

рителей для неразрушающего метода контроля, в радиационной химии, для радиоактивационного анализа, в ядерной физике, в медицине. На отдельной секции обсуждалось использование синхротронного излучения в физическом эксперименте.

В решении конференции нашли свое отражение предложения и рекомендации секций по более широкому развитию работ по электронным ускорителям. Конференция была своевременной и полезной.

ДИДЕНКО А. Н., КОНОНОВ В. К.

## VII Международная конференция по циклотронам и их применению

Конференция проходила с 19 по 22 августа 1975 г. в Цюрихе (Швейцария). В работе конференции приняли участие около 250 специалистов из 22 стран, заслушано 55 докладов и 70 докладов экспонировано для ознакомления участников конференции. Подводя основные итоги конференции, прежде всего следует отметить, что техника циклотронов за последние годы развивается: число работающих циклотронов быстро увеличивается, пущены мезонные фабрики на основе изохронных циклотронов и синхроциклотронов, начато использование сверхпроводимости в циклотронной технике, появляются новые и расширяются старые области применения циклотронов.

**Мезонные фабрики.** Уже осуществлен пуск двух мезонных фабрик на основе больших изохронных циклотронов (СИН в Швейцарии и «Триумф» в Канаде) и двух — на основе синхроциклотронов (в ЦЕРНе и Колумбийском университете, США). На ускорителе СИН во внешнем пучке получено около 30 мкА протонов с энергией 590 МэВ с трансмиссией через кольцевой циклотрон до 95%; ускорены поляризованные протоны, начато широкое использование пучков для физического эксперимента и прикладных исследований. На циклотроне «Триумф» из-за существенных потерь пучка в процессе ускорения (~30%) внешний пучок с энергией около 500 МэВ получен равным не более 0,3 мкА, хотя в импульсе он достигает 48 мкА. В начале 1976 г. средний ток будет повышен до 10 мкА, в 1977 г. — до 100 мкА. На синхроциклотроне в ЦЕРНе во внешнем пучке уже получено несколько микроампер, причем эффективность новой системы вывода достигает 70%. Внутренний пучок синхроциклотрона Колумбийского университета также достигает нескольких микроампер, и сейчас проводятся работы по выводу пучка.

Огромное впечатление производит предложение Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ по сооружению «сверхмезонной» фабрики на основе изохронного циклотрона с интенсивностью внешнего пучка в сотни миллиампер и энергией 800 МэВ, что станет возможным во внешнем пучке при условии 100%-ной эффективности вывода, а именно такая эффективность и может быть обеспечена путем использования принципиально нового метода выпуска пучка из изохронного циклотрона, предложенного и разработанного сотрудниками ОИЯИ и названного ими методом расширения замкнутых орбит в периодических магнитных полях.

**Ускорение тяжелых ионов.** По-прежнему растет интерес к ускорению тяжелых ионов. Действующие и запускаемые циклотроны реконструируются для ускорения тяжелых ионов, разрабатываются проекты новых циклотронов и комплексов, широким фронтом ведутся работы по усовершенствованию имеющихся и созданию новых источников многозарядных ионов. Примечательно, что все предложения по сверхпрово-

дящим циклотронам нацелены на ускорение тяжелых ионов (Мичиганский университет, Чок-Ривер, Ок-Ридж, Беркли). В докладах конференции сообщалось как о циклотронах, уже ускоряющих тяжелые ионы (основные из них — циклотроны в Дубне, Беркли, Ок-Ридже), так и об имеющихся предложениях — проектах. К настоящему времени тяжелые ионы ускоряются как минимум на 17 циклотронах мира, причем рекордсменами по набору ионов и их интенсивности являются Лаборатория ядерных реакций ОИЯИ, Беркли и Ок-Ридж. Хотя во многих лабораториях разрабатываются и исследуются новые типы источников многозарядных ионов (лазерный, электронно-лучевой), но преобладает мнение, что для циклотронов еще долгое время наиболее эффективным останется источник многозарядных ионов типа Пеннинга, наилучшей разновидностью которого является источник с подогревным катодом, работающий на циклотронах в ЛЯР ОИЯИ.

Отдельно следует остановиться на ускорении «полутяжелых» ионов — лития и бериллия, представляющих большой интерес для ядерно-физических исследований. Впервые в мире ионы лития и бериллия были ускорены на циклотроне ИАЭ им. И. В. Курчатова и до настоящего времени по интенсивности источник ИАЭ не превзойден. Эти же ионы с подобной интенсивностью теперь получают на циклотроне в Беркли, но из источника совсем другого типа. Трехзарядные ионы лития были также ускорены на циклотроне в Карлсруэ (правда, с интенсивностью 0,005 мкА, что на два порядка ниже интенсивности трехзарядных ионов лития во внешнем пучке в ИАЭ). Планируется получить их в только что запускаемом циклотроне в Индиане (США) во внутреннем пучке 0,1 мкА.

На конференции был представлен ряд предложений по ускорению тяжелых ионов в работающих, строящихся или в проектируемых циклотронах и синхроциклотронах. В 1976 г. должен войти в строй тяжелоионный комплекс ВИКСИ в Западном Берлине, состоящий из имеющегося там электростатического ускорителя-инжектора на 6 МВ и кольцевого четырехсекторного циклотрона. На этом комплексе можно будет ускорять ионы вплоть до аргона с энергией до 200 МэВ. В этом же году тяжелые ионы будут получены, помимо, во внешнем пучке циклотронного комплекса в Индиане (США). Комплекс состоит из электростатического ускорителя на 600 кВ и двух кольцевых циклотронов. Запуск комплекса планировался в 1972 г., но по ряду причин задержан. В стадии реализации находится один из ок-риджских проектов: по контракту с ORNL Национальная электростатическая корпорация создает электростатический перезарядный вертикальный П-образный ускоритель с потенциалом кондуктора до 25 МВ. Полная стоимость его 8,1 млн. долл. Первый пучок будет получен в 1979 г. После перезаряд-

ной инжекции пучка тяжелых ионов в существующий циклотрон ОРИК и ускорения их в нем для экспериментов будут доступны ионы с энергией выше кулоновского барьера на уране вплоть до массы 160. Есть предложение заменить ОРИК циклотроном с четырьмя раздельными магнитами и  $BR = 25 \text{ кГс}\cdot\text{м}$ , что позволит получить ионы урана с энергией до 10 МэВ/нуклон и углерода с энергией до 75 МэВ/нуклон. Возможный срок запуска — 1981 г.

Интенсивно разрабатывается французский проект ГАНИЛ, завершение которого планируется в 1980 г. Он включает в себя малый циклотрон-инжектор и два больших кольцевых циклотрона с раздельными магнитами с перезарядной инжекцией. Предполагается ускорение ионов вплоть до урана с энергией 8 МэВ/нуклон. Сделаны предложения по ускорению тяжелых ионов на синхротриплатонах в ЦЕРНе (вплоть до неона с энергией 70 МэВ/нуклон) и в Упсале (Швеция).

**Применение сверхпроводимости для циклотронов.** Первые практически обоснованные предложения по созданию циклотрона со сверхпроводящей основной обмоткой появились лишь в 1973 г. почти одновременно в трех лабораториях: в Чок-Ривере, Беркли и Мичиганском университете. Во всех предложениях использован богатый мировой опыт по созданию больших сверхпроводящих пузырьковых камер: полностью стабилизированный ниобиево-титановый сверхпроводник в медной матрице, подобная пузырьковым камерам конструкция криостата и рефрижераторов и т. д. Наиболее важное качество этих проектов — размещение ВЧ-системы, корректирующих обмоток стальных секторов при обычной температуре. Азимутальная вариация магнитного поля создается насыщенными стальными секторами, а не сверхпроводящими обмотками. В Мичиганском университете уже получены assignments на создание сверхпроводящего магнита с криогенной системой для такого циклотрона, имеющего трехсекторную структуру с  $BR = 46 \text{ кГс}\cdot\text{м}$  и выпускной радиус 0,65 м ( $K = 440$ ). Проблема выпуска решается прежде всего созданием магнитного поля, резко обрывающегося с увеличением радиуса, а также использованием пары электростатических дефлекторов с очень высоким градиентом и, главное, магнитного экрана в виде сверхпроводящей трубы, изготовленной из 50-микронного сверхпроводника  $Nb_3Sn$ . Такая труба уже изготовлена в Станфорде, и начаты ее исследования. Стоимость магнита 0,7 млн. долл.

Реализация проекта сверхпроводящего циклотрона Лаборатории в Чок-Ривере оценивается в 2,2 млн. долл., ввод намечен на 1980 г. Среднее магнитное поле составит 50 кГс, а выпускной радиус также 0,65 м. Инжекция в циклотрон будет осуществляться из имеющегося электростатического перезарядного ускорителя на 13 МВ. Проблемы выпуска до конца не решены. Предполагается получать ионы урана с энергией до 10 МэВ/нуклон, а ионы углерода с энергией до 50 МэВ/нуклон. В предложении лаборатории в Беркли

рассматриваются два варианта сверхпроводящих циклотронов, отличающихся только геометрическими размерами ( $K = 400$  и  $K = 800$ ). Один из вариантов будет выбран как постускоритель для имеющихся там Суперхайлака или 88-дюймового циклотрона, что позволит продвинуться в область очень тяжелых ионов с энергией в несколько десятков МэВ/нуклон. Принципиальное отличие от рассмотренных выше проектов — формирование нужного радиального профиля магнитного поля с помощью секционированной по вертикали основной сверхпроводящей обмотки (раздельное питание этих секций). Стоимость сверхпроводящих циклотронов 4,9 млн. долл. для  $K = 400$ ; 7,8 млн. долл. для  $K = 800$ . Если же эти циклотроны делать не сверхпроводящими, то стоимости возрастают соответственно до 10,3 и 18 млн. долл., т.е. более чем в два раза.

Заслуживает огромного внимания предложение Ок-Риджской лаборатории о замене обмотки циклотрона ОРИК сверхпроводящей с одновременным усилением стального ярма (дополнительная масса стали 1500 т). Это позволит в четыре раза увеличить ампер-витки обмотки и почти в два раза — среднее магнитное поле (с 18,6 до 33,9 кГс), т.е. увеличить  $K$  с 90 до 300.

**Применение циклотронов в прикладных исследованиях,** особенно в медицине, растет с большей скоростью, чем в области ядерной физики. Компактные изохронные циклотроны установлены даже во многих клиниках. Широко обсуждаются предложения, связанные с оптимальным с точки зрения медицины циклотроном, на котором можно проводить протонную терапию рака (энергия протонов 150-200 МэВ) и готовить большие количества радиоизотопов, необходимых для диагностики заболеваний. Продолжают развиваться такие применения циклотронов, как имитация радиационных повреждений реакторных материалов и радиоактивационный анализ сверхчистых материалов, главным образом полупроводниковых и реакторных. Появились новые области применения: циклотрон в Виннипеге (Канада) широко используется для определения количества протеина в различных злаках, циклотроны в Мельбурне (Австралия) и Девисе (США) — для анализа загрязнений окружающей среды.

Некоторые циклотроны в ФРГ и Англии применяются для определения износа деталей машин (колес вагонов, шестерен, шарикоподшипников и т. д.) и коррозии конструкций с использованием поверхностной активации пучком ускоренных частиц.

На конференции обсуждались также вопросы автоматического контроля и управления циклотронами с помощью ЭВМ, высококачественные и магнитные системы, динамика пучка, его инжекция, выпуск и транспортировка.

Следующую конференцию по циклотронам и их применению намечено провести в США в августе — сентябре 1978 г.

ВЕНИКОВ Н. И.