

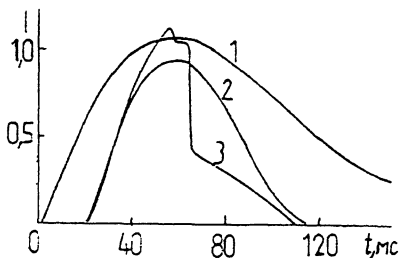
## ПРОЯВЛЕНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ СОСТОЯНИЙ В ПУЧКЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ СИНХРОТРОНА

А. С. Кузнецов, Э. Вилт

Компактные синхротроны с радиусом орбиты электронов в несколько сантиметров [1, 2] перспективны как лабораторные источники синхротронного излучения (СИ), так и как объекты для исследования динамики ускорения электронного пучка.

Ранее в [3] мы сообщали о создании импульсного лабораторного синхротрона ЛИС-2 с радиусом орбиты электронов 6 см, максимальной энергией электронов 60 МэВ и средним ускоренным током электронов около 10 мА. При исследовании оптических характеристик синхротрона ЛИС-2 было обнаружено необычно резкое изменение интенсивности СИ при относительно большом числе ускоренных электронов. Проявление этого эффекта видно на рисунке, где представлены временные зависимости импульсов СИ и магнитного поля. Измерение интегральной интенсивности СИ в области 300–900 нм осуществлялось фотоэлементом Ф-25, измерение магнитного поля велось по току через измерительный шунт. Как видно из рисунка, нарастание и спад магнитного поля (энергии электронов) сопровождается плавным изменением интенсивности излучения (кривые 1 и 2), что и следовало ожидать для СИ при постоянном числе ускоряемых электронов. Опыты также показали, что при некоторых условиях (см. ниже) значительная часть электронов (до 100%) может выпасть из режима синхротронного ускорения, что наблюдается по резкому уменьшению интенсивности СИ за время около 3 мс (кривая 3), соответствующему теоретическому расчету времени уменьшения энергии и радиуса орбит электронов за счет спонтанного СИ отдельных электронов. Визуально электроны, выпавшие из сепаратрисы, наблюдались по более слабому СИ при меньших радиусах электронной орбиты. Экспериментально установлено, что процессы сброса ускоренных электронов происходят с большей вероятностью при следующих условиях: 1) большем числе ускоряемых электронов; 2) больших максимальных энергиях электронов ( $E_{\max} > 30$  МэВ); 3) в области максимума магнитного поля.

Всю совокупность полученных данных, по нашему мнению, можно объяснить при предположении, что в процессе ускорения релятивистского электронного пучка низкой плотности происходит фазовый переход, сходный с кристаллизацией электронного газа, теоретически предложенный Вигнером [4] для модели вырожденного электронного газа низкой плотности, погруженного в положительное "желе", или образованием сильно коррелированных состояний типа "электронной жидкости". Для образования стабильного электронного кристалла в модели Вигнера [4, 5] необходимо, чтобы средняя потен-



Временная зависимость напряженности магнитного поля (1) и интенсивности СИ (2,3) при максимальной энергии электронов около 40 МэВ.

Потенциальная энергия электронов  $\bar{E}_n$  была больше средней кинетической  $\bar{E}_k$ , т.е.  $\bar{E}_n > \bar{E}_k$  и амплитуда колебания электронов около положения равновесия была достаточно мала, т.е.  $\bar{E}_n > k_B T$ . К настоящему времени экспериментально открыто существование Вигнеровской кристаллизации электронного газа для двухмерного случая электронных состояний на поверхности жидкого гелия и ведутся интенсивные поиски этого эффекта в твердых телах [5].

В случае ускоряемого в синхротроне релятивистского невырожденного электронного пучка малой плотности роль положительного "желе", по нашему мнению, может играть потенциал ускоряющего поля. Одно из условий образования конденсированного состояния в неравновесном, невырожденном, релятивистском газе электронов в пучке синхротрона может быть выражено в виде

$$\bar{E}_n > \Delta E \approx \hbar \omega_{By},$$

где  $\Delta E$  — интервал энергий в спектре релятивистских электронов, движущихся в магнитном поле,  $\hbar \omega_{By}$  — квант энергии ускоряющего поля. Проведем оценки выполнимости данного условия в нашем случае. При числе ускоренных электронов  $\sim 10^8$  с достижением электронами максимальной энергии около 40 МэВ плотность электронов в сгустке  $n_e \sim 10^{10}$  см<sup>-3</sup>, среднее расстояние между электронами составит  $r \sim n_e^{-1/3} \sim 10^{-3}$  см. и, следовательно, средняя потенциальная энергия Кулоновского взаимодействия  $\bar{E}_n \sim \frac{e^2}{r} \sim e^2 n^{1/3} \sim 10^{-4}$  эВ, что в нашем случае значительно больше энергии кванта ускоряющего поля  $\hbar \omega_{By} = 0,33 \cdot 10^{-5}$  эВ. В процессе ускорения с ростом энергии электронов  $E$  происходит увеличение электронной плотности из-за адиабатического уменьшения амплитуд поперечных бетатронных колебаний как  $E^{-1/2}$  и амплитуды фазовых колебаний как  $E^{-1/4}$ . Дальнейшее увеличение электронной плотности за время  $\tau \sim \frac{E}{W} \sim 10^{-2}$  с ( $W$  — мощность СИ,  $E = 40$  МэВ) происходит за счет излучения квантов СИ [6], что эквивалентно

эффективному охлаждению электронного пучка [7]. Отметим, что оценка времени охлаждения электронного пучка при энергии электронов 40 МэВ с учетом зависимости  $\tau \sim E/W \sim E^{-3}$  согласуется с фактом наблюдения сбросов электронов в области максимума магнитного поля при максимальной энергии электронов около 40 МэВ и заданной временной зависимости импульса магнитного поля (см. рис. 1). Увеличению плотности электронов в пучке способствует также и малый радиус электронной орбиты ускорителя.

Оценка температуры электронного пучка (при энергии 40 МэВ), установившейся в результате охлаждения за счет радиационных потерь, дает значение  $T \sim 1K$  ( $k_B T \sim 10^{-4}$  эВ), и, следовательно, условие стабильности электронного кристалла  $\bar{E}_n > k_B T$  также может быть выполнено.

Таким образом, в процессе ускорения пучка электронов в синхротроне с малым радиусом орбиты электронов благодаря затуханию бетатронных и фазовых колебаний при излучении квантов СИ могут возникнуть условия для фазового перехода – конденсации невырожденного релятивистского электронного газа, вследствие чего резко изменяется структура энергетического спектра электронов и электроны выпадают из режима синхротронного ускорения из-за нарушения условия синхронизма.

Авторы благодарят П. И. Консина и Ф. А. Савихина за обсуждения.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Kuznetsov A.S., Bahmann H.-R., Haamer A., Piilma M., Pill K., Sidorin K.K., Tammik A.-A., Tiit V. and Vilt E.// Nucl. Instr. and Meth. 1987. V. A261. P. 58-59.
- [2] Anevsky S.I., Vernyi A.E., Panasjuk V.S. and Kromchenko V.B.// Nucl. Instr. and Meth. 1987. V. A261. P. 56-57.
- [3] Kuznetsov A., Tiit V., Vilt E., Pill K., Haamer A., Tammik A., Piilma M.// Rev. Sci. Instrum., 1989. V. 60. No 7. P. 1717-1718.
- [4] Wigner E.P.// Phys. Rev. 1934. V. 46. P. 1002-1010.
- [5] Цидильковский Н.М.// УФН. 1987. Т. 152. В. 4. С. 583-622.
- [6] Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение. Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1986. 296 с.
- [7] Будкер Г.И., Скринский А.Н.// УФН. 1978. Т. 124. В. 4. С. 561-595.