

## Первые результаты исследования излучения позитронов в кристаллическом ондуляторе

В. Т. Баранов, С. Беллуччи<sup>+</sup>, В. М. Бирюков, Г. И. Бритвич, С. Баласубраманиан<sup>+</sup>, В. Гвиди\*, Дж. Джаннини<sup>+</sup>,  
В. Н. Запольский, В. И. Котов, А. Е. Кушниренко, В. А. Майшеев, Дж. Мартинелли\*, Е. Милан\*, В. А. Пикалов,  
В. И. Терехов, У. Уггерхой<sup>∇</sup>, В. Н. Чепегин, Ю. А. Чесноков<sup>1)</sup>

Институт физики высоких энергий, 142281 Протвино, Россия

<sup>+</sup> ИИФН – Национальная лаборатория Фраскати, 00044 Фраскати, Италия

\* Департамент физики и ИИФН, 1-44100 Феррара, Италия

<sup>∇</sup> Aarhus University, 8000 Aarhus C., Denmark

Поступила в редакцию 13 октября 2005 г.

В эксперименте 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.

PACS: 07.85.–m, 41.60.–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  $\gamma$  и обратно пропорциональна периоду ондулятора  $L$ :  $\hbar\omega = 2\pi\hbar\gamma^2c/L$ . 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 [10] мы впервые показали возможность создания такого устройства на практике.

Предлагаемый ондулятор представляет кристаллическую пластинку Si с поверхностью (111), толщиной около 0.5 мм с нанесенными на ее сторонах специальными канавками с периодом 0.1–1 мм. Эти канавки вызывают периодические деформации плас-

тины (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 наблюдалось излучение фотонов позитронами из кристаллического ондулятора.

Схема эксперимента представлена на рис.1. Позитронный пучок с центральным импульсом 10 ГэВ/с

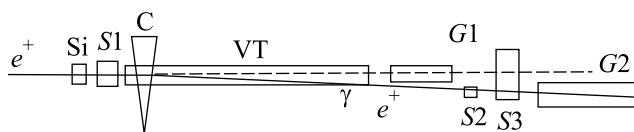


Рис.1. Схема эксперимента по наблюдению излучения из кристаллического ондулятора.  $e^+$  – позитронный пучок, Si – ондулятор и гониометр, C – горизонтальный магнит (корректор), VT – вакуумная трубка,  $\gamma$  – гамма-излучение на выходе ондулятора, S1–S3 – сцинтилляционные счетчики, G1, G2 – гамма-детекторы

попадает на кристаллический ондулятор. Гамма и позитронный пучки (частично сбросившие энергию из-за взаимодействия в ондуляторе) разделя-

<sup>1)</sup>e-mail: chesnokov@ihep.ru

ются 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.

Позитронный пучок был получен при энергии 10 ГэВ. При сбросе в среднем  $(3-4) \cdot 10^{11}$  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 ( $\div 0.3$  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.

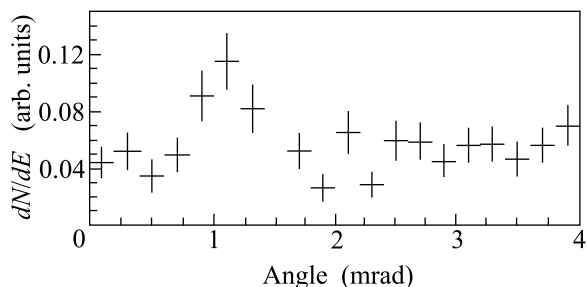


Рис.2. Количество регистрируемых фотонов в зависимости от ориентации кристалла. Десять отчетов соответствуют углу 1 мкрад

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 ответ-

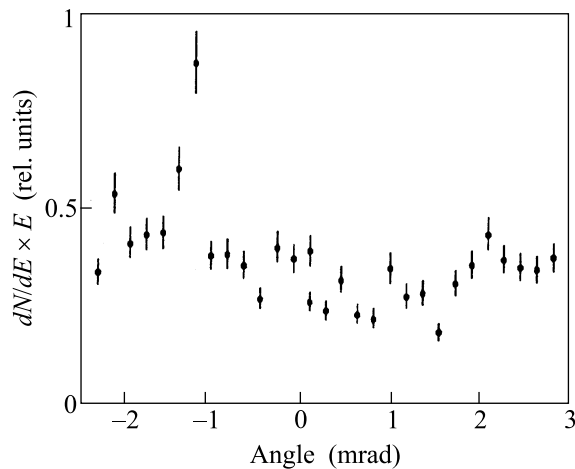


Рис.3. Ориентационная кривая излученной энергии, измеренная BGO детектором

ственным за столь узкую ширину углового скана, доли миллирадиана.

На рис.4 представлены спектры излучения фотонов в ориентированном и разориентированном кри-

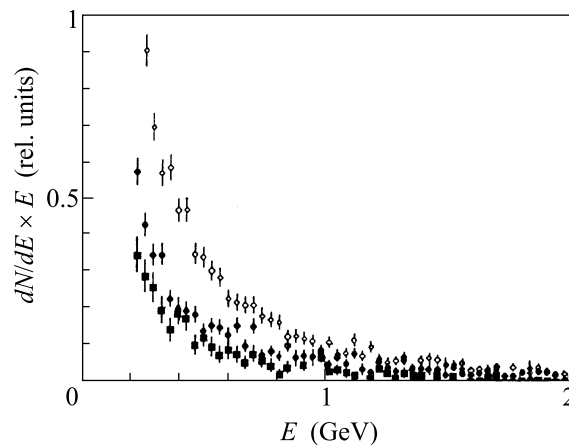


Рис.4. Спектр излученной энергии в ориентированном (белые точки) и разориентированном (черные точки) кристалле, а также фон без кристалла (квадраты), измеренный BGO детектором

сталлах, а также фоновые спектры без кристалла, измеренные детектором BGO. Наблюдается увеличе-

ние спектральной плотности именно в области сотен МэВ, соответствующей каналированию.

Сигнал на иттриевом детекторе, адаптированном на регистрацию ондуляторного излучения, подвержен большим искажениям. На рис.5 показаны изме-

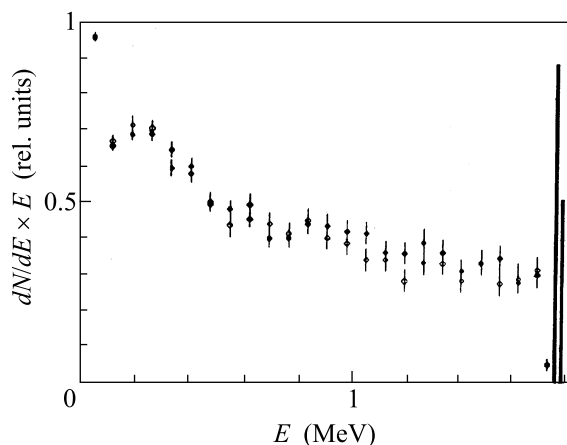


Рис.5. Спектры излученной энергии в ориентированном (белые точки) и разориентированном (черные точки) кристаллах, измеренные иттриевым детектором. Два столбца справа показывают сигналы свыше 2 МэВ (ориентированный/разориентированный случаи), в 50 раз уменьшенные в масштабе

ренные спектры излученной энергии в ориентированном и разориентированном кристалле. 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.

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.

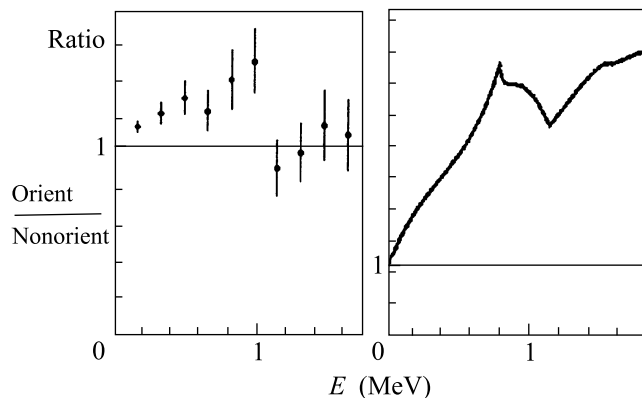


Рис.6. Экспериментальное указание на ондуляторный пик (слева) и результаты расчета (справа). Показаны спектры излученной энергии в виде отношения ориентированный/разориентированный кристаллы

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].

В эксперименте 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 Российского фонда фундаментальных исследований # 05-02-17622 и 05-02-08085офи-э.

1. Beam Line **32**, no. 1 (2002).
2. V. V. Kaplin, S. V. Plotnikov, and S. A. Vorobiev, Zh. Tekh. Fiz. **50**, 1079 (1980).
3. V. G. Baryshevsky, I. Ya. Dubovskaya, and A. O. Grubich, Phys. Lett. A **77**, 61 (1980).
4. H. Ikezi, Y. R. Lin-Liu, and T. Ohkawa, Phys. Rev. B **30**, 1567 (1984).
5. S. A. Bogacz and J. B. Ketterson, J. Appl. Phys. **60**, 177 (1986); S. A. Bogacz, Particle Accelerators **42**, 181 (1993).

6. G. B. Dedkov, *Phys. Stat. Sol. (b)* **184**, 535 (1994).
7. A. V. Korol, A. V. Solovov, and W. Greiner, *Intern. Journal of Mod. Phys.* **8**, 49 (1999).
8. U. Mikkelsen and E. Uggerhoj, *Nucl. Instr. and Meth. B* **160**, 435 (2000).
9. R. O. Avakian, K. T. Avetyan, K. A. Ispirian, and E. G. Melikyan, *Nucl. Instr. and Meth. A* **492**, 11 (2002).
10. S. Bellucci, S. Bini, V. M. Biryukov et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 034801 (2003).
11. S. Bellucci, S. Bini, G. Giannini et al., *Phys. Rev. ST AB* **7**, 023501 (2004).
12. A. G. Afonin, V. T. Baranov, S. Bellucci et al., *Nucl. Instr. Meth. B* **234**, 122 (2005).
13. G. S. Atoian, V. V. Issakov, O. V. Karavichev, *Nucl. Instrum. Meth. A* **531**, 467 (2004).
14. S. Bellucci and V. A. Maishev, *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., *ЖТФ* **38**, 374 (1993).
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.