

Обнаружение параметрического рентгеновского излучения умеренно релятивистских протонов в кристаллах

Ю. Н. Адищев⁺, А. С. Артемов, С. В. Афанасьев, В. В. Бойко[×], М. А. Воеводин, В. И. Волков, А. С. Гоголев⁺,
В. Н. Забаев⁺, А. Н. Ефимов, Ю. В. Ефремов[×], А. Д. Коваленко, Ю. Л. Пивоваров⁺, А. П. Потылицын⁺,
С. В. Романов, Ш. З. Сайфулин, Е. А. Силаев[×], А. М. Таратин¹⁾, С. П. Тимошенков*, С. Р. Углов⁺

Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Московская обл., Россия

⁺НИИ Ядерной физики Томского политехнического университета, 634050 Томск, Россия

[×]Институт физико-технических проблем, 141980 Дубна, Московская обл., Россия

* Московский государственный институт электронной техники, 124498 Москва, Зеленоград, Россия

Поступила в редакцию 10 февраля 2005 г.

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 Нуклotronа ЛВЭ ОИЯИ.

PACS: 78.70.-g

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 величины 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

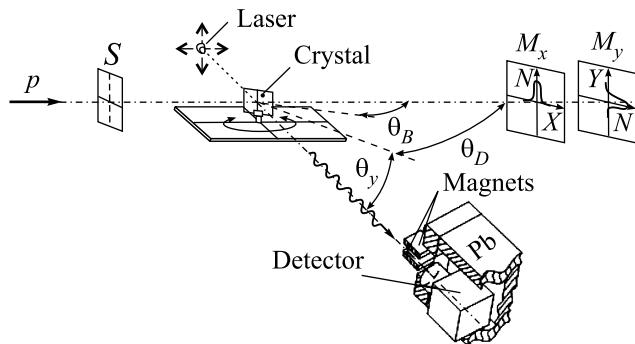


Рис.1. Схема эксперимента. S – ионизационный монитор пучка, M_x , M_y – ионизационные профилометры пучка, θ_B – угол ориентации кристалла, θ_D , θ_y – углы детектирования

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 применявшейся для спектральных измерений сцинтилляционный детектор обладал низким энерге-

¹⁾e-mail: taratin@sunhe.jinr.ru

тическим 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 убедительное свидетельство существования ПРИ для тяжелых частиц. Удалось зарегистрировать линии ПРИ в спектрах для релятивистских протонов. Работы выполнялись на выведенном из Нуклotronа 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 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 смешен 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 mm^2 . В эксперименте использовалась брэгговская геометрия.

Падающий на кристалл пучок определялся 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 гауссовых распределений. Энергетическое разрешение детектора в эксперименте на K_{α} -линии характеристического излучения меди с энергией 8.046 кэВ (первый пик) составило около 320 эВ (энергетическая ширина канала спектрометрического тракта 10.67 эВ).

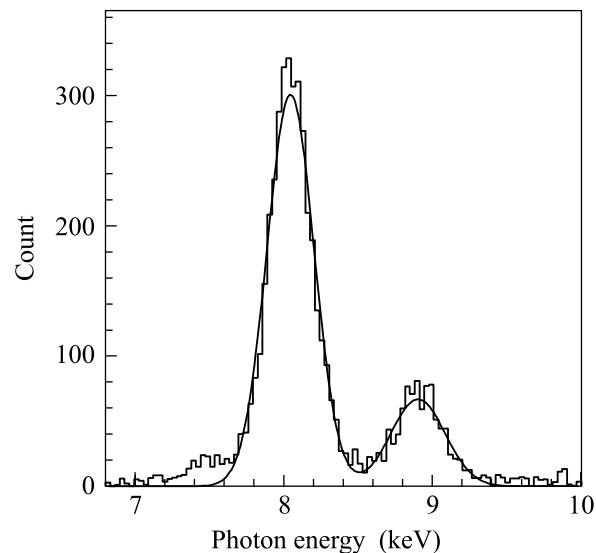


Рис.2. Калибровочный спектр с максимумами характеристического излучения меди, возбуждаемого в медной мишени протонным пучком. Показана также кривая фитирования спектра суммой двух гауссовых распределений

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. Использованные в эксперименте образцы кристаллов кремния были приготовлены и протестиированы 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.3а соответствует симметричному случаю $\theta_B = 0.5\theta_D = 22.5^\circ$. 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.3б 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/стераидиан, 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%.

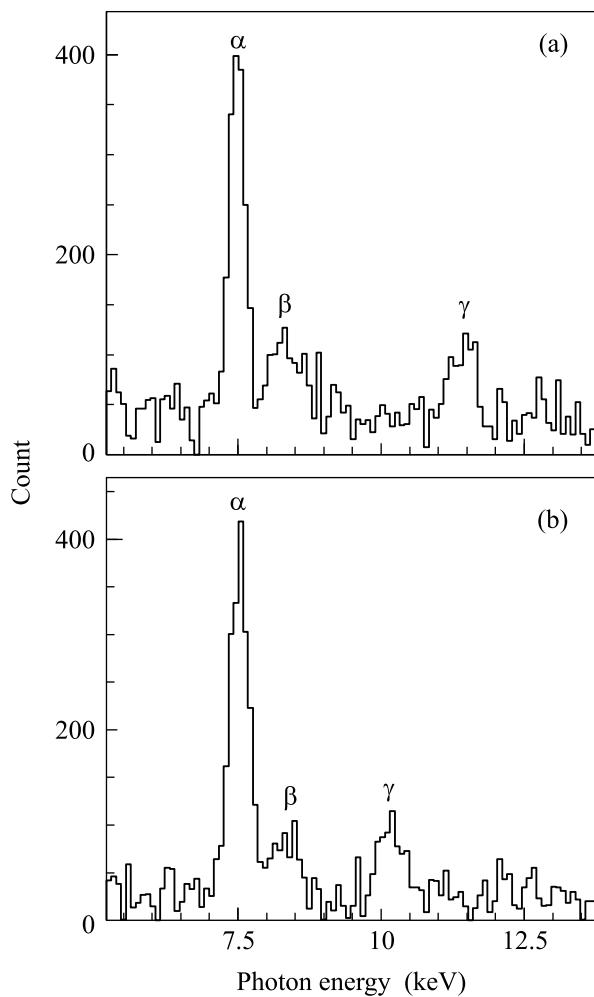


Рис.3. Спектры излучения, измеренные при взаимодействии протонного пучка с кристаллом (100) кремния. Углы ориентации $\theta_B = 22.5^\circ$ (а) и 20° (б)

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 Лауз. 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/стериadian, что более чем в два раза превышает выход ПРИ на протонах в нашем эксперименте. Так как условия двух экспериментов существенно отличаются, проведен-

ное 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 тол-

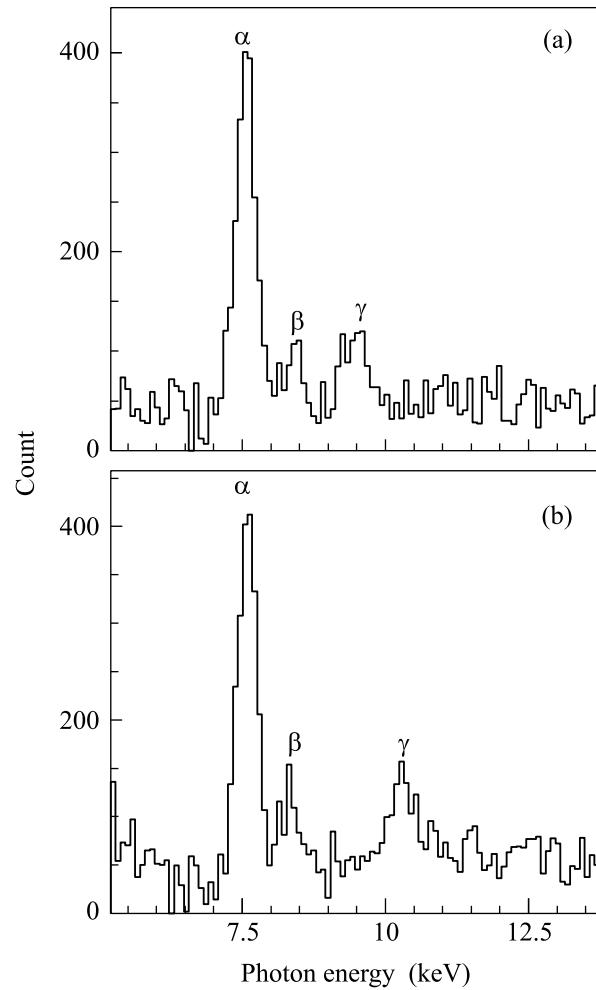


Рис.4. Спектры излучения, измеренные при взаимодействии протонного пучка с кристаллом графита. Углы ориентации $\theta_B = 22.5^\circ$ (а) и 25° (б)

шиной 2 мм и размером $20 \cdot 30 \text{ mm}^2$ с углом мозаичности около 0.4° . 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 дифрак-

ции ($E_1 = 4.51$ кэВ), поглощается в воздухе на пути к детектору. Чтобы наблюдать смещение максимума ПРИ, угол ориентации кристалла был увеличен с целью избежать наложения с максимумом β характеристического излучения никеля – рис.4б 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 не зависимости 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 загрузке.

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 мишней с целью калибровки ионизационного монитора.

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

1. М. Л. Тер-Микаэлян, *Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях*, Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1969, с. 343.
2. Г. М. Гарибян, Ян Ши, *ЖЭТФ* **61**, 930 (1971).
3. В. Г. Барышевский, И. Д. Феранчук, *ЖЭТФ* **61**, 944 (1971).
4. A. V. Schagin and X. K. Maruyama, in: *Accelerator-Based Atomic Physics Technique and Applications*, Eds. S. M. Shafroth and J. C. Austin, AIP Press, New York, 1997, p. 279.
5. P. Rullhusen, X. Artru, and P. Dhez, *Novel radiation sources using relativistic electrons*, Word Scientific, 1998.
6. Yu. L. Pivovarov, Yu. P. Kunashenko, and S. A. Vorobiev, *Radiation Effects* **100**, 51 (1986).
7. H. Nitta, *Phys. Rev. B* **45**, 7621 (1992).
8. V. P. Afanasenko, V. G. Baryshevsky, R. F. Zuevsky et al., *Phys. Lett. A* **170**, 315 (1992).
9. V. V. Morokhovskyi, J. Freudenberger, H. Genz et al., *Phys. Rev. B* **61**, 3347 (2000).