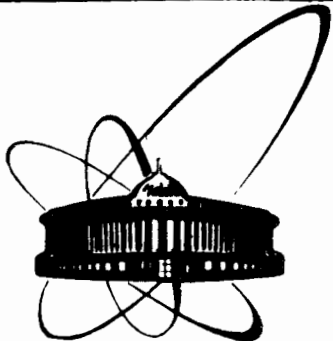


24/2-83



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

5537/83

9-83-562

Г.В.Долбилов, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев,
С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ
АБСОЛЮТНОГО КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРОНОВ
В КОЛЬЦЕ НА ПРОТОТИПЕ КУТИ

Направлено в "Журнал технической физики"

1983

Эффективность ускорения ионов электронными кольцами определяется плотностью электронов в сжатом кольце. Поэтому для понимания процесса ускорения ионов необходимо иметь достоверные и как можно более точные измерения интенсивности электронов в кольце. Наиболее хорошо разработанной и точной является методика измерения числа электронов по синхротронному свету^{/1/}. В этих измерениях неизвестным параметром является энергия электронов, которую надо знать с точностью 1%. По определению интенсивности электронов в кольцах было выполнено несколько работ^{/1, 2/}. В работе^{/1/} проводилось измерение в инфракрасной области спектра. В работе^{/2/} определение числа электронов осуществлялось в видимой области спектра. В связи с тем, что для этой области длин волн характерна сильная зависимость выхода излучения от энергии, одновременно измерялась энергия электронов по спектру синхротронного излучения.

Целью настоящей работы является:

1. Измерение энергии электронов различными методами, сравнение методик.

2. Измерение абсолютного выхода синхротронного излучения в разных областях спектра /видимой и инфракрасной/ и определение числа электронов.

3. Создание монитора числа электронов в сжатом кольце для работы в режиме ускорения.

1. Как известно, синхротронное излучение имеет непрерывный спектр по длинам волн λ , который описывается формулой^{/3/}

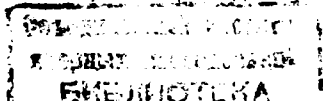
$$W_{\lambda} = 6,82 \cdot 10^{-21} \frac{y^7}{R^3} y^2 F(y), \quad (I)$$

λ_c - критическая длина волны, y - релятивистский фактор электронов, R - радиус кольца.

$$F(y) = y \int_{y/3}^{\infty} K_{5/3}(y) dy, \quad y = \frac{\lambda_c}{\lambda}.$$

Характерной особенностью спектра СИ является максимум, который приходится на длину волны $\lambda_M = 0,42 \lambda_c$. Уточнение значения энергии можно провести именно по положению максимума в синхротронном спектре.

А. Измерение спектра СИ было сделано в видимой и ближней инфракрасной области с помощью монохроматора МДР-2, на который



свет собирался с помощью зеркала и кварцевой линзы. В качестве регистрирующего элемента использовался германиевый фотодиод со спектральной чувствительностью $0,4+1,9$ мкм. Предварительно измерительная система калибровалась по излучению эталонной вольфрамовой лампы с температурой $T = 2343^\circ\text{C}$, как указано в работе^{/2/}. С учетом калибровок проводился пересчет измеряемого сигнала $U_{\text{син}}$ в мощность СИ по формуле:

$$W_{\text{син}} = \frac{U_{\text{син}}(\lambda)}{U_{\text{кал}}(\lambda)} P(\lambda T),$$

где $U_{\text{кал}}$ - сигнал детектора для данной длины волны λ при калибровке, $P(\lambda T)$ - мощность излучения вольфрамовой лампы. Измерение спектра СИ монохроматором проводилось на прототипе КУТИ. Режим магнитной системы обеспечивал сжатие электронных колец до $R = 3$ см.

Поскольку в каждом цикле сжатия проводилось измерение только при одной длине волны, был необходим монитор относительного числа электронов в кольце. Таким монитором служил сигнал с фотоэлектронного умножителя от тормозного излучения, возникающего при разжатии кольца электронов в магнитном поле и высадке их на стенку камеры. В дальнейшем он будет обозначаться, как U_y . Полученные при измерениях значения сигнала синхротронного излучения брались при одном мониторе. На рис.1 представлен восстановленный спектр СИ для $R = 2,9$ см. По положению максимума в спектре СИ можно определить энергию электронов:

$$\gamma = \left(\frac{4,2R}{\lambda_c}\right)^{1/3}, \quad \lambda_c = \frac{\lambda_M}{0,42}$$

Значение энергии, определенное этим способом, составляет $\gamma = 38,5$. При этом необходимо отметить, что это среднее значение энергии за большое число циклов сжатия.

К сожалению, провести измерение спектра СИ в другом режиме сжатия $R = 3,5$ см/ не удалось из-за уменьшения сигнала с фотодиода.

Б. Поскольку измерения с монохроматором проводились в течение многих циклов сжатия, было интересно определить спектр СИ за один цикл, не перестраивая прибора.

Такие измерения были выполнены на спектрографе ИСП-51. В качестве регистрирующего элемента была использована фотопластина. Спектр был снят в режиме сжатия до $R = 3,5$ см.

Обработка спектрограмм производилась по стандартной методике, описанной в работе^{/4/}. Погрешность в фотометрировании и пересчете на интенсивность составляет $20+30\%$. На рис.2 приведены экспериментальные точки измеренного распределения спектра синхротронного излучения. Линия соответствует расчету для $\gamma = 35$ и ра-

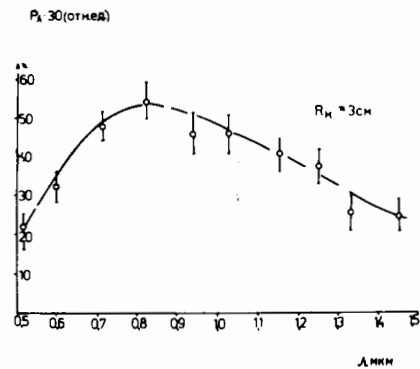


Рис.1. Спектральное распределение синхротронного излучения, измеренное с помощью монохроматора.

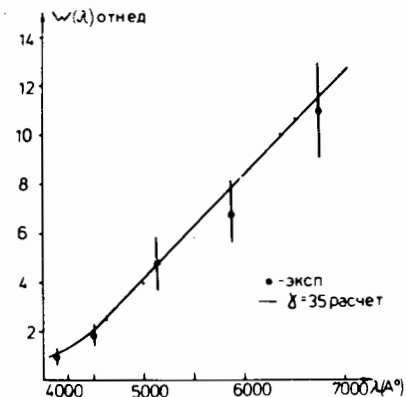


Рис.2. Восстановленный по фотопластинке спектр синхротронного излучения для радиуса кольца $R = 3,5$ см.

диусу кольца $R = 3,5$ см. Пересчет для радиуса кольца $R = 3$ см по инварианту $\gamma R = \text{const}$ дает значение $\gamma = 39$.

В. Были выполнены измерения энергии электронов по методике, аналогичной примененной в работе^{/2/}: с помощью двух ФЭУ, которые были снабжены интерференционными фильтрами, выделяющими $\lambda = 0,41$ мкм, $\lambda = 0,63$ мкм. Синхротронное излучение попадало на ФЭУ через волоконные световоды. Конец световодов, обращенный к источнику излучения, имел диаметр $\varnothing 15$ мм и был установлен на $R = 3,5$ см в медианной плоскости. Значение энергии рассчитывалось по асимптотической формуле для $\lambda \ll \lambda_c$

$$\gamma^3 = \frac{4,2R}{\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1\lambda_2} \ln\left(\frac{W(\lambda_1)}{W(\lambda_2)} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{5/2}\right)} \quad (II)$$

и по точным формулам (I), $\frac{W(\lambda_1)}{W(\lambda_2)}$ - отношение мощностей излучения

СИ на длинах волны λ_1, λ_2 . Предварительно ФЭУ с фильтрами и световодами калибровались по эталонной лампе, с учетом этого по измеренным отношениям сигналов $\frac{U_{\text{син}}(\lambda_1)}{U_{\text{син}}(\lambda_2)}$ находилось отношение $\frac{W\lambda_1}{W\lambda_2}$.

В табл.1 приведены значения $\frac{W(\lambda_1)}{W(\lambda_2)}$ для двух режимов сжатия: $R = 3$ см, $R = 3,5$ см.

Таблица 1

R	R = 3 см	R = 3,5 см
$\frac{W(\lambda_1)}{W(\lambda_2)}$	2,45	4,2
по форм. (II) γ	37,5	35,5 ÷ 36,5
по форм. (I) γ	38,0	35,5 ÷ 36,5

Как видно, значения энергии, определяемые по точным и асимптотическим формулам, совпадают, также совпадают и значения энергии, измеренные по максимуму спектра СИ в видимой области. Таким образом, для повышения точности измерения числа электронов в каждом цикле сжатия необходимо знание энергии электронов в каждом цикле, которое может быть измерено по асимптотической формуле спектра синхротронного излучения, использованного в описанной выше методике со световодами.

Необходимость измерения энергии электронов в каждом цикле сжатия определяется тем, что она меняется от импульса к импульсу. На рис.3 приведены радиальные профили сечения электронного кольца за несколько циклов сжатия. Радиус кольца - 3 см. По оси абсцисс на осциллограмме - текущий радиус. Масштаб: 1 клетка - 1,0 мм. Разброс положения максимума плотности составляет 1,5-2 мм, что соответствует изменению энергии от импульса к импульсу в среднем на 15-17%. Такие измерения энергии, если их не учитывать, при определении числа электронов даже в инфракрасной области спектра могут привести к большим неточностям.

2. Измерения числа электронов в кольце. Как было сказано выше, спектр синхротронного излучения достаточно широк. Для повышения точности пересчета измеряемой мощности синхротронного излучения в число электронов измерительные приборы должны быть достаточно узкополосны.

В данной работе эксперименты проводились со следующими фотоприемниками:

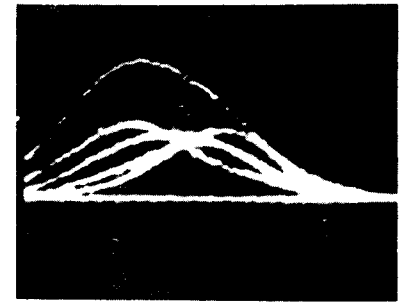
а/ германиевый фотодиод с фильтром на длине волны $\lambda = 1,6$ мкм, $\Delta\lambda = \pm 0,5$ мкм;

б/ охлаждаемое фотосопротивление с фильтром СЗС-9, $\lambda = 2,4$ мкм, $\Delta\lambda = \pm 0,5$ мкм;

в/ ФЭУ с набором узкополосных интерференционных фильтров с длинами волн $\lambda = 0,63$ мкм, $\lambda = 0,41$ мкм, полосой пропускания $\Delta\lambda = \pm 0,08$ мкм.

Калибровка приборов проводилась с помощью эталонной вольфрамовой лампы, как в работе^{1/2/}, с использованием прерывателя света /по длительности сигнал с детектора должен был совпадать с сигналом синхротронного излучения/.

Рис.3. Радиальное распределение профиля электронной плотности для конечного радиуса сжатия, измеренное с помощью диссектора; масштаб по оси абсцисс: 1 клетка соответствует 1 мм.



В табл.2 представлены результаты калибровки:

Таблица 2

Тип прибора	L /см/	P /Вт/мкм/	U кал /мВ/
$\lambda = 2,4$ мкм	29	0,947	10,0
$\lambda = 1,6$ мкм	35	2,38	68
$\lambda = 0,62$ мкм	16	0,36	38
$\lambda = 0,41$ мкм	16	1,2 10	48

Здесь P /Вт/мкм/ - мощность излучения эталонной лампы для данной длины волны, L - расстояние от лампы до детектора, $U_{\text{кал}}$ - амплитуда сигнала с детектора.

Температура лампы определялась пирометром с точностью 10°C. При расчете излучательная способность вольфрама для длин волн бралась из работы^{4/}. Измерение СИ на прототипе КУТИ, как было сказано выше, производилось тремя датчиками в инфракрасной и видимой области. Амплитуда сигнала с детектора при приеме излучения $U_{\text{син}}$ определяется^{2/} следующим образом:

$$U_{\text{син}} = \psi_{\lambda} \cdot W_{\text{лин}} \cdot \frac{\Delta\Omega}{2\pi \cdot 2\theta_z}$$

где ψ_{λ} - спектральная чувствительность детектора, $W_{\text{син}}$ -

мощность синхротронного излучения от электронного кольца; $\Delta\Omega$ - телесный угол регистрации излучения, $\Delta\Omega = \frac{S_n}{R^2}$, где R - расстояние от детектора до кольца; θ_z - полуширина углового распределения синхротронного излучения; ψ_{λ} - спектральная чувствительность, определяемая из результатов калибровки, приведенных в табл.2.

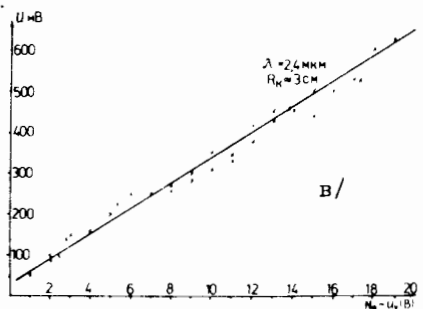
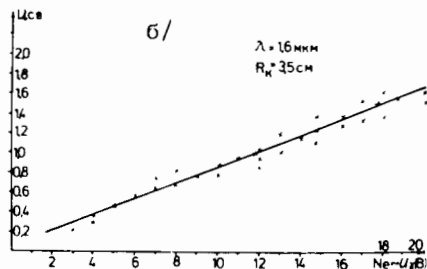
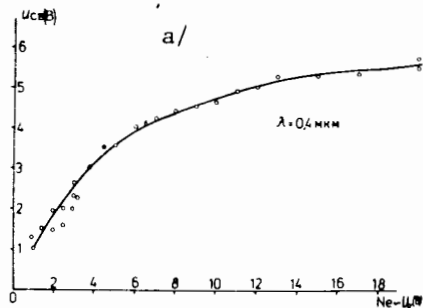


Рис.4. Зависимость выхода синхротронного излучения под нулевым углом от относительного числа электронов. Длины волн наблюдения: а/ $\lambda = 0,4$ мкм; б/ $\lambda = 1,6$ мкм; в/ $\lambda = 2,4$ мкм.

с учетом того, что синхротронное излучение некогерентно, а также с учетом калибровок формула для определения числа электронов в кольце имеет вид

$$N_e = \frac{U_{\text{син.}}}{U_{\text{кал.}}} \frac{P(\lambda T)}{W(\lambda)} 4 \left(\frac{R}{L}\right)^2 \theta_z,$$

где $W(\lambda)$ - мощность синхротронного излучения для одного электрона (I). Как видно из этой формулы, для нахождения числа электронов необходимо знание углового распределения синхротронного излучения в зависимости от параметров кольца. В работе^{15/} было показано, что ширина его зависит для видимой области спектра от числа электронов. При измерении в видимой области спектра синхротронного излучения под нулевым углом обнаружилась нелинейная зависимость сигнала света от числа электронов в кольце. На рис.4а показана эта зависимость. Поэтому при определении абсолютного числа электронов для каждого монитора числа электронов по γ -излучению определялась полуширина углового распределения, значение которой затем подставлялось в формулу для расчета интенсивности электронов. Был также измерен выход синхротронного излучения для длины волны $\lambda = 1,6$ мкм и $2,4$ мкм в зависимости от относительного числа электронов в кольце, см. рис.4б,в. Как видно, линей-

ная зависимость свидетельствует о постоянной ширине углового распределения для этого спектрального диапазона. Полученная в работе^{1/} и в данной работе величина θ_z составляет 50 мрад. Теоретическое значение полуширины углового распределения для $\theta_z / \text{мрад} = 0,82 / E$ (ГэВ), при $E = 18$ МэВ $\theta_z = 45$ мрад.

Перейдем к определению абсолютного числа частиц. Для детектора с длиной волны $\lambda = 2,4$ мкм измерение выхода синхротронного излучения проводилось в режиме сжатия до $\gamma = 38,5$. Поэтому с учетом калибровок табл. 2 100 мВ выходного сигнала соответствует $N_e = 1,3 \cdot 10^{12}$. Как видно из графика, максимальная величина сигнала - 620 мВ, что соответствует максимальному числу электронов в кольце: $N_e = 8 \cdot 10^{12}$ /по показаниям монитора $U_\gamma = 20$ В/. Для детектора с рабочей длиной волны $\lambda = 1,6$ мкм. Измерения проводились в режиме сжатия до $R = 3,5$ см, чтобы диапазон измерения сигнала находился в линейном режиме работы прибора; при этом использовался нейтральный фильтр для ослабления потока излучения в 3 раза; $R = 3,5$ см соответствует $\gamma = 36$. Так что 100 мВ соответствует $N_e = 4,1 \cdot 10^{11}$ электронов. Зарегистрировано, как видно из графика, 1,5 В, что дает для числа частиц N_e значение $N_e = 6 \cdot 10^{12} / U_\gamma = 16$ В/.

При определении числа электронов в видимой области спектра одновременно измеряется энергия электронов в каждом цикле. Так, для данного цикла измерений было получено среднее значение $\gamma = 37$ для радиуса кольца $R = 3$ см. По показаниям монитора $U_\gamma = 6$ В; значения сигналов с ФЭУ для $\lambda = 0,62$ мкм $U_c = 1,6$ В; для $\lambda = 0,41$ мкм $U_c = 3,2$ В. Этому значению числа электронов соответствует угловая ширина $\theta_z = 42$ мрад. Число электронов по этим измерениям: для $\lambda = 0,6200$ мкм, $N_e = 2,2 \cdot 10^{12}$, $U_\gamma = 6$ В; для $\lambda = 0,4100$ мкм, $N_e = 2,8 \cdot 10^{12}$, $U_\gamma = 6$ В. В этих измерениях учтено, что коэффициент прохождения видимого излучения составляет 0,92. Результаты измерений можно свести в таблицу.

Таблица 3

Энергия γ	λ мкм	$U_{\text{син}}$	Монитор U_γ	N_e	$\frac{N_e}{U_\gamma}$ /эл./В/
38,5	2,4	620 мВ	20 В	$8 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{11}$
36	1,6	1,5 В	16 В	$6 \cdot 10^{12}$	$3,8 \cdot 10^{11}$
37	0,6200	1,6 В	6 В	$2,2 \cdot 10^{12}$	$3,7 \cdot 10^{11}$
	0,4100	3,2 В	6 В	$2,8 \cdot 10^{12}$	$4,6 \cdot 10^{11}$

Из таблицы видно, что измерения в видимой и в инфракрасной области согласуются с 20%-ной точностью.

3. Для мониторинга числа частиц при ускорении электронно-ионных колец необходим прибор с большим динамическим диапазоном, поскольку процесс вывода электронного кольца происходит в широ-

ком интервале времен, которому соответствует большая область по энергии электронов. В качестве такого прибора используется ФЭУ-14ЭЛУ-Ф со спектральной чувствительностью до 1 мкм, выходной ток которого линеен до 3 ампер. Чтобы на показания монитора по синхротронному излучению не влияло изменение угловой ширины конуса СИ, ФЭУ установлен в фокальной плоскости линзы /рис.5/. Поле зрения линзы составляет $\pm 2,5$ см по аксиальному направлению. Была проведена калибровка монитора при выводе кольца по одному из абсолютных детекторов СИ; при этом одновременно изменялись амплитуда сигнала с монитора в момент времени $t = 2150$ мкс от начала сжатия кольца, соответствующий нахождению кольца в меридианной плоскости, и число электронов на длине волны $\lambda = 2,4$ мкм. На рис.6 представлена эта зависимость. Таким образом, монитор позволяет проводить измерения количества электронов в процессе вывода электронного кольца в широких пределах, что представляется важным для понимания процесса ускорения и соответственно подбора оптимальных параметров ускоряющей системы.

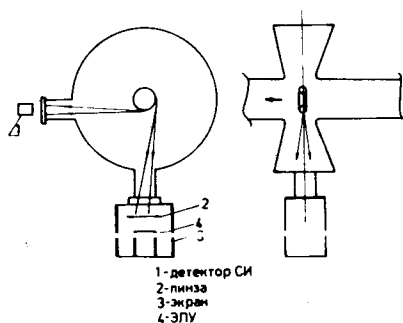


Рис.5. Геометрия расположения монитора в камере ускорителя.

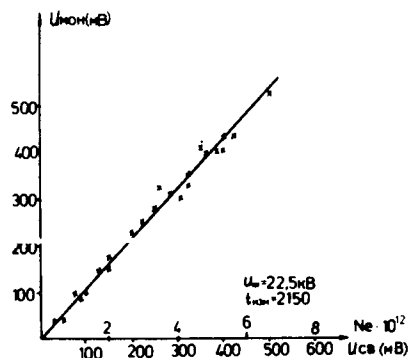


Рис.6. Калибровочная кривая монитора, время измерения $t = 2150$ мкс после инъекции. По оси абсцисс - абсолютное количество электронов и относительное, измеренное детектором с $\lambda = 2,4$ мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голутвин А.И. и др. ОИЯИ, Р9-81-245, Дубна, 1981.
2. Сумбаев А.П., Тютюнников С.И., Шаляпин В.Н. ОИЯИ, Р9-81-427, Дубна, 1981.
3. Пахомчик А. Радиоастрофизика. "Мир", М., 1973.
4. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. "Наука", М., 1979.
5. Казаринов Н.Ю. и др. ОИЯИ, Р9-81-428, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 августа 1983 года.

Долбилов Г.В. и др.

9-83-562

Определение абсолютного количества электронов
в кольце на прототипе КУТИ

Описаны результаты измерения энергии электронов по форме спектра синхротронного излучения /СИ/. Полученные значения энергии электронов используются для нахождения числа электронов в кольце. Определение мощности СИ произведено на трех длинах волн: $\lambda = 0,4$ мкм, $\lambda = 0,61$ мкм, $\lambda = 2,4$ мкм. Максимально измеренное число электронов в кольце составляет: $N_e = 8 \cdot 10^{12}$.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Dolbilov G.V. et al.

9-83-562

Determination of Electron Absolute Number
in Ring on Heavy Ion Collective Accelerator Prototype

The results of electron energy measurements on the shape of the synchrotron radiation spectra are described. These results are used to determine the electron number in a ring. Measurements of synchrotron radiation power are produced in three wave length: $\lambda = 0.4$ mcm, $\lambda = 0.61$ mcm, $\lambda = 2.4$ mcm. The maximum number of electrons in ring is $N_e = 8 \cdot 10^{12}$.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой