

22/11-71

H-731

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

3978/2-71

P9 - 6048



Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, П.Т.Шишлянников

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ИЗМЕРЕНИЕ
ЧАСТОТЫ ОБРАЩЕНИЯ ЧАСТИЦ
В ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА

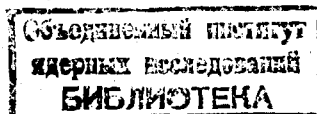
1971

P9 - 6048

Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, П.Т.Шишляников

ИЗМЕРЕНИЕ
ЧАСТОТЫ ОБРАЩЕНИЯ ЧАСТИЦ
В ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА

Направлено в ПТЭ



1. Частота обращения частиц в циклическом ускорителе связана с величиной магнитного поля на орбите B и величиной полной энергии частицы E соотношением

$$f = \frac{e c^2 B}{2 \pi E}, \quad (1)$$

где e - заряд частицы, c - скорость света. В изохронном циклотроне, где отсутствует фазовая фокусировка, величина этой частоты должна поддерживаться постоянной (и равной частоте ускоряющего напряжения f_0) за счет соответствующего изменения магнитного поля B вдоль радиуса с высокой степенью точности. Так, отклонение частоты от ее изохронного значения на величину $\Delta f/f_0 \approx 3 \cdot 10^{-4}$ приведет к тому, что частица, совершающая в процессе ускорения тысячу оборотов, сместится по фазе в замедляющую область и будет потеряна. В некоторых случаях, например в моноэнергетических циклотронах^{/2/}, допустимый фазовый сдвиг не превышает нескольких градусов и частота обращения должна поддерживаться постоянной с еще более высокой точностью.

Обычно о постоянстве частоты обращения в изохронном циклотроне (о степени изохронизма) судят по результатам фазовых измерений^{/3,4/}. Существует, однако, возможность непосредственного измерения частоты обращения частиц в циклотроне, которая заключается в следующем.

Если заставить сгусток частиц в циклотроне обращаться на определенном радиусе (циркулировать) без ускорения, то частота сигнала, наводимого этим сгустком на индукционный датчик тока пучка, будет равна частоте его обращения.

Циркулирующий пучок можно получить, используя импульсный режим работы генератора ускоряющего напряжения. Так как ускорение сгустка от центра циклотрона до конечного радиуса требует некоторого времени t , то частицы, инжектированные в ускоритель в течение времени t перед выключением ускоряющего напряжения, не будут ускорены до конечной энергии, а останутся циркулировать на промежуточных радиусах. При этом вся камера ускорителя будет заполнена циркулирующими сгустками.

Циркулирующий пучок из-за рассеяния на остаточном газе имеет ограниченное время жизни t . Оценки показывают ^{/5/}, что при давлении остаточного газа 10^{-6} мм рт.ст. время жизни циркулирующего пучка (число частиц в пучке уменьшается вдвое) составляет примерно 2×10^{-2} сек для протонов с энергией 1 Мэв и быстро увеличивается с ростом энергии.

Для электронов, с которыми были выполнены наши эксперименты, ситуация менее благоприятная. Так, при энергии электронов в несколько сот кэв время жизни циркулирующего пучка составляет несколько сотен микросекунд. При этом амплитуда высокочастотного сигнала, наводимого на индукционном датчике циркулирующим пучком, экспоненциально уменьшается со временем. На рис. 1 показана осциллограмма такого сигнала, наводимого на емкостном датчике циркулирующим пучком электронов с энергией 150 кэв.

2. Частоту этого сигнала можно определить, например, по "нулевым" биениям, наблюдаемым на экране осциллографа при подмешивании к исследуемому сигналу сигнала известной частоты.

Так как период наблюдаемых "нулевых" биений сравним с длительностью исследуемого сигнала (временем жизни пучка), то при $t = 100$ мксек погрешность в определении частоты составит примерно ± 5 кгц.

Недостаток метода "нулевых" биений заключается в его трудоемкости: необходимо при каждом измерении настраиваться на частоту исследуемого сигнала, причем необходимо иметь высокочастотный осциллограф, перестраиваемый высокочастотный генератор и частотомер.

Другой возможный способ измерения частоты заключается в использовании для этой цели цифрового частотомера, принцип работы которого заключается в определении числа импульсов за строго фиксированное время. Этот временной интервал ("ворота") в обычном частотомере, таком, например, как ЧЗ-4, генерируется специальным генератором. Если синхронизировать генератор "ворот" с исследуемым сигналом и ввести необходимую временную задержку, то частотомер может быть использован для измерения частоты импульсного высокочастотного сигнала. Этот способ удобен тем, что является, по существу, автоматическим.

Точность измерения частоты импульсного сигнала частотомером ограничена длительностью "ворот", которая, естественно, должна быть меньше длительности исследуемого сигнала. Так, если за время измерения регистрируется тысяча импульсов, точность определения частоты не превысит 10^{-3} .

Точность измерения частоты импульсным частотомером, однако, можно улучшить, если использовать частотомер в режиме накопления. При этом счёт импульсов ведется в течение не одного, а многих циклов модуляции ускоряющего напряжения, и погрешность в определении частоты уменьшается как корень квадратный из числа циклов. За счёт этого, даже при ограниченном времени жизни пучка, можно довести точность определения частоты до необходимой величины.

3. Такой частотомер для измерения частоты импульсного высокочастотного сигнала в режиме накопления был разработан специально для эксперимента по измерению частоты обращения частиц в циклотроне на базе частотомера, описанного в ^{16/}. Он имеет два режима работы по длительности "ворот" - 50 и 100 мксек - и два режима по числу накопленных циклов - 100 и 1000.

Упрощенная блок-схема частотомера для "ворот" длительностью 100 мксек и накопления 100 циклов показана на рис. 2. Он состоит из кварцевого генератора, формирователя эталонного времени ("ворот"), счётчика циклов, декадного счётчика, усилителя пускового сигнала и трех ключевых схем, К1, К2, ВК, которые управляются соответственно триггерами ТК1, ТК2 и ТВК. В режиме ожидания эти триггеры находятся в состоянии, запрещающем прохождение сигналов через ключевые схемы; триггеры счётчика циклов и формирователя "ворот" находятся в нулевом состоянии.

Нажатием кнопки "пуск" вырабатывается (на выходе усилителя) импульс сброса декадного счётчика в нулевое состояние, и этим же импульсом переводятся в состояние "1" триггеры Т10-Т12 счётчика и триггер ТК2. Проходящий при этом через К2 первый импульс модулятора переводит ТК1 в рабочее состояние, и импульсы от кварцевого генератора начинают поступать на вход формирователя эталонного времени.

Формирователь эталонного времени представляет собой двоичный счётчик, охваченный обратной связью на третий, четвертый и пятый триггеры. При этом разрешающий импульс с триггера ТВК управления высокочастотной ключевой схемой ВК имеет длительность 100 мксек (и задержан относительно импульса модулятора на ~ 32 мксек). Задним фронтом разрешающего импульса триггер ТК-1 переводится в исходное состояние. Одновременно прибавляется единица в счётчик циклов, полная емкость которого равна 100 импульсам ("уменьшение" емкости счётчика циклов на 28 единиц достигается за счёт сброса триггеров Т10-Т12 в

4. Ниже приводятся результаты экспериментов по измерению частоты обращения частиц в электронной модели кольцевого циклотрона /1/.

Для проверки метода и аппаратуры на фиксированном радиусе определялось изменение частоты обращения частиц при изменении величины магнитного поля. Связь между изменениями частоты и магнитного поля можно найти, дифференцируя (1) при постоянном радиусе и используя связь между величиной полной энергии частиц E , магнитного поля B и радиуса R в виде

$$E^2 = E_0^2 + (eBRc)^2. \quad (2)$$

При этом получится выражение

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta B}{B}, \quad \gamma = \frac{E}{E_0}. \quad (3)$$

Так как в изохронном циклотроне $B \approx B_0 \gamma$, где B_0 — поле в центре циклотрона, выражение (3) может быть записано также в виде

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{\gamma^3} \frac{\Delta B}{B_0}. \quad (4)$$

Магнитное поле в электронной модели создается токовыми обмотками без применения ферромагнитных материалов, поэтому величина магнитного поля, создаваемого какой-либо обмоткой, линейно связана с величиной тока в ней.

В описываемом эксперименте магнитное поле изменялось за счёт изменения тока в одной из concentрических обмоток. Создаваемое этой обмоткой магнитное поле известно из магнитных измерений и зависит от радиуса в соответствии с данными табл. 1.

Таблица 1

R,	см 65	70	75	80	85	90	92	95	98	100
B ₁₃ , гс	5,33	5,51	6,02	6,49	7,09	7,86	8,25	8,92	9,70	10,27

Величина тока в обмотке контролируется с точностью 10^{-4} и могла изменяться в эксперименте на величину порядка 1%.

На рис. 4 показана зависимость частоты обращения, измеренной по нулевым биениям, от величины магнитного поля для двух значений радиуса.

Наблюдающееся отклонение экспериментальных точек от расчётных зависимостей, показанных на этом же рисунке прямыми линиями, находится в пределах ожидаемых ошибок при измерении частоты этим способом.

На рис. 5 показана аналогичная зависимость, полученная при измерении частоты описанным выше частотомером: Отклонение экспериментальных точек от линейной зависимости не превышает 1 кгц, а экспериментальная прямая отклоняется от расчётной не более чем на 2%. Это отклонение можно объяснить отличием расчётного значения энергии частиц от фактического на величину порядка $\Delta\gamma/\gamma \approx 0,6\%$.

При измерении частоты обращения импульсным частотомером сигнал синхронизации подавался на частотомер через регулируемую задержку, величина которой подбиралась так, что измерение частоты начиналось после выключения ускоряющегося напряжения. Сигнал с индукционного датчика, имеющий вид импульсов, следующих с частотой обращения и экспоненциально убывающей амплитудой, вначале проходил через усилитель второй гармоники и затем подавался на вход частотомера. Это позволило вдвое увеличить число регистрируемых импульсов и таким образом увеличить точность измерения частоты.

Из рис. 5 видно, что в описанном эксперименте точность измерения частоты обращения составляет $\pm 2,5 \times 10^{-5}$.

На рис. 6 представлена зависимость частоты обращения от радиуса, измеренная с помощью описанной методики; величина Δf есть отклонение частоты обращения f от частоты ускоряющего напряжения f_0 . Так как для электронов с уменьшением энергии до области ниже 100 кэВ время жизни циркулирующего пучка быстро падает, оказалось возможным измерить частоту обращения, начиная лишь с радиуса $R = 70$ см (энергия электронов ≈ 113 кэВ).

Отличие частоты обращения частиц от частоты ускоряющего напряжения должно приводить к их смещению по фазе, которое в случае девятистоградного дуанта описывается выражением^{/4/}

$$\sin(\phi_2 - 45^\circ) - \sin(\phi_1 - 45^\circ) = -2\pi \frac{E_0}{\sqrt{2} e v_0} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \frac{\Delta f}{f_0} dy \quad \dots \quad (5)$$

где v_0 - амплитуда ускоряющего напряжения. Пользуясь (5), можно сравнить результат измерения частоты обращения, приведенный на рис. 6, с данными непосредственных фазовых измерений. На рис. 7 сплошными кривыми показана зависимость фазы от радиуса, измеренная с помощью фазометра^{/4/}, а крестами - данные о движении фазы, полученные обработкой зависимости частоты обращения от радиуса (рис. 6).

Фазовые кривые 1-2 измерены до и после измерения частоты обращения. Имеющийся между ними почти постоянный сдвиг $\approx 3 \cdot 10^\circ$ может быть объяснен как неточностью привязки абсолютного значения фазы, так и возможным уходом частоты ускоряющего напряжения на величину ≈ 1 кГц.

4. Измерение с высокой точностью частоты обращения частиц в изохронном циклотроне, возможность которого подтверждается результатами настоящей работы, может оказаться полезным при автоматической (с помощью ЭВМ) коррекции величины среднего магнитного поля "по пуч-

ку" по двум причинам: во-первых, отклонение частоты обращения линейно связано с отклонением магнитного поля и обработка результатов измерения на ЭВМ, которая производится для нахождения корректирующих токов в обмотках магнита, не связана с потерей точности (обработка для этих же целей фазовых измерений требует дифференцирования результатов измерений, что обычно связано с большими погрешностями); во-вторых, восстановление картины магнитного поля по результатам измерения частоты обращения может быть выполнено более чисто, так как частота обращения частиц зависит только от величины магнитного поля на орбите и не зависит (в отличие от фазы) от частоты ускоряющего напряжения.

В заключение авторы благодарят В.А. Аккуратова и В.А. Кочкина за помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. В.Н. Аносов и др. Атомная энергия, 25, 66 (1968).
2. А.А. Глазов и др. ЖТФ, 57, вып. 5, 1465 (1969).
3. H.P. Stüssi et al. Nucl. Instr, 89, 87 (1970).
4. В.Н. Аносов и др. ОИЯИ, Р9-5873, Дубна, 1971.
5. Г. Брук. Циклические ускорители заряженных частиц. Атомиздат, Москва, 1970.
6. Ю.Н. Денисов и др. Измерительная техника №1, 59 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел
24 сентября 1971 года.

Рис. 1. Осциллограмма сигнала, наводимого циркулирующим пучком на пикап-электроне. Длительность развертки 50 мксек/см.

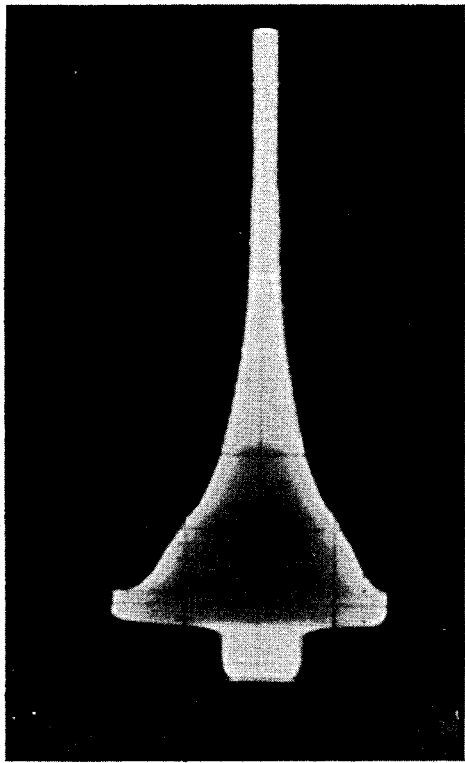


Рис. 2. Блок-схема импульсного частотомера с накоплением (100 циклов по 100 мксек).

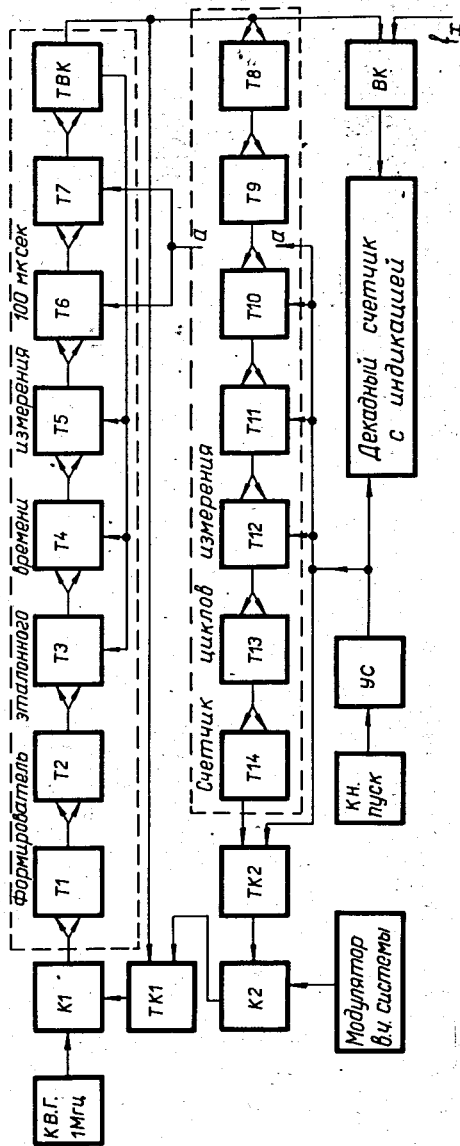


Рис. 3. Распределение отклонений при измерении эталонной частоты импульсным частотомером с накоплением а) 100 циклов, б) 1000 циклов.

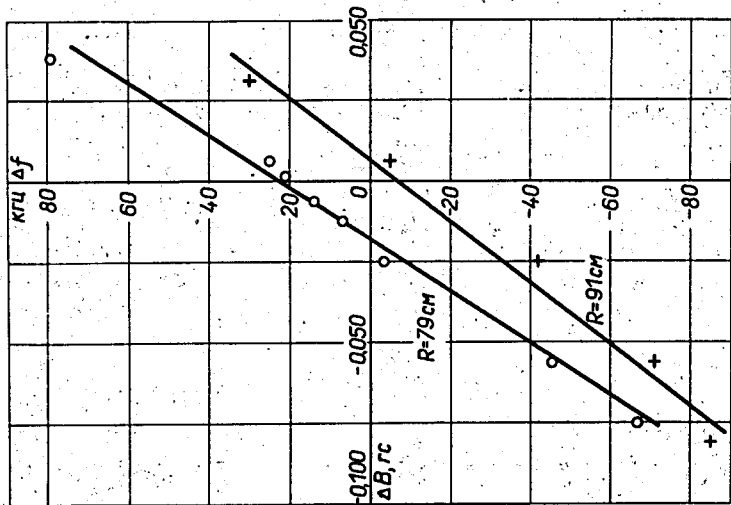
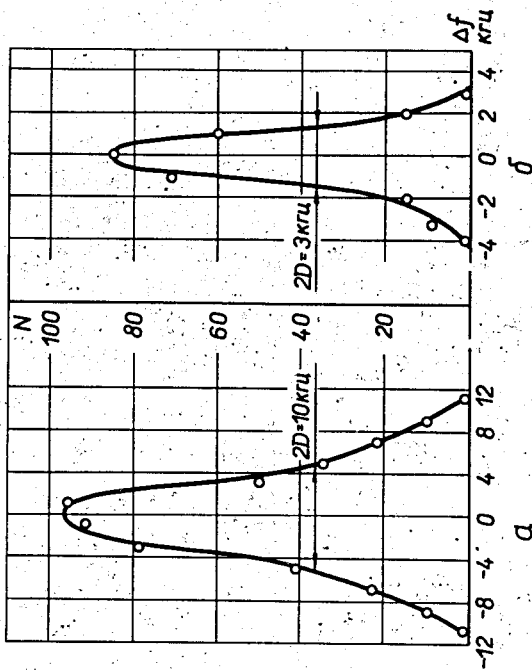


Рис. 4. Изменение частоты обращения при изменении магнитного поля. Частота измерена по "нулевому" биению.

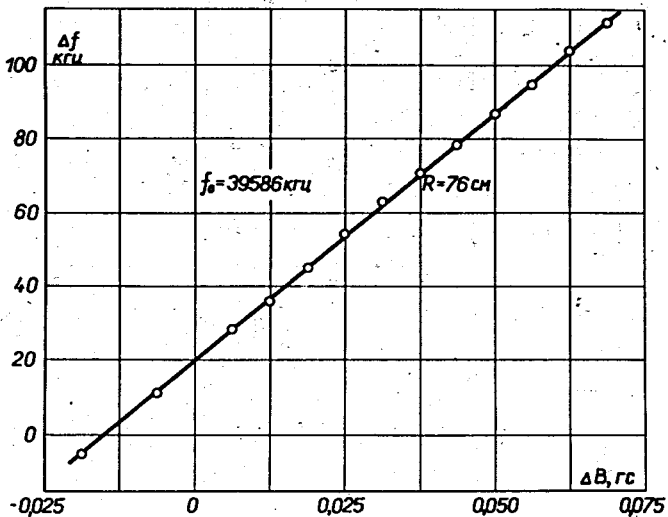


Рис. 5. Изменение частоты обращения при изменении магнитного поля. Частота измерена импульсным частотомером с накоплением 1000 циклов.

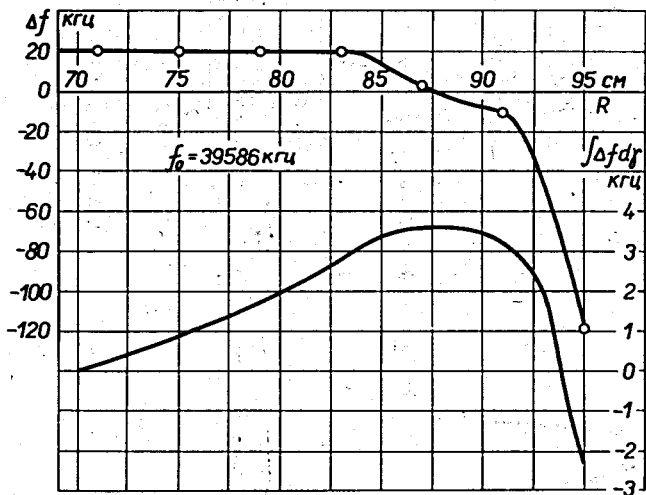


Рис. 6. Зависимость частоты обращения от радиуса в электронной модели кольцевого циклотрона.

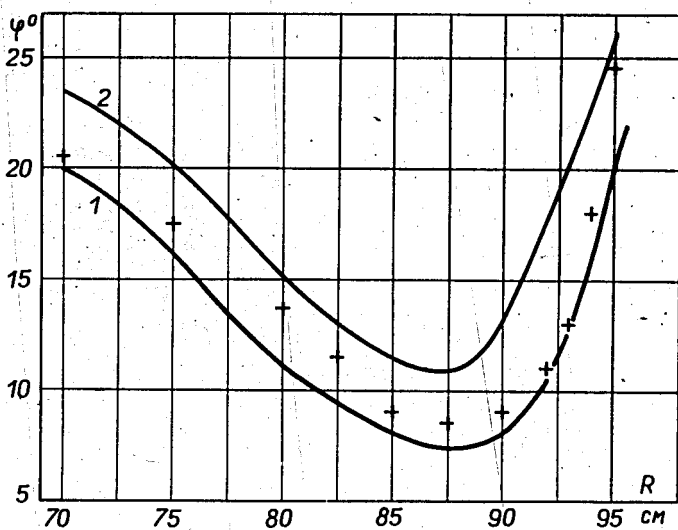


Рис. 7. Фаза пучка в электронной модели в зависимости от радиуса, измеренная с помощью фазометра (кривые 1 и 2) и восстановленная по частоте обращения (кресты).