



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2013–17

ЛДС

Е.Н. Ардашев, Г.И. Бритвич, А.П. Воробьев, В.Ф. Головкин,
С.Н. Головня, А.А. Киряков, В.Х. Маляев, В.А. Сенько,
М.М. Солдатов, А.Г. Холоденко, Ю.П. Цюпа

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино

Г.А. Богданова, В.Ю. Волков, А.К. Лефлат

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва*

В.Б. Дунин, Е.С. Кокоулина, В.А. Никитин, И.А. Руфанов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Калориметр мягких фотонов установки СВД-2

Направлено в ПТЭ

Протвино 2013

Аннотация

Ардашев Е.Н. и др. Калориметр мягких фотонов установки СВД-2: Препринт ИФВЭ 2013-17. – Протвино, 2013. – 18 с., 1 табл., 15 рис., библиогр.: 13.

В работе описана конструкция калориметра мягких фотонов установки СВД-2. Апертура прибора $210 \times 210 \text{ мм}^2$. Приведены первые результаты его испытания в ходе физического набора статистики в эксперименте E-190 на ускорителе ИФВЭ У-70.

Abstract

Ardashev E.N. et al. The soft photons calorimeter of the SCD-2 experiment: IHEP Preprint 2013–17. – Protvino, 2013. – p. 18, figs. 15, table 1, refs: 13.

The design of a soft photons calorimeter of the SVD-2 experiment is described. The aperture of the device is $210 \times 210 \text{ mm}^2$. The first test results gain by the E-190 experiment on the IHEP U-70 accelerator are presented.

Введение

Регистрация мягких фотонов (МФ) является одной из задач Предложения эксперимента E-190 «Рождение частиц с большой множественностью в pp взаимодействиях при 70 ГэВ» [1]. Мягкими называем фотоны с энергией в с.ц.м. меньше 100 МэВ или с поперечным и продольным импульсами $p_T < 0.1$ ГэВ/c, $x_F < 0.01$. Выполненные ранее исследования [2] показали, что выход фотонов в этой области (1 – 50 МэВ в с.ц.м.) может превысить теоретические оценки в 5–8 раз. Источником МФ может быть несколько физических процессов:

- В соответствии с квантовой хромодинамикой МФ могут быть испущены в процессе кварк-кваркового или кварк-глюонного взаимодействия.
- Возникновение МФ может также сигнализировать о существовании нового явления, связанного с коллективным поведением частиц. Для качественного объяснения этого эффекта в некоторых теоретических работах было сделано предположение об образовании холодного пятна кварк-глюонной плазмы или адронного газа [3]. Такое холодное пятно имеет относительную стабильность и излучает МФ. Интенсивность испускания МФ зависит от времени существования системы. В рамках модели глюонной доминантности [4] были оценены размеры области испускания МФ, которая составляет $\sim 4 - 6$ фм. Следует отметить, что фотоны с энергией меньше 20 МэВ имеют длину волны $\lambda > 69$ фм. Эта величина значительно больше размеров области испускания МФ,

поэтому такие фотоны могут излучаться системой как целой, а не отдельными её частями или частицами.

- Кроме того, в области большой плотности адронов предполагается ещё один источник МФ. Это аннигиляция пионов в фотоны ($\pi\pi \rightarrow n\gamma$, n – число пионов) [5].

С целью исследования вышеперечисленных процессов предлагается расширить аппаратные возможности установки СВД-2 [6], работающей на ускорителе У-70 ГИЦ ИФВЭ, и дополнить её компактным электромагнитным калориметром (ЭМК), позволяющим регистрировать фотоны в области десятков МэВ.

В настоящей работе приведён выбор и описание составных элементов ЭМК, а также первые предварительные результаты его испытания в ходе набора статистики в эксперименте E-190.

Выбор материала калориметра

По условиям размещения ЭМК в установке СВД-2, калориметр должен быть компактным, следовательно, материалом калориметра должна служить среда максимальной плотности и с малой радиационной длиной.

В Таблице 1 приведены некоторые характеристики, взятые из [7], [8], [12], для четырёх неорганических кристаллов, используемых в настоящее время в спектрометрии фотонов.

Таблица 1.

| | NaJ(Tl) | CsJ(Tl) | BGO* | LYSO** | CWO*** |
|--|-----------|----------|------------|----------|-------------------|
| Световой выход [фотон/кэВ], (%) | 41, (100) | 54, (45) | 8-10, (20) | 32, (75) | 12-15, (30-50) |
| температурный коэфф. световыхода, [%/С ⁰] | -0.3 | 0.01 | -1.2 | 0.04 | -0.1 |
| плотность, [г/см ³] | 3.67 | 4.51 | 7.13 | 7.1 | 7.9 |
| радиационная длина, [см] | 2.59 | 1.8 | 1.12 | 1.1 | 1.1 |

| | | | | | |
|--|------|--------|--------|------|-------|
| длина волны в макс. спектра эмиссии [нм] | 410 | 550 | 480 | 420 | 500 |
| коэфф. преломления в макс. спектра эмиссии | 1.85 | 1.79 | 2.15 | 1.81 | 2.3 |
| постоянная времени спада, [нс] | 250 | 1000 | 300 | 41 | 14000 |
| энергетическое разрешение на линии 662 кэВ | 6-8 | 7-8.5 | 9.5-12 | 7-11 | |
| гигроскопичность | да | слабая | нет | нет | нет |

* - $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ – ортогерманат висмута;

** - $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5$ (Ce) - PreLude™ 420 - лютеций-иттриевый ортосиликат допированный церием;

*** - CdWO_4 - вольфрамат кадмия.

В качестве материала калориметра был выбран ортогерманат висмута. Кристаллы BGO обладают по сравнению, например, с NaI(Tl) , более высокой поглощающей способностью, что позволяет снизить объём детектора на порядок. Кроме того, этот сцинтиллятор имеет малую чувствительность к нейтронам, что оказывается удобным при измерении гамма-излучения в условиях проведения экспериментов на ускорителе У-70. При изготовлении кристаллов BGO не возникает проблем равномерного распределения активатора по объёму кристалла. Наконец, многим неорганическим сцинтилляторам свойственно послесвечение – наличие долговременной компоненты высвечивания. Кристаллы BGO обладают относительно малым послесвечением.

Предварительные измерения с кристаллами BGO

При создании ЭМК необходимо иметь ответы на следующие вопросы.

- Как влияет на энергетическое разрешение ЭМК изменение длительности строба (время интегрирования сигнала)? Какая минимальная длительность строба удовлетво-

рывает условиям эксперимента, каков компромисс между энергетическим разрешением и быстродействием системы?

- Как влияет на энергетическое разрешение системы различный способ укладки кристаллов в сборку (плотная упаковка в виде матрицы, вариант укладки с небольшими нормированными зазорами или укладка со смещением рядов друг относительно друга)?

Для получения ответов на эти вопросы использована сборка из четырёх кристаллов, просматриваемых одним фотоумножителем. Во всех вариантах измерений, позиция сборки на фотокатоде и положение каждого из кристаллов в сборке сохранялись неизменными.

Кристаллы BGO (параллелепипед $30 \times 30 \times 180$ мм³) были обернуты материалом Tyvek [9] толщиной 120 мкм. Поверх Tyvek дополнительно для светозащиты используется обертка одним слоем майлара с двусторонней металлизацией. Измерения проводились на гамма-квантах от источника Am-Be на линии $E_\gamma = 4439.1$ кэВ. Источник расположен над сборкой из кристаллов (излучение направлено в торец сборки) и находится на удалении ~ 1 м. Длительность строба варьируется в диапазоне от 100 до 600 нс.

Схема проведения измерений показана на рис.1. Снимаемый с фотоумножителя ФЭУ-167 сигнал раздваивается на усилителе БУ ($KУ=1$), сигнал в первой ветви используется для формирования строба в системе. Он поступает на усилитель ($KУ=13$), где еще раз раздваивается. С выходов усилителя сигналы поступают на два дискриминатора с порогами, установленными на 80 мВ и 200 мВ, с выхода дискриминаторов сигналы подаются на схему совпадений (СС). После схемы совпадения (формировка со следящим порогом, которая даёт хорошую временную привязку сигнала) формируется строб заданной длительности. Он подается на ЛВ (линейные ворота). Сигнал во второй ветви после задержки на 200 нс поступает на линейные ворота. После ворот сигнал интегрируется на экспандере до длительности 5 мкс и поступает на вход анализатора. Схема в целом идентична стандартной электронике зарядо-цифрового преобразователя.

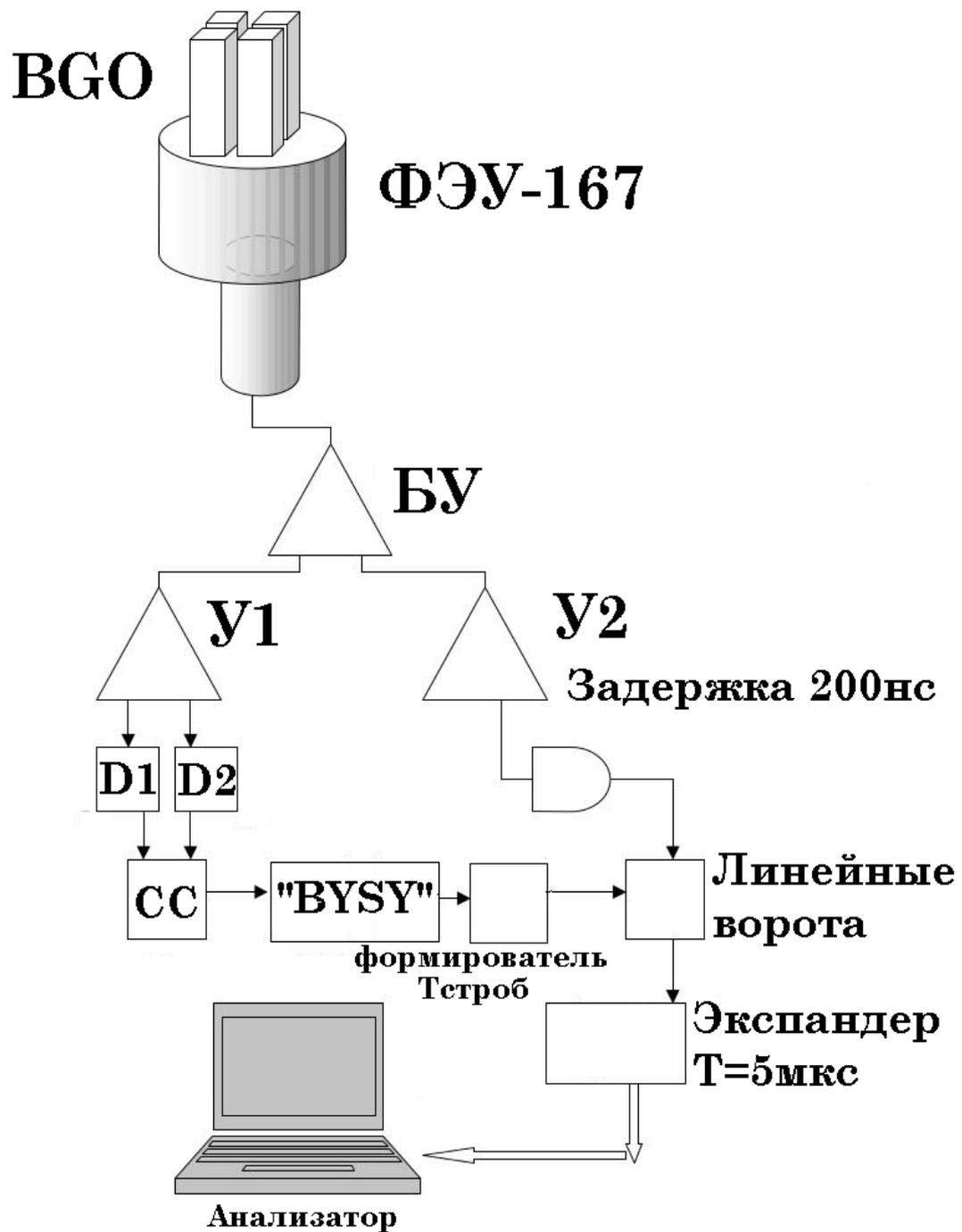


Рис. 1. Схема измерений. На рисунке для наглядности показана конфигурация с кристаллами, раздвинутыми на 2 мм.

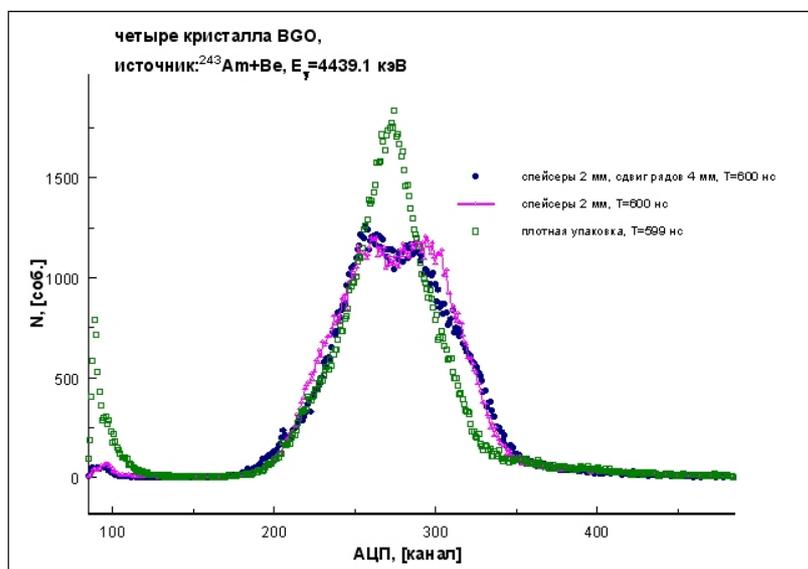


Рис. 2. Спектры сигналов от радиоактивного источника для разной упаковки кристаллов BGO.

На рис. 2 показаны спектры, полученные при трёх вариантах упаковки кристаллов в сборку:

- 1) четыре обернутых кристалла плотно сжаты между собой в виде матрицы 2x2;
- 2) между кристаллами установлена дополнительная пустотелая пластиковая прокладка - спейсер, толщиной 2 мм. В этой конфигурации кристаллы в сборке раздвинуты на 2 мм;
- 3) в третьей конфигурации установлены спейсеры и ряды матрицы смещены относительно друг друга на 4 мм.

Измерения выполнены при $T_{\text{строба}} = 600$ нс. Среднее значение пьедестала равно 59.26 отсчетов АЦП при FWHM равном 1.41.

Влияние длительности строба на форму сигнала и его уровень показано на рис. 3 (без спейсеров) и рис. 4 (со спейсерами). Длительность строба варьируется в интервале от 103 до 600 нс.

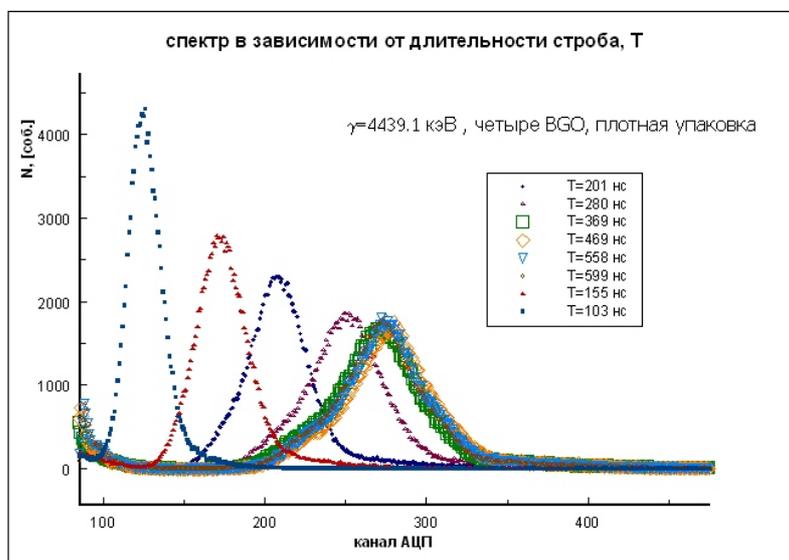


Рис. 3. Амплитудные спектры сигналов для разной длительности строба. Кристаллы плотно упакованы.

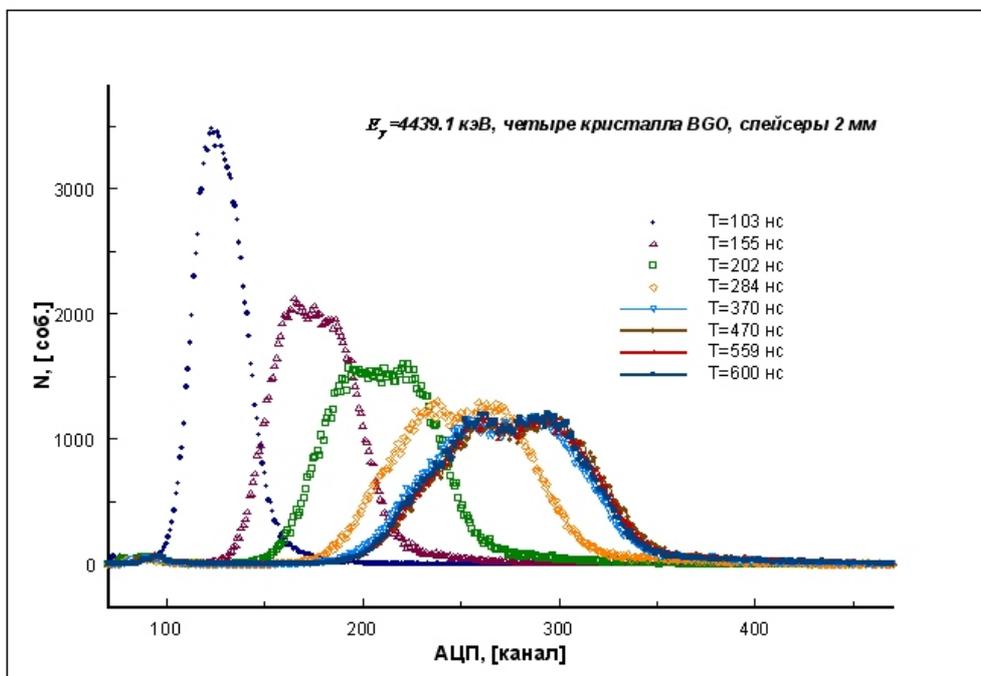


Рис. 4. Спектры сигналов для разной длительности строба. Между кристаллами установлены спейсеры 2 мм.

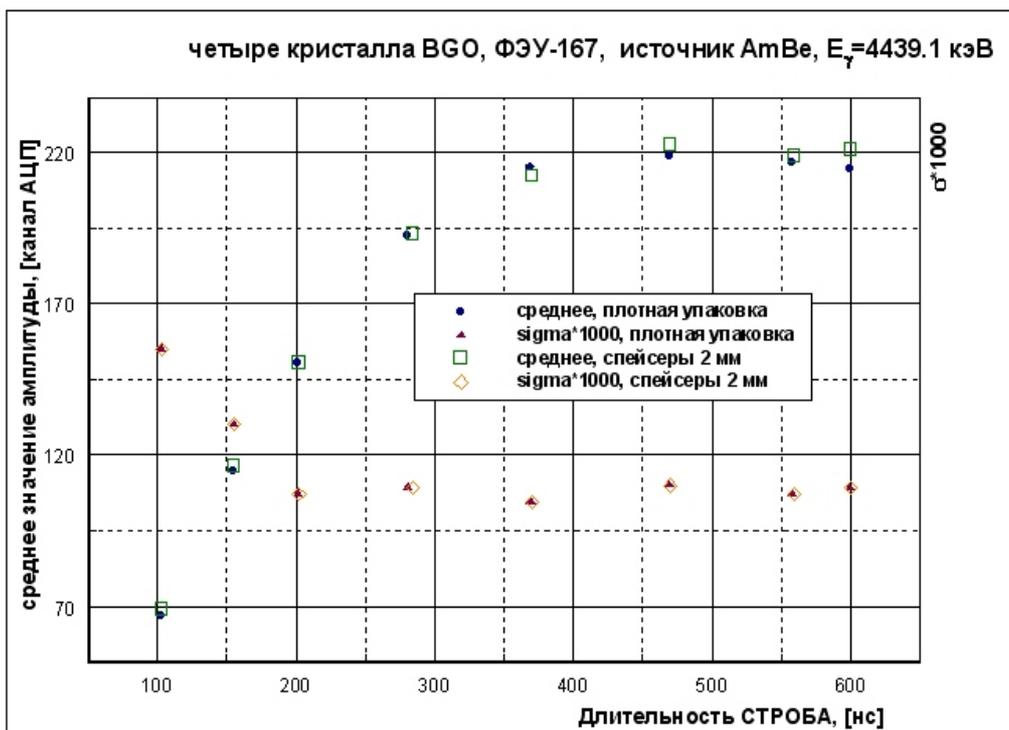


Рис. 5. Среднее значение амплитуды сигнала и его относительное среднеквадратичное отклонение (для масштабирования величина умножена на 1000) в зависимости от длительности stroba.

По результатам выполненных измерений (рис. 5) можно сделать следующие выводы:

1. Строб длительностью 400-500 нс достаточен для регистрации сигналов с BGO.
2. Плотная упаковка кристаллов в сборке является предпочтительной.
3. Наличие двух горбов в распределениях отклика в разряжённой упаковке указывает на зависимость величины сигнала от местоположения первого акта конверсии гамма-кванта в кристалле.

Конструкция калориметра

Калориметр представляет собой сборку из 49 сцинтилляционных счетчиков, собранных в виде матрицы 7x7 (рис. 6).

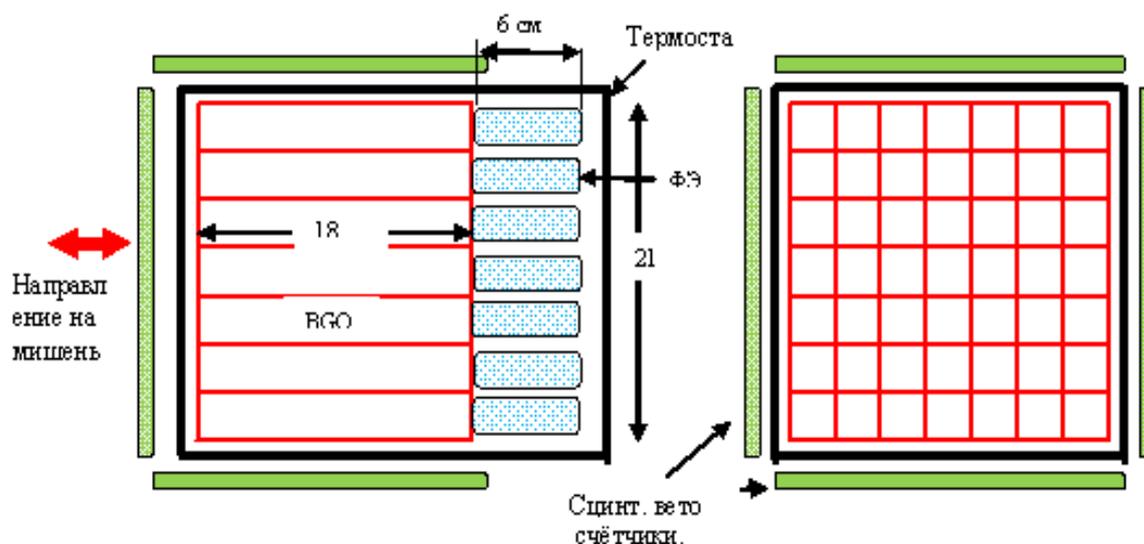


Рис. 6. Упрощённая схема электромагнитного калориметра на кристаллах BGO.

Каждый счетчик состоит из кристалла ортогерманата висмута (BGO) выполненного в форме параллелепипеда ($30 \times 30 \times 180 \text{ мм}^3$), просматриваемого с торца фотоумножителем. Боковые грани кристалла для увеличения светосбора обёрнуты материалом Тувек (толщина 120 мкм). Передний торец прикрыт высокоотражающей плёнкой типа VM2000 [10]. Используются фотоумножители типа 9106SB (ET Enterprises), ФЭУ имеет 8 динодов и повышенную квантовую эффективность в зеленой части спектра. Диаметр фотокатода 25 мм, диаметр колбы не превышает величину 29.5 мм. Колба имеет пермаллоевую защиту. ФЭУ приклеен к кристаллу двухкомпонентным оптическим клеем типа ЕРО-ТЕК 301 [11].

Предварительный усилитель выполнен на малошумящем операционном усилителе (ОУ) Ad8014 и представляет собой усилитель с обратной связью по току. Сигнал с ФЭУ подаётся на инвертирующий вход ОУ. Максимальное отношение сигнал-шум обеспечивает минимизация входной ёмкости. Она определяется промежутком динод-анод и ёмкостью монтажа и составляет ~ 6 пФ. Динамический диапазон сигналов более 66 дБ.

Внешний вид счетчика с делителем и предварительным усилителем (размещёнными непосредственно на панели ФЭУ) приведен на рис. 7.



Рис. 7. Счетчик с делителем и предварительным усилителем.

На рис. 8 а, б показаны лицевая и обратная стороны промежуточных переходных плат. Одна из них размещается внутри бокса с кристаллами, вторая - вне бокса. Платы связаны между собой двумя шлейфами кабелей. По шлейфам подаётся питание (+12, -12 В) от внешней платы в бокс на распределительную плату-предварительных усилителей и ФЭУ (400-600В). Напряжение питания ФЭУ может регулироваться на внешней плате отдельно для каждого из семи столбцов сборки. Внутренняя плата подсоединяется к задней стенке кожуха калориметра с использованием трёх шлейфов. По ним осуществляется коммутация счетчиков с сигнальными кабельными магистралями, ведущими к электронике, размещённой на пульте управления установкой.

Питание калориметра осуществляется от двух источников + 12В и – 12В. При токе потребления менее 1 А (+12 В) и 50 мА (-12 В). ФЭУ включены по схеме с заземлённым фотокатодом. Такое включение мотивировано максимальной плотностью упаковки кристаллов. Сигналы, снимаемые с предварительных усилителей, по кабельным магистралям поступают на входы усилителей, установленных на пульте управления установкой рядом с электроникой системы сбора данных. Внешний вид блока усилителей (со снятой крышкой) показан на рис. 9. В корпусе размещено 56 входных каналов. После инверсии каждый сигнал раздваивается и подаётся на оцифровку. Один канал прямой, второй – обзорный. Коэффициент аттенюации составляет 1:1,5. Имеется 112 выходных каналов.



Рис. 8а. Лицевая сторона плат: сверху внешняя плата – делители, внизу – внутренняя плата. Видны 49 разъемов для подключения панелей ФЭУ.

Рис 8б. Обратная сторона плат: На верхней (внешней плате) видны семь DC-DC преобразователей (типа EMCO C06) высоковольтного питания ФЭУ и потенциометры регулировки выходного напряжения.

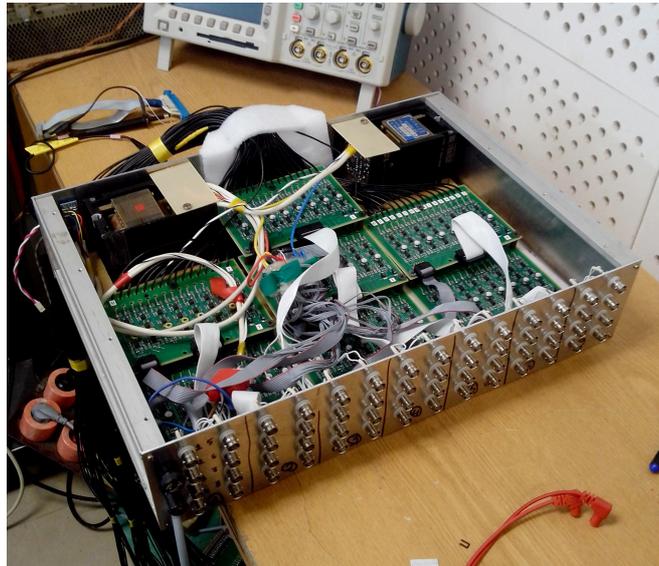


Рис. 9. Блок усилителей.

ЭМК размещён внутри термостатируемого бокса. Термостабилизация осуществляется холодильной установкой типа Huber 006В. Температура термостатирующей жидкости может задаваться в диапазоне $-20^0 \div +40^0$ С. В ходе измерений выбрана температура $+18^0$ С.

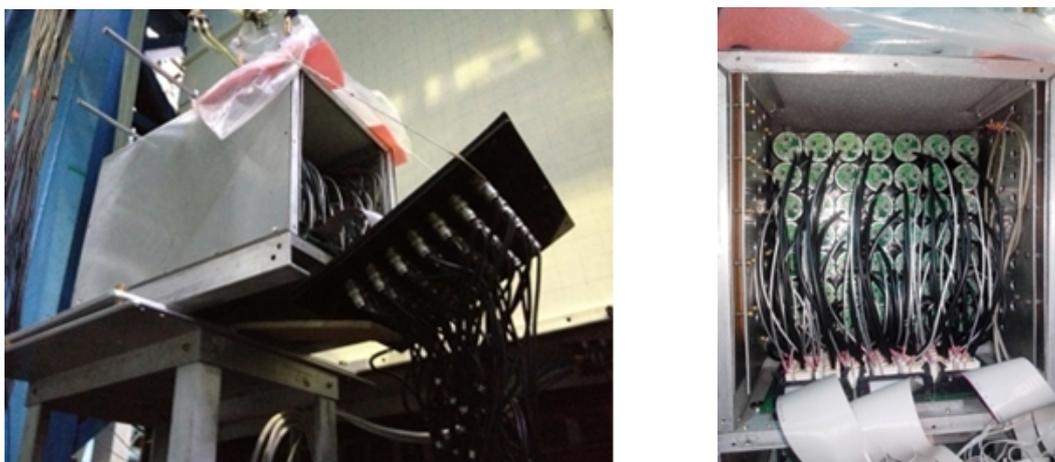


Рис. 10. Калориметр с откинутой задней стенкой. Внешний размер бокса ЭМК равен $287 \times 287 \times 420$ мм³.

Бокс ЭМК с фронтальной и боковых сторон окружен сцинтилляционными счетчиками охранной (вето) системы. Вето сигналы оцифровываются совместно с данными калориметра и используются при последующем анализе.

Внешний вид ЭМК в штатном положении в окружении счетчиков охранной системы приведен на рис. 11. На фотографии не показана пассивная защита из полиэтилена, толщиной 8 см, установленная по боковым стенкам калориметра для защиты от фона нейтронов.

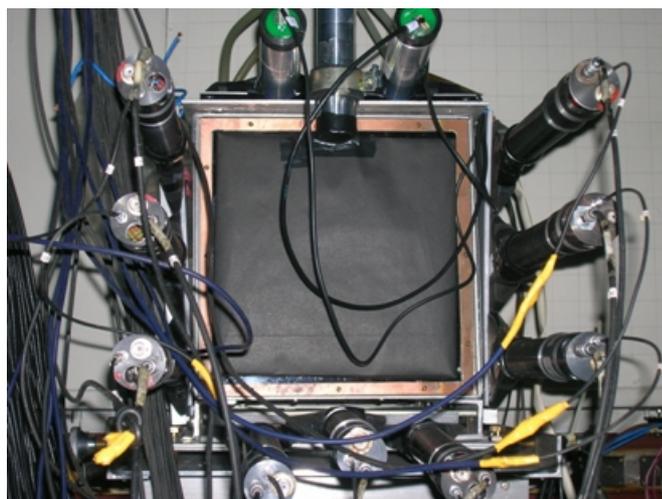


Рис. 11. Внешний вид калориметра в штатном положении.

Испытание калориметра в пучке

Калориметр установлен перед кассетой гамма-детектора (ДЕГА) [6] под углом около 5^0 относительно оси первичного пучка, на расстоянии 10 метров от центра жидководородной мишени на платформе гамма-детектора. ЭМК незначительно затеняет его апертуру. Есть возможность перемещать ЭМК на платформе в угловом интервале $\sim 2 \div 6^0$, что позволяет перекрыть конус в диапазоне $\sim 0 \div 50^0$ в с.ц.м. (импульс протонного пучка 50 ГэВ/с). В ходе проведения данных измерений положение калориметра было фиксированным.

Триггер события в эксперименте E-190 вырабатывается по совпадению сигналов от сцинтилляционных счётчиков, расположенных в первичном протонном пучке и сцинтилляционного триггерного годоскопа. Сигналы, поступающие со счётчиков ЭМК и счётчиков охранной системы, оцифровываются синхронно с данными детектора ДЕГА при поступлении триггерного сигнала эксперимента.

Выравнивание сигналов по амплитуде и предварительная калибровка счётчиков калориметра проводилась по пику от прохождения минимально ионизирующих частиц. Для выделения данного класса событий были применены следующие условия:

- во фронтальном охранном счётчике сигнал лежит в области пика (рис. 12, интервал ограниченный вертикальными линиями);
- в охранных счетчиках, окружающих боковые грани сборки, нет сигнала;
- в сборке сработал один и только один счетчик.

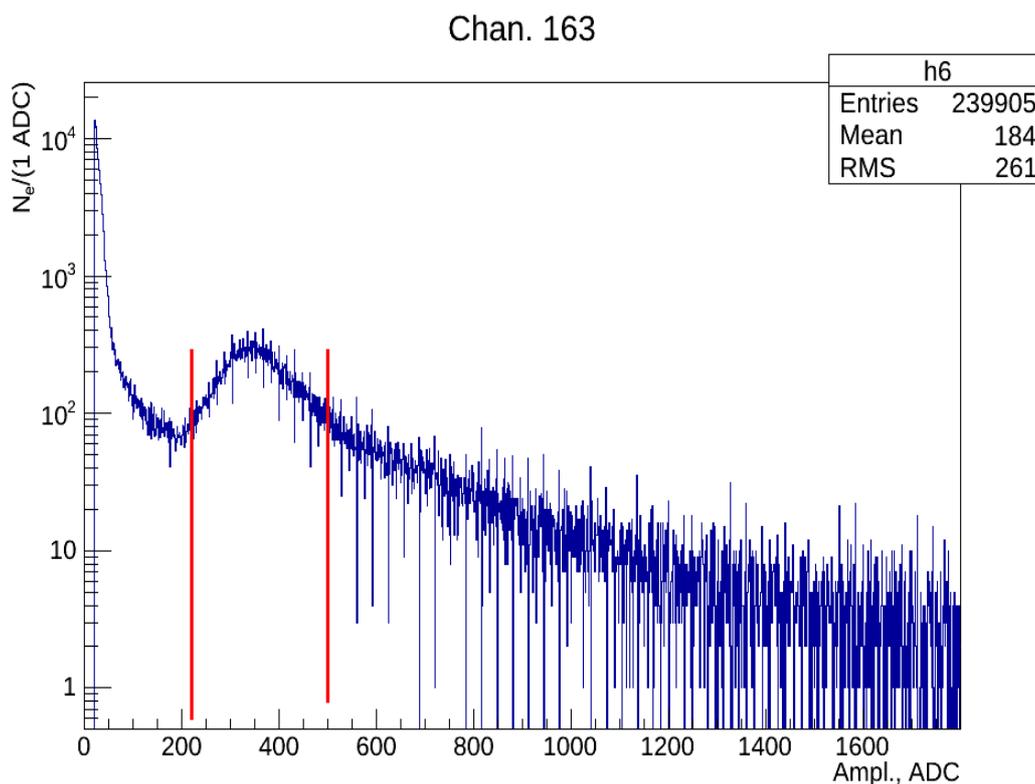


Рис. 12. Амплитудное распределение сигналов во фронтальном охранном счетчике.

Таким образом, для каждого счетчика ЭМК выделены события, в которых соответствующие заряженные частицы, прошли кристалл в продольном направлении. Согласно табличным данным [12], энергетические потери в кристалле ВГО для минимально ионизирующей частицы составляют 8,92 МэВ/см. Энергия, выделенная в кристалле длиной 180 мм, равна ~ 160 МэВ. Соответствующий энергетический спектр сигналов после предварительной калибровки показан на рис. 13.

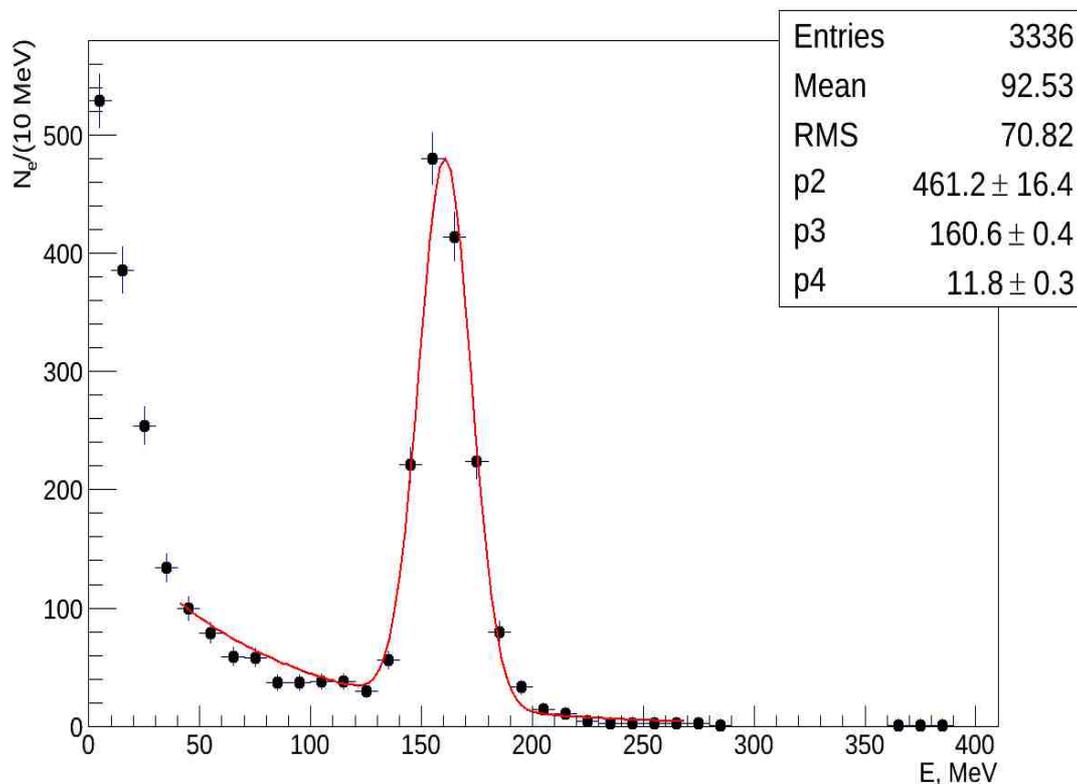


Рис. 13. Энергетический спектр в калориметре для событий, соответствующих пику во фронтальном охранном счетчике.

На рис. 14 приведён спектр сигналов в калориметре, полученный при следующих условиях:

- в счетчиках охранной системы нет сигналов;
- ни в одном счетчике внешнего слоя сборки ЭМК нет сигнала;
- сигналы во внутренней части сборки (3x3 кристаллов) ЭМК суммированы по всем 9 каналам с индивидуальными весовыми коэффициентами, полученными при калибровке.

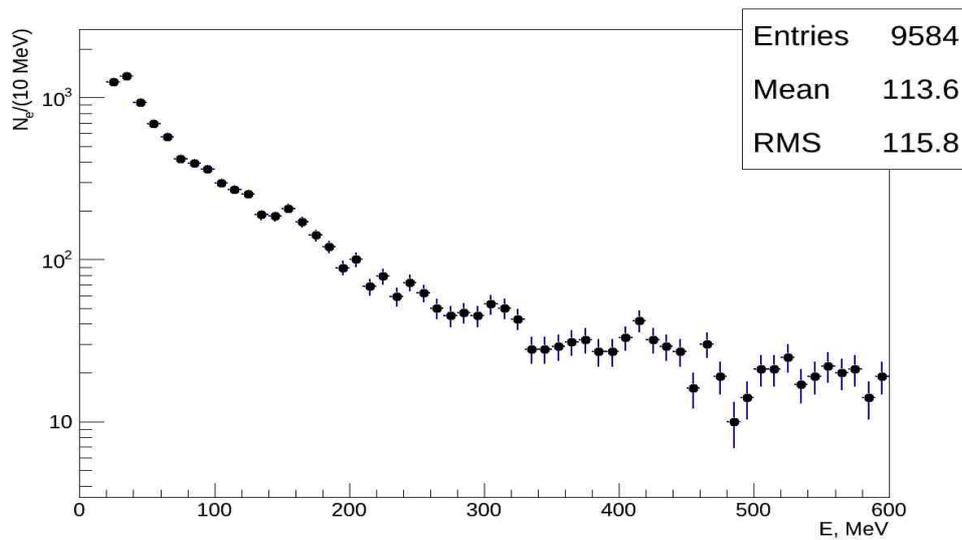


Рис. 14. Энергетический спектр, полученный в калориметре суммированием сигналов сборки счетчиков из 3x3 кристаллов. В спектр не внесены поправки на эффективность регистрации и на вклад от фотонов, рождающихся на конструкциях экспериментальной установки.

Распределение событий по числу сработавших счетчиков в сборке 3x3 приведено на рис. 15.

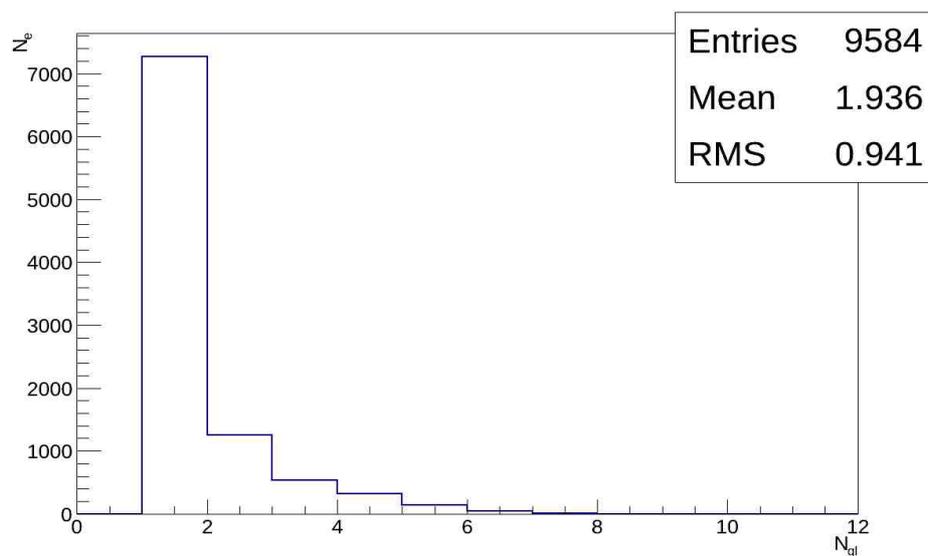


Рис. 15. Распределение событий по числу сработавших счётчиков в сборке 3x3.

Основные результаты и выводы

1. В состав установки СВД-2 на ускорителе У-70 введён новый детектор - калориметр мягких фотонов.
2. По данным, полученным в ходе экспозиции, сделана предварительная энергетическая калибровка каналов ЭМК.
3. Получены первые данные с использованием ЭМК по наблюдению спектра мягких фотонов, которые в настоящий момент обрабатываются.
4. ЭМК является законченным прибором и планируется к использованию в составе аппаратуры установки СВД-2 на ускорителе У-70 и установки ВМ@N на Нуклотроне ЛФВЭ ОИЯИ [13].

Список литературы

- [1] V.V. Avdeichikov et al.. JINR-P1-2004-190, Feb 2005. 45pp. Multiparticle production processes in PP interaction with high multiplicity at E=70 GeV. Proposal 'Thermalization'.(In Russian.)
- [2] P.V. Chliapnikov et al, Phys. Letters B141, p.2766 (1984); M.N. Ukhanov et al, IHEP preprint 86-195, Protvino (1986).
- T. Akesson et al., Phys. Rev. D 36, 2615 (1987).
- J. Schukraft (HELIOS Collaboration). Nucl. Phys. A 498, 79c (1989).
- S.Banerjee et al. Phys. Lett. B 305, 182 (1993).
- A.Belogianni et al. Phys.Lett. B548 (2002)122.
- [3] P.Lichard and L.Van Hove, Phys.Letters B245(1990) p. 105.
- [4] M.K. Volkov, E.S. Kokoulina and E.A.Kuraev. Particles and Nuclei, Letters. 1, 16 (2004). E.S.Kokoulina. AIP Conf.Proc.828:81-86 (2006).
- [5] M.K. Volkov and E.Kuraev, Phys.Lett, B424(1998) p.235, Yad.Fis.v62 (1999) p.133.
- [6] В.В. Авдейчиков и др. ПТЭ, №1 (2013), 14-37.
- [7] Carel W.E. van Eijk, NIM A 460 (2001), pp.1-14.
- [8] <http://www.detectors.saint-gobain.com>

- [9] http://www2.dupont.com/Tyvek/en_US/index.html
- [10] <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/957053-3bKJBw/957053.pdf>
- [11] <http://www.epotek.com/sscdocs/datasheets/301.PDF>
- [12] Eur.Phys.J. C 15, p. 80 (2000) (Rev. of Particle Physics).
- [13] <http://theor.jinr.ru/twiki/pub/NICA/NICAWhitePaper/Nikitin.pdf>

Рукопись поступила 7 октября 2013 г.

Е.Н. Ардашев и др.

Калориметр мягких фотонов установки СВД-2.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 14.10.2013. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 1,38. Уч.–изд.л. 1,92. Тираж 80. Заказ 40. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2013-17, ИФВЭ, 2013
