

02;07;12

Особенности реакции фотоэлектронных умножителей на фоновое космическое излучение

© М.Э. Дробышевский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: miked@mail.ru

(Поступило в Редакцию 29 июня 2009 г.)

Экспериментально исследованы свойства фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). В качестве источника сигналов, регистрируемых непосредственно ФЭУ-167 без сцинтиллятора, был использован поток космических лучей. Изучалась зависимость числа зарегистрированных событий от размеров лицевого окна ФЭУ. Для этого были специально изготовлены ФЭУ-167М, в них, при сохранении всех прочих параметров, был существенно уменьшен только размер прозрачного лицевого окна. Было обнаружено, что количество регистрируемых сигналов приблизительно пропорционально площади последнего. Отсюда следует, что сигнал от фоновых космических лучей возникает в стекле лицевого экрана ФЭУ. Следует учитывать выявленные свойства при работе с ФЭУ различных типов.

Известно [1] (см. § 5.3.8), что часть фоновых сигналов в фотоэлектронных умножителях (ФЭУ) обусловлена радиоактивными примесями урана, тория и их дочерних продуктов, или ^{40}K , содержащихся в материалах (стеклах) ФЭУ, а также космическими лучами (КЛ) и наводимой ими радиоактивностью. Именно поэтому в ФЭУ часто применяют боросиликатные стекла (например, марки С49-1), не содержащие калия. С другой стороны, несмотря на относительно низкую эффективность (световой выход не превышает $\sim 10\%$ эффективности NaI(Tl)) [1] (см. § 13.4)), стеклянные сцинтилляторы используются для специальных целей, например, для регистрации нейтронов Li- и B-содержащими стеклами и т.п. [2].

В процессе детектирования электрически заряженных планковских объектов (даемонов — Dark Electric Matter Objects), которые ряд авторов [3,4] рассматривают в качестве кандидатов на роль скрытой массы Вселенной, был выявлен ряд ранее неизвестных свойств ФЭУ-167 (рабочий диаметр фотокатода по паспорту 100 мм, в действительности — до 110–120 мм). В первых экспериментах [5] регистрация частиц велась по временному сдвигу сцинтилляционных сигналов, образующихся, как предполагалось, в двух тонких ($\sim 10\ \mu\text{m}$) ZnS(Ag) экранах, нанесенных на нижние поверхности прозрачных полистироловых пластин толщиной 4 мм и размером $50 \times 50\ \text{cm}$. Пластины помещались посередине жестяных кубических коробов со стороной 50 см, располагались друг под другом горизонтально на расстоянии 7 см и были разделены светонепроницаемой черной бумагой. Каждая пластина со своей стороны с расстояния 22 см наблюдалась ФЭУ-167, сигналы с которых подавались на двухлучевой цифровой осциллограф типа С9-8, управляемый ПК. При наличии сигналов с обоих ФЭУ в пределах $\pm 100\ \mu\text{s}$ (запуск осциллографа осуществлялся сигналом амплитудой $> 2.4\text{--}2.6\ \text{mV}$ с верхнего ФЭУ) событие запоминалось ПК для последующего анализа.

Такую систему будем в дальнейшем называть модулем. Использовалось до восьми подобных модулей (рис. 1).

Зарегистрированные события по временному сдвигу между сигналами с верхнего и нижнего ФЭУ можно разделить на два типа. К первому типу относятся редкие (3–5%) события, содержащие сигналы с нижнего ФЭУ, сдвинутые на десятки микросекунд в ту или иную сторону относительно длинного ($\sim 2.5\ \mu\text{s}$ до максимума) запускающего импульса (рис. 2), типичного для сцинтилляций в ZnS(Ag) от (нерелятивистских) α -частиц.

Такие события свидетельствуют о статистически значимом ($> 99.99\%$) наличии потоков низкоскоростных ($\sim 30\text{--}50\ \text{km/s}$) высокопроникающих объектов (см. подробней в [6]). Также наблюдаются события с короткими ($\sim 1.5\ \mu\text{s}$ до максимума) сигналами одинаковой формы с обоих ФЭУ без временного сдвига ($\text{с } \Delta t \leq 0.2\ \mu\text{s}$) относительно друг друга (рис. 3). Иногда они фиксируются одновременно в нескольких модулях. Подобные события характерны для атомосферных ливней КЛ.

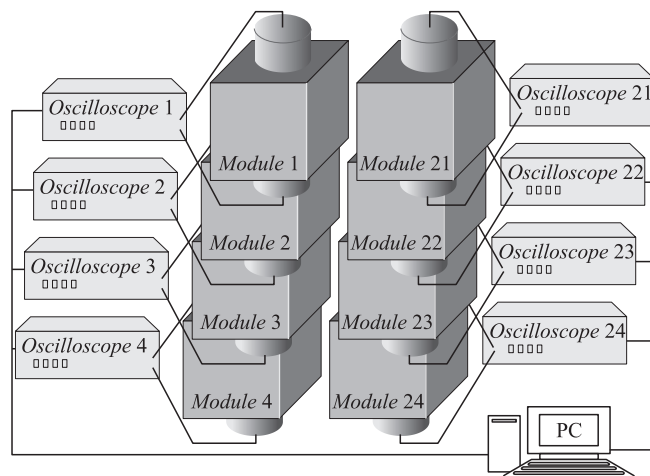


Рис. 1. Схема установки, состоящей из восьми модулей.

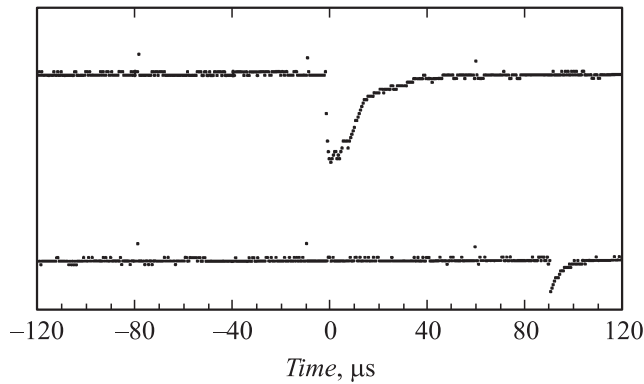


Рис. 2. Пример события со вторым сигналом, сдвинутым на $\Delta t = +92 \mu s$ относительно запускающего импульса. На верхнем и нижнем лучах сигналы с верхнего и нижнего ФЭУ соответственно. Верхний (удлиненный) сигнал в данном случае имеет признаки сцинтиляционного сигнала, вызванного в $ZnS(Ag)$ нерелятивистской частицей типа α -частицы.

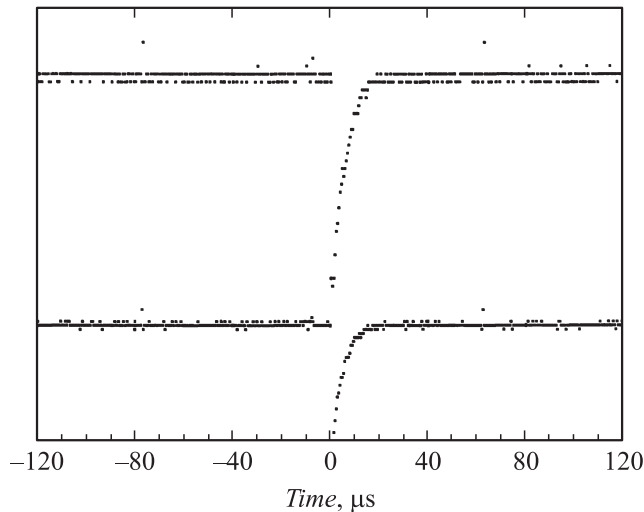


Рис. 3. Пример несдвинутых по времени ($|\Delta t| \approx 0 \mu s$) сигналов от космических лучей. На верхнем и нижнем лучах сигналы с верхнего и нижнего ФЭУ соответственно.

При проведении первых экспериментов предполагалось, что описанные несдвинутые короткие сигналы обусловлены сцинтиляциями, вызванными частицами КЛ в $ZnS(Ag)$ ($\sim 10 \mu m$ слой $ZnS(Ag)$ должен, хотя и слабо — с выделением в нем всего $\leq 10 keV$ энергии — чувствовать прохождение релятивистских частиц и γ -излучения [5]). Последующие эксперименты показали однако, что ФЭУ-167 реагируют на КЛ [7,8] практически независимо от их светоизоляции. Поэтому было высказано предположение, что КЛ возбуждают сигналы в ФЭУ, выбивая электроны в диодной сборке и/или из внутреннего алюминиевого покрытия катодной части их стеклянной колбы. Толщина Al-слоя у нескольких экземпляров ФЭУ-167-1 оказалась почти на порядок больше стандартной толщины покрытия (см. ниже).

Для проверки этих предположений по нашему заказу ЗАО „Экран — оптические системы“ (г. Новосибирск) изготовил три модифицированных ФЭУ-167М (рис. 4). Они отличались от стандартных ФЭУ-167 тем, что практически вся внутренняя поверхность катодной части колбы была покрыта довольно толстым ($0.5-1 \mu m$) слоем Al (в стандартных ФЭУ-167 и ФЭУ-167-1 — лицевые экраны последних изготовлены из стекла марки С52, содержащего $\sim 4\%$ K_2O , — толщина Al-покрытия $\sim 0.1 \mu m$). Только в центре стеклянного экрана ФЭУ-167М Al-покрытие имело окно диаметром 13 mm, так что его площадь составляла 1.5–2.0% площади фотокатода стандартного ФЭУ-167 (рис. 4). Поэтому калибровка ФЭУ-167М проводилась путем сопоставления его светочувствительности с чувствительностью стандартного ФЭУ-167, экран которого был закрыт черной бумагой с отверстием диаметром 13 mm.

В новом эксперименте нами по-прежнему использовалась многомодульная система, но была изменена струк-



Рис. 4. ФЭУ-167-1 и ФЭУ-167М.

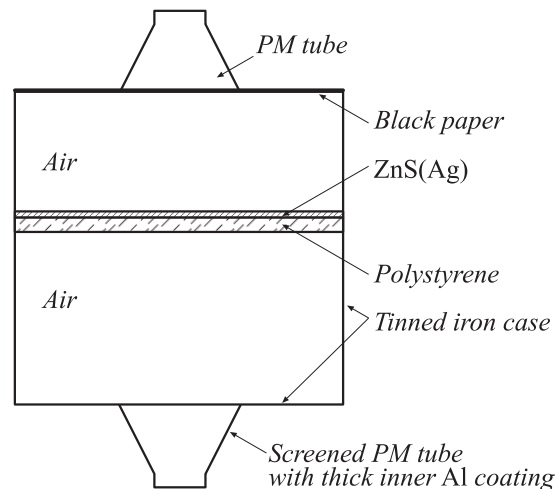


Рис. 5. Схематичное устройство модуля, использовавшегося в эксперименте для выявления механизма регистрации частиц КЛ непосредственно самим ФЭУ без сцинтиллятора.

Количество двойных событий (n_i) без временного сдвига с верхнего и нижнего ФЭУ, возбуждаемых прохождением частиц КЛ через модули

№ модуля	n_i для $ \Delta t \leq 0.4 \mu\text{s}$ и $U_2 \geq 0.6 \text{ mV}$	n_i для $ \Delta t \leq 0.2 \mu\text{s}$ и $U_2 \geq 0.6 \text{ mV}$	n_i для $ \Delta t \leq 0.4 \mu\text{s}$ и $U_2 \geq 2 \text{ mV}$
1(ФЭУ-167М)	90	60	7
2(ФЭУ-167М)	25	14	3
3(ФЭУ-167-1)	581	443	188
4(ФЭУ-167М)	16	12	2
23(ФЭУ-167-1)	1288	808	227
$\frac{3}{2} \frac{n_3 + n_{23}}{n_1 + n_2 + n_4}$	21.3	21.8	51.9

Примечание. Уровень запускающего сигнала от верхнего ФЭУ-167 $U_1 \geq 2.6 \text{ mV}$; величина сигнала с нижнего ФЭУ $U_2 \geq 0.6$ или 2.0 mV .

тура модуля. Каждый модуль (рис. 5) состоял из стандартного ФЭУ-167, наблюдавшего сверху отстоящий на 22 см ZnS(Ag) сцинтилляционный ZnS(Ag) экран и запускавшего осциллограф сигналом с амплитудой $\geq 2.6 \text{ mV}$. В качестве нижнего чувствительного элемента в трех модулях (№ 1, 2 и 4), функционировавших с 8 по 22 марта 2009 г., были использованы ФЭУ-167М. Одновременно для сравнения работало 2 модуля (№ 3 и 23) с нижними ФЭУ-167-1, с теми их экземплярами, которые, как было выявлено ранее [7,8], имеют несколько повышенную (до $\sim 0.5-1.0 \mu\text{m}$) толщину внутреннего Al-покрытия. Поскольку ФЭУ-167 чувствительны к КЛ независимо от их светоизоляции [7,8], все нижние ФЭУ были закрыты пленкой лавсана ($6 \mu\text{m}$) с непрозрачным для света $0.05 \mu\text{m}$ алюминиевым покрытием. Модули промывались поступающими снизу парами жидкого азота для удаления радона.

В качестве стабильного источника радиации использовались КЛ, т.е. рассматривались двойные события с нулевым временным сдвигом (реально с $|\Delta t| \leq 0.2$ или $0.4 \mu\text{s}$) между сигналами с верхних и нижних ФЭУ (рис. 3). Результаты измерений приведены в таблице. Последняя строка таблицы содержит отношение числа сигналов, приходящихся в среднем на каждый модуль с нижними стандартными ФЭУ-167-1, к таковому на модуль с ФЭУ-167М. Количество двойных событий, зарегистрированных модулями с ФЭУ-167-1, в десятки раз превосходит число событий в модулях с ФЭУ-167М, причем различие возрастает с увеличением амплитуды сигнала, поступающего с нижнего ФЭУ. Если предположить, что „работало“ только „окно“ диаметром 13 мм в ФЭУ-167М, то отношение должно составлять $\sim (110/13)^2 \approx 72$. В действительности в отверстие в Al-слое может попадать часть света из соседних областей стеклянного экрана (учитывая световые свойства лицевого экрана толщиной 5 мм вследствие отражения света от его поверхностей). Причем в отверстие будет попадать тем меньше света, чем дальше область сцинтилляции отстоит от отверстия. Это объясняет показанную в таблице зависи-

мость числа регистрируемых сигналов от их амплитуды.

Сопоставление данных, полученных с модулей (№ 1, 2 и 4) с нижними модифицированными ФЭУ-167М и с модулей (№ 3 и 23) с нижними стандартными ФЭУ-167-1, позволяет отвергнуть предположение о том, что сигналы, возбуждаемые проникающими частицами КЛ в ФЭУ-167, являются следствием их взаимодействия с диодной сборкой этих ФЭУ или с внутренним Al-покрытием (толщиной до $\sim 0.5-1 \mu\text{m}$) фотокатодной секции стеклянной колбы ФЭУ. На роль источника сигналов не подходит и тонкий ($\sim 0.01 \mu\text{m}$) фоточувствительный слой Sb-Cs-K-Na фотокатода (этот слой нанесен изнутри не только на прозрачный лицевой стеклянный экран ФЭУ, но и на все внутреннее Al-покрытие фотокатодной секции). Из полученных данных можно сделать вывод, что частицы КЛ возбуждают световое излучение непосредственно в стекле лицевого экрана ФЭУ. Это может быть как черенковское излучение, так и генерация сцинтилляций в самом экране.

В результате проведенных исследований установлена зависимость числа зарегистрированных космических лучей от размера прозрачного лицевого окна ФЭУ-167. Для эксперимента были специально изготовлены ФЭУ-167М с уменьшенным до 13 мм в диаметре окном в экране, при сохранении всех прочих основных параметров прибора неизменными. Изменение регистрируемого потока космических лучей, пропорциональное площади прозрачного лицевого диска, позволяет сделать важный вывод о том, что световая вспышка от частиц КЛ возникает в стекле лицевого экрана ФЭУ. Выявленные свойства ФЭУ-167 необходимо учитывать при выполнении любых прецизионных измерений с использованием также других типов ФЭУ и иных светочувствительных датчиков и приборов, а также при работах со схемами кратных совпадений.

Выражаю благодарность С.В. Бобашеву и Э.М. Дробышевскому за ряд ценных советов и помощь в написании этой работы.

Список литературы

- [1] *Birks J.B.* The Theory and Practice of Scintillation Counting. Pergamon Press, 1964. P. 662.
- [2] *Nail J.S., Boatner L.A., Wisniewski D., Ramey J.O.* Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics IX / Ed. by R.B. James, A. Burger, L.A. Franks. Proc. SPIE. 2007. Vol. 6706. P. 670-618.
- [3] *Марков М.А.* // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. № 3. С. 878–890.
- [4] *Drobyshevski E.M., Drobyshevski M.E.* Dark Matter Astroparticle and Particle Physics (DARK-2007) / Ed. by H.V. Klapdor-Kleingrothaus and G.F. Lewis. World Scientific. 2008. P. 549–561 (arXiv:0711.4779).
- [5] *Drobyshevski E.M.* // Astron. Astrophys. Trans. 2002. Vol. 21. N 1–3. P. 65–73.
- [6] *Drobyshevski E.M., Drobyshevski M.E.* // Astron. Astrophys. Trans. 2007. Vol. 26. N 4. P. 289–299 (arXiv:0704.0982).
- [7] *Drobyshevski E.M., Drobyshevski M.E.* // Astron. Astrophys. Trans. 2006. Vol. 25. N 1. P. 57–73 (astro-ph/0607046).
- [8] *Drobyshevski E.M.* // Astrophys. Trans. 2006. Vol. 25. N 1. P. 43–55 (astro-ph/0605314).