

## НАБЛЮДЕНИЕ ОНДУЛЯТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СИНХРОТРОНЕ "ПАХРА"

*Д.Ф.Алферов, Ю.А.Башмаков, К.А.Беловинцев,  
Е.Г.Бессонов, П.А.Черенков*

Описывается эксперимент по наблюдению ондуляторного излучения на синхротроне "Пахра" в видимой области спектра.

Получение узконаправленного поляризованного монохроматического электромагнитного излучения открывает большие возможности для исследований в физике высоких энергий, спектроскопии твердого тела, молекулярной физике, биологии, фотохимии и целом ряде других областей наук. В работах [1 – 4] обсуждалась возможность использования для этой цели излучения релятивистских заряженных частиц в периодических электромагнитных полях ондуляторов. Достаточно детальное теоретическое исследование свойств ондуляторного излучения можно найти в [5] и в приведенной там литературе. До настоящего времени ондуляторное излучение наблюдалось на электронных пучках линейных ускорителей в диапазоне энергий  $3 + 100$  Мэв [6 – 8] и на выведенном из синхротрона электронном пучке с энергией  $3,6$  Гэв [9].

Так как в этих работах использовалось только одно прохождение пучка через ондулятор, полученная интенсивность ондуляторного излучения была невелика. Однако, если поместить ондулятор в прямолинейном промежутке синхротрона, то за счет использования многократного прохождения частиц через ондулятор интенсивность (средняя) ондуляторного излучения может быть повышена на несколько порядков. Такая возможность ранее обсуждалась в работах [3] и [10]. В настоящей работе описываются эксперименты по наблюдению излучения электронов в ондуляторе, установленном на прямолинейном участке орбиты синхротрона "Пахра" [10].

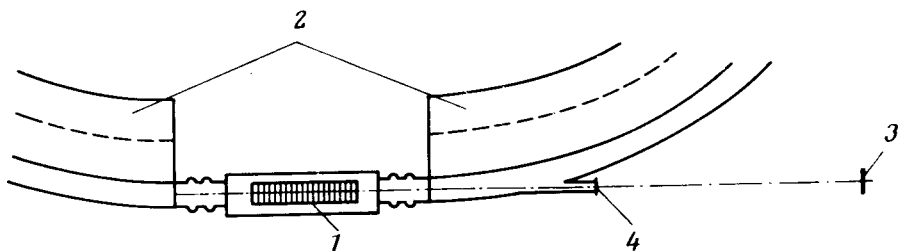
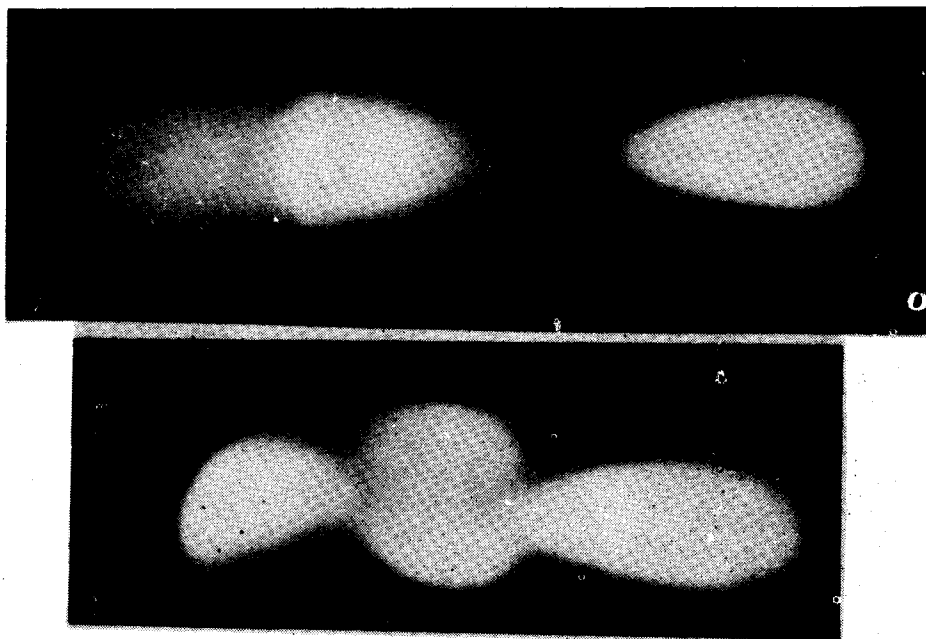


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – ондулятор, 2 – магнитопровод ускорителя, 3 – фотопластинка, 4 – кварцевое окно

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Ондулятор имеет 20 элементов периодичности. Длина каждого элемента – 4 см. Магнитное поле создается одновитковой плоской обмоткой, содержащей нечетное число последовательно соединенных параллельных проводников, ориентированных перпендикулярно оси пучка. Обмотка размещена в пазах магнитопровода, выполненного в виде ферромагнитной гребенки [11]. Питание обмотки ондулятора импульсное с максимальной амплитудой тока 8 ка и длительностью импульса 2 мсек. Плоскость ондулятора удалена от плоскости равновесной орбиты на 25 мм. Амплитуда поперечного периодического магнитного поля уменьшается с удалением от плоскости ондулятора. Поэтому для наиболее эффективной генерации излучения следует подводить пучок возможно ближе к плоскости ондулятора. В данной конструкции из-за влияния обратного токопровода наряду с поперечным периодическим магнитным полем появляется также неоднородная постоянная радиальная составляющая магнитного поля.

Возникновение радиальной составляющей вызывает вертикальное смещение циркулирующего пучка. В условиях эксперимента величина этого смещения составляла около 1 см по направлению к ондулятору. При токе в обмотке ондулятора, равном 3 ка, полученному смещению пучка синхротрона соответствует амплитуда магнитного поля ондулятора 360 э. Как показали наши эксперименты появление радиальной составляющей магнитного поля не приводило к потере электронов, ускоренных в синхротроне, если поле ондулятора включалось при энергии электронов большей 350 мэв. Условия нашего эксперимента были выбраны таким образом, чтобы ондуляторное излучение попадало в оптический диапазон волн. Ондуляторное и синхротронное излучение регистрировалось в диапазоне длин волн 2000 + 5000 Å с помощью фотопластинок "спектральные", тип 2, которые размещались перпендикулярно оси пря-

молинейного промежутка на расстоянии 440 см от центра ондулятора. Максимальная энергия электронов задавалась моментом выключения высокочастотного напряжения на ускоряющем резонаторе синхротрона. При этом импульсное магнитное поле ондулятора включалось и достигало своего амплитудного значения незадолго ( $\sim 0,1$  мсек) до снятия этого напряжения. Такой режим работы позволяет получить ондуляторное излучение от практически моноэнергетических электронов.



**Рис. 2.** *а* – Фотография синхротронного излучения электронов из поворотных магнитов синхротрона. Энергия 175 Мэв; *б* – фотография синхротронного и ондуляторного излучения электронов. Энергия 175 Мэв

На рис. 2, *а* представлена фотография синхротронного излучения от электронов с максимальной энергией 175 Мэв (при выключенном ондуляторе). Левая полоса соответствует излучению от пучка электронов на выходе из дальнего (относительно фотопластинки) квадранта камеры синхротрона, правая – излучению от пучка электронов при входе его в следующий квадрант камеры. На фотографии отчетливо виден минимум распределения интенсивности излучения в горизонтальной плоскости, который соответствует оси пучка в прямолинейном промежутке. Наблюдаемый разрыв между полосами объясняется тем, что излучение электронов данной энергии в рассеянных полях прямолинейного промежутка (которые заметно поворачивают вектор скорости электронов) попадает в инфракрасную область спектра и не регистрируется фотопластинкой. Фотография излучения при включенном ондуляторе представлена на рис. 2, *б*. Она показывает, что на месте минимума интенсивности излучения (рис. 2, *а*) появилось яркое пятно, соответствующее излучению от электронов в поперечном периодическом магнитном поле ондулятора.

Из предварительного анализа фотографий следует, что интенсивность ондуляторного излучения в единичном интервале углов вблизи оси ондулятора в несколько раз превышала соответствующую интенсивность синхротронного излучения. При этом учитывалось, что эффективная длительность синхротронного излучения примерно на порядок превышала длительность импульса ондуляторного излучения.

Чтобы лишний раз убедиться, что мы имеем дело с ондуляторным излучением, в одном из наших опытов максимальная энергия ускоренного пучка электронов была выбрана  $100 \text{ Мэв}$ , чтобы синхротронное излучение лежало в инфракрасной области вне области чувствительности фотопластинки. В этом случае фотоэмульсия должна регистрировать только ондуляторное излучение, спектр которого в соответствии с теорией должен в условиях нашего опыта лежать в видимой области. Рис. 3, где приведена фотография, полученная в таком опыте, показывает, что наблюдается снимок только ондуляторного излучения.

Интересно отметить, что, как и следовало ожидать, интенсивность ондуляторного излучения в плоскости колебаний частиц слабее (см. рис. 2, б).



Рис. 3. Фотография ондуляторного излучения. Энергия  $100 \text{ Мэв}$

Работа по дальнейшему изучению свойств ондуляторного излучения продолжается.

В заключение авторы считают приятным долгом поблагодарить В.В.Михайлина за постоянный интерес к работе, Н.И.Алексеева и В.А.Карпова за помощь в проведении эксперимента.

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

Поступила в редакцию  
25 июля 1977 г.

### Литература

- [1] В.Л.Гинзбург. Изв. АН СССР, сер. физ. 11, 165, 1947.
- [2] H. Motz. J. Appl. Phys., 22, 527, 1951 (пер. "Миллиметровые и субмиллиметровые волны", стр. 194, М., ИИЛ, 1959).
- [3] R. P. Godwin. Springer Tracts in Modern Physics, 51, 1, 1969. (пер. Синхротронное излучение в исследовании твердых тел, стр. 125, М., изд. Мир, 1970).

- [4] Д.Ф.Алферов, Ю.А.Башмаков, Е.Г.Бессонов. ЖТФ, 42, 1991, 1972; Препринт ФИАН, №23, 1972.
- [5] Д.Ф.Алферов, Ю.А.Башмаков, Е.Г.Бессонов. Труды ФИАН, 80, 100, 1975.
- [6] H. Motz, W. Torn, R.N. Whiterurst. J. Appl. Phys., 24, 856, 1953 (пер. "Миллиметровые и субмиллиметровые волны", стр. 317, М., ИИЛ, 1959).
- [7] И.А.Гришнев, В.И.Мякота, В.И.Колосов, В.И.Белоглад, П.В.Якимов. ДАН СССР, 131, 61, 1960.
- [8] L.R.Elias, W.M.Fairbank, J. M. J. Madey, H.A.Schwettman, T.I.Smith. Phys. Rev. Lett., 36, 717, 1976.
- [9] А.И.Алиханян, С.К.Есин, К.А.Испирян, С.А.Капканян, Н.А.Корхмязян, А.Г.Оганесян, А.Г.Таманян. Письма в ЖЭТФ, 15, 142, 1972.
- [10] Д.Ф.Алферов, Ю.А.Башмаков, К.А.Беловинцев, Е.Г.Бессонов, В.В.Михайлин, Е.И.Тамм, П.А.Черенков. Труды Третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., изд. Наука, 1973.
- [11] Д.Ф.Алферов, Ю.А.Башмаков, К.А.Беловинцев, Е.Г.Бессонов. А.С.Головин, П.А.Черенков. Материалы Всесоюзной конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей", Томск, 1975, стр. 214.
-