

## Новый циклотрон тяжелых ионов

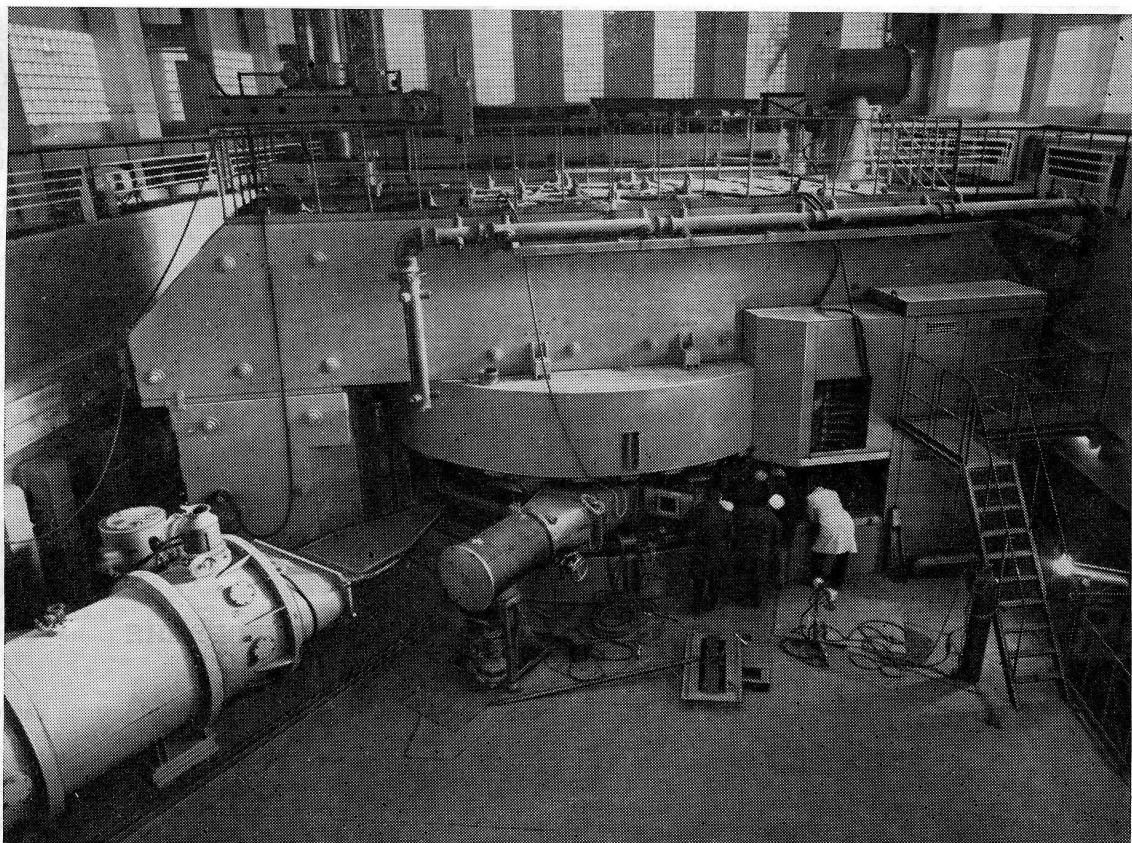
В Дубне в последние дни декабря 1978 г. пущен новый ускоритель тяжелых ионов — 4-метровый изохронный циклотрон У-400. Эта уникальная установка для ядерно-физических исследований спроектирована и сооружена за три года коллективом ученых, инженеров и рабочих под руководством акад. Г. Н. Флёрова и доктора физ.-мат. наук Ю. Ц. Оганесяна.

Новый ускоритель предназначен для получения интенсивных пучков быстрых ионов практически всех элементов таблицы Д. И. Менделеева. Основной диапазон по массовому числу ускоряемых частиц  $20 \leq A \leq 140$ . Ионы этого диапазона массы могут быть ускорены до энергии 10 МэВ/пучк. и ниже. Необходимую для прикладных исследований энергию 1—2 МэВ/пучк. можно получить для всех ионов с массовым числом  $12 \leq A \leq 240$ . Легкие частицы с  $A \leq 20$  можно ускорять до энергии 30—40 МэВ/пучк.

При проектировании ускорителя основное внимание было уделено достижению высокой интенсивности пучков частиц основного диапазона массы. При этом конструкция была оптимизирована с точки зрения простоты сооружения ускорителя, высокой надежности работы и малой стоимости эксплуатации. В результате анализа

различных вариантов выбор типа машины был сделан в пользу циклотрона: это направление техники ускорения тяжелых ионов является традиционным для Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. В основу проекта ускорителя У-400, разработанного в ЛЯР ОИЯИ, положены итоги 20-летних экспериментальных исследований специалистов Лаборатории в области физики и техники ускорителей. Существенными этапами этих исследований явились разработки ионных источников дугового типа, сооружение и эксплуатация классического циклотрона У-300 (действует с 1960 г.), создание 2-метрового изохронного циклотрона У-200, который был введен в строй в 1968 г. и явился прототипом ускорителя У-400 (масштаб 1 : 2), сооружение тандем-циклотрона У-300 — У-200 и получение на нем ускоренных ионов Хе, Кг, Ge.

Решение о сооружении У-400 было принято в 1974 г. Первые детали будущего циклотрона начали обрабатывать 7 июля 1975 г. Монтаж ускорителя был закончен в августе 1978 г., а в ноябре начались работы с пучком. Месяц спустя пучок был доведен до конечного радиуса и выведен из камеры ускорителя тяжелых ионов.



Общий вид изохронного циклотрона У-400 (фото Ю. Туманова)

Электромагнит циклотрона массой 2000 т собран из отдельных пакетов листов обычной стали. Изготовление и сборка пакетов остова магнита проводились непосредственно в циклотронном зале. Параллельно с этим осуществлялся монтаж электромагнита в целом. Уникальные станки для сборки и обработки пакетов остова были поставлены в Дубну из Чехословакии.

Конструкция электромагнита позволяет получить в воздушном зазоре напряженность магнитного поля 2,13 Т. Это является отличительной особенностью У-400 — на конечном радиусе ускорителя (180 см) энергия ускоренных ионов составляет  $\sim 700 (z^2/A)$  МэВ/нукл.

Азимутальная вариация поля создается четырьмя парами секторов с прямыми границами. Перепад от 2,7 Т (холм) до 1,6 Т (долина) обеспечивает жесткую фокусировку пучка до энергии 30—33 МэВ/нукл. Изохронная форма среднего магнитного поля обеспечивается ступенчатыми кольцевыми шиммами и корректирующими обмотками.

Высокочастотная система циклотрона состоит из двух коаксиальных резонаторов, нагруженных двумя дуантами с угловой протяженностью  $42^\circ$ , которые располагаются в двух противоположных долинах. В диапазоне частот 6—12 МГц потенциал на дуантах составляет около 100 кВ. Подобная система обладает добротностью  $Q=5000$  и позволяет эффективно ускорять ионы на 2-, 3- и 4-й гармониках высокочастотного потенциала (прирост энергии ионов за оборот равен соответственно 2,83; 3,7 и  $4z_e V_0$ ). Средняя мощность высокочастотного генератора равна  $\sim 30$  кВт. Вакуумный объем ускорителя составляет 25 м<sup>3</sup> и откачивается семью паромасляными насосами производительностью 4200 л/с каждый. Рабочий вакуум с пучком ускоренных ионов равен  $2 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. Предполагается, что в будущем давление будет доведено до  $5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. за счет введения охлаждаемых поверхностей.

Для вывода пучка из циклотрона У-400 используется метод перезарядки, предложенный Г. Н. Флоровым, Ю. Ц. Оганесяном и Г. Н. Вяловым в 1964 г. Сущность метода состоит в том, что у ионов, проходящих через тонкую углеродную пленку, увеличивается заряд, в результате чего возникает сильная радиальная неустойчивость движения. Описывая резко раскручивающуюся спираль в аксиально-неоднородном магнитном поле (поворот на 360 или  $\sim 700^\circ$ ), частицы выходят из камеры ускорителя. Плавное регулирование энергии ионов достигается за счет перемещения углеродной

пленки по радиусу, а ее перемещение по азимуту позволяет направлять пучки ионов разной энергии на мишень, находящуюся в фиксированном положении. Этот метод был исследован в 1965 г. на циклотроне SEVIL (Орсе, Франция) и применен впервые на 200-см изохронном циклотроне ОИЯИ для вывода ионов  ${}^4\text{He}^{+3}$  и плавной вариации их энергии от 27 до 41 МэВ\*. В циклотроне У-400 применен 2-оборотный вывод, который позволяет получать одновременно три пучка, заряд которых отличается на одну или две единицы (например  ${}^{40}\text{Ar}^{+16}$ ,  ${}^{40}\text{Ar}^{+17}$  и  ${}^{40}\text{Ar}^{+18}$ ).

В ускорителе У-400 применяются мощные ионные источники дугового типа с радиальным вводом (мощность дуги в импульсе длительностью 1 мс при скважности 4 составляет  $\sim 30$ —50 кВт).

В декабре 1978 г. на циклотроне У-400 получен пучок ионов  ${}^{40}\text{Ar}^{+4}$  с интенсивностью в импульсе  $8 \cdot 10^{13}$  частиц и энергией 5 МэВ/нукл. В ближайшее время начнутся первые эксперименты. Параллельно с этим будет повышаться интенсивность и энергия пучков ионов, расширится ассортимент ускоряемых частиц, будут развиваться системы транспортировки выведенных пучков и оборудоваться помещения для экспериментов.

Введение в строй нового ускорителя открывает широкие перспективы для проведения фундаментальных исследований в области физики тяжелых ионов, в частности, для экспериментов по синтезу и изучению физических и химических свойств далеких трансфермиевых и сверхтяжелых элементов ( $Z \geq 108$ ) в ядерных реакциях, вызываемых частицами массой  $A \geq 40$ , включая редкие изотопы  ${}^{48}\text{Ca}$ ,  ${}^{54}\text{Cr}$ ,  ${}^{70}\text{Zn}$ , для изучения механизма взаимодействия двух сложных ядер, свойств ядер, удаленных от области  $\beta$ -стабильности, некоторых актуальных проблем атомной физики и квантовой электродинамики. Пучки тяжелых ионов У-400 существенно расширяют возможности для решения практических задач — изготовления ядерных фильтров, моделирования радиационных повреждений, имплантации ионов и др.

ЛАЗАРЕВ Ю. А.

\* Впоследствии этот метод был использован и для более тяжелых ионов до  ${}^{22}\text{Ne}$ .

## Семинары, совещания

### Советско-финляндский семинар по нормам и стандартам проектирования атомного оборудования

Семинар «Нормы и стандарты проектирования оборудования и систем реакторных установок типа ВВЭР» состоялся в декабре 1978 г. в Москве. На нем было заслушано пять финских и девять советских докладов.

Финские специалисты рассказали о существующей в стране практике контроля за безопасностью. Основой служит закон об атомной энергии, в соответствии с которым для строительства и эксплуатации АЭС требуется разрешение Министерства торговли и про-

мышленности. При выдаче разрешений запрашивается мнение различных организаций, в том числе Института радиационной безопасности, который является инспекционным органом. Институт издал «Общие принципы, соблюдаемые при проектировании АЭС», а также другие руководства, конкретизирующие их применение (классификация оборудования АЭС, сосуды под давлением, строительная техника, ядерное топливо, радиационная защита и др.).