

**НИИЯФ  
МГУ**

Препринт -92 - 7/256

НИИЯФ - МГУ - 92 - 7 - 256

**РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ  
С ЭНЕРГИЯМИ 40-2000 МэВ  
НА ИНТЕНСИВНОМ ФОНЕ  
 $\gamma$ -КВАНТОВ С ПОМОЩЬЮ  $CsJ(Tl)$   
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ  
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ У-70**

МОСКВА 1992

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Антилов А.В., Белогорлов Е.А., Богомолов А.В., Бритвич Г.И.,  
Купцов С.И., Лупенко Г.В., Мягкова И.Н., Рюмин С.П.,  
Чумаков А.А

Регистрация нейтронов с энергиями 40-2000 МэВ на  
интенсивном фоне  $\gamma$ -квантов с помощью CsJ(Tl) в  
эксперименте на синхротроне У-70.

Препринт НИИЯФ МГУ -92-7/256

Москва, 1992

УДК 539.1.074.3

## СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация.....	3
Введение.....	6
Описание экспериментальной установки.....	8
Идентификация нейтронов и $\gamma$ -квантов.....	12
Результаты измерений.....	16
Заключение.....	23
Литература.....	24

Аннотация.

Исследовались характеристики детектора, предназначенного для регистрации солнечных нейтронов на космических аппаратах. Показано, что использование метода идентификации по форме сцинтилляционной вспышки в CsJ(Tl) дает возможность надежно разделить нейтроны и  $\gamma$ -кванты во всем исследованном диапазоне энергий, в том числе и при таких энергиях, когда фон от  $\gamma$ -квантов по отношению к потоку нейтронов в  $\approx 2$  раза выше, чем в космическом пространстве. Получены количественные оценки эффективности разделения вторичных протонов и электронов для энергий  $13.5 \pm 80$  MeV. В диапазоне  $21 \pm 45.5$  MeV сделаны оценки аппаратного спектра изотопного состава продуктов взаимодействия нейтронов с ядрами Cs и J. На основании полученных данных рассчитаны зависимости эффективности регистрации нейтронов и присчета  $\gamma$ -квантов от величины порога схемы идентификации для условий космического пространства.

Die Registrierung der Neutronen mit den Energien von  $10 \pm 2000$  MeV in Gegenwart des intensiven Hintergrunds der  $\gamma$ -Quanten mit Hilfe des Szintillatorkristall CsJ(Tl) im Experiment in der Teilchenbeschleuniger U-70.

Annotation.

In diesem Experiment erforschten wir die Charakteristiken des Detector, für die Registrierung der Solar Neutronen in Weltraum-Apparate vorausbestimmt. Wir erhalteten, daß die Verwertung der Palsform-Auswahl die Tunnung von Neutronen and  $\gamma$ -Quanten in aller erforschten Energiebereich erlaubt. Wir erhalteten die Bewertungen der Effektivität der Tunnung der sekundären Protonen und Elektronen mit den Energien von  $13.5 \pm 80$  MeV und des apparate Spectrum der isotopen Zusammensetzung der Produkte der Zusammenwirkung der Neutronen mit den Kerne Cs und J für die Energien von  $21 \pm 45.5$  MeV. Auf Grund der erhalten Daten, berechneten wir die Abhängigkeiten der Effektivität der Registrierung der Neutronen und der Anzahl der  $\gamma$ -Quanten, die als Neutronen registrierten, von der Größe der Schwelle des Trenung-Scheme.

Detection of 40±2000 MeV neutrons at the intense  $\gamma$ -ray background during the proton synchrotron U-70 experiment.

A.V.Antipov, E.A.Belogorlov, A.V.Bogomolov, G.I.Britvich,  
S.I.Kuptsov, G.V.Lupenko, I.N.Myagkova, S.P.Ryumina,  
A.A.Chumakov

#### Abstract.

The characteristics of the detector, intended for the observations of neutrons, produced by solar flares, in interplanetary space are studied. The measurements of such neutrons are difficult because of  $\gamma$ -ray background. In our experiment the detection of neutrons became possible due to the products of these particles interactions with the matter of CsI(Tl). In the course of such interactions the hydrogen and helium isotopes with the energies from one to tens MeV are mainly produced. Using the light-pulse shape in CsI(Tl) dependence on ionizational density allowed to separate the events caused by neutrons and  $\gamma$ -rays, which are detected due to the electrons and positrons with the low density of ionization.

In the earlier experiments, the effectivity of the separation of electrons and protons, which are heavy particles with the ionizational density close to that of electrons (at the definite energy) was not measured in the energies range 13.5-80 MeV.

The measurements were carried out at the Institute of High Energy Physics proton synchrotron. Secondary particles, produced in the process of beam proton interaction with the thin target passed through the magnet selecting the particles with the rigidity of about 2.5 GeV/c. The neutrons were born in the course of about 2 GeV protons interaction with 5 cm wide Pb target. The event was analyzed only when the "master" was generated. The "master" was formed if the signal from the telescope, consisted of two thin counters, which was situated in front of the target and was intended for the single relativistic particles detection, and the signal from the

analyzed detector ( CsJ(Tl) 8cm\*8cm) were present, and if at the same time the signal from any of the three counters situated in front of the target too and intended for the detection of two or more relativistic particles, and the signal from the detector "VETO", situated in front of the analyzed detector and intended for the detection of single charged particle, were absent.

The intensities of fast ( $I_f$ ) and slow ( $I_s$ ) components of the light-pulse in CsI(Tl) (the times of the de-excitation are  $0.5 \pm 0.1$  ns and  $4 \pm 7$   $\mu$ s, respectively) integration was made by the scheme of the identification for every component in its own circuit.  $I_f$  was integrated during the time from 0 to 3  $\mu$ s after the particles detection,  $I_s$  was integrated from 3 to 10  $\mu$ s. The time of flight of the particle from the target to the analyzed detector was measured too.

The results of this experiment presented as  $I_s(I_f)$  dependence show, that electrons and protons can be exactly separated in whole analyzed secondary particles energy range (13.5-80 MeV). The groups of events corresponding to deuterons tritons and  $\alpha$ -particles can be separated too. The separation of electrons and protons (and of  $\gamma$ -rays and neutrons, respectively) is good even at the energies, when the relation of the background  $\gamma$ -rays flux to the flux of neutrons is more with the coefficient  $\approx 2$  than that in the interplanetary space.

The dependence of the effectivity of neutron detection and the number of the  $\gamma$ -quanta, which will be detected as neutrons, on the value of the threshold of the identificational scheme for the interplanetary space were obtained, due to this experiment data. It was found, that if the value of this threshold changes in limits  $\pm 10\%$  from optimal value, the effectivity of the neutron detection changes from 87% to 100% and the number of  $\gamma$ -quanta, detected as neutrons, changes from 0% to 18%.

### Введение.

В связи с первыми наблюдениями потоков нейтронов солнечных вспышек в последнее время резко возрос интерес к различным способам регистрации этих частиц /1/. Одним из возможных детекторов нейтронов является прибор, собранный на основе сцинтилляционного кристалла CsJ(Tl), в котором регистрация нейтронов и  $\gamma$ -квантов осуществляется по продуктам их взаимодействия с веществом сцинтиллятора. В этом приборе производится идентификация нейтронов и  $\gamma$ -квантов по форме светового импульса в CsJ(Tl), что обуславливает низкий аппаратный фон при относительно малом весе и достаточной компактности. Помимо этого, данный прибор позволяет измерять спектры  $\gamma$ -линий. Так как измерения потоков солнечных нейтронов осложняется большим фоном  $\gamma$ -квантов, то преимущество данного прибора по сравнению с другими предлагаемыми детекторами представляются достаточно существенными /2/.

В эксперименте на орбитальном комплексе "Салют-7" - "Космос-1686"  $\gamma$ -фон подобного детектора, по сравнению с фоном сцинтилляционного детектора с кристаллами NaJ и CsJ, в котором нейтроны и  $\gamma$ -кванты не разделялись, был ниже не менее, чем в 5 раз /3/. Однако до настоящего времени не было данных об эффективности разделения нейтронов и  $\gamma$ -квантов по форме импульса в CsJ(Tl), что не позволяло интерпретировать результаты, полученные при помощи этой методики, с достаточной точностью.

Использованный метод разделения нейтронов и  $\gamma$ -квантов основан на зависимости формы сцинтилляционной вспышки в CsJ(Tl) от удельной ионизации регистрируемых частиц. Такое разделение возможно вследствие того, что во взаимодействиях нейтронов с ядрами Cs и J образуются в основном протоны, дейтроны, гритоны со средней энергией  $\sim 10$  МэВ и  $\alpha$ -частицы со средней энергией 15+20 МэВ /4/, а продуктами взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом сцинтиллятора при энергиях выше нескольких МэВ являются релятивистские электроны и позитроны.

Как впервые было установлено авторами /5/, сцинтилляционная вспышка в CsJ(Tl) состоит из двух основных компонент высвечивания ( $\tau_1 \approx 0.5+0.7$  мкс,  $\tau_2 \approx 7$  мкс), а отношение полного числа фотонов (интенсивности) медленной

компоненты к полному числу фотонов быстрой компоненты зависит от удельной ионизации регистрируемой частицы. Зависимость величины этого отношения от удельной ионизации приведена в /6/. Эксперименты, описанные в /7,8/, продемонстрировали, что идентификация по форме импульса в CsJ(Tl) позволяет разделить электроны, протоны, дейтроны и  $\alpha$ -частицы при энергиях от 1 до 10 МэВ. В работах /9,10,11/ исследовалась эффективность разделения электронов с энергией 0.1+2.2 МэВ и  $\alpha$ -частиц с энергией 0.1+5.5 МэВ при помощи различных методов цифрового анализа формы световой вспышки. Недавно авторами /12/ было показано, что при помощи данного метода в диапазоне энергий до 100 МэВ можно идентифицировать ионы с  $Z \leq 3$  и разделить изотопы водорода и гелия. В работе /13/ аналогичный результат был получен уже для энергий вплоть до 200 МэВ, а также было показано, что при таких энергиях для частиц с  $Z \geq 4$  в зависимости формы импульса от удельной ионизации наступает насыщение. Возможность разделения электронов и протонов исследовалась авторами /13/ только при энергиях до  $\sim 5$  МэВ. Согласно /13/,  $\tau_B \sim 0.5-1.0$  мкс,  $\tau_H \sim 4$  мкс.

Таким образом, возможность разделения электронов и протонов при помощи данного метода и эффективность такого разделения исследовалась только при энергиях 0.1+10 МэВ. В то же время для определения эффективности разделения нейтронов и  $\gamma$ -квантов необходима измерения эффективности разделения электронов и протонов при энергиях 5-100 МэВ, так как в этом диапазоне, согласно данным /4/, лежат энерговыведения заряженных частиц для основной части взаимодействий нейтронов с энергиями до  $\sim 2$  ГэВ с тяжелыми веществами. Помимо этого необходимо знать аппаратный спектр вторичных частиц, образованных в таких взаимодействиях в CsJ(Tl). Существующие данные позволяют провести только грубые оценки такого спектра. Наконец, измерения эффективности разделения по форме импульса в CsJ(Tl) непосредственно нейтронов и  $\gamma$ -квантов до настоящего времени не проводилось.



Описание экспериментальной установки.

Возможности регистрации нейтронов на интенсивном фоне  $\gamma$ -квантов при помощи кристалла CsJ(Tl) исследовались в эксперименте на синхрофазотроне У-70 (ИФВЭ). Излучение, образованное во взаимодействиях ускоренных до энергий  $\approx 70$  ГэВ протонов с мишенью из Al, проходило через электромагнит, отбравший частицы с жесткостью 2.5 ГэВ/с. Эти частицы выводились в экспериментальный зал через отверстие в биологической защите ускорителя. Сброс пучка осуществлялся в течение 1 секунды 1 раз в 10 секунд.

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1.

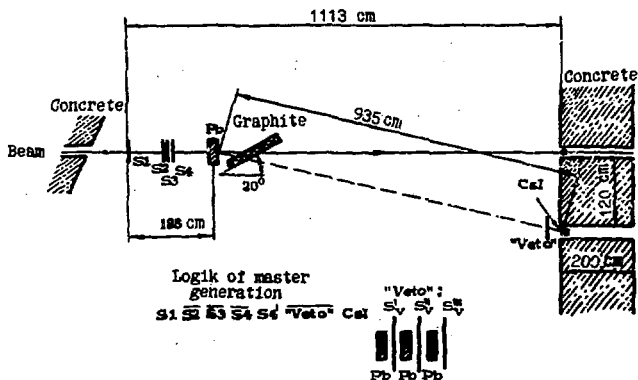


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Fig.1. A schematic drawing of the experimental installation.

Протоны с энергией  $\approx 2$  ГэВ взаимодействовали с мишенью из свинца размерами 5см-20см-10см. Нейтроны и  $\gamma$ -кванты, образовавшиеся в результате этих взаимодействий, регистрировались исследуемым детектором ("CsJ" на рис.1). Детектор представлял из себя сцинтилляционный кристалл CsJ(Tl) диаметром и высотой

8см в заводской упаковке из Al, просматриваемый ФЭУ-110. Суммарная толщина упаковки кристалла и упаковки всего сцинтилляционного счетчика составляла 4-5 мм Al. Детектор был расположен в углублении бетонной стены толщиной 2 м. Заряженные частицы разделялись при помощи счетчика, обозначенного на рис. I "Veto". Для уменьшения фона от первичных и вторичных заряженных частиц исследуемый детектор был выведен из пучка и находился на расстоянии 1.2 м от его оси.

По пути к мишени пучок проходил через счетчики  $S_1, S_2, S_3, S_4$ . Расстояние между счетчиками  $S_1$  и "CsJ" составляло  $\approx 1.2$  м, что позволило, измеряя время пролета частиц между этими счетчиками, оценить энергию регистрируемых нейтронов.

Каждый из счетчиков  $S_1, S_2, S_3, S_4$  представлял собой пластический сцинтиллятор размерами 2см-12см-12см, просматриваемый ФЭУ-85. Счетчики  $S_1$  и  $S_4$  образовывали телескоп, который служил для выделения событий, вызванных приходом протонов пучка. Порог регистрации для счетчиков  $S_1$  и  $S_4$  был установлен на уровне  $0.8 E_0$ , где  $E_0$  соответствует максимуму в распределении энергетических потерь релятивистских частиц в данном сцинтилляторе (для счетчика  $S_4$  этот порог обозначен на рисунке как  $S_4^1$ ). Для защиты от событий, вызванных одновременным приходом двух и более частиц, у счетчиков  $S_2, S_3, S_4$  устанавливался порог на уровне  $1.5 E_0$  (т.о. у счетчика  $S_4$  имелось 2 порога), и отбирались события, не зарегистрированные ни одним из счетчиков  $S_2, S_3, S_4$  по этому порогу. Скорость счета для счетчика  $S_1$  составляла  $\approx 312500$  с $^{-1}$ , величина потока событий, соответствующих логике отбора  $S_1 S_2 S_3 S_4 S_4^1$ , была равна  $\approx 73500$  с $^{-1}$ .

На пути пучка за свинцовой мишенью находилась графитовая пластина размерами 6см-50см-18см, установленная под углом  $\approx 20^\circ$  к оси пучка. Она служила для уменьшения  $\gamma$ -фона, образованного тормозным излучением электронов.

Структура счетчика "Veto", использовавшегося для защиты от заряженных частиц и ослабления потока  $\gamma$ -квантов, изображена на вставке рис. I. Данный счетчик был собран на основе трех пластических сцинтилляторов размерами 2см-24см-24см, каждый из которых просматривался своим ФЭУ-85, между сцинтилляторами находились пластины Pb размерами

1.2см-20см-20см. Сработавшим "Veto" считался в случае срабатывания хотя бы одного из трех сцинтилляционных счетчиков  $S_{\gamma}$ . Скорость счета счетчика "Veto" составляла  $44 \text{ с}^{-1}$ .

Логика формирования управляющего (мастерного) импульса, разрешавшего анализ и последующую запись событий, имела вид  $S_1 S_2 S_3 S_4 \text{ "Veto" "CsJ"}$  ("CsJ" соответствует сигналу на аноде ФЭУ исследуемого детектора). Для того, чтобы избавиться от фона малознергичных  $\gamma$ -квантов, которые составляли >95% всех регистрируемых событий при пороге  $\approx 0.5 \text{ МэВ}$ , для "CsJ" был установлен порог  $\approx 4.3 \text{ МэВ}$ . Скорость счета мастерного импульса составляла  $\approx 4.5 \text{ с}^{-1}$ .

Функциональная схема системы, использовавшейся для измерения интенсивностей быстрой ( $I_B$ ) и медленной ( $I_M$ ) компонент и времени пролета представлена на рис.2. В ней использована схема, аналогичная применявшейся для разделения нейтронов и  $\gamma$ -квантов в эксперименте на ОК "Салют-7" - "Космос-1686" /14/.

При обработке событий с помощью такой схемы производилось раздельное интегрирование интенсивностей быстрой и медленной компонент сигнала с последнего диода ФЭУ. Для уменьшения фона интегрирование начиналось только в случае прихода мастерного импульса. Мастерный импульс, логика формирования которого приведена выше, поступал на схему управления ключами. В исходном состоянии ключи К1 и К2, а также К3 и К4 разомкнуты, а К5 и К6 - замкнуты.

В момент прихода мастерного импульса ( $t_0$ ) К1 замыкался, а К5 размыкался, и происходило интегрирование в тракте быстрой компоненты сигнала (постоянная интегрирования  $I_B \approx 3 \text{ мкс}$ ). Через 3 мкс К1 размыкался, К2 замыкался и К6 размыкался. При этом тракт быстрой компоненты переходил в режим хранения амплитуды на конденсаторе  $C_1$ , а в тракте медленной компоненты начиналось интегрирование (постоянная интегрирования  $I_M \approx 7 \text{ мкс}$ ). Затем, спустя 10 мкс после  $t_0$ , происходило размыкание К2, а также замыкание К3 и К4, при этом сигналы в каждом из трактов, пропорциональные интенсивностям соответствующих компонент, после усиления поступали каждый на свой 2048-канальный АЦП, а затем записывались ЭВМ СМ-4. Запись осуществлялась только в случае прихода на ЭВМ мастерного импульса. По окончании записи ЭВМ вырабатывался сигнал,

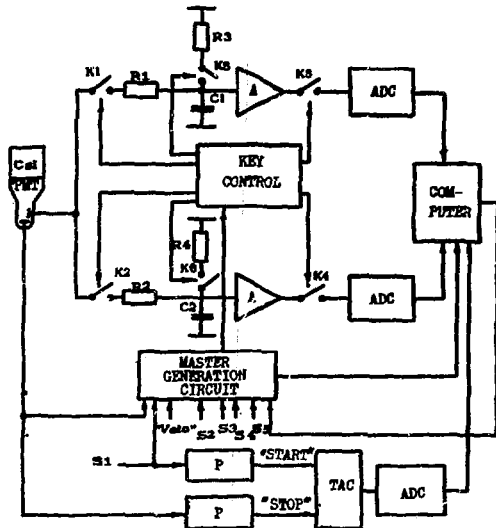


Рис.2. Функциональная схема системы, использовавшейся для измерения интенсивностей быстрой и медленной компонент и времени пролета.

Fig.2. A functional block-diagram of the system used for the measurements of the intensities of the fast and slow components and the time of flight.

PMT - photomultiplier tube,

A - amplifier,

ADC - analog - digital converter,

P - pulse-shape circuit,

TAC - time - amplitude converter,

MGC - master generation circuit,

KC - key control circuit.

который поступал на схему формирования мастерного импульса, разрешая формирование следующего мастерного импульса.

Кроме интенсивностей быстрой и медленной компоненты, для каждого события записывалась амплитуда сигнала, формируемого время-амплитудным преобразователем (ВАП), в котором сигналами "старт" и "стоп" служили сигналы с  $S_T$  и "CsJ" соответственно.

Через 13 мкс после  $t_0$  происходит размыкание К3 и К4 и замыкание К5 и К6, в результате чего конденсаторы С1 и С2 начинают разряжаться. После окончания разряда конденсаторов (15 мкс после  $t_0$ ) схема приходит в исходное состояние и готова проводить анализ следующего события. Таким образом, интегрирование медленной компоненты начиналось тогда, когда интенсивность быстрой компоненты уменьшалась более, чем в 50 раз. Интегрирование быстрой компоненты проводилось практически полностью, а медленной - на 41% от полной интенсивности (считая  $t_M=7$  мкс). Усиление в трактах измерения интенсивностей быстрой и медленной компонент были подобраны так, что для  $\gamma$ -квантов  $^{137}\text{Cs}$   $I_B=I_M$ .

За время сеанса было набрано  $\approx 87000$  событий. Калибровка АЦП, измерявших  $I_B$  и  $I_M$ , производилась при помощи радиоактивных источников  $^{60}\text{Co}$  и  $\text{Pu-Be}$  ( $\gamma$ -линии 1.17, 1.33 МэВ и 3.8, 4.3 МэВ соответственно) и по положению максимумов в спектрах энерговыделений релятивистских заряженных частиц в кристалле CsJ(Tl), а в промежуточном между ними диапазоне - от генератора. При помощи трех калибровочных задержек 14.0, 38.2 и 80.0 нс была проведена калибровка время-прелетной системы.

#### Идентификация нейтронов и гамма-квантов.

Полученный массив данных был представлен в виде двумерной диаграммы " $I_B-I_M$ " (рис.3). Для  $I_B$  и  $I_M$  приведены номера каналов АЦП, а также соответствующие им энергии, полученные, как отмечено выше, в процессе калибровок по релятивистским частицам.

На рисунке отчетливо видны две полосы, расположенные под  $\approx 45^\circ$  к оси абсцисс. Верхняя, наиболее интенсивная, проходит через весь рабочий диапазон АЦП - от порога (4.3 МэВ по  $I_B$ )

и вплоть до максимальных значений, регистрируемых АПД (при энергиях выше 80 МэВ и по  $I_B$ , и по  $I_M$  АПД перегружаются).

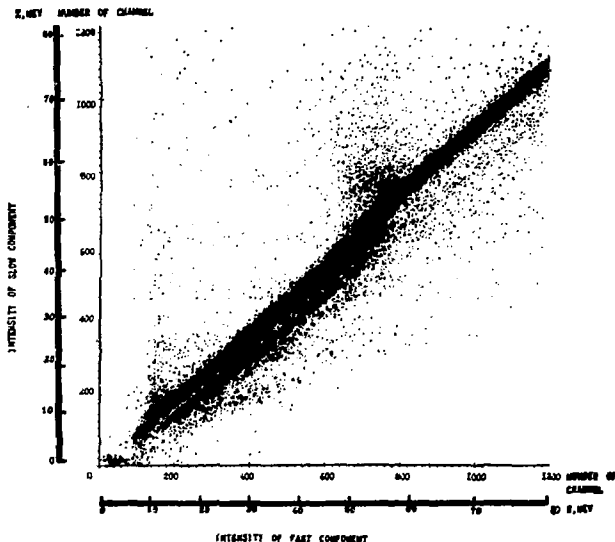


Рис.3. Диаграмма соотношений между интенсивностями быстрой и медленной компонент для всего полученного массива событий.

Fig.3. A diagram of relations of the fast and slow components intensities for all obtained events.

Нижняя полоса отчетливо видна в  $\sim 150+600$  каналах по  $I_B$ , и заметна, хотя и с существенно меньшей интенсивностью, в  $800+1200$  каналах. Ниже этих двух полос просматривается полоса

в  $\approx 350+700$  каналах, еще ниже - еще одна в  $200+500$  каналах. Согласно приведенным в /Б,Б/ данным, отношение  $I_M/I_B \approx 1$  для релятивистских частиц и убывает с увеличением удельной ионизации. Логично предположить, что основная полоса, для которой  $I_M/I_B$  действительно близко к единице (отклонения от линейности на рис.3 связаны с характеристиками усилителей), обусловлена релятивистскими электронами, образующимися во взаимодействиях с CsJ  $\gamma$ -квантов, а полосы, расположенные ниже, определяются частицами, образованными во взаимодействиях нейтронов с ядрами Cs и J - в основном изотопами водорода и гелия с энергиями единицы-десятки МэВ.

Помимо событий, образующих полосы, по полю двумерной диаграммы разбросаны единичные фоновые события. Эти события связаны, главным образом, с частицами, попадающими в CsJ в те моменты времени, когда происходит интегрирование сигнала от предыдущей частицы. Концентрация фоновых событий возрастает при  $I_B=50-60$  МэВ, что соответствует энергоделению в нашем кристалле релятивистских частиц - основной компоненты фона вблизи ускорителя при высоких энергиях, а также при малых энергиях вблизи порога обрезания, где велики потоки вторичных  $\gamma$ -квантов. Число фоновых событий составляет не более 3% от общего числа событий.

Справедливость предположения о природе различных групп событий подтверждает время-пролетные спектры, приведенные на рис.4. Первый из них построен для всего массива данных, т.е. для нейтронов и  $\gamma$ -квантов вместе, второй - только для событий, лежащих на диаграмме " $I_B-I_M$ " ниже границы разделения верхней полосы от нижней, а значит, согласно сделанному предположению, для событий, вызванных нейтронами. Из рисунка видно, что у первого спектра при минимальных значениях времени пролета наблюдается интенсивный пик, вызванный релятивистскими частицами, причем именно в этом пике сосредоточена основная часть событий. У второго спектра такой пик отсутствует. Таким образом, события, лежащие на верхней полосе диаграммы " $I_B-I_M$ " обусловлены, главным образом, релятивистскими частицами; события, образующие второй спектр - в основном, частицами с  $\beta=0.3+0.7$ .

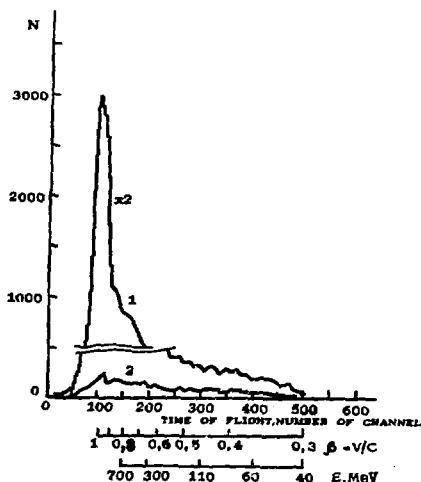


Рис.4. Время-пролетные спектры: 1 - события, вызванные нейтронами и  $\gamma$ -квантами; 2 - события, вызванные нейтронами.

Fig.4. Time-of-flight spectra. 1 - events caused by neutrons and  $\gamma$ -quanta, 2 - events caused by neutrons only.

Поскольку  $\gamma$ -кванты - релятивистские частицы, а спектр нейтронов, образовавшихся в ядерных взаимодействиях протонов с энергией  $\approx 2$  ГэВ с тяжелым веществом, согласно /4/, быстро спадает с ростом энергии, полученные спектры служат доказательством того, что события на центральной полосе двумерной диаграммы вызваны, в основном,  $\gamma$ -квантами, а события с меньшими  $I_M/I_E$  - нейтронами, и подтверждают возможность разделения нейтронов и  $\gamma$ -квантов исследуемым методом во всем использованном интервале энергий нейтронов. Шкала значений  $\beta=v/c$ , приведенная на рис.4 внизу, позволяет оценить энергии нейтронов. Шкала энергий нейтронов также приведена на рис.4. Как видно, энергии регистрируемых нейтронов лежат в широком диапазоне от 40 МэВ до релятивистских, их дифференциальный спектр имеет широкий



максимум в районе 50-80 МэВ. Разрешение время-пролетной системы по релятивистскому пику составляет 8 нс, или 25%.

### Результаты измерений.

На рис.5,6 приведены сечения диаграммы " $I_B-I_M$ " при фиксированных значениях быстрой компоненты, причем из-за малого числа зарегистрированных событий выполнялось суммирование сечений с учетом чаклона каждой из полос.

Считалось, что событие принадлежит одной из полос в том случае, если оно было расположено к центру этой полосы ближе, чем к центрам всех других полос. Суммирование выполнялось для девяти интервалов, ограниченных следующими значениями каналов: 151-200, 201-300, 301-400, 401-500, 501-600 (рис.5) и 801-900, 901-1000, 1001-1100, 1101-1200 (рис.6). Полученные сечения приведены к следующим значениям энергии (по быстрой компоненте): 13.5 МэВ (200 канал), 21 МэВ (300 канал), 29 МэВ (400 канал), 37 МэВ (500 канал), 45.5 МэВ (600 канал), на рис.5 и 65 МэВ (900 канал), 70 МэВ (1000 канал), 75 МэВ (1100 канал), 80 МэВ (1200 канал) на рис.6. Вертикальными черточками на рис.5 отмечены значения  $I_M$  при данных энергиях для протонов (p), дейтронов (d), тритонов (t),  $\alpha$ -частиц ( $\alpha$ ). Эти значения были рассчитаны исходя из приведенной в /6/ зависимости  $I_M/I_B$  от удельной ионизации частиц. Как и в /6/, было принято, что удельная ионизация равна энергии частиц, деленной на их пробег. На рис.6, относящемся к той части двумерной диаграммы, где заметно только два полосы, значения  $I_M$  отмечены только для протонов. Рассчитанные значения  $I_M$  нормированы к нашим данным при энергии протонов, равной 21 МэВ, то есть по протонному пику на рис. 5 b) (нормировочный множитель равен 1.05).

На рис.5,6 еще более наглядно, чем на рис.4, видно, что две наиболее интенсивные группы событий хорошо разделяются. Максимумы в спектрах второй по интенсивности группы событий при использованной нормировке в пределах  $\pm 5\%$  совпадают со значениями  $I_M$ , соответствующими, согласно /6/, протонам. Даже

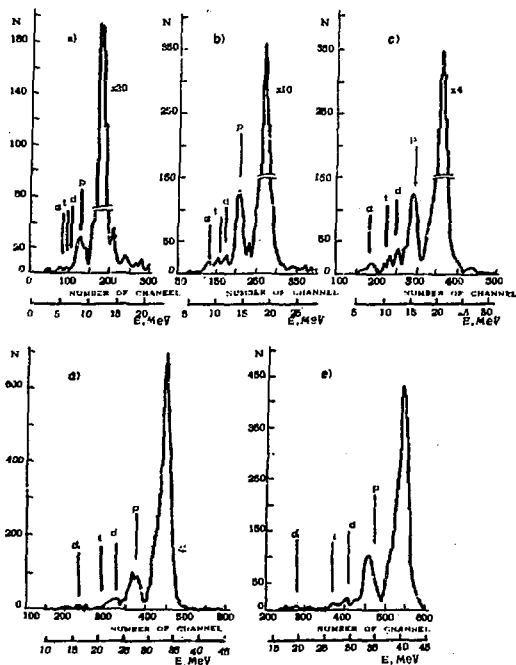


Рис.5.Сечения двумерной диаграммы " $I_B-I_M$ " при  $I_B=const$ : а - 13.5 MeB (200 канал), б-21 MeB (300 канал), с - 29 MeB (400 канал),д-37 MeB (500 канал),е-45.5 MeB(600 канал)  
 Fig.5.Sections of two-dimensional diagram " $I_B-I_S$ " for  $I_B=const$ , а - 13.5 Mev (200 channel), б - 21 Mev (300 channel), с - 29 Mev (400 channel), д - 37 Mev (500 channel), е - 45.5 Mev (600 channel).

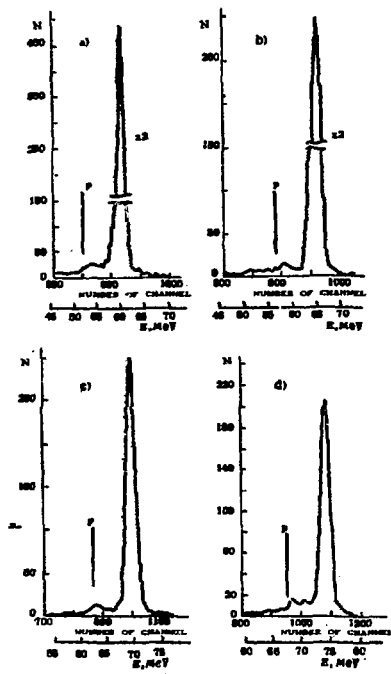


Рис.6. Сечения двумерной диаграммы " $I_E - I_M$ " при  $I_E = \text{const}$ : а - 65 МэВ (900 канал), б - 70 МэВ (1000 канал), в - 75 МэВ (1100 канал), д - 80 МэВ (1200 канал).

Fig.6. Sections of two-dimensional diagram " $I_E - I_M$ " for  $I_E = \text{const}$ , а - 65 MeV (900 channel), б - 70 MeV (1000 channel), в - 75 MeV (1100 channel), д - 80 MeV (1200 channel).

при плохой статистике прорисовываются спектры, для максимумов которых значения  $I_m$  мало отличаются от значений, рассчитанных для дейтронов (рис.5b,c,d,e), тритонов (рис.5b,c,e),  $\alpha$ -частиц (рис.5b,c,d).

Как видно из рисунки 5а, даже при минимальной из имеющихся энергий (13.5 МэВ), где значение в максимуме электронного пика превышает аналогичное значение для протонного пика более, чем в 140 раз, наблюдается разделение этих двух пиков, а следовательно, возможно достаточно надежное разделение нейтронов и  $\gamma$ -квантов. В предположении, что фон между электронным и протонным пиками полностью обусловлен  $\gamma$ -квантами и что такую же величину имеет фон (присчет)  $\gamma$ -квантов под протонным пиком (это является верхним пределом для оценки присчета  $\gamma$ -квантов) было получено, что вклад электронов в протонный пик при энергии 13.5 МэВ не превышает 14%. В то же время, по данным эксперимента на ОК "Салют-7" - "Космос-1686", в условиях космического пространства для аналогичного детектора скорости счета  $\gamma$ -квантов превышают скорости счета нейтронов при одинаковых энергиях вторичных частиц не более, чем в 50 раз /3/.

Для количественной оценки эффективности разделения протонов и электронов, был использован параметр разделения, введенный в работе /9/  $\xi = ((\alpha_1/\alpha_2)_1 - (\alpha_1/\alpha_2)_j) / (\sigma_1^2 - \sigma_2^2)^{0.5}$ , где в общем случае  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - величины, пропорциональные интенсивностям медленной и быстрой компонент,  $(\alpha_1/\alpha_2)_{1,j}$  - средние соотношения данных величин для каждого из сортов разделяемых частиц,  $\sigma_{1,j}$  - дисперсии распределений этих соотношений. Рассчитанные по нашим данным (см. рис.5, 6) значения параметра разделения показаны на рис.7. Эти значения лежат в диапазоне 1.7+2.3, ошибки их определения составляют 29% в первом случае и 10-13% для остальных случаев. Характер зависимости при более низких энергиях виден из значений, рассчитанных по приведенным в /8/ данным, которые также показаны на рис.7. Как видно из рис.7, значения  $\xi$ , полученные в нашем эксперименте и рассчитанные по данным /8/, хорошо стыкуются. Однако, поскольку согласно данным, приведенным в /8/ энергетическое разрешение по медленной компоненте при регистрации  $\gamma$ -квантов в этом эксперименте составляет

≈6% уже при энергии 5 МэВ, а в наших измерениях - ≈7.5% при энергии 13.5 МэВ, этот результат может быть случайным. Используемые для расчета значения энергетического разрешения лежат в диапазоне 5.1±7.5% при энергии 13.5+45.5 МэВ и 3.6±4.3% при 65+80 МэВ. Регулярной зависимости от энергии не наблюдается, что вызвано, по-видимому, погрешностями данного эксперимента. Аналогично тому, как это было сделано для протонов и электронов, был получен параметр разделения  $\xi$  для протонов и дейтронов, который составил 1.6±0.5 при 21 МэВ, 1.5±0.7 при 29 МэВ, 1.3±0.8 при 37 МэВ и 1.5±0.9 при 45.5 МэВ.

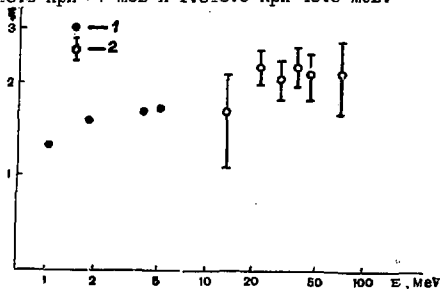


Рис.7. Параметр разделения электронов и протонов в зависимости от энергии электронов: 1 - данные работы /8/, 2 - результаты, полученные в нашем эксперименте.

Fig.7. Dependences of the parameter of electrons and protons separation on electron energy. 1 - data of /8/, 2 - results obtained during our experiment.

Для определения эффективности разделения нейтронов и  $\gamma$ -квантов данным методом в условиях околосреднего космического пространства были рассчитаны зависимости относительного числа регистрируемых по нейтронному каналу нейтронных событий и величин присчета  $\gamma$ -квантов в нейтронный канал от значения порога схемы идентификации. Полученные зависимости представлены на рис.8. Расчеты производились для энергии вторичных частиц, равной 13.5 МэВ, в предположении, что и протонный, и электронный пики можно аппроксимировать нормальным распределением. Было принято, что энергетическое

разрешение детектора по  $\gamma$ -пику составляет 7.5%, а по протонному пику - в  $(I_M / I_{Mr})^{1/2}$  раз больше, т.е. 9%, где  $I_M$  и  $I_{Mr}$  - значения интенсивностей медленной компоненты для электронного и протонного пиков, соответственно. Отношение скоростей счета детектором  $\gamma$ -квантов и нейтронов для данной энергии вторичных частиц было взято из спектров энерговыделений нейтронов и  $\gamma$ -квантов в аналогичном детекторе в космическом пространстве /3/.

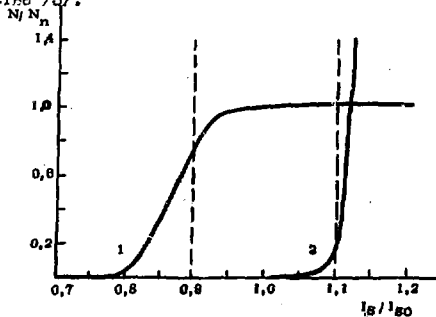


Рис.8. 1 - эффективность регистрации нейтронов, 2 - присчет  $\gamma$ -квантов в условиях околоземного космического пространства в зависимости от величины порога схемы идентификации событий. Величина порога приведена в виде отношения  $I_S / I_{SO}$ , где  $I_{SO}$  - оптимальное значение порога ( $I_S = 13.5$  МэВ).

Fig.8. Dependences of: 1 - the neutron detection effectivity, 2 - the number  $\gamma$ -quanta, detected as neutrons on the scheme of events identification threshold value. The threshold value is shown as  $I_S / I_{SO}$ , where  $I_{SO}$  is optimal threshold value ( $I_S = 13.5$  MeV).

Было получено, что при этой энергии оптимальное значение порога схемы разделения соответствует  $I_S / I_{SO} \approx 1.2$ , где  $I_{SO}$  - значение интенсивности медленной компоненты, соответствующее границе между электронным и протонным пиками. Достаточно эффективную регистрацию нейтроновых событий (не хуже 87%) при относительно небольшом присчете  $\gamma$ -квантов (не более 18%)

можно обеспечить в пределах  $\pm 10\%$  от оптимального значения порога схемы идентификации. Следует отметить, что при более высоких энергиях вторичных частиц эффективность регистрации нейтронных событий в этих пределах может быть только выше. Действительно, эффективность разделения электронов и протонов, как это следует из рис.7, при энергии 13.5 МэВ минимальна. Кроме этого, как видно на рис.5, при энергиях  $21+45.5$  МэВ нейтроны регистрируются не только по протонам, но и по дейтронам, тритонам и  $\alpha$ -частицам. Полученная оценка относится к нейтронам, энергии которых лежат, как это следует из рис.4, главным образом, в интервале  $40+100$  МэВ. При более высоких энергиях, вплоть до  $\approx 2$  ГэВ, согласно /4/, форма спектров вторичных частиц меняется незначительно, но растет относительное число вторичных заряженных частиц тяжелее протона. Поэтому можно считать, что при всех энергиях в диапазоне  $40-2000$  МэВ эффективность регистрации нейтронов при пороге схемы идентификации, равно  $0.9$  от оптимального значения, выше  $87\%$ .

Приведенные на рис. 5,6 данные позволили провести оценки аппаратного спектра изотопного состава продуктов взаимодействия нейтронов с веществом сцинтиллятора CsJ(Tl) (см.таблицу 1).

Таблица 1. Аппаратурный спектр изотопного состава продуктов взаимодействия нейтронов с CsJ(Tl). Число событий в максимумах спектров протонов -  $100+130$  (при энергии  $6+13.5$  МэВ - 30), дейтронов -  $30+40$ , тритонов -  $25+30$ ,  $\alpha$ -частиц -  $15+20$ .

Интервал энергий, МэВ	p, %	d, %	t, %	$\alpha$ , %
6+10	>88	$\leq 5$	$\leq 7$	
13.5+21	73 $\pm$ 7	10 $\pm$ 2	6 $\pm$ 1	11 $\pm$ 2
21+29	74 $\pm$ 6	11 $\pm$ 1.5	6.5 $\pm$ 1	8.5 $\pm$ 1.5
29+37	77 $\pm$ 8	14 $\pm$ 2	-	9 $\pm$ 1.5
37+45.5	83 $\pm$ 7	13 $\pm$ 2	4 $\pm$ 1	-
6+45.5	77 $\pm$ 3	12 $\pm$ 1	4 $\pm$ 0.5	7 $\pm$ 0.6

Заклучение.

В настоящем эксперименте исследовалась эффективность идентификации нейтронов с энергиями  $40 \pm 2000$  МэВ на интенсивном фоне  $\gamma$ -квантов по форме импульса в CsJ(Tl) в диапазоне энерговыделений  $5 \pm 80$  МэВ, т.е. в том диапазоне, где лежат энерговыделения основной части заряженных частиц, образующихся во взаимодействиях нейтронов с энергиями до  $\approx 2$  ГэВ с ядрами Cs и J. Получено, что во всем исследованном диапазоне энерговыделений эффективность регистрации взаимодействовавших в CsJ(Tl) нейтронов не хуже 87% при изменении порога схемы идентификации на  $\pm 10\%$  от оптимального значения. Более полный набор данных (17 значений по сравнению с 4 значениями, использованными ранее /Б./) дает возможность уточнить зависимость формы светового импульса в CsJ(Tl) от удельной ионизации регистрируемой частицы.



Андрей Владимирович Антшин  
Виталий Александрович Болотников,  
Андрей Владимирович Богомолов  
Геннадий Иванович Бритвич  
Сергей Иванович Кушцов  
Госпадин Викторович Луринко  
Ирина Николаевна Миткова  
Сергей Павлович Тумин  
Андрей Анатольевич Чумаков

Регистрация нейтронов с энергиями до 2000 МэВ  
на ионизирующем флуоресцентном экране с помощью  $\text{Sn}^{117\text{m}}$   
в эксперименте на синхротроне У-70.

Препринт ИЯЯФ МГУ - 92 - 7/256  
Работа поступила в ОИЯИ 10.03.92г.

Подписано в печать 10.03.92г.  
Печать офсетная. Пумига многоточечная лицензионная.  
Формат 60x84/16. Уч.-изд.л. -1,56. Усл.п.л. -1,7  
Заказ № 5158. Тираж 70 экз.

Бесплатно

---

Отпечатано в серии офсетной печати  
и машинетальной техники  
ИЯЯФ МГУ