

УДК 539.122.17:548

## МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЛИВНЯХ, ОБРАЗОВАННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ В ОРИЕНТИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ ВОЛЬФРАМА

В. А. Басков<sup>1</sup>, В. В. Ким<sup>1</sup>, Б. И. Лучков<sup>2</sup>, В. Ю. Тугаенко<sup>2</sup>, В. А. Хабло<sup>1</sup>

*Показано увеличение в  $\sim 2$  раза средней множественности заряженных частиц в электромагнитных ливнях, инициированных  $\gamma$ -квантами с энергиями 9–26 ГэВ в ориентированном вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристалле вольфрама толщиной 1 мм ( $T = 77$  К) по сравнению с разориентированным.*

**Ключевые слова:** электромагнитные ливни, заряженные частицы, ориентированный кристалл.

Электромагнитные ливни от  $\gamma$ -квантов и электронов, развивающиеся в ориентированных кристаллах, отличаются от ливней в разориентированных кристаллах и аморфном веществе. Отличие обусловлено разным числом фотонов  $N_\gamma$  и заряженных частиц  $N_e$  с соответствующими величинами энергий на заданной глубине развития ливня. Теория каскадных ливней в кристаллах развита давно [1, 2], однако экспериментальное определение  $N_\gamma$  и  $N_e$  до сих пор является актуальной задачей. Особенно важно определение множественности в ливнях, выходящих из ориентированных кристаллов и инициированных  $\gamma$ -квантами, поскольку существует возможность практического использования особенностей развития ливней в ориентированных кристаллах при создании новых типов  $\gamma$ -детекторов в  $\gamma$ -астрономии и на ускорителях при создании кристаллических мишеней для получения высокоинтенсивных пучков электронов и позитронов [3].

Настоящая работа представляет экспериментальные результаты измерения средней множественности заряженных частиц  $N_e$ , выходящих из кристалла вольфрама, вызванных  $\gamma$ -квантами с энергией 9–26 ГэВ [4, 5]. Работа была выполнена на установке “Каскад” на электронном канале ускорителя ИФВЭ. Использовался кристалл вольфрама толщиной 1 мм, охлажденный жидким азотом до температуры  $T = 77$  К. Ориента-

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru.

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115549, Москва.

ция кристалла осуществлялась вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ . Мозаичность кристалла составляла 1 мрад [6].

Метод определения множественности заряженных частиц в ливне от  $\gamma$ -квантов заключался в том, что за кристаллом помещался пластиковый сцинтилляционный счетчик толщиной 5 мм, сигнал с которого подавался на амплитудный анализатор. По величине сигнала делалось заключение о величине средней ионизации и о среднем числе заряженных частиц в ливне, выходящих из кристалла. Число фотонов электромагнитного ливня, давших конверсию  $e^+e^-$ -пар на толщине счетчика, составляло  $\sim 1\%$ .

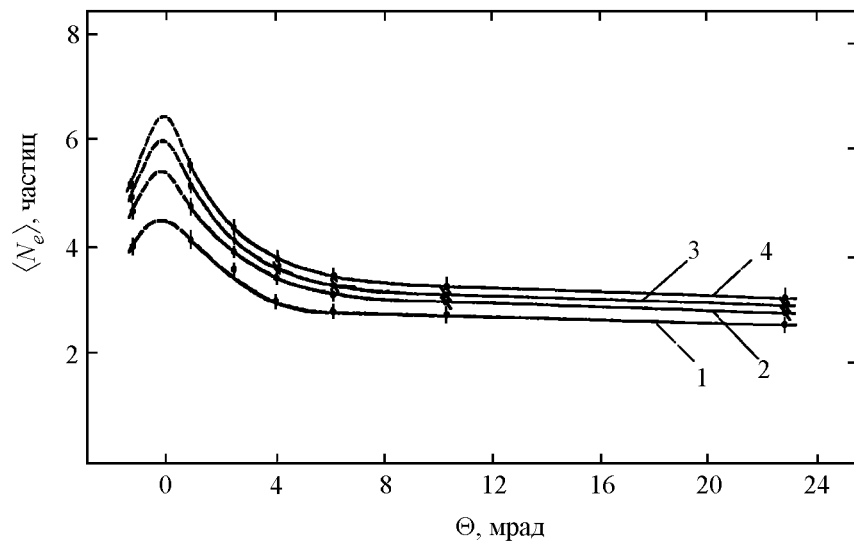


Рис. 1: Ориентационные зависимости средней множественности заряженных частиц  $N_e$  в ливне от  $\gamma$ -квантов в кристалле вольфрама толщиной 1 мм ( $\langle 111 \rangle$ ,  $T = 77$  K): 1 –  $E_\gamma = 10.0$  ГэВ; 2 –  $E_\gamma = 15.1$  ГэВ; 3 –  $E_\gamma = 20.3$  ГэВ; 4 –  $E_\gamma = 26.0$  ГэВ.

На рис. 1 показаны ориентационные зависимости средней множественности заряженных частиц в ливне ( $N_e$ ) для четырех энергий  $\gamma$ -квантов. Из рисунка видно, что при всех указанных энергиях  $\gamma$ -квантов по мере уменьшения угла ориентации кристалла  $\Theta$  ( $\Theta$  – угол между импульсом  $\gamma$ -квантов и осью  $\langle 111 \rangle$ ) средняя множественность заряженных частиц в ливне растет. При угле  $\Theta = 1.2$  мрад множественность заряженных частиц в ливне по сравнению с разориентированным кристаллом ( $\Theta = 22.8$  мрад) увеличивается в  $\approx 1.7$  раза для всех указанных энергий  $\gamma$ -квантов. В точке  $\Theta = 0$  измерения проведены не были. Однако, если считать, что зависимость  $N_e$  симметрична относительно точки  $\Theta = 0$  и, не изменяя наклона кривой, экстраполировать зависи-

мость  $N_e$  в диапазоне  $\Delta\Theta = 1-3$  мрад в точку  $\Theta = 0$ , можно предположить, что средняя множественность достигает максимума при  $\Theta = 0$ .

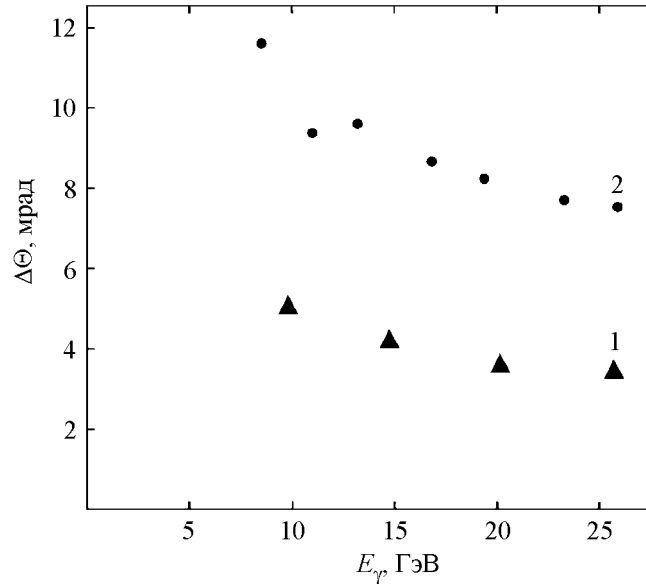


Рис. 2: Изменение ширины ориентационной зависимости  $\Delta\Theta$  от энергии  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma$ , падающих на кристалл вольфрама толщиной 1 мм ( $\langle 111 \rangle$ ,  $T = 77$  К); 1 –  $\Delta\Theta$  средней множественности заряженных частиц  $N_e$ ; 2 –  $\Delta\Theta$  среднего энерговыделения ливня  $\langle \Delta E \rangle$  в свинцово-сцинтилляционном счетчике.

Изменение ширины ориентационной зависимости  $N_e$  в ливне, определяемой как ширина ориентационной зависимости на половине высоты, от энергии  $\gamma$ -квантов (при указанной экстраполяции) показана на рис. 2 (кривая 1). Она меньше ширины ориентационной зависимости энерговыделения ливня ( $\langle \Delta E \rangle$ ) в свинцово-сцинтилляционном счетчике полного поглощения типа “сэндвич” толщиной в 1.2 радиационной длины, стоящем далее за сцинтилляционным счетчиком (кривая 2) [7]. Например, при энергии  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma = 20$  ГэВ ширина ориентационной зависимости  $N_e$  составляет  $\approx 3.5$  мрад, а ширина ориентационной зависимости энерговыделения  $\langle \Delta E \rangle$  составляет  $\approx 8.5$  мрад. Уширение можно объяснить вкладом в ширину ориентационной зависимости  $\langle \Delta E \rangle$  ширины ориентационной зависимости среднего числа фотонов в ливне  $\langle N_\gamma \rangle$ , которая практически равна ширине ориентационной зависимости излучения  $e^+e^-$ -пар [8]. Рис. 2 также показывает, что величины ширин ориентационных зависимостей  $\Delta\Theta$  изменяются с энергией  $\gamma$ -квантов как  $\Delta\Theta = k \cdot E_\gamma^{-1/2}$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $E_\gamma$  – энергия  $\gamma$ -квантов.

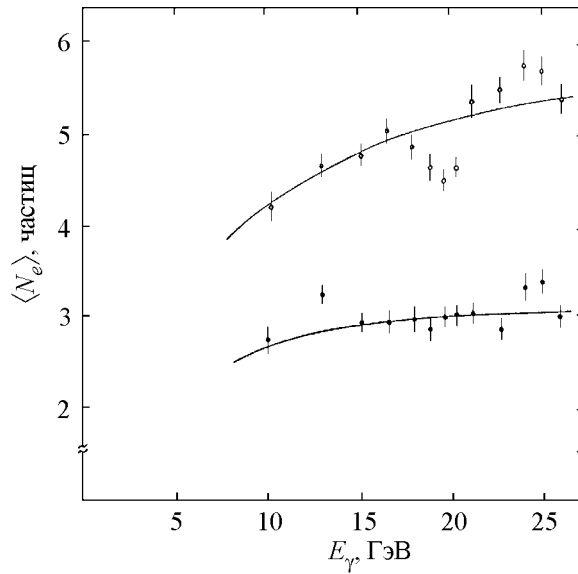


Рис. 3: Зависимость средней множественности заряженных частиц в ливне  $N_e$  от энергии  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma$  и угла ориентации  $\Theta$  (кристалл вольфрама толщиной 1 мм,  $\langle 111 \rangle$ ,  $T = 77$  К):  $\circ$  –  $\Theta = 1.2$  мрад;  $\bullet$  – 22.8 мрад.

Зависимость средней множественности заряженных частиц в ливне от энергии  $\gamma$ -квантов для разориентированного кристалла ( $\Theta = 22.8$  мрад) и угла, близкого к углу ориентации кристалла ( $\Theta = 1.2$  мрад), показана на рис. 3. Из рисунка видно, что при толщине кристалла 1 мм средняя множественность заряженных частиц, начиная с  $E_\gamma \approx 15$  ГэВ, практически не меняется и составляет  $\sim 3$  и  $\sim 5$  для разориентированного и ориентированного кристалла соответственно. Результаты хорошо согласуются с данными работ [9].

Таким образом, экспериментальные результаты показывают увеличение выхода среднего числа заряженных частиц из ориентированного кристалла по сравнению с разориентированным при развитии в нем ливня от  $\gamma$ -квантов.

Авторы выражают благодарность Е. И. Тамму и Е. И. Малиновскому за поддержку работы; В. И. Сергиенко за практическое руководство и организацию работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Н. Байер, В. М. Катков, В. М. Страховенко, *Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах* (Изд-во “Наука” СО АН СССР, г. Новосибирск, 1989).

- [2] А. И. Ахиезер, Н. Ф. Шутьга, *ЖЭТФ* **85**, 94 (1983).
- [3] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., *ПТЭ* **6**, 10 (1996).
- [4] В. А. Басков, В. Б. Ганенко, В. А. Гущин и др., в: *“Материалы Всесоюзного совещания, “Проблемы применения эффектов каналирования частиц кристаллами в физике высоких энергий”* (Протвино, ИФРЭ, 1991), стр. 103.
- [5] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Препринт ФИАН № 9 (Москва, ФИАН, 2005).
- [6] В. А. Басков, В. В. Ким, И. В. Коноров и др., *ПТЭ* **5**, 58 (1990).
- [7] В. А. Басков, В. Б. Ганенко, Б. Б. Говорков и др., *Письма в ЖЭТФ* **52**, 1082 (1990).
- [8] V. A. Baskov, V. V. Ganenko, V. V. Govorkov, et al., Preprint FIAN **143**, (Moscow, LPI, 1988).
- [9] R. Moore, M. A. Parker, A. Baurichter, et al., *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res.* **119B**, 149 (1996).

Поступила в редакцию 29 апреля 2010 г.