ITEP-43-98

Институт теоретической и экспериментальной физики

FERMILAB **43-98**

MAR 22 1999

LIBRARY

Ковальский Д.В.

Методика диагностики системы сбора временной информации в трековой установке по поиску безнейтринного 2β-распада.

Fermilab Library
0 1160 0062344 1

Москва 1998

УДК 539.I М-I6

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ СИСТЕМЫ СБОРА ВРЕМЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ В ТРЕКОВОЙ УСТАНОВКЕ ПО ПОИСКУ БЕЗНЕЙТРИННОГО 2β- РАСПАДА: Препринт ИТЭФ 43-98/

Д.В.Ковальский - М., I998 - 20с.

Описаны новые методики диагностики системы сбора временной информации с пропорционально-дрейфового детектора. Проведен анализ существующих методик и их эффективности в сравнении с новыми методиками статистической диагностики. Дано краткое описание трековой установки для изучения 2β-распадов.

DIAGNOSTIC OF TIME DIGITAL CONVERTERS OF TRACKING DETECTOR FOR DOUBLE BETA DECAY SEARCH.

New methods of statistical diagnostic of the time digital converters for the Time Projection Chamber (TPC) have been shown. They were compared with conventional methods. A shot description of the tracking detector for the double beta decay search has been given.

Рис. - 5, список лит. - I8 наим.

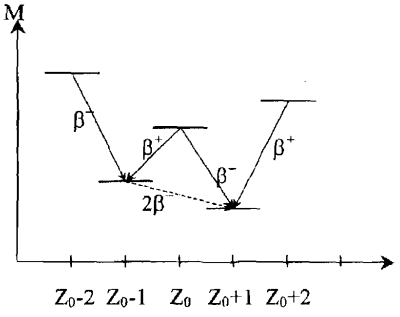
© Институт теоретической и экспериментальной физики, I998

О природе нейтрино

Вопрос о природе нейтрино, из-за крайне малого сечения взаимодействия этих частиц с веществом, до сих пор остается открытым. Сейчас ставится множество сложных экспериментов с участием большого количества научных институтов различных стран мира. Развитие современной теории взаимодействий в сильной степени зависит от результатов этих экспериментов. Особо важными являются: проблема наличия массы у нейтрино, тесно связанная со спиральностью нейтрино и проблема нарушения закона сохранения лептонного числа в слабых взаимодействиях

За долгий период исследований данного вопроса, было предложено множество экспериментов для изучения свойств нейтрино. Однако до сих пор результаты экспериментов не дают убедительных доказательств правоты одной из точек зрения на природу нейтрино. Не смотря на достаточно жесткие ограничения на массу нейтрино, полученные в последних экспериментах, существуют некоторые основания предполагать, что она может быть отлична от нуля, и свойства нейтрино могут отличаться от свойств, предсказываемых стандартной теорий взаимодействий.

Одним из перспективных направлений в изучении свойств нейтрино в последнее время является поиск безнейтринного двойного β-распада (2β0ν).



2β-распад – очень редкое явление, возможность существования которого

Таблица 1. Теоретические и экспериментальные оценки времени 2β-распадов для различных веществ

Элемент	Максимальная кинетическая энергия, МэВ	$T_{1/2}^{2\beta2\nu}$		$T_{1/2}^{2\beta0\nu}$	
		теор., лет	экспер., лет	теор., лет	экспер., лет
Ca^{48}	4,3	* $2,9*10^{19}$	$4,3*10^{19}$	$2,8*10^{25}$	> $9,5*10^{21}$
Ge^{76}	2,0	$3,0*10^{21}$	$1,8*10^{21}$	$1,8*10^{25}$	> $9,6*10^{24}$
Se^{82}	3,0	$1,1*10^{20}$	$1,1*10^{20}$	$2,8*10^{24}$	> $2,7*10^{22}$
Te^{128}	0,9	$2,6*10^{24}$	$7,7*10^{24}$	$1,5*10^{26}$	> $7,7*10^{24}$
Te^{130}	2,6	$1,8*10^{20}$	$2,7*10^{21}$	$2,1*10^{23}$	>$3,25*10^{22}$
Mo^{100}	3,0	$1,3*10^{18}$	$1,0*10^{19}$	$3,6*10^{27}$	> $4,4*10^{22}$
Xe^{136}	2,5	$4,6*10^{21}$	> $5,5*10^{20}$	$2,8*10^{24}$	> $4,4*10^{23}$
Nd^{150}	3,4	$7,4*10^{18}$	$1,9*10^{19}$	** $5,6*10^{23}$	> $2,1*10^{23}$

Примечание: Теоретическое предсказание времени полураспада 2β2β взято из работы [4], (* - [3]), а для 2β0ν – из работы [5], (** - [4]) в предположении, что me ~ 1 eB.

возникает в случае, когда процесс β-распада с изменением заряда ядра на единицу запрещен по энергии перехода, а распад с изменением заряда ядра на две единицы возможен. Например, изотопы $_{48}Cd^{116}$, $_{49}In^{116}$, $_{50}Sn^{116}$. (M_{Cd}-M_{Sn} = 2,7МэВ; M_{In}-M_{Cd} = 0,6МэВ). 2β-распадных ядер существует достаточно много, но концентрация изотопов подходящих для исследования 2β-распадов в природных элементах, как правило, не превышает 10%. Наибольший интерес представляют следующие изотопы: ^{48}Ca, ^{76}Ge, ^{82}Se, ^{100}Mo, ^{128}Te, ^{130}Te, ^{136}Xe, ^{150}Nd.

Одним из самых удачных экспериментов в области поиска 2β-распадов в настоящее время является эксперимент KIAE-MPIH с полупроводниковым кристаллом германия обогащенным изотопом ^{76}Ge до 85% с общей массой 11 кг. Эксперимент производился под землей с мощной пассивной защитой, изготовленной из очень чистых материалов (свинец поднимали с затонувших древних испанских галлеонов) [12]. Энергетическое разрешение составило 0,2% при энергии 2,6 МэВ, а предел на период полураспада по

безнейтринному каналу составил: $T_{1/2}^{0\nu}(^{76}Ge) > 1{,}0*10^{25}$ лет (90%), что соответствует оценке на массу нейтрино: $m_\nu < 0{,}5$ эВ. [4]

На данном этапе наиболее перспективным методом поиска 2β-распадов является трековая методика с активной мишенью, позволяющая использовать десятки килограмм изотопов исследуемого вещества.

Пропорционально-дрейфовая камера.

Пропорционально-дрейфовая камера, получившая широкое распространение в экспериментах по поиску 2β-распадов, является одной из разновидностей трековых установок. Установки такого типа отличаются хорошим пространственным и временным разрешением.

Основу такого детектора составляет газонаполненная камера, помещенная в магнитное поле. Электроны и ионы ионизации, образовавшиеся после пролета электронов, под действием электрического поля дрейфуют к пропорциональным многопроволочным детекторам, обеспечивающим существенное усиление сигнала. Из-за большой передачи энергии нейтральным атомам в соударениях, ионы дрейфуют со скоростями не на много отличающимися от скорости теплового движения. Свободные электроны ионизации, участвуя в упругих соударениях, практически не теряют энергию, приобретаемую в электрическом поле до тех пора, пока их энергия не станет соизмеримой с энергией возбуждения атомов. Скорость дрейфа электронов ионизации на два-три порядка больше скорости ионов, поэтому, как правило, регистрируется сигнал от электронов ионизации.

Одним из факторов ухудшающих пространственное разрешение является процесс диффузии электронов ионизации в газе.

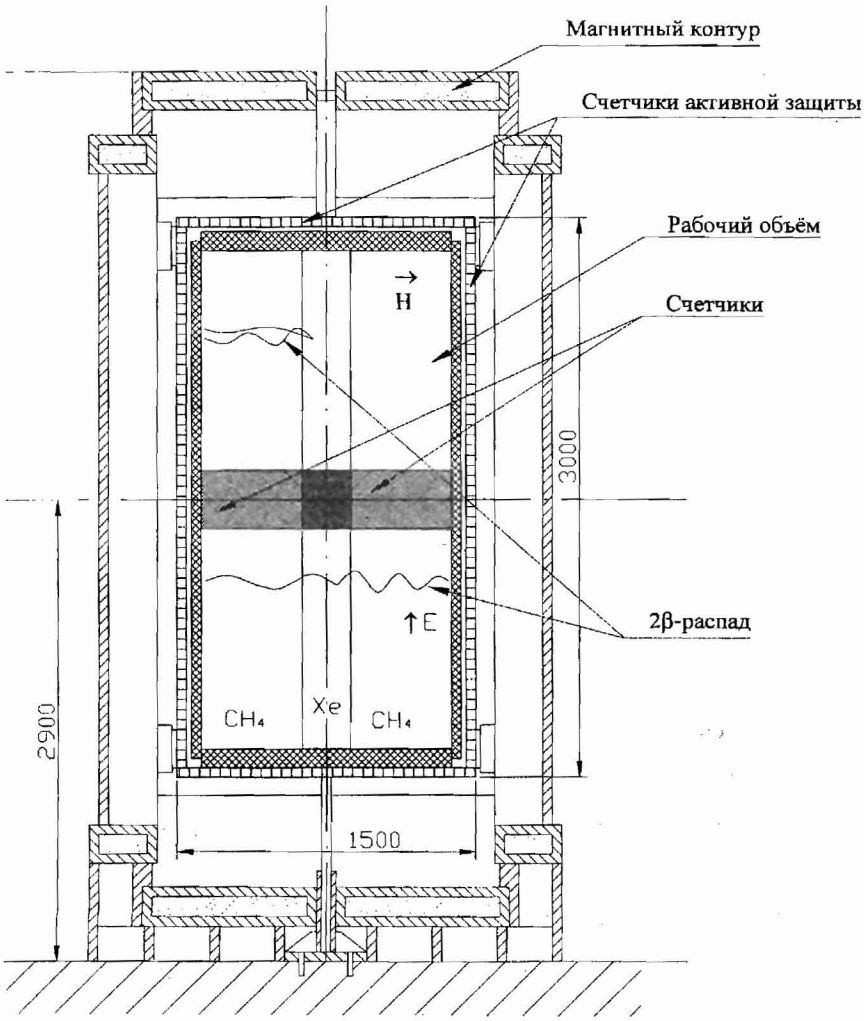


Рис. 1 Большая пропорционально дрейфовая камера

Большая пропорционально-дрейфовая камера.

На протяжении многих лет в ИТЭФ уделялось большое внимание проблеме поиска 2β-распадов. В ИТЭФ впервые в мире был выполнен

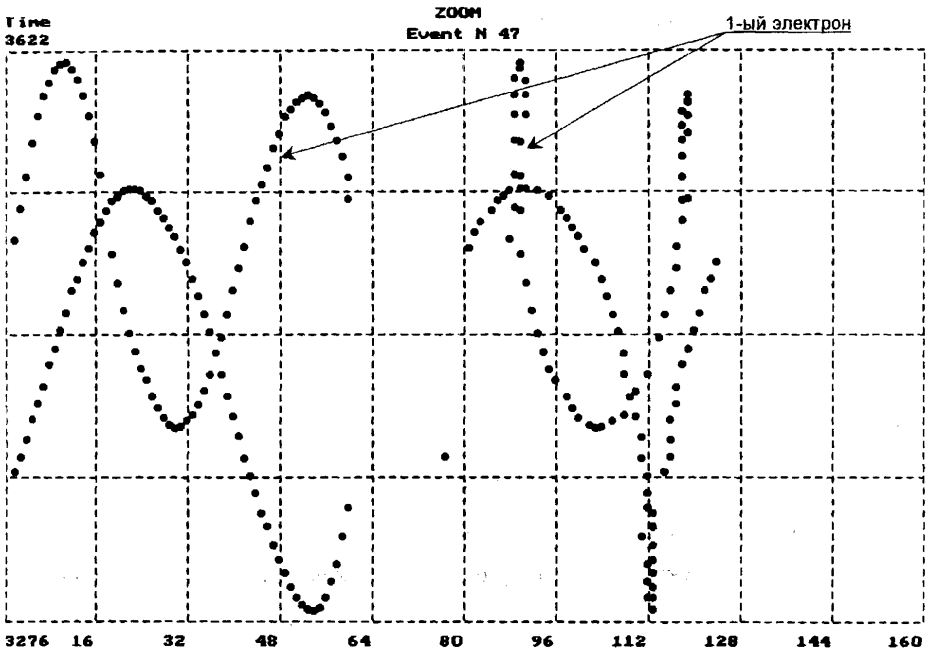


Рис.2. Треки двух электронов
(слева – информация с проволочек, справа – информация со стрипов)

эксперимент с детектором на полупроводниковом кристалле ^{76}Ge, обогащенном до 85%, в котором был обнаружен $2\beta2\nu$-распад. Успешно завершена работа на малой пропорционально-дрейфовой камере, благодаря чему был накоплен большой опыт в организации и проведении подобных трековых экспериментов. В настоящее время ведутся пуско-наладочные работы на большом трековом детекторе с рабочим веществом ^{136}Xe. Xe является удобным газом для наполнения пропорциональных камер. Планируется использование ^{150}Nd, обладающего большой энергией перехода (3,4МэВ).

Большая пропорционально-дрейфовая камера (рис.1) представляет собой газонаполненную камеру размером 3x3x1,5 м^3, разделенную на две части (верхнюю и нижнюю) между которыми находятся анодные проволочки

пропорциональных счетчиков. Весь объем камеры разбит на три независимых объема, разделенных майларовыми пленками. В центральном объеме содержится смесь Xe и CH_4, а в крайних - только CH_4. Камера окружена счетчиками активной защиты от космического излучения, способного порождать в объеме камеры различные фоновые процессы, и помещена в магнитное поле. Для обеспечения однородности электрического поля по длине дрейфа на стенках камеры, крышках и поверхности майлара расположены полезадающие электроды.

В детекторе непосредственно измеряется лишь координата X траектории заряженной частицы, направленная по магнитному полю, определяемая по номеру сработавшей проволочки с точностью ±5 мм (расстояние между проволочками 1 см). Другую координату траектории (Y) определяют по времени дрейфа электронов, в результате чего количество счетчиков растет линейно относительно характерного размера дрейфовой камеры, позволяя уменьшить стоимость установки. При этом достигается точность ~ 2 мм, которая определяется диффузией. В детекторе также есть возможность получить информацию и по третьей координате посредством стрипов – многопроволочных детекторов, расположенных в горизонтальной плоскости под углом в 45^0 к основным проволочкам. По амплитуде сигнала счетчиков в ксеноновом объеме будут учитываться потери электронов на ионизацию, а потери в метановом объеме будут восстанавливаться по изменению траекторий частиц.

В проекции на ось X и Y траектории электронов появляются в виде синусоид, по характеристикам которых можно судить об импульсе (энергии) электронов. Анализ события по информации со стрипов (проволочек расположенных под углом 45^0), позволяет судить о направлении пролета электрона. На рис.2 показана смоделированная траектория двух электронов. В

правой части (стрипы), по расположению петель в траектории электронов можно сказать, что электроны двигались в противоположных направлениях.

По параметрам синусоиды $T = A\sin(2\pi X/L + \varphi_0)$ можно определить импульс частицы. Ларморовский радиус электрона равен:

$$\boxed{R_L = \sqrt{A^2 + \frac{L^2}{4\pi^2}}}$$, где A – амплитуда (см); L – период (см).

Импульс электрона равен:

$$\boxed{p = 0{,}3BR_L = 0{,}3B\sqrt{A^2 + \frac{L^2}{4\pi^2}}}$$, где B – магнитное поле (кГс), p – импульс (МэВ)

Множество разнообразных факторов влияет на результат эксперимента. 2β-распад очень редкое явление, поэтому вопрос подавления фоновых событий является одним из важнейших. Основной источник фона γ-кванты от радиоактивных примесей в окружающих рабочий объём камеры материалах и внешние высокоэнергетические γ-кванты, выбивающие из материалов защиты электроны.

Для подавления фона используются различные подходы. Ниже приведен краткий список наиболее действенных способов уменьшения фона.

1. Уменьшение парциального давления Xe уменьшит многократное рассеяние электронов, приводящее к размыванию траекторий частиц. Однако уменьшение давления связано с уменьшением абсолютной массы исследуемого вещества в детекторе, а, следовательно, с уменьшением эффекта, что требует еще большего подавления фона и большей экспозиции.
2. Анализ траекторий электронов в магнитном поле детектора (импульс частицы, направление движения, знак частицы).

3. Улучшение пространственного разрешения, т.к. вероятность появления фонового события, имитирующего 2β-распад, уменьшается с улучшением разрешения, что позволяет отличать два независимых электрона, выходящих близко друг от друга, от истинного 2β-распада.

Кроме фона на результатах опыта так же отрицательно сказываются неравномерность электрического и магнитного полей (затрудняется восстановление треков частиц), шумы и наводки в электронике (усилители, TDC) и многие другие факторы.

Система сбора временной информации

Система сбора временной информации предназначена для регистрации времени дрейфа электронов ионизации. Для получения пространственного разрешения порядка 2 мм (диффузия электронов в CH_4 в нормальных условиях при дрейфе ~ 1-1,5 м. и напряженности электрического поля 0,2-0,5 кВ/см) требуется, при скорости дрейфа v ≈ 5 см/мкс (E~0,3 кВ/см), временное разрешение не хуже чем 20 нс, а полное время регистрации информации от одного события ~ 80 мкс.

Система сбора временной информации состоит из блока задающего

Порт	Данные								Примечания
308	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	считывание данных в компьютер
309	D16	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	считывание данных в компьютер
30A	D24	D23	D22	D21	D20	D19	D18	D17	считывание данных в компьютер
30B	пуск	C3	C2	C1	A4	A3	A2	A1	передача C и A спец. контроллеру
30C	пуск	-	-	N5	N4	N3	N2	N1	передача N спец. контроллеру
30D	пуск	-	-	F5	F4	F3	F2	F1	передача F спец. контроллеру
30E	-	-	L4	L3	L2	L1	Q	X	номер LAM (L), Q и X - ответы
30F	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	передача данных контроллеру
307	D16	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	передача данных контроллеру
306	D24	D23	D22	D21	D20	D19	D18	D17	передача данных контроллеру

Таблица 2. Порта интерфейса (флаг "пуск" надо использовать лишь в последней передаче части команды специальному контроллеру)

генератора, TDC (time digital converter) - многоканальные цифровые блоки, фиксирующие время прихода сигналов и специального контроллера опроса.

Задающий генератор состоит из 12-разрядного счетчика, который пересчитывает импульсы с частотой 50 МГц от внутреннего генератора или приходящие извне. Выходящие сигналы с задающего генератора шифруются в код Грея (изменение числа на единицу вызывает изменение в двоичном представлении числа лишь в одном бите), что позволяет уменьшить помехи. Временное разрешение системы составляет 20 нс. Полное время одного цикла составляет 2^{12}x20 нс ≈ 80 мкс. Выходящие сигналы с задающего генератора в коде Грея через разветвитель витыми парами подаются на вход накопителей памяти TDC.

Каждый блок TDC состоит из восьми каналов, на которые через дискриминатор подаются сигналы с усилителей проволочек. Время прихода события на любой из каналов фиксируется сначала в триггере соответствующего канала, а затем переносится в оперативную память. В каждом канале TDC содержится накопительный блок памяти, позволяющий организовать запись до 15 событий в каждом канале.

Блок TDC собран на плате размером 310x205мм^2. Для уменьшения тепловыделения в блоке подводимые напряжения уменьшены до ±5 В, введено напряжение –2,5 В, увеличен продув охлаждающего воздуха, температура которого поддерживается кондиционером.

Специальный контроллер каркаса разработан для последовательного считывания информации из памяти блоков TDC, дешифровку этих данных из кода Грея в двоичный код и связи с интерфейсом компьютера. В таблице 2 и 3 представлена информация о портах и о командах управления установкой.

При отладке блоков TDC используется еще один генератор с частотой ~1 кГц, эмулирующий события, сигналы с которого через разветвитель подаются на входы каналов TDC.

№	C	N	A	F	Ответ	Описание
1	Z	26	-	24	X	сброс счетчиков числа событий для всех TDC в корзине Z
2	4	30	9	24	X	снятие флага "INHIBIT"
3	4	30	9	26	X	установка "INHIBIT"
4	4	17	0	24	X	снятие флага "Computer Busy"
5	4	17	0	26	X	установка флага "Computer Busy"
6	Z	28	8	26	X	предустановка специального контроллера корзины Z в начало опроса блоков TDC
7	Z	24	-	0	Q, X	последовательный опрос блоков TDC корзины Z
8	4	18	0	26	-	пуск генератора "Clock TDC" от компьютера
9	Z	26	-	26	X	установка всех счетчиков событий в "1" для последующего повторного считывания данных из блоков TDC корзины Z

Таблица 3. Команды управления специальным контроллером

Для отладки системы сбора временной информации используются следующие основные режимы.

1. Режим с общим стартом – сигнал с блока формирующего начало регистрации события через блок временной задержки подается на вход блоков TDC. При этом все события эмулируются с одним и тем же временем, определяющимся величиной задержки.
2. Эмуляция событий при помощи второго генератора (mode “RUN”):
   a) одноцикловый режим – запуск регистрации события внешним образом и остановка его по завершению одного цикла;
   b) многоцикловый режим – запуск регистрации событий внешним образом (при отладке запуск от компьютера) и работа в циклическом режиме, без промежуточных остановок.

Ниже приведена последовательность команд управления специальным контроллером для реализации этих двух режимов.

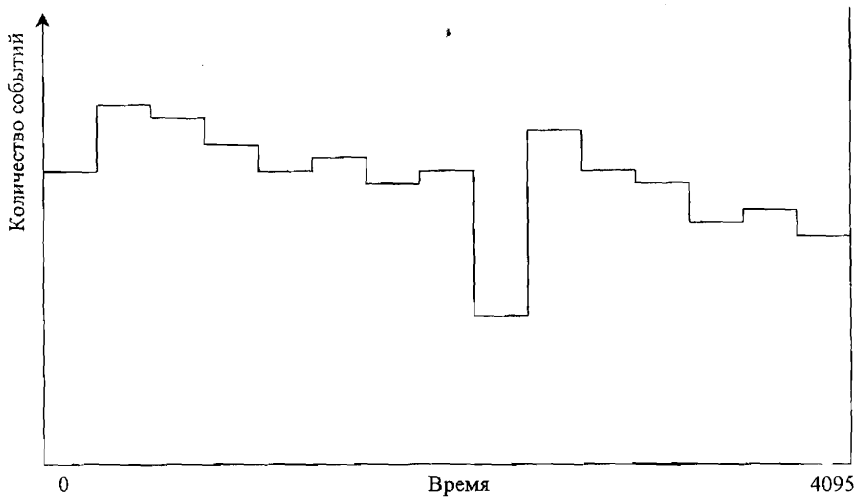


Рис. 3 15-ти канальная гистограмма

Режим с общим стартом

1. Сброс в "0" счетчиков числа событий: C(X)*N(26)*A( )*F(24).
2. Снятие INHIBIT (набор информации): C(4)*N(30)*A(9)*F(24).
3. Установка INHIBIT (прекратить набор информации): C(4)*N(30)*A(9)*F(26).
4. Предустановка спец. контроллера в начало опроса блоков TDC: C(X)*N(28)*A(8)*F(26).
5. Последовательный опрос блоков TDC: C(X)*N(24)*A( )*F(0)

Эмуляция событий при помощи второго генератора (mode “RUN”)

1. Сброс в "0" счетчиков числа событий: C(X)*N(26)*A( )*F(24).
2. Снятие Computer Busy: C(4)*N(17)*A(0)*F(24).
3. Пуск генератора "Clock TDC" от ЭВМ: C(4)*N(18)*A(0)*F(26).
4. Снятие INHIBIT (набор информации): C(4)*N(30)*A(9)*F(24).

5. Установка INHIBIT (прекратить набор информации): C(4)*N(30)*A(9)*F(26).
6. Установка “Computer Busy”: C(4)*N(17)*A(0)*F(26).
5. Предустановка спец. контроллера в начало опроса блоков TDC: C(X)*N(28)*A(8)*F(26).
7. Последовательный опрос блоков TDC: C(X)*N(24)*A( )*F(0).

В настоящее время режим с общим стартом для диагности практически не применяется из-за малой информативности и низкой эффективности методик предназначенных для работы в этом режиме. В дальнейшем будут рассматриваться только методики предназначенные для работы в режиме эмуляции событий при помощи второго генератора (mode “RUN”).

Многоцикловый режим: все сигналы приходят на вход блоков TDC одновременно.

В соответствии с обычной методикой диагностики, проверка блоков TDC проводилась при помощи гистограмм и on-line просмотра событий. Гистограмма (рис.3) строилась следующим образом. Программа накапливала статистику событий. Весь интервал времени $2^{12} = 4096$ разбивался на N каналов (количество каналов можно менять). В гистограмме по одной оси откладывались номера каналов соответствующих определенным промежуткам времени, а по другой оси - количество событий с временами, принадлежащими соответствующим каналам. Гистограммы строились отдельно для каждого канала TDC и для всей корзины блоков TDC в целом. По таким гистограммам можно было судить о правильности функционирования блоков TDC. Однако, при отрицательных результатах, интерпретация гистограмм становилась крайне сложной и спорной. Более того, порой даже для хорошо работающих блоков TDC гистограмма указывала на нарушения функционирования блоков из-за невозможности учесть особенности работы генераторов,

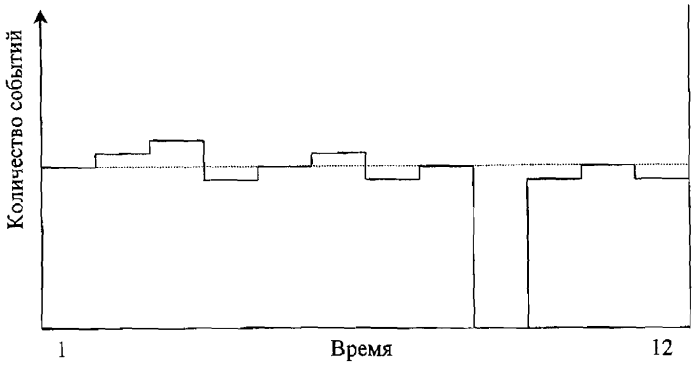


Рис. 4 12-ти битная гистограмма

использующихся для эмуляции событий, которые могли с различной вероятностью генерировать события с различными временами.

В новой методике был использован другой подход к диагностике блоков TDC. Для большей информативности гистограмм, вместо разбиения временного промежутка на каналы и построения зависимости по каналам, было применено построение диаграмм по частоте появления каждого из 12 бит двоичного представления времени события. Это позволяет диагностировать существенные провалы или подъемы каждого из 12 бит для каждого канала блоков TDC, что показывает, в каком бите идет сбой и какого типа. Например, по гистограмме представленной на рис.4 можно судить о том, что 9-й бит за время набора статистики не появлялся, т.е. можно сказать, что сбой происходит в 9-ом бите, что существенно облегчает отладку. Однако возник вопрос, является ли 12-битная гистограмма тождественной обычной гистограмме и на сколько ее результаты достоверны.

Оказалось, что ровная 12-битная гистограмма, говорящая об одинаковой частоте появления каждого бита, не тождественна обычной гистограмме. Существует набор данных, для которого 12-битная гистограмма ровная, а обычная гистограмма имеет провалы. Например, 12N событий, из которых N

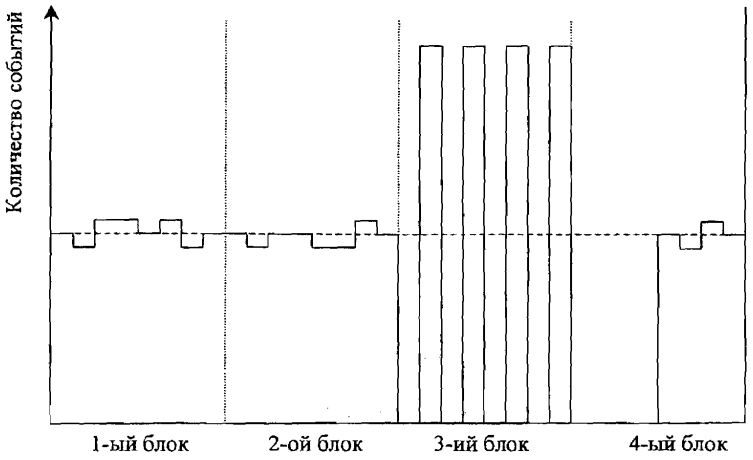


Рис. 5 Гистограмма количества событий по блокам TDC

событий имеют время 2^0, следующие N событий имеют время 2^1 и так далее вплоть до 2^{12}. На обычной гистограмме будет виден набор из двенадцати максимумов, тогда как 12-битная гистограмма будет ровной. Однако вероятность набрать такую статистику практически ровна нулю и убывает с ростом количества событий, как показательная функция.

Перейдем теперь к рассмотрению других методов диагностики блоков TDC, существенно облегчающих их наладку.

Одноцикловый режим: события со второго генератора, эмулирующего события, не чаще чем один раз за цикл одновременно подаются на вход блоков TDC.

1. **Гистограмма количества сигналов, зарегистрированных каждым каналом блоков TDC.**

   В процессе набора статистики формируется гистограмма, на которой отображается количество событий, зафиксированное в каждом канале блоков TDC, т.е. количество событий, зафиксированное каждой проволочкой. При этом ведется учет реального числа событий

(количество сигналов от установки "LAM", сообщающих о готовности передачи компьютеру очередного события). Это число реальных событий отображается горизонтальной прямой на гистограмме. На рис.5 показана гистограмма четырех блоков TDC, каждый из которых состоит из 8-ми каналов, на которые подается информация с проволочек. По этой гистограмме можно сказать, что сбой в третьем блоке может быть вызван сбоем в первом бите формирователя номера канала, т.к. в нечетных каналах события отсутствуют, а в четных их количество в два раза больше. В четвертом блоке мы видим, что первые четыре канала не регистрировали события, а оставшиеся четыре работали нормально.

При компьютерной обработке можно получить более точную оценку отличия зафиксированного в каждом канале количества событий от реального их количества.

2. Диагностика неточности измерения времени.

Все события приходят на блоки TDC одновременно, и большая часть каналов фиксирует одинаковое время. Однако, в некоторых случаях, при сбоях, наблюдается сдвиг по времени в ту или иную сторону. Настоящим временем является время прихода события на большую часть каналов блоков TDC. Если такое время определить нельзя, данное событие отбрасывается и не используется при наборе статистики (при этом желательно проверять новые блоки одновременно с проверенными и надежно работающими блоками, т.к. при этом будет меньше отбрасываемых событий, и настоящее время будет определяться с большей достоверностью). По набранной статистике, можно судить о частоте появления сдвига во времени в каждом бите. При этом необходимо учитывать возможность для больших времен, порядка ~ 4096, при небольшом сдвиге во времени перейти к началу с очень большим скачком (после 4096 следует 1,2,3,4..., т.к. время представляется 12-

битным числом), что не является сбоем. По набранной статистике можно судить о частоте появления сбоев в каждом из 12-ти бит. Частоту сбоев в самом младшем бите можно не учитывать, т.к. это предельная точность измерения времени и часто такие сбои могут быть вызваны множеством различных причин. Для всех остальных разрядов при частоте сбоев больше 0,5% необходимо проводить отладку соответствующего канала блока TDC. Этим методом можно изучать стабильность работы блоков TDC и определять оптимальные параметры и условия их работы (например, время прогрева, условия охлаждения и т.д.)

При конкретной реализации на компьютере данных методик диагностики необходимо уделять пристальное внимание обеспечению стабильности работы программы и ее устойчивости при сбоях различного характера в электронике (в частности в блоках TDC). Необходимо внимательно следить за тем, к чему может привести любое некорректное действие. В частности наблюдался следующий сбой в электронике: одна из корзин, состоящая из 10-ти блоков TDC, имела нестабильно работающий специальный контроллер, что проявлялось в отсутствии конца передачи данных с блоков TDC, т.е. после передачи информации обо всех зарегистрированных событиях передавались нулевые данные и при этом контроллер не выдавал признака конца считывания. Из-за этого может происходить переполнение буфера программы, что может привести к сбою в ее работе. Основной критерий для работы программы можно выразить так, что программа должна справляться с любыми сбоями в установке и оставаться работоспособной пока установка может хоть как-нибудь функционировать.

В заключении автору хотелось бы поблагодарить своего научного руководителя О.Я. Зельдович за активное участие в подготовке данной

публикации, а также В.В. Кириченко и Э.В. Брахмана за сотрудничество и предоставленную информацию.

Литература

1. С.Д. Борис, А.И. Голутвин, М.В. Данилов, О.Я. Зельдович, Ю.А. Камышков, ВВ. Кириченко, О.М. Козодаева, В.А. Любимов, И.Н. Тихомиров, **О возможности измерения двойного безнейтринного β-распада в ^{136}Xe.**, М, Препринт ИТЭФ, 1982, №47
2. O.Ya. Zeldovich, **Double beta decay (experiment).** Lecture at XXV ITEP Winter School 1997, M, Preprint ITEP №29, 1997
3. Haxton W.S. and Stephenson G.J. Jr., "**Double Beta Decay**", Prog. Part. Nucl. Phys. 12, 409 (1984)
4. Staudt A., Muto K. and Klapdor-Kleingrothaus H.V., "**Calculation of 2ν and 0ν double beta decay**", Europhysics Lett. 13, 31 (1990)
5. Pantis G. et al., "**Neutrinoless double beta decay within the quasiparticle random-phase approximation with proton-neutron pairing**", Physic.Rev. C53, 659, (1996)
6. Bernatowicz et al. "**A Precise Determination of Relative and Absolute ββ decay of ^{128}Te and ^{130}Te**", Phys.Rev. c47, 806 (1993)
7. Elliott S.R. et al. "**Double Beta Decay of ^{82}Se**", Phys.Rev. C46, 135(1992)
8. Nelson M.A. "**The Double Beta Decay of ^{150}Nd and ^{100}Mo**", Dissertation, University of California, Irvine, 1995, unpublished
9. Arnold R. et al. (NEMO collab.) "**Performance of a prototype tracking detector for double beta decay measurements**", NIM A 354, 338 (1995)
10. Alessandrello A. et al. "**Improvements in ^{130}Te double beta decay search with cryogenic TeO_2 array detectors**", Nucl.Phys B (Proc.Suppl.) 48, 238 (1995), TAUP'95

11. Alston-Garnjost M. et al. "**Experimental search for double β-decay of ^{100}Mo**", Phys.Rev. C55, 474 (1997)

12. Artemiev V. et al. "**The search for ^{136}Xe 2β2ν-decay with proportional drift detector**", Phys.Lett. B 280, 159 (1992)

13. Artemiev V. et al. "**Half-life measurement for ^{150}Nd 2β2ν-decay in the Time Projection Chamber experiment**", Phys.Lett. B345, 564(1995)

14. Artemiev V. et al. "**The ^{136}Xe double beta decay track experiment**", NIM a 303, 309 (1991).

15. Мухин К.Н. "**Экспериментальная ядерная физика. Физика элементарных частиц**" Книга 2, М, Энергоатомиздат, 1993

16. F.Sauli "**Principle of operation of multiwire proportional and drift chambers**", CERN 77-09, Preprint, 1977

17. В.И. Калашникова, М.С. Козодаев "**Детекторы элементарных частиц**", М, Наука, 1966

18. Э.В. Брахман, О.Я. Зельдович, В.В. Кириченко, О.М. Козодаева, А.И. Митин, Т.Н. Цветкова "**Система сбора временной информации с пропорционально-дрейфовой камеры**", М, Препринт ИТЭФ, 1986, №44