

10;12

## **Исследования характеристик ионизационно-нейтронного калориметра в адронных пучках (4–70 GeV) ускорителя ИФВЭ**

© В.В. Аммосов, Г.И. Мерзон, Т. Саито, Х. Сасаки,  
В.А. Рябов, А.П. Чубенко, А.Л. Шепетов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва  
Институт физики высоких энергий РАН, Москва  
Токийский университет, Япония  
Университет Кочи, Япония

*Поступило в Редакцию 15 августа 1997 г.  
В окончательной редакции 10 апреля 1998 г.*

В качестве этапа разработки ионизационно-нейтронного калориметра, сочетающего в себе свойства ионизационного и нейтронного калориметров, измерены средние значения и флуктуации выхода нейтронов из свинцовой мишени толщиной 60 см и площадью  $20 \times 20$  см. Измерения выполнены на ускорителе У-70 при энергиях пионного и протонного пучков 4 и 70 GeV соответственно. Средние значения выхода нейтронов хорошо согласуются с расчетными данными программного кода "SHIELD".

### **Введение**

Ионизационный калориметр (ИКА), впервые предложенный более 30 лет назад [1,2] для измерения энергии частиц космического излучения, в настоящее время широко используется и в ускорительных экспериментах [3–5]. Принцип работы ИКА основан на измерении ионизации, создаваемой каскадными ионизирующими частицами, образованными первичной частицей в результате взаимодействия с ядрами атомов среды.

Другой метод измерения энергии, основанный на регистрации испарительных нейтронов от расщеплений ядер каскадными частицами, был предложен также более 30 лет назад [6] и используется при анализе

данных мировой сети нейтронных мониторов [7]. Однако нейтронные калориметры (НКА) полного поглощения, несмотря на предложения [8] об их использовании, до настоящего времени не нашли широкого применения.

Представляется целесообразным совместить оба принципа измерения энергии частицы в одном приборе — ионизационно-нейтронном калориметре (ИНКА). Информативность такого калориметра будет существенно выше, чем у ИКА и НКА в отдельности.

В самом деле, кроме определения энергии двумя независимыми методами ИНКА способен разделять гамма-кванты, электроны и адроны в смешанном потоке частиц, так как выход нейтронов в электромагнитных каскадах по отношению к ядерным составляет не более 5–10% [9,10]. Если для регистрации нейтронов в ИНКА использовать метод замедления до тепловых энергий, то конструкция ИНКА практически ничем не отличается от обычного ИКА. В этом случае сигналы от нейтронов будут запаздывать по отношению к ионизационному сигналу на десятки и сотни микросекунд благодаря процессам термализации и диффузии в веществе замедлителя и регистрацию ионизационного и нейтронного сигналов можно проводить одними и теми же детекторами, например газовыми пропорциональными нейтронными счетчиками, со сдвигом по времени.

Характеристики ионизационного сигнала в ИКА хорошо известны [3–5]. В данной работе исследовались основные свойства нейтронного сигнала: 1) зависимость среднего выхода нейтронов  $\nu$  от энергии первичного адрона  $E_0$ ; 2) флуктуации выхода нейтронов при разных энергиях  $E_0$ ; 3) время термализации и диффузии нейтронов в слоистой структуре калориметра; 4) распределение нейтронного сигнала по глубине комбинированного поглотителя, содержащего легкое и тяжелое вещества.

## Экспериментальная установка

В эксперименте использовался ИНКА с поглотителем, содержащим 6 рядов свинца толщиной 10 см и площадью  $20 \times 20$  см, прослоенных пластинами полиэтилена толщиной 6 см. В качестве нейтронных детекторов применялись гелиевые ( $^3\text{He}$ ) счетчики СНМ-18 длиной 30 см и диаметром 3 см. В каналах, просверленных в полиэтиленовых

пластинах, под каждым рядом поглотителя ИНКА помещалось по три счетчика, так что расстояние между центрами двух соседних счетчиков достигало 6 см, а между счетчиками в двух смежных рядах — 15 см; общее число счетчиков в ИНКА составляло 18.

С целью увеличения эффективности регистрации испарительных нейтронов, генерируемых в ИНКА, свинцовый поглотитель был закрыт со всех сторон полиэтиленовым отражателем-замедлителем толщиной  $\cong 10$  см. Для определения эффективности  $\varepsilon$  регистрации испарительного нейтрона были проведены калибровочные измерения с источниками  $\text{Po-Be}$  с активностями  $2.25 \cdot 10^5$  и  $2.25 \cdot 10^6$  Вк. Источники поочередно помещались в разные точки ИНКА, и определялся суммарный счет нейтронов в 18 каналах ИНКА. Среднее значение эффективности регистрации, полученное для 20 различных положений источника в ИНКА, составило  $\langle \varepsilon \rangle = 7.4 \pm 0.4\%$ .

Рабочие измерения проводились в пионном и протонном пучках ускорителя У-70 ИФВЭ с энергиями  $E_{\pi^+} = 4 \text{ GeV}$  и  $E_p = 70 \text{ GeV}$ . Использовался растянутый пучок, когда сброс адронов происходил равномерно в течение 2 с, а общее число частиц за каждый сброс не превышало 10 000, таким образом, среднее время между прохождением адронов составляло  $\geq 200 \mu\text{s}$ .

Триггер ИНКА обеспечивал: 1) выделение нейтронного сигнала от одиночной пучковой частицы, проходящей через центр ИНКА; 2) отсутствие перекрытия нейтронных сигналов от двух и более частиц и 3) исключение сигналов фоновых частиц.

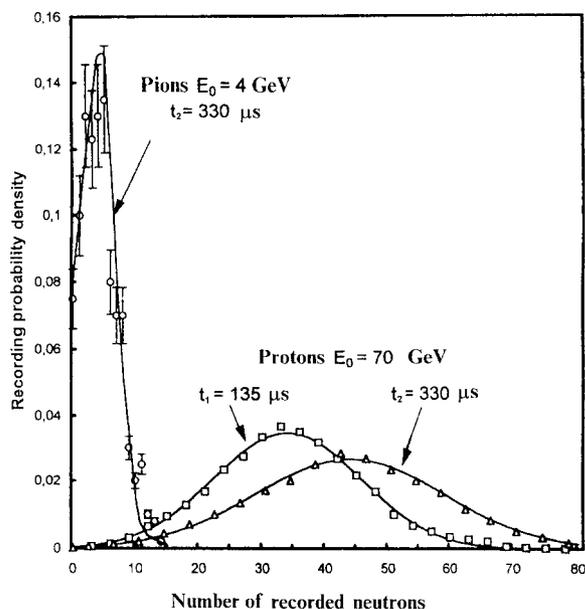
Для формирования триггерного сигнала использовались четыре сцинтилляционных счетчика:  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_4$ , размещенных на базе 20 т. Счетчик  $S_1$  располагался непосредственно перед выходным окном коллиматора пучка, а  $S_3$  — непосредственно перед калориметром. Совпадения  $S_1 S_2 S_3$  выделяли события, отвечающие прохождению пучковой частицы через установку. Для отделения фоновых событий и прохождения дополнительных пучковых частиц использовался антисовпадательный счетчик большого размера  $S_4$  ( $30 \times 30$  см) с центральным отверстием диаметром 2 см.

Каждый триггерный сигнал  $S_1 S_2 S_3 \bar{S}_4$  с задержкой  $10 \mu\text{s}$  открывал временные ворота длительностью от 30 до  $420 \mu\text{s}$  (в разных сериях измерений), в течение которых каналы ИНКА регистрировали нейтронные сигналы.

## Результаты измерений

На рис. 1 приведены флуктуационные кривые для числа  $m$  регистрируемых ИНКА нейтронов в каскадах от протонов с  $E_p = 70 \text{ GeV}$  и пионов с  $E_{\pi^+} = 4 \text{ GeV}$ . Для протонов распределение хорошо аппроксимируется кривой Гаусса, а распределение для пионов — суперпозицией двух распределений Пуассона, что отражает сложный характер процесса генерации ядерных расщеплений в поглотителе.

Характерное время жизни нейтронов в ИНКА было определено из зависимости средних значений  $\langle m \rangle$  от длительности временных ворот  $t$  и составило  $(130 \pm 10) \mu\text{s}$ . Все значения  $\langle m \rangle$ , приведенные ниже, отвечают



**Рис. 1.** Распределение числа зарегистрированных испарительных нейтронов от каскадов, генерированных в свинцовом поглотителе ( $20 \times 20 \times 60 \text{ cm}$ ) пионами ( $E_{\pi} = 4 \text{ GeV}$ ) и протонами ( $E_p = 70 \text{ GeV}$ ). Характерное время жизни замедленных нейтронов в ИНКА  $\tau \approx 135 \mu\text{s}$  получено путем сравнения результатов измерений с длительностью временных ”ворот”  $T_1 = 135 \mu\text{s}$  и  $T_2 = 330 \mu\text{s}$ .

Поглотитель Pb, 20 × 20 × 60 см

Частица	$E_0, \text{GeV}$	$\langle m \rangle$	$\sigma(m)$	$\langle \nu_{exp} \rangle$	$\sigma_{exp}(\nu)$	$\langle \nu_{th} \rangle$
$\pi$ -мезон	4	$4.35 \pm 0.22$	$2.2 \pm 0.1$	$63 \pm 3$	$9.5 \pm 4$	78
Протон	70	$43.2 \pm 0.08$	$14.3 \pm 0.7$	$624 \pm 12$	$171 \pm 12$	650

длительности ворот  $t = 330 \mu\text{s}$ . При этом сбор нейтронов составлял около 95%.

Так как каждый нейтрон регистрируется независимо, то распределение  $P(m)$  числа регистрируемых нейтронов  $m$  связано с распределением  $P(\nu)$  числа  $\nu$  генерируемых нейтронов в поглотителе ИНКА простым соотношением

$$P(m) = \sum_{\nu=m}^{\infty} P(\nu) C_{\nu}^m \varepsilon^m (1 - \varepsilon)^{\nu-m}.$$

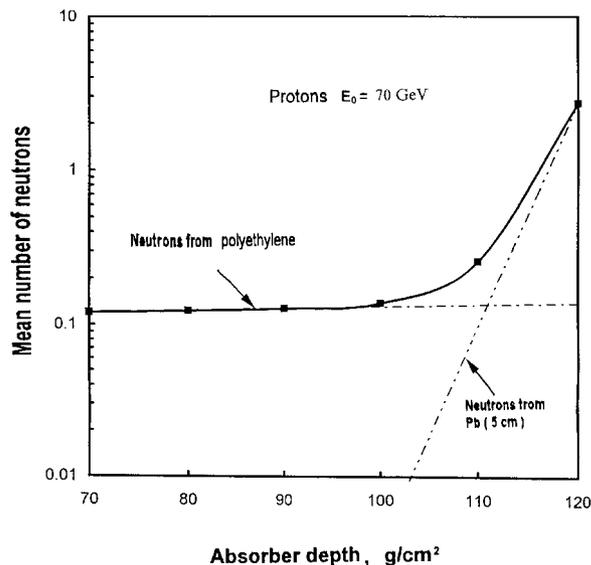
Отсюда нетрудно получить соотношения, связывающие средние значения и дисперсии числа наблюдаемых и генерированных нейтронов:

$$\langle \nu \rangle = \langle m \rangle / \varepsilon; \quad \sigma^2(\nu) = \sigma^2(m) - \varepsilon(1 - \varepsilon)\langle \nu \rangle.$$

В таблице приведены измеренные в эксперименте значения  $\langle m \rangle$  и  $\sigma(m)$ , а также значения  $\langle \nu_{exp} \rangle$  и  $\sigma_{exp}(\nu)$ , рассчитанные с помощью вышеприведенных соотношений при  $\varepsilon = 7.4\%$ . Указаны только статистические ошибки; методические ошибки, по нашим оценкам, составляют  $\pm 5\%$ . Там же для сравнения приведены данные для средних значений числа испарительных нейтронов  $\langle \nu_{th} \rangle$ , вычисленные для протонов с  $E_0 = 4$  и  $70 \text{ GeV}$  по программе SHIELD [11], в которой реализована каскадно-испарительная модель расщепления ядер [12]. Вычисления проводились для мишени из свинца толщиной 60 см и диаметром 20 см.

Из таблицы следует, что: 1) экспериментальные значения  $\langle \nu_{exp} \rangle$  соответствуют энергетической зависимости  $\langle \nu \rangle \sim E^{\alpha}$ , где  $\alpha \cong 0.8$ , и 2) в пределах ошибок измерений  $\langle \nu_{exp} \rangle$  хорошо согласуются с расчетным значением  $\langle \nu_{th} \rangle$  при  $E_0 = 70 \text{ GeV}$ , но на 20% меньше при  $E_0 = 4 \text{ GeV}$ . Такого результата следовало ожидать, поскольку  $\pi$ -мезоны в среднем тратят меньше энергии на ядерные расщепления, чем протоны из-за возможности перезарядки на ядрах  $\pi^{\pm} \rightarrow \pi^0$ .

Рост  $\sigma_{exp}(\nu)$  при переходе от  $E_0 = 4 \text{ GeV}$  к  $E_0 = 70 \text{ GeV}$ , по видимому, связан со сравнительно малой толщиной поглотителя ИНКА



**Рис. 2.** Зависимость среднего числа нейтронов, зарегистрированных в ИНКА, от глубины поглотителя из полиэтилена при введении в 6-й ряд слоя свинца толщиной 5 см. (Штриховой линией показано распределение нейтронов из свинца, полученное вычитанием числа нейтронов, генерированных в полиэтилене).

( $\sim 3\lambda_{\text{Pb}}$ ) и тем, что точки взаимодействия первичных частиц распределены по глубине по закону  $\exp(-x/\lambda_{\text{Pb}})$ , что должно приводить к большим флуктуациям энерговыделения в поглотителе. При этом, как известно, энерговыделение каскада зависит от  $E_0$ , а именно с ростом  $E_0$  относительная доля энерговыделения падает при фиксированной глубине поглотителя [13,14]. Природу наблюдаемых больших флуктуаций в энерговыделении предполагается выяснить с помощью программы SHIELD.

В нашем эксперименте было также измерено распределение нейтронного сигнала в ИНКА с комбинированным поглотителем из легкого и тяжелого вещества. Для этих целей в 6-м ряду ИНКА часть полиэтиленового поглотителя была заменена слоем свинца толщиной 5 см. Измерения были проведены в протонном пучке с  $E = 70 \text{ GeV}$ .

Результаты эксперимента приведены на рис. 2. Как видно, замена полиэтилена свинцом резко (в 20 раз) увеличивает число регистрируемых нейтронов в 6-м ряду по отношению к первым четырем рядам. Такой своеобразный переходный эффект полиэтилен–свинец связан с тем, что число испарительных нейтронов существенно зависит от атомного номера  $A$  поглотителя. Из наших данных легко оценить величину отношения числа нейтронов, генерируемых в углероде и свинце, воспользовавшись соотношением:

$$\frac{\langle \nu_c \rangle}{\langle \nu_{\text{Pb}} \rangle} = \left( \frac{\Delta x_{\text{Pb}}}{\Delta x_c} \right) \left( \frac{\lambda_c}{\lambda_{\text{Pb}}} \right) \left( \frac{n_4}{n_6} \right),$$

где  $\lambda$  — пробег для взаимодействия протона, а  $n_i$  — число регистрируемых нейтронов в  $i$ -м ряду. Принимая для  $\Delta x_{\text{Pb}} = 55 \text{ g/cm}^2$  и  $\Delta x_c = 10 \text{ g/cm}^2$  ( $\Delta x$  — длина замедления), мы получим, что  $\langle \nu_c \rangle / \langle \nu_{\text{Pb}} \rangle \simeq 1/8$ . Это значение соответствует зависимости  $\langle \nu \rangle(A) \sim A^{2/3}$ .

Существование переходного эффекта для нейтронного сигнала позволяет использовать ИНКА поглотители с низким атомным номером  $A$  (в пределе  $A = 1$ ), а для увеличения сигнала прослаивать их тонкими слоями тяжелого поглотителя ( $A \sim 200$ ). Такие конструкции ИНКА важны для экспериментов на искусственных спутниках земли (ИСЗ), где требуется минимизировать вес calorimetра при сохранении его светосилы.

Результаты данного эксперимента позволяют нам провести калибровку программы SHIELD, с помощью которой планируется разработка конструкций ИНКА для измерений на ИСЗ первичных электронов и  $\gamma$ -квантов с энергиями выше 300 GeV, а также состава и энергетического спектра первичных частиц в области энергий ( $10^{14} - 10^{16}$  eV).

Авторы выражают глубокую признательность В.А. Цареву за постоянное внимание и поддержку этой работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 97-02-17867.

## Список литературы

- [1] Григоров Н.И. // Частицы высоких энергий в космических лучах. М.: Наука, 1973. 296 с.
- [2] Мурзин В.С., Сарычева Л.И. // Космические лучи и их взаимодействия. М.: Атомиздат, 1968. 356 с.
- [3] Willis W.J., Radeka V. // Nucl. Instr. Meth. 1974. V. 120. P. 221.
- [4] Fabjan C., Wigmans R. // Rept. Prog. Phys., 1989. V. 52. P. 1519.
- [5] Bintiinger D. // Proc. of the Workshop on Calorimetry for the Supercollider. Tuscaloosa. March 13–17, 1989. P. 91.
- [6] Simpson J.A., Fongen W., Treiman S.B. // Phys. Rev. B. 1953. V. 90. P. 934.
- [7] Дорман Л.И. // Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 256 с.
- [8] Воловик В.Ф., Козырь И.Г. // ПТЭ. 1984. В. 2. С. 38–41.
- [9] Ряжская О.Г. // Дис. докт. физ.-мат. наук. М.: ИЯИ АН СССР, 1986.
- [10] Еникеев Р.И., Зацепин Г.Т., Королькова Е.В. и др. // ЯФ. 1987. Т. 46. В. 5(11). С. 1492.
- [11] Dementyev A.V., Sobolevsky N.M., Stavisky Yu.Yu. // Nucl. Instr. Meth. 1996. A 374. P. 70–72.
- [12] Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействия частиц и атомных ядер высоких и сверхвысоких энергий с ядрами. М.: Атомиздат, 1972. 643 с.
- [13] Blumer H. Diplomarbeit, Dortmund, 1982.
- [14] Клайнкнехт К. // Детекторы корпускулярного излучения. М.: Мир, 1990. 220 с.