

## ОЦЕНКИ ПОПЕРЕЧНОГО РАЗВИТИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИВНЕЙ

В. А. Басков

*Оценки поперечного развития аномальных электромагнитных ливней от электронов 26 ГэВ в ориентированных вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристаллах вольфрама, вольфрамата и граната показывают отличия контуров развития этих ливней от аналогичных контуров развития стандартных ливней; оценки длин Мольера составили  $\sim 8X_0$ ,  $\sim 7.5X_0$  и  $\sim 6X_0$  или  $\sim 28$  мм,  $\sim 67$  мм и  $\sim 87$  мм, соответственно.*

**Ключевые слова:** электромагнитные ливни, ориентированный кристалл, продольное развитие, поперечное развитие, длина Мольера.

Электромагнитные ливни, развивающиеся вдоль осей и плоскостей ориентированных кристаллов (*аномальные ливни*), существенно отличаются от обычных (*стандартных*) ливней, развивающихся в аморфных веществах [1–3].

При развитии *аномального ливня* в продольном направлении радиационная длина кристалла уменьшается и ливень развивается на меньшем расстоянии в отличие от *стандартного ливня*. Например, при энергии электронов 26 ГэВ длина продольного развития *аномального ливня* в электромагнитном спектрометре с ориентированным вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  ( $\Theta = 0$ ,  $\Theta$  – угол ориентации) кристаллическим вольфрамовым конвертором (толщиной от 2.7 до 8.4 мм при температуре  $T = 293$  К) меньше длины развития *стандартного ливня* на 20–30% [4–6].

Экспериментальных и теоретических исследований поперечного развития *аномальных* электромагнитных ливней в кристаллах до настоящего времени произведено не было и оценки ширины поперечного смещения ливня по известным формулам, например, представленным в [7, 8], выполнить нельзя. Тем не менее, радиус Мольера (длина Мольера), определяющий поперечное развитие  $r_M$  *аномальных ливней*, развивающихся в ориентированных вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристаллах вольфрама ( $W$ ), вольфрамата ( $PbWO_4$ ) и граната ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ) при энергиях электронов в десятки ГэВ и температуре 293 К [6, 9], оценить можно.

Теория развития стандартных ливней в веществе и эксперимент показывают, что число вторичных частиц  $N$  в ливне составляет  $N \sim E_0/\epsilon_k$ , где  $E$  – энергия первичной частицы,  $\epsilon_k$  – критическая энергия. В легком веществе критическая энергия ( $\epsilon_k^l$ ) больше, чем в тяжелом ( $\epsilon_k^T$ ) (например, для алюминия (Al) и свинца (Pb),  $\epsilon_k^{Al}/\epsilon_k^{Pb} \cong 6$ ). Соответственно, при одной и той же энергии первичной частицы в ливне, развивающемся в легком веществе, число вторичных частиц в  $\epsilon_k^l/\epsilon_k^T$  раз меньше, чем в тяжелом. Пространственные распределения вторичных частиц в каскадах для легких и тяжелых веществ также различаются. На рис. 1 показаны контурами эффективные области развития ливней в алюминии (контур 1) и свинце (контур 2) при одной и той же энергии первичной частицы. Для алюминия  $r_M^{Al} \cong 0.5X_0^{Al}$ , для свинца  $r_M^{Pb} \cong 3X_0^{Pb}$  ( $X_0$  – радиационная длина). Поэтому эффективная область развития ливня в свинце в  $\approx 6$  раз шире, чем в алюминии [7].

Отношение площадей сечений контуров на соответствующей глубине развития ливня в свинце и алюминии, в зависимости от глубины развития ливня, определяется как  $\eta_1 = \Delta E^{Pb}/\Delta E^{Al}$  ( $\Delta E^{Pb(Al)}$  – энергия, выделяющаяся на соответствующей глубине развития ливня в свинце и алюминии).

Значения  $\epsilon_k$  для разориентированных кристаллов вольфрамата  $\epsilon_k^{PWO} = 8.5$  МэВ и вольфрама  $\epsilon_k^W = 7.9$  МэВ близки к  $\epsilon_k$  для свинца  $\epsilon_k^{PbWO} = 7.2$  МэВ, а значения  $\epsilon_k$  для кристалла граната  $\epsilon_k^G = 13.5$  МэВ отличаются приблизительно в два раза от  $\epsilon_k^{PbWO}$ , поэтому можно считать, что эффективная область развития ливня для свинца приблизительно совпадает с эффективными областями развития ливня в аморфных (разориентированных) кристаллах вольфрамата ( $\Delta E_d^{PWO} \approx \Delta E^{Pb}$ ), вольфрама ( $\Delta E_d^W \approx \Delta E^{Pb}$ ) и граната ( $\Delta E_d^G \approx \Delta E^{Pb}$ ). То есть  $\Delta E_o^{PWO(W,G)} = \eta_2 \cdot \Delta E_d^{PWO(W,G)} \approx \eta_2 \cdot \Delta E^{Pb}$ , где  $\Delta E_{d(o)}^{PWO(W,G)}$  – энергия, выделяющаяся на соответствующей глубине развития ливня в разориентированных (ориентированных) кристаллах вольфрамата, вольфрама и граната [7, 10], а  $\eta_2 = \Delta E_o^{PWO(W,G)}/\Delta E_d^{PWO(W,G)}$ .

Умножая значения  $\Delta E^{Pb}$ , являющиеся площадями сечения контура 2, перпендикулярного ливню, на соответствующей глубине развития ливня в свинце и представленные на рис. 1 из [7], на значения  $\eta_2 = \Delta E_o^{PWO(W,G)}/\Delta E_d^{PWO(W,G)}$ , полученные из анализа результатов работ [6, 9], и учитывая, что при энергии электронов в десятки ГэВ длина продольного развития *аномальных* ливней в ориентированных вдоль осей  $\langle 111 \rangle$  кристаллах вольфрама, вольфрамата и граната уменьшается на  $\sim 3X_0$ ,  $\sim 2X_0$  и  $\sim 1X_0$ , соответственно, получаем радиусы Мольера контуров развития *аномальных* ливней в ориентированных кристаллах (контур 3, 4 и 5 рис. 1). Радиусы Мольера в этом случае

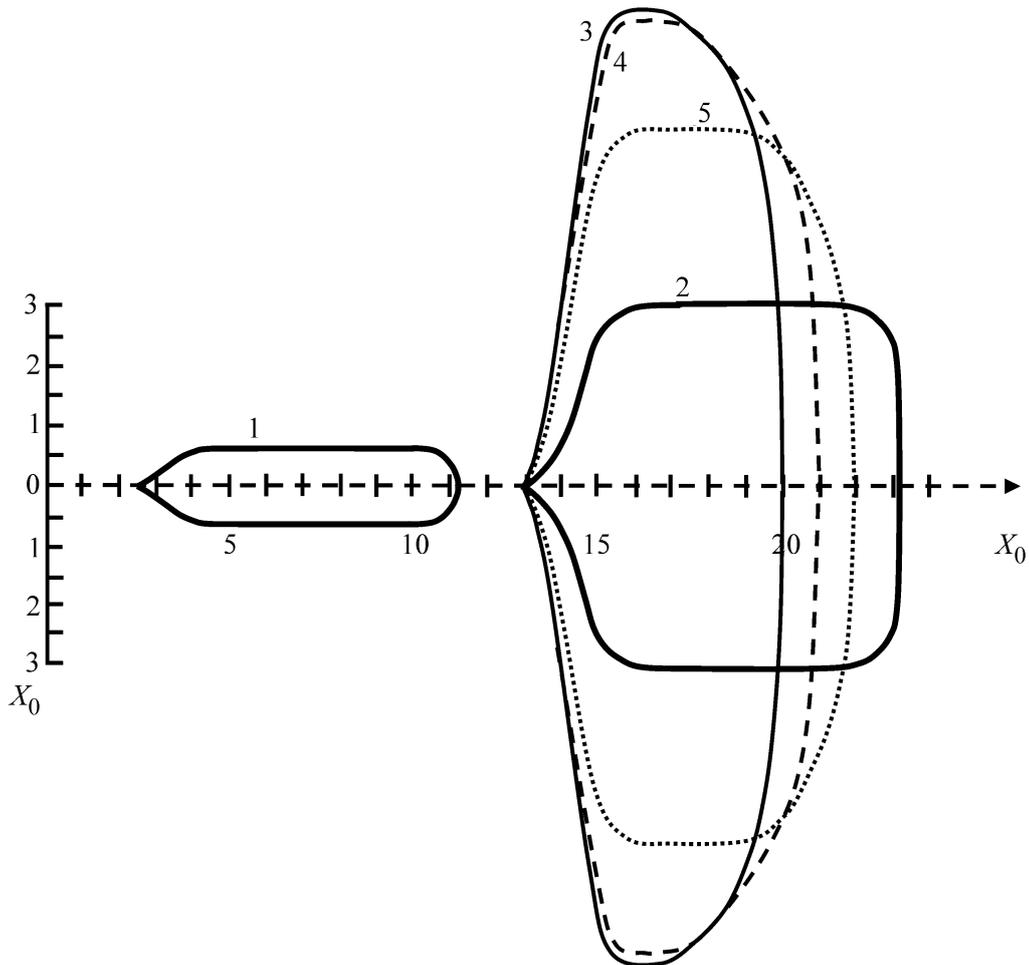


Рис. 1: Контуры областей, в которых выделяется  $\sim 90\%$  энергии электромагнитного ливня при энергиях электронов в десятки ГэВ: ливни развиваются в алюминии (1), свинце (2); в ориентированных кристаллах вольфрама (3), вольфрамата (4), граната (5) ( $X_0$  – радиационная длина).

составляют  $\sim 8X_0$ ,  $\sim 7.5X_0$  и  $\sim 6X_0$ . С учетом значений радиационных длин вольфрама ( $X_0 = 3.5$  мм), вольфрамата ( $X_0 = 8.9$  мм) и граната ( $X_0 = 14.5$  мм) длины Мольера составляют  $\sim 28$  мм,  $\sim 67$  мм и 87 мм, соответственно.

Таким образом, оценки показывают, что контуры развития ливней в ориентированных кристаллах вольфрама, вольфрамата и граната отличаются от контуров развития ливней в аморфных (разориентированных) кристаллах.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] U. I. Uggerhoj, Rev. of Mod. Phys. **77**, 1131 (2005).
- [2] В. Н. Байер, В. М. Катков, В. М. Страховенко, *Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах* (Новосибирск, Наука, СО АН СССР, 1989).
- [3] А. И. Ахиезер, Н. Ф. Шульга, *Электродинамика высоких энергий в веществе* (М., Наука, 1993).
- [4] В. Н. Байер, В. А. Басков, В. В. Ганенко и др., Письма в ЖЭТФ **49**, 533 (1989).
- [5] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(8), 16 (2012).
- [6] В. А. Басков, Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(10), 8 (2012).
- [7] А. Н. Калиновский, Н. В. Мохов, Ю. П. Никитин, *Прохождение частиц высоких энергий через вещество* (М., Энергоатомиздат, 1985).
- [8] Э. Сегре, *Экспериментальная ядерная физика*, т. 1, 242 (М., ИЛ, 1955).
- [9] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Труды сессии-конференции ЯФ ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий”, 21–25 ноября 2011, ИТЭФ, Москва, [http://matras.iter.ru/npd2kl/Malyi\\_za/24\\_november/ba/ppt](http://matras.iter.ru/npd2kl/Malyi_za/24_november/ba/ppt).
- [10] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(5), 3 (2013).

Поступила в редакцию 25 октября 2013 г.