

## КАЛИБРОВКА КОСМИЧЕСКИМИ МЮОНАМИ СПЕКТРОМЕТРА-ТЕЛЕСКОПА

В. А. Басков, Б. Б. Говорков, В. В. Полянский

*Представлены результаты калибровки космическими мюонами многоканального свинцово-сцинтилляционного спектрометра-телескопа типа “сэндвич”, предназначенного для работы в высокоинтенсивных фотонных и электронных пучках, способного определять энергию пучка и формировать собственный триггер. Обнаружено, что относительное энергетическое разрешение при среднем энерговыделении в спектрометре космическими мюонами  $\sim 26$  МэВ составляет от 7.5% до 23% в зависимости от варианта внутреннего и внешнего триггера.*

**Ключевые слова:** электромагнитные ливни, спектрометр, сместитель спектра, космические мюоны, триггер.

В физике промежуточных энергий 0.1–1.0 ГэВ для регистрации электромагнитных продуктов распадов (гамма-квантов, электронов и позитронов) остаётся актуальной задача совмещения в одном детекторе хорошего временного и энергетического разрешений. Хорошее энергетическое разрешение традиционно достигается применением различных типов кристаллов (NaI(Tl), CsI и т. д.), в которых для получения хорошего временного разрешения используется разбиение детекторов на составные части с вставками из быстрого пластического сцинтиллятора или выделение быстрой компоненты во временном спектре [1–3]. Однако остаётся интерес к наиболее дешевым и обладающим большими конструктивными возможностями многопластинчатым свинцово-сцинтилляционным спектрометрам типа “сэндвич” [4, 5].

В Отделе физики высоких энергий Физического института им. П.Н. Лебедева на выведенном электронном пучке ускорителя “Пахра” с энергией 250–500 МэВ создана многоканальная (64 канала) высокоинтенсивная ( $\sim 10^6$  фотонов/сек) система меченых фотонов (СМ) [7]. Для определения характеристик СМ (эффективности гамма/е-совпадений, временных соотношений между сигналами экспериментальной установки и

каналами СМ и т.д.) и регистрации продуктов реакций, исследуемых с помощью СМ, создан многопластинчатый свинцово-сцинтилляционный спектрометр-телескоп (СТ) [7].

Быстрое время высвечивания сцинтилляторов дало возможность создать детектор, способный работать в условиях больших загрузок, и значительно снизить число случайных совпадений. Это снижение обусловлено наличием естественного энергетического порога, существующего в случае развития электромагнитного ливня в веществе СТ, а также возможностью формировать различные варианты внутреннего триггера с помощью счетчиков СТ [8].

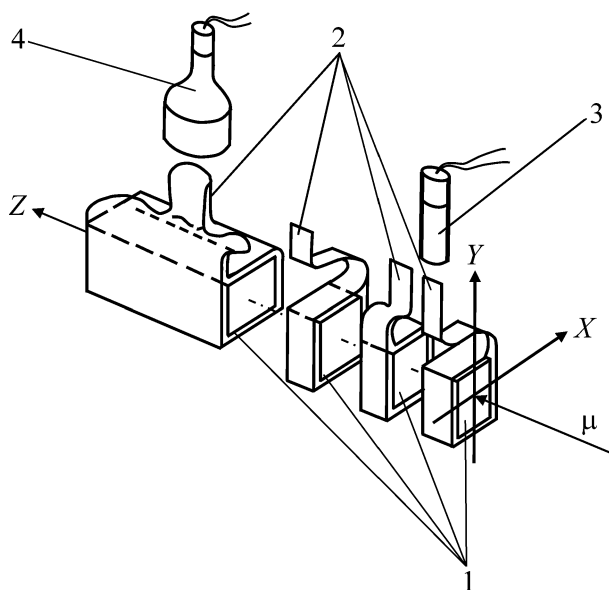


Рис. 1: Схема спектрометра-телескопа (общий вид): 1 – свинцово-сцинтилляционная сборка; 2 – шифтер; 3 – ФЭУ-85 с делителем; 4 – ФЭУ-52 с делителем.

Спектрометр-телескоп (рис. 1) содержит 26 пластин свинца (3 мм) и пластического сцинтиллятора типа “полистирол” (5 мм) с поперечными размерами  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ . Общая толщина СТ составляет 14.3 радиационных длин. По глубине СТ разбит на 4 счетчика таким образом, чтобы при развитии в нем электромагнитного ливня с энергией первичного электрона или фотона  $\sim 350 \text{ МэВ}$  в каждом счетчике СТ выделялась одинаковая средняя величина энергии ливня. Набор пластин в счетчиках СТ составил: СТ1 – 4 Рb + 4 сцинтил.; СТ2 – 3 Рb + 3 сцинтил.; СТ3 – 4 Рb + 4 сцинтил.; СТ4 – 15 Рb + 15 сцинтил. Сцинтилляционный свет с каждого счетчика снимается с помощью сместителя спектра (шифтера) толщиной 4 мм со всех сторон свинцово-сцинтилляционной сборки и выводится без светосборника на ФЭУ (рис. 1). Шифтеры “поверхностные”,

то есть спектросмещающая добавка нанесена на поверхность оргстекла, из которого состоят шифтеры. Конструктивно схема выводов света со счетчиков СТ одинакова, но для компактности световыводящие торцы счетчиков СТ1 и СТ3 сдвинуты на 1.5–2.0 см в одну сторону от оси симметрии сцинтиляционной сборки, а торцы СТ2 и СТ4 – в другую на такое же расстояние. Длина световыводящих торцов составила 12 см. Все счетчики вместе с шифтерами со всех сторон, исключая торцы, просматриваемые ФЭУ, обернуты алюминизированной фольгой (0.05 мм). Для регистрации света в счетчиках СТ1, СТ2 и СТ3 используются ФЭУ-85. Фотокатоды ФЭУ непосредственно прилегают к световыводящим торцам шифтеров. В счетчике СТ4 наряду с ФЭУ-85, просматривающим торец шифтера через световод, используется ФЭУ-52, прилегающий к торцу шифтера непосредственно фотокатодом.

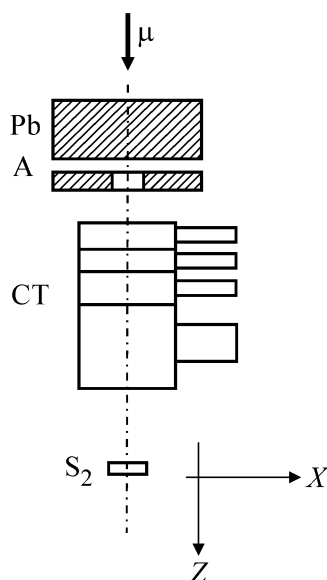


Рис. 2: Схема калибровки спектрометра-телескопа космическими мюонами (основные элементы калибровки): Pb – свинцовая защита; A – счетчик "вето"; СТ – спектрометр-телескоп; S<sub>2</sub> – один из триггерных счетчиков.

Калибровка СТ была проведена на космических мюонах (рис. 2). В качестве триггерных счетчиков использовались сцинтиляционные счетчики разных размеров: S<sub>1</sub> (100 × 20 × 5 мм<sup>3</sup>), S<sub>2</sub> (90 × 30 × 10 мм<sup>3</sup>) и S<sub>3</sub> (40 × 40 × 5 мм<sup>3</sup>). Счетчик veto A имел размер 500 × 150 × 10 мм<sup>3</sup> с диаметром центрального отверстия 20 мм. Для выделения мюонов при калибровке СТ перед счетчиком A или СТ помещались свинцовые блоки толщиной 5 и 10 см. В исследованиях использовался различный набор триггеров, составленный из счетчиков S<sub>1</sub>–S<sub>3</sub> и A, которые располагались как впереди, так и по-

зади СТ. Триггер мог формироваться также из счетчиков самого СТ. Набор каждой амплитудной гистограммы в зависимости от конфигурации триггера составлял от 8 до 40 часов, число событий в наборе колебалось от 1000 до 3500 [5–8].

Ниже представлена зависимость относительного энергетического разрешения  $\beta = \Delta A / \langle A \rangle / 2.35$  ( $\langle A \rangle$  – средняя энергия мюонов в счетчике или комбинации счетчиков СТ;  $\Delta A$  – полная ширина на половине высоты амплитудного спектра) от конфигурации триггера (во всех счетчиках СТ в пунктах 1–8 использовались ФЭУ-85, в пункте 9 в СТ4 использовался ФЭУ-52):

- |   |                  |
|---|------------------|
| 1. свинца нет, триггер: $T = S_2 \times S_3 \times S_4$ перед СТ                        | $\beta = 18\%$ ; |
| 2. 5 см свинца между $S_2$ и $S_4$ , $T = S_2 \times S_3 \times S_4$ перед СТ           | $\beta = 18\%$ ; |
| 3. свинца нет, $T = СТ1 \times СТ2 \times СТ3 \times СТ4$                               | $\beta = 23\%$   |
| 4. свинца нет, $T = СТ1 \times СТ2 \times СТ3 \times СТ4 \times S_2$                    | $\beta = 17\%$ ; |
| 5. свинца нет, $T = A \times СТ1 \times СТ2 \times СТ3 \times СТ4 \times S_2$           | $\beta = 17\%$ ; |
| 6. 5 см свинца перед А, $T = A \times СТ1 \times СТ4 \times S_1$                        | $\beta = 16\%$ ; |
| 7. 5 см свинца перед А, $T = A \times СТ4 \times S_1$                                   | $\beta = 15\%$ ; |
| 8. 10 см свинца перед А, $T = A \times СТ4 \times S_1$                                  | $\beta = 12\%$ ; |
| 9. 10 см свинца перед А, $T = A \times СТ1 \times СТ2 \times СТ3 \times СТ4 \times S_1$ | $\beta = 7.5\%$  |

(триггер Т в пунктах 6–9 формировался при положении счетчиков СТ (СТ1–СТ4) вдоль траектории мюона (рис. 1 и 2); в СТ4 вместо ФЭУ-85 стоит ФЭУ-52).

Из представленных результатов видно, что разрешение СТ во всех пунктах, кроме пунктов 3 и 9, колеблется в пределах 12%–18%. Улучшение разрешения СТ в пункте 9 с 12% до 7.5% связано с заменой светосборника и ФЭУ-85 на ФЭУ-52 без светосборника, фотокатод которого непосредственно соприкасался с полированным торцом шифтера в СТ4.

Разрешение спектрометра, когда триггер сформирован только совпадениями счетчиков СТ (пункт 3), несколько хуже разрешений остальных пунктов. Можно предположить, что ухудшение разрешения в этом случае связано: а) с худшей регистрацией СТ периферийных треков вблизи боковых поверхностей счетчиков; б) регистрацией СТ не только “жесткой” компоненты космического излучения – мюонов, но и “мягкой” – электронов, позитронов и фотонов, которые развивают электромагнитные ливни, внося в величину разрешения СТ неопределенность, связанную с “сэмплинг” флуктуациями в свинцовых пластинах.

Разрешения отдельных счетчиков СТ в пункте 9 составили: СТ1 – 22.5%; СТ2 – 24.8%; СТ3 – 21.3%; СТ4 – 15.9%.

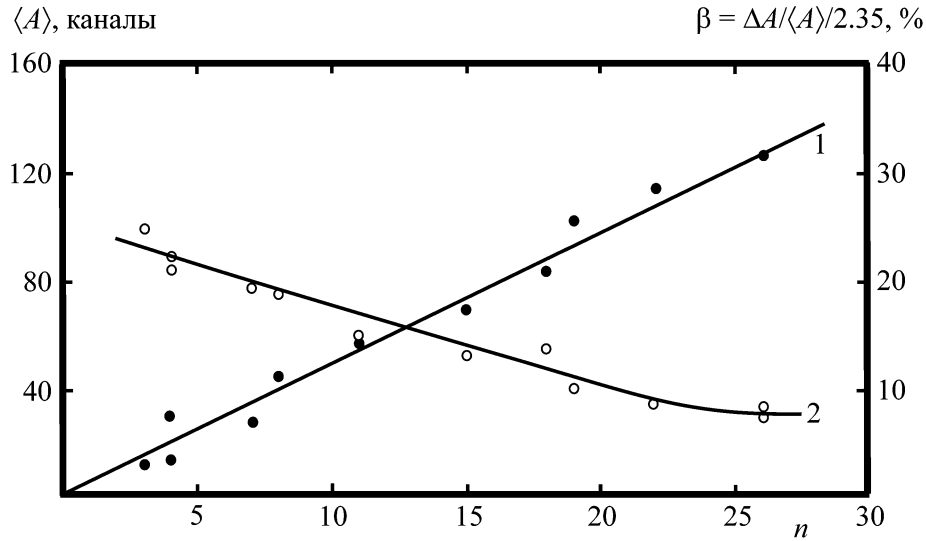


Рис. 3: Зависимость средней амплитуды  $\langle A \rangle$  (1) и относительного энергетического разрешения  $\beta = \Delta A / \langle A \rangle / 2.35$  (2) спектрометра-телескопа от числа пластин  $n$ .

На рис. 3 представлены зависимости амплитуды (1) и относительного энергетического разрешения (2) отдельных счетчиков СТ и их комбинаций от числа сцинтилляционных пластин. Измерения были выполнены в конфигурации внешнего триггера пункта 9 и проходили в следующей последовательности: после счетчика А на первом этапе помещался СТ2 (3 сцинтилл. пластины), далее СТ1 или СТ3 (4 сцинтилл. пластины) (3 + 4 = 7 пластин), далее счетчики СТ3 и СТ4 и так далее, вплоть до полной толщины СТ в 26 сцинтилляционных пластин. В этих измерениях в СТ4 использовался ФЭУ-52.

Из рис. 3 видно, что средняя величина амплитуды пропорциональна числу пластин  $\langle A \rangle = m \cdot n$  ( $m$  – коэффициент пропорциональности в единицах [каналов/пластину];  $n$  – число пластин) или средней величине энергии, выделившейся в каждой сцинтилляционной пластине ( $\langle \Delta E \rangle = d \cdot n \cdot E$ , где  $E \approx 2$  МэВ/см – средняя энергия, выделяющаяся при прохождении мюона в сцинтилляторе;  $d = 0.5$  см – толщина сцинтилляционной пластины СТ). Зависимость величины относительного энергетического разрешения  $\beta = \Delta A / \langle A \rangle / 2.35$  от числа пластин  $n$  хорошо описывается зависимостью  $\beta = k / n^{1/2}$  при  $k = 40$  ( $\Delta A$  – ширина на половине высоты амплитудного спектра со счетчика с соответствующим числом пластин;  $\langle A \rangle$  – средняя амплитуда по спектру).

При калибровке одиночными космическими мюонами, когда свинцовая защита больше 10 радиационных длин, электромагнитные ливни от гамма-квантов и электронов практически отсутствуют. В этом случае светособирающая система регистрирует толь-

ко один трек минимально ионизирующего мюона. Энергетическое разрешение в этом случае определяют четыре основных фактора:

1 – флуктуации числа фотонов при ионизации мюоном сцинтилляционных пластин СТ;

2 – флуктуации числа фотонов при переизлучении сцинтилляционного света в шифтере;

3 – флуктуации числа фотонов при транспортировке переизлученного света к фотокатоду ФЭУ;

4 – флуктуации числа фотоэлектронов, “выбиваемых” шифтерными фотонами из фотокатода ФЭУ.

Вклад каждого фактора флуктуаций в общее энергетическое разрешение необходимо исследовать дополнительно, однако можно предположить, что основными факторами, влияющими на энергетическое разрешение СТ, являются 1 и 4.

Таким образом, предварительная калибровка на космических мюонах многопластинчатого свинцово-сцинтилляционного спектрометра-телескопа показала, что спектрометр в зависимости от варианта внутреннего и внешнего триггера имеет относительное энергетическое разрешение, находящееся в диапазоне от  $\delta = 7.5\%$  до  $\delta = 23\%$ .

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Н. Okuno, A. Imanishi, K. Maruyama, et al., Phys. Rev. A, Nucl. and Meth. **365**, 352 (1995).
- [2] В. А. Басков, Ю. А. Башмаков, А. В. Верди и др., ПТЭ № 1, 42 (1995).
- [3] М. Е. King, R. Baggs, E. Church, et al., Preprint SLAC-PUB-5971 (SLAC, USA, 1992).
- [4] Т. Kishimoto, N. Shinkai, S. Ajimura, et al., Annual Report, Institute for Nuclear Study (University of Tokyo), 1994-1995 (Univ. of Tokyo, Tokyo, 1996), p. 92.
- [5] К. Н. Мухин, *Экспериментальная ядерная физика, том 2* (М., Энергоиздат, 1983).
- [6] С. Хаякава, *Физика космических лучей, том 1* (М., Мир, 1973).
- [7] В. А. Басков, А. В. Верди, Б. Б. Говорков и др., Препринт ФИАН № 37 (ФИАН, Москва, 1999).
- [8] В. А. Басков, Б. Б. Говорков, В. В. Полянский, Краткие сообщения по физике ФИАН **41**(5), 37 (2014).

Поступила в редакцию 19 декабря 2014 г.