

У.Б.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

С345
И-605

Г. Индреаш

1100

ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ЦИКЛОТРОНЕ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
член-корреспондент Академии наук СССР
Г.Н. Флеров

Дубна 1983 год

Г. Индреаш

C 345
И-605

1190

ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ЦИКЛОТРОНЕ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
член-корреспондент Академии наук СССР
Г.Н. Флеров

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

После первых опытов по получению ускоренных ионов тяжелее гелия на циклотронах, предназначенных для ускорения более "легких" частиц, во многих лабораториях начали строить ускорители, позволяющие получать интенсивные пучки тяжелых ионов до энергий ~ 10 Мэв/нуклон.

В настоящее время известны действующие установки различного типа /циклотроны, линейные ускорители, тандем-генераторы/, на которых широким фронтом проводятся исследования по взаимодействию тяжелых ионов с ядрами.

Сравнение параметров этих ускорителей показывает, что циклотронный метод для ускорения тяжелых ионов является в настоящее время наиболее эффективным^{/1-3/}.

Из анализа экспериментальных зависимостей интенсивности ускоренных ионов от радиуса и амплитуды высокочастотного напряжения следует, что необходимое радиальное распределение магнитного поля для получения пучков с энергией 8-10 Мэв/нуклон при фиксированном максимальном ускоряющем потенциале должно быть более "пологим", чем в обычных протонных циклотронах.

В связи с этим при формировании слабо спадающего магнитного поля была применена аппаратура с датчиком, основанным на ядерном магнитном резонансе. Некоторые изменения, введенные в магнитометр ИМИ-2, позволили повысить точность измерений до 0,005%, а также производить измерения резко неоднородных полей с градиентом ~ 300 э/см при формировании полей с азимутальной вариацией.

Необходимые радиальные распределения при формировании поля циклотрона были получены наиболее простым и эффективным способом с помощью железных шимм. Теоретический расчет величины вклада кольцевых и дисковых шимм по методу равномерного намагничивания^{/4/} совпадает с измерениями в нашем случае с точностью $\sim 5-10\%$.

Для улучшения магнитной фокусировки в начальной области ускорения целесообразно использовать токовые катушки, помещенные над поверхностью полюсов внутри вакуумной камеры. Вклад поля токовой катушки существенно зависит от геометрических размеров межполюсного зазора. Для обычной циклотронной геометрии учет влияния поверхностей железа на конфигурацию магнитного поля катушки с током с удовлетворительной точностью может быть получен введением "коэффициента отражения"^{/5/}.

Расчет вклада поля плоских токовых катушек может быть произведен с точностью не хуже 2%. Из опытных данных следует, что влияние магнитной проницаемости железа $\mu \neq \infty$ / в пределах 0,5-15 Кэрст на распределение поля токов пренебрежимо мало /5/.

Наряду с формированием магнитного поля важное значение имеет получение необходимого высокочастотного ускоряющего напряжения на дуантах.

Из расчетных данных и предварительных опытов при оптимальной конфигурации магнитного поля следует, что для получения интенсивных пучков на радиусах, близких к конечному, необходимо, чтобы разность потенциалов на дуантах составляла - 300-350 Кв.

Получение столь высоких напряжений на дуантах встретило ряд затруднений, основные из которых были:

а/ сильная нагрузка контура при $2V_0 \geq 100-150$ Кв, приводящая к ухудшению добротности резонансной системы;

б/ значительное уменьшение потенциала дуантов при включении магнитного поля /в начале тренировки потенциал уменьшался в 1,5 раза/.

С целью выяснения причин, вызывающих эти явления и влияния различных параметров ускорителя на получение максимального высокочастотного потенциала на дуантах, проводились исследования непосредственно на работающей установке с помощью регистрации γ -излучения, возникающего в резонансном контуре циклотрона при наличии ускоряющего напряжения на дуантах.

Из полученных экспериментальных данных следует, что γ -излучение, регистрируемое счетчиком, является тормозным излучением электронов, которые ускоряются в промежутке дуант-крышка камеры и бомбардируют медные поверхности электродов.

Энергия электронов зависит от абсолютного значения напряжения между дуантами, и верхняя граница γ -спектра соответствует амплитудному значению высокочастотного потенциала.

В связи с этим, по форме спектра γ -излучения можно сравнительно точно измерять амплитудные значения потенциала на дуантах /точность измерения - 3% независимо от режима работы высокочастотного генератора: непрерывный или импульсный/.

Было установлено, что интенсивность γ -излучения существенно зависит от амплитуды напряжения на дуантах, от состояния поверхностей электродов и практически не зависит от давления в камере в пределах $5 \cdot 10^{-6} - 3,5 \cdot 10^{-5}$ мм.

При включении внешнего магнитного поля при $0 < H_0 < 1$ Кэрст интенсивность излучения возрастает в несколько раз и практически не зависит от дальнейшего увеличения H_0 .

Соотношение интенсивности γ -лучей в присутствии и в отсутствие магнитного поля может служить критерием тренировки системы: для тренированной системы это отношение наименьшее.

Наблюдаемое γ -излучение не является, однако, причиной пробоя промежутка, так как в опытах не было получено совпадения между импульсами, соответствующими максимальной плотности излучения и световыми вспышками от пробоев. Тем не менее, по характеру зависимости скорости счета γ -лучей от величины потенциала на дуантах можно судить о том, как близко система находится от состояния пробоя.

Это особенно важно в случае резонаторов с высокой добротностью, когда пробои могут привести к серьезным повреждениям поверхности электродов и поэтому режим тренировки системы должен, по возможности, исключить возникновение пробоев. В этом отношении регистрация γ -квантов предпочтительна другому методу /7/.

При фиксированном максимальном напряжении на дуантах и радиальном распределении магнитного поля с относительно малым градиентом особое внимание было обращено на вертикальную фокусировку пучка в процессе ускорения ионов до конечного радиуса.

Как правило, в больших циклотронах не хватает максимально достигаемого высокочастотного ускоряющего напряжения и поэтому всегда приходится идти на компромисс между условиями фокусировки и пусковой характеристикой.

Известно /8/, что траектория частиц в циклотроне зависит от очень многих параметров, точная величина которых обычно не известна /движение на первых оборотах; фазовая "группировка", начальные фазы и т.д./.

Это обстоятельство не дает возможности получить расчетным путем количественные соотношения, показывающие, какое влияние на интенсивность пучка оказывает суммарное действие этих параметров.

Поэтому более целесообразно экспериментально контролировать положение пучка по всему тракту ускорения.

С целью исследования вертикальных размеров и геометрического положения пучка в горизонтальной плоскости была разработана методика, основанная на одновременном измерении интенсивности частиц, падающих на токовый пробник, и нейтронного потока, возникающего при бомбардировке ионами медных кромок дуантов. Оценка величины кулоновского барьера на меди показывает, что измерения можно вести для энергии иона $> 2,5$ Мэв/зуклон, что является основным недостатком данного метода.

Из сравнения резонансных кривых: выхода нейтронов и тока на мишень

следует, что интенсивность пучка на конечном радиусе обусловлена в основном частицами, имеющими большие положительные фазы в начале лизового режима. В связи с этим увеличение интенсивности пучков может быть достигнуто расширением диапазона положительных фаз в начальной стадии ускорения^{/8,9/}.

Одним из эффективных способов, с этой точки зрения, является поворот источника по отношению к вытягивающему электроду^{/10/}, который приводит к смещению фаз в положительную область.

В условиях циклотрона ЛЯР максимальная интенсивность получалась обычно в тех случаях, когда вытягивающий электрод стержневого типа был смещен на 10-12 мм за щель источника, что в некоторой степени аналогично^{/10/}.

Специфика ускорения тяжелых ионов требует использования несколько видоизмененной начальной оптики. Это вызвано тем, что на первых оборотах движения присутствует мощный поток малозарядных частиц, не участвующих в дальнейшем ускорении.

В работе даны расчеты траектории движения частиц на первых оборотах и приводится оценка полезного диапазона фаз для различных конфигураций элементов начальной оптики.

Расчеты производились на электронно-счетной машине, что позволило исследовать влияние различных параметров на траекторию частиц: форма ускоряющего электрического поля, расстояние между дуантами, отношение $\frac{A}{Z}$, начальная фаза иона и т.д.

В настоящее время на большом циклотроне тяжелых ионов ЛЯР получены внутренние пучки трехзарядных ионов C, N, O с интенсивностью ~ 200 мка и четырехзарядных ионов O и Ne с интенсивностью до 100 мка.

На сегодняшний день во многих исследовательских лабораториях социалистических стран и Советского Союза работают циклотроны с диаметром полюсов 120 и 150 см. В связи с этим рассматривается возможность ускорения тяжелых ионов на этих установках. Условия резонанса для частиц с $\frac{A}{Z} > 2$ могут быть достигнуты увеличением максимальной индукции в центре H_0 и собственной длины волны резонансного контура. С этой точки зрения уменьшение отношения воздушного зазора к диаметру полюсов является наиболее перспективным. Конструктивно уменьшение межполюсного зазора осуществляется путем насадки дисков из мягкой стали на крышки ускорительной камеры.

Предлагаемые конструктивные изменения дадут возможность ускорить частицы в диапазоне $2 < \frac{A}{Z} < 3,7$ на У-120 и $2 < \frac{A}{Z} < 4$ на У-150, до энергии 5-6 Мэв/нуклон.

Выводы

1. Результаты экспериментов по формированию магнитного поля 300 см и 150 см циклотронов ЛЯР указывают, что теоретический расчет вклада поля железных кольцевых и дисковых шимм по методу равномерного намагничивания может быть осуществлен с точностью ~ 5-10%.

Вклад поля плоской катушки с током существенно зависит от геометрических размеров межполюсного зазора; показано, что конфигурацию магнитного поля токовой катушки в зазоре электромагнита можно получить с удовлетворительной точностью, пользуясь "коэффициентом отражения". В работе приведены графики, позволяющие рассчитать вклад поля плоских кольцевых катушек с током с точностью не хуже 2%.

2. Предлагается новая методика для исследования состояния резонансной системы ускорителя при помощи регистрации γ -излучения тормозных электронов. Показано, что интенсивность γ -излучения существенно зависит от амплитуды напряжения на дуантах, от состояния поверхностей электродов и практически не зависит от давления в ускорительной камере в пределах $5 \cdot 10^{-6}$ - $3,5 \cdot 10^{-5}$ мм Hg.

Спектр γ -излучения может быть использован для определения абсолютного значения ускоряющего напряжения на дуантах с точностью ~ 3%.

3. Для исследования влияния отдельных параметров на режим ускорения и для настройки циклотрона предлагается эффективная методика, основанная на одновременном измерении интенсивности пучка с помощью токового пробника и нейтронного потока, возникающего в результате ядерных реакций при бомбардировке ионами медных кромок дуантов.

Методика пригодна для энергии иона $E \geq 2,5$ Мэв/нуклон.

4. Рассматривается вопрос ускорения тяжелых ионов на циклотронах с диаметром полюсов 120 и 150 см, работающих в настоящее время для ускорения дейтронов и α -частиц.

Показано, что при небольших изменениях существующих конструкций ускорителей можно будет получать пучки ионов в пределах отношения массы к заряду от 2 до 4 с энергией 3-8 Мэв/нуклон.

Материалы настоящей работы опубликованы в печати^{/5,6,11,13/}, данные работы докладывались на рабочем совещании по циклотронам в ОИЯИ, Дубна /1980г./ и на конференции по исследованиям на циклотронах в Кракове /1981г./.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю члену-

корреспонденту Академия наук СССР Г.Н. Флерову за постановку задачи и постоянный интерес к работе, научному сотруднику Ю.Ц. Оганесяну за повседневную помощь и советы при выполнении и написании данной работы, а также В.В. Бабикову, Б.А. Загеру, Ю.В. Лобанову, Б.Н. Маркову, П.И. Рыльцеву и В.Г. Тихину за помощь при проведении экспериментов и обсуждение полученных результатов.

Л и т е р а т у р а

1. Г.Н. Флеров. Основные проблемы физики многозарядных ионов. Материалы конференции по ядерным реакциям с многозарядными ионами ОИЯИ Дубна, 1958.
2. Ю.Ц. Оганесян. Получение пучков ускоренных ионов на 300 см циклотроне ОИЯИ. Доклад на конференции по циклотронам. Краков, 1961 г.
3. G.Indreas: Accelerarea ionilor grei. Automatica si Electronica /в печати/.
4. В.И. Данилов. Диссертация, ЛЯП ОИЯИ, 1959 г.
5. Г. Индреаш, П.И. Рыльцев. Магнитное поле плоской кольцевой катушки с током. Препринт ОИЯИ 903, 1962 г.
6. Г. Индреаш, А.Ф. Линев, Ю.В. Лобанов, Б.Н. Марков, Ю.Ц. Оганесян. Исследование γ -лучей резонансной системы циклотрона. Препринт ОИЯИ Р-873, 1962 г.
7. W.W.Chupp, H.G.Heard: Spark Dammage and High Voltage Breakdown of Metals in Vacuum. UCRL 1962 (1954).
8. Д.М. Каминкер. Диссертация, Ленинград, 1958 г.
9. Н.Д. Федоров. Атомная Энергия 2, 4, 385, 1957.
10. W.J.V. Studii Nucl.Instr. 9, 1, 49, 1960.
11. Г. Индреаш, Ю.Ц. Оганесян. Revue de Physique 6, 3, 347, 1961.
12. A.Valeriu, Studii si cercetari de Fizica 10, 2, 379, 1959.
13. Г. Индреаш. О возможности ускорения тяжелых ионов на 120 и 150 см циклотронах. Сборник докладов конференции. Краков, 1961 г.
14. Г. Индреаш, Ю.Ц. Оганесян. Studii si cercetari de Fizica 12, 4, 821, 1961.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 февраля 1963 г.