

ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ С РЕЗКИМИ ГРАНИЦАМИ

Д.Ф.Алферов , Ю.А.Башмаков

Экспериментально исследованы спектрально-угловые и энергетические зависимости излучения релятивистских электронов в слабом магнитном поле с резкими границами. Показано, что в длинноволновой области спектра излучение электронов в таком поле обладает высокой интенсивностью и направленностью.

С помощью специального магнитного устройства, установленного на орбиту циклического ускорителя [1], было получено излучение, свойства которого выгодно отличаются от синхротронного. В этом и аналогичных устройствах формировалось поперечное периодическое магнитное поле, что обеспечивало генерацию интенсивного монохроматического коротковолнового излучения. Для увеличения интенсивности излу-

чения в длинноволновой области спектра большой интерес представляет использование слабых магнитных полей одной полярности.

Теоретическое исследование излучения электронов в таком магнитном поле, когда угол поворота α мал по сравнению с характерным углом излучения $1/\gamma$, где $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, $\beta = v/c$, v — скорость частицы, выполнено в работах [2 + 7].

Из результатов теоретического рассмотрения следует, что в этом случае свойства излучения релятивистских электронов существенно отличаются от свойств синхротронного излучения (СИ) ($\alpha \gg 1/\gamma$).

При выполнении условия дипольности ($\alpha \ll 1/\gamma$) форма импульса излучения в направлении, определяемом углом θ относительно траектории частицы, повторяет характер изменения магнитного поля вдоль ее траектории, а его длительность $\Delta t = (L/c)(1 - \beta \cos \theta)$, где L — область действия поля.

Если магнитное поле имеет резкие границы, т. е. вблизи края поля $\frac{L}{H_m} \frac{\partial H}{\partial Z} \gg 1$, где H_m — амплитуда поля, Z — направление движения частицы, то в спектрально-угловом распределении интенсивности излучения будет наблюдаться последовательность минимумов и максимумов, положение которых определяется соотношениями

$$\frac{L(1 + \theta^2 \gamma^2)}{2\lambda \gamma^2} = \begin{cases} k, & \min \left(\begin{array}{l} \theta \ll 1 \\ \gamma \gg 1 \end{array} \right), \\ \frac{2k + 1}{2}, & \max \left(\begin{array}{l} \theta \ll 1 \\ \gamma \gg 1 \end{array} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$, λ — наблюдаемая длина волны излучения. В частности, на заданной длине волны при определенных условиях возможно появление кольцевой структуры в угловом распределении излучения.

В настоящей работе приводятся первые результаты экспериментов по исследованию излучения электронов в слабом магнитном поле. Эксперименты выполнены на синхротроне "Пахра". Энергия электронов изменялась вплоть до 850 МэВ.

В наших опытах требуемое магнитное поле формировалось в прямолинейном промежутке ускорителя с помощью двух прямоугольных обмоток длиной $L = 100$ см. Область нарастания магнитного поля составляла ~ 10 см. Возбуждаемое обмоткой на орбите синхротрона магнитное поле ориентировано параллельно плоскости орбиты.

Поле возбуждалось импульсным током трапецеидальной формы с длительностью фронта ~ 1 мсек и плоской вершины ~ 2 мсек. Стабилизация тока на плоской вершине обеспечивалась с точностью не хуже 0,3%.

При выбранной ориентации возбуждаемого магнитного поля вектор поля излучения электронов направлен преимущественно перпендикулярно плоскости орбиты синхротрона (π -компонента). С другой стороны вектор электрического поля СИ из магнита ускорителя ориентирован главным образом в плоскости орбиты (σ -компонента). Поэтому с целью существенного уменьшения фона от СИ в наших опытах выделялась π -компонента излучения.

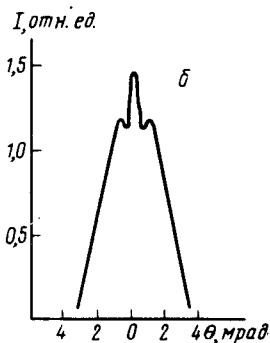
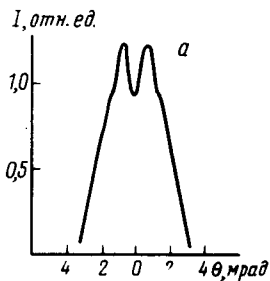


Рис.1.

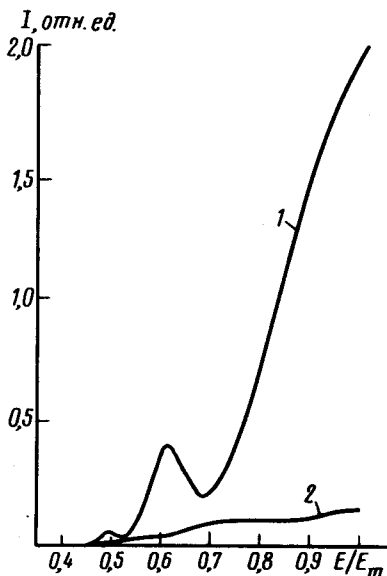


Рис.2.

Рис. 1. Вертикальное угловое распределение интенсивности излучения в направлении оси прямолинейного промежутка синхротрона (π -компонента). *a* – При отсутствии поля в обмотке; *b* – при наличии поля в обмотке

Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения от энергии электронов (π -компонента). 1 – При наличии поля в обмотке; 2 – при отсутствии поля в обмотке

Угловое распределение интенсивности излучения электронов исследовалось фотографическим способом. Фотоматериалы размещались в фокальной плоскости объектива. Излучение на фиксированной длине волны выделялось интерференционным светофильтром ($\lambda_{\phi} = 5040 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda/\lambda_{\phi} = 2,2\%$). Импульсное магнитное поле в обмотке включалось при достижении электронами максимальной энергии ($E_m = 850 \text{ МэВ}$), что практически исключало изменение энергии электронов во время экспонирования фотопластинок. Амплитуда магнитного поля составляла $H_m = 26,6 \text{ Э}$. При этом радиус кривизны траектории электронов составляет $\sim 1 \text{ км}$.

Распределение интенсивности излучения в вертикальной плоскости из поворотных магнитов синхротрона в направлении оси прямолинейного промежутка приведено на рис. 1, *a*. На этом рисунке виден характерный для π -компоненты минимум интенсивности излучения в плоскости орбиты электронов. Следует отметить, что в согласии с [8, 9], максимальное значение интенсивности излучения, приведенного на рис. 1, *a* заметно превышает соответствующую интенсивность в однородных полях поворотных магнитов.

Включение поля в обмотке приводит к существенному изменению картины излучения (рис. 1, б). Как и ожидалось, на месте минимума (рис. 1, а) появляется узкий максимум с шириной ~ 1 мрад, что свидетельствует о более высокой направленности исследуемого излучения.

Зависимость интенсивности излучения под нулевым углом ($\theta = 0$) от энергии электронов исследовалась нами с помощью ФЭУ-93. Энергия излучающих электронов изменялась путем перемещения импульса возбуждаемого в обмотке магнитного поля в цикле ускорения. На рис. 2 (кривая 1) приведена полученная таким образом зависимость при поле обмотки $H_m = 19,9$ Э. Из рисунка видно, что в диапазоне энергии от 400 до 600 МэВ эта зависимость носит колебательный характер. Для энергий, превышающих 600 МэВ, интенсивность излучения монотонно нарастает. Положение максимумов и минимумов интенсивности излучения находится в удовлетворительном согласии с соотношением (1). Некоторое отличие может быть обусловлено излучением электронов в поворотных магнитах, конечной областью спектральной чувствительности ФЭУ ($3800 \text{ \AA} \lesssim \lambda \lesssim 4800 \text{ \AA}$), а также слабым нарушением условия дипольности излучения в наших опытах.

Для сравнения на этом же рисунке приведена зависимость интенсивности излучения электронов в краевых полях поворотных магнитов (кривая 2). Видно, что мгновенная спектрально-угловая интенсивность излучения при включении поля обмотки значительно превосходит интенсивность синхротронного излучения.

Ярко проявляющаяся на кривой 1 однозначная зависимость положения резких максимумов (минимумов) от энергии частиц может быть использована для оперативного измерения энергии ускоренных частиц с высокой точностью. Наблюдаемый характер зависимости интенсивности излучения от энергии, в принципе, позволяет осуществить в такой системе генерацию индуцированного излучения.

Таким образом, излучение электронов в слабом магнитном поле с резкими границами обладает в длинноволновой области спектра высокой интенсивностью и направленностью, а также рядом других привлекательных для практических применений особенностей.

Авторы выражают благодарность К.А.Беловинцеву, Е.Г.Бессонову, Б.М.Болотовскому, В.Л.Гинзбургу, В.И.Манько, К.Н.Шорину, П.А.Черенкову за полезные обсуждения и В.А.Карпову за помощь в проведении эксперимента.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15 мая 1981 г.

Литература

- [1] Д.Ф.Алферов, Ю.А.Башмаков, К.А.Беловинцев, Е.Г.Бессонов, П.А.Черенков. Письма в ЖЭТФ, **26**, 525, 1977.
- [2] Л.Д.Ландау, Е.М.Лившиц. Теория поля, М., изд. Наука, 1967.
- [3] Д.Ф.Алферов, Ю.А.Башмаков, Е.Г.Бессонов. ЖТФ, **42**, 1921, 1972.
- [4] Ю.А.Башмаков. Диссертация ФИАН, 1978.

- [5] R. Coisson. *Phys. Rev.*, **A20**, 524, 1979.
- [6] В.Г.Багров, М.Б.Моисеев, М.М.Никитин. Н.И.Федосов. *Изв. ВУЗов, Физика*, №5, 125, 1980.
- [7] Е.Г.Бессонов. *ЖЭТФ*, **80**, 852, 1981.
- [8] З.Л.Артемьева, Е.М.Мороз, К.Н.Шорин. *Краткие сообщения по физике*, №7, 36, 1980.
- [9] М.М.Никитин, А.Ф.Медведев, М.Б.Моисеев, В.Я.Эпп. *ЖЭТФ*, **79**, 763, 1980.
-