

3-264



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

9 - 6084

Б. И. Замолодчиков

ЦИКЛОТРОН И ФАЗОТРОН
С ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ЭНЕРГИЮ ДО 1 ГЭВ

(Теоретические и экспериментальные исследования
и проектные разработки)

Специальность 280 - электрофизические установки
и ускорители

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1971

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Ф.А. Водопьянов

доктор технических наук

Л.П. Зиновьев

доктор технических наук

Н.А. Моносзон

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе АН СССР.

Автореферат разослан " " 1971 года.

Защита диссертации состоится " " 1971 года на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А. Батусов

9 - 6084

Б.И. Замолотчиков

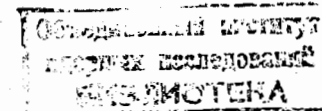
ЦИКЛОТРОН И ФАЗОТРОН
С ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ЭНЕРГИЮ ДО 1 ГЭВ

(Теоретические и экспериментальные исследования
и проектные разработки)

Специальность 280 - электрофизические установки
и ускорители

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Конец первой половины двадцатого века ознаменовался рядом крупных достижений в области практического использования ядерной энергии для различных целей. Это вызвало бурное развитие исследований в ядерной физике и физике элементарных частиц, результаты которых существенно обогатили наши сведения о микромире на пути познания его свойств и закономерностей. В то же время за каждым значительным результатом этих исследований следовал вывод о необходимости новых тщательных экспериментов, связанных с большими энергиями взаимодействия, с меньшими сечениями взаимодействия, с более высокой точностью и т.д., т.е., в конечном счёте, с привлечением все более и более сложного экспериментального оборудования.

Поскольку одним из основных средств изучения ядра и элементарных частиц являются ускорители, то такая ситуация обусловила стремительный прогресс в физике и технике этих атомных машин. Достаточно отметить, что уже в 1967 году в СССР был запущен протонный синхротрон на энергию 70 Гэв, а еще в сороковых годах энергия ускорителей не превышала одного-двух десятков Мэв.

Разнообразные исследования с помощью ускорителей (и не только в ядерной физике) определили широкий диапазон требований к пучкам ускоренных частиц, что в свою очередь привело к большому разнообразию ускорителей, использующих различные принципы действия.

В настоящее время в целях более полного удовлетворения растущих требований к ускорителям ведутся широкие теоретические и экспериментальные поиски как в направлении разработки новых методов ускорения (встречные пучки, плазменные, коллективные ускорители и др.), так и по пути раскрытия новых качеств и возможностей в "традиционных" принципах.

К очень разнообразным практическим применениям привело отступление от аксиальной симметрии в магнитном поле циклических ускорителей. Некоторые из таких применений рассматриваются в реферируемой диссертации.

Хотя впервые идея об использовании азимутально-несимметричного магнитного поля для циклотрона была высказана еще в 1938 году^{/1/}, детальное изучение возможностей для ускорительной техники, которые заложены в неоднородных структурах стационарных магнитных полей, начались в 50-х годах; в числе первых исследований динамики частиц в циклотронах с пространственной вариацией напряженности следует назвать работы В.П. Дмитриевского, В.В. Кольги^{/2,3/} и др. Со второй половины 50-х годов ведется интенсивное проектирование и сооружение циклотронов с пространственной вариацией. Можно особо выделить теоретические и экспериментальные работы, связанные с разработкой проектов релятивистских циклотронов на энергию в несколько сот Мэв и отметить, что исследования в этом направлении, проводимые в Дубне, в какой-то мере опережали аналогичные исследо-

вания в других лабораториях мира. Достаточно сказать, что именно в Дубне, в Лаборатории ядерных проблем, был в 1959 году запущен первый в мире циклотрон со спиральной вариацией магнитного поля^{/4/}.

В диссертации излагаются результаты теоретических и экспериментальных исследований и проектных разработок, проводимых автором в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в течение более 10 лет, в основном по циклотронам и фазотронам с вариацией магнитного поля на энергию около 1 Гэв, и имевших своей конечной целью составление детальных проектов ускорителей. Рассмотрение циклотронов в "домезонном" диапазоне энергий было менее детальным.

В диссертации приведены основные результаты работ^{/4-36/}, опубликованных в виде журнальных статей, препринтов и трудов ряда международных и всесоюзных конференций по ускорителям, где они докладывались.

1. Развитие физики высоких энергий в области до 1 Гэв и требования к ускорителям

Экспериментальные данные обо всех основных видах взаимодействий частиц с точностью (10-20)%, которыми располагает в настоящее время физика высоких и средних энергий, недостаточны для получения ответов на такие коренные вопросы, как справедливость *CPT*-теоремы, строгая проверка *T*-инвариантности сильных взаимодействий (с точностью < 0,1%), многие принципиальные вопросы слабых и электромагнитных взаимодействий и др.

В настоящее время совершенно ясна необходимость получения в экспериментах существенно более точных количественных

данных, так как решение большинства вопросов применимости того или иного теоретического описания явлений в области физики элементарных частиц связано с получением опытных данных с точностями порядка десятых долей процента и измерением сечений порядка $\sigma \approx 10^{-36} + 10^{-38} \text{ см}^2$.

Достигнутые интенсивности пучков частиц, ускоренных в современных действующих ускорителях, не обеспечивают таких экспериментальных возможностей. Это относится и к ускорителям до 1 ГэВ, в частности и к синхроциклотронам на энергию в несколько сот МэВ, хотя их интенсивность на несколько порядков выше интенсивности существующих синхрофазотронов на энергии 6-70 ГэВ.

Программы экспериментальных исследований на сильноточных ускорителях протонов на энергию до 1 ГэВ, выполнение которых позволило бы существенно продвинуть решение многих вопросов в области физики элементарных частиц и атомного ядра, выдвигались в нескольких лабораториях мира и широко обсуждались на конференциях по физике высоких энергий или по ускорителям высоких энергий /21,37-42/.

Интерес к протонным ускорителям на энергию около 1 ГэВ вызывается также программой перспективных исследований по нейтронной физике /43/, требующей плотности нейтронных потоков $\sim 10^{16}$ нейтрон/сек, что превышает достигнутую к настоящему времени плотность потоков на атомных реакторах.

Что касается целесообразной энергии ускорителей, то из сопоставления различных факторов можно заключить, что наибольшим потенциалом для разнообразных исследований в домиллиардной области энергий будут обладать протонные ускорители на энергию 650-900 МэВ. Это обусловлено в первую очередь тем, что рассматриваемые ускорители должны являться источниками интенсивных пучков мезонов или нейтронов.

Как показывают расчёты и опыт, выполнение намеченных программ требует увеличения интенсивности пучков протонов, нейтронов, пионов, мюонов, поляризованных нуклонов, нейтрино в сто-тысячу раз по сравнению с существующей. Для иллюстрации можно сослаться на таблицу 1 из /45/, из которой видно, что для большинства экспериментов нужна интенсивность ускоренных протонных пучков не менее $50 + 1000$ мка. Интенсивность протонного пучка для нейтронного генератора должна составлять ≈ 100 ма.

До настоящего времени для ускорения протонов до энергии в несколько сот МэВ используются во всех лабораториях мира только синхроциклотроны. Поиски путей существенного повышения интенсивности пучков быстрых частиц привели к тому, что в последнее десятилетие предлагались и разрабатывались проекты, использующие и другие типы ускорителей для ускорения протонов в указанном диапазоне энергии, такие, как ^{x/} линейный ускоритель /39/, циклотрон с разделенными орбитами /44,47/, релятивистский циклотрон /5,8,40,41/, фазотрон с вариацией магнитного поля /21,51/.

Релятивистский циклотрон, как показывают исследования /4-18/, представляющие в основном предмет реферируемой диссертации, сохраняя основные достоинства циклотронного метода ускорения, позволяет расширить диапазон энергии ускоряемых протонов до нескольких сот МэВ. Используя предложение о жесткофокусирующем кольцевом релятивистском циклотроне /19/, возможно получать пучки протонов с интенсивностью порядка несколько сот миллиампер при энергии до 1 ГэВ.

^{x/} Не рассматриваются методы коллективного ускорения, ускорения плазмы и др.

Использование вариации магнитного поля в сочетании с фазotronным принципом ускорения позволяет ослабить требования к вариации частоты по сравнению с обычными синхротронами и в то же время ослабить требования к магнитному полю по сравнению с релятивистским циклотроном. Достижимая интенсивность пучков ускоренных частиц оказывается промежуточной между случаями синхротрона и циклотрона /21/. Из сравнения параметров ускорителей различных типов делается заключение об особой пригодности релятивистского циклотрона для "мезонной фабрики" и высокоинтенсивного нейтронного генератора (таблица II).

2. Движение заряженных частиц в стационарном магнитном поле со спиральной вариацией напряженности

Определение условий, которые необходимо создать для того, чтобы обеспечить ускорение заряженных частиц до желаемой энергии и интенсивности, требует тщательных теоретических исследований и расчётов динамики этих частиц. В диссертации рассматриваются вопросы динамики для случая стационарного магнитного поля, аксиальная составляющая напряженности которого в медианной плоскости изменяется периодически по радиусу и азимуту, как это необходимо для циклотрона на энергию порядка 1 Гэв /2,5/. Если ограничиваться синусоидальной вариацией, то это поле можно представить в виде

$$H_z(r, \theta) = H(r) \left\{ 1 + \xi(r) \sin[\alpha(r) - N\theta] \right\}, \quad (1)$$

где r, θ, z - координаты цилиндрической системы; $H(r)$ - сред-

нее значение напряженности магнитного поля, обеспечивающее постоянство периода обращения; $\xi(r)$ - глубина вариации напряженности магнитного поля, отношение амплитуды N -ой гармоники напряженности к среднему значению; $\alpha(r)$ - фаза вариации поля, зависящая от радиуса (определяет спиральность вариации); N - периодичность структуры поля по азимуту.

Решение уравнений движения в таком поле в линейном приближении позволяет выделить свободные колебания с частотами Q_r и Q_z относительно замкнутой орбиты r_3 :

$$Q_r^2 = (1+n) \left[1 + \frac{3}{2N^2} \left(\frac{\xi R \alpha'}{N} \right)^2 \right], \quad (2)$$

$$Q_z^2 = -n + \frac{\xi^2 R^2 \alpha'^2}{N^2} + \frac{\xi^2}{2}, \quad (3)$$

$$\left(n = \frac{R}{H} \cdot \frac{dH}{dr} \Big|_{r=R}, \quad \alpha' = \frac{d\alpha}{dr} \Big|_{r=R} \right),$$

и определить изохронный закон роста среднего поля:

$$H(r) = \frac{H_0}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{r_\infty^2}}} \left\{ 1 - \frac{\xi^2}{4N^2(1+n)} \left(2+n + 2r \cdot \frac{\xi'}{\xi} \right) \right\}, \quad (4)$$

H_0 - значение напряженности поля в центре ускорителя, $r_\infty = \frac{c}{\omega}$, $\omega = 2\pi f$ - угловая частота обращения частицы в циклотроне.

Анализ решений уравнений движения показывает, что для релятивистского циклотрона возможно и целесообразно выбрать структуру поля с равномерной спиральностью ($\alpha' = \frac{1}{\lambda} = const$,

спираль Архимеда), а необходимое движение рабочей точки по области устойчивости (Q_r, Q_z) поддерживать изменением вариации ξ вдоль радиуса. Для кольцевого фазотрона с вариацией магнитного поля целесообразной является структура, например, с $a' \sim \frac{1}{R}$, позволяющая обеспечить постоянство Q_r и Q_z /20/.

Выделение собственных частот колебаний Q_r и Q_z и инвариантность величин $a_r^2 Q_r H$ и $b_z^2 Q_z H$ (a_r и b_z - амплитуды колебаний) позволяют полностью решить вопрос о пространственной устойчивости движения ионов в рассматриваемом поле за исключением областей резонансного возбуждения. Резонансное возбуждение колебаний возможно вблизи зон, где собственные частоты удовлетворяют соотношению

$$pQ_r \pm qQ_z = \pm l, \quad (5)$$

p, q, l - целые числа; $(|p| + |q|)$ - определяет порядок резонанса, l - соответствует номеру гармоники "возбуждающей силы". Для линейных резонансов условие (5) конкретизируется в виде:

$$\begin{aligned} Q_{r,z} = l & \quad - \text{простой резонанс,} \\ Q_{r,z} = \frac{pl}{2} (p = 1, 2, \dots) & \quad - \text{параметрический резонанс,} \\ Q_r \pm Q_z = \pm l (l = 0, 1, 2, \dots) & \quad - \text{резонанс связи.} \end{aligned} \quad (6)$$

Так как верхние границы области устойчивости уравнений свободных колебаний (приведенных к форме уравнений Матье) соответствуют $Q_r = \frac{N}{2}$ и $Q_z = \frac{N}{2}$, то все резонансы, лежащие внутри этой области, могут возникать только от низших гармоник по отношению к основной периодичности N .

Из исследования линейных резонансов выводятся допуски на низшие гармоники в аксиальной компоненте магнитного поля и на гармоники отклонения медианной поверхности поля ($H_r = 0, H_\theta = 0$) от средней плоскости зазора. Для прохождения простого (целочисленного) резонанса по радиальным колебаниям при $Q_r = 2$ необходимо было бы обеспечить точность шиммирования магнитного поля лучше чем 10^{-4} , и, следовательно, его можно считать непроходимым. Таким образом накладываются ограничения на предельную энергию, которую можно получить в релятивистском циклотроне. При простом резонансе в центральной области ускорителя ($Q_r = 1, l = 1$) требования к величине $(\frac{H_1}{H})$ оказываются значительно (на порядок) слабее.

Как показывают оценки, для прохождения резонанса $Q_z = 1$ необходимо выдержать очень жесткие допуски на отклонение медианной поверхности от средней плоскости, поэтому целесообразно выбрать такой режим движения изображающих точек по области устойчивости, при котором не пересекается линия резонанса $Q_z = 1$.

Что касается параметрических резонансов, то при практически осуществимых параметрах циклотрона величины допусков на соответствующие гармоники поля $(\frac{H_l}{H})$ составляют доли процента, и, следовательно, можно допускать режимы, при которых частоты колебаний ионов в процессе ускорения будут проходить зоны параметрического резонанса.

Исследование внутренних нелинейных резонансов в релятивистском циклотроне приводит к заключению, что резонанс 4-го порядка по радиальным колебаниям не проходит без существенных потерь частиц, а для прохождения резонанса 5-го порядка необходимо принимать параметр спирали λ таким, чтобы $\lambda \geq 2a_0$.

Электромагнитное поле совокупности ускоряемых ионов влияет на движение отдельной частицы, вызывая изменение частоты вертикальных и радиальных колебаний, изменение частоты обращения и изменение набора энергии за оборот. Эти изменения при некоторой плотности заряда в пучке могут стать такими, что процесс ускорения будет нарушаться и таким образом эта плотность заряда определит предельную интенсивность ускорителя.

В большинстве рассматриваемых в диссертации задач размеры и формы пучка таковы, что можно вычисление электромагнитного поля пучка проводить для некоторого заданного распределения зарядов (без строгого решения самосогласованной задачи).

После некоторых дополнительных допущений и приближений были получены простые выражения для предельного тока ускоряемых ионов, ограничиваемого:

- действием поперечных составляющих электромагнитного поля пучка в изохронном циклотроне ^{/6,7/}:

$$i_{\text{пр}} = k \frac{[Q_x^2 - (Q_x - \Delta Q_x)^2] \Delta E \cdot \Delta \theta \cdot h \cdot f}{2 \pi e}; \quad (7)$$

- действием продольной составляющей электрического поля пучка в релятивистском циклотроне ^{/16/}:

$$i_{\text{пр}} = q \frac{\Delta \theta^2 \left(\frac{\Delta E}{e}\right)^2 c}{8 \pi^5 H_k \left(h_1 - \frac{h}{2}\right)}; \quad (8)$$

- действием поперечных составляющих электромагнитного поля пучка в синхроциклотроне (или фазотроне) ^{/6,7/}:

$$i_{\text{пр}} = \frac{Q_x^2 h \cdot E_0}{2 \pi e} \sqrt{\frac{2 e V_0}{\pi K_e E_0}} \phi F, \quad (9)$$

где $\Delta \theta$ - азимутальная протяженность пучка, ΔE - набор энергии протонов за оборот, $2h$ - высота пучка, e, E_0 - заряд и энергия покоя протона, ΔQ_x - допустимое изменение частоты под действием пространственного заряда, q - кратность частоты ускоряющего напряжения, $2h_1$ - апертура дуантов, H_k - напряженность поля на конечном радиусе ускорения, V_0 - амплитуда ускоряющего напряжения на дуанте, $K = 1 - \frac{n}{1+n} \cdot \frac{1}{\beta^2}$; $\psi = \phi \sqrt{\cos \phi + \cos \phi_0} - (\pi - \phi - \phi_0) \sin \phi_0 d\phi$, F - частота модуляции в синхроциклотроне (или фазотроне).

3. Релятивистский протонный циклотрон

Циклотронный метод ускорения, характеризующийся режимом непрерывного ускорения при постоянной частоте обращения, позволяет получать высокоинтенсивные пучки ускоряемых частиц при умеренных амплитудах высокочастотного напряжения. Применяя магнитное поле с азимутальной вариацией, можно существенно повысить предельную энергию ускоряемых ионов в циклотроне; дополнительное введение в вариацию магнитного поля спиральности открывает возможность ^{/2,52/} реализовать циклотронный режим для ускорения протонов до энергии в несколько сот Мэв.

Как можно видеть из выражений (7) и (8), для получения ускоренных до энергии 700-800 Мэв протонов с интенсивностью один или несколько миллиампер вполне достаточным является значение частоты аксиальных колебаний всего 0,2-0,3 от частоты обращения ионов. В таком случае, если использовать в структуре магнитного поля максимально допустимую спиральность, требуемая глубина вариации не превысит 30%, такое значение может быть получено в зазоре электромагнита со сплошными полюсами без применения дополнительных токовых обмоток, а лишь с помощью

железных шимм. Это обстоятельство позволяет переоборудовать некоторые действующие синхротроны в релятивистские циклотроны на ту же энергию, но с интенсивностью пучка на два-три порядка более высокой /5,6,8/.

В диссертации излагаются некоторые решения из проекта "РЦ", предусматривающего создание релятивистского циклотрона на энергию протонов 700 Мэв с интенсивностью около 1 миллиампера на базе 680 Мэв синхротрона ОИЯИ /8/.

Основные параметры установки "РЦ" приводятся в таблице III, общий вид - на рис. 1, интенсивность пучков - в таблице IV.

Работе над проектом предшествовало создание и запуск в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в 1959 году первого в мире изохронного циклотрона со спиральной вариацией магнитного поля /5,6/. Теоретические расчёты отдельных систем проверялись на специально созданных моделях и макетах /8/.

Вывод, сделанный на основе детальных проектных проработок всех систем ускорителя, заключался в том, что такая реконструкция позволяет наиболее экономичным образом и в наиболее короткий срок создать (в условиях ОИЯИ) "мезонную фабрику" (таблица IV).

Продвижение к более высоким интенсивностям (несколько сот миллиампер) при энергии порядка 1 Гэв оказывается возможным в жесткофокусирующем кольцевом циклотроне /13,19/. В диссертации рассматриваются основные особенности такого циклотрона, в частности возможность использования спиральных ускоряющих промежутков, и приводятся предварительные параметры и схема одного из вариантов (таблица III, рис. 2).

По своим характеристикам и технико-экономическим показателям такой циклотрон имеет в ряде случаев преимущества перед

другими типами ускорителей. Однако некоторые физические и технические аспекты проблемы создания релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой требуют проведения более детальных теоретических и экспериментальных исследований, моделирования и конструкторских разработок. Безусловно, в числе первоочередных задач в этом ряду следует назвать моделирование эффектов пространственного заряда, ограничивающих интенсивность пучка.

Для экспериментального исследования поведения пучка в циклотроне при высоких плотностях заряда в Лаборатории ядерных проблем был создан электронный аналог (модель) релятивистского жесткофокусирующего циклотрона /15,17/.

На электронной модели предусматривается моделирование эффектов в протонном циклотроне на энергию 810 Мэв с вертикальной жесткостью магнитной системы $Q_z = 1,1-1,35$ и более при токе ускоренных протонов в несколько сот миллиампер. Из условий динамического подобия между электронной моделью и протонным циклотроном вытекают соотношения между токами i_e и i_p модели и природы:

$$\frac{i_e}{i_p} = \frac{\Delta E_e h_e H_0^e E_0^p}{\Delta E_p h_p H_0^p E_0^e} \quad (10)$$

по поперечному действию поля пучка, и

$$\frac{i_e}{i_p} = \frac{\Delta E_e^2 H_0^p (h - \frac{h}{2})_p q_p}{\Delta E_p^2 H_0^e (h_1 - \frac{h}{2})_e q_e} \quad (11)$$

по продольному действию поля пучка.

Здесь индекс "e" относит соответствующие величины к электронной модели, а индекс "p" - к моделируемому протонному ускорителю; предполагается, что $q_e \Delta \theta_e = q_p \Delta \theta_p$.

В таблице V даны основные параметры электронной модели, а на рис. 3 - ее общий вид.

В диссертации приводятся результаты первого этапа исследований на модели, которые показали отсутствие каких-либо дополнительных эффектов, связанных с пространственным зарядом, при электронных токах, соответствующих протонному току более 200 миллиампер (рис.4).

4. Фазотрон с вариацией магнитного поля

Применение пространственной вариации магнитного поля открывает интересные возможности развития синхроциклотронного метода ускорения и усовершенствования уже действующих синхроциклотронов с целью существенного повышения их интенсивности. Эти возможности обусловлены, с одной стороны, смягчением трудностей, связанных с повышением ускоряющего напряжения благодаря уменьшению диапазона изменения частоты ускоряющего напряжения, с другой стороны, уменьшением параметра "К", что в совокупности, как это видно из (9), может привести к значительному (до 50-100 мка) увеличению тока ускоряемых протонов /21/.

В диссертации исследуется движение ионов в центральной области фазотрона с вариацией поля. Приводятся полученные критерии для выбора параметров структуры магнитного поля и допуски на них. В частности, показывается, что выбор параметра "К" в центре ускорителя существенно меньшим единицы приводит к дополнительному допуску на магнитное поле в этой области по условиям фазовой устойчивости в течение первого фазового колебания.

В связи с тем, что достижимая интенсивность определяется значением Q_z в центральной области, где магнитная фокусировка слаба (или вообще отсутствует), тщательно исследовалось действие ускоряющего поля дуанта на аксиальное движение ионов в центре ускорителя /21,22/. Показывается, что фокусирующее действие электрического поля при некоторых условиях (осуществимых в варианте фазотрона с вариацией поля) сравнимо с магнитной фокусировкой на последующих радиусах и вполне достаточно для обеспечения интенсивности, определяемой (9). На рис. 5 приведены значения $Q_{z\phi}$ для некоторых режимов и параметров ускорителя.

Далее рассматривается аксиальное движение частиц в центре с учётом пространственного заряда. На рис. 6 показана рассчитанная на ЭВМ граничная траектория ионов, не соударяющихся с поверхностями оснований дуантов, при токе ускоренных протонов 160 микроампер.

В этой главе диссертации рассматриваются обоснования основных решений проекта переоборудования синхроциклотрона ОИЯИ в сильноточный фазотрон (установка "Ф"), который в настоящее время реализуется /21/.

В таблице III приведены основные параметры этого фазотрона, интенсивности пучков - в таблице IV, на рис. 7 - его общий вид, а на рис. 8 - схема пучков и план защиты.

5. О некоторых возможных применениях секторной структуры магнитного поля для слаборелятивистских циклотронов

Логика развития циклотронного метода ускорения и распространение его на область энергий в несколько сот Мэв при высокой интенсивности пучка потребовала применения магнитных систем, составленных из отдельных спиралевидных секторов. Оказалось, однако, что применение секторной структуры (радиальной или спиральной) позволяет также найти лучшие решения для некоторых специальных задач ускорения частиц и в слаборелятивистской области энергии, чем это удается сделать при использовании магнитной системы со сплошным полюсом.

В диссертации рассматривается два предложения такого рода, соавтором которых является диссертант /30,34/:

а) получение интенсивных пучков протонов и ионов ряда легких ядер с малыми энергетическим разбросом ($\approx 10^{-4}$) и малой угловой расходимостью при широкой регулировке энергии частиц;

б) получение интенсивных пучков ионов самых тяжелых элементов (вплоть до урана) с энергией на нуклон выше кулоновского барьера.

За последние годы сильно вырос интерес к исследованиям атомного ядра с помощью заряженных частиц, обладающих высокой степенью моноэнергетичности. Этому в значительной степени способствовали успехи в развитии электростатических тандем-генераторов, на которых можно получать пучки частиц до 25-35 Мэв с энергетическим разбросом порядка 10^{-4} при плавной регулировке энергии.

Однако новым требованиям физиков, связанным с повышением энергии протонов до 100 Мэв и интенсивности пучка ускоренных частиц до 50-100 микроампер, электростатические тандем-генераторы, по-видимому, уже не смогут удовлетворить, даже если считать, что в ближайшие годы удастся достичь на них энергии 40-45 Мэв при интенсивности в несколько микроампер.

В связи с создавшейся ситуацией было предпринято рассмотрение возможности достижения требуемой моноэнергетичности пучков $\approx 10^{-4}$ при энергиях ≈ 100 Мэв и токах до 100 мка в изохронных циклотронах.

Как показывает анализ, основные решения для моноэнергетического циклотрона с названными выше параметрами представляются как некоторая последовательность достаточно определенных следствий.

Эти решения, адекватные поставленной задаче, могут быть выражены следующим образом:

а) Магнитная система - четырехсекторная, без спиральности, с низким средним значением напряженности поля.

б) Ускоряющая система - два основных ускоряющих электрода, работающие на двойной кратности от частоты обращения, имеют угловую протяженность 90° и расположены в противоположных квадратах так, что ускоряющие щели направлены вдоль радиуса по осям смежных магнитных секторов; два дополнительных электрода, работающие на шестой кратности от частоты обращения, имеют угловую протяженность 30° и расположены в двух других промежутках между секторами.

в) Система вывода - отклоняющее устройство, устанавливаемое в промежутке между магнитными секторами.

г) Вариация энергии частиц пучка достигается перемещением отклоняющего устройства вдоль радиуса, т.е. без изменения уровня магнитного поля.

д) Инжекция - внешняя, от электростатического ускорителя на энергию около 1 Мэв.

В диссертации приводятся проектные соображения по моноэнергетическому циклотрону (проект "МЦ" ОИЯИ)^{/30/}, основные параметры которого приведены в таблице VI, а общая схема - на рис. 9.

Пучки ускоренных ионов различных изотопов тяжелых элементов являются одним из мощных средств в исследованиях по ядерной физике. Использование таких пучков создает широкие возможности для образования и изучения новых изотопов, в том числе и далеких трансплутониевых элементов. Именно на пучках ускоренных ионов (аргона, неона) синтезированы наиболее тяжелые из трансурановых элементов. Перспективы дальнейших исследований обуславливают необходимость ускорять более тяжелые ионы.

В диссертации рассматривается схема двухступенчатого ускорения тяжелых ионов, использующая стриппинг на промежуточном этапе ускорения, включающая только один ускоритель - кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой. Проанализированы основные соотношения, определяющие возможность такой схемы. Преимущества заключаются в ее компактности и экономичности по сравнению со схемами, использующими два ускорителя примерно одинаковых габаритов, при высокой интенсивности пучка (до $\approx 10^{12}$ ионов/сек для ионов вплоть до урана при энергии на нуклон выше кулоновского барьера).

Основные выводы из исследований, изложенных в настоящей диссертации, кратко могут быть сведены к следующему:

1. Использование стационарного магнитного поля с пространственной вариацией напряженности, снимающая ограничения, на-

лагаемые аксиально-симметричным магнитным полем на циклотронный метод ускорения, открывает широкие возможности развития этого метода.

Эти возможности, в первую очередь, заключается в том, что значительно (до двух порядков) повышается предельная энергия ускоряемых протонов при технически реализуемых в настоящее время значениях ускоряющего напряжения, при этом сохраняется высокая интенсивность пучка, обусловленная режимом непрерывного ускорения.

Предельная энергия порядка 100 Мэв (или несколько более) может быть достигнута в циклотроне с магнитным полем, варьируемым только по азимуту. Однако для достижения более высоких значений энергии ускоряемых протонов необходимо использовать спиралеобразную вариацию, т.е. такое магнитное поле, напряженность которого периодически изменяется и по азимуту, и по радиусу. Для циклотронов на энергию, близкую к 1 Гэв, именно спиральность вариации дает основной вклад в аксиальную фокусировку.

2. Исследование эффектов пространственного заряда ускоряемого пучка показало, что возможно в релятивистском циклотроне на энергию порядка 1 Гэв получить интенсивность пучка протонов от нескольких миллиампер до нескольких сот миллиампер, при этом в качестве ограничивающего фактора могут проявляться либо поперечные компоненты электрического и магнитного поля пучка, либо азимутальная компонента электрического поля пучка.

3. Интенсивность в несколько сот миллиампер при энергии протонов порядка 1 Гэв может быть достигнута при использовании спирально-секторной магнитной системы, позволяющей полу-

чить значения $Q_x > 1$ (жесткая фокусировка), и внешней инжекции с энергией в несколько десятков Мэв (кольцевая магнитная система). Такой кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой, сохраняя в значительной степени достоинства циклотрона - высокое качество пучка, надежность работы, - имеет перед другими ускорителями в этой области энергии то преимущество, что он экономичнее их как при создании, так и в процессе эксплуатации. Он может служить хорошей основой для создания исследовательских комплексов типа сверхмощных "мезонных фабрик" и высокоинтенсивных нейтронных генераторов.

4. Использование магнитного поля со спиральной вариацией напряженности открывает интересные возможности переоборудования (реконструкции) существующих синхроциклотронов на энергию в несколько сот Мэв в циклотроны (релятивистские) или в фазотроны. В первом случае интенсивность ускорителя может быть повышена на два-три порядка, а во втором случае - на один-полтора порядка. Последний путь позволяет при минимальных затратах создать пучки мезонов, по интенсивности достаточные для выполнения значительной части экспериментов из программы "мезонных фабрик". Возможности первого и второго вариантов реконструкции иллюстрируются в диссертации подробно разработанными проектами переоборудования синхроциклотрона ОИЯИ, причём второй вариант реконструкции - переоборудование синхроциклотрона в сильноточный фазотрон (проект "Ф") - в настоящее время реализуется.

5. Секторная структура магнитной системы циклотрона, к которой приводит логика развития циклотронного метода, примененная к циклотронам на энергии в несколько десятков Мэв, позволяет в некоторых случаях придать этим машинам новые качества.

Была предложена и исследована схема циклотрона на энергию до 100 Мэв, в которой уже в процессе ускорения обеспечивается моноэнергетичность пучка 10^{-4} при возможности плавной регулировки энергии в широких пределах и при интенсивности пучка в несколько десятков микроампер.

Показано, что жесткофокусирующая кольцевая секторная магнитная система позволяет осуществить двухцикловый режим ускорения с перезарядкой ионов путем обдирки электронов при некоторой промежуточной энергии.

Литература

1. L.N. Thomas. Phys.Rev., 54, 580 (1938).
2. Д.П. Василевская, В.П. Дмитриевский, В.В. Кольга и др. Препринт ОИЯИ, Р-390, Дубна, 1959; АЭ, 8, 189 (1960).
3. А.А. Коломенский, В.А. Петухов, М.С. Рабинович. Сб. "Некоторые вопросы теории циклических ускорителей". М., Изд-во АН СССР, 1955, стр. 7; Е.М. Мороз, М.С. Рабинович. ПТЭ, №1, 15 (1957).
4. Д.П. Василевская, Б.И. Замолодчиков и др. АЭ, 6, 657 (1959); Nucl.Instr. and Meth., 5, 335 (1959).
5. V.I. Danilov, B.I. Zamolodchikov et al. Proc. of the Inter. Conf. on High Energy Accel. and Instr., CERN, 1959, p.211.
6. В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга. Материалы рабочего совещания по обмену опытом и по научным исследованиям на циклотронах. Краков, 1961.
7. Б.И. Замолодчиков. Препринт ОИЯИ, 756, Дубна, 1961.
8. В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков и др. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963. М., Атомиздат, 1964, стр. 547.
9. А.А. Глазов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков и др. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963. М., Атомиздат, 1964, стр. 611. Препринт ОИЯИ, Р-1169, Дубна, 1969.

10. В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга, Т.М. Прилипо. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963. М., Атомиздат, 1964, стр. 608.
11. С.Б. Ворожцов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков и др. Препринт ОИЯИ, Р-1738, Дубна, 1964.
12. В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга. Препринт ОИЯИ, 1831, Дубна, 1964; УФН, 85, в.4, 651 (1965).
13. В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга. IEEE. Trans. on Nucl. Sci., NS-13 No 4, 215 (1966).
14. С.Б. Ворожцов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков и др. Препринт ОИЯИ, 2848-1, Дубна, 1966. IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-13, No 4, 84 (1966).
15. В.Н. Аносов, Б.И. Замолодчиков и др. Препринт ОИЯИ, Р9-3787, Дубна, 1968; АЭ, 25, №6, 539 (1968).
16. Б.И. Замолодчиков. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 1968, т.1, М., 1970, стр. 78.
17. А.А. Глазов, В.П. Желепов, Б.И. Замолодчиков и др. Препринт ОИЯИ, 9-5206, Дубна, 1970.
18. Б.И. Замолодчиков. Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц. Ереван, 1969 г. Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1970, с. 303.
19. В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга. Препринт ОИЯИ, 2804-1, Дубна, 1966.
20. Д.П. Василевская, Б.И. Замолодчиков и др. Препринт ОИЯИ, Р-930, Дубна, 1962; Nucl. Instr. & Meth., 21, No 1 85 (1963).
21. А.А. Глазов, Б.И. Замолодчиков и др. Препринт ОИЯИ, 9-3211, Дубна, 1967.
22. В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга, Н.И. Полумордвинова. Тезисы совещания по изохронным циклотронам. Алма-Ата, 1967, с.10.
23. А.А. Глазов, Б.И. Замолодчиков и др. Препринт ОИЯИ, 9-3951, Дубна, 1968; АЭ, 27, в.1, 16 (1969), Proc. of 6th Inter. Conf. on High Energy Accel., 1967, Cambridge, 1967, p. 303.
24. В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга, Н.И. Полумордвинова. Proc. of Fifth Inter. Cyclotron Conf., Oxford, 1969, p. 711.
25. Б.И. Замолодчиков, Д.Л. Новиков, Э.А. Полферов. Препринт ОИЯИ, Р-720, Дубна, 1961.
26. В.И. Данилов, Б.И. Замолодчиков и др. ОИЯИ, Б-1-1515, Дубна, 1963.
27. В.И. Данилов, Б.И. Замолодчиков и др. АЭ, 16, в.1, 9 (1964). Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963. М., Атомиздат, 1964, с. 591.
28. В.И. Данилов, Б.И. Замолодчиков и др. Препринт ОИЯИ, Р-1985, Дубна, 1965; АЭ, 19, в.3, 289 (1965); J. Nucl. Energy, Pt. C., 8, No 4, 473 (1966).
29. В.И. Данилов, Б.И. Замолодчиков и др. Авторское свидетельство № 175586 с приоритетом от 25 ноября 1963. Открытия, изобретения, №24, 1966.
30. А.А. Глазов, Б.И. Замолодчиков и др. Препринт ОИЯИ, Р9-3932, Дубна, 1968; ЖЭТФ, 57, в. 5(11), 1465 (1969); Nucl. Instr. and Meth., 70, No 3, 274 (1969).
31. С.Б. Ворожцов, Б.И. Замолодчиков, Н.Л. Заплатин. Материалы рабочего совещания по моноэнергетическому циклотрону. Дубна, апрель 1969; ОИЯИ-13-4496, с.81, Дубна, 1969; Proc. of Fifth Inter. Cyclotron Conf., Oxford, 1969, p. 414.
32. Д.П. Василевская, Б.И. Замолодчиков и др. Материалы рабочего совещания по моноэнергетическому циклотрону. Дубна, апрель 1969. Препринт ОИЯИ, 13-4496, Дубна, 1969, с.88.
33. В.П. Желепов, Б.И. Замолодчиков и др. Препринт ОИЯИ, 9-5292, Дубна, 1970.
34. В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга. Препринт ОИЯИ, Р9-3443, Дубна, 1967; АЭ, 24, в.4, 323 (1968). Proc. of 6th Inter. Conf. on High Energy Accel., 1967, Cambridge, 1967, p. 295.
35. В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга. Авторское свидетельство №240884 с приоритетом от 16 августа 1967. Открытия, изобретения, № 13, 1969.
36. В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга. Препринт ОИЯИ, Р-355, Дубна, 1959; В сб. "Ускорители", Атомиздат, 1961.

37. A Proposal for the mc^2 Isochronous Cyclotron, ORNL - 3540, 1963. R.S.Livingston, J.A.Martin, Proc. of the International Conf. on High Energy Accel. Dubna, 1963, M., Atomizdat, 1964, p. 547.
38. 700 MeV Negative Hydrogen Ion Cyclotron Facility, UCLA Report (1963); R.P.Haddock et al., Proc. of the International Conference on High Energy Accel. Dubna, 1963, M., Atomizdat, 1964, p.568.
39. A Proposal for a High Flux Meson Facility, Los Alamos Scientific Laboratory, September 1964.
40. Projekt einer Forschungsanlage mit einem Beschleuniger hoher Intensität für Protonen von 500 MeV, ETN Report (Zürich), January, 1964.
41. Triumph - Proposal and Cost Estimate, University of British Columbia, November, 1966.
42. Proposal to the National Science Foundation for Yale-Columbia Project of Major Modification to the Synchrocyclotron and Facilities Improvement at the Columbia University-Nevis Laboratory, January, 1967.
43. G.A. Bartholomew, I.C.D. Milton and E.W. Vogt, An Intense Neutron Generator based on a Proton Accelerator, AECL, R - 1905, 1964.
44. The AECL Study for an Intensity Neutron Generator, AECL-2600, July, 1966.
45. E.W. Vogt, Y.R. Richardson, IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-13, No. 4, 262 (1966).
46. F.M. Russel. Nucl. Instr. and Meth., 23, 229 (1963).
47. R.S.Livingston, J.A.Martin et al. V International Conference on High Energy Accel. (1965), p. 431.
48. F.M. Russel, R.S.Livingston. Proc. of the International Conf. on High Energy Accel. Dubna, 1963, M., Atomizdat (1964), p. 1085.
49. F.M. Russel. IEEE Trans. on Nucl. Sci., No. 5-13, 309 (1966).
50. M.M. Gordon. Nucl. Instr. and Meth., 58, 2 (1968).

51. S. Rainwater. Rev. Sci. Instr., 37, 269 (1966).
52. D.W. Kerst et al. Bull Amer. Phys. Soc., 30, 14 (1955).

Рукопись поступила в издательский отдел
12 октября 1971 года.

Таблица I

Оценка требуемой интенсивности протонного пучка от ускорителя для проведения некоторых экспериментов / 45 /.

Эксперименты	Требуемый ток, мка	Сравнительный порядок важности экспериментов	
		В области физики ядра	В области физики элементарных частиц
1. Пион-нуклонное упругое рассеяние а/ П - p б/ П - n	5+50 500+5000		а а
2. Пион-пионное рассеяние	x		а
3. Нуклон-нуклонные силы а/ С _{np} в/р,р/ б/ Спиновая корреляция /р,р/ в/ Тройное рассеяние /п,р/	0,5 50 50	2 2 2	а а а
4. Образование мезонов	xx		б
5. Упругое рассеяние ядрами	xx	2	
6. Различные ядерные формфакторы: а/ Рассеяние б/ Угловые корреляции напр. Ca ⁴⁰ /р,р/	xx 100	2 2	
7. Квазисвободное рассеяние, напр. /р,2р/реакции	I-10	2	
8. Выбивание кластеров	I-10	2	
9. Реакции подхвата	I-10	2	
10. Перезарядка пионов: а/ Образование изотопов б/ Наблюдение пионов от перезарядки	xx 100	3 2	
11. Мюонное рассеяние	1000	3	
12. Реакции при захвате пионов	xx	1	
13. П-мезоатомы	xx	3	
14. М-мезоатомы: а/ Исследование мезорентгеновского излучения б/ Захват слотными ядрами	5-50 0,5-5	1 1	
15. Захват мюонов нуклонами	50		а
16. Остановившиеся пионы, напр. редкие схемы распада	xx		б
17. Остановившиеся мюоны, напр. параметр Мисселя	xx		б
18. Нейтрино	1000		б

Примечание: Степень важности экспериментов обозначена в области физики ядра, как 1,2,3, и в области физики элементарных частиц, как а,б, причем 1 и а - означает наивысший приоритет /масштаб произвольный/ в указанной области физики.
x - требуется пучок высокой энергии и высокой интенсивности.
xx - оценка интенсивности не дается, но ток 100 мка при энергии более 500 Мэв будет достаточным.

Таблица II

Сильноточные ускорители на энергию протонов до 1 Гэв (проекты и сооружаемые).
Сравнение и оценка затрат *1,8, 2, 3, 7-10*.

	"Мезонные фабрики"		Высокоинтенсивные нейтронные генераторы		РЭЦ, Дубна	Н ⁻ -цикло-трон, Ванкувер	"Ф" кольцевой циклотрон, Цюрих	Колумбийский унисверситет, Нью-Йорк	Дубна	Чок-Ривер	РЭЦ, Дубна
	Изохронные циклотроны	Фазотрон с вариацней магн. поля.	Линейные ускорители	Циклотрон с разделенными орбитами							
Энергия протонов, Мэв	700 ^x	500	510	680 ^x	550 ^x	800	1000	975	810		
Ток ускоренных протонов, ма	0,5	0,1	0,1	0,05-0,1	0,01-0,05	1,0	65	65	100		
Эффективность вывода пучка, %	90	100	90	50	50	100	100	100	90		
Макроструктура пучка, %	100	100	100	50	50	6	100	100	100		
Микроструктура пучка, %	20	20	20	25	25	5	25	5	20		
Стоимость сооружения, млн. дол.	24 ^{xx}	18	21	10 ^{xx}	5	65	145	175	100 ^{xx}		
Общая мощность электропитания ускорителя, Мвт	7,5	5,1	1,0	1,6		7,5	210	200	160		

x Реконструкция;

xx Стоимость в рублях.

Интенсивность пучков частиц от релятивистского циклотрона /РЦ/
и сильноточного фазотрона /Ф/.

Основные проектные параметры ускорителей РЦ, Ф и РЦЦ

Таблица III

П а р а м е т р ы	Релятивистский	Сильноточный	Релятивистск.
	циклотрон, РЦ	фазотрон, Ф	циклотрон с жестк. фокусир. РЦЦ
1. Энергия ускоренных протонов, Мэв	700	680	810
2. Ток ускоренных протонов, ма	0,5-1,0	0,05-0,1	100
3. Пределный ток, ма: по "поперечному" заряду,	10,0	0,1	500
по "продольному" заряду	57,0		318
4. Энергия инжектируемых протонов, Мэв	-	-	50
5. Конечный радиус ускорения, см	825	270	640
6. Средняя напряженность на конечном радиусе, э	18778	16276	7679
7. Радиус инжекции, см	0	0	250
8. Средняя напряженность на ра- диусе инжекции, э	7887	11900	4340
9. Число спиралей или секторов	8	4	8
10. Частота аксиальных колебаний	0,24+0,29	~0,2	1,85+1,4
11. Частота радиальных колебаний	1,0+1,8	1+1,2	1,07+2,0
12. Частота ускоряющего поля, Мгц	12,05	18,2+14,4	25,2
13. Кратность частоты ускоряющего поля	1	1	4
14. Число дуантов /резонаторов/	2	1	4
15. Максимальный набор энергии за оборот, кэв	400	100	1000
16. Апертура дуанта или щелей, см	5	6+10	10
17. Способ вариации частоты	нет	вращающийся конденсатор	нет
18. Частота модуляции, гц	0	600+700	0
19. Амплитуда напряжения на вариаци- онном конденсаторе, кв	-	40+50	-
20. Зазор между спиральными или попереч- ными наконечниками, см	14,6+22	11,7+30	20
21. Вес электромагнита, тн	7700	7700	6000
22. Мощность питания магнитной систе- мы, квт	2100	1100	4000
23. Потери мощности в в.ч. системе, квт	2500	200	500
24. Азимутальная протяженность пучка, рад	0,5	2,5	0,25
25. Стоимость работ по сооружению ускорителя, включая помещение, млн руб	25	10	~100

Пучки частиц	Релятивистский циклотрон РЦ		Сильноточный фазотрон Ф		Синхроциклотрон ОИЯИ	
	Энер- гия, Мэв	Интенсив- ность на данную площадь в сек	Энер- гия, Мэв	Интенсив- ность на данную площадь в сек	Энер- гия, Мэв	Интенсив- ность на данную площадь в сек
I. Протоны /внутренний пучок/	700	500 мка	680	50 мка	680	2,8 мке
2. Протоны /выведенный пучок/	700	$\frac{2,7 \cdot 10^{15}}{12 \text{ см}^2}$	680	$\frac{1,5 \cdot 10^{14}}{12 \text{ см}^2}$	665	$\frac{4 \cdot 10^{11}}{12 \text{ см}^2}$
3. Поперечно-поляризованные протоны	670	$\frac{4 \cdot 10^{10}}{20 \text{ см}^2}$	620	$\frac{6 \cdot 10^9}{10 \text{ см}^2}$	685	$\frac{4,5 \cdot 10^7}{10 \text{ см}^2}$
4. Продольно-поляризованные протоны	670	$\frac{4 \cdot 10^{10}}{20 \text{ см}^2}$	620	$\frac{6 \cdot 10^9}{10 \text{ см}^2}$	612	$\frac{8 \cdot 10^7}{10 \text{ см}^2}$
5. Нейтроны /на всю область спектра/	$550 \leq E \leq 680$	$\frac{1 \cdot 10^8}{20 \text{ см}^2}$	$500 \leq E \leq 660$	$\frac{6 \cdot 10^7}{10 \text{ см}^2}$	$500 \leq E \leq 650$	$\frac{8 \cdot 10^6}{18 \text{ см}^2}$
6. Электроны конверсии гамма- квантов от распада Π^- -мезонов			150	$\frac{8 \cdot 10^6}{75 \text{ см}^2}$	150	$\frac{1,4 \cdot 10^5}{75 \text{ см}^2}$
7. Гамма-кванты от распада Π^- -мезонов			$10 \leq E \leq 600$	$\frac{5 \cdot 10^6}{20 \text{ см}^2}$	$10 \leq E \leq 600$	$\frac{2,4 \cdot 10^5}{20 \text{ см}^2}$
8. Π^+ - мезоны			70	$\frac{1,6 \cdot 10^6}{75 \text{ см}^2}$	70	$\frac{7 \cdot 10^4}{75 \text{ см}^2}$
9. Π^- - мезоны			70	$\frac{1,6 \cdot 10^6}{75 \text{ см}^2}$	70	$\frac{8 \cdot 10^4}{75 \text{ см}^2}$
10. Π^+ - мезоны			300 ± 6	$\frac{4,8 \cdot 10^7}{75 \text{ см}^2}$	300 ± 6	$\frac{2,4 \cdot 10^5}{75 \text{ см}^2}$
11. Π^- - мезоны			300 ± 8	$\frac{8 \cdot 10^5}{75 \text{ см}^2}$	300 ± 8	$\frac{4 \cdot 10^4}{75 \text{ см}^2}$
Пучки мезонного тракта						
12. μ^- - мезоны			$80 \leq E \leq 300$	$\frac{5 \cdot 10^6}{50 \text{ см}^2}$	$67 \leq E \leq 275$	$\frac{1 \cdot 10^5}{50 \text{ см}^2}$
13. μ^- - мезоны		I % от Π^\pm - мезонов	73 ± 7	$\frac{3 \cdot 10^6}{50 \text{ см}^2}$	73 ± 7	$\frac{1,5 \cdot 10^5}{50 \text{ см}^2}$
14. μ^- - мезоны			115 ± 11	$\frac{1,2 \cdot 10^6}{50 \text{ см}^2}$	115 ± 11	$\frac{6 \cdot 10^4}{50 \text{ см}^2}$
15. Π^+ - мезоны	155 ± 5	$\frac{2 \cdot 10^9}{200 \text{ см}^2}$	98 ± 7	$\frac{8 \cdot 10^6}{50 \text{ см}^2}$	98 ± 7	$\frac{1,6 \cdot 10^5}{50 \text{ см}^2}$
16. Π^- - мезоны	155 ± 5	$\frac{3 \cdot 10^8}{200 \text{ см}^2}$	98 ± 5	$\frac{1,2 \cdot 10^7}{50 \text{ см}^2}$	98 ± 5	$\frac{6 \cdot 10^5}{50 \text{ см}^2}$
17. Π^- - мезоны	300 ± 8	$\frac{6 \cdot 10^8}{200 \text{ см}^2}$	294 ± 20	$\frac{2,2 \cdot 10^7}{50 \text{ см}^2}$	294 ± 20	$\frac{1 \cdot 10^6}{50 \text{ см}^2}$

Основные параметры моноэнергетического циклотрона (МЦ)

Таблица У

Основные параметры электронной модели релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой

1. Максимальная энергия ускоренных электронов	409 кэВ
2. Предельный ток /расчетный/ ускоренных электронов /при $\Delta E = 1,7$ кэВ/:	
по формуле /7/	840 мкА
по формуле /8/	860 мкА
3. Энергия инжектируемых электронов	6 кэВ
4. Радиус инжекции	18 см
5. Среднее значение напряженности магнитного поля на радиусе инжекции	14,01 э
6. Конечный радиус ускорения	100,6 см
7. Среднее значение напряженности на конечном радиусе	24,45 э
8. Частота радиальных колебаний	1,05+1,94
9. Частота аксиальных колебаний	1,35+1,7
10. Число спиралей в структуре поля	8
11. Радиальный шаг структуры поля	8 см
12. Вариация напряженности магнитного поля на конечном радиусе	1,06
13. Частота обращения электронов	39,475 МГц
14. Частота ускоряющего напряжения	39,475 МГц
15. Набор энергии за оборот	1,2+2,8 кэВ
16. Азимутальная протяженность пучка на конечном радиусе	0,7 рад
17. Апертура дуанта	2 см
18. Зазор между полюсными поверхностями	8 см
19. Высота пучка	~0,4 см

	p	d	α	H_e^3	L_e^6
1. Ускоряемые частицы					
2. Максимальная энергия, МэВ	80	60	120	120	180
3. Диапазон изменения энергии выведенного пучка			(0,25+1,0)		
4. Энергетический разброс			$1 \cdot 10^{-4}$		
5. Интенсивность выведенного пучка, мкА	100				
6. Средняя напряженность поля на конечном радиусе, э	3292	3985	3960	3460	3967
7. Напряженность поля в центре, э	3037	3861	3837	3317	3844
8. Средний радиус конечной орбиты, см			400		
9. Средний радиус орбиты при инжекции, см			54		
10. Потенциал инжектора, мВ	1,29	1,045	1,045	1,03	1,043
11. Частота колебаний:					
аксиальных				0,8+0,9	
радиальных				1,07+1,17	
12. Частота обращения, МГц	4,638	2,948	2,948	3,377	2,948
13. Кратность частоты ускоряющего напряжения			2		
14. Число основных дуантов			2		
15. Амплитуда ускоряющего напряжения на основных дуантах, кВ			55		
16. Число дополнительных дуантов			2		
17. Набор энергии за оборот, кэВ			200		
18. Шаг орбит на конечном радиусе, см	0,44	0,6	0,6	0,6	0,6
19. Число секторов магнитной системы			4		
20. Вес магнитной системы, тн			1200		
21. Высота зазора электромагнитов, см			16		
22. Максимальная мощность питания электромагнитов, кВт			1500		
23. Мощность потерь в в.ч. системе, кВт			140		

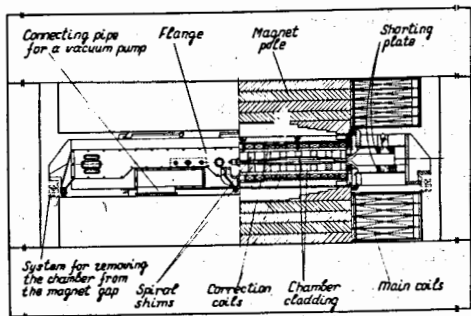
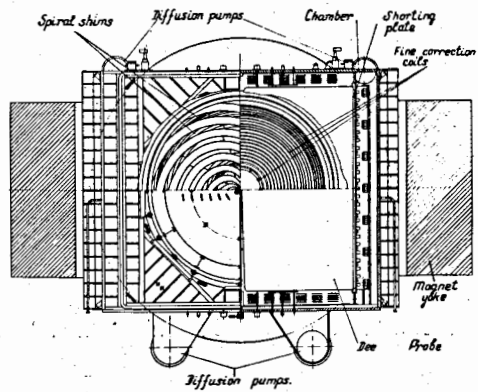
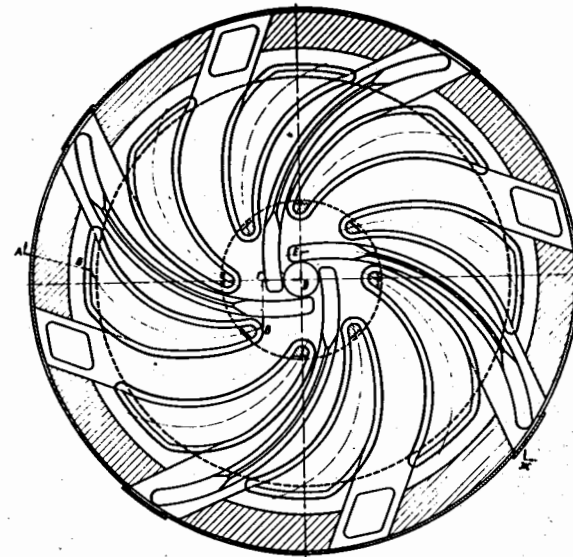


Рис.1. Релятивистский циклотрон. (Проект „РЦ“ ЛЯП ОИЯИ.
Энергия протонов-700 Мэв, ток протонов-500 мка).
Общий вид.



По „А-Б-В-Г-Д-Е-Ж“

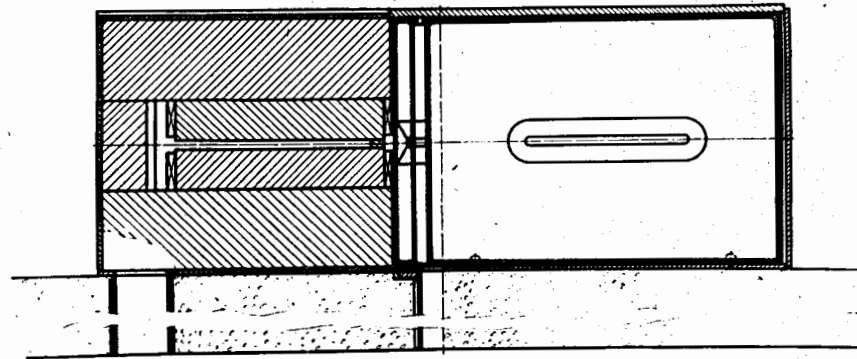


Рис.2. Релятивистский циклотрон с жесткой фокусировкой.
(Энергия протонов-810 Мэв, ток протонов-100 ма).Схема.

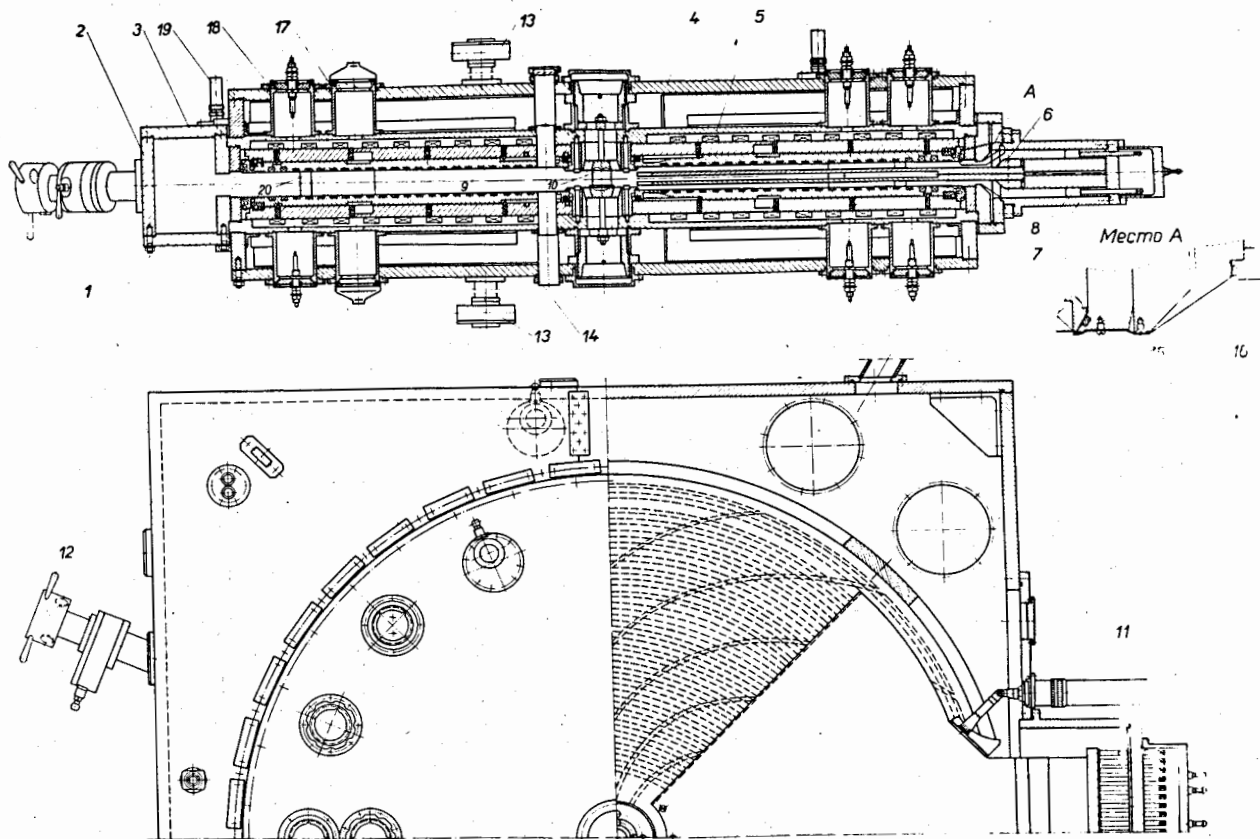


Рис.3. Электронная модель релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой (общий вид).

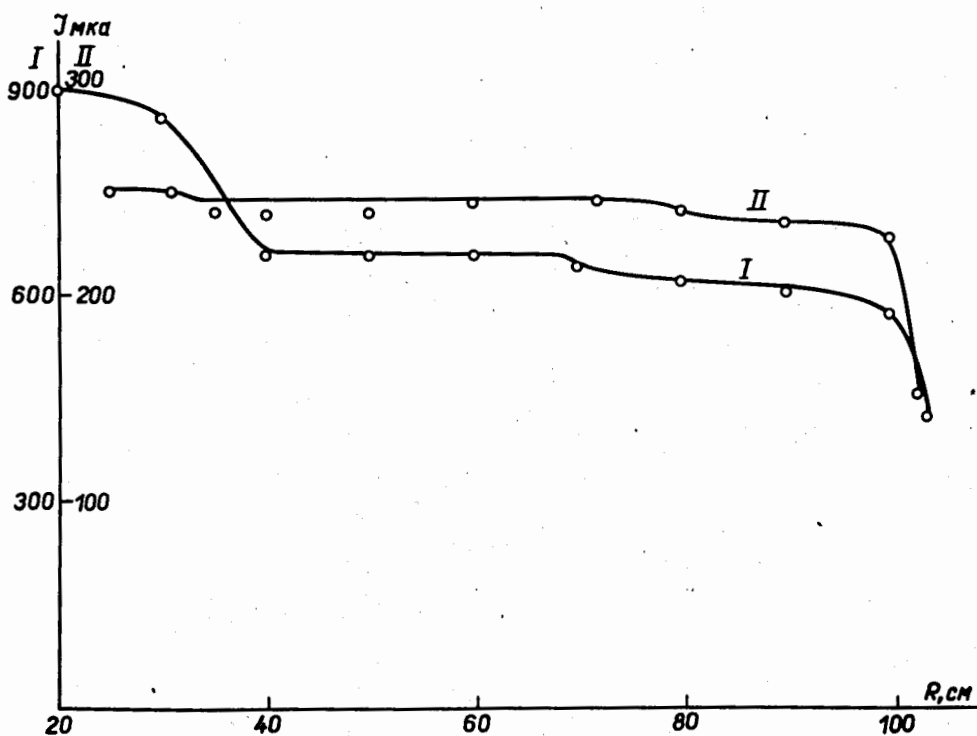


Рис.4. Экспериментальная зависимость тока ускоренных электронов от радиуса при $Q_z=1,35$ и $V_0=1,2$ кв.
(Электронная модель релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой).

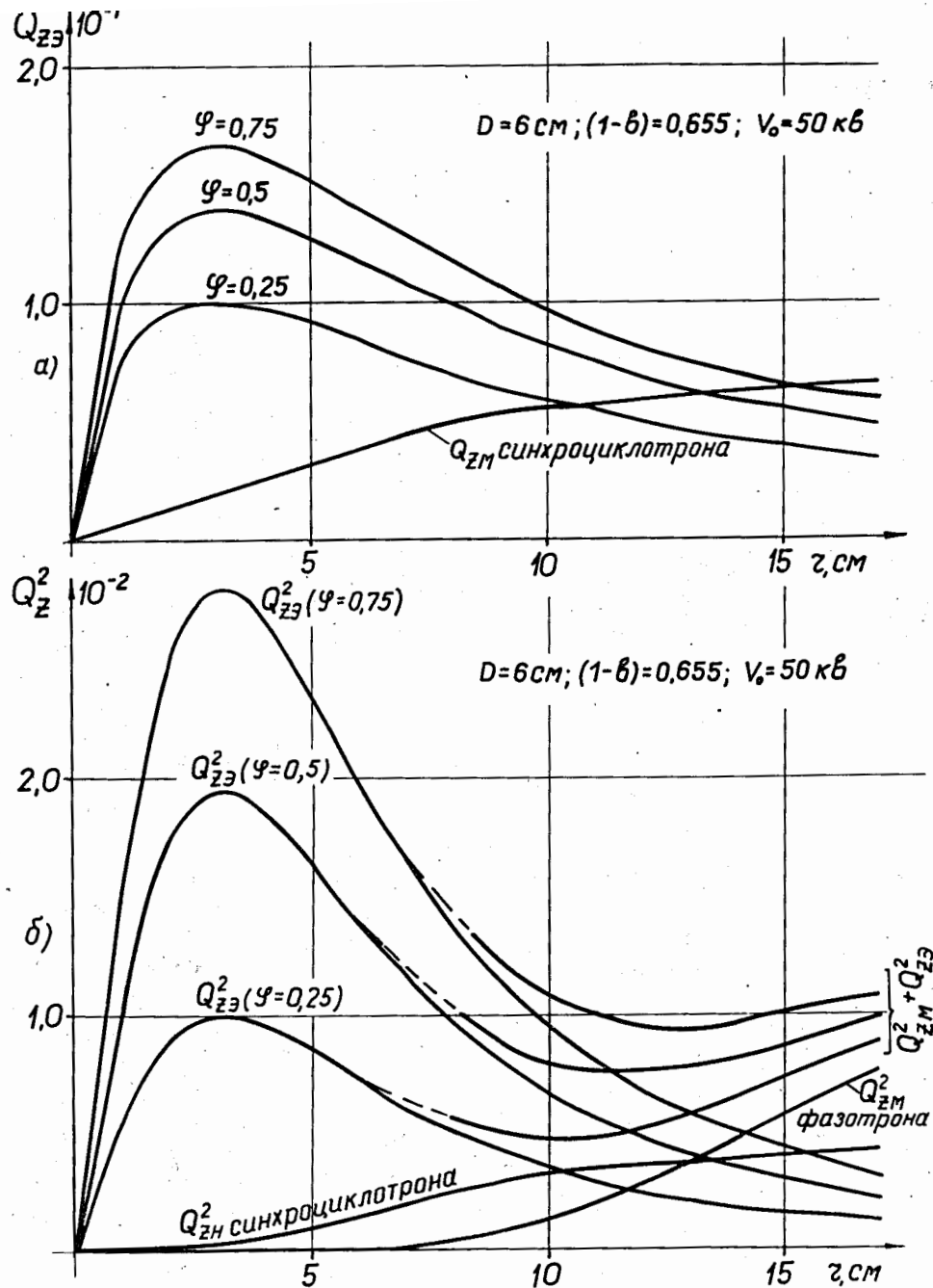


Рис. 5. Фокусировка ускоряющим полем в фазотроне „Ф“. Зависимость $Q_{z\text{З}}$ от радиуса.

38

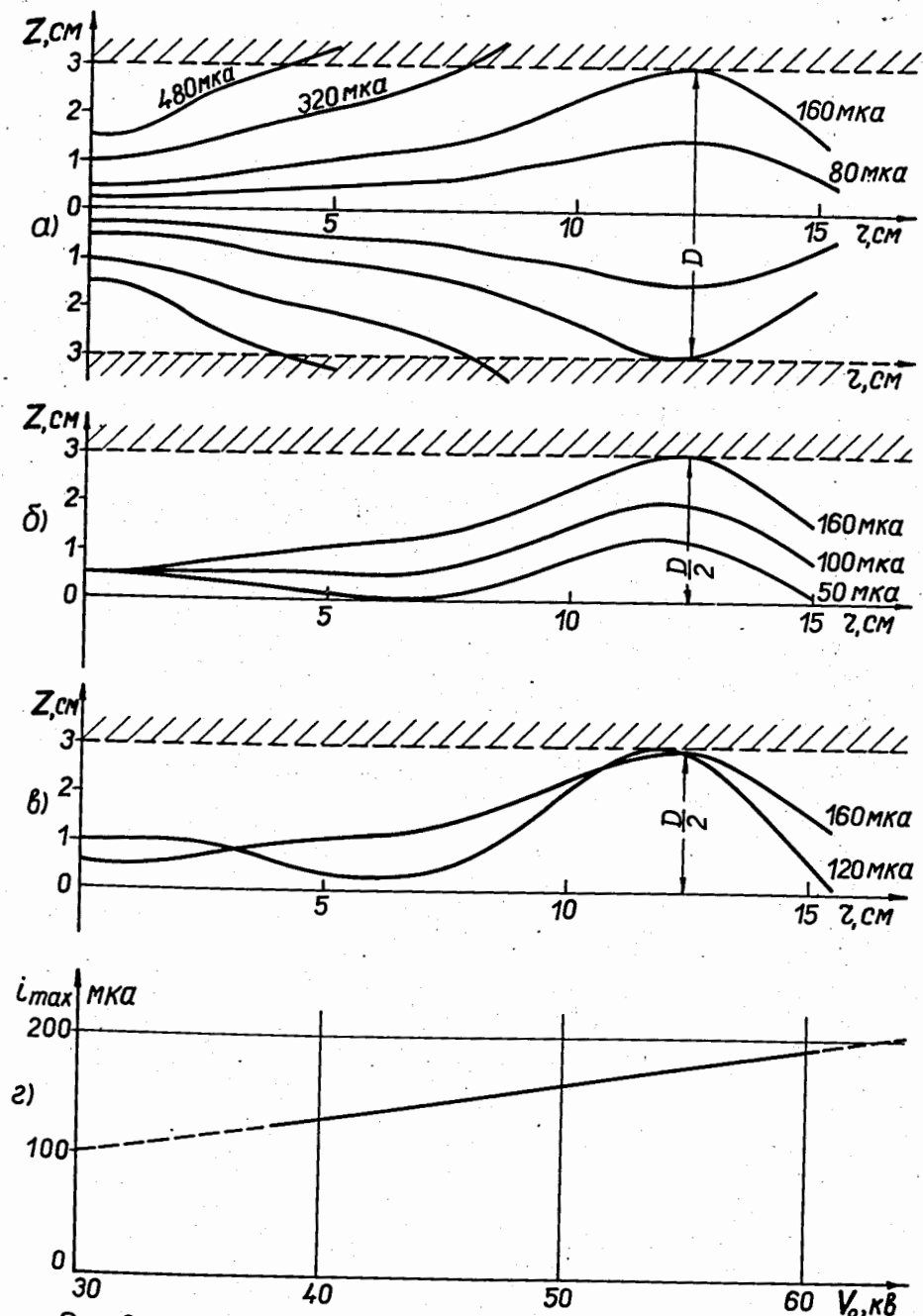
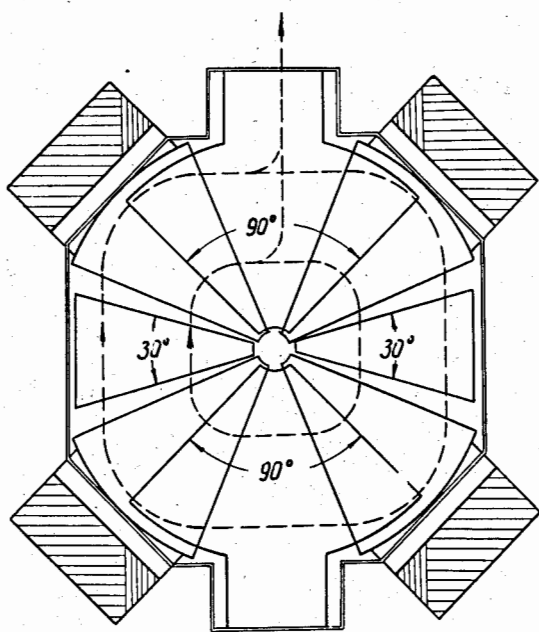


Рис. 6. Граничные траектории в центральной области фазотрона „Ф“ и зависимость предельного тока в этой области от амплитуды напряжения на дуанте (расчетные).

39



0 10 20 м

Рис.9. Моноэнергетический циклотрон (проект МЦ ЛЯП ОИЯИ).
Энергия протонов - 80 МэВ, ток протонов - 100 мкА. Схема.