

# Исследование излучения фотонов при объемном отражении позитронов с энергией 10 ГэВ в изогнутом монокристалле кремния

А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, Г. И. Бритвич, А. П. Бугорский, В. И. Котов, А. Е. Кушниренко, В. А. Маишев<sup>1)</sup>,  
В. А. Пикалов, В. Н. Чепегин, Ю. А. Чесноков<sup>1)</sup>, И. А. Язынин, Ю. М. Иванов<sup>+</sup>, В. В. Скоробогатов<sup>+</sup>

Государственный научный центр “Институт физики высоких энергий”, 142281 Протвино, Московская обл., Россия

<sup>+</sup> Санкт-Петербургский институт ядерной физики, 183300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия

Поступила в редакцию 14 августа 2008 г.

Представлены экспериментальные результаты излучения фотонов при движении пучка позитронов энергии 10 ГэВ в изогнутых кремниевых кристаллах. Приводится сравнение теоретических вычислений с экспериментальными данными.

PACS: 29.27.–a, 42.79.Ag, 61.85.+p

Процесс объемного отражения заряженных частиц в изогнутых кристаллах [1, 2], представляющий собой когерентное рассеяние, наблюдался для протонных пучков в экспериментах последних трех лет (см. [3] и ссылки в ней). Эти эксперименты показали хорошее согласие между предсказанными и измеренными характеристиками процесса [4]. При объемном отражении частицы пересекают изогнутые кристаллографические плоскости. Вследствие этого их поперечная скорость имеет характер аperiодических колебаний. На основе рассмотрения этого движения в работе [5] был предсказан новый тип интенсивного когерентного излучения. Из-за большой величины лоренц-фактора  $\gamma$  легких лептонов это излучение более мощное, чем у других частиц.

Рис.1 иллюстрирует процесс объемного отражения ультрарелятивистской частицы, движущейся в

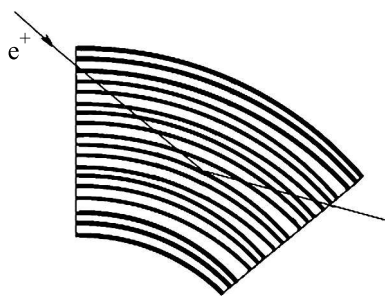


Рис.1. Движение частицы в кристалле при объемном отражении

системе изогнутых кристаллографических плоскостей. При приближении к точке касания поперечная скорость частицы становится близкой к нулю,

и частица испытывает отражение (когерентное рассеяние). Кроме того, при движении в этой области частица пересекает ряд кристаллографических плоскостей под малыми углами, вследствие чего ее скорость испытывает значительные аperiодические колебания (рис.2). В результате такое движение элек-

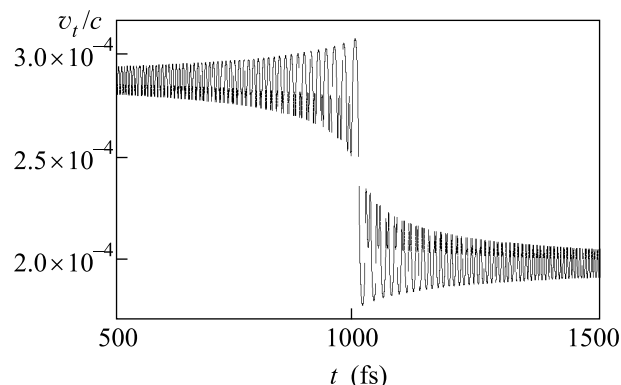


Рис.2. Зависимость поперечной скорости частицы от времени  $t$  (фемтосекунды). Момент  $t = 0$  соответствует входу частицы в кристалл

тронов и позитронов при объемном отражении сопровождается интенсивным гамма-излучением.

В прямом кристалле с плоскостной ориентацией характер излучения электронов и позитронов зависит в основном от угла влета относительно кристаллографических плоскостей. В случае, когда  $\theta \gg \theta_b = U/m_e c^2$  ( $U$  – потенциальный барьер,  $m_e$  – масса покоя электрона и  $c$  – скорость света), излучение имеет характер когерентного тормозного, а когда  $\theta \ll \theta_b$ , излучение будет подобно синхротронному (магнитотормозному). Тип излучения может быть также описан параметром  $\rho = 2\gamma^2 \langle v_t^2 - v_m^2 \rangle / c^2$ , где  $\langle v_t^2 - v_m^2 \rangle$  – среднеквадратичное отклонение поперечной скорости

<sup>1)</sup> e-mail: Chesnokov@ihep.ru, Maishev@ihep.ru

от ее средней величины. Тогда когерентное тормозное и синхротронно-подобное излучения соответствуют случаям, когда величины  $\rho \ll 1$  и  $\rho \gg 1$ . При промежуточном случае,  $\rho \sim 1$ , один тип излучения преобразуется в другой. В прямых тонких кристаллах характер излучения частицы определяется входным углом  $\theta$ , который практически сохраняется при движении частицы.

Однако в изогнутом кристалле угол относительно кристаллографических плоскостей меняется при движении частицы, вследствие чего тип излучения также меняется. Далеко от точки касания, в области  $\rho \ll 1$ , излучение частицы будет когерентным тормозным [7]. При приближении частицы к точке касания параметр  $\rho$  увеличивается. Оценим параметр  $\rho$  вблизи точки касания. Если радиус кривизны значительно больше критического радиуса каналирования [8], то для позитронов средний угол объемного отражения будет:  $\theta_{vr} \approx \sqrt{2}\theta_{ch}$ , а для электронов  $\theta_{vr} \approx \theta_{ch}$ , где  $\theta_{ch} = \sqrt{2U/E}$  – критический угол каналирования в прямом кристалле и  $E$  – полная энергия частицы. Тогда для позитронов и электронов величины параметра  $\rho$  будут порядка  $\gamma\theta_b$  и  $0.5 \cdot \gamma\theta_b$ , соответственно, и излучение будет подобно синхротронному при условии  $\gamma \gg 1/\theta_b$  для позитронов и  $\gamma \gg 2/\theta_b$  для электронов. Значению  $\rho = 1$  для позитронов и электронов соответствуют энергии 12 и 24 ГэВ для кристалла кремния плоскостной ориентации (110) и (111).

Известно, что случай движения частицы, когда  $\rho \sim 1$ , наиболее сложен для адекватного математического описания процесса излучения. В работе [5] вычисления параметров излучения в этом случае основывались на зависимостях из работы [6]. Эти вычисления предсказывают значительное увеличение интенсивности излучения для коротких кристаллов кремния  $\sim 1$  мм по сравнению с аморфным или разориентированным образцом такой же толщины.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию излучения позитронов энергии 10 ГэВ в изогнутом кремниевом кристалле при объемном отражении. В ней приводится также сравнение полученного энергетического спектра излучения с расчетным.

Эксперимент проводился на 22 канале ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ. На рис.3 показана принципиальная схема эксперимента.

Пучок позитронов энергии 10 ГэВ проходит через сцинтилляционный счетчик  $S_1$  и после фокусировки квадрупольными линзами  $Q_1$  и  $Q_2$  попадает на калориметр  $C_1$  или  $C_2$  (при отключенном магните  $M$ ). Кремниевый монокристалл Si установлен

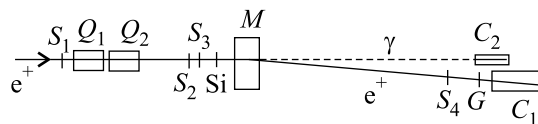


Рис.3. Схема эксперимента

на одноосевом гониометре. Для этого эксперимента используется квазимозаичный кристалл кремния диаметром 15 мм и толщиной 0.65 мм по направлению пучка. Этот кристалл был изготовлен в Санкт-Петербургском институте ядерной физики по технологии, описанной в работе [9]. Кристалл плоскостной ориентации (111) с радиусом кривизны 1.3 м был выбран в качестве рабочего. Два тонких сцинтилляционных счетчика, стоящих близко один от другого, имеют вид прямоугольника в поперечной плоскости с размерами  $0.5 \times 15$  мм в горизонтальном и вертикальном направлениях относительно оси пучка. Эта область соответствует рабочей области изогнутого кристалла. Магнит  $M$  разделяет в пространстве гамма и позитронный пучки после взаимодействия позитронов с кристаллом. Энергии гамма-квантов и позитронов были измерены с помощью калориметров  $C_1$  и  $C_2$ . Годоскоп  $G$  установлен перед калориметром  $C_1$  и служит для измерения поперечной координаты каждого позитрона. Его пространственное разрешение около 5 мм. Сцинтилляционный счетчик  $S_1$  используется для включения годоскопа.

Калориметр  $C_1$  сделан из стекла со свинцом и имеет поперечное сечение в виде квадрата со стороной 20 см. Калориметр  $C_2$  представляет собой кристалл ВГО длиной по пучку 15 см, имеющий правильный шестиугольник в поперечном сечении со стороной 2.55 см (с диаметром описанной окружности 5.1 см).

Предварительная ориентация монокристалла была произведена с помощью протонного пучка 50 ГэВ в 22 канале. На годоскопе  $G$  наблюдался протонный пучок небольшого размера (порядка нескольких миллиметров). Несмотря на невысокое разрешение годоскопа, явно наблюдался эффект каналирования для небольшой фракции пучка  $\sim 10\%$ , то есть кристалл был ориентирован по пучку.

Основные измерения проводились с позитронным пучком энергии 10 ГэВ полной интенсивности  $\sim 10^4$ . Фракция позитронов в пучке составляла около 95%. Для каждой частицы, проходящей через счетчики  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ , регистрировались сигналы с калориметров  $C_1$ ,  $C_2$  и годоскопа для дальнейшего анализа данных.

Первоначально была найдена ориентационная зависимость интенсивности излучения. Для измерений были выбраны события со следующими сигналами в детекторах:

- 1) энергия потерь в  $C_2$  соответствует  $\gamma$ -кванту энергией от 100 до 500 МэВ;
- 2) энергия потерь в  $C_1$  более 5 ГэВ;
- 3) горизонтальный размер пучка позитронов на годоскопе менее  $\pm 10$  мм.

Первое условие соответствует ожидаемой энергии  $\gamma$ -квантов в процессе объемного отражения. Второе условие используется для регистрации высокоэнергетичных позитронов и третье соответствует тому, что частицы имеют угол расходимости меньше чем  $\pm 0.1$  мрад.

На рис.4 представлены результаты этих измерений. Можно увидеть, что ориентационная кривая

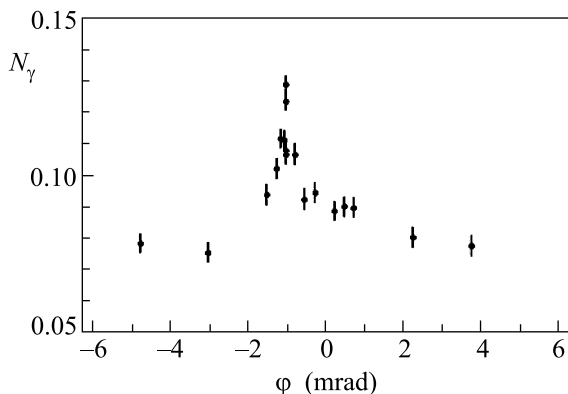


Рис.4. Измеренная ориентационная зависимость выхода  $\gamma$ -квантов

имеет явный максимум. В максимуме количество  $\gamma$ -квантов превышает в 1.7 раз по сравнению с разориентированным случаем. Однако это отношение в несколько раз меньше, чем ожидалось. Этот факт мы объясняем фоном, образующимся из-за вещества в канале, через которое проходят позитроны и  $\gamma$ -кванты до регистрации (несколько воздушных зазоров и вакуумных фольг). Заметим, что величина  $\varphi = 0$  соответствует найденной ориентации кристалла для режима каналирования протонного пучка. Из рис.4 следует, что максимум ориентационной зависимости имеет место при  $\varphi = -1$  мрад вместо предсказанной величины  $-(0.3 \div 0.4)$  мрад, что объясняется небольшим отличием в геометрии прохождения позитронного и протонного пучков.

В максимуме ориентационной кривой ( $\varphi = -1$  мрад) были произведены измерения  $\gamma$ -спектра. Кроме этого  $\gamma$ -спектр был измерен в минимуме ориентационной кривой. Оба измерения были проведены при упомянутых условиях, но для первого условия область измерения энергии  $\gamma$ -квантов расширена до 1 ГэВ. Результат вычитания двух спектров, показанный на рис.5а, объясняется наличием когерентного

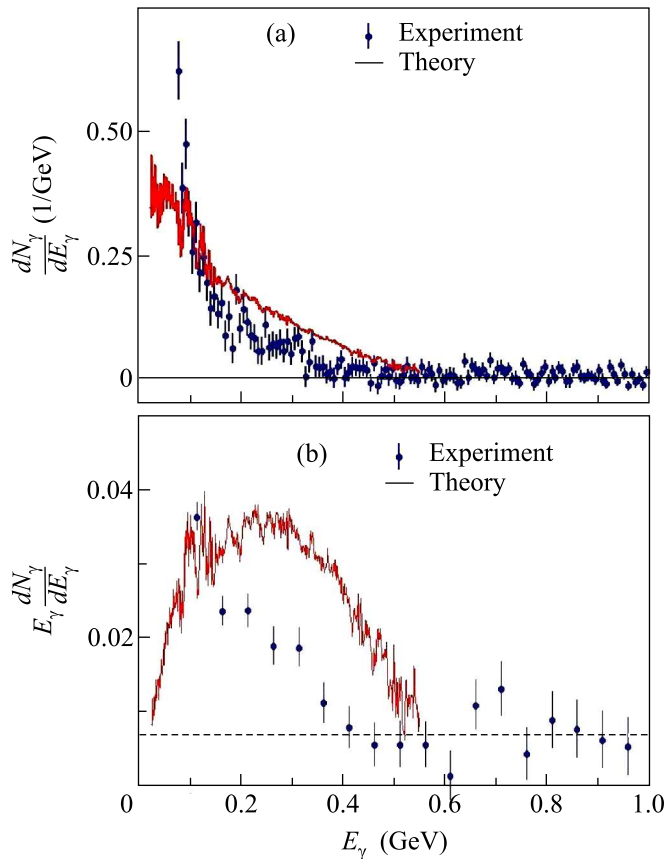


Рис.5. Когерентная часть спектра  $\gamma$ -квантов (а) и соответствующие дифференциальные потери энергии позитронов (б) в монокристалле кремния. Точки – экспериментальные данные, непрерывная кривая – расчет, штриховая линия – расчет для разориентированного кристалла

взаимодействия позитронного пучка с кристаллографическими плоскостями в процессе объемного отражения.

На рис.5б показаны измеренные потери энергии позитронов при излучении  $E_\gamma dN_\gamma/dE_\gamma$  в изогнутом монокристалле. Этот результат был получен из разницы  $\gamma$ -спектров (рис.5а), однако для лучшей статистики каждые 7 каналов  $\gamma$ -спектра были объединены в один. На рисунке также показана расчетная теоретическая кривая. Наблюдается некоторое отличие между теоретическими и экспериментальными данными, которое можно объяснить утечками излучения с боковой поверхности калориметра  $C_1$ . Для сравнения штриховой линией приведена энергия излучения для аморфного кремния или разориентированного кристалла. Она практически не зависит от энергии  $\gamma$ -квантов, и ее величина равна  $\sim 0.007$ .

Представленные здесь экспериментальные результаты показывают значительное увеличение

интенсивности излучения при отражении позитронов в изогнутом кристалле в сравнении с аморфным случаем. Имеются также положительные отличия в сравнении с излучением при каналировании частиц, так как при отражении в изогнутом кристалле нет острой зависимости излучения от угла влета и знака заряда частицы. Поэтому данный вид излучения имеет перспективы для создания мощных пучков гамма-квантов и оптимизации позитронных источников на электронных ускорителях.

Работа поддержана Дирекцией ИФВЭ, Госкорпорацией Росатом и грантами Российского фонда фундаментальных исследований ## 07-02-00022-а, 08-02-01453-а, 08-02-13533-офи\_ц, 08-02-91020-ЦЕРН.

1. A. M. Taratin and S. A. Vorobiev, *Phys. Letter A* **119**, 425 (1987).
2. V. A. Maisheev, *Phys. Rev. SP AB* **10**, 084701 (2007).
3. W. Scandale, D. A. Still, A. Carnera et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 154801 (2007).
4. W. Scandale, A. Vomiero, S. Baricordi et al., *Investigation of the volume reflection dependence of 400-GeV protons in a bent crystal on the crystal curvature*, Submitted in *Phys. Rev. Lett.*
5. Yu. A. Chesnokov, V. I. Kotov, V. A. Maisheev, and I. A. Yazynin, *Radiation of photons in process of charge particle volume reflection in bent single crystal*, JINST **3** P02005 (2008).
6. V. N. Baier, V. M. Katkov, and V. M. Strakhovenko, *Electromagnetic processes at high energies in oriented single crystals*, Singapore, Singapore World Scientific, 1998.
7. V. A. Arutunov, N. A. Kondrashov, V. M. Samsonov, and M. N. Strikhanov, *Nucl. Phys. B* **363**, 283 (1991).
8. E. N. Tsyganov, *Fermilab Preprint TM-682, TM-684* Batavia, 1976.
9. Y. M. Ivanov, A. A. Petrunin, and V. V. Skorobogatov, *JETP Lett.* **81**, 99 (2005).