

О ЖЕСТКОМ ИЗЛУЧЕНИИ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА
В МОНОКРИСТАЛЛЕ

Л.А.Ривлин

I. Классическое условие возникновения излучения Вавилова-Черенкова $v = (c/n) \cos^{-1} \theta = u < c$ (c - скорость света в вакууме, v - скорость электрона, θ - угол между ее вектором и направлением испускания фотона, n - показатель преломления среды) [1] не может быть выполнено в рентгеновском диапазоне, где $n \lesssim 1$, и поэтому принято считать, что "в этой области излучение невозможно" [2], стр.29). Это утверждение справедливо только до тех пор, пока допустимо описывать свойства среды с помощью единственного макроскопического параметра - показателя преломления n .

2. При рассмотрении распространения рентгеновского излучения в монокристалле монохроматическое волновое поле излучения можно представить суммой бесконечного числа пространственных гармонических составляющих трехмерного ряда Фурье с одной и той же частотой ν , но с различными направлениями и скоростями распространения фазы u_{klm} [3]. Среди множества пространственных гармоник существуют и такие, для которых $u_{klm} < c$.

3. Величина u , входящая в условие синхронизма (п.1), есть по существу скорость перемещения фазы электромагнитной волны в направлении движения электрона. Поэтому, если при движении электрона в монокристалле его скорость v совпадает по величине и направлению со скоростью $u_{klm} < c$ одной из пространственных гармоник ($v = u_{klm}$), то следует ожидать возникновения излучения Вавилова-Черенкова в рентгеновском диапазоне.

4. Можно показать [4], что для распространяющихся в монокристалле электромагнитных колебаний рентгеновского диапазона существуют резонансные моды, которые изображаются теми точками на границах зон Бриллюэна [3], где градиент частоты по волновому вектору обращается в нуль. Собственные частоты и направления распространения резонансных мод можно отыскать из условия пересечения сферы распространения Эвальда [3], не менее чем с двумя узлами обратной решетки, не считая узла, лежащего в начале координат. В предельном случае расположения одного из узлов и начала координат на концах диаметра сферы достаточно пересечения с этим единственным узлом. Для фотонов с энергией порядка нескольких десятков

килоэлектронвольт собственная добротность резонансных мод идеального монокристалла, определяемая потерями при фотоэффекте, комптоновском рассеянии и рассеянии на фононах, может достигать величины порядка 10^8 [4].

5. В силу отмеченных резонансных свойств решетки монокристалла спектр возникающего в нем жесткого излучения Вавилова-Черенкова состоит из линий, совпадающих с теми резонансными модами, для которых выполнено условие синхронизма $v = u_{klm}$, и из менее интенсивного нерезонансного фона. Повышенная интенсивность резонансных линий обусловлена по существу стимулированным испусканием.

6. В качестве поясняющего примера полезно рассмотреть двумерную квадратную решетку с постоянной d . Из построения Эвальда следуют условие для собственных частот $(2d v_{\alpha\beta}/c)^2 = \alpha^2 + \beta^2$ (α и β - целые числа, не обращающиеся одновременно в нуль) и условие, задающее направление распространения излучения относительно одной из осей кристалла, $\cos \theta = \beta(\alpha^2 + \beta^2)^{-1/2}$. Если скорость электрона v направлена вдоль той же оси, то скорость $u_m^{\alpha\beta}$ перемещения фазы волны с частотой $\nu_{\alpha\beta}$ вдоль его траектории равна $u_m^{\alpha\beta} = (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2} (\beta + 2m)^{-1}$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Условие синхронизма (п. I) выполняется в виде $v = c(\alpha^2 + \beta^2)^{1/2} (\beta + 2m)^{-1}$, где исключены значения $\alpha = 0$ (предельный случай нулевой интенсивности) и $m = 0$ (невозможность синхронизма). Пример: $\alpha = 1, \beta = 0, c/\nu_{\alpha\beta} = 2d$ (порядка 5 Å), $m = 1, v/c = 0,5$ (энергия электронов около 80 кэВ). При нецелочисленных значениях α и β приведенные формулы описывают также условия возникновения нерезонансного фона.

7. Применимость проведенного рассуждения (но отнюдь не возможность возникновения самого явления), ограничена пренебрежением как релятивистскими, так и квантовыми поправками. Первое обстоятельство ставит верхний, а второе - нижний пределы скоростям $v = u_{k\ell m}$ (квантовые эффекты можно не учитывать, пока де-бройлевская длина волны электрона остается много меньше c/v и др. [2], стр.36). Электроны из предыдущего примера с энергиями порядка 80 кэВ не выходят за оба предела.

8. В заключение полезно заметить, что аналогичное явление излучения электромагнитных колебаний при синхронизме электронного потока с одной из пространственных гармоник поля излучения широко используется в технике генераторов и усилителей сантиметровых волн. Параллелизм между явлениями в этих устройствах и эффектом Вавилова-Черенкова подчеркнут, напр., в [2] (стр.59).

Интересно также сопоставить когерентное тормозное излучение электронов низких и средних энергий в монокристалле [5] с рассматриваемым явлением. Оба эффекта излучения связаны с взаимодействием электрона с пространственными гармониками полей внутри монокристалла: в [5] этим полем является атомное поле решетки, здесь - само поле излучения. Таким образом, как и при сравнении обычного тормозного излучения с эффектом Вавилова-Черенкова, различие состоит в наличии или отсутствии ускорения излучающего заряда. Детальное сопоставление излучения Вавилова-Черенкова с излучением заряда, перемещающегося с ускорением в пространственно-периодическом силовом

поле (макроскопическом аналоге атомного поля решетки кристалла), непосредственно приложимое к рассматриваемому вопросу, проведено в [6].

Автор выражает искреннюю признательность М.Ф.Стельмаху за стимулирующее обсуждение и ценные советы и Ю.С.Коробочко за очень полезную дискуссию и предоставленную возможность ознакомиться с [5] в рукописи.

Поступило в редакцию

18 марта 1965 г.

Литература

- [1] И.М.Франк, И.Е.Тамм. ДАН СССР, 14, 109, 1937.
- [2] Дж.Джелли. Черенковское излучение, Изд.иностр.лит., 1960.
- [3] Л.Бриллюэн, М.Пароди. Распространение волн в периодических структурах, Изд.иностр.лит., 1959.
- [4] Л.А.Ривлин. Электроника, 35, 60, 1962.
- [5] Ю.С.Коробочко, В.Ф.Космач, В.И.Минеев. ЖЭТФ, 48, 1248, 1965.
- [6] H. Motz. Trans. IRE, AP-4, № 3, 374, 1956.
(Рус.перев. в сб. "Миллиметровые и субмиллиметровые волны", Изд.иностр.лит., стр.210, 1959).