

5/4-70

С 3454

Г-524

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

5206

9 - 5206



А.А. Глазов, В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский,
Б.И. Замоладчиков, В.В. Кольга, Д.Л. Новиков,
Л.М. Онищенко

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

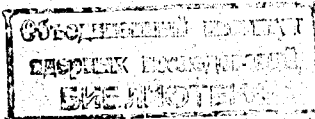
ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА

1970

9 - 5206

А.А. Глазов, В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский,
Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга, Д.Л. Новиков,
Л.М. Онищенко

ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА



8487/2 49

Постоянно растущие требования к точности физического эксперимента вызывают необходимость создания ускорителей со все большими токами и стимулируют теоретические и экспериментальные исследования возможности создания таких ускорителей.

В Лаборатории ядерных проблем в начале 1968 года была введена в действие электронная модель ускорителя нового типа - релятивистского кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой^{1/}.

Модель имеет одинаковую с моделируемым протонным ускорителем конечную энергию и набор энергии за оборот (в единицах энергии покоя), а также частоту бетатронных колебаний и фазовую протяженность сгустка.

Если исходить из предположения, что величина тока в ускорителе ограничивается ослаблением поперечной фокусировки за счёт действия пространственного заряда, то при указанных выше условиях ток в моделируемой протонной машине связан с током электронной модели соотношением

$$\frac{i_p}{i_e} = \frac{eV_p}{eV_e} \frac{\omega_p}{\omega_e} \frac{\Delta z_p}{\Delta z_e} = \frac{M_p}{m_e} \frac{\omega_p}{\omega_e} \frac{\Delta z_p}{\Delta z_e} = \frac{B_p}{B_e} \frac{\Delta z_p}{\Delta z_e} \quad (1)$$

где ω , Δz - частота обращения и высота пучка; M - масса частицы, B - магнитное поле, eV - набор энергии; индекс "р" - относится к протонам, "е" - к электронам. Магнитное поле в модели на радиусе инжекции равно 14 гс; если принять для протонной машины $B = 4200$ гс и $\Delta z_p / \Delta z_e = 2$, то коэффициент моделирования по току $i_p / i_e = 600$.

Основные параметры электронной модели следующие:

энергия инжекции - 6 кэв;	конечная энергия - 409 кэв;
радиус инжекции - 18 см;	конечный радиус - 100,7 см;

частота обращения $f = 39475$ кгц; $\eta_{\infty} = 121,2$ см; $Q_r = 1,045+2$; $Q_z = 1,15+1,32$.

Система инжекции в электронную модель/2/ обеспечивает на радиусе инжекции ток в виде микросгустков амплитудой до 20 ма и длительностью 2,0 нсек.

Модель имеет, кроме непрерывного, также импульсный режим работы, что достигается модуляцией инжекторов или ускоряющего напряжения, либо того и другого одновременно.

В настоящее время на конечном радиусе ускорителя получен средний ток 600 мка, что соответствует току протонов 300+400 ма. Зависимость тока от радиуса показана на рис. 1а и 1б (средний ток и амплитуда тока в микроимпульсе - соответственно).

На рис. 1в показана зависимость плотности электронов от радиуса (кривая 1), определенной как/3/

$$n = \gamma^3 \frac{E_0}{eV} \frac{i}{f r_{\infty}^2 \Delta z \Delta \phi e} \quad (2)$$

На том же рисунке (кривая 2) приведена зависимость от радиуса предельной плотности, определенной из условия

$$Q_z^2(r) - 4\pi \frac{n(r) r_{\infty}^2 r_e}{\gamma^3(r)} = 1 \quad (3)$$

где $r_e = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 m_0 c^2} = 2,82 \cdot 10^{-13}$ см - классический радиус электрона. При выводе (3), а также (1) предполагалось, что пространственный заряд, сосредоточенный в "бесконечном" слое толщиной Δz , понижает частоту вертикальных колебаний Q_z до единицы.

При определении плотности по (2) необходимо, кроме величины тока, знать также набор энергии за оборот (eV), вертикальный (Δz) и азимутальный ($\Delta \phi$) размеры пучка.

Вертикальный размер пучка определялся по распределению тока на девятиламельную мишень, которое записывалось на самописец (или наблюдалось на пятилучевом осциллографе). Зависимость $\Delta z(r)$ показана на рис. 2а (полная ширина на полувысоте распределения). На большей части радиусов Δz не превышает 5 мм.

Набор энергии за оборот определялся по времени ускорения пучка до фиксированного радиуса в импульсном режиме как

$$eV = \frac{W(r_2) - W(r_1)}{t(r_2) - t(r_1)} T, \quad (4)$$

где $W(r)$ - энергия на радиусе r , $t(r)$ - время ускорения до этого радиуса, T - период обращения. На рис. 2б приведена усредненная для выбранного интервала радиусов величина набора энергии в зависимости от радиуса при ускоряющем напряжении 1,2 кв. Эта картинка дает также представление о движении фазы ускоряемого пучка. На рис. 2в показано поведение фазы пучка вдоль радиуса, измеренной непосредственно с помощью фазометра. Видно, что полная девиация фазы не превышает 25° .

Азимутальный размер сгустка ускоряемых частиц измерялся с помощью экранированной мишени, сигнал с которой согласованным кабелем подавался на вход стробоскопического осциллографа (одновременно определялась амплитуда тока). Результаты этого измерения показаны на рис. 2г, из которого видно, что $\Delta\phi$ не очень сильно меняется вдоль радиуса и близко к 0,5 рад.

Кроме измеренных характеристик пучка, знание которых необходимо для определения плотности частиц в ускоренном пучке, были экспериментально определены значения частот бетатронных колебаний на разных радиусах. Колебания (центра тяжести пучка) раскачивались высокочастотным полем, которое создавалось электродами соответствующей конфигурации (двумя горизонтальными пластинами, питаемыми противофазно, - для раскачки вертикальных колебаний; вертикальной пластиной и плакировкой камеры - для раскачки радиальных колебаний). Подводящие к пластинам высокочастотное напряжение кабели оканчивались согласованными нагрузками, что обеспечивало постоянное (внутри 20%) напряжение раскачки в широком диапазоне частот. Перестраиваемый в диапазоне 45-105 Мгц генератор работал в импульсном режиме. Резонанс фиксировался по уменьшению тока на мишени.

Результаты измерения Q_r и Q_z представлены на рис. 3а и 3б вместе с теоретическими зависимостями этих величин от радиуса, полученными из соотношений^{4/}

$$Q_z^2 = -\dot{n} + \frac{\epsilon^2 N^2}{2(N^2 - 1 - n)} + \frac{\epsilon^2 R^2}{2\lambda^2(N^2 - 1 - n)} + \frac{\epsilon^2 R^2}{2\lambda^2 N^2},$$

$$Q_z^2 = (1+n) \left[1 + \frac{3}{2N^2} \left(\frac{\epsilon R}{N\lambda} \right)^2 \right] + \frac{\epsilon^2}{2(N^2 - 4 - 4n)} \left(2 - \frac{N^2}{N^2 - 1 - n} + n \right)^2 + \frac{0,7\epsilon^2}{N^2 - 1 - n}, \quad (5)$$

где n - показатель роста магнитного поля, ϵ - глубина вариации, $N=8$ - число спиралей, $\lambda = 8$ см - шаг спирали.

Резонансная частота фиксировалась с точностью не хуже 200 кгц, так что точность измерения Q определяется в основном конечной радиальной протяженностью пластин (4 см). Описанные измерения дают достаточно полную информацию о характеристиках пучка и позволяют определить как плотность частиц в ускоренном пучке (максимальная плотность, достигнутая на конечном радиусе, составляет 4×10^7 1/см³), так и ожидаемый сдвиг частоты вертикальных колебаний под действием пространственного заряда.

Согласно теоретическим представлениям^{/5/} пространственный заряд должен оказывать влияние на некогерентную частоту (частоту колебаний частиц относительно центра тяжести пучка) бетатронных колебаний, в то время как когерентная частота должна оставаться постоянной с высокой степенью точности. Это последнее утверждение было подвергнуто экспериментальной проверке. Частота вертикальных колебаний центра тяжести пучка определялась на фиксированном радиусе при изменении тока от 10 до 620 мка, что соответствует изменению плотности от $2,5 \cdot 10^5$ 1/см³ до $1,6 \cdot 10^7$ 1/см³. Относительная точность измерения Q составляла 0,005. Внутри этой точности не было отмечено зависимости Q_z от величины тока (рис. 3в).

Для измерения частоты некогерентных колебаний была сделана попытка возбудить параметрический резонанс высокочастотным полем, близким по форме к полю квадруполья, которая, однако, оказалась неудачной. Это, по-видимому, можно объяснить недостаточным числом оборотов ускоряемого пучка в зоне действия возбуждающего поля. Чтобы преодолеть

эту трудность, был осуществлен режим циркулирующего пучка. Пучок останавливался в зоне действия возбуждающего поля за счёт модуляции ускоряющего напряжения. При этом из-за конечного времени жизни электронов и расплывания циркулирующего пучка в азимутальном направлении плотность заряда уменьшается во времени. На рис. 4а показана осциллограмма сигнала, наводимого на пикап-электрод циркулирующим пучком, а на рис. 4б - то же при возбуждении внешнего резонанса (длительность импульса возбуждающего поля - около 15 мксек). В настоящее время этот эксперимент продолжается.

Л и т е р а т у р а

1. В.Н. Аносов, А.Т. Василенко, С.Б. Ворожцов и др. Электронная модель релятивистского кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой. АЭ, 25, вып. 6, 539 (1968).
2. А.А. Глазов, Д.Л. Новиков, Л.М. Онищенко. Система внешней инжекции релятивистского кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 1, 485, ВИНТИ, Москва, 1970.
3. В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга. О минимальной амплитуде ускоряющего напряжения в релятивистских циклотронах. Труды конференции по циклотронам, Краков, 1961.
4. В.П. Дзелепов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга. Сильноточные ускорители частиц высоких энергий - "фабрики мезонов". УФН, 85, вып. 4, 651 (1965).
5. L.J. Laslett. Proc. 1963 Summer Study on Storage Rings Accelerators and Experimentation at Super-high Energies. BNL-7534, 324-67.

Рукопись поступила в издательский отдел

29 июня 1970 года.

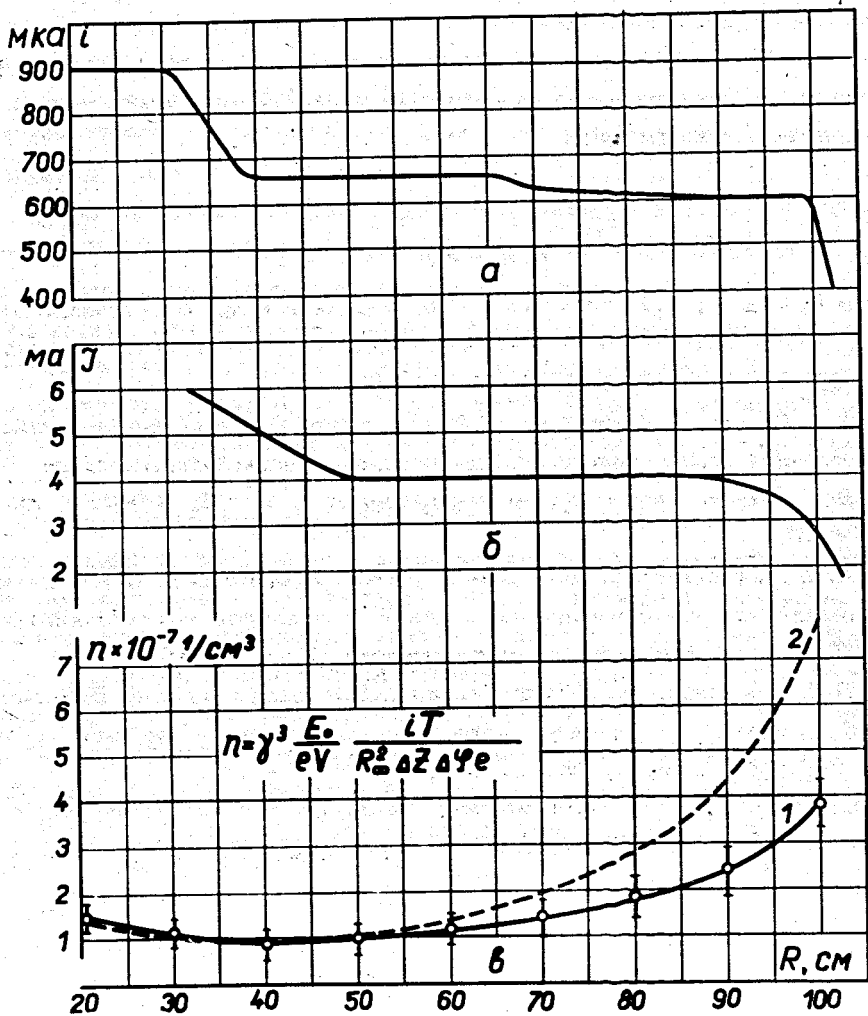


Рис. 1. Зависимость от радиуса а) среднего тока, б) амплитуды тока в сгустке, в) плотности тока.

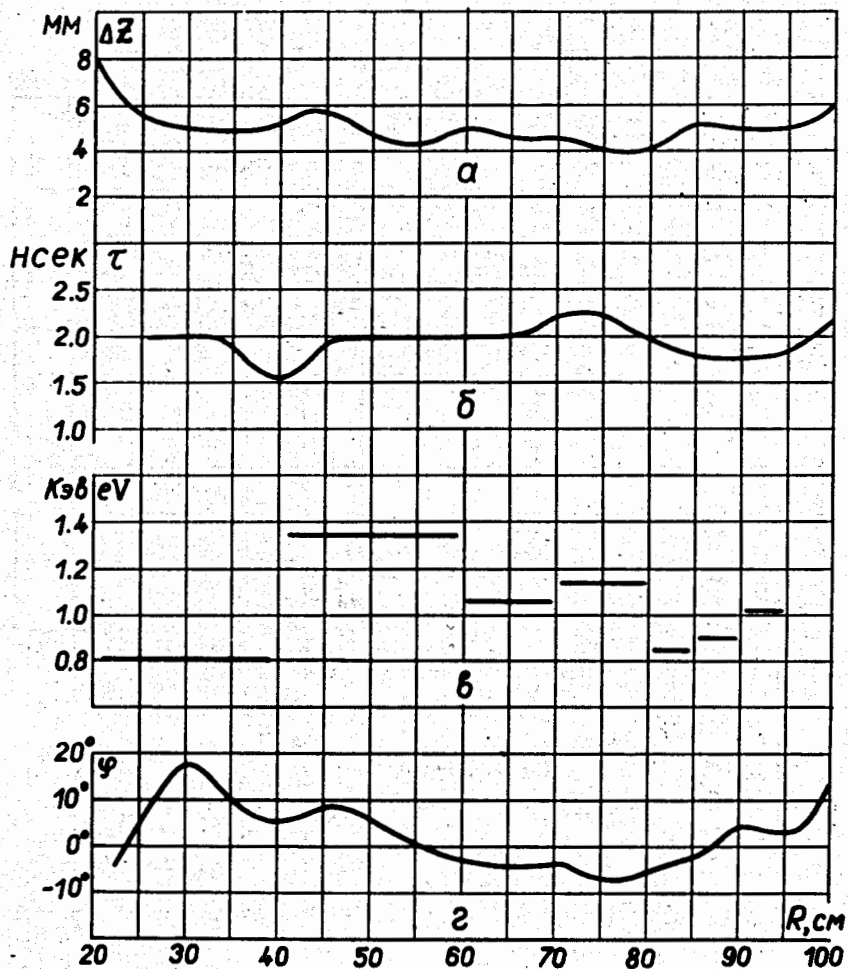


Рис. 2. Зависимость от радиуса а) высоты пучка, б) фазовой протяженности (длительности) сгустка, в) набора энергии за оборот, г) фазового положения сгустка.

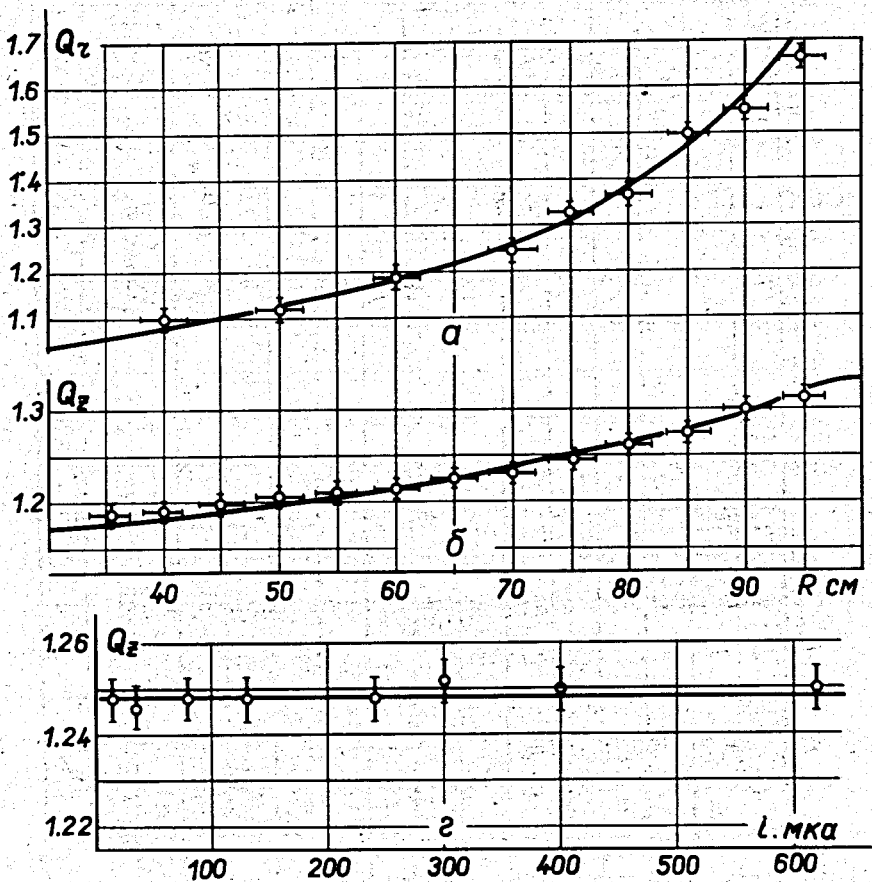
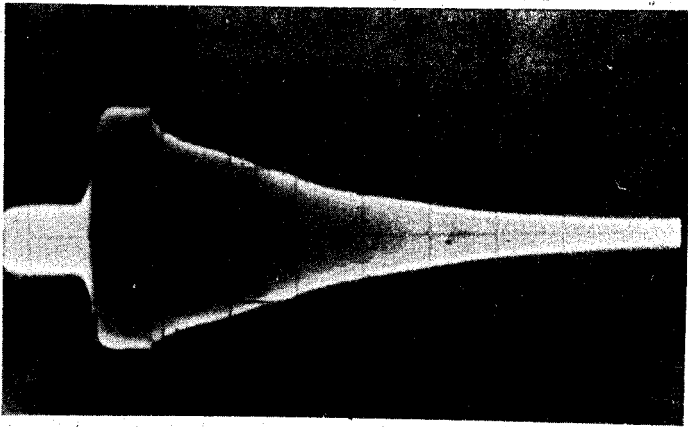
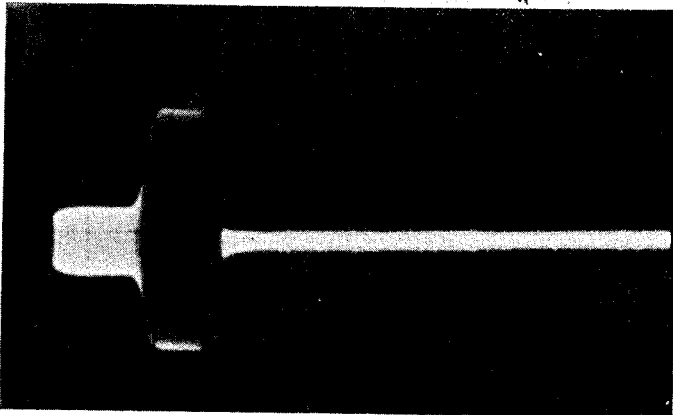


Рис. 3. Зависимость а) Q_z от радиуса, б) Q_z от радиуса, в) Q_z от величины среднего тока.



а)



б)

Рис. 4. Осциллограммы сигнала на пикап-электроне, наводимого циркулирующим пучком (развертка 50 мксек/см) а) в отсутствие возбуждающего поля, б) при возбуждении внешнего резонанса.