

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ**



*имени  
П.Н.Лебедева*

**Ф И А Н**

ПРЕПРИНТ

9

В.А.БАСКОВ, В.В.КИМ, Б.И.ЛУЧКОВ,  
В.Ю.ТУГАЕНКО, В.А.ХАБЛО

**МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ЗАРЯЖЕННЫХ  
ЧАСТИЦ В ЛИВНЯХ ОТ ГАММА-КВАНТОВ,  
РАЗВИВАЮЩИХСЯ В ОРИЕНТИРОВАННОМ  
КРИСТАЛЛЕ ВОЛЬФРАМА**

МОСКВА 2005

**МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
В ЛИВНЯХ ОТ  $\gamma$ -КВАНТОВ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ  
В ОРИЕНТИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ  
ВОЛЬФРАМА**

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

**А Н Н О Т А Ц И Я**

Показано увеличение в  $\sim 2$  раза средней множественности заряженных частиц в электромагнитных ливнях, инициированных  $\gamma$ -квантами с энергиями 9 - 26 ГэВ в ориентированном по оси  $\langle 111 \rangle$  кристалле вольфрама по сравнению с разориентированным. Толщиной кристалла составляла 1 мм,  $T = 77^\circ\text{K}$ .

**MULTIPLICITY OF CHARGED PARTICLES IN SHOWERS INDUCED BY  
PHOTONS IN AN ORIENTED CRYSTAL OF TUNGSTEN**

Baskov V.A., Kim V.V., Khablo V.A., Luchkov<sup>1</sup> B.I., Tugaenko<sup>1</sup> V. Yu.

**A B S T R A C T**

The growth of average multiplicity  $\langle N_e \rangle$  of charge particles in electromagnetic showers induced by photons with energies of 9 - 26 GeV in an oriented tungsten crystal comparing to a disoriented one is shown. The thickness, the temperature and the oriented axis of the crystal are 1 mm,  $77^\circ\text{K}$  and  $\langle 111 \rangle$  accordingly. Also  $\langle N_e \rangle$  versus orientation and energy is shown.

<sup>1</sup> - Инженерно- физический институт, г. Москва.

\* - [baskov@x4u.lebedev.ru](mailto:baskov@x4u.lebedev.ru)

Электромагнитные ливни от  $\gamma$ -квантов и электронов, развивающихся 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 довольно 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, инициированных  $\gamma$ -квантами, поскольку существует возможность практического использования эффектов ориентации кристаллов в создании новых типов детекторов для  $\gamma$ -астрономии и на ускорителях в создании кристаллических мишеней для получения высокоинтенсивных  $e^+e^-$  пучков [3,4].

Настоящая работа представляет экспериментальные результаты измерения средней множественности заряженных частиц  $N_e$ , выходящих из кристалла вольфрама, вызванных  $\gamma$ -квантами с энергией 9 - 26 ГэВ. Работа была выполнена на установке “Каскад” на электронном канале ускорителя ИФВЭ. Использовался кристалл вольфрама толщиной 1 мм, охлажденный жидким азотом до температуры  $T = 77^\circ\text{K}$ . Ориентация кристалла осуществлялась вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ . Мозаичность кристалла составляла 1 мрад.

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 анализ. 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  $\sim 1\%$ .

На рис. 1 показаны ориентационные зависимости средней множественности заряженных частиц в ливне  $\langle N_e \rangle$  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. Уже при угле  $\Theta = 0,9$  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. К сожалению, в точке  $\Theta = 0$  измерения проведены не были. Однако, если предположить что каждая зависимость  $\langle N_e \rangle$  на рисунке симметрична относительно точки  $\Theta = 0$  и достигает в ней своего максимума, то не изменяя наклона кривых в диапазоне  $\Delta\Theta = 1 - 3$  мрад можно экстраполировать каждую зависимость  $\langle N_e \rangle$  в точку 0 и получить примерные значения максимумов  $\langle N_e \rangle$  для указанных энергий.

Изменение ширины ориентационной зависимости ( $\Delta\Theta$ )  $\langle N_e \rangle$  в ливне, определяемой как ширина ориентационной зависимости на половине высоты, от энергии  $\gamma$ -квантов (при указанной экстраполяции) показана на рис. 2 (точки  $\blacktriangle$ ). Она уже ширины ориентационной зависимости энерговыделения ливня  $\langle \Delta E_1^W \rangle$  в свинцово-сцинтилляционном счетчике полного поглощения типа “сэндвич” толщиной 1,2 радиационной длины, стоящим далее за сцинтилляционным счетчиком (точки  $\bullet$ ), но больше ширины ориентационной зависимости  $\langle E_1^{Si} \rangle$  в случае кристалла кремния толщиной 20 мм и ориентированного вдоль оси  $\langle 110 \rangle$  при  $T = 293^\circ\text{K}$  (точки  $\circ$ ). В этом случае за кристаллом кремния находился черенковский счетчик толщиной в одну радиационную длину [5]. Например, при энергии  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma = 20$  ГэВ ширина ориентационной зависимости  $\langle N_e \rangle$

составляет  $\approx 3,5$  мрад, ширина ориентационной зависимости энерговыделения  $\langle \Delta E_1^W \rangle$  для кристалла вольфрама составляет  $\approx 8,1$  мрад, а для кристалла кремния  $\langle \Delta E_1^{Si} \rangle$  составляет  $\approx 2,3$  мрад. Уширение можно объяснить вкладом в ширину ориентационной зависимости  $\langle \Delta E_1^W \rangle$  ширины ориентационной зависимости среднего числа фотонов в ливне  $\langle N_\gamma \rangle$ , которая практически равна ширине ориентационной зависимости излучения  $e^+e^-$  пар [6]. Кроме того, ширина ориентационной зависимости  $\langle \Delta E_1^W \rangle$  при  $E_\gamma = 25$  ГэВ совпадает с шириной ориентационной зависимости электронов с энергией  $E_e = 28$  ГэВ, выходящих из того же кристалла вольфрама ( $\Delta\Theta \approx 8$  мрад) [7].

Рис. 2 также показывает, что ширины ориентационных зависимостей с увеличением энергии  $\gamma$ -квантов уменьшаются как  $\Delta\Theta \sim \Theta_c \sim E_\gamma^{-1/2}$  ( $\Theta_c$  - угол Линхарда,  $E_\gamma$  - энергия  $\gamma$ -квантов). Например, при  $\langle E_\gamma \rangle = 20$  ГэВ отношение ширины ориентационной зависимости энерговыделения в кристалле вольфрама к ширине ориентационной зависимости в кристалле кремния составляет  $\Delta\Theta_{\Delta E}^W / \Delta\Theta_{\Delta E}^{Si} \sim 3$ , что с учетом мозаичности данного кристалла вольфрама соответствует отношению характерных углов каналирования  $\Theta_c$ .

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 ( $\Theta = 0,9$  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.

Увеличение средней множественности заряженных частиц  $N_e$  в ливне от  $\gamma$ -кванта происходит в следствии когерентного процесса рождения  $e^+e^-$  пары и дальнейшего когерентного процесса излучения  $e^+e^-$  пары при ее движении в поле

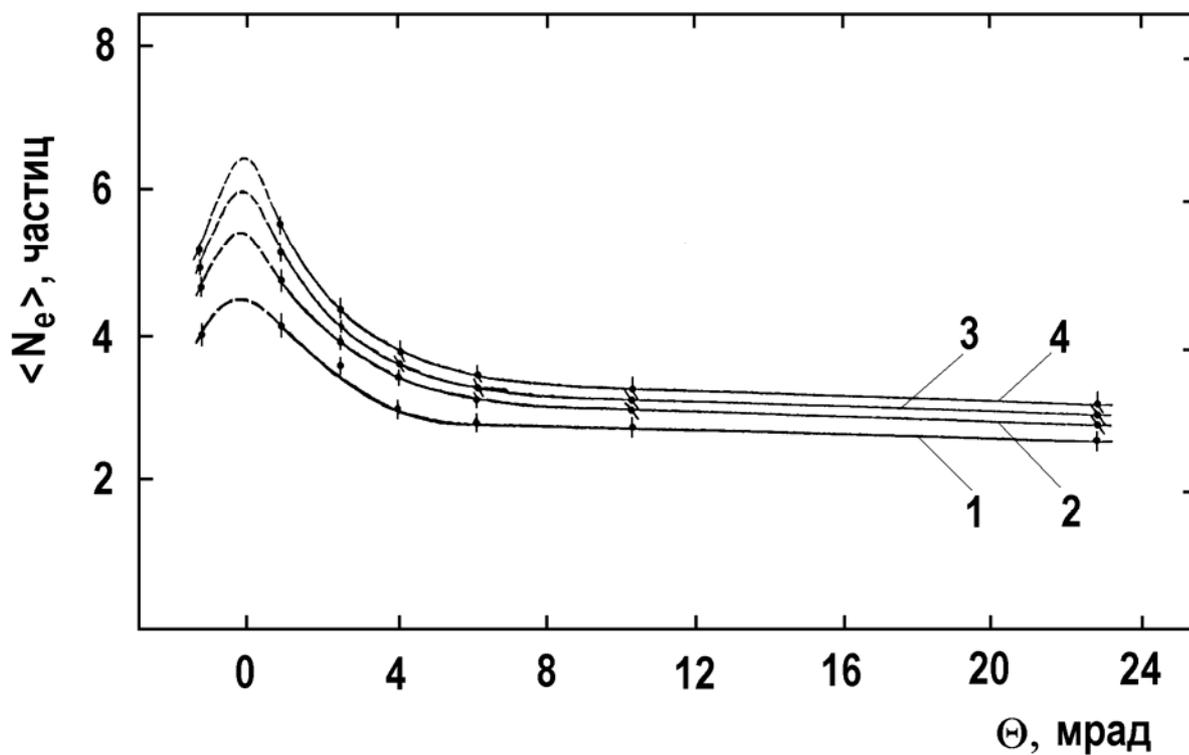
оси кристалла с последующим интенсивным излучением и рождением пар уже за счет механизма Бете-Гайтлера [1,2].

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.

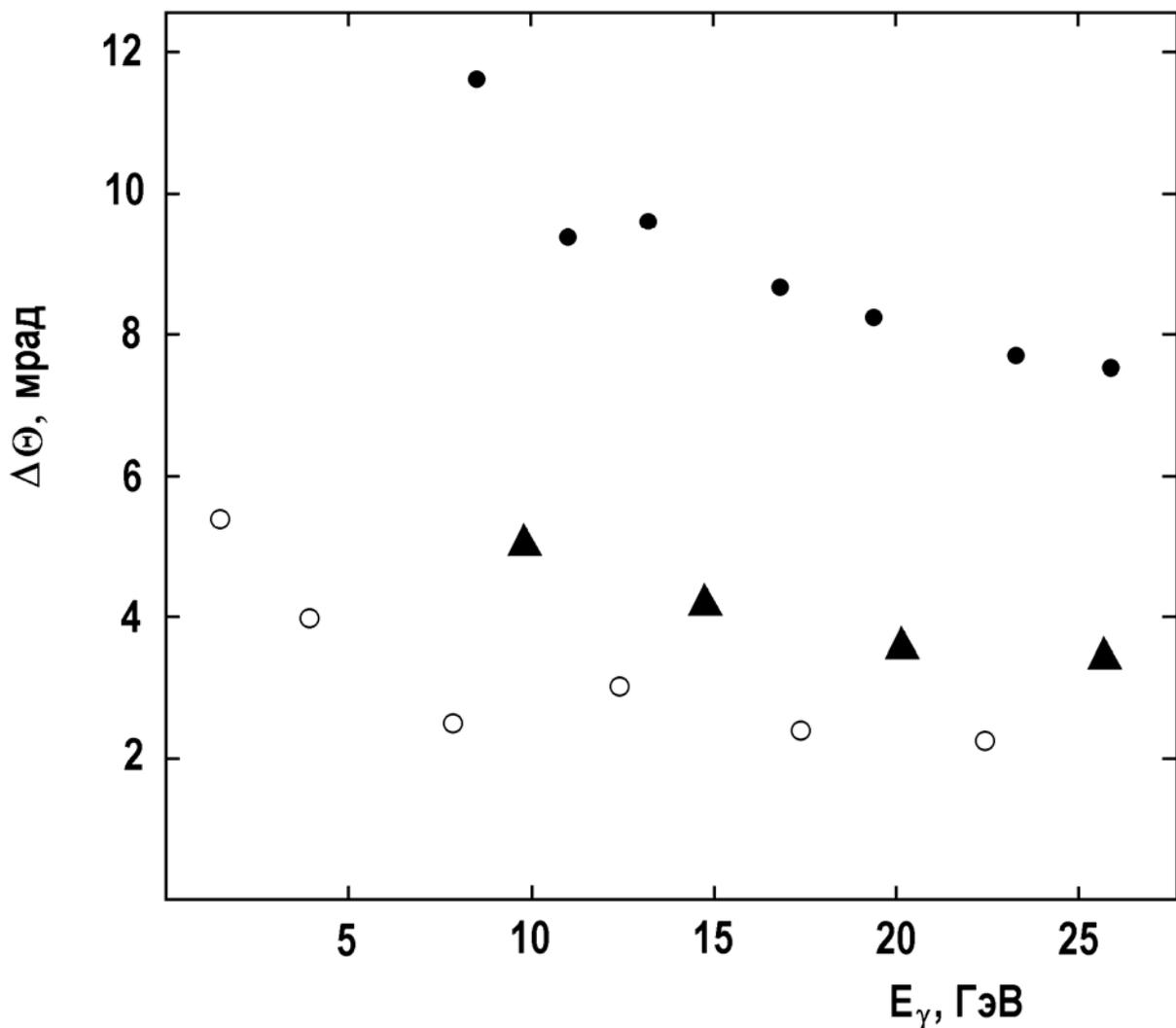
## ЛИТЕРАТУРА

1. Байер В.Н., Катков В.М., Страховенко В.М. Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах, Издательство “Наука” СО АН СССР, г. Новосибирск, 1989.
2. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф. ЖЭТФ, **85** 94 (1983).
3. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V., Sergienko B.I., Luchkov B.I., Tugaenko V.Yu. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. (B), **122** (1997) 194.
4. Artru X., Baier V.N., Baier T.V. et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. (B), **119** (1996) 246.
5. Басков В.А., Ганенко В.Б., Гущин В.А. и др., Письма в ЖЭТФ **50**, 395 (1989).
6. Baskov V.A., Ganenko V.B., Govorkov B.B. et al. Preprint FIAN **143**, Moscow, 1988.
7. Байер В.Н., Басков В.А., Ганенко В.Б. и др., ЖЭТФ **101** 1351 (1992).



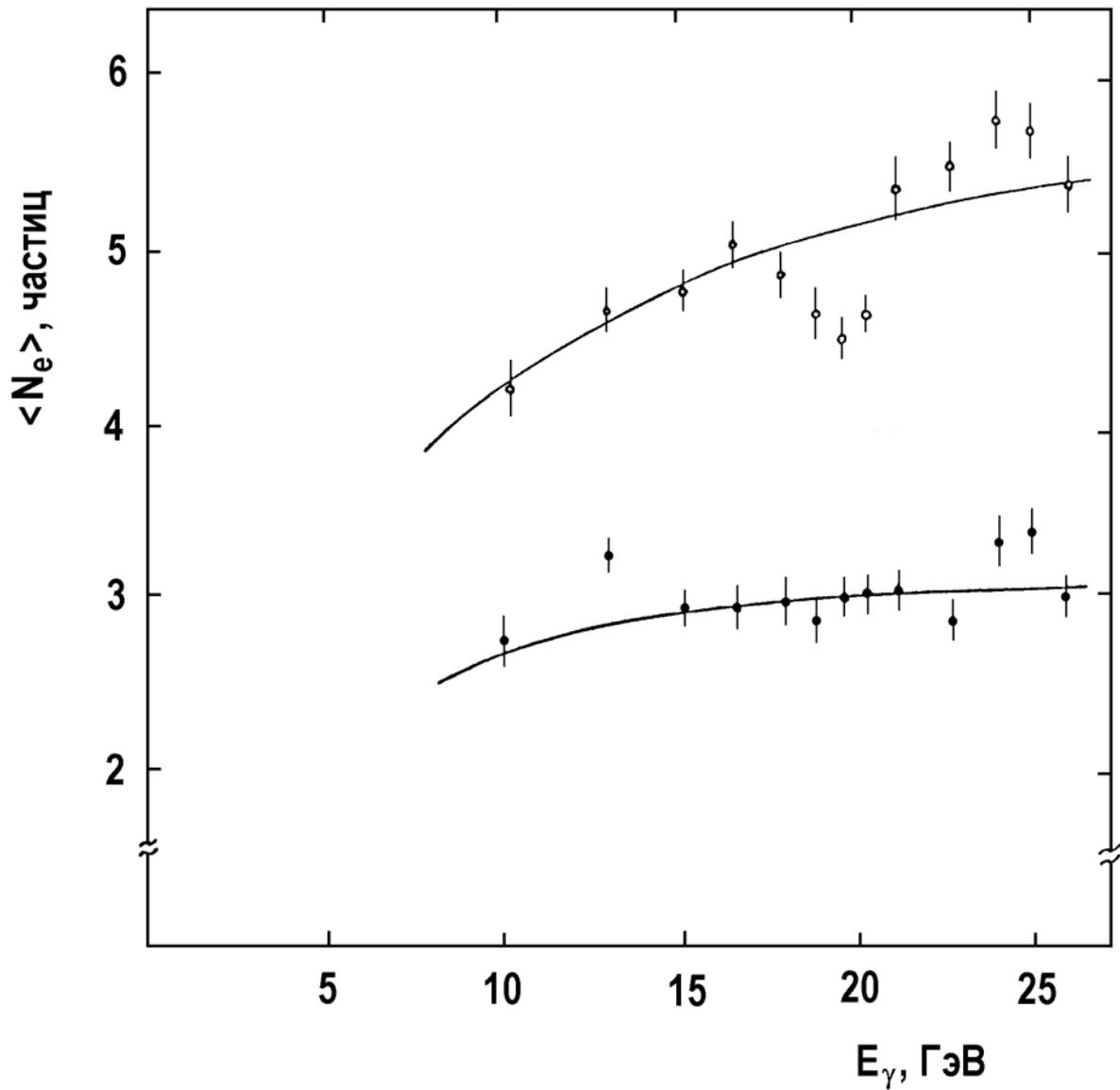
**Рис. 1**

1. Ориентационные зависимости средней множественности заряженных частиц  $\langle N_e \rangle$  в ливне от  $\gamma$ -квантов ( $W$ , толщина 1,0 мм,  $\langle 111 \rangle$ ,  $T = 77^\circ\text{K}$ ): 1 -  $\langle E_\gamma \rangle = 10,0$  ГэВ; 2 -  $\langle E_\gamma \rangle = 15,1$  ГэВ; 3 -  $\langle E_\gamma \rangle = 20,3$  ГэВ; 4 -  $\langle E_\gamma \rangle = 26,0$  ГэВ.



**Рис. 2**

2. Изменение ширины на половине высоты ориентационной зависимости  $\Delta\Theta$  от энергии  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma$ :  $\bullet$  - среднее энерговыделение ливня в свинцово-сцинтилляционном счетчике  $\langle\Delta E_1\rangle$  (W, толщина 1,0 мм,  $\langle 111 \rangle$ ,  $T = 77^\circ\text{K}$ );  $\blacktriangle$  - средняя множественность заряженных частиц  $N_e$  (W, толщина 1,0 мм,  $\langle 111 \rangle$ ,  $T = 77^\circ\text{K}$ );  $\circ$  - среднее энерговыделение ливня в черенковском счетчике  $\langle\Delta E_1\rangle$  (Si, толщина 20 мм,  $\langle 110 \rangle$ ,  $T = 293^\circ\text{K}$ )



**Рис. 3**

3. Зависимость средней множественности заряженных частиц в ливне  $\langle N_e \rangle$  от энергии  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma$  и угла ориентации  $\Theta$  (W, толщина 1,0 мм,  $\langle 111 \rangle$ ,  $T = 77^\circ\text{K}$ ):  $\circ$  -  $\Theta = 0,9$  мрад;  $\bullet$  - 22,8 мрад.