

УДК 539.1;519.6

ЭФФЕКТЫ КОГЕРЕНТНОСТИ КВАЗИЧЕРЕНКОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ

М. А. АГИНЯН, ЯН ШИ

Ереванский физический институт

(Поступила в редакцию 2 июня 1985 г.)

Исследованы зависимости числа квантов квазичеренковского излучения от толщины кристалла и лоренц-фактора  $\gamma$  частицы. При промежуточных толщинах обнаружены интерференционные явления, аналогичные известному «маятниковому эффекту» при рассеянии рентгеновских лучей. Насыщение интенсивности излучения наступает при толщинах, в несколько раз превышающих длину поглощения в соответствующей аморфной среде. Интенсивность практически не зависит от  $\gamma$  при больших  $\gamma$  для промежуточных и больших толщин. Она монотонно растет с  $\gamma$  при малых толщинах, а также малых  $\gamma$ . Проведено сравнение теоретического расчета с экспериментальными результатами.

На возможность образования квазичеренковского излучения равномерно и прямолинейно движущейся релятивистской заряженной частицей в кристалле на брэгговских углах и частотах впервые указывалось в работах [1—3] (см. также [4]). В дальнейшем теория квазичеренковского излучения развивалась как для случая совершенных кристаллов [5—8], так и для случаев холестерических жидких кристаллов [9] и мозаичных кристаллов [10].

Из общего теоретического анализа следовало [5], что в силу когерентности квазичеренковского излучения, образуемого на всем пути движения частицы через совершенный кристалл, должна наблюдаться сложная зависимость интенсивности излучения от толщины  $a$  кристалла. Однако количественный анализ этой зависимости до сих пор не проводился.

В настоящей работе проведен такой анализ и рассчитаны числа квантов  $N_k$  квазичеренковского излучения в геометрии Лауэ для кристаллов произвольной толщины  $a$  (рис. 1). При малых  $a$ , намного меньших так называемой экстинкционной длины  $l_e$ , зависимость  $N_k$  от  $a$  является линейной и совпадает с результатом кинематической теории [10, 4] (штриховые прямые).

При промежуточных  $a \sim l_e$  хорошо виден осцилляционный характер кривых (аналог известного маятникового эффекта). Видно также, что кривые выходят на плато лишь при толщинах, в несколько раз превышающих значения (отмеченные стрелками) обычной длины поглощения для аморф-

ного вещества, что является проявлением эффекта аномального прохождения квазичеренковского излучения\*.

Из рис. 1 следует также, что число квантов  $N_h$ , вычисленное при корректном применении динамической теории в двухволновом приближении, всегда остается меньше, чем значение, которое дает кинематическая теория, неприменимая при промежуточных и больших толщинах. Для таких толщин отличие составляет порядок или больше.

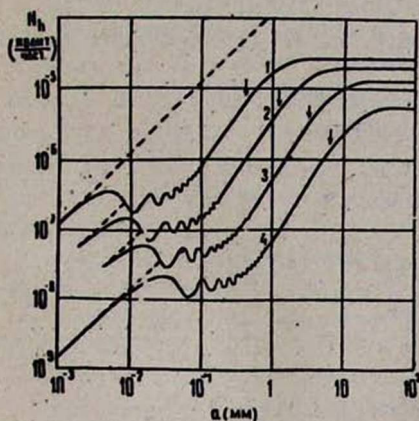


Рис. 1. Зависимость числа квантов  $N_h$  квазичеренковского излучения от толщины  $a$  кристалла алмаза для разных пятен отражения в симметричном случае Лауэ. Цифры у кривых соответствуют индексам отражения (2, 2, 0), (4, 0, 0), (4, 4, 0), (8, 0, 0), энергиям кванта  $h\omega_B = 7,05; 9,82; 14,10; 19,65$  кэВ и углам Брэгга  $\theta_B = 44,15; 44,99; 44,15; 44,99$  град. Стрелками указаны значения обычной длины поглощения для аморфного вещества при соответствующих частотах. Кривые рассчитаны для электронов с лоренц-фактором  $\gamma = 1,8 \cdot 10^3$ . Штриховые прямые соответствуют расчету в рамках кинематической теории.

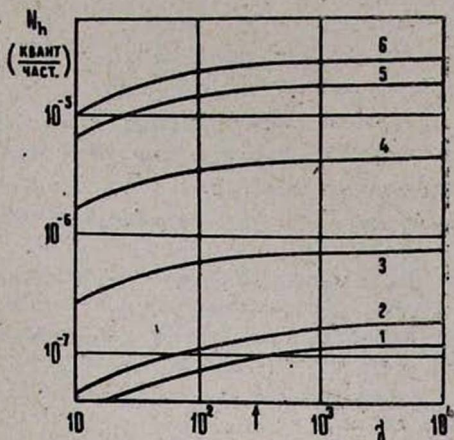


Рис. 2. Зависимость  $N_h$  от лоренц-фактора  $\gamma$  электрона при разных толщинах кристалла алмаза для отражения (2, 2, 0) в симметричном случае Лауэ ( $h\omega_B = 7,05$  кэВ). Цифры 1—5 у кривых соответствуют значениям  $a = 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 0,31, 1$  мм. Кривая 6 соответствует  $a > 10$  мм. Стрелкой указано значение отношения брэгговской частоты к плазменной. Длина поглощения для аморфного вещества составляет 0,44 мм.

В случае достаточно толстых кристаллов  $N_h$  практически не зависит от  $\gamma$  при больших  $\gamma$  [8, 10]. При промежуточных или малых толщинах такое насыщение менее выражено или вообще отсутствует (рис. 2). В таблице приведены некоторые результаты расчета для кристаллов алмаза, кремния и германия в случае Лауэ. При  $a = 0,35$  мм число квантов в случае германия наибольшее из-за больших значений отношения плазменной частоты к брэгговской, в случае толстых кристаллов алмаз лучше излучает из-за малого коэффициента поглощения.

\* Согласно [3] число квантов излучения экспоненциально должно убывать с увеличением толщины кристалла, что, по-видимому, неправильно.

Недавно появились сообщения [11, 12] об экспериментальном обнаружении рентгеновского излучения при прохождении ультрарелятивистских электронов через монокристалл алмаза. Частоты, на которые приходятся максимумы излучения, хорошо совпадают с брэгговскими.

Сравнение экспериментальных значений  $N_h$  с теоретическим расчетом (см. таблицу) показывает определенное согласие, по крайней мере по порядку величины. Более низкое значение  $N_h$ , наблюдаемое в эксперименте [11] в случае отражения (8, 0, 0), возможно, объясняется малым углом коллимации.

Расчет показывает (см. рис. 1), что для пятен, исследованных в экспериментах [11, 12],  $N_h$  продолжает существенно расти с  $a$  для значений  $a > 0,35$  мм. Поэтому если перейти к более толстым кристаллам, то можно ожидать получить гораздо большую интенсивность. Однако при этом необходимо иметь в виду угловое (а также частотное) уширение пятен из-за многократного рассеяния электронов в кристалле.

Таблица

Числа квантов  $N_h$  пятен квазичеренковского излучения, образуемого электроном с  $\gamma = 1800$  в кристаллах алмаза, кремния и германия. Интервалы расчетных значений соответствуют разным углам влета электронов в кристаллы.

| Отражение         |                           | (4,4,0)       |         | (6,6,0) |           | (8,0,0) |                        |    |
|-------------------|---------------------------|---------------|---------|---------|-----------|---------|------------------------|----|
| $\theta_B$ (град) |                           | 45            |         | 45      |           | 45      |                        |    |
| Алмаз             | $\hbar\omega_B$ (кэВ)     | 13,89         |         | 20,84   |           | 19,65   |                        |    |
|                   | $a$ (мм)                  | 0,35          | >15     | 0,35    | >30       | 0,35    | >25                    |    |
|                   | $N_h \cdot 10^7$          | расчет        | 1,1÷5,1 | 127     | 0,19÷0,35 | 43      | 0,20÷0,66              | 54 |
|                   |                           | эксп. [11,12] | 6±3     | —       | 0,7±0,4   | —       | 0,08±0,03<br>0,05±0,02 | —  |
| Si                | $\hbar\omega_B$ (кэВ)     | 9,13          |         | 17,70   |           | 12,92   |                        |    |
|                   | $a$ (мм)                  | 0,35          | >0,4    | 0,35    | >1,5      | 0,35    | >1,2                   |    |
|                   | $N_h \cdot 10^7$ , расчет | 18,0÷21,5     | 21,5    | 2,4÷6,3 | 7,9       | 3,6÷7,6 | 9,5                    |    |
| Ge                | $\hbar\omega_B$ (кэВ)     | 8,76          |         | 13,14   |           | 12,39   |                        |    |
|                   | $a$ (мм)                  | >0,1          |         | >0,1    |           | >0,1    |                        |    |
|                   | $N_h \cdot 10^7$ , расчет | 46,1          |         | 3,1     |           | 3,4     |                        |    |

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тер-Микаелян М. А. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1969, § 28.
2. Гарибян Г. М., Ян Ши. ЖЭТФ, 61, 930 (1971).

3. Барышевский В. Г., Феранчук И. Д. ЖЭТФ, 61, 944 (1971).
4. Гарибян Г. М., Ян Ши. Рентгеновское переходное излучение. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1983, гл. III.
5. Гарибян Г. М., Ян Ши. ЖЭТФ, 63, 1198 (1972).
6. Барышевский В. Г., Феранчук И. Д. Изв. АН БССР, сер. физ.-мат. наук, вып. 2, 102 (1973).
7. Барышевский В. Г., Феранчук И. Д. ДАН БССР, 18, 499 (1974).
8. Авакян А. Л. и др. ЖЭТФ, 68, 2038 (1975).
9. Belyakov V. A., Orlov V. P. Phys. Lett., A24, 3 (1972).
10. Афанасьев А. М., Агинян М. А. ЖЭТФ, 74, 570 (1978).
11. Воробьев С. А. и др. Письма в ЖЭТФ, 41, 3 (1985).
12. Адишев Ю. Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 41, 295 (1985).

**ԳՎԱԶԻՉԵՐԵՆԿՈՎՅԱՆ ՃԱՌԱԳԱՑՔՄԱՆ ԿՈՇԵՐԵՆՏՈՒԹՅԱՆ  
ԷՖԵԿՏՆԵՐԸ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ**

Մ. Ա. ԱՂԻՅԱՆ, ՑԱՆ ՇԻ

Հետազոտված է զվազիչերենկոմյան ճառագայթման թվանոսների թվի կախումը բյուրեղի հաստությունից և մասնիկի լորենց-գործակցից՝  $\gamma$ -ից: Ցույց է տրված, որ միջին հաստությունների դեպքում գոյություն ունի ինտերֆերենցիոն երևույթ, որը նման է ունետգենյան ճառագայթների սրման դեպքում ի հայտ եկող «ճեռճանակային էֆեկտին»: Ճառագայթման ինտենսիվության հազիցումը տեղի է ունենում այնպիսի հաստության դեպքում, որը մի քանի անգամ գերազանցում է կլանման երկարությանը համապատասխան ամորֆ միջավայրում: Մեծ  $\gamma$ -ների դեպքում ճառագայթման ինտենսիվությունը միջին և մեծ հաստությունների համար փաստորեն կախված է  $\gamma$ -ից: Փոքր հաստությունների, ինչպես նաև փոքր  $\gamma$ -րի դեպքում այն մոնոտոն աճում է  $\gamma$ -ի մեծացմանը զուգահեռ: Կատարված է տեսական հաշվարկի համեմատումը փորձնական արդյունքների հետ:

**COHERENT EFFECTS OF QUASI-CHERENKOV RADIATION  
IN CRYSTALS**

M. A. AGINYAN, CHI YANG

Dependences of the number of quasi-Cherenkov radiation quanta on the thickness of a crystal and the Lorentz factor  $\gamma$  of a particle are studied. For intermediate thicknesses of the crystal some interference phenomena analogous to the well-known "pendulum effect" at the scattering of X-rays were observed. The saturation of radiation intensity occurred at thicknesses exceeding several times the absorption length in the corresponding amorphous medium. For intermediate and large values of the thickness and large  $\gamma$  the intensity is practically independent of  $\gamma$ . It steadily grows with  $\gamma$  at small thicknesses as well as small values of  $\gamma$ . The comparison of calculation results with experimental data was made.