

10;12

РЕГИСТРАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НЕЙТРИНО ПРИ ОТСУТСТВИИ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ОТ УСКОРИТЕЛЯ У-70

© А.Г.Афонин,¹ П.С.Васильев,² Е.П.Кузнецов,² Б.Н.Ломоносов,²
А.В.Минченко,¹ Л.С.Первов,² В.А.Рябов,² Ю.С.Черноузько¹

¹Институт физики высоких энергий,
Протвино, Московская область, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
117924 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 30 января 1995 г.)

В окончательной редакции 9 октября 1995 г.)

Приведены результаты экспериментов по обнаружению взаимодействий нейтринного пучка ускорителя У-70 с помощью автоматизированной физической установки при отсутствии непосредственной синхронизации от системы вывода пучка ускорителя. Приведена методика определения временного положения пучка и его временной разброс, измерена интенсивность регистрации нейтринных взаимодействий и фона космического излучения, проведена оценка порога обнаружения по измеренному соотношению сигнал-шум.

Введение

В проекте "Байкал" [1] при исследовании осцилляций нейтрино и поиске тяжелых нейтрино необходимо решить задачу синхронизации физической установки, удаленной от ускорительно-накопительного комплекса (УНК) на расстояние свыше 4 тыс.км, с целью надежного отделения нейтринных взаимодействий пучка ускорителя от фона. Интенсивность фоновых событий в этом случае значительно выше, чем при непосредственной работе на ускорителе. Это связано со значительно большими геометрическими размерами детектора черенковского излучения ($1.94E + 6 \text{ м}^3$), который регистрирует не только космические мюоны, но и биофон, радиоактивные вещества, присутствующие в водах озера Байкал. При возрастании фона до уровня, соизмеримого с интенсивностью полезных событий, наиболее эффективным методом борьбы с фоном является временно стробирование полезного сигнала.

Естественно, возникает необходимость создания автономной системы синхронизации, которая каким-то образом стробировала бы временно положение пучка. В работе [2] предложен принцип решения такой проблемы. Его суть заключается в создании двух синфазно работающих синхронизаторов с высокой стабильностью, один из которых управляет моментом сброса пучка в нейтринный канал, а второй вырабатывает стробирующие сигналы для детектора. Не рассматривая проблему начальной синхронизации этих двух синхронизаторов (как вариант это могла бы быть начальная присинхронизация автономно работающего синхронизатора детектора с последующей его транспортировкой к месту назначения), остановимся на вопросах, требующих своего решения. При решении задачи обнаружения необходимо будет учесть, что с целью создания управляемого сброса пучка ускорителя необходимо будет осуществить перепривязку момента сброса пучка к высокостабильной опорной частоте синхронизатора на основе атомных стандартов частоты. При этом период опорной частоты должен быть во много раз меньше цикла ускорителя и составлять несколько десятков Гц (30–50 Гц), чтобы выполнить условие попадания на начало “полочки” магнитного поля (У-70: цикл равен 8 с, длительность “полочки” 2 с, начальный участок “полочки” не более 60 мс). Это обстоятельство приводит к значительному усложнению задачи обнаружения из-за неопределенности периода опорной частоты, в котором произошел сброс пучка ускорителя.

Цель и условия проведения эксперимента

С целью отработки методики обнаружения и апробации принятых технических решений был проведен ряд экспериментов по обнаружению нейтрино на ускорителе У-70. Эксперименты проводились на нейтринном пучке со средней интенсивностью $2.0E + 12$ протонов на мишень за сброс. Структура пучка состояла из 10 банчей с периодом следования 166 нс и длительностью сброса 1.6 мкс. Система быстрого вывода протонного пучка ускорителя У-70 в нейтринный канал состоит обычно из 30 банчей длительностью 30 нс с интервалом 166 нс между банчами. Это позволяет достигнуть максимальной в настоящее время интенсивности протонного пучка, сброшенного на нейтринную мишень, — $1.6 \cdot 10^{13}$ протонов на сброс (время сброса 5 мкс) [3]. Техническое обеспечение эксперимента осуществляла автоматизированная установка [2]. На рис. 1 приведена блок-схема эксперимента. Аппаратура управления пучком была установлена в помещении пульта системы быстрого вывода и подключена к стойке SHOT. Сигнал вывода 2 со стойки SHOT запускает синхронизатор, который осуществляет привязку к опорной частоте T_0 и задерживает относительно нее на время, кратное 50 мкс, в соответствии с установленной программой управления пучком. Сигнал 3 с целью исключения влияния на других потребителей нейтринного пучка задерживается на 500 мкс (два последовательно включенных генератора Г5-48) и далее запускает ВЧ серию системы вывода [4]. Ориентировочно с учетом задержки системы вывода ускорителя (166 мкс) положение пучка относительно T_0 должно запаздывать на величину 600 мкс.

Аппаратура обнаружения нейтрино была расположена на гибридном спектрометре СКИФ, эксперимент Е-128 [5]. Сцинтилляционные

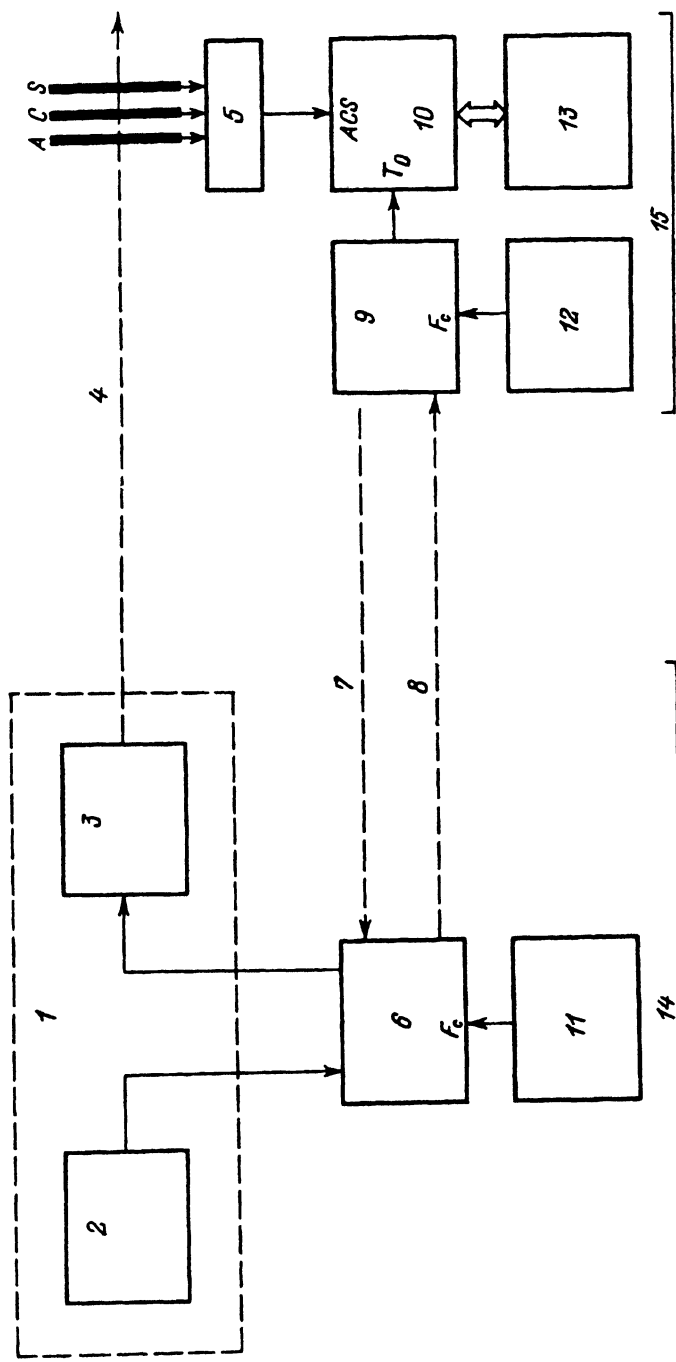


Рис. 1. Блок-схема эксперимента.

1 — синхронизатор У-70; 2 — В-серия; 3 — В-серия; 4 — пучок; 5 — схема совпадений; 6, 9 — блоки синхронизации; 7 — старт; 8 — готовность; 10 — обнаружитель нейтрино; 11, 12 — стандарт частоты (сапфир); 13 — компьютер IBM PC/XT; 14 — аппаратная синхронизация системы вывода; 15 — аппаратная обнаружения нейтрино.

счетчики спектрометра использовались в качестве детектора обнаружителя нейтрино. Здесь же в помещении СКИФ были установлены синхронизатор обнаружителя и обнаружитель на базе компьютера IBM PC/XT.

Начальный запуск системы был осуществлен подачей сигнала "старт" по коаксиальному ВЧ кабелю на синхронизатор управления пучком. Задержка распространения не превышала 5 мкс. В результате этого импульса опорной частоты T_0 синхронизатора управления пучком отставал от импульса опорной частоты T_0 синхронизатора обнаружителя. Высокоустойчивые синхронизаторы ($\gamma = 1.0E - 12$) находились в состоянии взаимной синхронизации в течение всего эксперимента и на точность измерений практически не влияли.

Обнаружитель осуществлял измерение временных интервалов регистрируемых событий относительно T_0 одним из 4 измерителей обнаружителя $tacs1$, $tacs2$, $tacs3$ и $tacs4$ с дискретом 1 мкс. Кроме того, фиксировался условный номер $T_0 - nT_0$, в котором произошло хотя бы одно событие. Счет T_0 начинался от начала включения программы обнаружителя.

Измеренные данные записывались в файл, который состоял из записей

2 байта	2 байта	2 байта	2 байта	8 байт
$tacs1$	$tacs2$	$tacs3$	$tacs4$	nT_0 .

Эксперимент осуществлялся в следующей последовательности.

1) Перед началом работы два синхронизатора были приведены в состояние взаимной синхронизации.

2) Включалась одна из 15 программ управления пучком, которая осуществляла временную задержку сброса пучка относительно T_0 . Точность установки программных задержек не хуже ± 100 нс.

3) По программе $dn\ 1001$ в on-line осуществлялась регистрация событий и фона в одном из режимов работы обнаружителя — со стробированием или без стробирования.

В режиме без стробирования регистрировались все события на интервале ($T_0, T_0 + 13000$ мкс); в режиме со стробированием регистрировались только те события, которые попали в интервал стробирования. Временное положение строба относительно T_0 и его длительность задавались экспериментатором в диалоговом режиме компьютера перед началом регистрации.

4) Статистическая обработка результатов осуществлялась в режиме off-line, и это на данном этапе работ по обнаружению нейтринных взаимодействий позволило применить разнообразные алгоритмы обработки, исключив зависимость дорогостоящих экспериментальных данных от быстродействия компьютера. Кроме того, наличие полученных файлов данных поможет в будущем при моделировании и проверке новых идей.

Измерение временного положения пучка

Целью измерения временного положения пучка является определение среднего значения T и его разброса. Вначале был осуществлен следующий эксперимент: обнаружитель работал в режиме обнаружения без стробирования, регистрируя все события на всем интервале

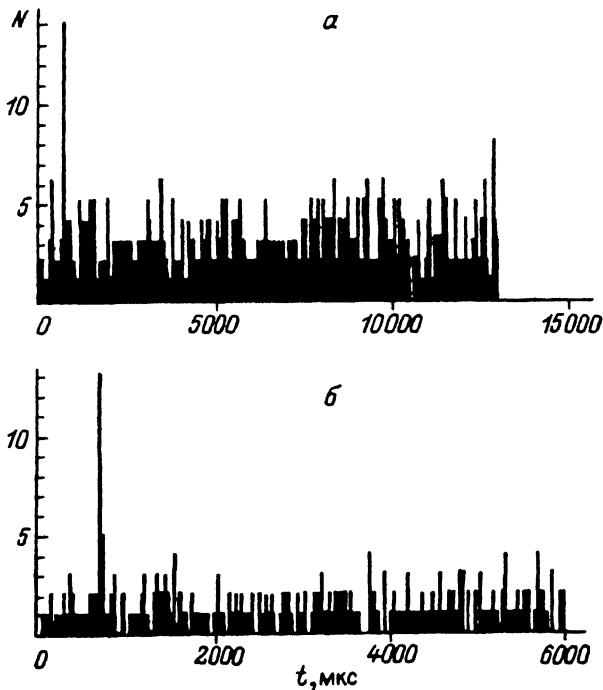


Рис. 2. Гистограмма $N = f(t)$, файл *nu* 3000.
 $\tau_b = 50$ (а), 20 мкс (б); $N_{\max} = 14$ (а), 13 (б); $T_{\max} = 700$ (а), 720 мкс (б).

обнаружения ($T_0, T_0 + 13000$ мкс) при управлении пучком ускорителя по программе 1. Величина программной задержки равнялась 50 мкс. За время измерений $21283 \cdot T_0$ было зарегистрировано от детектора 674 события, являющихся суммой полезных событий N_a и фоновых N_ϕ . Программой *din* 1001 строились графические распределения $N = f(t)$ путем отображения числа событий, попавших на интервалы временных выборок, и одновременно осуществлялся поиск интервала T_{\max} с максимальным числом событий N_{\max} .

На рис. 2 и 3 показаны результаты обработки файла *nu* 3000, *dat* при интервалах выборок 50, 20 и 1 мкс. Из графического распределения рис. 3 можно определить T_{\max} , равное 736 мкс. Зная величину вносимой программной задержки $T_3 = 50$ мкс, можно определить ориентировочную величину задержки, вносимую ускорителем $T_y = T_{\max} - T_3 = 686$ мкс. Более точное измерение временного положения пучка осуществлялось при большей статистике измерений в режиме регистрации со строби-

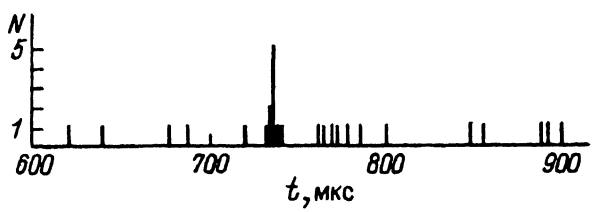


Рис. 3. Гистограмма $N = f(t)$ при $\tau_b = 1$ мкс, файл *nu* 3000 ($N_{\max} = 5$, $T_{\max} = 736$ мкс).

рованием и путем расчета T_n и σ_n по формулам

$$T_n = \frac{\sum_i N_i t_i}{\sum_i N_i}, \quad (1)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_i (t_i - T_n)^2}{\sum_i (N_i - 1)}}, \quad (2)$$

$$\sigma'_n = \sqrt{\frac{\sum_i (t_i - T_n)^2}{\sum_i N_i \left(\sum_i (N_i - 1) \right)}}. \quad (3)$$

При включенной программе 5 (номер интервала 120; $T_3 = 6000$ мкс) проводилась регистрация в режиме обнаружения со стробированием, при этом строб достаточно симметрично накрывал предполагаемое нахождение пучка T_n

$$T_n = T_y + T_e = 686 + 6000 = 6686 \text{ мкс.}$$

При длительности строба $\tau_c = 100$ мкс задержка строба равнялась $T_c = 6635$ мкс.

Результаты статистической обработки программой wbeam, ехе приведены в табл. 1.

Зная временную флуктуацию пучка σ_n , можно предположить алгоритм поиска положения пучка по методу "скользящего окна". Суть метода: выбирается окно длительностью $T_w > 2\sigma_n \alpha$ (α — коэффициент, зависящий от доверительной вероятности; при $P(\alpha) = 0.997$ $\alpha = 3$) и на интервале обнаружения осуществляется сканирование этим стробирующим окном, т.е. строб смещается шаг за шагом на 1 дискрет измерений Δ от начала обнаружения до конца обнаружения.

Количество циклов сканирования можно оценить по формуле

$$N_{\text{скан}} = (t_k - t_n) / \Delta \quad (4)$$

где t_n и t_k — начало и конец интервала обнаружения.

При каждом положении окна измеряется количество попавших в него событий N_w . Путем поиска максимальной величины $(N_w)_{\text{max}}$ определяется соответствующее положение окна. Окончательное положение пучка определяется путем статистической обработки всех событий,

Таблица 1. Статистическая обработка программой wbeam, ехе

Параметры строба, мкс		Положение пучка, мкс			Число событий N
задержка	длительность	T_n	σ'_n	σ_n	
6665	40	6684.90	0.52	3.42	43
6675	20	6684.36	0.31	2.02	41
6680	10	6684.60	0.21	1.37	40

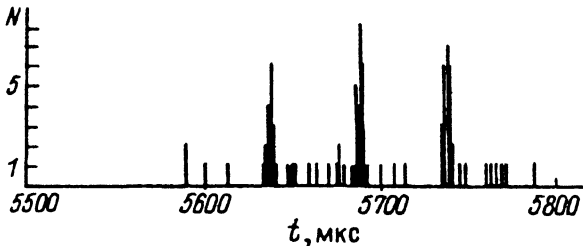


Рис. 4. Гистограмма $N = f(t)$ при $\tau_n = 1$ мкс, файл *nu* 3003.

Таблица 2. Обработка по алгоритму скользящего окна

Файл	Интервал обнаружения, мкс		Метод скользящего окна, мкс				Метод максимума, мкс		
	t_n	t_k	T_w , мкс	T_n	σ'_n	σ_n	N_w	T_{max}	N_{max}
<i>nu</i> 3000	100	8000	20	734.1	1.29	4.68	13	736	5
<i>nu</i> 3101	600	3000	11	733.8	0.68	2.04	9	735	3
<i>nu</i> 3102	6665	6705	13	6684.3	0.31	2.02	41	6685	13
<i>nu</i> 3102	6665	6705	11	6684.6	0.21	1.37	40	6685	13
<i>nu</i> 3102	6665	6705	7	6684.6	0.21	1.37	40	6685	13

зарегистрированных в данном окне по формулам 1–3. В программе *wbeam*, *exe* реализован алгоритм скользящего окна и поиск максимума в распределении $N = f(t)$. Результаты обработки по данному алгоритму приведены в табл. 2.

В заключение данного раздела с целью наглядной демонстрации о возможности регистрации нейтринных взаимодействий предложенным способом приведем распределение $N = f(t)$, полученное при управлении пучком программой 14 (номера интервалов 99, 100, 101; величины задержки 4950, 5000, 5050 мкс; чередование интервалов 99–100–101–99). На рис. 4 приведено данное распределение, где отчетливо видны три максимума, отстоящие друг от друга на 50 мкс.

Измерение интенсивности событий

Подробное описание электронных блоков синхронизации и обнаружителя взаимодействия нейтрино представлено в [2].

Ускоритель является импульсным источником: он испускает частицы в течение времени сброса (в данном эксперименте длительность сброса составляла 1.6 мкс); циклы излучений повторяются с периодом $T_a = 8$ с. Кроме того, в данном эксперименте момент сброса ускорителя привязан к опорной частоте с периодом $T_o = 50$ мс. Допустим, что обнаружитель регистрирует число событий в интервале строга τ_c при условии, что строб накрывает положение пучка. Тогда за время наблюдений τ_o могло быть зарегистрировано N_c событий, состоящих из некоторого числа фоновых событий N_ϕ и полезных событий N_a , порожденных пучком ускорителя,

$$N_c = N_a + N_\phi.$$

Число фоновых событий N_{ϕ} за время измерений $t_u = (\tau_o/T_o)\tau_c$ равно $N_{\phi} = (\tau_o/T_o)\tau_c n_{\phi}$. Число событий от ускорителя можно оценить из следующего соотношения:

$$N_a = \frac{\tau_o}{T_a} E_f,$$

где $E_f < 1$ — некий постоянный для данных условий (интенсивность пучка, положение мишени, характеристики детектора и т. д.) коэффициент, характеризующий эффективность регистрации детектором и равный отношению числа зарегистрированных событий к числу сбросов ускорителя.

При хорошей статистике интенсивность регистрируемых событий n_c может быть вычислена по формуле

$$n_c = \frac{N_c}{t_u} = \frac{T_o}{T_a} \frac{E_f}{\tau_c} + n_{\phi}. \quad (5)$$

Обнаружение нейтрино методом пороговой обработки

Для обнаружения положения пучка на удаленной физической установке возможно использование разнообразных методов статистической обработки (критерии значимости и максимального правдоподобия, порогового обнаружения, рассмотренный выше алгоритм “скользящего окна” и др.). Как наиболее простой в данной работе был испробован метод пороговой обработки. Условием его применения являются предварительно измеренные следующие параметры: средняя интенсивность фона n_{ϕ} ; интенсивность регистрации полезных событий от ускорителя n_c ; начальное временное положение пучка относительно периода опорной частоты T_y , фактически в эту задержку T_y входит как собственная задержка ускорителя, так и задержка пролета нейтрино от ускорителя до физической установки; априорное соглашение — пучок может смещаться относительно начального положения T_y на величину, кратную T_d ,

$$T_{\Pi} = T_y + T_d \cdot i, \quad (6)$$

где T_d — шаг смещения, который много больше величины разброса пучка $T_d \gg \sigma_{\Pi}$; i — коэффициент смещения 1, 2, 3, ... m .

С целью проверки метода пороговой обработки на ускорителе У-70 был впервые проведен следующий эксперимент: с пульта управления системы быстрого вывода последовательно включались программы управления пучком 1-3-1-6-1-2-1, которым соответствовали интервалы $1 = 1.30, 1.150, 1, 2, 1$; продолжительность интервалов измерения была неравномерная и колебалась от 25 до 110 мин; параметры управления пучком $T_d = 50$ мкс, $m = 255, T_u = 685$ мкс.

В табл. 3 приведены результаты обнаружения при различных порогах N_o и длительности строба τ_c : номер обнаруженного интервала i , в котором количество накопленных событий превысило установленный порог; момент обнаружения $T_{обн}$; количество событий, зарегистрированных в обнаруженном интервале N_{\max} , и максимальный уровень фона в остальных интервалах $N_{фон}$.

Таблица 3. Результаты обнаружения нейтринных взаимодействий при различных порогах

Номер серии	$\tau_c, \text{мкс}$	Порог	i_0	$T_{\text{обн}}, \text{с}$	N_{max}	$N_{\text{фон}}$	Результаты обнаружения
1	40	14	1	1122	22	10	Ложное обнаружение $i = 53$
			30	2759	20	11	
			1	5041	22	12	
			150	6831	26	7	
			1	8102	41	8	
			2	9472	65	12	
			53*	12261	15	5	
		15	1	12994	15	3	Правильное обнаружение
			1	1138	23	11	
			30	2933	19	12	
			1	5417	21	8	
			150	6860	26	7	
			1	8143	41	8	
			2	9482	65	14	
			1	12550	26	5	
2	20	8	1	881	20	6	Ложное обнаружение $i = 29$
			30	2644	16	6	
			1	4892	17	7	
			150	6619	22	5	
			1	7812	36	6	
			2	9385	55	7	
			29*	12215	8	4	
		9	1	12695	15	3	Правильное обнаружение
			1	905	20	6	
			30	2672	17	6	
			1	4945	17	6	
			150	6638	22	5	
			1	7780	36	5	
			2	9414	55	8	
			1	12492	21	3	
3	12	7	1	823	20	5	Ложное обнаружение $i = 152$
			30	2644	14	4	
			1	4892	15	4	
			152*	6188	7	2	
			150	6619	21	4	
			1	7784	33	4	
			2	9366	54	6	
		8	1	12424	20	3	Правильное обнаружение
			1	881	20	5	
			30	2672	15	4	
			1	4945	15	6	
			150	6638	21	4	
			1	7812	33	4	
			2	9385	54	6	
			1	12492	20	3	

По результатам проведенных экспериментов можно сделать основные выводы.

1. Экспериментально доказана возможность обнаружения нейтринных взаимодействий от нейтринного пучка ускорителя удаленной физической установкой в отсутствие кабельной синхронизации, т.е. предложенный метод создания синхронизированных пучков ускорителя подтвердился.

2. Впервые на физической установке с собственным автономным синхронизатором были получены следующие результаты: измерено временное положение пучка T_n и его временной разброс σ_n ; при "хорошей" статистике ($N_c = 40$) было получено среднее значение положения пучка относительно опорной частоты $T_n = 6684.6 \pm 0.21$ мкс со среднеквадратичным отклонением $\sigma_n = 1.37$ мкс (табл. 2); получено практическое подтверждение метода обнаружения по алгоритму "скользящего окна" в достаточно широком интервале поиска (табл. 2); экспериментально измерены интенсивность фона n_ϕ и интенсивность ускорителя n_c ; приведена зависимость интенсивности ускорителя от длительности строка $n_c = f(\tau_c)$; приведены некоторые соображения по качественной картине порогового обнаружения и оценке порога обнаружения; осуществлен эксперимент по управлению моментом сброса пучка путем задания чередующейся последовательности временных интервалов с возвратом к i -му интервалу; успешно проведена серия порогового обнаружения при различной длительности интервалов обнаружения.

Благодаря выбраным техническим решениям была проверена идея программно-управляемого сброса пучка и впервые на этой установке осуществлена регистрация равновесных мюонов от взаимодействий нейтрино с спинтилляционным телескопом (установка Е-128) в отсутствие кабельной связи с системой вывода, которая обычно используется при синхронизации детектора с моментом быстрого вывода протонного пучка в нейтринный канал.

Список литературы

- [1] Сотрудничество Москва-Серпухов-Иркутск. Препринт ФИАН. № 87. М., 1989.
- [2] Васильев П.С., Котельников С.К., Кузнецов Е.Л. и др. Препринт ФИАН. № 151. М., 1990.
- [3] Черный С.А. Препринт ИФВЭ. № 89-196. Протвино, 1989.
- [4] Комаров В.В., Черноусько Ю.С. Препринт ИФВЭ. № 80-77. Серпухов, 1980.
- [5] Алешин Ю.Д., Аммосов В.В., Баранов В.И. и др. Препринт ФИАН. № 10. М., 1989.