

УДК 539.1.08

ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИВНЕЙ В СПЕКТРОМЕТРЕ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

В. А. Басков

Длина продольного развития электромагнитного ливня от электронов с энергией 26 ГэВ в спектрометре направленного действия, состоящего из ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристаллического вольфрамового конвертора и составного черенковского ливневого спектрометра, меньше по сравнению с длиной развития стандартного ливня на 20–30% при толщинах конвертора от 2.7 до 8.4 мм.

Ключевые слова: ориентированные кристаллы, электромагнитные ливни, продольное развитие, спектрометры направленного действия.

Экспериментальные установки, эксплуатирующиеся на современных ускорителях высоких энергий, содержат отдельные спектрометры или “стенки” спектрометров полного поглощения, которые регистрируют e^- , e^+ и γ -кванты, образовавшиеся в мишени при взаимодействии с ней первичного пучка или при столкновении встречных пучков. Основными целями спектрометров и “стенок” являются определение энергий и координат e^- , e^+ и γ -квантов и совместно с другими детекторами установки восстановление продуктов взаимодействия первичной частицы с мишенью, дальнейшее понимание механизма взаимодействия. Увеличение энергии ускорителей приводит к увеличению продольных размеров спектрометров и спектрометров, входящих в “стенки”, которое в свою очередь приводит к ухудшению энергетического и пространственного разрешений спектрометров из-за возникновения неоднородностей, приводящих к потерям света [1].

Применение в экспериментальных установках компактных спектрометров нового типа – спектрометров направленного действия на основе ориентированных кристаллов (СНД) – является хорошей альтернативой.

СНД – спектрометры полного поглощения регистрируют e^- , e^+ или γ -кванты в заданном направлении и представляют собой спектрометры с ориентированными

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский проспект, 53; e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru.

непрозрачными или прозрачными кристаллическими конверторами, располагающимися перед спектрометрами, или спектрометры на основе непосредственно прозрачных кристаллов. Кристаллографическая ось конвертора или прозрачного кристалла-спектрометра должна быть направлена на источник частиц – на мишень или область взаимодействия в случае встречных пучков. В качестве конвертора в зависимости от целей установки и назначения СНД можно использовать различные кристаллы, как непрозрачные – кремний (Si), германий (Ge), вольфрам (W) и т.д., так прозрачные – вольфрамат (PbWO_4), гранат ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) и т. д. [2–4].

Теоретические и экспериментальные исследования электродинамических процессов рождения e^+e^- -пар γ -квантами, излучения электронами (позитронами) и развития электромагнитных ливней в ориентированных кристаллах показали, что наиболее эффективно СНД можно использовать при энергиях частиц, при которых формируется область “постоянного сильного поля” (ПСП), в которой значительно возрастает вероятность электродинамических процессов и развиваются аномальные электромагнитные ливни [2–6].

Область ПСП формируется при углах входа частиц в кристалл $\Theta \ll \Theta_{PSP} = V/mc^2$ (Θ – угол между импульсом частицы и осью или плоскостью кристалла; V – масштаб потенциала оси или плоскости; m – масса электрона; c – скорость света). Для каждой оси (плоскости) кристалла, вдоль которой происходит ориентация, существует своя энергия, при которой возникает область ПСП. Например, для ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристалла вольфрама ($T_W = 293$ К) область ПСП формируется при энергии электронов $E_e \approx 30$ ГэВ, а для ориентированного вдоль оси $\langle 110 \rangle$ кристалла кремния ($T_{\text{Si}} = 293$ К) область ПСП возникает при $E_e = 150$ ГэВ [5].

В работе проведен анализ продольного развития электромагнитных ливней от электронов в СНД, состоящем из ориентированного кристалла вольфрама и составного черенковского ливневого спектрометра (СЧЛС) [3, 4, 6].

Электромагнитные ливни в ориентированных кристаллах изучались на электронном канале ИФВЭ на установке “Каскад”. В исследованиях использовались кристаллы вольфрама толщиной 2.7, 5.8 и 8.4 мм (радиационная длина $X_0 = 3.5$ мм). Ориентация кристаллов при комнатной температуре $T_W = 293$ К осуществлялась вдоль оси $\langle 111 \rangle$. Кристаллы считались разориентированными при $\Theta_{PSP} \ll \Theta = 20\text{--}30$ мрад. Мозаичность кристаллов составляла $\Delta\Theta_W \approx 1$ мрад. В эксперименте использовался пучок электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ с расходимостью $|v| \leq 0.1$ мрад по основанию [6].

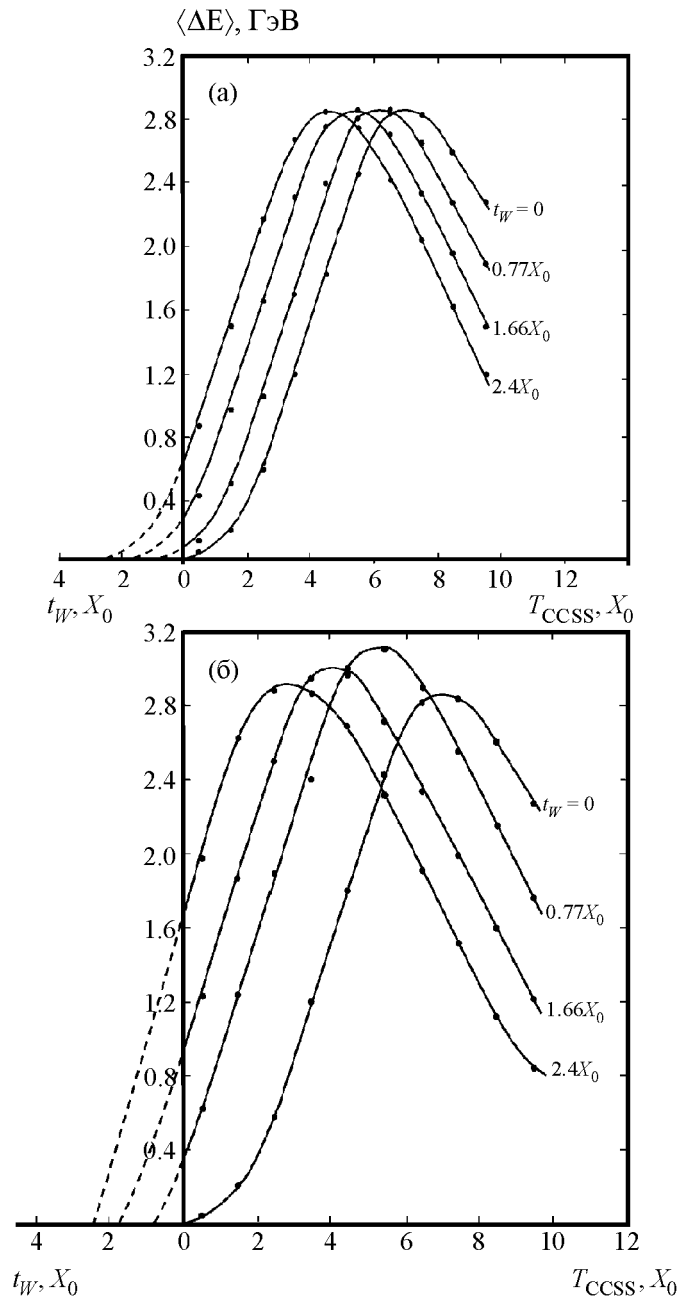


Рис. 1: Дифференциальные (каскадные) кривые развития электромагнитного ливня в СЧД от электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ при различных толщинах разориентированных (а) и ориентированных (б) кристаллов вольфрама ($\langle \Delta E \rangle$ – средняя энергия ливня, выделившаяся в каждом счетчике СЧЛС; t_W и t_{CCSS} – толщины кристаллов и СЧЛС, соответственно).

Ливень, выходящий из кристалла, продолжал развиваться в СЧЛС, стоявшем в 45 см за кристаллом. СЧЛС состоял из 10 независимых светоизолированных счетчиков (радиаторов) из свинцового стекла ТФ-1. Счетчики имели одинаковый размер 100×100 мм² и толщину $1X_0$. Для сбора оставшейся части ливня за СЧЛС был помещен черенковский спектрометр ЧС толщиной $15X_0$. ЧС имел шестигранный радиатор из свинцового стекла ТФ-1 с диаметром вписанной окружности 180 мм [7].

На рис. 1 и 2 приведены дифференциальные (каскадные) и интегральные кривые развития электромагнитных ливней от электронов, выходящих из разориентированных (а) и ориентированных (б) кристаллов вольфрама и далее продолжающих развиваться в СЧЛС и ЧС. На рисунках по оси абсцисс отложена толщина спектрометра СЧЛС в радиационных длинах (для последней точки рис. 2 толщина спектрометра равна сумме толщин СЧЛС и ЧС [7]). По оси ординат на рис. 1 отложена средняя энергия ливня, оставленная им в каждом счетчике спектрометра, а на рис. 2 отложена средняя суммарная энергия ливня, выделенная в спектрометре соответствующей толщины с учетом энергии ливня, оставленной в кристаллах вольфрама. На рис. 1(а) и 2(а) приведена калибровочная кривая, когда перед СЧЛС отсутствует кристаллический конвертор ($t_W = 0$). В этом случае начало развития ливня приходится на первый счетчик СЧЛС. Статистические ошибки на рис. 1 и 2 не приведены, поскольку составляли менее 1%.

Если перед СЧЛС находится разориентированный кристалл вольфрама, являющийся практически аморфным веществом, начало развития ливня и начало соответствующей каскадной кривой приходится на кристалл. По мере наращивания толщины кристалла начало развития ливня все дальше сдвигается от СЧЛС. На рис. 1(а) и 2(а) хорошо видно, что по мере наращивания толщины кристалла каскадная и интегральная кривые сдвигаются относительно своего первоначального положения (калибровочных кривых). Экстраполяция кривых в область начала развития ливня, то есть в кристалл, осуществлялась с помощью аналитической формулы, используемой в работе [6]: $f(t) = ct^\alpha \exp(-t/\beta)$, где c – нормировочный коэффициент, α и β – подгоночные параметры.

При ориентации кристалла характер электромагнитного ливня в кристалле меняется, что сказывается на изменении отклика спектрометра за кристаллом, выраженном в изменении каскадных и интегральных кривых [4–6, 8, 9]. На рис. 1 и 2 видно увеличение энерговыделения в первых счетчиках СЧЛС и уменьшение энерговыделения в счетчиках СЧЛС за максимумом каскадной кривой, ещё большая сдвигка каскадных и интегральных кривых к началу развития ливня. Особенно заметно увеличение

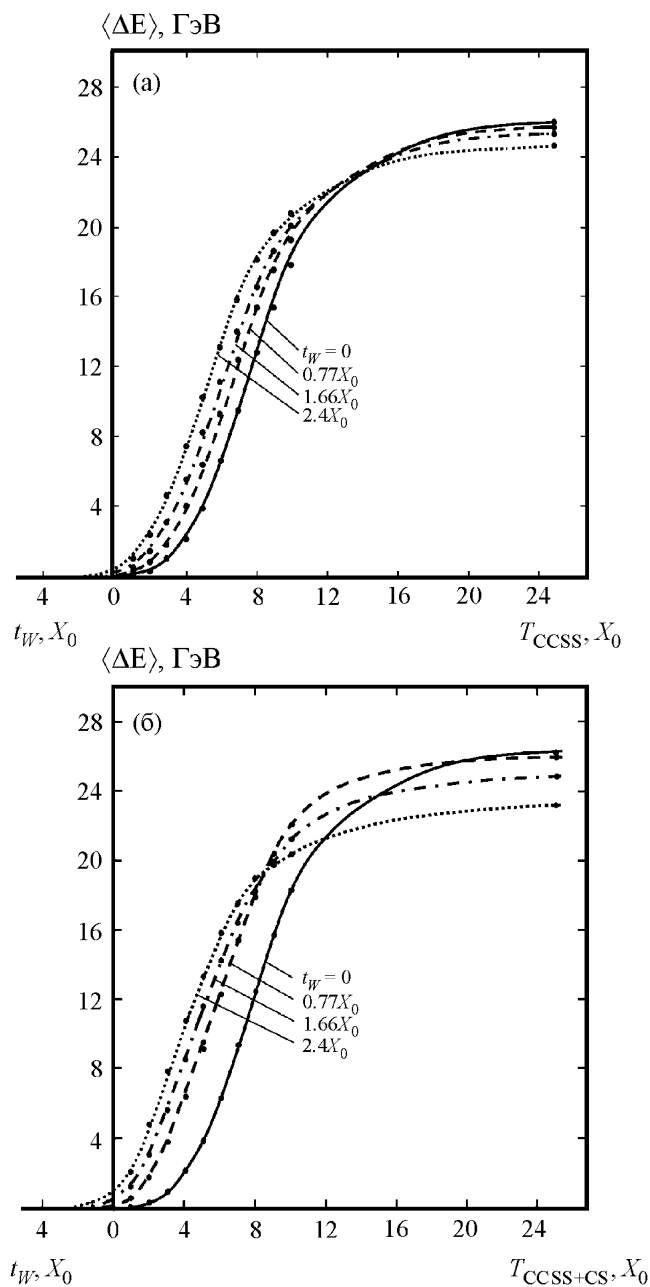


Рис. 2: Интегральные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС и ЧС от электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ при разных толщинах разориентированных (а) и ориентированных (б) кристаллов вольфрама ($\langle E \rangle$ – средняя энергия ливня, зарегистрированная спектрометром; t_W и $t_{CCSS+CS}$ – толщины кристаллов и спектрометров СЧЛС+ЧС, соответственно).

энерговыведения для толстых кристаллов 5.8 и 8.4 мм. В отличие от случая разориентированного кристалла регистрация 90–95% энергии ливня осуществляется меньшим числом счетчиков СЧЛС. Рис. 2(а) и 2(б) показывают, что число счетчиков уменьшается с 15 до ≈ 12 ($t_w = 2.7$ мм) и даже до ≈ 10 ($t_w = 8.4$ мм), что на 20–30% меньше толщины обычного спектрометра (t_w – толщина разориентированного кристалла вольфрама).

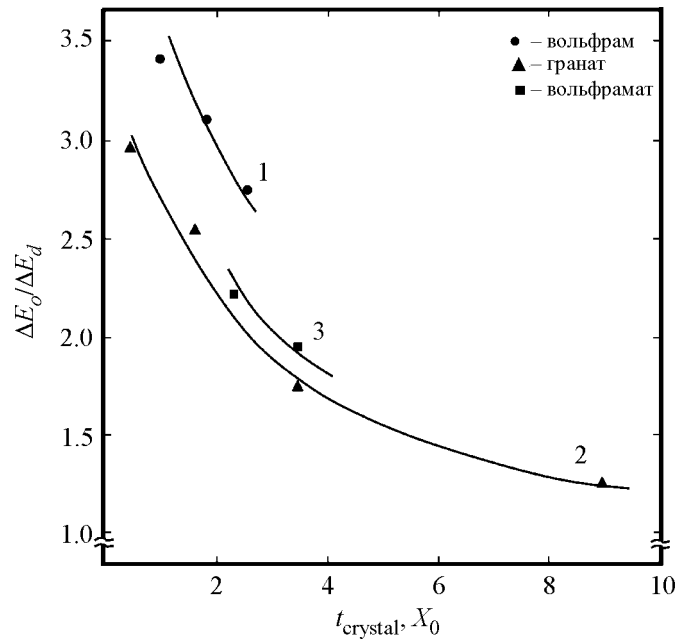


Рис. 3: Зависимость относительного энерговыведения ливня в кристаллах вольфрама, граната и вольфрамата от толщины кристаллов ($t_{crystal}$) ($\Delta E_{d(o)}$ – энерговыведение ливня при разориентации (ориентации) кристалла, энергия электронов $E_e = 26$ ГэВ).

Величина превышения энерговыведения при ориентации кристалла ΔE_o относительно разориентации ΔE_d представлена на рис. 3, где $\Delta E_{d(o)}$ – энергия, поглощенная разориентированным (ориентированным) кристаллом. Для сравнения на этом же рисунке показана зависимость относительного энерговыведения от толщины для кристаллов граната и вольфрамата [8]. Превышение энерговыведения $\Delta E_o / \Delta E_d > 1$ наблюдается во всём диапазоне толщин кристаллов $t_{crystal} \leq 10X_0$ и наиболее сильное для $t_{crystal} \leq X_0$. Это означает, что даже в кристаллах большой толщины, на много порядков превосходящих длину когерентности, развитие ливней частично идёт по когерентным механизмам излучения γ -квантов электронами (позитронами) и рождения e^+e^- -пар. С увеличением толщины ориентированных кристаллов происходит значительное усиление рассеяния

ливневых частиц, вклад когерентных процессов в ливнях уменьшается. В результате, хотя абсолютное значение превышения энерговыделения в ливнях в ориентированном кристалле относительно энерговыделения для разориентированного кристалла увеличивается с толщиной кристаллов (рис. 3), относительное энерговыделение в ориентированном кристалле при этом уменьшается. С другой стороны, влияние когерентного характера аномального ливня, развивающегося в тонком ориентированном кристалле вольфрама $t_W = 0.02X_0$, заметно даже на отклике ЧС толщиной $15X_0$ [9].

СНД можно использовать и для регистрации γ -квантов, поскольку сдвигка каскадной кривой также наблюдается при развитии ливней от γ -квантов с энергиями 9–27 ГэВ в ориентированном вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристалле вольфрама толщиной 1 мм ($T_W = 77$ К) [10].

Таким образом, аномальные электромагнитные ливни, возникающие в СНД от электронов и γ -квантов с энергиями в десятки гигаэлектронвольт, изменяют отклик спектрометра, находящегося за кристаллом, относительно отклика на стандартные ливни, сказывающийся в уменьшении длины продольного развития ливня, что в свою очередь ведет к уменьшению толщины спектрометра и всего СНД.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. M. Brown, D. J. A. Cockerill, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. (A) **666**, 47 (2012) (<http://scedirect.com/sceince/article/pii/S0168900211005572>).
- [2] V. N. Baier, V. M. Katkov, V. M. Strakhovenko, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A **250**, 514 (1986).
- [3] В. А. Басков, В. Б. Ганенко, В. А. Гушин и др., Письма в ЖЭТФ **50**, 395 (1989).
- [4] V. A. Baskov, V. A. Khablo, V. V. Kim et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **145**, 92 (1998).
- [5] U. I. Uggerhoj, Reviews of Modern Physics **77**, 1131 (2005).
- [6] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Препринт ФИАН № 31 (ФИАН, Москва, 2006).
- [7] В. А. Басков, А. С. Белоусов, В. В. Ким и др., ПТЭ **5**, 66 (2011).
- [8] V. A. Baskov, A. P. Bugorsky, V. A. Kachanov et al., Phys. Lett. B **456**, 86 (1999).
- [9] В. А. Басков, В. В. Ким, В. А. Хабло, ПТЭ **4**, 13 (2010).
- [10] В. А. Басков, В. Б. Ганенко, Ю. В. Жебровский и др., Письма в ЖЭТФ **57**, 282 (1993).

Поступила в редакцию 6 декабря 2011 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ИХ ПРОБЕГУ В ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

А. С. Барабаш¹, В. Я. Браднова², В. В. Дубинина¹, Н. П. Егоренкова¹,
С. И. Коновалов¹, Е. А. Пожарова¹, Н. Г. Полухина³, В. А. Смирнитский¹,
Н. И. Старков³, Тан Ханг Со³, М. М. Чернявский³, Т. В. Щедрина³,
В. И. Юматов¹

Координатным методом измерены в ядерной фотоэмульсии пробеги монохроматических мюонов, возникающих в $\pi \rightarrow \mu\nu$ распаде, с целью определения по пробегу их энергии. Дисперсия измерения этим методом энергии мюонов $\sigma_\mu = (0.11 \pm 0.01)$ МэВ, что соответствует точности определения энергии заряженной частицы по пробегу в ядерной эмульсии $\approx 3.1\%$. Разработанная методика позволит измерить энергию электронов в 2β -распаде (~ 3 МэВ) с точностью (5 – 6)%.

Ключевые слова: нейтрино, ядерная фотоэмульсия, распознавание образов.

В работе [1] была показана возможность применения ядерной фотоэмульсии с молибденовым наполнением для поиска 2β -распада. Оценка фоновых условий, проанализированных в работе [2], показала возможность за один год измерений достичь чувствительности к 0ν -распаду ^{100}Mo на уровне $\sim 1.5 \cdot 10^{24}$ лет.

Существенным обстоятельством, определяющим успешность выполнения этой работы, является возможность автоматизированной обработки эмульсий: поиск и распознавание треков частиц на комплексе ПАВИКОМ. При распознавании треков частиц одной из основных задач является задача их отделения от фона. Одним из таких фоновых процессов является распад радиоактивных ядер, присутствующих в фотоэмульсии,

¹ ФГБУ ГНЦРФ ИТЭФ, 117218 Россия, Москва ул. Большая Черемушkinsкая, 25.

² ОИЯИ – Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри 6, 141980 Дубна, Московская область.

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: poluhina@sci.lebedev.ru.