

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ПО ИЗУЧЕНИЮ НЕУПРУГИХ  
ЯДЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НУКЛОНОВ ПРИ ЭНЕРГИЯХ  
 $5 \cdot 10^{11}$ — $2 \cdot 10^{13}$  эв И АНАЛИЗ ЕЕ РАБОТЫ НА ВЫСОТЕ 3250 м  
НАД УРОВНЕМ МОРЯ

Э. А. МАМИДЖАНЫН, М. О. АЗАРЯН, Р. А. БАДАЛЯН,  
Р. М. МАРТИРОСОВ, М. М. МУРАДЯН

Описывается установка по изучению неупругих ядерных взаимодействий нуклонов в углероде и железе при энергиях  $5 \cdot 10^{11}$ — $2 \cdot 10^{13}$  эв.

Она сконструирована на базе большого ионизационного калориметра на г. Арагац в сочетании с годоскопической системой, предназначенной для идентификации сорта космических адронов.

Приводится анализ параметров годоскопической системы за 1000 часов работы установки.

Показано, что предлагаемый метод определения сорта ядерно-активных частиц является простым и достаточно надежным.

В настоящей статье приводится описание установки, состоящей из ионизационного калориметра и годоскопической системы счетчиков Гейгера.

Электронные схемы были разработаны в МГУ. Монтажные и наладочные работы проводились совместно двумя группами (МГУ и Ереванский физический институт) на высокогорной станции Арагац. Предварительная эксплуатация установки ( $>1000$  часов измерений) и излагаемый ниже анализ надежности работы годоскопической системы установки проведены в Ереванском физическом институте.

Установка позволяет выделять нуклоны с энергией  $5 \cdot 10^{11}$ — $2 \cdot 10^{13}$  эв и изучать характеристики неупругих ядерных взаимодействий нуклонов с веществом.

Калориметр, измеряющий энергию адрона с большой точностью (дисперсия измерения  $\sigma = \langle (\ln E - \ln E_0)^2 \rangle = 0,22$ ), подробно описан в ряде работ (напр. [1]). Схематический вид всей установки приводится на рис. 1.

При измерении энергии  $E_1$ , выделенной адроном в калориметре, необходимо пользоваться формулой

$$E_1 = 0,76 \cdot 10^8 (J_{IV} + J_{VI}) + 1,52 \cdot 10^8 (J_{III} + J_V + \sum_{i=VII}^{XII} J_i) + 5 \cdot 10^8 \cdot J_{XII},$$

где  $J_i$  — суммарный толчок в  $i$ -ом ряду камер, выраженный в числе релятивистских частиц, прошедших по диаметру камер, а  $E_i'$  выражено в эв.

Расположенные над калориметром два ряда ионизационных камер со свинцовыми фильтрами служат для определения энергии электронно-фотонной ( $\gamma$ - $\phi$ ) компоненты:

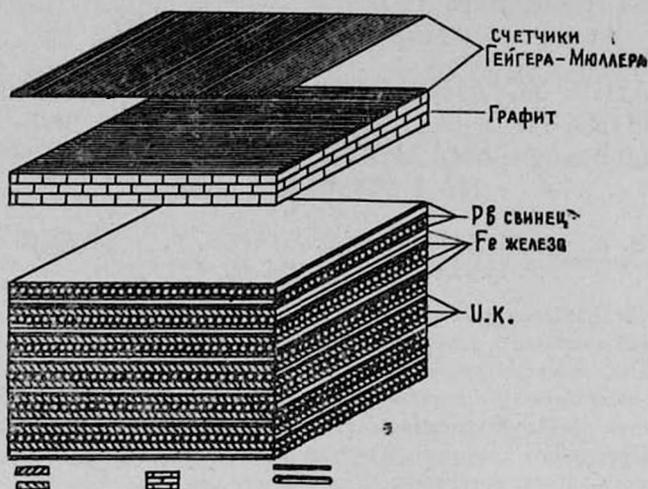


Рис. 1. Схематический вид установки.

$$E_2 = 1,78 \cdot 10^8 \cdot J_{I, II},$$

где  $J_{I, II}$  — максимальный толчок в одном из верхних (I и II) рядов камер.

Находящийся выше графитовый фильтр толщиной  $60 \text{ г/см}^2$  служит мишенью, в которой происходят ядерные взаимодействия адрона. Генерированные при этом  $\pi_0$ -мезоны и дают начало э-ф каскадам.

Таким образом, полная энергия адрона  $E_0 = E_1 + E_2$ .

Два ряда серийно выпускаемых газоразрядных счетчиков СИ-5Г (верхний, I, ряд — 420 счетчиков, по 10 в каждой коробке; нижний, II, — 360 счетчиков, 36 коробок), расположенных над мишенью и перекрывающих площадь калориметра, составляют годоскопическую систему, предназначенную для регистрации ливневого сопровождения  $\alpha$ -частиц, выделения одиночных адронов и для идентификации их сорта.

Регистрация событий происходит всякий раз, когда энерговыделение в калориметре превышает пороговую величину и годоскоп фиксирует прохождение одиночных или с малым ливневым сопровождением (главным образом электронов)  $\alpha$ -частиц ( $\leq 4$  частиц сопровождения на всей площади I ряда годоскопа).

12 рядов ионизационных камер позволяют достаточно точно определить координаты ядерно-каскадного ливня, вызванного частицей. Естественно, для анализа взаимодействий используются случаи, когда ионизация в калориметре образует ствол.

Критерий отбора адронов был следующий: ядерный ливень вызван нейтроном, если в коробке, соответствующей прохождению оси ливня, и двух смежных с нею не срабатывает ни один счетчик в обоих рядах. Частица считается заряженной, если в указанных коробках обоих рядов имеются сработавшие счетчики. При таком критерии

из-за посторонних разрядов в счетчиках и просчете мы теряем события. Статистический анализ характеристик годоскопа, приведенный ниже, позволяет достаточно точно определить процент потерянных по этому критерию событий.

Блок-схема установки приведена на рис. 2.

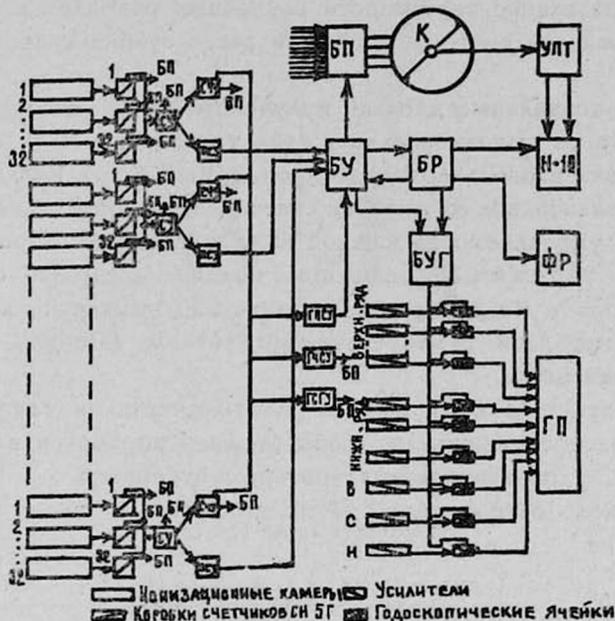


Рис. 2. Блок-схема установки.

Необходимыми для регистрации событий являются условия:

- а) суммарная ионизация в любых двух рядах камер должна превосходить пороговую величину в 300 рел. частиц;
- б) суммарная ионизация всех 12 рядов камер должна превосходить величину в 5000 рел. частиц;
- в) события должны быть одиночными, либо иметь малоплотное воздушное сопровождение.

При выполнении указанных требований блок управления установки вырабатывает главный мастерный импульс, который запускает блок памяти (БП), блок регистрации (БР) и блок управления годоскопом (БУГ).

БУГ вырабатывает и подает управляющий импульс на годоскопические ячейки всех счетчиковых коробок. Каждая ячейка соединена с неоновой лампочкой фотографируемой годоскопической панели системы регистрации. Система регистрации негативная.

Основными требованиями, предъявляемыми к годоскопу, являются:

- а) управляемость системы, т. е. не поджигание фотографируемой неоновой лампочки при пролете заряженного адрона через соответ-

ствующую коробку счетчиков (назовем это одиночным срабатыванием) и отсутствие срабатывания, (т. е. поджигание лампочки) при пролете нейтрона или же отсутствии частицы вообще.

б) высокая эффективность ( $\sim 100\%$ ) регистрации одиночных частиц;

в) точное знание вероятности случайных разрядов в счетчиках;

г) надежность системы и прежде всего стабильность параметров во времени.

Экспериментальные данные, полученные нами, вполне определенно указывают на выполнение всех этих требований.

Установка в описанном виде проработала более 1000 часов. Ежедневно проверялись все 78 коробок счетчиков по скорости счета и форме импульсов и управляемость каждой годоскопической коробки. Коробка считалась управляемой, если при подаче двадцати стандартных сигналов с БУГ-а на данную ячейку соответствующая лампочка ни разу не поджигалась. В отсутствие же сигнала лампочка все время (20 раз) поджигалась.

Для статистического анализа работы счетчиков годоскопа были построены распределения числа сработавших коробочек в обоих рядах для событий, удовлетворяющих критерию отбора.

Если число срабатываний  $N$  представить в виде нормального распределения

$$f(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2}} \cdot e^{-\frac{(N - \langle N \rangle)^2}{2(\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2)}},$$

то более 60% всех экспериментальных точек ложится в доверительный интервал  $\langle N \rangle \pm \sqrt{\langle N^2 \rangle}$  для обоих рядов. При этом  $\langle N \rangle = 48$  для I ряда и 97 для второго ряда.

Было построено и дифференциальное распределение частоты срабатывания  $N$ . Эта зависимость  $\rho(N)$  в виде гистограммы [приведена на рис. 3 (а, б) для верхнего и нижнего рядов. Можно показать, что она достаточно хорошо описывается в обоих случаях гауссовским распределением с  $\langle N \rangle = 48$  и 97.

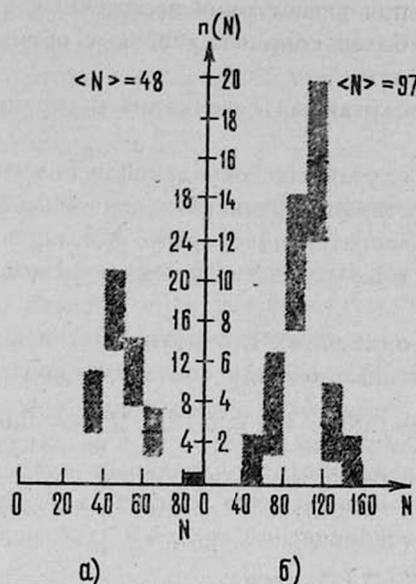
Для регистрации тройных совпадений, вызываемых пролетом релятивистских мюонов через установку, в калориметре, на разных глубинах, расположены три коробочки счетчиков, аналогичных счетчикам годоскопа.

Измерения методикой тройных совпадений проводились систематически (по 50 точек ежедневно). В статье используются данные по 1000 случаям.

При 100% эффективности и отсутствии случайных совпадений в счетчиках мы бы имели 1000 случаев с одиночным срабатыванием в обоих рядах. В таблице 1 приводятся экспериментальные данные.

Как видно из таблицы, годоскопическая система характерна почти 100% эффективностью регистрации частиц:

$$\epsilon_{\text{сст.}} = 97,5 \pm 3,3\%$$



ис. 3. Гистограммы распределения сработавших годоскопических коробок по рабочим событиям для верхнего а) и нижнего б) рядов годоскопа.

Таблица 1

(В процентах к 1000 случаям)

Число случаев с одиночным срабатыванием в I ряду	Число случаев с одиночным срабатыванием во II ряду	Число случаев с одиночным срабатыванием в обоих рядах
$40,1 \pm 2,4$	$46,0 \pm 2,6$	$21,0 \pm 1,8$
Число случаев с отсутствием срабатывания в I ряду	Число случаев с отсутствием срабатывания во II ряду	Число случаев с отсутствием срабатывания в обоих рядах
$16,4 \pm 1,3$	$14,8 \pm 1,2$	$2,5 \pm 0,5$

Если запускать калориметр  $m$  раз посторонним импульсом от специального генератора стандартных сигналов (имитируя тем самым главный мастерный импульс БУ), то при достаточно большом  $m$  распределение и число срабатываний в годоскопической системе позволяет экспериментально довольно точно определить вероятность случайных разрядов в годоскопической системе, вызванных посторонними событиями.

Анализ случайных совпадений для  $m = 1500$  дал следующие результаты:

а) вероятность случайных разрядов по обоим рядам составляет  $69,7 \pm 3,3\%$  ( $76,5 \pm 3,7\%$  по методике тройных совпадений). Это озна-

чает, например, что при регистрации заряженных адронов  $\sim 70\%$  всех событий с одним и более сопровождением в обоих рядах фактически являются одиночными;

б) вероятность случайных совпадений в верхнем ряду составляет  $54,8\%$ ;

в) вероятность случайных совпадений в нижнем ряду составляет  $44\%$  (довольно существенная разница в величинах вероятности в обоих рядах годоскопа объясняется некоторым поглощением ливневого сопровождения в  $\sim 10$  г/см<sup>2</sup> вещества между верхним и нижним рядами счетчиков);

г) вероятность одиночных и с разной степенью кратности случайных совпадений в нижнем ряду составляет соответственно

$$W_1^{II} = 0,31, \quad W_2^{II} = 0,12, \quad W_{>2}^{II} = 0,05.$$

Одинаковые характеристики случайных совпадений, измеренных нами в разное время эксперимента, свидетельствуют о стабильном характере работы годоскопической системы (таблица 2).

Таблица 2

	500 случаев	500 случаев три месяца спустя
Число случаев, когда в I ряду нет срабатывания (I=0) (независимо от II ряда)	199	234
Число случаев, когда во II ряду нет срабатывания (II=0) (независимо от I ряда)	271	280
Число случаев, когда в обоих рядах нет срабатывания (I=0, II=0)	137	157
Число случаев, когда I=0, II>0	62	74
Число случаев, когда I=0, II>1	15	13
Число случаев, когда I=0, II>2	3	4
Число случаев, когда II=0, I>0	134	120
Число случаев, когда II=0, I>1	46	33
Число случаев, когда II=0, I>2	7	6

При идентификации событий по годоскопической системе следует учесть возможность попадания в счетчики годоскопа рассеянных заряженных частиц малых энергий через боковую поверхность установки, а также возможность обратного тока заряженных ливневых частиц, зародившихся при взаимодействии „первичного“ адрона с ядром мишени-углерода.

Построив распределение срабатываний всех коробок по случайным и рабочим событиям, можно убедиться, что боковой эффект не играет сколько-нибудь значительной роли — крайние коробки не отличаются большим срабатыванием.

Количественная оценка этого эффекта показывает: из 1500 случайных событий наблюдалось 679 случаев с отсутствием срабатывания в верхнем ряду, из которых лишь в 245 случаях отмечалось срабатывание в нижнем ряду. Следовательно, эффект рассеяния боковых электронов может сказаться лишь в

$$W_{\text{бок.}} \sim \frac{245}{679} = 36\% \text{ всех случаев.}$$

Можно оценить и обратный ток ливневых заряженных частиц для II ряда (для первого ряда он практически отсутствует, так как между обоими рядами около  $10 \text{ г/см}^2$  вещества).

Для этого по пленкам было обработано  $N_0^I = 123$  рабочих событий, удовлетворяющих системе отбора. При этом требовалось, чтобы в верхнем ряду не было ни одного срабатывания. Очевидно, что указанные события являются одиночными нейтронами с  $\sim 15\%$  примесью одиночных заряженных  $\alpha$ -частиц, „бесследно“ проскочивших верхний ряд. При этом в каком-то проценте событий срабатывания в нижнем ряду были вызваны взаимодействиями нейтронов с малой неупругостью в веществе между обоими рядами.

Доля событий  $\delta$ , где сказывается обратный ток частиц, будет равна

$$\delta = \frac{N_0^I \cdot \varepsilon_I - N_0^{II} \cdot \varepsilon_{II} - N_1^{II} \cdot W_1^{II} - N_2^{II} \cdot W_2^{II} - N_{>2}^{II} \cdot W_{>2}^{II} - N_{>0}^{II} \cdot W_{\text{бок}}}{N_0^I \cdot \varepsilon_I},$$

где  $\varepsilon_I$  — эффективность регистрации частиц в I ряду — равна  $1 - 0,16 = 0,84$  (см. табл. 1);  $\varepsilon_{II}$  — эффективность регистрации частиц во II ряду — равна  $1 - 0,15 = 0,85$ ;  $N_1^{II} = 34$ ;  $N_2^{II} = 32$ ;  $N_{>2}^{II} = 30$  — числа событий, когда во II ряду одно, два и более двух срабатываний, соответственно;

$$N_{>0}^{II} = N_1^{II} + N_2^{II} + N_{>2}^{II} = 96.$$

Используя также величины  $W$ , приведенные выше, получаем  $\delta \leq 0,27$ .

Фактическая поправка на обратный ток еще меньше, так как система антисовпадений (АС) отбирала случаи, когда в I ряду число сработавших коробок  $\leq 4$ . Естественно, при этом в нижнем ряду может срабатывать и большее число счетчиков, так как никакого ограничения в этом ряду нет. Эксперимент показывает, что при отсутствии системы АС и в верхнем ряду величины  $\langle N \rangle$  в обоих рядах в пределах статистических ошибок одинаковы. Это указывает на то, что обратный ток ливневых заряженных частиц, если и существует, то очень мал.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность В. Я. Шестоперову за прочтение рукописи и ряд замечаний.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. А. Собиляков, Диссертация, НИИЯФ, МГУ, 1968.

5.10 — 2.10 էվ էներգիաների Դեպոնիտ Նոնկոնեների  
ՈՉ ԱՌԱՋԳԱԿԱՆ ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ԵՐԵՎՈՒՅՑԹՆԵՐԻ ՌԻՍՈՒՄՆԱՍԻՐՄԱՆ  
ՀԱՄԱՐ ՆԱԽԱՏԵՍՎԱԾ ԿԱՅԱՆՔԻ ՆԿԱՐԱԴՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՆՐԱ  
ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԾՈՎԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅՑԻՅ  
3250 Մ. ԲԱՐՁՐՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Է. Ա. ՄԱՄԻԶՅԱՆ, Մ. Հ. ԱԶԱՐՅԱՆ, Ռ. Ա. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Ռ. Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՈՎ,  
Մ. Մ. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ

Նկարագրվում է կայանքում ածխածնի ու երկաթի նուկլոնների ոչ առաձգական միջուկային  
փոխազդեցությունների ուսումնասիրությունը  $5 \cdot 10^{11}$ — $2 \cdot 10^{13}$  էներգիաների ղեկավարում:

Կայանքը ստեղծված է Արագածի իոնիզացիոն մեծ կալորիմետրի հիման վրա, ղուգակցված  
հողոսկոպիկ սխեմայի հետ, որը նախատեսված է տիեզերական աղբյուրների տեսակի իզննա-  
ֆիկացման համար:

Բերված է հողոսկոպիկ սխեմայի պարամետրերի վերլուծությունը, կայանքի 1000 ժ. աշ-  
խատանքի համար:

Ցույց է տրված, որ միջուկային ակտիվ մասնիկների տեսակի որոշման առաջարկված եղա-  
նակը հանդիսանում է հասարակ ու բավարար հուսալի:

AN EQUIPMENT TO STUDY NUCLEAR INTERACTIONS  
OF NUCLEONS IN  $5 \cdot 10^{11}$ — $2 \cdot 10^{13}$  eV ENERGY REGION  
WHICH CONSISTS OF AN IONIZATION CALORIMETER  
AND HODOSCOPIC SYSTEM

E. A. MAMIDJANIAN, M. O. AZARIAN, R. A. BADALIAN,  
R. M. MARTIROSOV, M. M. MURADIAN

An equipment for an investigation of strong interactions of nucleons in the  
 $5 \cdot 10^{11}$ — $2 \cdot 10^{13}$  eV energy region is described.

The equipment consists of an ionization calorimeter and hodoscopic system for  
identification of the charge of hadrons.

The detailed analysis of parameters of hodoscopic system is given.

On the basis of preliminary running of apparatus (for more than 1000 hours  
this equipment is concluded to provide an effective way of studying the nuclear  
interactions of nucleons.