

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.3

КАЛОРИМЕТР МЯГКИХ ФОТОНОВ УСТАНОВКИ СВД-2

© 2015 г. Е. Н. Ардашев, Г. И. Бритвич, А. П. Воробьев, С. Н. Головня,
В. Ф. Головкин, А. А. Киряков, В. Х. Маляев, В. А. Сенько, М. М. Солдатов,
А. Г. Холоденко, Ю. П. Цюпа, Г. А. Богданова*, В. Ю. Волков*, А. К. Лефлат*,
В. Б. Дунин**, Е. С. Кокоулина**, В. А. Никитин**, И. А. Руфанов**

ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”
Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

*НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Россия, 119992, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

**Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

E-mail: Sergey.Golovnya@ihep.ru

Поступила в редакцию 20.03.2014 г.

Описана конструкция калориметра мягких фотонов установки СВД-2. Апертура прибора 210×210 мм. Приведены первые результаты его испытания в ходе физического набора статистики в эксперименте E-190 на ускорителе У-70 ИФВЭ.

DOI: 10.7868/S0032816215020020

ВВЕДЕНИЕ

Регистрация мягких фотонов (м.ф.) 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 системе центра масс (с.ц.м.) меньше 100 МэВ или с поперечным и продольным импульсами $p_T < 0.1$ ГэВ/с, $x_F < 0.01$. Выполненные ранее исследования [2–7] показали, что выход фотонов в этой области (1–50 МэВ в с.ц.м.) может превысить теоретические оценки в 5–8 раз. Источником м.ф. может быть несколько физических процессов:

- В соответствии с квантовой хромодинамикой м.ф. могут быть испущены в процессе кварк-кваркового или кварк-глюонного взаимодействия.

- Возникновение м.ф. 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 [8]. Такое холодное пятно имеет относительную стабильность и излучает м.ф. Интенсивность испускания м.ф. зависит от времени существования системы. В рамках модели глюонной доминантности [9, 10] были оценены размеры области испускания м.ф., которая составляет ~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 м.ф., поэтому такие фотоны могут излучаться системой как целой, а не отдельными ее частями или частицами.

Кроме того, в области большой плотности адронов предполагается еще один источник м.ф. Это аннигиляция пионов в фотоны ($\pi\pi \rightarrow n\gamma$, n – число пионов) [11].

С целью исследования выше перечисленных процессов предлагается расширить аппаратные возможности установки СВД-2 [12], работающей на ускорителе У-70 ИФВЭ и дополнить ее компактным электромагнитным калориметром (э.м.к.), позволяющим регистрировать фотоны в области десятков мегаэлектронвольт.

В данной работе приведен выбор и дано описание составных элементов э.м.к., а также приведены первые предварительные результаты его испытания в ходе набора статистики в эксперименте E-190.

ВЫБОР МАТЕРИАЛА КАЛОРИМЕТРА

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

| Характеристики | NaI(Tl) | CsI(Tl) | BGO | LYSO | CWO |
|---|----------|---------|-----------|---------|---------------|
| Световойход, фотон/кэВ (%) | 41 (100) | 54 (45) | 8–10 (20) | 32 (75) | 12–15 (30–50) |
| Температурный коэффициент световыхода, %/°C | –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 максимуме спектра эмиссии, нм | 410 | 550 | 480 | 420 | 500 |
| Коэффициент преломления в максимуме 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 |

Примечание. $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ – ортогерманат висмута; $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$ -PreLude™ 420 – лютеций-иттриевый ортосиликат, допированный церием; CdWO_4 – вольфрамат кадмия.

В таблице приведены некоторые характеристики, взятые из [13–15], для четырех неорганических кристаллов, используемых в настоящее время в спектрометрии фотонов.

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

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С КРИСТАЛЛАМИ BGO

При создании э.м.к. необходимо иметь ответы на следующие вопросы:

– как влияет на энергетическое разрешение э.м.к. изменение длительности строба (время интегрирования сигнала), какая минимальная длительность строба удовлетворяет условиям экспе-

римента, 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 четырех кристаллов, просматриваемых одним фотоумножителем. Во всех вариантах измерений позиция сборки на фотокатоде и положение каждого из кристаллов в сборке сохранялись неизменными.

Кристаллы BGO (параллелепипед $30 \times 30 \times 180$ мм) были обернуты материалом Туvek [16] толщиной 120 мкм. Поверх Туvek дополнительно для светозащиты используется обертка одним слоем майлара с двусторонней металлизацией. Измерения проводились на γ -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 приведена на рис. 1. Снимаемый с фотоумножителя ФЭУ-167 сигнал раздваивается на блоке усилителя БУ ($K_y = 1$), сигнал в первой ветви используется для формирования строба в системе. Он поступает на усилитель U_1 ($K_y = 13$), где еще раз раздваивается.

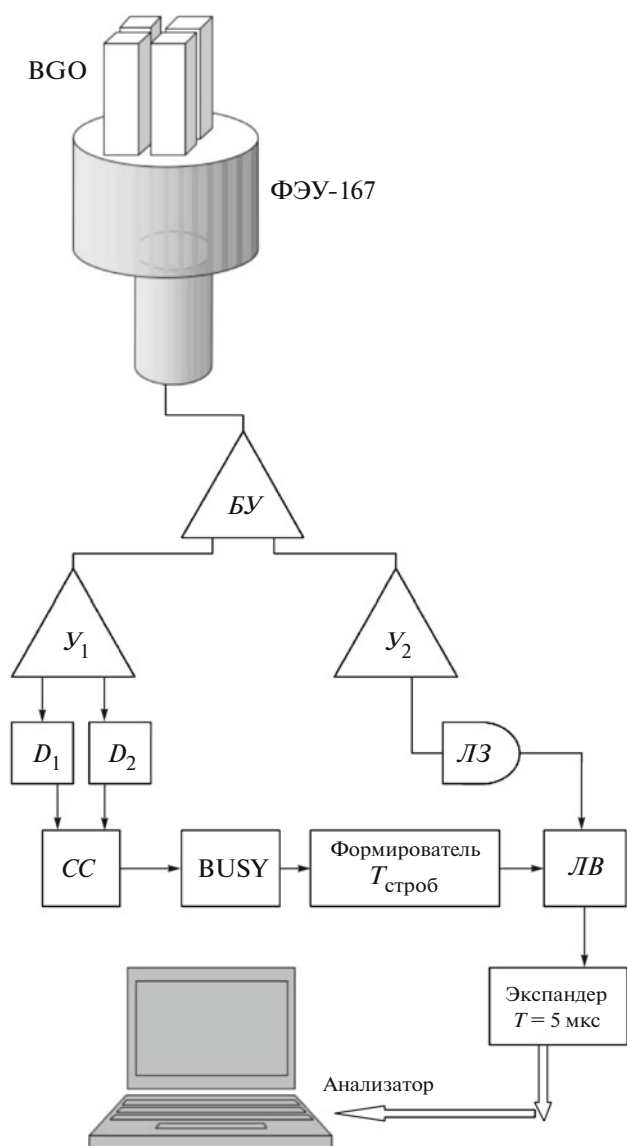


Рис. 1. Схема измерений (для наглядности показана конфигурация с кристаллами, разнесенными на 2 мм). БУ – блок усилителя, U_1 , U_2 – усилители, D_1 , D_2 – дискриминаторы, СС – схема совпадений, ЛВ – линейные ворота, ЛЗ – линия задержки $T = 200$ нс.

С выходов усилителя сигналы поступают на два дискриминатора (D_1 , D_2) с порогами, установленными на 80 и 200 мВ соответственно. С выхода дискриминаторов сигналы подаются на схему совпадений СС, после которой (формирование со следящим порогом дает хорошую временную привязку сигнала) формируется строб заданной длительности. Он подается на линейные ворота ЛВ. Сигнал во второй ветви после задержки на 200 нс также поступает на ЛВ. После ЛВ сигнал интегрируется на экспандере до длительности 5 мкс и поступает на вход анализатора. Схема в

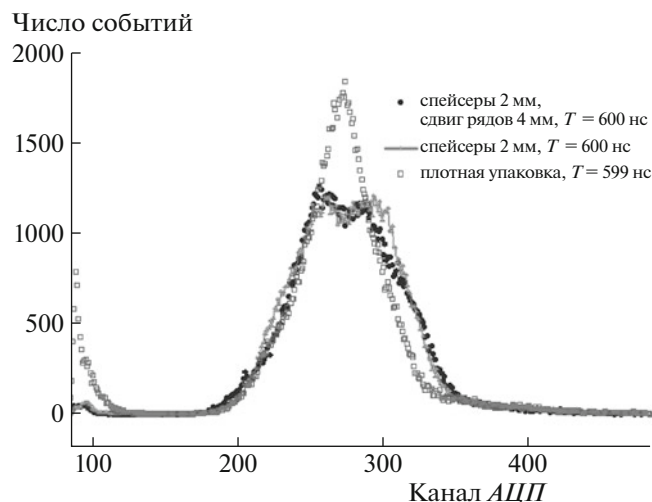


Рис. 2. Спектры сигналов от радиоактивного источника для разной упаковки кристаллов ВГО.

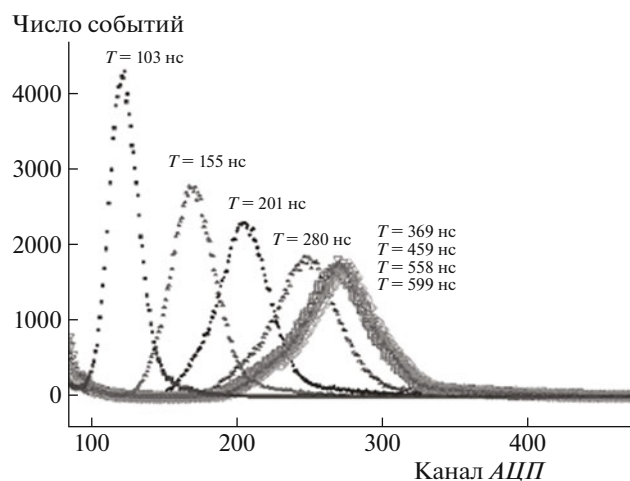


Рис. 3. Амплитудные спектры сигналов для разной длительности строба. Кристаллы плотно упакованы.

целом идентична стандартной электронике аналого-цифрового преобразователя АЦП.

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

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

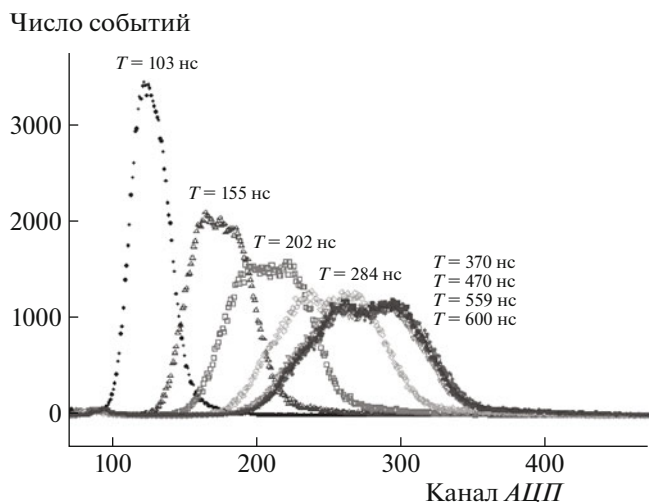


Рис. 4. Амплитудные спектры сигналов для разной длительности строба. Между кристаллами установлены спейсеры 2 мм.

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

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

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

- строб длительностью 400–500 нс достаточен для регистрации сигналов с BGO;
- плотная упаковка кристаллов в сборке является предпочтительной;
- наличие двух горбов в распределениях отклика в разреженной упаковке указывает на зависимость величины сигнала от местоположения первого акта конверсии γ -кванта в кристалле.

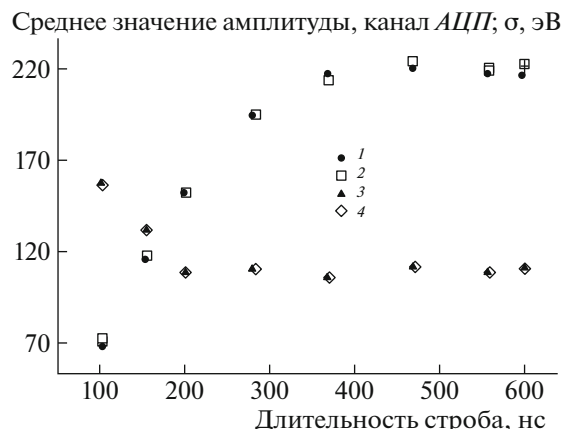


Рис. 5. Среднее значение амплитуды сигнала (1, 2) и его относительное среднеквадратичное отклонение σ (3, 4 – для масштабирования величина умножена на 1000) в зависимости от длительности строба. 1, 3 – плотная упаковка, 2, 4 – спейсеры 2 мм.

КОНСТРУКЦИЯ КАЛОРИМЕТРА

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

Каждый счетчик состоит из кристалла ортогерманата висмута (BGO), выполненного в форме параллелепипеда ($30 \times 30 \times 180$ мм), просматриваемого с торца фотоумножителем. Боковые грани кристалла для увеличения светосбора обернуты материалом Тувек (толщина 120 мкм). Передний торец прикрыт высокоотражающей пленкой VM2000 [17]. Используются фотоумножители 9106SB (ET Enterprises), ф.э.у. имеет 8 динодов, а также повышенную квантовую эффективность в зеленой части спектра. Диаметр фотокатода 25 мм, диаметр колбы не превышает 29.5 мм. Колба имеет пермаллоевую защиту. Ф.э.у. при-

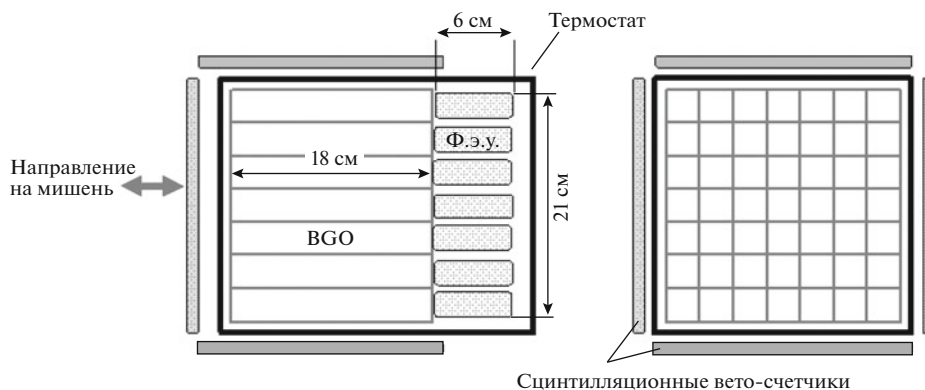


Рис. 6. Упрощенная схема электромагнитного калориметра на кристаллах BGO.



Рис. 7. Внешний вид счетчика с делителем и предварительным усилителем.

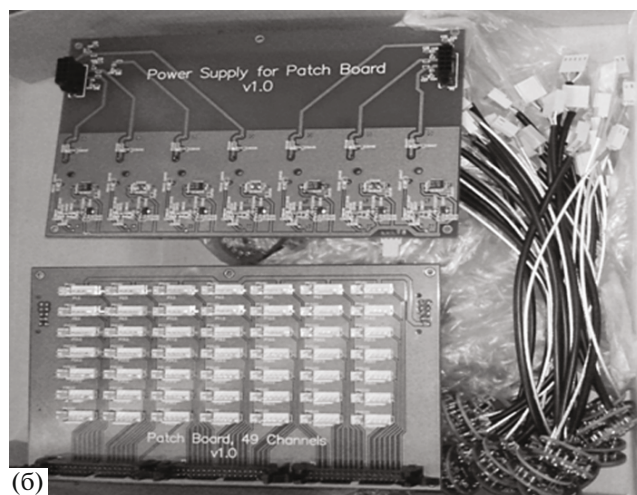
клеен к кристаллу двухкомпонентным оптическим клеем ЕРО-ТЕК 301 [18].

Предварительный усилитель выполнен на малощумящем операционном усилителе Ad8014 и представляет собой усилитель с обратной связью по току. Сигнал с ф.э.у. подается на инвертирующий вход операционного усилителя. Максимальное отношение сигнал/шум обеспечивает минимизация входной емкости. Она определяется промежутком диод–анод и емкостью монтажа и составляет ~ 6 пФ. Динамический диапазон сигналов более 66 дБ. Внешний вид счетчика с делителем и предварительным усилителем (размещенными непосредственно на панели ф.э.у.) показан на рис. 7. На рис. 8 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 подается питание (+12, –12 В) от внешней платы в бокс на распределительную плату предварительных усилителей и ф.э.у. (400–600 В). Напряжение питания ф.э.у. может регулироваться на внешней плате отдельно для каждого из семи столбцов сборки. Внутренняя плата подсоединяется к задней стенке кожуха калориметра с использованием трех шлейфов. По ним осуществляется коммутация счетчиков с сигнальными кабельными магистралями, ведущими к электронике, размещенной на пульте управления установкой.

Питание калориметра осуществляется от двух источников (+12 и –12 В) при токе потребления менее 1 А (+12 В) и 50 мА (–12 В). Ф.э.у. включены по схеме с заземленным фотокатодом. Такое



(а)



(б)

Рис. 8. а – лицевая сторона плат (вверху внешняя плата – делители, внизу – внутренняя плата; видны 49 разъемов для подключения панелей ф.э.у.); **б** – обратная сторона плат (на верхней, внешней, плате видны семь DC-DC-преобразователей EMCO C06 высоковольтного питания ф.э.у. и потенциометры регулировки выходного напряжения).

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. В корпусе размещено 56 входных каналов. После инверсии каждый сигнал раздваивается и подается на оцифровку. Один канал прямой, второй – обзорный. Коэффициент аттенюации составляет 1 : 1.5. Имеется 112 выходных каналов.

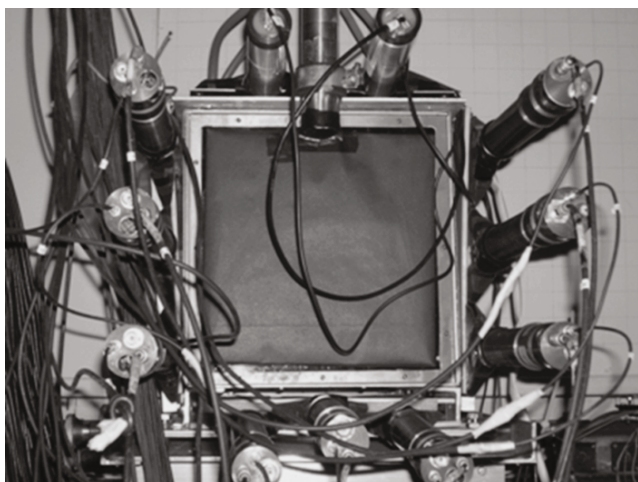


Рис. 9. Внешний вид калориметра в штатном положении.

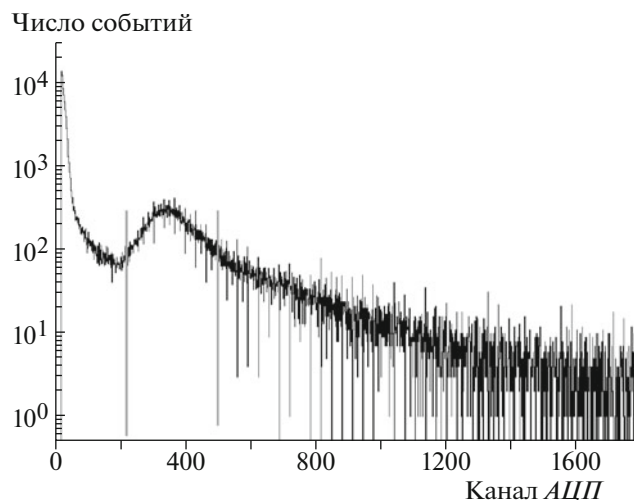


Рис. 10. Амплитудное распределение сигналов во фронтальном охранном счетчике.

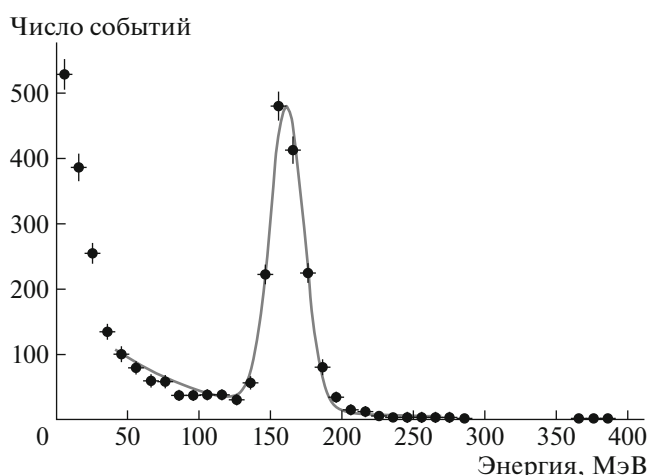


Рис. 11. Энергетический спектр в калориметре для событий, соответствующих пику во фронтальном охранном счетчике.

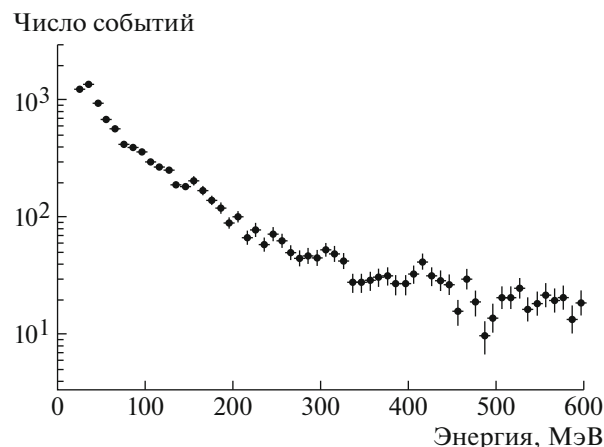


Рис. 12. Энергетический спектр, полученный в калориметре суммированием сигналов сборки счетчиков из 3×3 кристаллов. В спектр не внесены поправки на эффективность регистрации и на вклад от фотонов, рождающихся на конструкциях экспериментальной установки.

Э.м.к. размещен внутри термостатируемого бокса. Термостабилизация осуществляется холодильной установкой Huber 006В. Температура термостатирующей жидкости может задаваться в диапазоне $-20...+40^{\circ}\text{C}$. В ходе измерений выбрана температура $+18^{\circ}\text{C}$. Бокс э.м.к. 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 э.м.к. в штатном положении в окружении счетчиков охранной системы приведен на рис. 9 (не показана пассивная защита

из полиэтилена, толщиной 8 см, установленная по боковым стенкам калориметра для защиты от фона нейтронов).

ИСПЫТАНИЕ КАЛОРИМЕТРА В ПУЧКЕ

Калориметр установлен перед кассетой гамма-детектора (ДЕГА) [12] под углом около 5° относительно оси первичного пучка, на расстоянии 10 м от центра жидководородной мишени на платформе гамма-детектора. Э.м.к. незначительно затеняет его апертуру. Есть возможность перемещать э.м.к. на платформе в угловом интервале $\sim 2^{\circ}-6^{\circ}$, что позволяет перекрыть конус в диапазоне $\sim 0^{\circ}-$

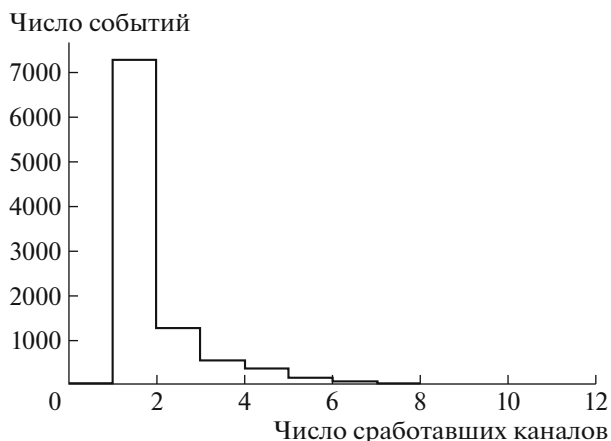


Рис. 13. Распределение событий по числу сработавших счетчиков в сборке 3×3 .

50° 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 счетчиков, расположенных в первичном протонном пучке, и сцинтилляционного триггерного годоскопа. Сигналы, поступающие со счетчиков э.м.к. и счетчиков охранной системы, оцифровываются синхронно с данными детектора ДЕГА при поступлении триггерного сигнала эксперимента.

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

- во фронтальном охранном счетчике сигнал лежит в области пика (рис. 10; интервал, ограниченный вертикальными линиями);

- в охранных счетчиках, окружающих боковые грани сборки, нет сигнала;

- в сборке сработал один и только один счетчик.

Таким образом, для каждого счетчика э.м.к. выделены события, в которых соответствующие заряженные частицы прошли кристалл в продольном направлении. Согласно табличным данным [15] 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. 11.

На рис. 12 приведен спектр сигналов в калориметре, полученный при следующих условиях:

- в счетчиках охранной системы нет сигналов;
- ни в одном счетчике внешнего слоя сборки э.м.к. нет сигнала;

- сигналы во внутренней части сборки (3×3 кристаллов) э.м.к. суммированы по всем 9 каналам с индивидуальными весовыми коэффициентами, полученными при калибровке.

Распределение событий по числу сработавших счетчиков в сборке 3×3 приведено на рис. 13.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В состав установки СВД-2 на ускорителе У-70 введен новый детектор – калориметр мягких фотонов.

2. По данным, полученным в ходе экспозиции, сделана предварительная энергетическая калибровка каналов э.м.к.

3. Получены первые данные с использованием э.м.к. по наблюдению спектра мягких фотонов, которые в настоящий момент обрабатываются.

4. Э.м.к. 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 [19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сотрудничество ОИЯИ-НИИЯФ МГУ-ИФВЭ-ФИРАН-ГГТУ-ОИЭЯИ НАНБ. JINR-P1-2004-190. Дубна, 2005.
2. Chliapnikov P.V., DeWolf E.A., Fenyuk A.B., Gerdyukov L.N., Goldschmidt-Clermont Y., Ronjin V.M., Weigend A. // Phys. Lett. 1984. V. B141. P. 276.
3. Уханов М.Н., Боголюбский М.Ю., Кирюнин А.Е., Моисеев А.М., Минаенко А.А., Чежулаев С.В., Лемон Ж., Вайхомвеген Г., Викенс Д., Хайган В.М., Туоминиеми Й., Эструх Д.А., Мейсон П., Экспонг Г., Селден Б., Цицлли Л., Ямагни Н. Preprint IHEP 86-195. Protvino, 1986.
4. The Axial Field Spectrometer Collaboration // Phys. Rev. D. 1987. V. 36. P. 2615.
5. HELIOS Collaboration // Nucl. Phys. 1989. V. A498.
6. Banerjee S., Barberis D., Belogianni A., Beusch W., Brodbeck T.J., French B.R., Goldschmidt-Clermont Y., Grabowski M., Kerres U., Knudson K., Morris J.A.G., Perepelitsa V., Quercigh E., Sonderegger P., Spyropoulou-Stassinaki M., Subramanian A., Vassiliadis G., Vichou I., Weigend A., Wilson G.W. // Phys. Lett. 1993. V. B305. P. 182.
7. Belogianni A., Beusch W., Brodbeck T.J., Evans D., French B.R., Ganoti P., Jacholkowski A., Kinson J.B., Kirk A., Lenti V., Loconsole R.A., Manzari V., Minashvili I., Perepelitsa V.F., Russakovich N., Sonderegger P., Spyropoulou-Stassinaki M., Tchatchidze G., Vassiliadis G.,

- Vichou I., Villalobos Bailliae O.* // Phys. Lett. 2002. V. B548. P. 122.
8. *Lichard P., Van Hove L.* // Phys. Lett. 1990. V. B245. P. 105.
9. *Volkov M.K., Kokoulina E.S., Kuraev E.A.* // Particles and Nuclei, Letters. 2004. V. 1. P. 16.
10. *Kokoulina E.S.* // AIP Conf. Proc. 2006. V. 828. P. 81.
11. *Volkov M.K., Kuraev E.* // Phys.Lett. 1998. V. B424. P. 235.
12. *Авдейчиков В.В., Алеев А.Н., Ардашев А.Н., Басиладзе С.Г., Богданова Г.А., Вишневская А.М., Волков В.Ю., Воробьев А.П., Воронин А.Г., Головня С.Н., Головкин В.Ф., Горохов С.А., Гришкевич Я.В., Ермолов П.Ф., Зверев Е.Г., Зоткин С.А., Карманов Д.Е., Киреев В.И., Кокоулина Е.С., Крамаренко В.А., Кутов А.Я., Ланищиков Г.И., Лефлат А.К., Лютов С.И., Малеяев В.Х., Меркин М.М., Митрофанов Г.Я., Мялковский В.В., Никитин В.А., Петров В.С., Пешехонов В.Д., Плескач А.В., Полковников М.К., Попов В.В., Руфанов И.А., Рядовилов В.Н., Сенько В.А., Солдатов М.М., Тихонова Л.А., Фурманец Н.Ф., Холоденко А.Г., Цюпа Ю.П., Шааланда Н.А., Юкаев А.И., Якимчук В.И.* // ПТЭ. 2013. № 1. С. 14; doi 10.7868/S003281621206002X
13. *Carel W.E. van Eijk* // Nucl. Instrum. and Methods. 2001. V. A460. P. 1.
14. <http://www.detectors.saint-gobain.com>
15. Atomic and nuclear properties of matter // Revised May 2000 by D.E. Groom (LBNL) // Eur. Phys. J. C 15, p. 80 (2000) (Rev. of Particle Physics); http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_Data_Group
16. http://www2.dupont.com/Tyvek/en_US/index.html
17. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/957053-3bKJBw/957053.pdf>
18. <http://www.epotek.com/sscdocs/datasheets/301.PDF>
19. <http://theor.jinr.ru/twiki/pub/NICA/NICAWhitePaper/Nikitin.pdf>