

P1-2005-11

Ю. Н. Адищев¹, А. С. Артемов, С. В. Афанасьев,
В. В. Бойко², М. А. Воеводин, В. И. Волков,
А. С. Гоголев¹, В. Н. Забаев¹, А. Н. Ефимов,
Ю. В. Ефремов², А. Д. Коваленко, Ю. Л. Пивоваров¹,
А. П. Потылицын¹, С. В. Романов, Ш. З. Сайфулин,
Е. А. Силаев², А. М. Таратин*, С. П. Тимошенко³,
С. Р. Углов¹

**ОБНАРУЖЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УМЕРЕННО
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ В КРИСТАЛЛАХ**

Направлено в журнал «Письма в ЖЭТФ»

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики, Томский политехнический университет

² Институт физико-технических проблем, Дубна

³ Московский государственный институт электронной техники, Зеленоград

* E-mail: taratin@sunhe.jinr.ru

Адищев Ю. Н. и др.

P1-2005-11

Обнаружение параметрического рентгеновского излучения умеренно релятивистских протонов в кристаллах

Впервые зарегистрированы спектральные максимумы параметрического рентгеновского излучения при взаимодействии умеренно релятивистских протонов с различными кристаллами. Положения максимумов излучения в спектрах зависят от угла ориентации кристалла и соответствуют теоретическим значениям. Измерения выполнены с кристаллами кремния и графита на пучке протонов 5 ГэВ нуклотрона ЛВЭ ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005

Adishev Yu. N. et al.

P1-2005-11

Observation of Parametric X-Ray Radiation from Moderately Relativistic Protons in Crystals

Spectral maxima of parametric X-ray radiation from moderately relativistic protons interacting with different crystals have been observed for the first time. The radiation maxima positions in the spectra depend on the crystal angle and correspond to the theoretical values. The measurements have been performed with silicon and graphite crystals at the Nuclotron (LHE, JINR) external beam of protons with the energy 5 GeV.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005

Параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) быстрых заряженных частиц в кристаллах возникает в результате дифракции поля виртуальных фотонов быстрой заряженной частицы на кристаллографических плоскостях. После теоретических предсказаний [1–3] параметрическое рентгеновское излучение было обнаружено и исследовано на пучках электронов различной энергии [4, 5].

Характеристики ПРИ заряженной частицы в кристалле определяются ее скоростью v и не зависят от знака заряда и массы частицы. Увеличение заряда Z частицы должно приводить к росту интенсивности ПРИ пропорционально Z^2 [6]. Проверка указанных положений теории ПРИ и явилась целью настоящих и планируемых экспериментов на пучках релятивистских ядер. Соотношение, определяющее энергию квантов ПРИ, имеет вид [7]

$$E_n = n \frac{2\pi\hbar c}{d} \frac{\beta \sin \theta_B}{1 - \sqrt{\varepsilon} \beta \cos \theta_D \cos \theta_y}, \quad (1)$$

где n — порядок дифракции; d — межплоскостное расстояние; θ_B — угол ориентации плоскостей кристалла относительно направления скорости частицы (см. рис. 1); θ_D , θ_y — углы, определяющие направление регистрации излучения; $\beta = v/c$; ε — диэлектрическая проницаемость материала мишени. Детектор расположен под углом θ_D в плоскости дифракции и смещен на угол θ_y в плоскости, перпендикулярной плоскости дифракции. Плоскость дифракции определяется векторами импульса частицы и нормали к плоскостям кристалла. Для ультрарелятивистских частиц ($\beta \approx 1$) в рентгеновском диапазоне частот ($\varepsilon \approx 1$) формула (1) с высокой точностью совпадает с условием Брэгга–Вульфа для дифракции реальных фотонов в кристалле.

Единственная попытка исследования ПРИ тяжелых заряженных частиц была предпринята в 1992 г. на пучке протонов с энергией 70 ГэВ в ИФВЭ [8]. Однако применявшийся для спектральных измерений сцинтилляционный детектор обладал низким энергетическим разрешением, что не позволило зарегистрировать линию ПРИ в спектре излучения. Тем не менее наблюдавшуюся зависимость интегрального выхода излучения в рассматриваемом энергетическом диапазоне от угла вылета фотонов авторы объясняли регистрацией ПРИ протонов.

В нашей работе дается первое убедительное свидетельство существования ПРИ для тяжелых частиц. Впервые удалось зарегистрировать линии ПРИ в спектрах для релятивистских протонов. Работы выполнялись на выведенном из нуклотрона ЛВЭ ОИЯИ пучке протонов с энергией 5 ГэВ.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Пучок протонов падал на кристалл, ориентированный большой гранью под углом $\theta_B = 22,5^\circ$ к оси

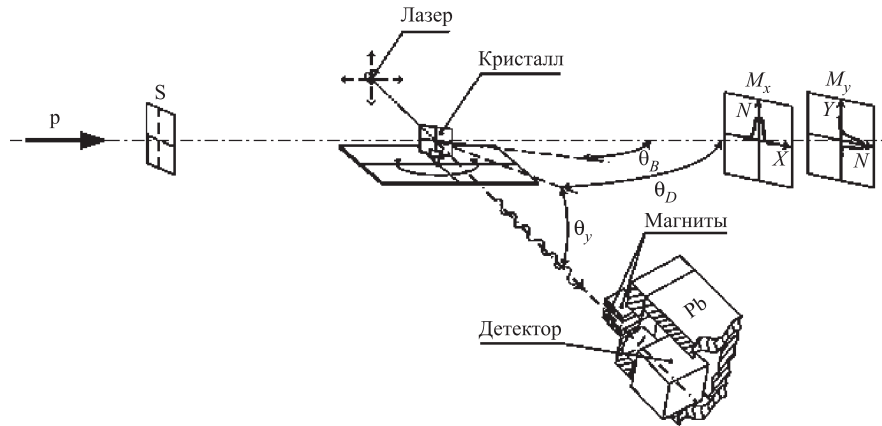


Рис. 1. Схема эксперимента: S — ионизационный монитор пучка; M_x, M_y — ионизационные профилометры пучка; θ_B — угол ориентации кристалла; θ_D, θ_y — углы детектирования

пучка. Большая грань кристалла была параллельна плотноупакованным кристаллографическим плоскостям. Кристалл устанавливался вертикально, поэтому плоскость дифракции совпадала с горизонтальной плоскостью. Регистрация фотонов возникающего параметрического рентгеновского излучения производилась полупроводниковым кремниевым детектором, размещенным под углом $\theta_D = 2\theta_B = 45^\circ$ на расстоянии $L = 480$ мм по горизонтали от мишени. Кроме того, детектор был смещен вниз от плоскости дифракции на 72 мм, чтобы оказаться в максимуме углового распределения ПРИ, отстоящем от этой плоскости на угол $\theta_y = 1/\gamma = 0,158$, где γ — релятивистский фактор протонов. Рабочая площадь детектора составляла 12 мм^2 . В эксперименте использовалась брэгговская геометрия.

Падающий на кристалл пучок мониторировался ионизационной камерой S . Ионизационные профилометры M_x, M_y давали распределение частиц в пучке. Характерные размеры пучка составляли $\sigma_x = 3$ мм, $\sigma_y = 6$ мм. В начале измерений было проведено облучение сборных мишеней из тонких пластин алюминия и полиэтилена в месте расположения кристалла и ионизационной камеры. По измерениям наведенной в мишенях радиоактивности была проведена калибровка ионизационного монитора.

Калибровка полупроводникового детектора производилась по линиям характеристического излучения, возбуждаемого в медной мишени протонным пучком. На рис. 2 показан измеренный спектр характеристического излучения атомов меди. Распределение фитировалось суммой гауссовских распределений. Энергетическое разрешение детектора в эксперименте на K_α -линии

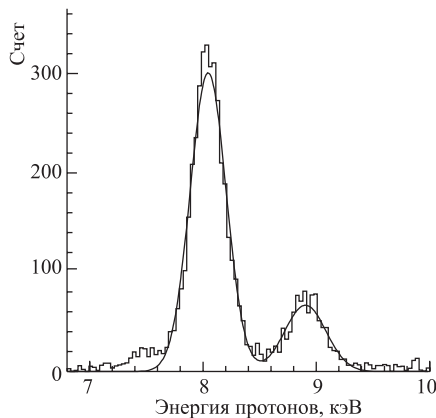


Рис. 2. Калибровочный спектр с максимумами характеристического излучения меди, возбуждаемого в медной мишени протонным пучком. Показана также кривая фитирования спектра суммой двух гауссовских распределений

характеристического излучения меди с энергией 8,046 кэВ (первый пик) составило около 320 эВ (энергетическая ширина канала спектрометрического тракта 10,67 эВ).

На рис. 3 представлены спектры излучения, измеренные при взаимодействии протонного пучка с кристаллом (100) кремния. Кристалл представлял собой круглую пластину диаметром 100 мм и толщиной 300 мкм. Используемые в эксперименте образцы кристаллов кремния были приготовлены и протестированы в МИЭТ (Зеленоград). На рисунке максимумы, обозначенные α и β , отвечают характеристическому излучению атомов никеля корпуса детектора ($E_\alpha = 7,48$ кэВ, $E_\beta = 8,26$ кэВ), возбуждаемого частицами гало пучка (протоны, рассеянные в веществе по тракту транспортировки, и вторичные частицы). Рис. 3, а соответствует симметричному случаю $\theta = 0,5\theta_D = 22,5^\circ$. Положение максимума γ при $E_\gamma = 11,4$ кэВ согласуется со значением, рассчитанным по (1) $E_1 = 11,15$ кэВ, то есть соответствует ПРИ протонов на плоскостях (400) кремния. Как и ожидается из соотношения (1), линия ПРИ смещается в мягкую область с уменьшением угла ориентации кристалла — рис. 3, б для $\theta_B = 20^\circ$. Здесь $E_\gamma = 10,21$ кэВ, расчетное значение равно 9,96 кэВ. Выход ПРИ из кристалла кремния составляет $2,25 \cdot 10^{-6}$ и $2,05 \cdot 10^{-6}$ фотон/протон/ср соответственно. Эти величины получены из спектров после пересчета, учитывающего ослабление излучения на пути к детектору и его эффективность. Это примерно вдвое меньше теоретических оценок выхода ПРИ [7]. Суммарную погрешность, в основном определяемую быстродействием спектрометра, мы оцениваем в 40 %.

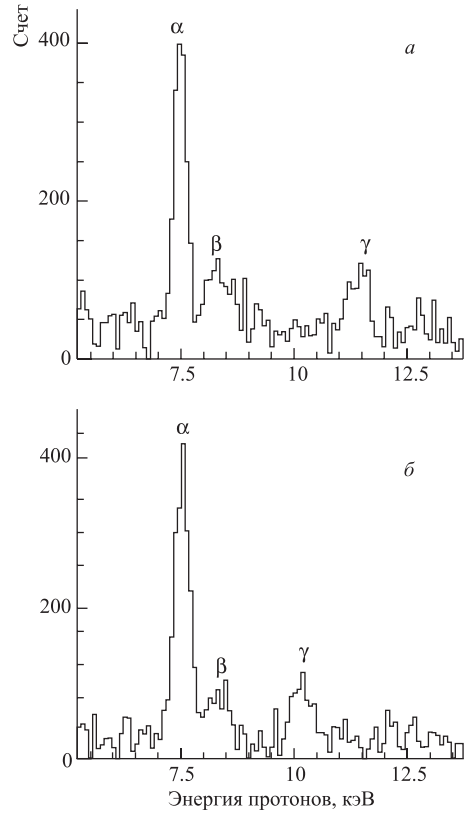


Рис. 3. Спектры излучения, измеренные при взаимодействии протонного пучка с кристаллом (100) кремния. Углы ориентации: а) $\theta_B = 22,5^\circ$; б) 20°

В работе [9] исследовалось ПРИ в кристалле кремния толщиной 20 мкм от электронов с энергией 4 МэВ, то есть релятивистский фактор частиц $\gamma_e = 8,83$ был близок нашему случаю для протонов $\gamma_p = 6,33$. Углы ориентации кристалла и регистрации излучения примерно соответствовали нашим, но геометрия эксперимента была иной – геометрия Лауэ. Кристаллографические (110) плоскости, на которых происходила дифракция поля виртуальных фотонов частиц, были перпендикулярны большим граням кристалла. Выход ПРИ электронов в эксперименте [9], измеренный в максимуме, с небольшим вкладом когерентного тормозного излучения и их интерференции составлял около $5 \cdot 10^{-6}$ фотон/электрон/ср, что более чем в два раза превышает выход ПРИ на протонах в нашем эксперименте. Так как условия двух экспериментов существенно отличаются, проведенное сопоставление носит только ориентировочный характер.

Ширина измеренных максимумов ПРИ превосходит разрешение детектора и определяется поперечными размерами протонного пучка на мишени, поскольку детектор располагался достаточно близко к мишени.

На рис. 4 представлены спектры излучения, измеренные на кристалле пиролитического графита толщиной 2 мм и размером 20·30 мм с углом моза-

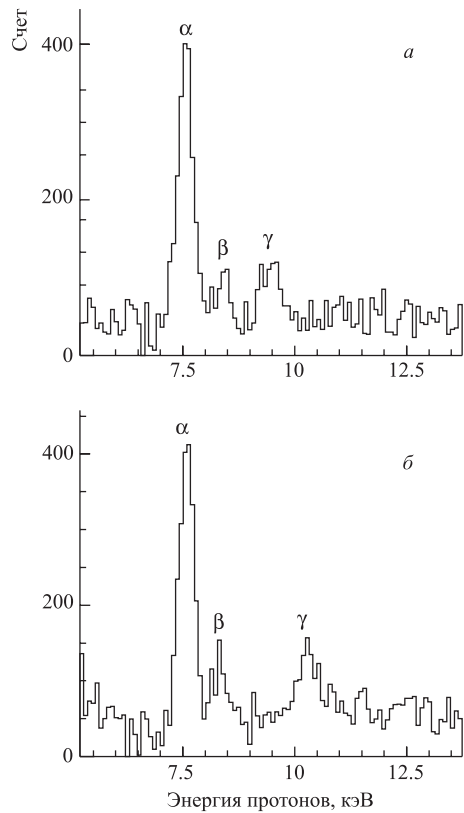


Рис. 4. Спектры излучения, измеренные при взаимодействии протонного пучка с кристаллом графита. Углы ориентации: а) $\theta_B = 22,5^\circ$; б) 25°

ичности около $0,4^\circ$. Здесь α и β также обозначают максимумы характеристического излучения атомов никеля корпуса детектора. В симметричном случае (а) максимум γ при $E_\gamma = 9,5$ кэВ отвечает максимуму второго порядка параметрического излучения протонов на плоскостях (002) графита. Излучение, соответствующее первому порядку дифракции ($E_1 = 4,51$ кэВ), поглощается в воздухе на пути к детектору. Чтобы наблюдать смещение максимума ПРИ, угол ориентации кристалла был увеличен с целью избежать наложения на

максимум β ХРИ никеля — рис. 4, б для $\theta_B = 25^\circ$. Здесь $E_\gamma = 10,35$ кэВ, что соответствует расчетному положению линии ПРИ — $E_2 = 9,97$ кэВ.

Зарегистрированные в спектрах линии, положение которых согласуется с расчетными для исследованных кристаллов кремния и графита при разной ориентации их на пучке, однозначно свидетельствуют о наблюдении в нашем эксперименте параметрического рентгеновского излучения умеренно релятивистских протонов. Результаты эксперимента подтверждают выводы теории о независимости спектральных характеристик ПРИ от знака заряда и массы частиц. Меньшая величина измеренного выхода ПРИ по сравнению с теоретическими оценками, а также с экспериментом на электронах [8] может быть связана с неконтролируемыми просчетами детектора при высокой фоновой нагрузке.

В дальнейших экспериментах значение выхода ПРИ для протонов будет уточняться. Планируется также проведение эксперимента на пучке ядер углерода с целью проверки Z^2 -зависимости выхода ПРИ.

Авторы выражают искреннюю благодарность И. Г. Григорьевой и А. А. Антонову за предоставленный для исследований образец высококачественного кристалла пиролитического графита, изготовленного ООО «Атомграф АГ» (www.optigraph.fta-berlin.de), а также В. П. Бамблевскому за проведенные измерения наведенной активности облученных протонным пучком мишеней с целью калибровки ионизационного монитора.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (грант #2140) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант #03-02017578).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тер-Микаэлян М. Л.* Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1969. С. 343.
2. *Гарибян Г. М., Ян Ши* // ЖЭТФ. 1971. Т. 1. С. 930.
3. *Барышевский В. Г., Феранчук И. Д.* // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. С. 944.
4. *Schagin A. V., Maruyama X. K.* // Accelerator-Based Atomic Physics Technique and Applications / Eds. S. M. Shafroth, J. C. Austin. New York, 1997. P. 279.
5. *Rullhusen P., Artru X., Dhez P.* Novel radiation sources using relativistic electrons. World Scientific, 1998.
6. *Pivovarov Yu. L., Kunashenko Yu. P., Vorobiev S. A.* // Radiation Effects. 1986. V. 100. P. 51.
7. *Nitta H.* // Phys. Rev. B. 1992. V. 45. P. 7621.

8. *Afanasenko V.P., Baryshevsky V.G., Zuevsky R.F. et al. // Phys. Letters A. 1992. V. 170. P. 315.*
9. *Morokhovskiy V.V., Frenzenberger J., Genz H. et al. // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. P. 3347.*

Получено 22 февраля 2005 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 31.03.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,44. Уч.-изд. л. 0,53. Тираж 385 экз. Заказ № 54846.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/