

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю.Н.Адищев¹⁾, В.Г.Барышевский, С.А.Воробьев¹⁾, В.А.Данилов,
С.Д.Пак²⁾, А.П.Потылицын¹⁾, П.Ф.Сафронов, И.Д.Феранчук, С.В.Черепица

Сообщается о первом экспериментальном наблюдении нового механизма образования рентгеновского излучения релятивистскими заряженными частицами в кристаллах – параметрического рентгеновского излучения Вавилова – Черенкова.

Известно, что равномерно движущийся заряд излучает фотоны при условии, что показатель преломления среды $n > 1$ (эффект Вавилова – Черенкова). В рентгеновском диапазоне частот, больших характерных атомных частот, $n < 1$ ¹ и эффект Вавилова – Черенкова отсутствует. Однако, как было показано Барышевским и Феранчуком²⁻⁴, явление, аналогичное эффекту Вавилова – Черенкова – так называемое параметрическое рентгеновское излучение Вавилова – Черенкова (ПРИ) – возникает при движении релятивистских заряженных частиц в кристаллах. Эффект обусловлен тем, что периодическое расположение атомов (ядер) в кристалле приводит к выполнению неравенства $n > 1$ даже в рентгеновском диапазоне, если значение частоты ω и импульса кванта находится вблизи края зоны Бриллюэна. Теория явления дана в работах²⁻⁷. Отметим, что ПРИ аналогично оптическому параметрическому излучению, рассмотренному Файнбергом и Хижняком для одномерной периодической среды⁸. В случае тонкого кристалла, когда $\frac{\omega}{c} |n - 1| L \ll 1$ (L – толщина кристалла) параметрическое излучение отсутствует, однако, возможно резонансное излучение, рассмотренное Тер-Микаеляном⁹.

Одно из характерных свойств ПРИ состоит в существовании дифракционных пиков рентгеновского излучения, сосредоточенных под большими углами к направлению движения частицы. Направления вылета фотонов θ_τ и их частоты $\omega_\tau^{(n)}$ не зависят от энергии частицы, а определяются векторами $\vec{\tau}$ обратной решетки кристалла и углом влета θ_0 частицы по отношению к кристаллографическим плоскостям, связанным с $\vec{\tau}$, причем⁶

$$\theta_\tau = 2\theta_0; \omega_\tau^{(n)} = \frac{\tau}{2\sin\theta_0} \frac{\pi n}{d\sin\theta_0}; n = 1, 2, 3, \dots; \hbar = c = 1, \quad (1)$$

где d – межплоскостное расстояние.

Эксперимент по наблюдению ПРИ был проведен на томском синхротроне "Сириус" для электронов с энергией 900 МэВ. Был исследован спектр рентгеновского излучения, возникающего под углом $\theta_\tau = 90^\circ$ к скорости v электронов, проходящих через монокристалл алмаза. Схема экспериментальной установки и параметры пучка были такими же, как и в работе¹⁰, однако, измерение спектра проводилось с помощью пропорционального счетчика с ксеноновым наполнением. Входное окно детектора было изготовлено из бериллиевой фольги толщиной 0,3 мм, так что детектор был чувствителен к фотонам с энергией $\omega < 40$ кэВ.

Вывод излучения из вакуумной камеры, где располагался гониометр с образцом алмаза, осуществлялся через окно диаметром $d_1 = 30$ мм, вырезанное из плексигласа толщиной $l = 6$ мм. Расстояние от образца до выходного окна составляло $L_1 = 318$ мм, а до детектора – $L_2 = 1874$ мм. Диаметр входного окна детектора был равен 50 мм. Энергетическая калибровка детектора осуществлялась с помощью стандартного набора изотопов. Энергетическое разрешение детектора на линии Zn^{65} с энергией 8,2 кэВ составило 14%.

В соответствии с теорией ПРИ⁶ первый максимум в спектре излучения в рассматриваемой экспериментальной ситуации отвечает индексам Миллера (4, 0, 0) и составляет $\omega_{400}^{(T)} = 9,85$ кэВ

1) Томский политехнический институт.

2) Ташкентский государственный университет.

(излучение при более низких индексах отсутствует из-за обращения в нуль структурного фактора). Второй максимум, согласно (1), должен наблюдаться при энергии $\omega_{800}^{(T)} = 19,7$ кэВ.

На рис. 1, а приведен экспериментальный спектр излучения, на котором четко выделяются два пика с энергией $\omega_{400}^{(3)} = 9,9 \pm 0,16$ кэВ и $\omega_{800}^{(3)} = 19,7 \pm 0,16$ кэВ. Поворот гониометра на 30 мрад вокруг вертикальной оси приводил к исчезновению пиков в спектре. Спектр фоновых квантов, измеренный в таком положении, приведен на рис. 1, б. Отметим, что пик $\omega_{800}^{(3)}$ наблюдался в работе ¹⁰, однако, наличие одного максимума с небольшим превышением над фоном в спектральном распределении излучения не может служить основанием для достоверного вывода об обнаружении ПРИ, так как такой максимум может быть имитирован фоновыми условиями или другими процессами.

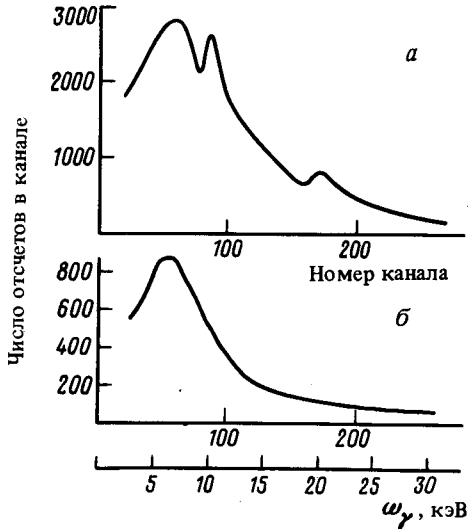


Рис. 1. а – Спектр рентгеновского излучения электронов с энергией 900 МэВ под углом 90° к направлению пучка в кристалле алмаза при ориентации $\langle 110 \rangle$; б – спектр, измеренный после поворота кристалла на 30 мрад

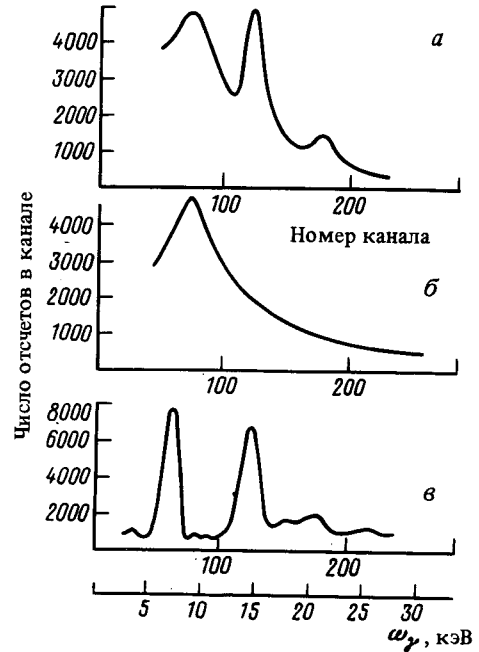


Рис. 2. а – Спектр излучения электронов при ориентации $\langle 100 \rangle$ кристалл; б – спектр после поворота кристалла на 40 мрад; в – спектр излучения за вычетом фона, полученный после замены плексигласа на лавсан

При повороте кристалла на угол 45° вокруг вертикали направление скорости пучка совпало с осью $\langle 100 \rangle$. При такой ориентации детектор, расположенный по-прежнему под углом 90° к ν должен регистрировать ПРИ, обусловленное дифракцией собственного поля частицы на плоскостях (110) . При этом в спектре должны возникать пики для энергий $\omega_{220}^{(T)} = 6,96$ кэВ, $\omega_{440}^{(T)} = 13,9$ кэВ, $\omega_{660}^{(T)} = 20,9$ кэВ. Экспериментальный спектр для данного случая приведен на рис. 2, а и показывает хорошее согласие с теоретическими предсказаниями: $\omega_{440}^{(3)} = 14,0 \pm 0,16$ кэВ и $\omega_{660}^{(3)} = 20,7 \pm 0,16$ кэВ. После поворота гониометра на 40 мрад вокруг вертикальной оси максимумы в спектре исчезли (рис. 2, б). После замены в выходном окне плексигласа, который сильно поглощает излучение с энергией 7 кэВ, на лавсан был зарегистрирован также и пик $\omega_{220}^{(3)} \cong 7$ кэВ (рис. 2, в). Экспериментальное значение для числа квантов на электрон в пике (440) составляет $(6 \pm 3) \cdot 10^{-7}$, в пике (660) – $(0,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$, что хорошо согласуется с теоретическими значениями $2,3 \cdot 10^{-7}$ и $0,3 \cdot 10^{-7}$.

Литература

2. Барышевский В.Г., Феранчук И.Д. ЖЭТФ, 1971, 61, 944; поправка ЖЭТФ, 1973, 63, 760.
3. Барышевский В.Г., Феранчук И.Д. ДАН БССР, 1974, 18, 499.
4. Барышевский В.Г., Феранчук И.Д. Изв. АН СССР, сер. физико-математическая, 1973, № 2, 102.
5. *Varyshevsky V.G., Feranchuk I.D. Phys. Lett., 1976, 57A, 183.*
6. *Varyshevsky V.G., Feranchuk I.D. J. de Physique, 1983, 44, 913.*
7. Гарибян Г.М., Ян Ши. ЖЭТФ, 1972, 63, 1198.
8. Файнберг Я.Б., Хижняк Н.А. ЖЭТФ, 1957, 32, 883.
9. Тер-Микаелян М.Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Ереван, 1969.
10. Воробьев С.А., Калинин Б.Н., Пак С., Потылицын А.П. Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 3.

Научно-исследовательский
институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко

Белорусский государственный университет
им. В.И.Ленина

Поступила в редакцию
12 февраля 1985 г.
