

КРИТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЛИВНЕЙ ОТ ЭЛЕКТРОНОВ

В. А. Басков

Представлены результаты экспериментальных исследований аномальных электромагнитных ливней от электронов в десятки ГэВ, выходящих из ориентированных кристаллов вольфрама и регистрируемых электромагнитным спектрометром. Обнаружено увеличение критической энергии ε_c развития аномального ливня в ~ 2 раза по сравнению с аналогичной величиной в случае развития стандартного ливня, исследовано её поведение от ориентации, толщины и температуры кристалла, энергии электронов.

Ключевые слова: аномальные ливни, стандартные ливни, электромагнитный спектрометр, критическая энергия.

При прохождении фотонов, электронов или позитронов с энергиями в десятки и сотни ГэВ через ориентированный кристалл происходит резкое возрастание сечений электродинамических процессов излучения электронами (позитронами) и рождения электрон-позитронных пар фотонами, что приводит к развитию нестандартных (аномальных) электромагнитных ливней. В *аномальных* ливнях по сравнению с ливнями, развивающимися в аморфном веществе (*стандартными* ливнями), возрастает число заряженных частиц N_e и число фотонов N_γ , изменяются их энергетические спектры, что приводит к изменению отклика детектора, регистрирующего ливни [1, 2].

Отличия отклика спектрометра, регистрирующего аномальные электромагнитные ливни, относительно отклика спектрометра, регистрирующего стандартные электромагнитные ливни, распространяется практически на все параметры отклика, в том числе и на величину критической энергии ε_c , определяющей начало затухания ливня в спектрометре [3–5].

Данная работа представляет экспериментальные результаты исследования критической энергии ε_c черенковского спектрометра, регистрирующего аномальные электро-

магнитные ливни, выходящие из ориентированных кристаллов [4].

Работа была выполнена на установке “Каскад” на электронном канале 2В ускорителя ИФВЭ в рамках программы изучения эффектов квантовой электродинамики в сильных полях ориентированных кристаллов. Схема установки, её характеристики представлены в [6].

В исследованиях были использованы кристаллы толщиной много меньше толщины спектрометра, применяемого для регистрации ливней $t_{\text{cryst}}(0.28X_0 - 2.4X_0) \gg t_{\text{spectr}}(25X_0)$ (t_{cryst} и t_{spectr} – толщины кристаллов и спектрометра, соответственно) [7], поэтому исследовалась критическая энергия ливня, развивающегося в спектрометре.

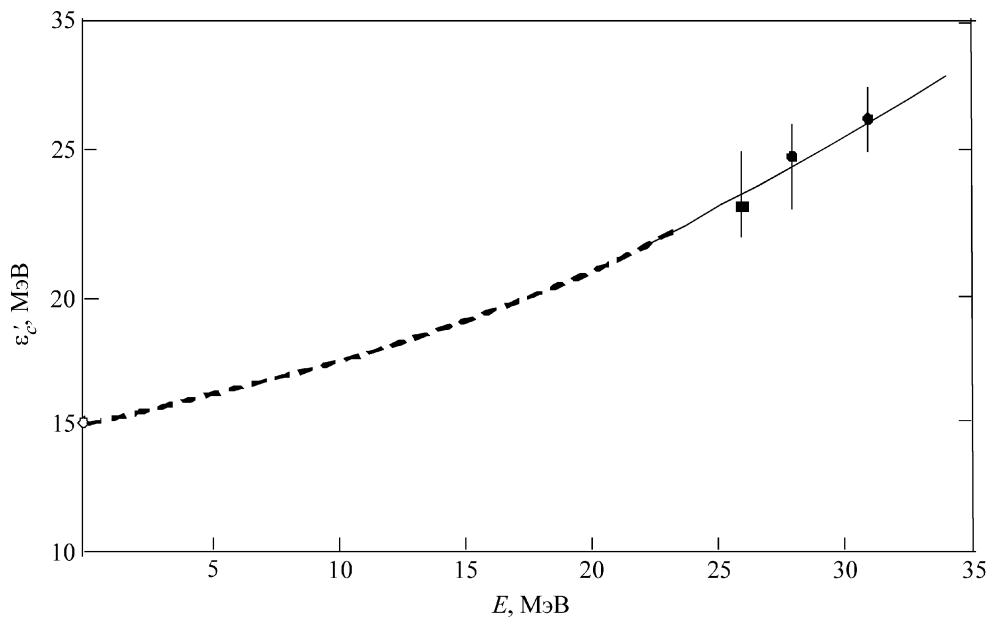


Рис. 1: Зависимость критической энергии ε'_c черенковского спектрометра с кристаллическим вольфрамовым конвертером от энергии электронов E (толщина конвертера 1 мм, ориентация вдоль оси $\langle 111 \rangle$, температура $T = 293$ К; ○ – табличное значение [10], ■ – оценка [3, 11], ● – эксперимент).

Зависимость положения максимума развития электромагнитного ливня в спектрометре без кристалла от энергии электронов пучка от ускорителя E описывается известным выражением [5, 8, 9]:

$$t_{\text{max}} = \ln(E/e_c) - c, \quad (1)$$

где E – энергия электронов пучка (МэВ), e_c – критическая энергия черенковского стекла (МэВ); $c = 0.5$.

Положение максимума развития электромагнитного ливня в спектрометре с конвертером из разориентированного (аморфного) кристалла при энергии электронов E представляется выражением [3]:

$$t_{\max} = \ln(E/\varepsilon_c) - c - t_{\text{cryst}}. \quad (2)$$

Зависимость (2) смещена относительно зависимости (1) на величину толщины разориентированного кристалла (t_{cryst}) перед спектрометром.

Ориентация кристалла приводит к увеличению *эффективной* толщины кристалла t_{eff} перед спектрометром (t_{eff} – *эффективная* толщина кристалла, на которой происходит наиболее эффективное взаимодействие частиц с кристаллом) и смещению зависимости (1) на соответствующую величину [3]:

$$t_{\max} = \ln(E/\varepsilon_c) - c - t_{\text{eff}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{eff}} = t_{\text{cryst}} + \Delta t$, а $\Delta t = t_{\max d} - t_{\max o}$ является “добавкой” к толщине кристалла t_{cryst} за счет эффекта ориентации ($t_{\max d}$ и $t_{\max o}$ – положение максимума каскадной кривой при разориентированном и ориентированном кристалле, соответственно).

Увеличение *эффективной* толщины кристалла t_{eff} при его ориентации не приводит к *реальному* изменению толщины кристалла, что может означать изменение критической энергии при развитии аномального ливня в кристалле.

Действительно, развитие аномального ливня в кристалле идёт в значительной степени по когерентным механизмам излучения γ -квантов электронами (позитронами) и рождения e^+e^- пар фотонами. В результате, в аномальном ливне происходит увеличение энерговыделения по сравнению с энерговыделением в стандартном ливне. Дальнейшее развитие аномального ливня в спектрометре продолжает частично идти по когерентным механизмам, действия которых простираются на значительную толщину спектрометра и приводят к изменению его отклика. В характере отклика спектрометра появляются ориентационные и температурные зависимости, происходит сдвигка максимума каскадной кривой развития ливня и т. д., в том числе меняется критическая энергия [1, 2, 7].

Таким образом, зависимость (3) модифицируется:

$$t_{\max} = \ln(E/\varepsilon'_c) - c - t_{\text{cryst}}, \quad (4)$$

где ε'_c – *модифицированная критическая* энергия.

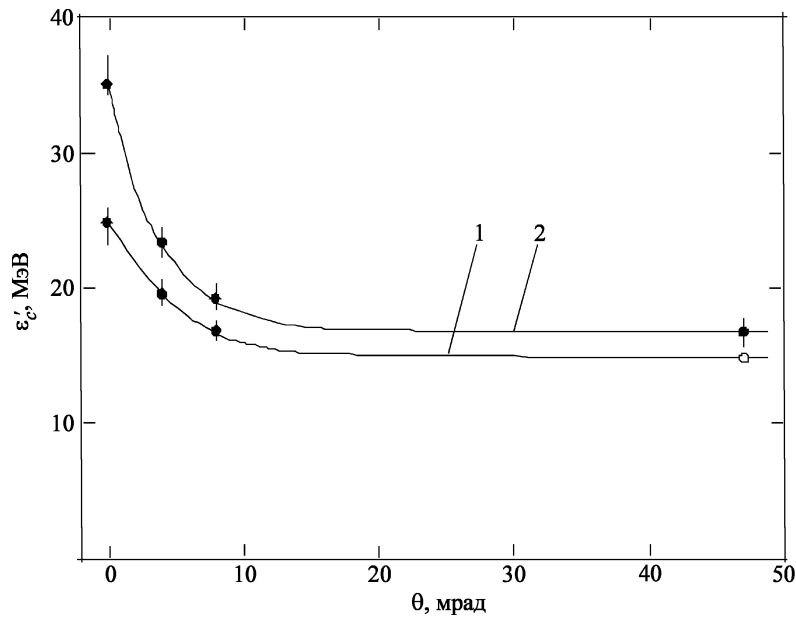


Рис. 2: Зависимость критической энергии ε'_c черенковского спектрометра от угла ориентации θ кристаллического вольфрамового конвертера толщиной 1 мм относительно оси $\langle 111 \rangle$ ($E = 28$ ГэВ; 1 – $T_1 = 293$ К, 2 – $T_2 = 77$ К; \circ – табличное значение [10], \bullet – эксперимент).

У модифицированной критической энергии ε'_c к зависимости от типа вещества добавляются зависимости от энергии электронов, ориентации, температуры и толщины кристалла.

Приравнивая выражения (3) и (4), получаем зависимость ε'_c от “добавочной” толщины кристалла за счет степени ориентированности вдоль соответствующей оси или плоскости, так как $\Delta t = \Delta t(\theta)$ (θ – угол ориентации кристалла относительно кристаллографической оси или плоскости):

$$\varepsilon'_c = e_c \cdot \exp(\Delta t). \quad (5)$$

Зависимость ε'_c от энергии электронов E для кристаллического вольфрамового конвертера толщиной 1 мм, ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$, при температуре $T = 293$ К, представлена на рис. 1. Видно, что с увеличением энергии электронов критическая энергия увеличивается с табличной величины 15 МэВ при энергии электронов, близкой к нулю [10], до ~ 25 МэВ при энергии электронов около 30 ГэВ. Увеличение составляет ~ 1.7 раза.

Зависимость ε'_c от угла ориентации θ относительно кристаллографической оси $\langle 111 \rangle$

для того же кристалла при температурах $T_1 = 293$ К и $T_2 = 77$ К и энергии электронов 28 ГэВ представлена на рис. 2. Ширины ориентационных зависимостей составили $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_{293K} = 7.5$ мрад и $\Delta\theta_2 = \Delta\theta_{77K} = 5$ мрад, соответственно. Рисунок также показывает увеличение величины ε'_c при уменьшении температуры кристалла с $\varepsilon'_c \approx 25$ МэВ (T_1) до $\varepsilon'_c \approx 35$ МэВ (T_2).

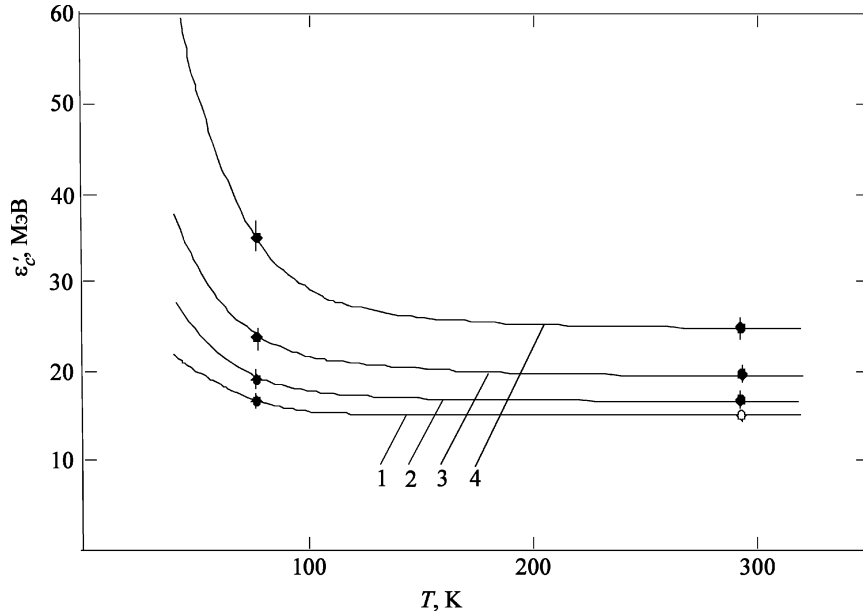


Рис. 3: Зависимость критической энергии ε'_c черенковского спектрометра от температуры T кристаллического вольфрамового конвертера при различных углах ориентации θ относительно оси $\langle 111 \rangle$ (толщина конвертера 1 мм; $E = 28$ ГэВ; 1 – $\theta = 45$ мрад; 2 – $\theta = 8$ мрад; 3 – $\theta = 4$ мрад; 4 – $\theta = 0$ мрад) (○ – табличное значение [10], ● – эксперимент).

Зависимость ε'_c от температуры T для разных углов ориентации θ кристалла представлена на рис. 3. Для всех исследуемых углов ε'_c возрастает при уменьшении температуры.

Зависимость ε'_c от толщины кристалла t_{cryst} при энергии электронов 26 ГэВ и температуре $T_1 = 293$ К представлена на рис. 4. Если предположить, что в пределах исследуемых толщин кристаллов зависимость имеет пропорциональный характер, то

$$\varepsilon'_c = at_{\text{cryst}} + b, \quad (6)$$

где $a = 18, b = 15$ МэВ.

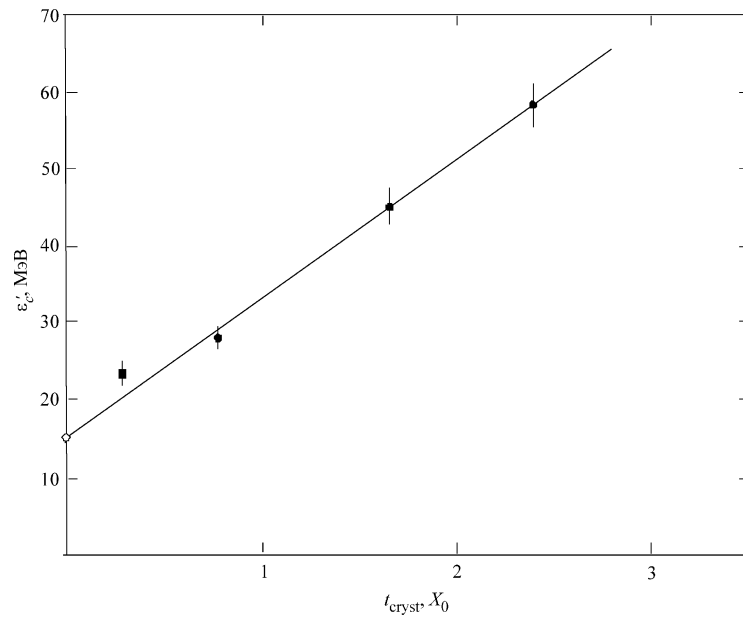


Рис. 4: Зависимость критической энергии ϵ'_c черенковского спектрометра от толщины t_{cryst} ориентированных относительно оси $\langle 111 \rangle$ кристаллов вольфрама при температуре $T = 293 \text{ K}$ (○ – табличное значение [10], ■ – оценка [3, 11], ● – эксперимент).

Надо отметить, что возрастание критической энергии ϵ'_c аномальных электромагнитных ливней с увеличением энергии электронов должно происходить до тех пор, пока энергия не достигнет величины, при которой отношение радиационной длины разориентированного кристалла X_0 к радиационной длине ориентированного кристалла X'_0 [1]

$$X_0/X'_0 = \text{const.} \quad (7)$$

В этом случае X'_0 достигает минимальной величины, а ϵ'_c – максимальной и при дальнейшем увеличении энергии электронов не меняется.

Таким образом, при регистрации аномальных электромагнитных ливней от электронов с энергиями в десятки ГэВ критическая энергия спектрометра, регистрирующего ливни, возрастает. В пределах исследуемых толщин кристаллов зависимость критической энергии от энергии электронов экспоненциальная, от толщины кристаллического конвертера перед спектрометром пропорциональная. Наблюдается возрастание критической энергии при уменьшении угла ориентации кристаллического конвертера и уменьшении его температуры.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. Н. Байер, В. М. Катков, В. М. Страховенко, *Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах* (изд. "Наука" СО АН СССР, г. Новосибирск, 1989).
- [2] А. И. Ахиезер, Н. Ф. Шильга, *Электродинамика высоких энергий в веществе* (М., Наука, 1993).
- [3] В. А. Басков, Препринт ФИАН № 9 (ФИАН, Москва, 2013).
- [4] В. А. Басков, Препринт ФИАН № 1 (ФИАН, Москва, 2014).
- [5] А. Н. Калиновский, Н. В. Мохов, Ю. П. Никитин, *Прохождение частиц высоких энергий через вещество* (М., Энергоатомиздат, 1985).
- [6] В. А. Басков, В. В. Ким, В. И. Сергиенко, В. А. Хабло, ПТЭ, № 5, 58 (1990).
- [7] В. А. Басков, Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(10), 8 (2012).
- [8] В. М. Barnett, С. D. Carone, D. K. Groom, et al., Particle Physics (Booklet), American Institute of Physics, Available from LBNL and CERN, July 1996, p. 172.
- [9] Б. Словинский, *Физика элементарных частиц и атомного ядра* (ФЭЧАЯ, Дубна), **25**(2), 417 (1994).
- [10] Б. Б. Говорков, в: *Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий*, Дубна, 1970 (ОИЯИ, Дубна, 1970), с. 389.
- [11] В. А. Басков, Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(8), 42 (2013).

Поступила в редакцию 10 февраля 2014 г.