

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ

Б.А.Басков, В.Б.Ганенко¹⁾, В.А.Гущин¹⁾, Ю.В.Жебровский¹⁾,

В.В.Ким, Л.Я.Колесников¹⁾, И.В.Коноров, Б.И.Лучков²⁾,

В.А.Мишнев³⁾, А.Л.Рубашкин¹⁾, В.И.Сергиенко,

В.Ю.Тугаенко²⁾, В.А.Хабло, О.В.Чупиков²⁾

Представлены ориентационные зависимости сигналов с черенковского счетчика, регистрировавшего выходящие из кристалла кремния электромагнитные ливни, образованные γ -квантами с энергией 3 ± 15 ГэВ. Показана возможность использования полученных эффектов для определения положения источника γ -квантов.

Каскадные процессы в ориентированных кристаллах, образованные γ -квантами высокой энергии, существенно отличаются от аналогичных процессов в аморфных веществах. При определенных энергиях и малых углах θ между импульсом первичной частицы и кристаллографической осью (плоскостью) вероятность образования γ -квантом e^+e^- -пары и вероятность излучения электроном γ -кванта могут значительно превысить соответствующие вероятности для аморфного вещества или разориентированного кристалла. В результате электромагнитный ливень развивается на более коротком расстоянии, величина которого зависит от θ , энергии первичной частицы и характеристик кристалла. При уменьшении энергии γ -квантов, движущихся вдоль кристаллографической оси, вероятность образования ими e^+e^- -пар экспоненциально уменьшается, тогда как вероятность множественного излучения γ -квантов электронами, движущимися в аналогичных условиях, остается высокой. В кристалле образуются специфические фотонные ливни, в которых число γ -квантов может быть значительно больше числа заряженных частиц ^{1, 2}. В результате направленность каскадных процессов относительно угла θ будет определяться направленностью радиационных потерь электронов (позитронов) в кристалле в широком интервале энергий первичных γ -квантов. Такая направленность наблюдалась в ориентационных зависимостях выхода из кристалла вольфрама фотонной и заряженной компонент электромагнитных ливней, образованных γ -квантами с энергией 8 ± 26 ГэВ ³. Зависимости имели ширины сравнимые в пределах ошибок между собой и с шириной ориентационной кривой излучения электронов с импульсом 28 ГэВ/с в том же кристалле ⁴.

В ряде работ были предложены методы использования монокристаллов для определения направления пучка γ -квантов, основанные на измерении ориентационной зависимости сечения фоторождения e^+e^- -пар ⁵. При низких энергиях γ -квантов кривая сечения фоторождения имеет ряд когерентных пиков, расположенных по θ на расстоянии сотен миллирадиан от угла $\theta = 0$, когда кристаллографическая ось направлена точно на источник γ -квантов. С ростом энергии пики сближаются и растут. При высоких энергиях (для кремния $E_\gamma \gtrsim \gtrsim 100$ ГэВ, для вольфрама $E_\gamma \gtrsim 25$ ГэВ) сечение имеет один ярко выраженный пик при $\theta = 0$, обусловленный процессом образования e^+e^- -пар в сильном поле. Ориентационную кривую сечения можно получить, поворачивая гониометрическим устройством кристалл с выделенной кристаллографической осью в потоке γ -квантов, считая события конверсии γ -квантов и определяя энергию их при помощи расположенного за кристаллом детектора. По пикам в сечении можно найти направление пучка γ -квантов. Однако, применение этого ме-

¹⁾ Харьковский физико-технический институт.

²⁾ Московский инженерно-физический институт.

³⁾ Институт физики высоких энергий, г. Серпухов.

тогда в γ -астрономии для поиска космических источников γ -излучения следует считать малоэффективным. При низких энергиях γ -квантов (≥ 1 ГэВ) точность определения по когерентным пикам не лучше, чем у традиционных методов, и процедура определения затруднена в особенности, если источник не один. При высоких энергиях (≥ 100 ГэВ) малы потоки космических γ -квантов, поэтому необходимо создавать детектор большой площади, что практически очень трудно в особенности для внеземной γ -астрономии. Необходим метод, который работал бы в широкой области энергий γ -квантов, начиная с ~ 1 ГэВ, с использованием таких легкодоступных, совершенных, имеющих сравнительно большие размеры кристаллов, как, например, кремний.

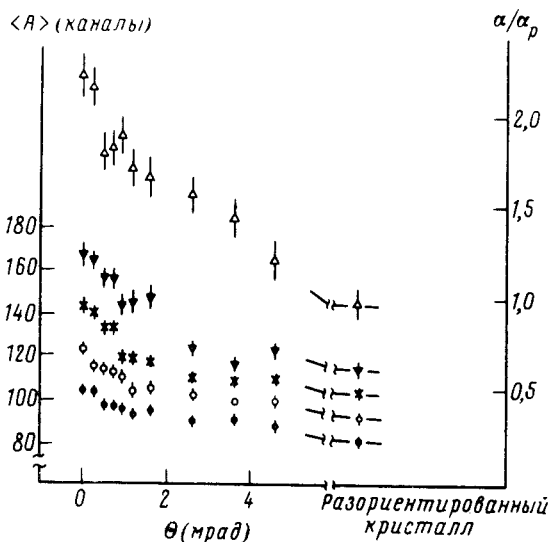


Рис. 1. Ориентационные зависимости: — средней амплитуды сигналов с черенковского счетчика (левая ордината, точки \bullet , \circ , \times , \blacktriangledown); — трансформации амплитудного спектра сигналов со счетчика (правая ордината, точки Δ). \bullet — $E_\gamma = 3 \div 5$ ГэВ, \circ — $E_\gamma = 5 \div 7$ ГэВ, \times — $E_\gamma = 7 \div 10$ ГэВ, \blacktriangledown — $E_\gamma = 10 \div 15$ ГэВ, Δ — $E_\gamma = 3 \div 5$ ГэВ

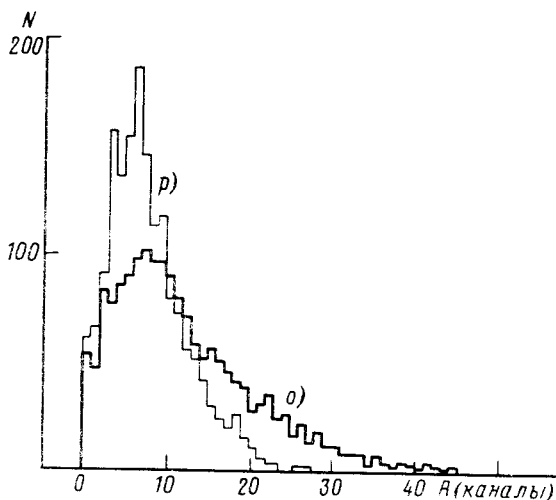


Рис. 2. Амплитудные спектры сигналов с черенковского счетчика: p) — кристалл разориентирован; o) — кристалл ориентирован осью $\langle 110 \rangle$ на пучок γ -квантов

Для проверки применимости эффекта развития каскадных процессов в кристаллах в качестве такого метода было проведено измерение выхода заряженной компоненты ливня из кристалла кремния. Кристалл имел толщину 20 мм, температуру 293°K , ориентация осуществлялась относительно оси $\langle 110 \rangle$. На рис. 1 (левая ордината, точки \bullet , \circ , \times , \blacktriangledown) представлены ориентационные зависимости средней амплитуды сигналов от черенковского счетчика с радиатором из свинцового стекла толщиной в одну радиационную длину, расположенного за кристаллом. Расходимость пучка первичных γ -квантов $|\vartheta| \leq 0,5$ миллирадиан по основанию. Все кривые имеют единственный максимум при $\theta = 0$, полуширина на полувы-

соте которого в пределах ошибок одинакова и составляет ~ 3 мрад. С ростом энергии γ -квантов превышение в максимуме растет от $\sim 30\%$ при $E_\gamma = 3 \div 5$ ГэВ до $\sim 50\%$ при $E_\gamma = 10 \div 15$ ГэВ, т. е. с ростом энергии метод работает все более эффективно. При энергии γ -квантов $\lesssim 3$ ГэВ превышение незначительное и практический поиск положения источника может быть затруднен. На рис. 2 приведены содержащие одинаковое число событий амплитудные спектры сигналов со счетчика для двух крайних случаев: р) — кристалл разориентирован; о) — кристалл ориентирован на пучок γ -квантов с энергией $3 \div 5$ ГэВ. Форма спектра о) трансформировалась по сравнению с р): увеличилось число событий с большой амплитудой за счет уменьшения с малой. Количественно величину трансформации можно оценить коэффициентом $\alpha = \Delta N_{\text{пр}} / \Delta N_{\text{л}}$, где $\Delta N_{\text{пр}}$ — число событий в правой части амплитудного спектра относительно выбранного канала, $\Delta N_{\text{л}}$ — число событий в левой части. В данном случае оптимальное отношение коэффициентов спектров $\alpha_o / \alpha_p = 2,3 \pm 0,2$, т. е. превышение $\gtrsim 100\%$. Ориентационная зависимость отношения α_o / α_p представлена на рис. 1 (правая ордината, точки Δ). Она имеет ту же ширину, что и соседние зависимости. Применение метода трансформации спектра существенно упростит по нашему мнению поиск источника γ -квантов с энергией $\lesssim 3$ ГэВ.

Приведенные в статье результаты свидетельствуют, что направленность каскадных процессов в кристаллах наблюдается в широкой области энергий первичных γ -квантов. Это существенно как для создания γ -телескопов, так и спектрометров направленного действия, предназначенных для определения энергии γ -квантов и вершины их образования в ядерных реакциях.

Литература

1. *Baier V.N. et al.* NIM in Phys. Res. B, 1987, 27, 360.
2. *Ахиезер А.И. и др.* ДАН СССР, 1987, 292, 338.
3. *Басков В.А. и др.* Препринт ФИАН № 143, Москва, 1988. Тезисы докладов XIX Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 1989, МГУ, Москва.
4. *Байер В.Н. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1989, 49, 533. Препринт ФИАН № 144, Москва, 1988.
5. *Зверев В.Г. и др.* Сб. "Элементарные частицы и космические лучи", 1985, МИФИ, Москва; *Baier V.N. et al.* NIM in Phys. Res. A, 1986, 250, 514; *McBreen B.* Proceedings 20-th Int Cosmic Ray Conference, 1987, Moscow, 9, 367.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28 сентября 1989г.