



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2005–32
ОП, ОРИ

В.Т. Баранов, С. Беллуччи¹, В.М. Бирюков, Г.И. Бритвич,
С. Баласубраманиан¹, В. Гвиди², Дж. Джаннини¹, В.Н. Запольский, В.И. Котов,
А.Е. Кушниренко, В.А. Майшеев, Дж. Мартинелли², Е. Милан²,
В.А. Пикалов, В.И. Терехов, У. Уггерхой³, В.Н. Чепегин, Ю.А. Чесноков*

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЗИТРОНОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ОНДУЛЯТОРЕ

Направлено в «Письма в ЖЭТФ»

¹ ИЯЭ – Национальная лаборатория Фраскати, П.О. Бокс 13, 00044 Фраскати, Италия

² Департамент физики и ИЯЭ, Парадизо 12, I-44100 Феррара, Италия

³ Университет Орхуса, Дания

* Corresponding author: chesnokov@ihep.ru

Протвино 2005

Аннотация

Баранов В.Т., Беллуччи С., Бирюков В.М. и др. Первые результаты исследования излучения позитронов в кристаллическом ондуляторе: Препринт ИФВЭ 2005–32. – Протвино, 2005. – 6 с., 6 рис., библиогр.: 16.

В эксперименте впервые наблюдалось излучение при движении позитронов в периодически деформированном кристалле. Измерены спектры излучения в широком диапазоне энергии. Получено экспериментальное указание на существование ондуляторного пика в излучении, на качественном уровне подтвержденное расчетами. Кристаллические ондуляторы обеспечивают эквивалентное магнитное поле 1000 Т и период субмиллиметрового диапазона, и поэтому могут применяться для генерации рентгеновского и гамма-излучения, в сотни раз более жесткого, чем излучение в обычных ондуляторах.

Abstract

Baranov V.T., Bellucci S., Biryukov V.M. et al. First Results on Study of Radiation of Positrons in Crystal Undulator: IHEP Preprint 2005–32. – Protvino, 2005. – p. 6, fig. 6, refs.: 16.

In experiment radiation of positrons moving in periodically deformed crystal was observed for the first time. Spectra of radiation are measured in a wide range of energy. The experimental indication on existence of undulator peak in radiation was obtained at a qualitative level confirmed by calculations. Crystal undulators provide an equivalent magnetic field of 1000 T and the period of a submillimetric range and consequently can be applied to generation of x-ray and gamma-ray, in hundreds times of more rigid, than radiation in usual undulators.

PACS numbers: 41.60.-m,07.85.-m,61.85.+p

В настоящее время для исследований в биологии, медицине, материаловедении и многих других областях науки и техники применяются интенсивные рентгеновские пучки. Традиционный путь для получения таких пучков (с энергиями в несколько КэВ и выше) – это использование специальных магнитов – ондуляторов на ускорителях [1].

Энергия фотонов, генерируемых в ондуляторе, пропорциональна квадрату Лоренц-фактора частицы γ и обратно пропорциональна периоду ондулятора L : $\hbar\omega = 2\pi\hbar\gamma^2 c/L$. В обычном электромагнитном ондуляторе период достигает нескольких сантиметров, таким образом, при энергии пучка в ускорителе около 1 ГэВ получаются фотоны с энергией около 1 КэВ.

Увеличить энергию пучков очень важно для целого ряда исследований. Идея создания ондуляторов на основе кристаллов, в которых самой природой создано интенсивное периодическое электрическое поле, активно обсуждалась в последние четверть века [2–9]. В работе [10] мы впервые показали возможность создания такого устройства на практике.

Предлагаемый ондулятор представляет собой кристаллическую пластинку (толщиной около 0.5 мм) с нанесенными на ее сторонах специальными канавками с периодом 0.1–1 мм. Эти канавки вызывают периодические деформации пластины (с амплитудой до 100 и более ангстрем), близкие к синусоидальной форме. Первые опытные образцы кристаллического ондулятора уже изготовлены, и наличие волнообразного изгиба было установлено с помощью рентгеновского анализа [11]. Проведены также решающие тесты на протонном пучке, доказывающие «прозрачность» кристаллоондуляторов для прохождения высокоэнергетичных частиц в режиме каналирования [12]. В прошедшем сеансе (осень–2004) на ускорителе У-70 ИФВЭ впервые наблюдалось излучение фотонов позитронами из кристаллического ондулятора.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Позитронный пучок с центральным импульсом 10 ГэВ/с попадает на кристаллический ондулятор. Гамма и позитронный пучки (частично сбросивший энергию из-за взаимодействия в ондуляторе) разделяются с помощью горизонтального магнита. Гамма-кванты из ондулятора регистрируются электромагнитным калориметром G1. В эксперименте в качестве этого детектора использовались 2 калориметра (не одновременно) на основе кристаллов из алюмината иттрия $YAlO_3$ и BGO. Иттриевый калориметр был адаптирован для регистрации фотонов в области 60 КэВ – 2 МэВ, BGO детектор мог регистрировать гамма-кванты с энергиями от нескольких МэВ и выше.

Электромагнитный калориметр G2 – «Шашлык» [13] регистрировал позитроны. Триггером было совпадение счетчиков S1S3. Кроме того, велась запись амплитуды ионизационных потерь в счетчике S2.

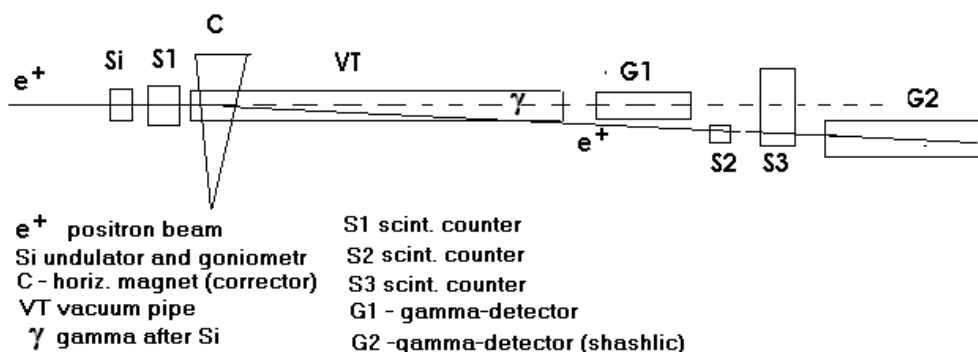


Рис. 1. Схема эксперимента по наблюдению излучения из кристаллического ондулятора.

Позитронный пучок был получен при энергии 10 ГэВ. При сбросе в среднем $(3-4)10^{11}$ протонов на алюминиевую мишень в канале было около 10^5 позитронов. Энергетический спектр позитронного пучка измерялся калориметром «Шашлык» с разрешением несколько процентов.

Специфика задачи заключается в необычной геометрии источника. Он имеет малые размеры в поперечном направлении (~ 0.3 мм) и значительную протяженность вдоль пучка несколько миллиметров, так как требуется порядка десяти ондуляторных периодов с шагом 0.5 мм и амплитудой несколько десятков ангстрем. Ранее эксперименты по излучению при каналировании в кристаллах проводились с короткими мишенями (менее 1 мм).

Поэтому первая проблема заключается в идентификации источника, так как только малая доля частиц пучка пересекает кристалл ($\sim 1/500$). Мы использовали тонкий сцинтиллятор шириной 500 мкм в качестве триггера, дистанционно перемещали кристалл поперек пучка, поэтому легко обнаружили источник излучения. Ориентационная кривая, показанная на рис. 2, доказывает, что источником излучения является ориентированный кристалл.

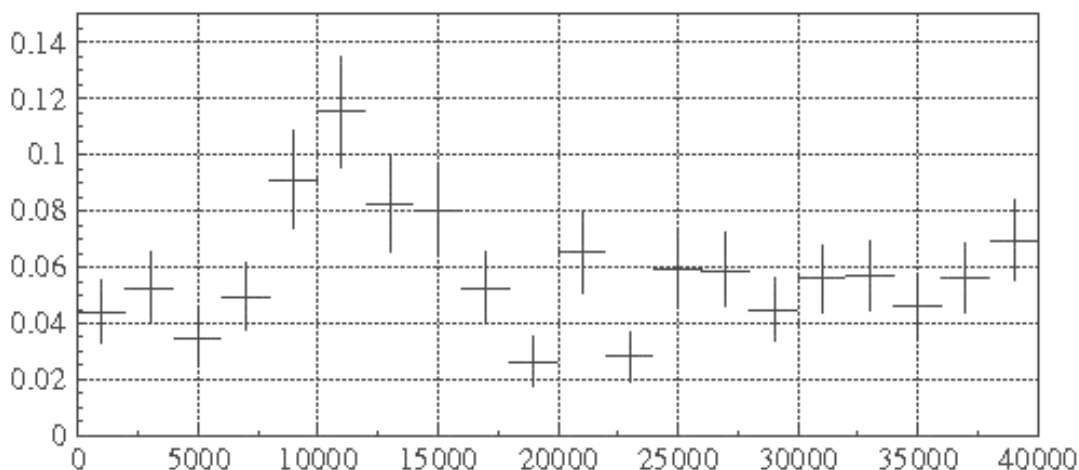


Рис. 2. Количество регистрируемых фотонов в зависимости от ориентации кристалла. Десять отчетов соответствуют углу 1 микрорадиан.

Вторая особенность, связанная с большой протяженностью кристалла, приводила к множественному рождению фотонов, искажая измеренные спектры. Поэтому более показательными были измерения излученной энергии. Эти измерения в сравнении с расчетами на рис. 3 в точности доказывают наличие процесса каналирования в деформированном кристалле. Только явление каналирования может быть ответственным за столь узкую ширину углового скана – доли миллирадиана.

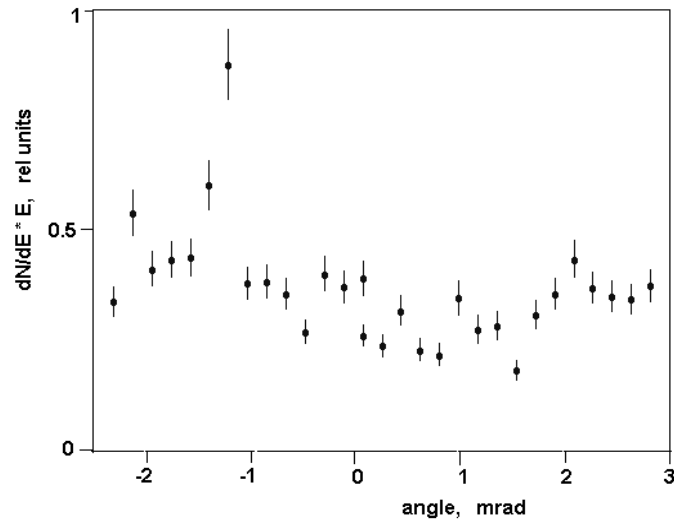


Рис. 3. Ориентационная кривая излученной энергии, измеренная BGO детектором.

На рис. 4 представлены спектры излучения фотонов в ориентированном и разориентированном кристаллах, а также фоновые спектры без кристалла, измеренные детектором BGO. Наблюдается увеличение спектральной плотности именно в области сотен МэВ, соответствующей каналированию.

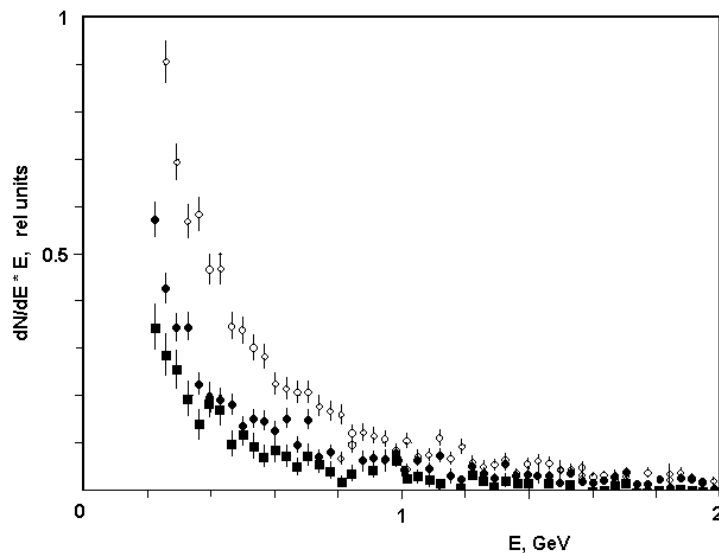


Рис. 4. Спектр излученной энергии в ориентированном (белые точки) и разориентированном кристалле (черные точки), а также фон без кристалла (квадраты), измеренный BGO детектором.

Сигнал на иттриевом детекторе, адаптированном на регистрацию ондуляторного излучения, подвержен большим искажениям. На рис. 5 показаны измеренные спектры излученной энергии в ориентированном и разориентированном кристаллах. Расчеты [14] показывают, что эти искажения обусловлены наличием сопровождающего когерентного излучения при каналировании, которое при достигнутой в канале 22 энергии позитронов 10 ГэВ создает фактор множественности около 3, заметно превышающий 1. Так что большая часть ондуляторных событий (0.5 фотонов на 1 позитрон) сопровождается несколькими фотонами более высокой энергии и регистрируется с искажениями.

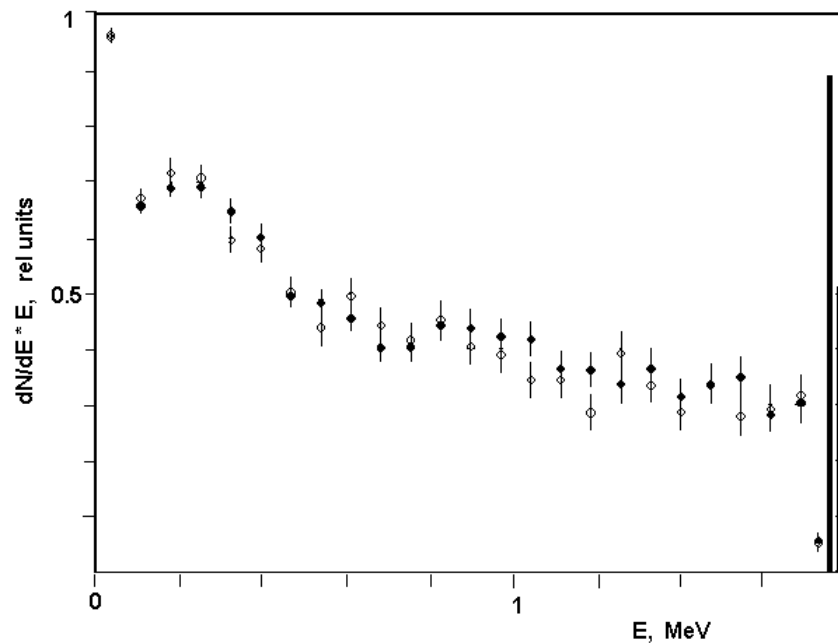


Рис. 5. Спектры излученной энергии в ориентированном кристалле (белые точки) и разориентированном (черные точки), измеренные иттриевым детектором. Два столбца справа показывают сигналы выше 2 МэВ (ориентированный/разориентированный случаи), в 50 раз уменьшенные в масштабе.

Однако, применяя специальный отбор событий с малыми потерями энергии первичного позитрона с помощью прецизионного спектрометра «Шашлык» (около 30% от всей статистики), мы получили спектры, которые являются экспериментальным указанием существования ондуляторного пика в районе энергии 1 МэВ. Эти данные представлены на рис. 6 в сравнении с результатами расчета, подтверждающими наличие пика излучения при этой энергии. Это сравнение возможно только на качественном уровне, поскольку не учитывалась аппаратная функция детектора (ограниченная эффективность регистрации гамма и комптоновский хвост).

Используемая схема установки будет модернизирована в следующих сеансах работы ускорителя. В частности, планируется использовать узкий коллиматор для ограничения углового распределения гамма-излучения. Также предполагается применить методику комптоновского рассеивателя [15] с целью восстановления неискаженного спектра гамма. Предполагается также оптимизировать кристаллы в соответствии с рекомендациями [14].

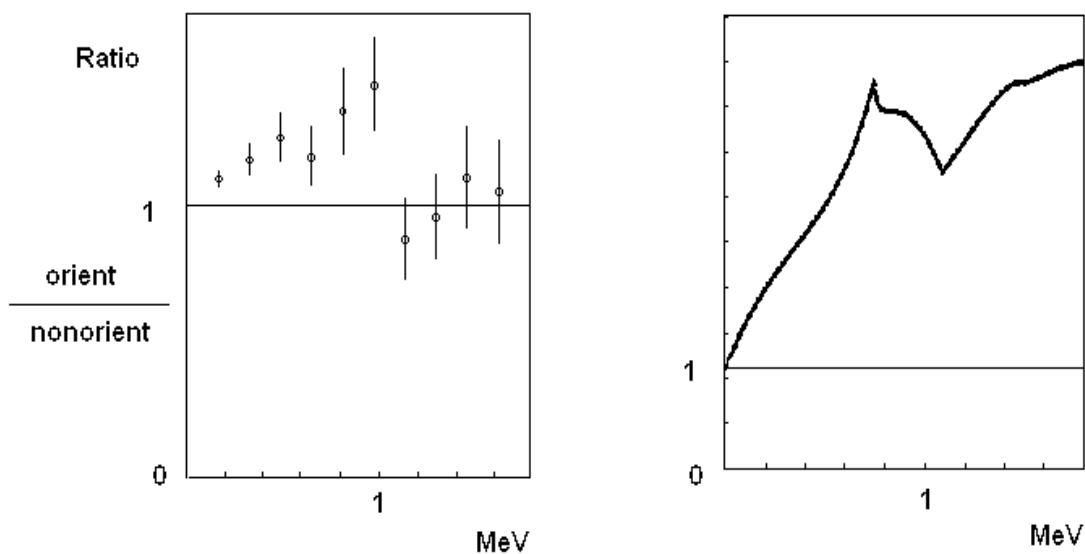


Рис. 6. Экспериментальное указание на ондуляторный пик (слева) и результаты расчета (справа). Показаны спектры излученной энергии в виде отношения ориентированный/разориентированный кристаллы.

Заключение

В эксперименте впервые наблюдалось излучение позитронов в периодически деформированном кристалле. В тяжелых фоновых условиях из-за процесса множественного рождения фотонов мы получили экспериментальное указание на существование ондуляторного пика в излучении, на качественном уровне подтвержденного расчетами. Для продолжения этих измерений в чистых условиях планируется несколько мероприятий: оптимизация установки, канала частиц и кристаллов. Предполагается также продолжить эти исследования в других ускорительных центрах при других условиях [11, 16].

Авторы благодарны А.М. Зайцеву и Н.Е. Тюрину за внимание и поддержку работы. Работа поддержана также грантами РФФИ 05-02-17622 и 05-02-08085 офи-э.

Список литературы

- [1] Beam Line, v. 32, no. 1 (2002).
- [2] V.V. Kaplin, S.V. Plotnikov, and S.A. Vorobiev. Zh. Tekh. Fiz. 50, 1079 -1081 (1980).
- [3] V.G. Baryshevsky, I.Ya. Dubovskaya, and A.O. Grubich. Phys. Lett., 77A, 61 -64 (1980).
- [4] H. Ikezi, Y.R. Lin-Liu, and T. Ohkawa. Phys. Rev., B30, 1567 -1568 (1984).

- [5] S.A. Bogacz and J.B. Ketterson. J. Appl. Phys. 60, 177 -188 (1986). S.A. Bogacz, Particle Accelerators, 42 (1993) 181.
- [6] G.B. Dedkov. Phys.Stat.Sol. (b) 184, 535 -542 (1994).
- [7] A.V. Korol, A.V. Solovev, and W. Greiner. Intern. Journal of Mod. Phys., 8, 49 -100 (1999).
- [8] U. Mikkelsen and E. Uggerhoj. Nucl. Instr. and Meth., B160, 435 - 439 (2000).
- [9] R.O. Avakian, K.T. Avetyan, K.A. Ispirian and E.G. Melikyan. Nucl. Instr. and Meth., A492, 11 - 13 (2002).
- [10] S. Bellucci, S.Bini, V.M.Biryukov et al. Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 034801.
- [11] S. Bellucci, S.Bini, G.Giannini et al. Phys. Rev. ST AB **7** (2004) 023501.
- [12] A.G. Afonin, V.T.Baranov, S.Bellucci et al. Nucl Instr Meth **B234** (2005) 122.
- [13] G.Britvich et al. Shashlyk calorimeter.
- [14] S.Bellucci and V.A.Maisheev. Talk on Workshop "Relativistic Channeling and Related Coherent Phenomena" July 25-28, 2005, INFN, Frascati.
- [15] S.V.Blazhevich, G.L.Bochek, A.P.Potylitsin et al. Zhurnal Tech. Phys. **38** (1993) 374.
- [16] J.U.Andersen, S.P.Moller, A.H.Sorensen et al. Electromagnetic processes in strong crystalline fields, CERN note: CERN-SPSC-2005-030, Sep 2005.

Рукопись поступила 26 сентября 2005 г.

В.Т. Баранов и др.

Первые результаты исследования излучения позитронов в кристаллическом ондуляторе.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы *Word*.

Редактор Н.В.Ежела .

Подписано к печати 03.10.2005. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.

Печ.л. 0,75. Уч.–изд.л. 0,7. Тираж 90. Заказ 93. Индекс 3649.

ЛР №020498 от 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142284, Протвино Московской обл.

