем пробеги для взаимодействия и поглощения нуклонов и пионов. Площадь магнитного спектрометра,

к сожалению, не позволит исследовать явления, вызываемые первичными космическими лучами с энергией выше  $10^5$  ТэВ.

Сооружение базового комплекса "АНИ" и начало его эксплуатации в 2-3 ближайших года создаст условия для превращения "АНИ" из совместного эксперимента двух институтов в широкое сотрудничество многих институтов как Советского Союза так и других стран. Интерес к сотрудничеству в экспериментах на комплексе "АНИ" проявляется со стороны физиков разных стран: Англии, Болгарии, Бразилии, Китая, Польши, США, Франции, Японии. Однако реальное и эффективное международное сотрудничество вокруг комплекса "АНИ" возникнет лишь после создания его основной части и начала осуществления исследовательской программы. В этом случае не просто личное участие физиков из разных стран, а дополнение уже действующей базовой установки новыми детекторами будет расширять информативность проводимых экспериментов. Гарантией появления таких дополнений явится уникальный по светосиле центральный спектрометрический комплекс "АНИ".

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1 Распределения по относительному потоку мюонов в ливне (а) и по отношению потока энергии адронного ( $E_a$ ) и электронно-фотонного ( $E_{эф}$ ) компонентов ствола ливня (б). Стрелками показаны допустимые значения этих отношений в ливнях от первичных гамма-квантов. Сплошные линии и косые крестики соответствуют интервалу по числу электронов  $N_e$   $3,2 \cdot 10^5 \leq N_e \leq 5,6 \cdot 10^5$ , пунктир и прямые крестики  $5,6 \cdot 10^5 \leq N_e \leq 10^6$ . На рисунке б крестиками показаны значения  $E_a / E_{эф}$  в "безмюонных" ливнях.

Рис. 2 Экспериментальная установка "Гамма" комплекса АНИ.

Рис. 3 а) Дифференциальное распределение интенсивности широких атмосферных ливней (сплошная линия) и числа семейств гамма-квантов с различной суммарной энергией ( $\sum E_{\gamma}$ ) в равнологарифмических интервалах по числу электронов  $N$ . б) Зависимость потока энергии электронно-фотонного компонента ствола ливня ( $\sum E_{\gamma}$  ( $\gamma \leq 1$  м) и суммарной энергии гамма-квантов с энергией  $E_{\gamma} \geq 2$  ТэВ в стволах широких атмосферных ливней (точки, левая шкала) от полного числа электронов в ливне  $N$  или от энергии первичной частицы ( $E_0$ ). Энергия  $E_0 = 4,7 \cdot 10^9 N^{0,926}$  следует из квазикалориметрических измерений [18]. Правая шкала - число гамма-квантов  $n_{\gamma}$  с энергией  $E_{\gamma} \geq 2$  ТэВ (прямые крестики) и  $E_{\gamma} = 20$  ТэВ (косые крестики) в стволах ливней с различными  $N$  и  $E_0$ .

Рис. 4 Интегральный энергетический спектр гамма-квантов и электронов в стволах широких атмосферных ливней на глубине атмосферы  $700 \text{ г/см}^2$  в квазискейлинговой области энергий

первичных частиц  $E_0 = 2 \cdot 10^2 - 1,5 \cdot 10^4$  ТэВ и в области энергий первичных частиц  $E_0 > 1,5 \cdot 10^4$  ТэВ. Энергия гамма-квантов дана в масштабно-инвариантной относительной величине  $E_\gamma/E_0$ .

Рис. 5 а) Дифференциальный энергетический спектр первичных протонов, растративших на образование широкого атмосферного ливня энергию  $E < 3E_n$ , где  $E_n$  - энергия протона или вторичного адрона на глубине атмосферы  $\sim 700$  г/см<sup>2</sup>. Условие  $E < 3E_n$  исключает случаи проскока одного из четырех нуклонов первичной  $\alpha$ -частицы до уровня наблюдения без потерь энергии в атмосфере.

б) Отношение потоков энергии адронного и электронно-фотонного компонентов широких атмосферных ливней в круге радиусом 10 м от оси ливня на глубине атмосферы  $\sim 700$  г/см<sup>2</sup> для первичных частиц различной энергии  $E_0$ .

Рис. 6 Схематический разрез центральной спектрометрической части комплекса "АНИ". 1 - сцинтилляционные детекторы потока электронов широкого атмосферного ливня для уточнения положения оси ливня, 2 - рентгеноэмульсионные камеры для измерения энергии гамма-квантов и адронов, 3 - ионизационные камеры, 4 - сцинтилляционные детекторы для регистрации потока мюонов в ливнях, 5 - трековые детекторы магнитного спектрометра, 6 - железное ярмо электромагнита.

Рис. 7 Интегральный энергетический спектр [20] первичного космического излучения, полученные в калориметрических измерениях [19] за пределами атмосферы (1), по измерениям черенковского излучения в атмосфере (2,3) [20] и по ква-

зикалориметрическим данным о широких атмосферных ливнях [18] (4). Результат учета переданной в электронно-фотонный компонент ливня энергии из фрагментационной области взаимодействий первичных протонов и ядер с энергией выше  $1,5 \cdot 10^4$  ГэВ/нуклон. Штрих-пунктир - учет взаимодействий первичных частиц. Сплошная линия - учет взаимодействий также вторичных пионов.

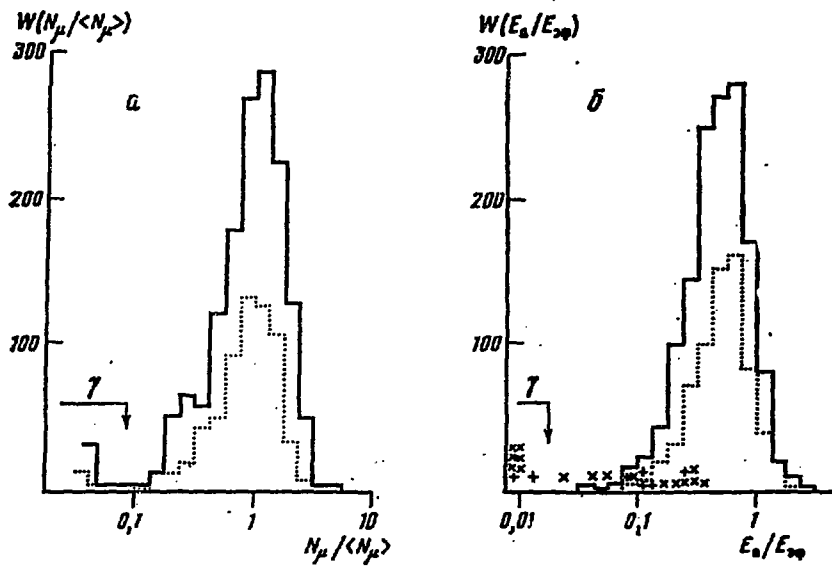
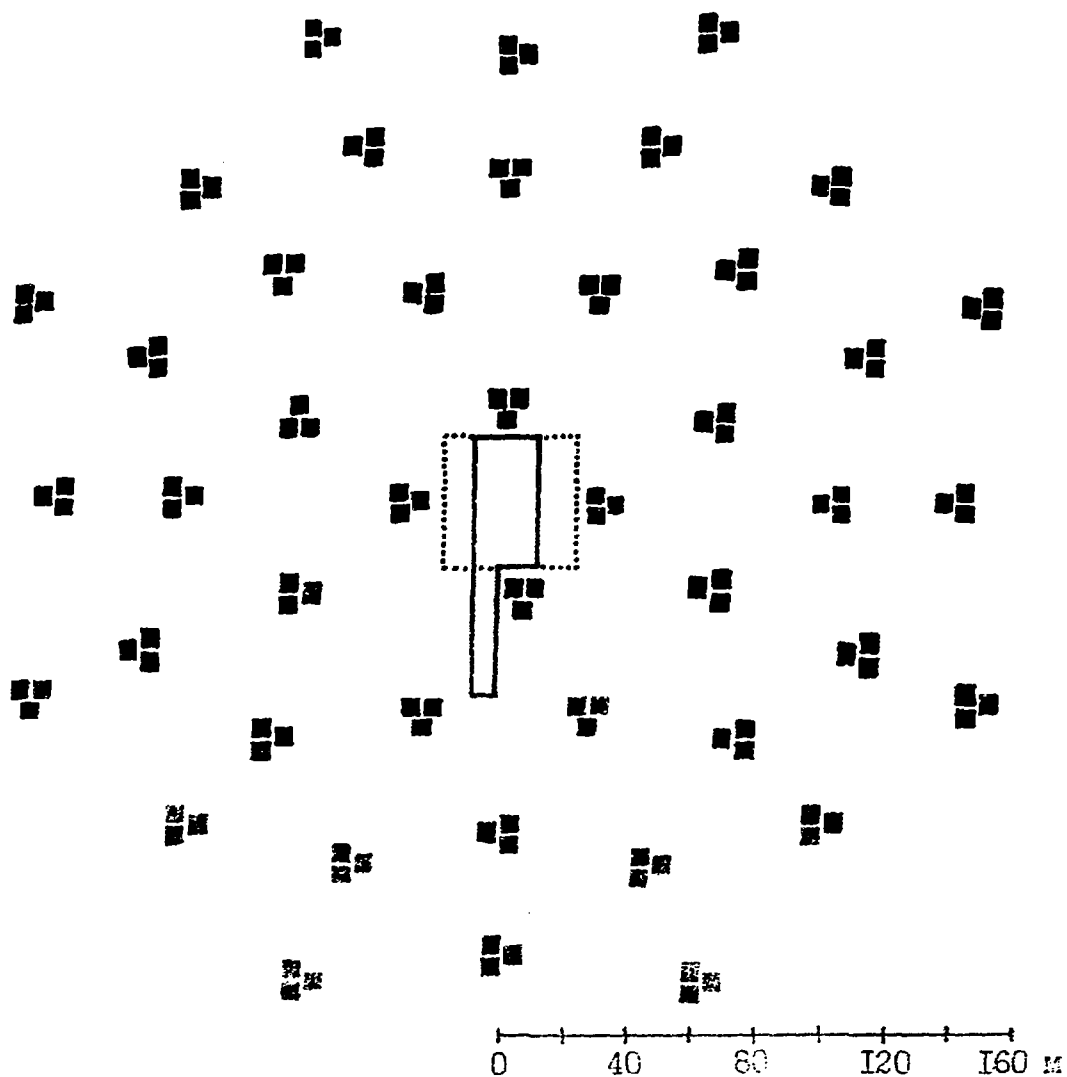


Рис. I.






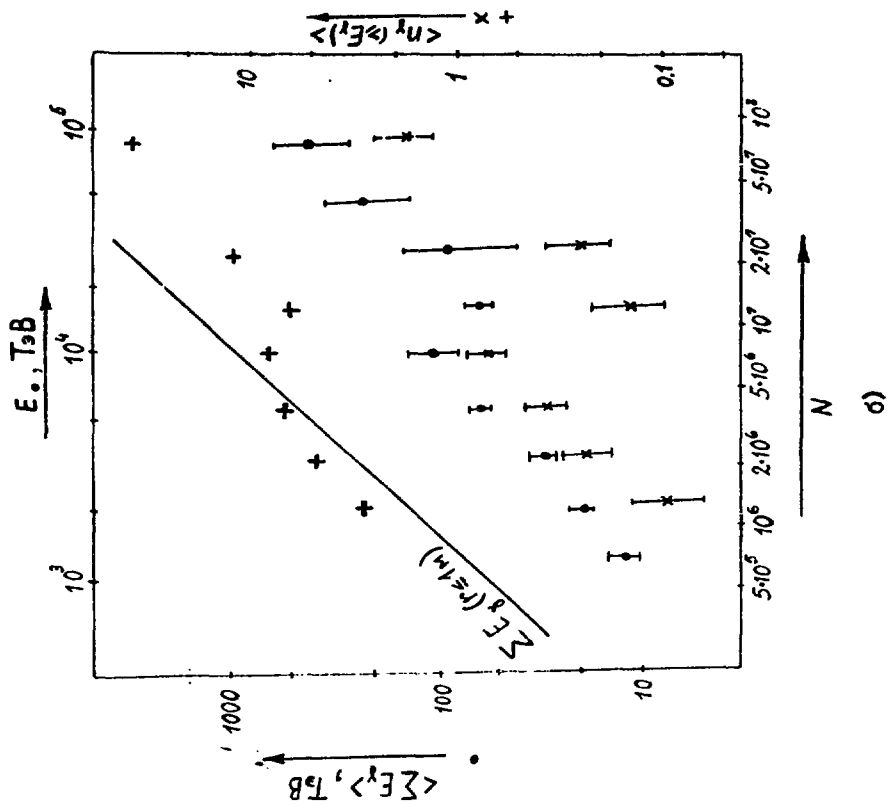
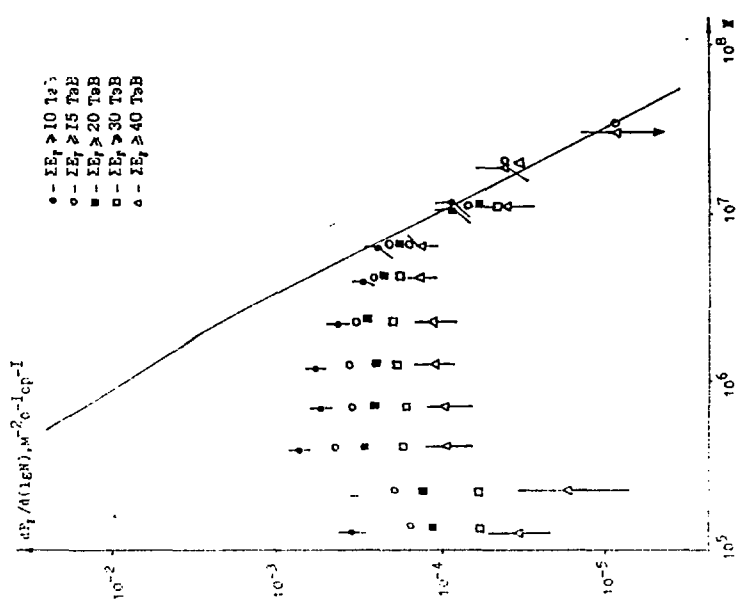
- 
 - стандартные детекторы площади  $1 \text{ м}^2$
- 
 - подземные детекторы мюонов
- 
 - калориметр "АМБ" с рентгеномультиплексными камерами

Рис. 2.



a)



- -  $\Sigma E_i > 10 T_0 B$
- ◻ -  $\Sigma E_i > 15 T_0 B$
- ◻ -  $\Sigma E_i > 20 T_0 B$
- ◻ -  $\Sigma E_i > 30 T_0 B$
- ◻ -  $\Sigma E_i > 40 T_0 B$

FIG. 3

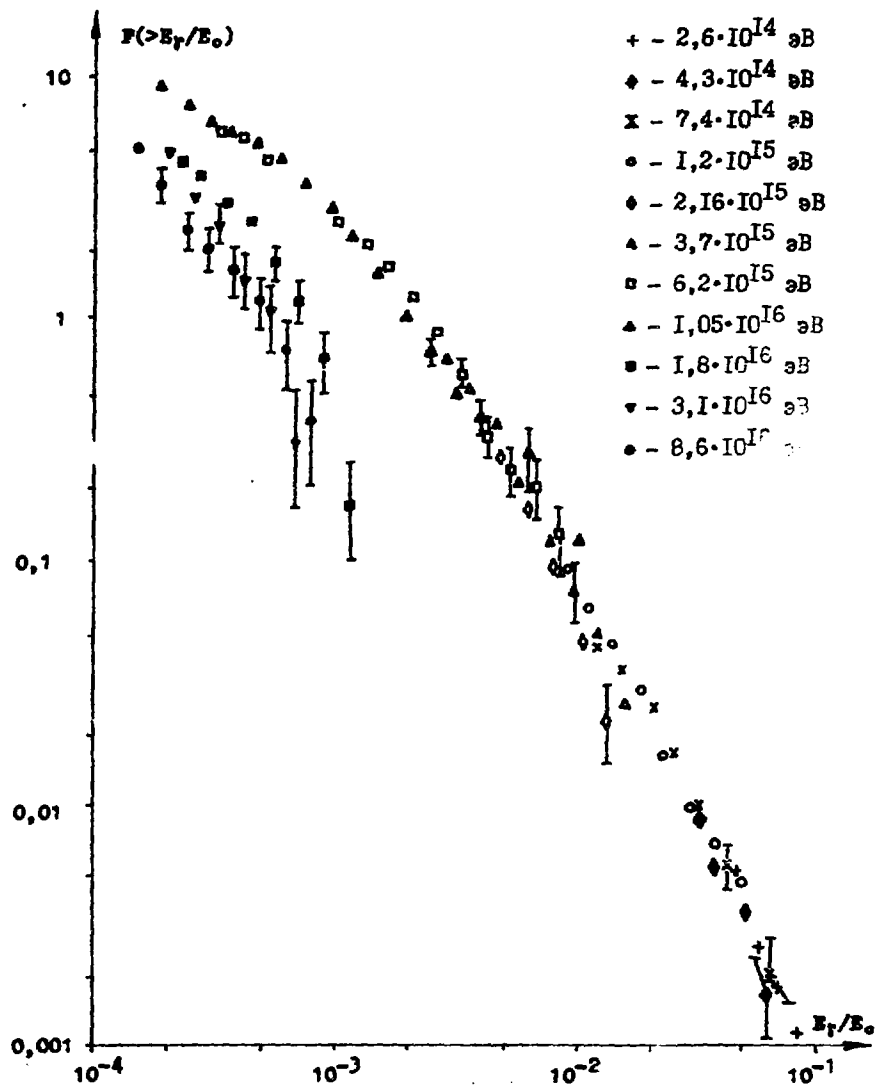


Рис. 4

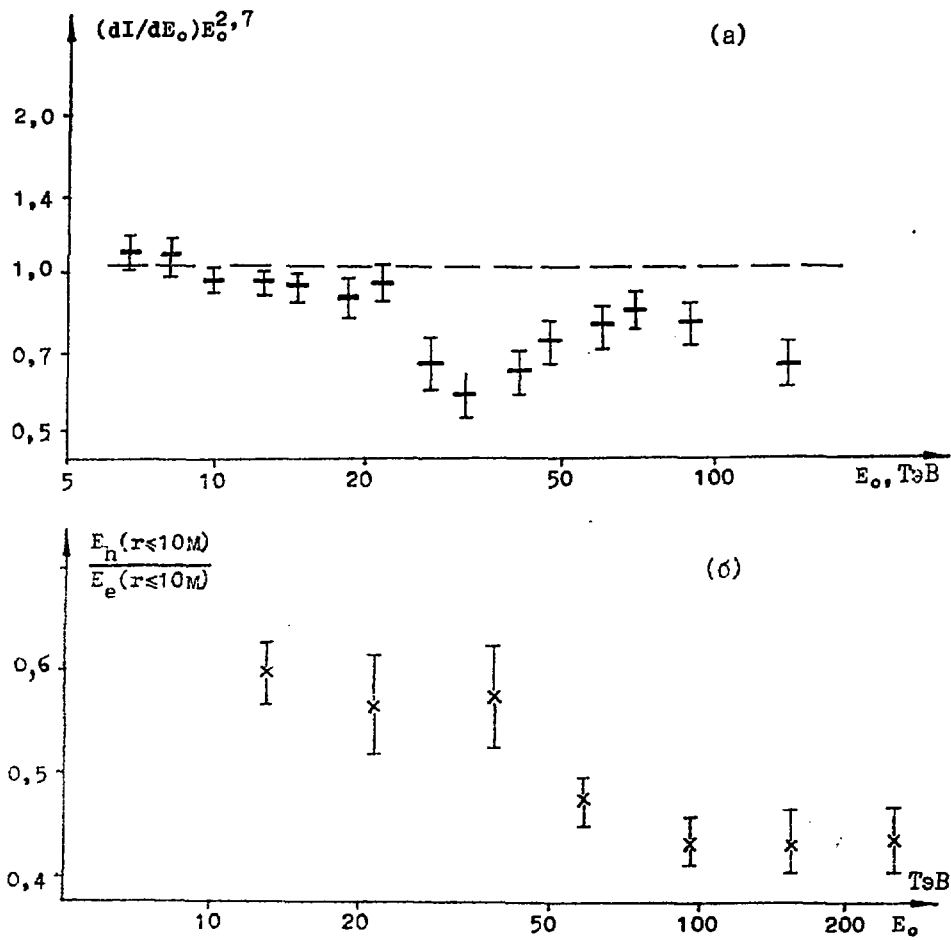


Рис. 5.

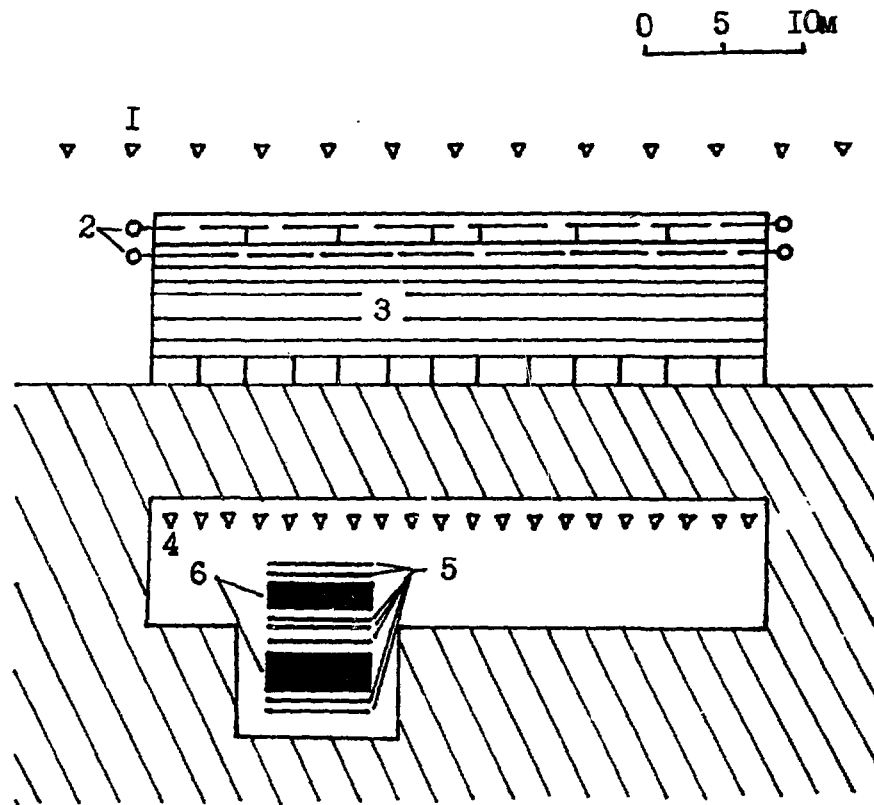


Рис. 6.

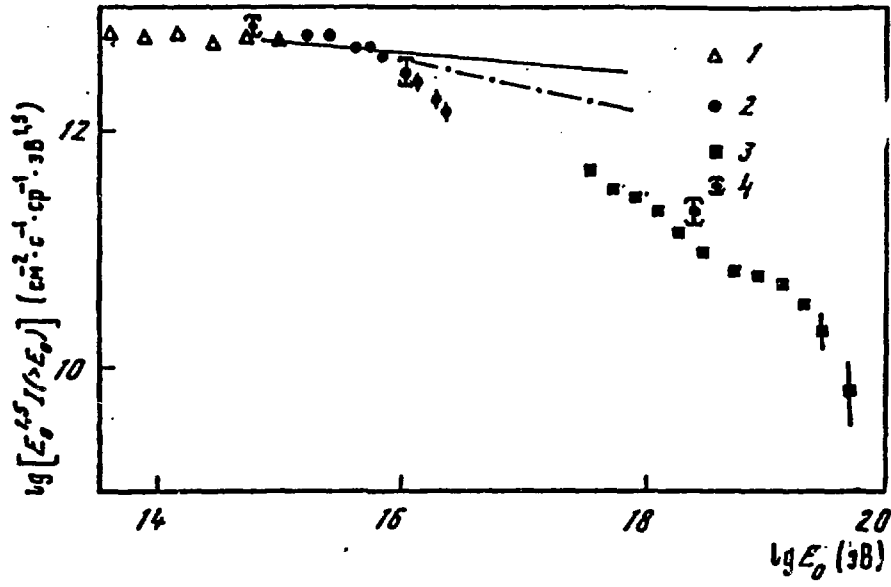


Рис. 7.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- I. Амагуни А.Ц. и др. Препринт ЕФМ-358-79, Ереван, 1979 .
2. Данилова Т.В. и др. Известия АН Арм.ССР, физика ,1982, т.17, с.129 .
3. Авакян В.В. и др. ВАНТ, вып.5(31), 1988, с.3 .
4. Абдарашитов С.Ф. и др. Изв.АН СССР, сер.физ.,1986, т.50, с.2203 .
5. Avakian V.V. et al. Proc. XXI ICRC, Adelaide 1990, v.10, 162
6. Арабкин и др. Препринт ФИАН, №140, Москва, 1990 .
7. Христиансен Г.Б. Сб."Проблемы физики космических лучей", М.:Наука, 1987, с.226 .
8. Nikolski S.I., Stamenov J.N., Ushev S.Z. J. Phys. G: Nucl. Phys. 1987, v.13, p.883.
9. Weber W.R. Rapporteur paper of 26th ICRC, 1987, v.8, p.65.
10. Байбурина С.Г. и др. Труды ФИАН СССР, 1984, т.154, с.3 .
- II. Nikolski S.I. Invited Talks of 11th European Cosmic Ray Symposium, Hungary 1988, p.35.
12. Никольская Н.М. и др. Препринт ФИАН СССР, №42, 1989 .
13. Никольский С.И. Препринт ФИАН СССР, №188, 1989 .
14. Afanasieva L.N., Ivanova M.A., Ivanenko I.P. et al. 20th ICRC, 1987, v.6, p.161.
15. Amato N. 19th ICRC Papers, 1985, v.5, p.356.
16. Емельянов А.Ю. и др. Известия АН СССР, сер.физ., 1989, т.53, с.263
17. Никольский С.И. Сб."Проблемы физики космических лучей", М.:Наука, 1987, с.211 .
- 18 Никольский С.И. Сб."Проблемы физики космических лучей", М.:Наука.1987. с.169 .

19. Grigorov N.L. et al. Berlin Acad. Verl., 1972, p.1617.
20. Фримов Н.Н. и др. Сб. "Проблемы физики космических лучей", М.:Наука,1987, с.136 .
21. Никольский С.И. УФН,1962, т.73, с.365 .
22. Grigorov N.L. 21st ICRC Papers, 1990, v.3, p.73.
23. Sokolskaya N.V. et al. Proc. 18th ICRC. 1983. v.2, p.101.
24. Jones W.V. et al. Ann Part. Sci. 1987, v.37, p.71.
25. Никольский С.И. ЛЭТФ,1984, т.33, с.18 .
26. Karakula S et al. Proc. 20th ICRC, 1987, v.7, p.80.
27. Experiment OMEGA. Observation of Multiple Particle Productions, Exotic Interactions, Gamma-Ray Showers and Heavy Primaries. Inst for CR Research, University of Tokyo, 1990

Рукопись поступила 12 октября 1990 г.

А.А.МАНЦУЛЯНИ, Э.И.НИКОЛЬСКИЙ  
ИССЛЕДОВАНИЕ АДРОНИЗАЦИИ КВАРКОВ В СКОБИРГЕ-ВИТЕ АНИ.

Редактор Л.Н.Лукаин

Технический редактор А.С.Абрамян

---

Подписано в печать 19/XI-90г.      Формат 60x84/16

Литсетная печать. Уч. изд. л. 1,5 Тираж 299 экз. Ц. 22

Сак. тип. № 304

Индекс 3649

---

Печатано в Ереванском физическом институте  
Ереван 36, ул. Братьев Аликянн, 2

The address for requests:  
Information Department  
Yerevan Physics Institute  
Alikhanian Brothers 2,  
Yrean, 375036  
Armenia, USSR

ИНДЕКС 3649



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

