

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Б 41

P9-88-249

**В.Бейшовец*, А.Т.Василенко, А.А.Глазов,
В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, М.Крживанек*,
Ле Киен Тхань, З.Трейбал*, Й.Тучек*, М.Чигак***

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ОДНОВРЕМЕННОГО УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ
И Н⁻-ИОНОВ НА ИЗОХРОННОМ
ЦИКЛОТРОНЕ У-120М**

*Институт ядерной физики ЧСАН, Прага

В настоящее время изохронные циклотроны являются наиболее распространенными базовыми установками в физических лабораториях и центрах по производству изотопов. Как правило, изохронные циклотроны используются как для проведения экспериментальных исследований по ядерной физике, так и для широкого круга прикладных задач. В связи с этим определенный интерес представляет рассмотрение возможности выполнения прикладных работ совместно с проведением ядерно-физических исследований.

В работе ^{1/} предложена и теоретически обоснована возможность одновременного ускорения в изохронном циклотроне двух пучков. Один пучок состоит из положительных ионов, второй - из отрицательных ионов одного и того же элемента, например протонов и H^- -ионов, дейтронов и D^- -ионов и т.д. Оба пучка имеют одинаковую величину заряда ионов, как правило, они однозарядные, и сгустки пучков вращаются в процессе ускорения в противоположные стороны, достигая примерно одинаковой энергии. Пучок отрицательных ионов выводится из камеры циклотрона с помощью перезарядной мишени, пучок положительных ионов проходит практически без искажений ^{2/} через тонкую мишень и выводится в другом направлении с помощью электростатического дефлектора. Таким образом, каждый из ускоренных пучков выводится в заданном направлении и применяется по назначению. При этом эффективность использования базовой ускорительной установки существенно возрастает.

При одновременном ускорении положительных и отрицательных ионов выбранного элемента изохронный рост магнитного поля должен соответствовать среднему значению энергии покоя \bar{E}_0 . При этом сдвиг фазы ионов определяется выражением

$$\sin \phi_k = \sin \phi_n \pm \pi \cdot q \cdot \frac{\Delta E_0}{E_0} \cdot \frac{\bar{E}_0^2}{E_n \cdot E_k} \cdot \frac{W_k - W_n}{\Delta W}, \quad /1/$$

где ϕ_n , ϕ_k - начальная и конечная фазы данного иона; E_n , W_n , E_k , W_k - начальные и конечные полная и кинетическая энергии ионов; q - кратность ускорения; ΔW - максимальный набор энергии за оборот; ΔE_0 - суммарное различие масс покоя. Знак "+" соответствует отрицательным ионам, "-" - положительным.

Максимально достижимый прирост энергии $W_k - W_n$ при одновременном ускорении однозарядных положительных и отрицательных

ионов выбранного элемента получается из выражения /1/ при $\Delta E_0 = 2 \cdot 0,51$ МэВ, $\sin \phi_k = 1$ и $\sin \phi_H = -1$:

$$W_k - W_H = 600 \cdot A \cdot \frac{\Delta W}{q} \quad (M \text{ эВ}), \quad /2/$$

где A - атомный вес ионов.

Для проверки теоретических расчетов по одновременному ускорению в циклотроне двух пучков в Лаборатории ядерных проблем ОИЯМ совместно с ИЯФ ЧСАН /Ржеж, ЧССР/ был разработан проект эксперимента применительно к изохронному циклотрону У-120М, который эксплуатируется в Институте ядерной физики ЧСАН^{/3/}. В 1987 г. эксперимент был успешно осуществлен. На циклотроне У-120М одновременно ускорены пучки протонов и H^- -ионов.

В настоящем сообщении приводятся результаты как экспериментального исследования, так и сравнения с численными расчетами работ^{/1,2/}. Как следует из выражения /1/, при одновременном ускорении в циклотроне У-120М протонов и H^- -ионов до одинаковой энергии сдвиг фазы из-за различия в массах покоя ионов составляет

$$\sin \phi_k = \sin \phi_H \pm 0,00334 \cdot \frac{W_k - W_H}{\Delta W}. \quad /3/$$

При правильной настройке частоты ускоряющего напряжения фаза сгустка H^- -ионов будет сдвигаться в положительном направлении, фаза сгустка протонов - практически симметрично в отрицательном направлении. Общий фазовый сдвиг H^- -ионов относительно протонов определяется из формулы

$$\sin \phi_{2k} - \sin \phi_{1k} = \sin \phi_{2H} - \sin \phi_{1H} + 0,00668 \cdot \frac{W_k - W_H}{\Delta W}. \quad /4/$$

Из выражений /3/ и /4/ следует, что для получения на У-120М максимальных энергий протонов и H^- -ионов /порядка 40 МэВ/ необходимо, чтобы конструкция ионных источников и пулера обеспечивала получение начальных фаз примерно 30° для протонов и -30° для H^- -ионов. Например, при $\phi_H = -30^\circ$ и $W_H = 0$, $W_k = 40$ МэВ, $\Delta W = 0,1$ МэВ/оборот. из формулы /3/ получим $\phi_k = 57^\circ$.

Такие начальные фазы можно обеспечить, например, с помощью поворота обоих ионных источников и пулера вокруг центра магнита на угол 30° относительно ускоряющей кромки дуанта против направления вращения протонного пучка. Численные расчеты центральной области У-120М показывают, что при таком повороте ионных источников и пулера величины начальных фаз центров сгустков примерно равны величине поворота для обоих знаков ионов.

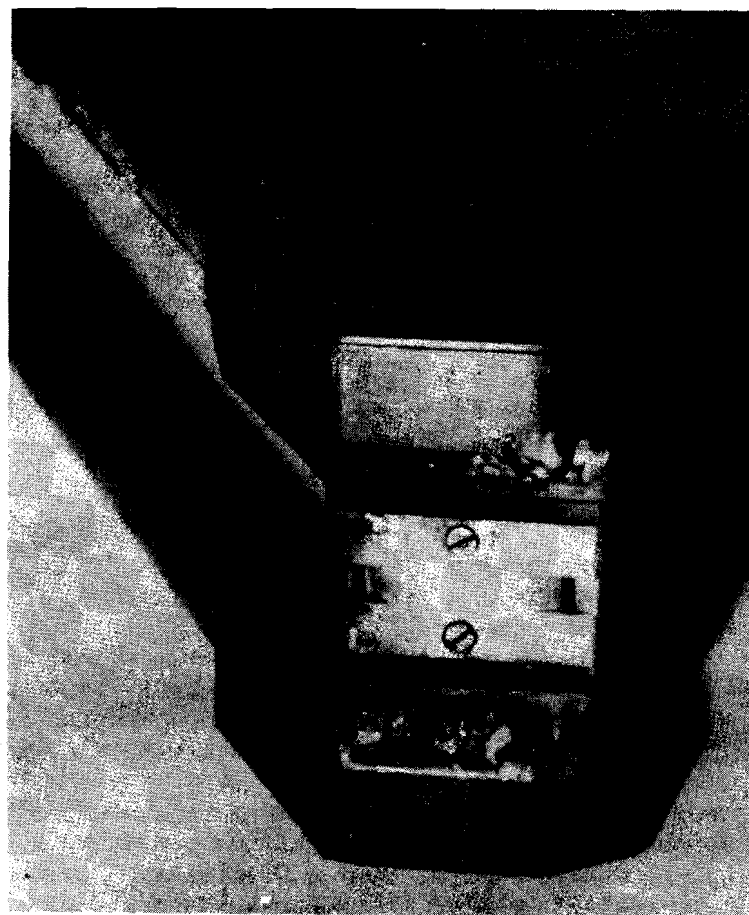


Рис. 1

При разработке конструкции ионных источников было поставлено требование внесения минимальных изменений в геометрию центральной области У-120М, чтобы после окончания эксперимента в короткий срок перевести циклотрон в режим штатной эксплуатации. Поэтому был выбран вариант совмещения обоих ионных источников в общей головке, имеющей посадочные размеры, идентичные существующим. На рис. 1 показана головка нового комбинированного источника, в которой имеются два накаливаемых катода, два антикатада и две отдельные разрядные камеры. Плоскость щелей, через которые переменным ускоряющим полем поочередно инжектируются протоны и H^- -ионы, а также новый съемный пулер с двумя щелями повернуты на 30° против движения протонов. Расстояние между щелями 2,7 см, и для обхода центральной части ис-

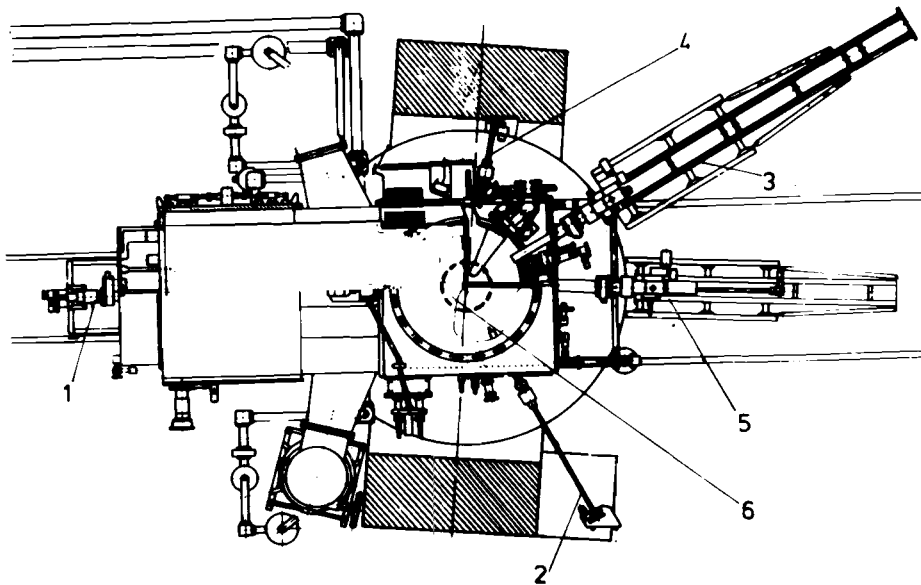


Рис. 2

точника радиус первой орбиты должен составлять $1,7 \pm 1,8$ см. На катоды подается раздельно питание, поэтому возможна как совместная работа двух разрядных камер, так и каждой в отдельности.

На рис. 2 приведено сечение в средней плоскости циклотрона У-120М. Цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены пробники /пр. 1, пр. 2, пр. 3, пр. 4/ для измерения тока пучков и установки перезарядной мишени, 5 - источник ионов, 6 - центральная корректирующая обмотка /К2/ для регулировки бампа магнитного поля.

Программа экспериментов на У-120М включала проведение следующих работ:

1. *Выбор режимов ускорения с комбинированным ионным источником.* При этом исследовались два варианта. В первом - направление основного поля соответствовало режиму обычной эксплуатации /прямое поле/. При этом протоны, выходя из правой щели источника, вращаются против часовой стрелки, H^- -ионы инжектируются из левой щели и вращаются по часовой стрелке, если смотреть сверху со стороны штоков источника. В первом режиме достаточная для экспериментов интенсивность пучка протонов вдоль радиуса получилась при уровне магнитного поля, соответствующем частоте ускоряющего напряжения $f_0 = 20,31$ МГц. При этом на радиусе $r_k = 50$ см энергия протонов равна 22 МэВ.

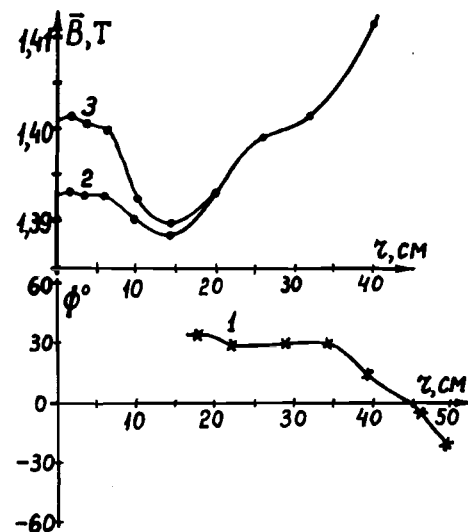


Рис. 3

Второй режим соответствовал реверсу тока в основной и во всех корректирующих обмотках /обратное поле/. В этом режиме пучки протонов и H^- -ионов меняются местами, и максимальный уровень магнитного поля, соответствующий ускорению протонного пучка из левой щели источника, несколько увеличивается. Была достигнута частота ускоряющего напряжения $f_0 = 21,2$ МГц, что соответствует энергии протонов 24 МэВ при $r_k = 50$ см. Пучок протонов в обоих режимах регистрировался на токовом пробнике, и интенсивность его составляла $1 \pm 1,5$ мкА при скважности 10. На рис. 3 показана измеренная с помощью пикап-электродов зависимость фазы центра сгустка протонов от радиуса при прямом поле /кривая 1/. Среднее магнитное поле для этой фазы, соответствующее табличным значениям токов коррекции /с малым бампом/, изображается кривой 2. Видно, что начальные фазы протонного сгустка составляют 35° . Такая величина начальной фазы создается поворотом щелей ионного источника, так как малый бамп среднего поля в центре практически не вносит сдвига фаз.

Пучок H^- -ионов также регистрировался на токовом пробнике. Для надежной идентификации тока H^- -ионов на пробник подавался опорный положительный потенциал, и уменьшение этого потенциала при настройке на ускорение H^- -ионов позволяло с достаточной точностью измерять резонансные кривые H^- -пучка /зависимость тока пучка от величины основного магнитного поля/. Интенсивность пучка H^- -ионов в центральной области достигала величины 40 ± 50 нА / $r = 25$ см/. На конечном радиусе / $r_k = 47 \pm 49$ см/ интенсивность H^- -ионов уменьшалась до 5 ± 7 нА при вакууме, измеренном в районе диффузионных насосов, равном $1,1 \pm 1,3 \cdot 10^{-5}$ ммНг. Из-за малой интенсивности H^- -пучка зависимость фазы сгустка вдоль радиуса измерить не удалось.

2. *Вывод пучка H^- -ионов и регистрация выведенного пучка.* Пучок H^- -ионов в конце ускорения пересекал перезарядную мишень, имеющую форму вертикальной полоски из углеродной фольги толщиной $0,25$ мкм /50 мкг/см²/ и шириной вдоль радиуса

0,3 см. Мишень натягивалась на оправке, закрепленной на пробнике пр.2 /рис.2/, и могла устанавливаться дистанционно на выбранный радиус. После прохождения этой мишени практически 100% H^- -ионов теряли оба электрона^{12/}, и пучок протонов выходил на фланец из плексигласа на стенке камеры, где был установлен прозрачный флуоресцирующий экран. Светящееся пятно, отождествляющее форму выведенного пучка, регистрировалось телекамерой и передавалось на приемный телеэкран, расположенный на пульте циклотрона.

Одновременно видеосигнал обрабатывался с помощью управляющей ЭВМ, и томографическое изображение пучка затем распечатывалось в заданном масштабе. Протонный пучок пересекал в течение нескольких оборотов эту мишень без заметных потерь интенсивности.

3. Влияние на фазовое движение центральной концентрической обмотки /обмотка К2/. С помощью численных расчетов и экспериментов на пучке протонов было найдено, что изменением тока в обмотке К2 можно в достаточно широких пределах регулировать начальную фазу ускоряемых сгустков. Эта обмотка создает в центральной области бамп среднего магнитного поля величиной 34 Гс при $\Delta I_2 = 100$ А и протяженностью до $r = 18 \pm 20$ см. Фазовый сдвиг сгустка до этих радиусов изменялся на $\pm 10 \pm 12^\circ$ при изменении тока в обмотке (ΔI_2) на ∓ 100 А. Это влияние обмотки использовалось в эксперименте для установки оптимальных значений фаз обоих пучков в области $r = 15 \pm 20$ см, где разница в массах покоя протонов и H^- -ионов еще не влияет на фазовое движение.

4. Одновременное ускорение протонов и H^- -ионов. Для осуществления этого режима вначале зажигались обе дуги источника и измерялись на токовых пробниках резонансные зависимости интенсивности пучков протонов и H^- -ионов при изменении тока в основной обмотке магнита циклотрона. Эти измерения были проведены как для прямого направления основного магнитного поля, так и для обратного. При режиме с обратным полем пучок H^- -ионов после перезарядки в протоны отклоняется на передний фланец камеры и падает почти перпендикулярно на регистрирующий экран. При этом существенно улучшается качество воспроизведения формы светящегося пятна выведенного пучка.

На рис.4 приведены резонансные кривые пучка протонов /точки/ и H^- -ионов /квадратики/ при обратном поле, полученные с помощью автоматической системы управления ускорителем, разработанной в ИЯФ ЧСАН^{4/}. По оси абсцисс отложена величина среднего магнитного поля, найденная по величине тока магнита из таблиц магнитных измерений, по оси ординат - интенсивность пучков в произвольных единицах. При этом максимальные токи

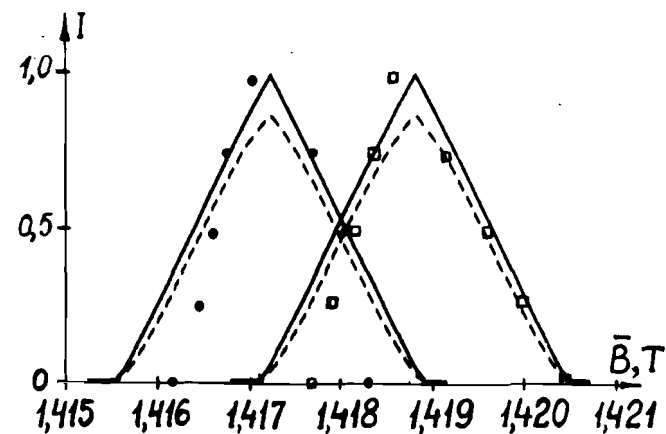


Рис.4

пучков, отличающиеся для протонов и H^- -ионов в этих измерениях примерно в 50 ± 60 раз, приведены к одинаковой величине. Радиус кромки измерительной мишени - 45 см.

Сплошной линией на рис.4 изображена расчетная резонансная кривая, основанная на зависимости тока из источника от действующего напряжения на дуанте в виде $I = (A U_g \cdot \cos \phi)^{3/2}$. Интенсивность определялась путем численного интегрирования по возможным начальным фазам в пределах ϕ_{H1}, ϕ_{H2} . При этом в зависимости от знака расстройки магнитного поля $B - B_{рез}$ одна из крайних начальных фаз задавалась, например, величиной $\phi_{H1} = 45^\circ$. Другая крайняя начальная фаза ϕ_{H2} находилась из расчета фазового движения для различных величин магнитного поля при условии, что значение соответствующей конечной фазы $\phi_{K2} \leq 45^\circ$. Пунктирной линией обозначена расчетная зависимость при предположении, что $I = A (U_g \cdot \cos \phi)^3$. Расчетная разность резонансных магнитных полей для протонов и H^- -ионов в данном случае составляет 15,4 Гс. Как видно из рис.4, экспериментальные точки с достаточной для целей эксперимента точностью совпадают с расчетными кривыми.

После этого введен пробник с перезарядной мишенью /пр.2/, кромка мишени установлена на $r_M = 47$ см, токовая мишень на другом пробнике /пр.3/ установлена на $r_3 = 49$ см, величина тока магнита выбрана между резонансными значениями токов для протонов и H^- -ионов $I_{ср} = 1,418$ Т/, и впервые проведено одновременное ускорение двух пучков противоположно заряженных ионов. Наблюдалась одновременно ток ускоренного протонного пучка на $r_3 = 49$ см и через телесистему светящееся пятно на флуоресцирующем экране, создаваемое отклоненным в магнитном поле протонным пучком после перезарядки на $r_M = 47$ см ускоренного пучка

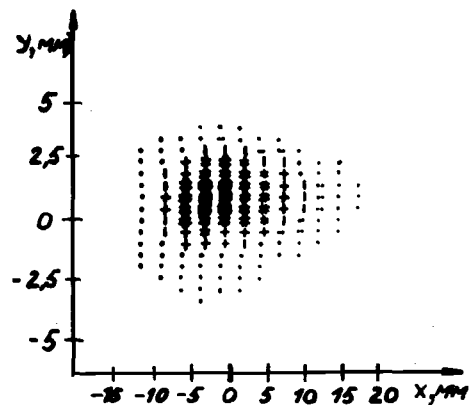


Рис. 5

H^- -ионов. Затем была выбрана оптимальная величина тока в обмотке K2 по относительно-му максимуму интенсивности обоих пучков. Оказалось, что для этого ток в обмотке K2 следует изменить примерно на 230 А в сторону увеличения бампа в центре магнитного поля. Такое изменение тока в этой корректирующей обмотке соответствует, как указано выше, сдвигу фаз обоих пучков в центральной области примерно на $-/20 \div \pm 25/^\circ$. Кривая 3 /рис.3/ изображает форму среднего магнитного

поля в центральной области, соответствующую оптимальному режиму одновременного ускорения двух пучков. По-видимому, начальные фазы H^- -пучка из-за невозможности создать для данного эксперимента S-образную форму кромки дуанта в центре /1/ не получаются равными -30° , и в конце ускорения происходят фазовые потери. С помощью бампа поля получают необходимые начальные отрицательные фазы для H^- -пучка, при этом, правда, уменьшаются положительные начальные фазы протонного пучка, и поэтому имеются оптимальные величины начальных фаз для обоих пучков.

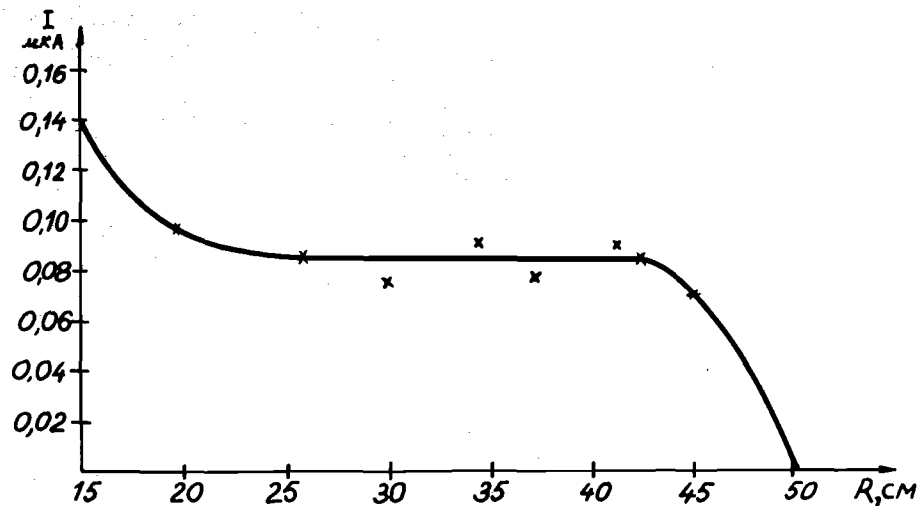


Рис. 6

На рис.5 приведено изображение светящегося пятна от второго пучка на люминесцентном экране при оптимальном режиме. На рис.6 представлена зависимость интенсивности протонного пучка вдоль радиуса в оптимальном режиме одновременного ускорения двух пучков.

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование на циклотроне У-120М доказало практически принципиальную возможность одновременного ускорения в изохронном циклотроне двух пучков противоположно заряженных ионов.

Авторы выражают благодарность В.П.Джелепову, Л.М.Онищенко, В.Г.Сазонову за поддержку при выполнении этой работы, а также Н.В.Васильеву и Н.С.Толстову за участие в разработке и наладке ионного источника, Р.Ирану и всему коллективу сотрудников, обслуживающих У-120М, за инициативное участие во всех работах, касающихся проводимого эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ, Р9-87-703, Дубна, 1987.
2. Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ, Р9-88-243, Дубна, 1988.
3. Бейшовец В. и др. - В сб.: Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1981, т.2, с.70.
4. Бейшовец В., Трейбал З., Чигак М. - В сб.: Международное совещание по циклотронам. ОИЯИ, Р9-85-707, Дубна, 1985, с.230.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 апреля 1988 года.