

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 4,5 ГэВ В АЛМАЗЕ

*Р.О.Авакян, А.Э.Аветисян, Ю.Н.Адищев, Г.М.Гарибян, С.С.Данагулян,
О.С.Кизогян, А.П.Потылицын, С.П.Тароян, Г.М.Элбакян, Ян Ши*

Сообщается о наблюдении квазичеренковского рентгеновского излучения электронов энергии 4,5 ГэВ от плоскостей (110) кристалла алмаза. Обнаружен рост выхода фотонов от толщины кристалла.

На возможность образования рентгеновского излучения равномерно и прямолинейно движущейся релятивистской заряженной частицей в монокристалле под брэгговскими углами и на брэгговских частотах (квазичеренковского излучения) впервые указывалось в работах ¹⁻³. В дальнейшем теория квазичеренковского (параметрического) излучения развивалась как для совершенных кристаллов ⁴⁻⁷, так и для жидких ⁸ и мозаичных кристаллов ⁹. Недавно появились первые сообщения ^{10,11} об экспериментальном обнаружении этого излучения.

В настоящей работе проведен эксперимент по исследованию квазичеренковского излучения (КЧИ) на выведенном электронном пучке Ереванского синхротрона с энергией 4,5 ГэВ.

Использование выведенного пучка в подобных исследованиях позволяет более достоверно определить абсолютное сечение процесса.

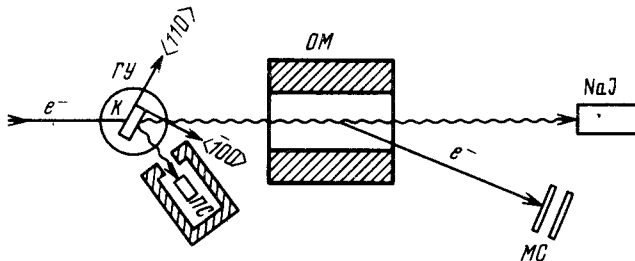


Рис. 1. Схема экспериментальной аппаратуры: К – кристаллический радиатор, ГУ – гониометрическое устройство, ПС – пропорциональный счетчик, ОМ – отклоняющий магнит, NaJ – спектрометр полного поглощения, МС – мониторные счетчики

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Пучок электронов с расходимостью 10^{-5} рад направлялся на кристаллическую мишень под углом 35° по отношению к плоскости (110). Излучение от электронов детектировалось под углом $2\theta_B = 70^{\circ}$ от начального направления электронного пучка. Кристаллическая мишень (толщиной 0,2 мм и 1 мм) устанавливалась в гониометрическую систему, (ГУ), позволяющую дистанционно осуществлять вращение кристаллической мишени в двух взаимноперпендикулярных направлениях с точностью $4 \cdot 10^{-5}$ рад. Для ориентировки кристалла по отношению к направлению пучка электронов использовались известные ориентационные зависимости излучения электронов высоких энергий при каналировании в монокристалле. В качестве детектора излученных фотонов использовался пропорциональный счетчик (ПС) с входным бериллиевым окном толщиной 0,15 мм с газовым наполнением Хе + 10% СН₄. Телесный угол регистрации квантов равнялся $2 \cdot 10^{-4}$ ср. Мониторинг производился измерением числа электронов излучавших жесткие тормозные фотоны в кристалле.

На рис. 2 приведен экспериментальный результат по наблюдению излучения электронов с энергией 4,5 ГэВ в кристалле алмаза толщиной $l = 0,2$ мм под углом $2\theta_B = 70^{\circ}$. В эксперименте при энергии фотонов $8,9 \pm 1$ кэВ ($l = 1$ мм) и энергии фотонов $9,2 \pm 1,1$ кэВ ($l = 0,2$ мм) наблюдалась пиковая структура излучения. При повороте кристалла на угол 50 мрад вокруг вертикального направления пик в спектре излучения исчезал. При изменении угла между плоскостью (110) и направлением электронного пучка от 35 до 30° и соответственно изменением угла регистрации фотонов от 70 до 60° пик в спектре излучения смещался до энергии $E_{\gamma} = 11,3 \pm 1,3$ кэВ (рис. 3) в удовлетворительном согласии с расчетным значением $E_{\gamma} = 9,8$ кэВ, полученным из формулы

$$\omega_B = \frac{\pi n}{a |\cos \theta_B|},$$

где ω_B — брэгговская частота, излучения, θ_B — угол между импульсом электрона и вектором обратной решетки, a — постоянная решетки, $n = 1, 2, 3$ — порядок дифракции.

Результаты эксперимента после вычитания фонового излучения на основании измерений от дезориентированной мишени приведены в таблице.

θ_B	Толщина мишени	E_{γ} (кэВ)	Число фотон/электрон	
			эксперимент	теория
35°	1 мм	$8,9 \pm 1$	$(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$
35°	0,2 мм	$9,2 \pm 1,1$	$(6,61 \pm 0,8) \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
30°	0,2 мм	$1,13 \pm 1,3$	$(1,0 \pm 0,17) \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-7}$

В случае мишени толщиной 1 мм отчетливо наблюдалось при $\theta_B = 35^{\circ}$ второй пик $E_{\gamma} = 21 \pm 1,8$ кэВ (расчетная величина 19,1 кэВ) с выходом $2,62 \pm 1,2 \cdot 10^{-7}$ фотонов/электрон.

Из таблицы видно, что в случае кристалла толщиной 0,2 мм теоретические и экспериментальные значения числа квантов излучения неплохо согласуются между собой. Однако, в случае кристалла толщиной 1 мм теоретическое значение существенно выше. Возможно, это обусловлено несовершенством кристалла, использованного в эксперименте, в то время как теоретический расчет относится к совершенному монокристаллу. Обсудим возможность вклада других видов излучения в исследуемый эффект.

В частности, тормозное излучение, образуемое частицей в кристалле, может отразиться на кристаллографических плоскостях и выйти из кристалла под тем же удвоенным брэгговским углом относительно траектории частицы и на той же брэгговской частоте.

Число квантов $dN_{\text{тор}}$ тормозного излучения, образуемого на длине a , в интервале частот $(\omega, \omega + d\omega)$, можно оценить по формуле ¹

$$dN_{\text{тор}} = \frac{ad\omega}{L_{\text{рад}} \omega} \left[1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega} \gamma \right)^2 \right]^{-1} \cdot 2,7,$$

где ω_0 и $L_{\text{рад}}$ — плазменная частота и радиационная длина среды, γ — лоренц-фактор частицы.

Для $\hbar\omega = 8,5$ кэВ, $\gamma = 9000$ и $\hbar\omega_0 = 36$ эВ (алмаз) имеем $(\omega_0\gamma/\omega)^2 \approx 1500$.

Это означает, что в рассматриваемой области $dN_{\text{тор}} \propto \gamma^{-2}$. Если принять, что при брэгговском отражении $d\omega/\omega \sim 10^{-2}$ (что согласуется с расчетом ⁷ спектральной ширины квазичеренковского излучения), то для алмаза толщиной 0,2 мм число отраженных квантов тормозного излучения не превосходит $4 \cdot 10^{-8}$ на частицу.

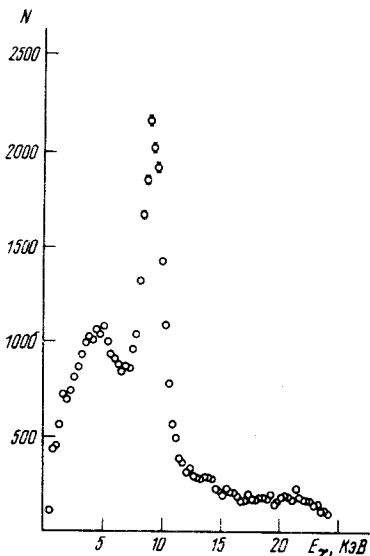


Рис. 2. Спектр излучения рентгеновских фотонов под углом $2\theta_B = 70^\circ$ при толщине кристалла $l = 0,2$ мм

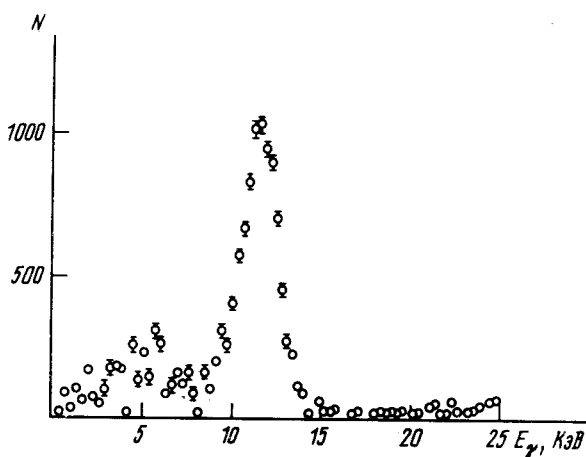


Рис. 3. Спектр излучения рентгеновских фотонов под углом $2\theta_B = 60^\circ$ с вычетом излучения от разориентированного кристалла

Для алмаза той же толщины расчетное число квантов квазичеренковского излучения (отражение $(2,2,0)$, $\hbar\omega_B = 8,5$ кэВ, $\theta_B = 35,3^\circ$) составляет $1,2 \cdot 10^{-6}$, т.е. на два порядка больше вклада тормозного излучения. При этом интенсивность квазичеренковского излучения практически не зависит от γ ¹².

Мы попытались экспериментально оценить возможный вклад обычного тормозного излучения. Для этого поместили перед алмазным радиатором 0,2 мм алюминиевую пластинку толщиной 3 мм. В пределах экспериментальных ошибок увеличение выхода излучения за счет дифракции реальных фотонов тормозного излучения от алюминиевой мишени не было обнаружено.

Авторы выражают свою благодарность М.А.Агиня за помощь в расчетах, а также Г.А.Вартапетяну и С.А.Воробьеву за обсуждения полученных результатов.

Литература

1. Тер-Микаелян М.Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Ереван, изд. АН Арм. ССР, 1969, § 28.
2. Гарибян Г.М., Ян Ши. ЖЭТФ, 1971, 61, 930.

3. Барышевский В.Г., Феранчук И.Д. ЖЭТФ, 1971, 61, 944.
4. Гарибян Г.М., Ян Ши. ЖЭТФ, 1972, 63, 1198.
5. Барышевский В.Г., Феранчук И.Д. Изв. АН БССР, сер. физ.-мат. наук, 1973, вып. 2, 102.
6. Барышевский В.Г., Феранчук И.Д. ДАН БССР, 1974, 18, 499.
7. Авакян А.Л., Агинян М.А., Гарибян Г.М., Ян Ши. ЖЭТФ, 1975, 68, 2038.
8. Velyakov V.A., Orlov V.P. Phys. Lett., 1972, A42, 3.
9. Афанасьев А.М., Агинян М.А. ЖЭТФ, 1978, 74, 570.
10. Воробьев С.А., Калинин Б.П., Пак С.Д., Потылицын А.П. Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 3.
11. Адищев Ю.Н., Барышевский В.Г., Воробьев С.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 295.
12. Агинян М.А., Ян Ши. Изв. АН Арм. ССР, сер. Физика, 1986, 21, 280.

Поступила в редакцию
10 февраля 1987 г.
