

ЦИКЛОТРОНЫ

Л. М. Онищенко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	1843
ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ ЦИКЛОТРОНОВ	1844
ДИНАМИКА ПУЧКА В ЦИКЛОТРОНЕ И ФАЗОТРОНЕ	1855
СТАТУС НЕКОТОРЫХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЦИКЛОТРОНОВ	1865
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	1881
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	1894

ЦИКЛОТРОНЫ

Л. М. Онищенко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлен обзор развития и современного состояния циклотронов — ускорителей протонов и ионов. Основные области применения циклотронов — исследования по ядерной физике, генерация и исследование радиоактивных ионов, прикладные применения, главным образом в медицине.

A review of the development and modern status of the cyclotrons — accelerators of protons and ions — is presented. Main topics of the cyclotrons application are nuclear physics investigations, generation of the radioactive ions, applied application mainly in medicine.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

«Циклотрон — резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (протонов, ионов), в котором частота ускоряющего напряжения и ведущее магнитное поле постоянны во времени. Частицы в циклотроне движутся по развертывающейся спирали. Максимальная энергия ускоренных в (классическом) циклотроне протонов около 20 МэВ, а в специальном (изохронном) циклотроне до 1 ГэВ» (БСЭ. 1978. Т. 28. С. 562).

Со времени изобретения циклотрона прошло более 75 лет. За это время построено несколько сотен циклотронов. С 1959 г. циклотронное сообщество проводит регулярные международные конференции «International Conference on Cyclotrons and Their Applications» и издает труды этих конференций.

Конечно, в первые годы существования циклотронов, до того как начали проводиться специализированные конференции, работы, посвященные циклотронам, публиковались в периодических научных изданиях, таких как «Science», «Physical Review», «Nuclear Instruments and Methods», «Particle Accelerators», и докладывались на других конференциях.

Конференции, посвященные циклотронам, проводятся раз в три года, поочередно в Америке, Европе и Азии. Одна из них (в 1995 г.) прошла на африканском континенте. Перечень всех состоявшихся конференций дается в приложении 1. Труды конференций, главным образом двух последних — «Cyclotrons-2004» в Токио и «Cyclotrons-2007» на Сицилии, были использованы при написании этого обзора.

В обзоре автор ставил цель изложить историю создания и развития циклотронов, описать процесс ускорения частиц в циклотронах и их разнообразное применение. Обзор включает в себя 3 раздела и 2 приложения.

1. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ ЦИКЛОТРОНОВ

В предисловии к книге М. Намиаса «Циклотрон» [1] Ф. Жолио-Кюри пишет: «В 1919 г. Резерфорду удалось, бомбардируя атомы азота α -частицами, испущенными естественным радиоактивным элементом, превратить азот в кислород и осуществить таким образом первое превращение материи.

До 1932 г. α -частицы (от радиоактивных источников) были единственным источником заряженных частиц с энергией 1–2 МэВ, которые могут использоваться в ядерной физике. Первым искусственным источником стал ускоритель Кокрофта и Уолтона (ускоритель прямого действия), который ускорял ионы водорода в сильном электрическом (электростатическом) поле. Им удалось получить очень мощные пучки протонов, дейтронов и ядер гелия с энергией до 1 МэВ, благодаря чему были открыты многочисленные ядерные реакции. Применявшиеся пучки имели интенсивность порядка 10^{15} с^{-1} , в миллион раз большую, чем при использовании радиоактивных источников α -частиц. Однако энергии частиц, полученных на этом ускорителе, были значительно меньше энергий естественных α -частиц.

Только благодаря новому исключительно остроумному способу, предложенному американским ученым Э. О. Лоуренсом, а именно его циклотрону, разработанному и введенному в действие в 1930–1936 гг., были получены в значительном количестве частицы с энергией, превышающей 1–2 МэВ».

Циклотрон был изобретен Э. О. Лоуренсом в 1930 г. [2].

В апреле 1931 г. была осуществлена первая экспериментальная демонстрация: на 4-дюймовом циклотроне ионы молекулярного водорода были ускорены до энергии 80 кэВ [3]. Осенью 1931 г. в 11-дюймовом циклотроне впервые в истории науки протоны были ускорены до энергии 1–1,2 МэВ [4]. 1-МэВ протоны были использованы, чтобы подтвердить британские результаты*. Дезинтеграция наблюдалась на литии и нескольких других мишенях [5].

Следующим этапом стало сооружение циклотрона с диаметром полюсов 27 дюймов, в котором дейтроны были ускорены до энергии 5 МэВ [6].

В 1937 г. 27-дюймовый циклотрон был превращен в 37-дюймовый путем замены полюсов и вакуумной камеры. Энергия дейтронов достигла 8 МэВ, а ток — 100 мкА.

*В 1932 г. Кокрофт и Уолтон в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета с помощью своего ускорителя на напряжение 400 кВ ускорили протоны, которыми бомбардировали литиевую мишень и наблюдали дезинтеграцию (расщепление) лития.

В 1939 г. был построен большой 60-дюймовый циклотрон «Крокер» для медицинских применений, который ускорял дейтроны до 20 МэВ и ионы гелия до 40 МэВ. В это время циклотроны начали сооружаться и в других лабораториях, которые внесли существенный вклад в их развитие.

В Советском Союзе первый циклотрон (он же был первым в Европе) с диаметром полюсов 100 см был построен в 1937 г. в Радиевом институте (Ленинград) [7].

В первых циклотронах можно выделить 4 основные системы: магнитную (магнит с источником постоянного тока), ускоряющую (ускоряющие электроды — дуанты и генератор высокочастотного напряжения), ионный источник и вакуумную систему (вакуумную камеру со средствами вакуумной откачки).

По мере создания новых циклотронов эти системы постоянно улучшались [8].

Мы приведем здесь несколько примеров. Для более точного формирования спада магнитного поля по радиусу (для обеспечения вертикальной фокусировки) были придуманы кольцевые шиммы (ферромагнитные пластины), крепившиеся на полюсах магнита, которые позволяли более аккуратно формировать градиент магнитного поля вдоль радиуса. Применение таких шимм позволило существенно увеличить интенсивность пучка на 37-дюймовом циклотроне в Беркли [9]. На 60-дюймовом циклотроне Радиационной лаборатории Калифорнийского университета была установлена система автоматической стабилизации магнитного поля. На берклиевском и других циклотронах для подвода к дуантам высокочастотной мощности были использованы четвертьволновые резонансные линии, которые вместе с дуантами создают высокочастотные контуры и, таким образом, позволяют стабилизировать частоту ускоряющего напряжения и уменьшить потребляемую мощность [10]. При этом линии, передающие мощность от генератора к дуантному контуру, делаются нерезонансными и могут иметь любую длину, что позволяет удалить генератор от циклотрона на удобное расстояние.

Существенно улучшилась также конструкция ионного источника. В ранних циклотронах так называемый открытый источник представлял собой нагреваемую вольфрамовую нить, расположенную в центре циклотрона над (или под) дуантами. Подававшийся на нить отрицательный потенциал в несколько сотен вольт ускорял эмитируемые нитью электроны, которые, соударяясь с нейтральными молекулами газа в вакуумной камере, создавали вертикальную колонну положительных ионов в центре камеры. Из этой колонны ионы высасывались в дуанты. Необходимый газ напускался в камеру. В 1939 г. авторы [11] разработали и применили капиллярный ионный источник. Вслед за ними авторы [12] сообщили, что интенсивность дейтронного пучка в 60-дюймовом циклотроне Беркли за счет применения капиллярного источника увеличилась с 14 до 90 мкА.

Применение капиллярного источника позволило также использовать дуанты с гораздо меньшей вертикальной апертурой. А это, в свою очередь, дало возможность уменьшить зазор между полюсами магнита и, следовательно, мощность его питания.

Ниже приводится цитата из воспоминаний Э. Макмиллана [13] (перевод автора обзора), который в то время работал в Радиационной лаборатории и был свидетелем описываемых событий:

«Именно в это время (1935 г.) в Берклиевской лаборатории возник интерес к биологии, который продолжается до сих пор (1959 г.). Начало этому положил брат Эрнеста Лоуренса Джон Лоуренс. Именно в то время он провел первые эксперименты по использованию трейсеров на человеке, в которых измерялась скорость циркуляции крови весьма примитивным способом. Человек выпивал радиоактивный натрий, растворенный в воде, и после этого счетчик Гейгера, который он держал в руке, начинал считать. После нескольких минут возрастающая скорость счета достигала равновесного значения, и из этого наблюдения вы получали время циркуляции крови. Такими примитивными были и первые опыты по терапевтическому использованию циклотрона, приведшие немногим позже к тем, в которых нейтронное излучение было применено, например, для лечения рака.

В 1936 г. многие пытались искусственно создать наблюдавшиеся в природе радионуклиды. Это были действительно классические эксперименты, так как в то время не все ученые были уверены, что искусственные радиоактивные материалы имеют ту же природу, что и естественные. Джек Ливингуд (Jack Livingood) облучал 6-МэВ дейтронами из циклотрона висмут. Эта энергия оказалась достаточной, чтобы в реакции (d, p) получить довольно большой выход радия E, изотопа висмута, который затем распадался в полоний. Таким образом, тогда впервые удалось осуществить с помощью заряженных частиц эксперимент по дезинтеграции элемента, расположенного так далеко в Периодической таблице элементов.

В то же время мы впервые осуществили вывод пучка из камеры с помощью отклоняющего поля. Я хорошо помню этот момент, потому что сначала пучок вышел почти тангенциально и стенка камеры остановила его, так что я потратил полдня, выскабливая желоб в стенке камеры, чтобы пучок мог выйти наружу. Можно сказать, что это был предшественник современных систем экстракции, которые стали очень сложными.

До сих пор речь шла о 27-дюймовом циклотроне. Я должен извиниться за то, что сконцентрировался на работах Беркли. Тем не менее в 1936–1937 гг. начали поступать сведения о циклотронах из других частей мира. К концу 1936 г. в мире было около 20 циклотронов, так распространилось это искусство; были придуманы улучшенный ионный источник, улучшенные высокочастотные системы, схемы контроля магнитов и многое другое. Таким образом, развитие циклотронов стало делом интернациональным.

В 1938 г. Альварец впервые ввел измерение времени пролета нейтронов (для измерения их энергии), переключая пучок циклотрона.

Тогда же был открыт (Сегре) первый искусственный элемент, созданный на циклотроне. После демонтажа циклотрона, когда старая камера была выброшена, Сегре сказал, что хочет взять себе септум (современное название элемента системы вывода), который был сделан из молибдена и, естественно, подвергся бомбардировке дейтронами. Вместе с Перье он в Италии смог доказать, что в септуме содержится новый элемент технеций, образовавшийся в результате бомбардировки молибдена дейтронами.

В это время стартовала другая важная вещь — теоретики заинтересовались циклотронами. Бете и Розе впервые указали на релятивистский предел энергии в циклотроне, и немного времени спустя Л. Томас нашел ответ на это ограничение. Этот ответ оказался довольно трудным для понимания (и осуществления) экспериментаторами и поэтому оставался не использованным в течение многих лет. Кроме того, в то время (1937 г.) энергия циклотронов ограничивалась другими факторами (такими как размеры бюджета), а не релятивистским эффектом, который был открыт раньше, чем он стал практическим ограничением.

Теперь (1959 г.), конечно, все хотят строить циклотроны типа циклотрона Томаса или FFAG-машины (которые являются, в сущности, экстремальным вариантом циклотрона Томаса).

Вскоре (1938 г.) появляется 60-дюймовый циклотрон, который был первым действительно профессионально сконструированным циклотроном, который был построен в Беркли. Много полезных модификаций было внесено в конструкцию этой машины, и одно из самых важных решений пришло извне — это идея убрать стеклянные изоляторы. При этом резонансная система образуется дуантом и коаксиальной линией.

60-дюймовый циклотрон был установлен в новом здании в лаборатории «Крокер». При этом старый 37-дюймовый циклотрон продолжал работать до тех пор, пока он не был использован для первой модельной проверки идеи синхроциклотрона в 1946 г.

В ноябре 1939 г. Э. Лоуренс получил Нобелевскую премию, и это помогло ему получить 8 апреля 1940 г. 1,15 млн долларов от Рокфеллеровского фонда на строительство 100-МэВ циклотрона, о котором он мечтал (теперь он называется 184-дюймовый циклотрон). Речь шла о классическом циклотроне, и нетрудно оценить (следуя теории Розе и Бете), что для этого требовалось напряжение на каждом из дуантов 700 кВ (1400 кВ между дуантами). Но тут началась война, и усилия лаборатории были повернуты к другим вещам. Магнит, построенный для этого циклотрона, был использован для исследований процесса электромагнитного разделения изотопов, и прошло не так мало времени, пока мы вернулись к идее использования его для циклотрона. Но в это время появилась новая идея (автофазировка и модуляция частоты)».

На фотографии, заимствованной из цитировавшихся выше воспоминаний Э. Макмиллана, изобретатель циклотрона Э. Лоуренс запечатлен со своим аспирантом М. Ливингстоном, вместе с которым они ускорили в 1931 г. на 11-дюймовом циклотроне протоны до энергии 1 МэВ (см. рис. 1).

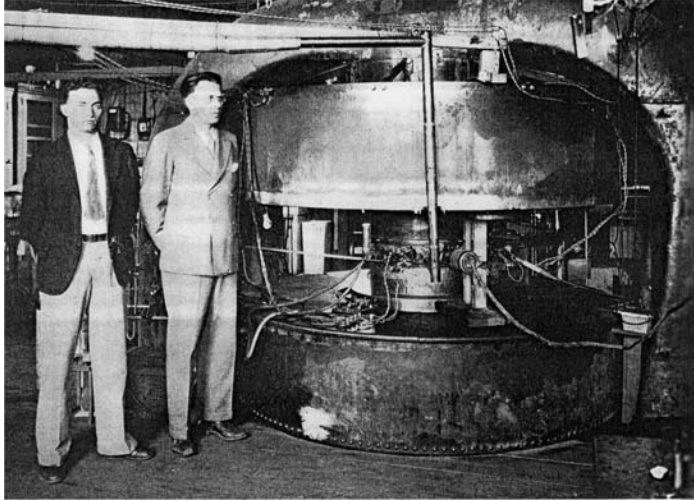


Рис. 1. М. Ливингстон (слева) и Э. Лоуренс у 27-дюймового циклотрона

Ускоряемая в циклотроне заряженная частица (заряд e , масса m) движется в стационарном (постоянном во времени) магнитном поле, обладающем симметрией относительно средней ($z = 0$) плоскости магнита. Движение частицы описывается уравнением

$$\frac{d}{dt}(m\dot{\mathbf{r}}) = e(\mathbf{r} \times \mathbf{B}) + e\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1.1)$$

где $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ — индукция ведущего магнитного поля; $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r})$ — напряженность ускоряющего высокочастотного электрического поля, изменяющегося во времени по гармоническому закону

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_0 \cos \omega t. \quad (1.2)$$

В изобретенном Э. Лоуренсом классическом циклотроне магнитное поле практически постоянно в пространстве (спадает по радиусу на величину, не превышающую 1%). Поэтому траектория частиц, движущихся со скоростью v , представляет собой окружность радиусом r , а круговая частота обращения

$$\omega = \frac{eB}{m} \quad (1.3)$$

постоянна, если не учитывать релятивистского возрастания массы частицы m :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = m_0 \gamma,$$

$\beta = v/c$ — относительная скорость частицы.

В первых циклотронах энергия ускоренных частиц — протонов, дейтронов и альфа-частиц — не превышала 10 МэВ, что было вполне достаточно для изучения ядерных реакций и искусственно создаваемых в этих реакциях радиоактивных элементов. Из числа 360 искусственно созданных до 1937 г. радиоактивных элементов более половины были открыты на циклотронах [14].

Тем не менее проблема ограничения достижимой в циклотроне энергии [15] из-за нарушения синхронизма (вследствие уменьшения частоты обращения в постоянном по радиусу магнитном поле) привлекала внимание ученых и изобретателей, мысль которых двигалась в двух направлениях.

Первое — устранить нарушение изохронизма, *сделав магнитное поле растущим вдоль радиуса, в соответствии с релятивистским ростом массы*. Этому препятствовало то обстоятельство, что в растущем по радиусу магнитном поле исчезает фокусировка частиц в вертикальном (перпендикулярном плоскости симметрии магнитного поля) направлении, которая существует в спадающем по радиусу магнитном поле. Чтобы устранить это препятствие, уже в 1938 г. Л. Томас предложил создать в циклотроне знакопеременную фокусировку за счет изменения магнитного поля вдоль азимута. В своей работе [16] он показал аналитически, что азимутальная вариация магнитного поля с периодом $\pi/2$ (говоря современным языком, в четырехсекторном циклотроне) и амплитудой вариации, большей чем βH (β — относительная скорость частиц, H — среднее поле), обеспечивает фокусировку в магнитном поле, растущем вдоль радиуса по закону $H = H_0 \left(1 + \frac{1}{2}\beta^2\right)$, по крайней мере до энергий, при которых учет β^3 становится важным. Однако это предложение не было использовано в течение как минимум 20 лет, так как использование этой идеи требовало сформировать с высокой точностью магнитное поле довольно сложной конфигурации, что в те времена было непростым делом. Кроме того, для собственно ядерной физики достижимые на классическом циклотроне энергии (~ 10 – 15 МэВ) были достаточны, а для физики частиц требовались энергии в сотни МэВ, которые вряд ли могли быть достигнуты с использованием предложения Томаса.

Второе направление — устранить нарушение изохронизма *за счет введения зависимости частоты ускоряющего напряжения от времени* — стало возможным после открытия в 1944 г. В.И. Векслером [17] и независимо в 1945 г. Э. Макмилланом [18] принципа автофазировки.

В 1946 г. Ричардсон и др. опробовали [19] эту идею на 37-дюймовом циклотроне в Беркли. После этого было принято решение превратить соору-

жавшийся в то время 184-дюймовый циклотрон в циклотрон с модуляцией (во времени) частоты ускоряющего напряжения (впоследствии такие ускорители стали называться синхроциклотронами или фазотронами). Эта идея была осуществлена, и в 1947 г. на 184-дюймовом синхроциклотроне были получены ускоренные дейтроны с энергией около 200 МэВ и α -частицы с энергией 400 МэВ [20]. Измеренная интенсивность пучка дейтронов на радиусе 40 дюймов (энергия 52 МэВ) составила 0,6 мкА. Уменьшение интенсивности пучка по крайней мере в 100 раз — это та цена, которую пришлось заплатить за увеличение энергии до сотен МэВ. Это и понятно, так как циклотрон с модуляцией частоты (синхроциклотрон) — это импульсный ускоритель, в котором отношение времени захвата пучка из ионного источника к периоду модуляции частоты составляет несколько процентов.

В 1949 г. в Советском Союзе (в Дубне) был введен в эксплуатацию синхроциклотрон с диаметром полюсов 5 м, в котором ускорялись дейтроны (280 МэВ), α -частицы (250 МэВ) и протоны (480 МэВ). В 1952 г. полюса синхроциклотрона были увеличены до 6 м и в нем были ускорены протоны до энергии 680 МэВ [21] и получен выведенный пучок [22]. Это были первые в мире ускорители высоких (близких к 1 ГэВ) энергий, на которых возникла физика высоких энергий — физика частиц.

Были построены и другие синхроциклотроны: в США (Кембридж, 1949), в Канаде (Монреаль, 1949), в Швеции (Упсала, 1951), в Германии (Геттинген, 1962), во Франции (Лион, 1963, Орсэ, 1963), в Швейцарии (Женева, ЦЕРН, 1957). В 1967 г. в СССР (Гатчина) введен в действие протонный синхроциклотрон на энергию 1 ГэВ.

Через 10–12 лет были построены первые синхротроны — в США (3 и 6 ГэВ), в Дубне (синхрофазотрон — 10 ГэВ), первый жесткофокусирующий синхротрон в Женеве, ЦЕРН (PS — 30 ГэВ).

Что касается дубненского синхроциклотрона, то он работал до 1979 г., когда был остановлен и реконструирован в фазотрон (синхроциклотрон со спиральной вариацией магнитного поля), который работает до настоящего времени и используется как для физических исследований, так и для терапии онкологических заболеваний [23].

Как упоминалось выше, в 1938 г. Томас предложил для преодоления нарушения изохронизма в циклотроне из-за релятивистского возрастания массы использовать азимутальную вариацию магнитного поля [16]. *Среднее поле в таком циклотроне растет по радиусу пропорционально увеличению полной энергии* (энергия покоя частицы E_0 плюс кинетическая энергия W), при этом частота обращения иона остается постоянной. Возникающая из-за роста магнитного поля дефокусировка компенсируется за счет изменения (вариации) магнитного поля на орбите по азимуту, например, по синусоидальному закону

$$B_z = B_z(r)[1 + \varepsilon \sin N\vartheta], \quad (1.4)$$

где $B(r)$ — среднее поле, растущее с радиусом; ε — относительная амплитуда вариации; N — число периодов (число секторов). Обычно N равно 3 или 4, а $\varepsilon < 0,25$.

Частота вертикальных колебаний в таком циклотроне

$$\nu_z^2 = -n + \frac{F^2}{2}, \quad (1.5)$$

где $F^2 = (\overline{B^2} - \bar{B}^2)/\bar{B}^2$; $n = (R/B)(dB/dR)$ — показатель роста среднего магнитного поля с радиусом; ν_z — отношение частоты вертикальных колебаний к частоте обращения.

Для синусоидальной вариации

$$\nu_z^2 = -n + \frac{\varepsilon^2}{2} + \dots \quad (1.6)$$

В изохронном циклотроне среднее магнитное поле должно расти с радиусом (без учета отличия формы орбиты от круговой, что выполняется при $\varepsilon \ll 1$) как

$$B(r) = B_0 \gamma = \frac{B_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{B_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{r\omega}{c}\right)^2}}, \quad (1.7)$$

где B_0 — поле в центре магнита ($r = 0$); $\beta = v/c$ и $\gamma = E/E_0$ — релятивистские факторы; v — скорость частицы; c — скорость света; ω — круговая частота обращения частицы

$$\omega = \frac{qc^2 B}{E}, \quad (1.8)$$

где q — заряд ускоряемой частицы (для протонов $q = 1$, если энергия выражена в электронвольтах).

Первый циклотрон такого типа (AVF — azimuthally varying field) заработал в Делфте (Нидерланды) в 1958 г. [24].

Впоследствии выяснилось, что в циклотроне Томаса (секторном циклотроне с азимутальной вариацией) энергия не может быть существенно увеличена. Действительно, из (1.7) следует, что показатель роста магнитного поля в изохронном циклотроне $n = \gamma^2 - 1$ и уже при $\gamma = 1,02$ (кинетическая энергия для протона около 20 МэВ) $n > 0,04$. Поэтому нужно, чтобы $\varepsilon^2 > 0,04$ (у Томаса ε ограничено величиной 0,2).

Для тяжелых ионов это ограничение не является (не являлось в XX в.) таким жестким. Поэтому секторные циклотроны широко используются для ускорения тяжелых ионов (см. ниже) и для прикладных целей (циклотроны для производства медицинских изотопов). Они имеют важное техническое преимущество, так как позволяют разместить дуанты ускоряющей системы в долинах, не увеличивая вертикальный зазор в холмах. Правда, при этом

частота ускоряющего напряжения должна быть гармоникой (высшей) частоты обращения.

В 1952 г. Курант, Ливингстон и Снайдер опубликовали работу [25], в которой показали, что чередование больших по величине положительных и отрицательных показателей изменения магнитного поля $n = (r/H)(\partial H/\partial r)$ обеспечивает значительно более сильную фокусировку в синхротроне. Последовательность чередующихся фокусирующих и дефокусирующих магнитных линз одинаковой силы является фокусирующей и приводит к значительному уменьшению амплитуд поперечных колебаний как в радиальном, так и в аксиальном направлениях.

В 1955 г. Керст, Тервиллигер, Саймон и Джонс [26] предложили использовать в ускорителях (синхротронах и синхроциклотронах) магнитное поле со *спиральной* вариацией:

$$H = H_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k \left[1 + f \sin \left\{ \frac{r - r_0}{\lambda} - N\vartheta \right\} \right], \quad (1.9)$$

где N — периодичность (число спиралей). В публикации указывается, что такой ускоритель может быть использован для ускорения до энергии в миллиарды электронвольт.

В расположенной рядом (на той же странице, Д4) заметке указывается, что использование спиральной вариации позволит превратить синхроциклотрон в циклотрон с фиксированной (не изменяющейся по времени) частотой.

В ноябре того же года (1955) В. П. Дмитриевский показал возможность ускорения в магнитном поле со спиральной вариацией при $N = 4$ и $f > 0,015$ дейтронов до энергии 545 МэВ, а при $N = 6$ — до 790 МэВ [27].

Для экспериментальной проверки этой возможности в 1955–1958 гг. в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований был разработан и сооружен циклотрон с пространственной вариацией магнитного поля [28]. Он был использован для проверки теории пространственной устойчивости, развитой в Дубне и Харуэлле. На нем были экспериментально исследованы проблемы фазового движения ионов и методы расчета и создания требуемых структур магнитного поля.

В циклотроне были ускорены дейтроны до энергии 13 МэВ при минимальном напряжении на дуанте 5 кВ, что соответствует 2500 оборотам ионов в процессе ускорения. Сформированное среднее магнитное поле изменялось по радиусу от 13600 в центре до 13700 Гс на радиусе вывода 54 см и отличалось от изохронного (расчетного) не более чем на 5 Гс.

Это был первый в мире циклотрон со спиральной вариацией магнитного поля. Он послужил прототипом разработанного в ЛЯП ОИЯИ, но так и не осуществленного проекта релятивистского циклотрона.

С тех пор в мире построено более ста циклотронов. В списке циклотронов, опубликованном в материалах 12-й Международной конференции по

циклотронам [29], приводятся технические данные 130 циклотронов (см. приложение 2). Одна половина из них — AVF-циклотроны (с прямыми секторами), другая — циклотроны со спиральной вариацией. Наиболее крупные из них — циклотрон PSI в Виллигене (Швейцария), который ускоряет протоны до энергии 590 МэВ, и TRUMF в Ванкувере (Канада), ускоряющий H^- -ионы до энергии 500 МэВ.

Прежде чем детально говорить о работающих в настоящее время циклотронах, нужно вспомнить о других важных усовершенствованиях в циклотронах, которые были предложены и осуществлены в 1960–1970 гг. XX в.

В 1961 г. В. П. Дмитриевский [30] рассмотрел возможность создания *кольцевого* релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой ($\nu_z > 1$) с внешней инжекцией и секционированным магнитом (мезонной фабрики).

На конференции по ускорителям высоких энергий в Дубне в 1963 г., кроме доклада от ОИЯИ, было представлено еще 2 доклада [31, 32], посвященных этому вопросу. Доклад о проекте швейцарской мезонной фабрики в том же году был сделан на конференции в Женеве [33]. Забегая вперед, отметим, что два таких циклотрона — PSI в Швейцарии и TRIUMF в Канаде — были построены и работают с 1975 г. до настоящего времени.

Использование в кольцевом циклотроне внешней инжекции (с энергией в несколько МэВ) должно было позволить увеличить интенсивность ускоряемого до релятивистских энергий пучка до сотен микроампер.

Для проверки этой идеи в 1968 г. в отделе новых ускорителей ЛЯП ОИЯИ была построена электронная модель кольцевого циклотрона с внешней инжекцией. Энергия инжектируемого сгустка электронов была равна 5 кэВ, конечная энергия ускоренного пучка 450 кэВ. На модели экспериментально исследовалось влияние пространственного заряда на частоту вертикальных колебаний в зависимости от тока пучка. Наблюдался не только сдвиг частоты (совпадавший с расчетным), но и появление полосы частот колебаний, что связано с неоднородным распределением заряда в сгустке [34]. Исследовался также вывод пучка с использованием «эффекта расширения замкнутых орбит» [35]. Эффективность вывода равнялась 95 %.

В то же время (в конце 1950-х гг.) возник интерес к ускорению в циклотроне тяжелых ионов. В Дубне под руководством Г. Н. Флерова была создана специальная Лаборатория ядерных реакций, в которой в 1960 г. был пущен У-300 [36] для ускорения тяжелых ионов до энергий ~ 8 МэВ/нукл. В этом циклотроне ускорялись ионы от углерода-12 до аргона-40.

Циклотроны для ускорения тяжелых ионов создавались в то время в США и европейских странах. В настоящее время более половины циклотронов, работающих в ядерно-физических лабораториях, ускоряют тяжелые ионы. Два крупных центра (во Франции и Японии) используют для этой цели каскад циклотронов. При этом ионы, ускоренные в циклотроне-инжекторе до сравнительно низкой энергии (~ 1 МэВ/нукл.), перед инжекцией во второй

циклотрон перезаряжаются на обдирочной фольге и приобретают более высокий заряд (а значит, и более высокую энергию при ускорении их во втором циклотроне).

Ускорение в циклотронах тяжелых ионов потребовало создания ионных источников для генерации разнообразных ионов. Вначале в тяжелоионных циклотронах (как и в протонных) использовались внутренние дуговые источники, которые генерировали ионы с низким зарядом.

В 1964 г. Р. Желер создал источник многозарядных ионов, основанный на электрон-циклотронном резонансе (ECR-источник) [37]. К настоящему времени существуют разные типы ECR-источников, в том числе сверхпроводящие, и в них генерируются ионы вплоть до урана с высокой зарядностью (например, 24-зарядные ионы криптона).

Другим достоинством ECR-источников является возможность генерации в одном источнике практически всех типов ионов (специй), ускоряемых в циклотроне. Однако габариты ECR-источника предполагают его использование как внешнего источника, и поэтому потребовалась разработка способов и устройств для внешней инжекции ионов в циклотрон (каналов внешней инжекции). В компактных циклотронах AVF единственным практически возможным способом инжекции оказалась аксиальная инжекция, когда ионы инжектируются в циклотрон сквозь вертикальный канал (цилиндрическое отверстие) в яре и полюсе магнита с последующим их поворотом в горизонтальную (медианную) плоскость в зазоре магнита. Для поворота инжектируемого по вертикали пучка в горизонтальную плоскость было предложено несколько типов поворотных устройств, обзор которых можно найти в [38]. Наиболее популярным из них является спиральный инфлектор, разработанный в Гренобле Жаном Бельмо [39]. Впервые аксиальная инжекция была успешно осуществлена в 1962 г. в Бирмингеме на изохронном циклотроне [40].

В циклотронах с разделенными секторами (*separated sectors cyclotron* — SSC) возможна инжекция высокоэнергичных пучков в горизонтальной плоскости сквозь долины (*valley*), где магнитное поле отсутствует, с последующим поворотом на орбиту с помощью электростатических или магнитных устройств.

В 1974 г. в Лаборатории в Чок-Ривере (Канада) возникло предложение о создании сверхпроводящего тяжелоионного циклотрона (отчет CRNL-1045). Дело в том, что энергия ускоряемых в циклотроне ионов пропорциональна квадрату отношения заряда иона к его массе. Поэтому энергия на нуклон для тяжелых ионов получается значительно меньшей, чем для протонов (в циклотроне тех же размеров).

Хотя этот отчет не был опубликован, однако, по свидетельству Генри Блоссера [41], он широко циркулировал в циклотронных лабораториях и привел к появлению большого числа сверхпроводящих циклотронов. Первый такой циклотрон K-500 появился в 1982 г. в NSCL/MSU (Nuclear Science

Cyclotron Laboratory, Michigan State University). В последующие годы появилось еще 7 сверхпроводящих циклотронов. Два из них (фирмы ACCEL) сконструированы не для ядерной физики, а для протонной терапии.

Поскольку в циклотроне отсутствует фазовая устойчивость, ускорение сильноточных пучков сопровождается расталкиванием (под действием пространственного заряда) ускоряемого банча в азимутальном направлении. При использовании ускоряющего напряжения синусоидальной формы увеличение азимутального размера сгустка приводит к увеличению энергетического разброса, что мешает эффективному выводу пучка. Уменьшить этот эффект позволяет применение так называемых flat-top ускоряющих систем, когда дополнительно к основной ускоряющей частоте добавляется в противофазе ее нечетная гармоника (3-я или 5-я); при этом вершина синусоиды делается плоской (это, конечно, жаргон) и разброс в наборе энергии частицами уменьшается. Впервые о работающей ускоряющей системе с flat-top-резонатором в PSI сообщение было сделано в 1981 г. [42].

Можно упомянуть о многих других усовершенствованиях, связанных с улучшением функционирования циклотронов, таких как замена дуантов резонаторами (в SSC), системы стабилизации магнитного поля и частоты ускоряющего напряжения с точностью лучше 10^{-5} , развитие разнообразной диагностики пучка, вывод пучка тяжелых ионов с помощью перезарядки (предложен Г. Н. Флеровым, Ю. Ц. Оганесяном и Г. Н. Вяловым в 1964 г. [43]). В этой же лаборатории (ЛЯР ОИЯИ) впервые в 1971 г. в каскаде из двух циклотронов были ускорены ионы ксенона до энергии 5–7 МэВ/нукл. [44].

2. ДИНАМИКА ПУЧКА В ЦИКЛОТРОНЕ И ФАЗОТРОНЕ

Уравнение движения заряженной частицы с массой m и зарядом q , движущейся со скоростью $\dot{\mathbf{r}}$ в стационарном магнитном поле с индукцией \mathbf{B} , имеет вид

$$\frac{d}{dt}(m\dot{\mathbf{r}}) = q[\dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{B}] + q\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2.1)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}(r)$ — напряженность электрического поля, действующего на частицу (как внешнего, так и собственного поля пучка); $m = m_0\gamma$, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, $\beta^2 = |\dot{\mathbf{r}}|^2/c^2$; c — скорость света; \mathbf{r} — радиус-вектор частицы. Здесь нужно сказать о форме магнитного поля, применяемого в циклотроне. Основной компонентой магнитного поля является аксиальная компонента B_Z , которая заставляет двигаться заряженную частицу по (примерно) круговой орбите, расположенной вблизи средней плоскости магнита. Такое поле обладает плоскостью симметрии $Z = 0$, что означает, что две другие компоненты поля — B_r и B_φ — равны нулю в этой плоскости. Однако в общем случае и магнитное, и электрическое поля являются трехмерными, т. е. имеют три компоненты.

Тогда в цилиндрической системе координат векторное уравнение (2.1) дает три скалярных уравнения для радиального r , азимутального φ и аксиального z движений:

$$\begin{aligned} \ddot{r} &= r\dot{\varphi}^2 + \frac{qc^2}{E} \left[\varepsilon_r - r\dot{\varphi}B_z + \dot{z}B_\varphi - \frac{\dot{r}}{c^2} (\dot{r}\varepsilon_r + r\dot{\varphi}\varepsilon_\varphi + \dot{z}\varepsilon_z) \right], \\ \ddot{z} &= \frac{qc^2}{E} \left[\varepsilon_z + r\dot{\varphi}B_r - \dot{r}B_\varphi - \frac{\dot{z}}{c^2} (\dot{r}\varepsilon_r + r\dot{\varphi}\varepsilon_\varphi + \dot{z}\varepsilon_z) \right], \\ \ddot{\varphi} &= -\frac{2\dot{r}\dot{\varphi}}{r} + \frac{qc^2}{rE} \left[\varepsilon_\phi + \dot{r}B_z - \dot{z}B_r - \frac{r\dot{\varphi}}{c^2} (\dot{r}\varepsilon_r + r\dot{\varphi}\varepsilon_\varphi + \dot{z}\varepsilon_z) \right]. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Пользуясь расчетными или измеренными значениями компонент магнитного B_z , B_r , B_ϕ и электрического ε_φ , ε_r , ε_z полей, полученными с помощью современных компьютерных программ, можно найти решения уравнений (2.2). На рис. 2, 3 показан пример расчета движения 2000 частиц

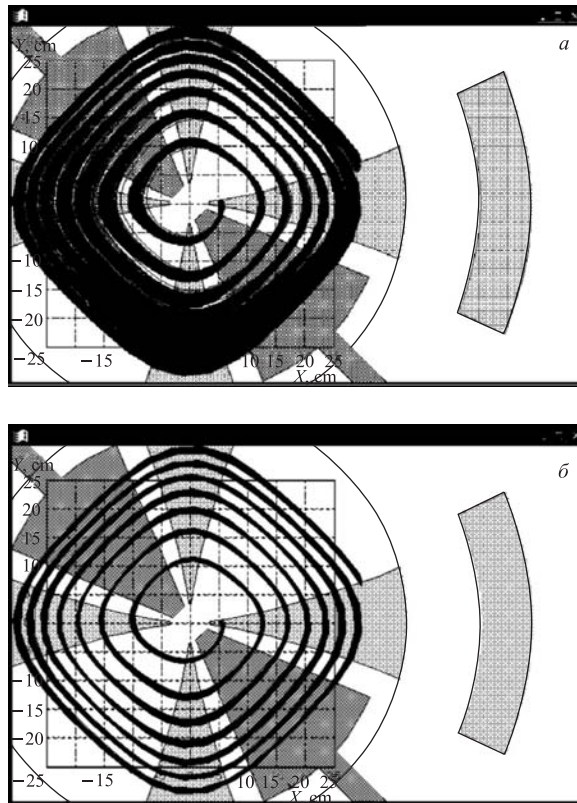


Рис. 2. Радиальные траектории при разных токах пучка: а) $I = 5$ мА; б) $I = 0$ мА

в горизонтальной и вертикальной плоскостях 4-секторного циклотрона для двух значений тока пучка [48]. Видно, как сильно в секторном циклотроне форма орбиты отличается от окружности (за счет этого и создается аксиальная фокусировка в растущем по радиусу магнитном поле).

Однако в 50-х гг. прошлого века, когда мощности компьютеров были далеки от современных, приходилось использовать аналитические решения. Излагаемая здесь аналитическая теория базируется на лекциях В. П. Дмитриевского [49]. В упрощенном виде этот материал можно найти в лекции Т. Штамбаха [50].

Основным вопросом при анализе динамики является устойчивость движения, или наличие фокусировки частиц по поперечным (r, z) координатам. Устойчивость движения определяется в основном характеристиками магнитного поля, так как уже для частиц, относительная скорость которых близка к 0,1 скорости

света, сила действия обычно применяемого магнитного поля (1–2 Тл) много больше силы действия применяемых электрических полей (10^6 В/м)*.

Благодаря этому *одночастичная* теория для всех типов ускорителей, включая сильноточные, базируется на упрощенном уравнении (2.1) с постоянной массой, которое при условии $v^2 = \text{const}$ преобразуется в

$$m_0 \gamma \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = e[\mathbf{r} \times \mathbf{B}]. \quad (2.1')$$

Векторное уравнение (2.1') представляет собой систему трех уравнений, а при выборе в качестве независимой переменной азимутальной координаты

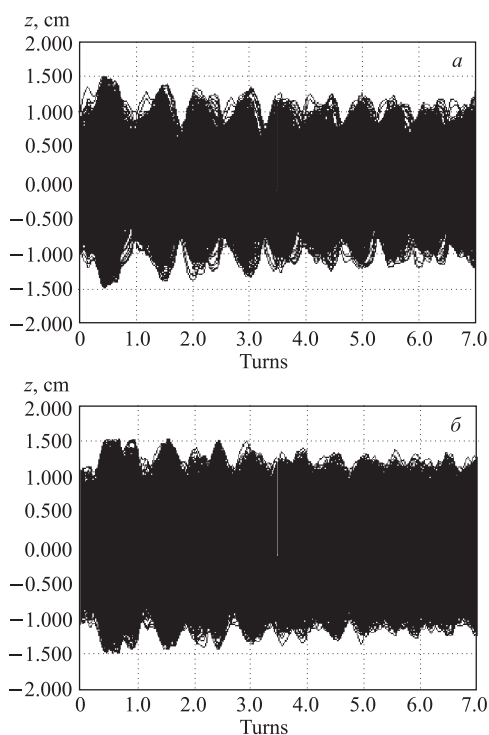


Рис. 3. Аксиальные траектории: а) $I = 0$ мА; б) $I = 5$ мА

*При малых скоростях частиц, т. е. в центре циклотрона, нужно учитывать действие электрического поля; см. статью M. Rose в [1, гл. 1] или W. I. B. Smith (Nucl. Instr. Meth. 1960. V. 9. P. 49).

частицы φ — систему двух уравнений в цилиндрической системе координат (r, φ, z) :

$$\begin{aligned} r'' - \frac{2r'^2}{r} - r &= \frac{qc^2}{Ev} \frac{\sqrt{z'^2 + r^2 + r'^2}}{r} [z'rB_\varphi - (r^2 + r'^2)B_z + r'z'B_r], \\ z'' - \frac{2z'r'}{r} &= \frac{qc^2}{Ev} \frac{\sqrt{z'^2 + r^2 + r'^2}}{r} [(r^2 + z'^2)B_r - rr'B_\varphi - z'r'B_z], \end{aligned} \quad (2.3)$$

где штрих означает дифференцирование по φ , при этом система описывает динамику частиц с постоянным импульсом $p = m_0\gamma v = \text{const}$.

Компоненты магнитного поля B_r и B_φ определяются как

$$B_r = \int_0^z \frac{\partial B_z}{\partial r} dz, \quad B_\varphi = \frac{1}{r} \int_0^z \frac{\partial B_z}{\partial \varphi} dz \quad (2.4)$$

при заданном распределении индукции в медианной плоскости $B_z(0, r, \varphi)$.

Раннее поколение циклотронов и фазотронов использовало магнитные поля с азимутальной симметрией ($B_\varphi = 0$, $B_r = (\partial B_z / \partial r)z + \dots$). Использование таких полей приводит к простейшему условию устойчивости частиц

$$-1 < n < 0, \quad n = \frac{r}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial r}. \quad (2.5)$$

Эта же величина определяет относительные частоты колебаний:

$$\nu_r = \frac{\omega_r}{\omega_0} = \sqrt{1+n}, \quad \nu_z = \frac{\omega_z}{\omega_0} = \sqrt{-n}. \quad (2.6)$$

Приведенные равенства ограничивают жесткость магнитной системы (слабая фокусировка) и тем самым, как будет показано ниже, предельную интенсивность ускорителей. Они же определяют предельную энергию частиц в циклотроне и величину диапазона частоты ускоряющего напряжения в синхrocиклотроне, который (диапазон), в свою очередь, определяет период модуляции частоты (и тем самым интенсивность пучка).

Снять (ослабить) эти ограничения позволяет использование неоднородных по азимуту и радиусу магнитных полей вида

$$B_z = B_z(r)[1 + \varepsilon f(r, \varphi)], \quad (2.7)$$

где $f(r, \varphi)$ — периодическая функция r и φ (вариация магнитного поля), а ε — ее амплитуда, определяющая флаттер (см. ниже).

Для магнитного поля вида (2.7) уравнения (2.2), (2.3), если «привязать» систему координат для заданного импульса

$$p = eBR \quad (2.8)$$

к среднему радиусу замкнутой орбиты R , преобразуются (в линейном приближении по ρ/R и z/R) к уравнениям (2.9):

$$\begin{aligned} \rho'' + \left[\frac{2+n}{\Lambda} - 1 + \frac{\varepsilon}{\Lambda} (2+n+m) f + \frac{\varepsilon R}{\Lambda} \frac{\partial f}{\partial R} \right] \rho &= R \left(1 - \frac{1}{\Lambda} \right) - \frac{\varepsilon R f}{\Lambda}, \\ z'' - \frac{1}{\Lambda} \left(n + \varepsilon n f + \varepsilon m f + \varepsilon R \frac{\partial f}{\partial R} \right) z &= 0, \end{aligned} \quad (2.9)$$

где

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial R} = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right)_{r=R}, \quad \frac{\partial f}{\partial R} = \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)_{r=R}, \quad n = \left(\frac{R}{B} \frac{dB}{dr} \right)_{r=R}, \quad m = \left(\frac{R}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dr} \right)_{r=R};$$

$\Lambda(\varepsilon, \varepsilon', N)$ — параметр, который характеризует отклонение среднего радиуса замкнутой орбиты от его значения в азимутально-однородном поле (где $p = eBR\Lambda$), а ρ — отклонение от среднего радиуса R . Величина Λ приблизительно равна $\Lambda \cong 1/2 + \sqrt{1/4 + \varepsilon^2(2+n+m)/2N^2}$ и, за исключением специальных случаев ($|m| \gg 1$), очень близка к единице. Поэтому для упрощения дальнейшего изложения мы будем полагать $\Lambda = 1$.

Линейная система уравнений (2.9) удовлетворительно описывает основные динамические эффекты магнитного поля и позволяет исследовать в аналитической форме основные закономерности движения в рамках так называемой одночастичной теории. Влияние отброшенных нелинейных членов нужно учитывать только в зонах резонансных значений собственных частот колебаний, которые вычисляются для заданного вида функции $f(r, \varphi)$. В общем случае эта периодическая по r и φ функция может быть представлена рядом Фурье с периодом по φ , равным $2\pi/N$, где N — число периодов магнитного поля:

$$f(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin [\alpha_k(r) - kN\varphi]. \quad (2.10)$$

Однако основные теоретические результаты могут быть получены исходя из основной ($k = 1$) гармоники структуры поля:

$$f(r, \varphi) = \sin [\alpha(r) - N\varphi] = \sin \Psi. \quad (2.11)$$

В этом случае линии равной напряженности магнитного поля расположены на кривых

$$\alpha(r) = N\varphi. \quad (2.12)$$

Особых ограничений на функцию $\alpha(r)$ нет, однако обычно используется либо спираль Архимеда [$\alpha(r) = r/\lambda$], либо логарифмическая спираль [$\alpha(r) = (N/\text{tg } \theta) \ln(r/r_0)$], для которой постоянен угол между спиралью и окружностью.

Спираль Архимеда, как правило, применяется в компактных ускорителях (со «сплошным» магнитом), так как обеспечивает возможность довести спираль почти до центра магнита; логарифмическая спираль может использоваться для ускорителей с секционированной структурой магнитного поля (separated sectors) и обеспечивает при определенных условиях постоянство частоты аксиальных колебаний.

Подставляя (2.11) в (2.9), получим (в предположении $\Lambda = 1$) линейную систему уравнений для анализа динамических процессов:

$$\begin{aligned} \rho'' + \left[1 + n + \varepsilon(2 + n + m) \sin \Psi + \frac{\varepsilon R}{\lambda} \cos \Psi \right] \rho &= \delta - \varepsilon R \sin \Psi, \\ z'' - \left[n + \varepsilon(n + m) \sin \Psi + \frac{\varepsilon R}{\lambda} \cos \Psi \right] z &= 0, \quad \delta \cong \frac{R\varepsilon^2}{N^2}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Из рассмотрения первого уравнения системы (2.13) следует, что существуют вынужденные радиальные колебания орбиты вокруг среднего радиуса, связанные с периодической структурой магнитного поля, и постоянное смещение среднего радиуса δ , которое определяется параметром Λ . При значении параметра Λ , близком к единице, фаза замкнутой орбиты совпадает с фазой магнитного поля (максимум отклонения лежит в зоне максимума магнитной индукции); в рассматриваемом приближении форма замкнутой орбиты не влияет на характер свободных колебаний (аксиальных и радиальных), которые описываются системой (2.13) без правой части.

На основе этих выводов будем рассматривать свободные колебания для случая $\Lambda = 1$, $m = 0$. При условии $R \gg \lambda(2+n)$ система (2.13) преобразуется в систему уравнений Матье [51]

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \rho}{d\xi^2} + (a_r + 2q \cos 2\xi) \rho &= 0, \\ \frac{d^2 z}{d\xi^2} + (a_z - 2q \cos 2\xi) z &= 0, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где $a_r \cong \frac{4}{N^2}(1+n)$, $a_z \cong -\frac{4}{N^2}n$, $q = \frac{2\varepsilon R}{N^2\lambda}$, $2\xi = \frac{R}{\lambda} - N\varphi$.

Такое приближение справедливо только для крутоспиральных структур магнитных полей, но оно наглядно отражает основные изменения собственных частот свободных колебаний в процессе ускорения.

Из анализа коэффициентов уравнений Матье непосредственно следуют следующие выводы:

1. Аксиальная устойчивость обеспечивается полностью параметрическим действием вариации магнитного поля; радиальная — в основном ростом среднего магнитного поля вдоль радиуса.

2. Минимальное значение вариации определяется условием

$$\varepsilon \geq \frac{N\lambda}{R} \sqrt{n}, \quad n = \gamma^2 - 1. \quad (2.15)$$

3. Собственные частоты колебаний ν_r, ν_z определяются уравнением

$$\cos \pi\mu = \cos \pi\sqrt{a} - \frac{\pi^2 \sin \pi\sqrt{a}}{4} \frac{q^2}{\pi\sqrt{a}} \frac{1}{1-a}, \quad \nu_{r,z} = \frac{N}{2} \mu_{r,z}. \quad (2.16)$$

Таким образом, для заданных характеристик магнитного поля (N, ε, λ), пользуясь таблицами или графиками собственных чисел функций Матье (μ), легко определить собственные частоты свободных колебаний частиц в процессе ускорения.

Для оценочных расчетов существуют многочисленные приближенные формулы, которые получаются из (2.16) при условии $q \ll 1$. Простейшими из них являются

$$\nu_r^2 \cong 1 + n = \gamma^2, \quad \nu_z^2 \cong -n + \frac{\varepsilon^2}{2} + \left(\frac{\varepsilon R}{N\lambda} \right)^2 + \dots \quad (2.17)$$

Во втором уравнении (2.17) член $\varepsilon^2/2$ характеризует фокусировку Томаса (при отсутствии спиральности $\lambda \rightarrow \infty$). Точное значение этого члена может быть получено только при учете квадратичных членов в уравнениях движения. Член $(\varepsilon R/N\lambda)^2$ характеризует спиральную фокусировку; видно, что он увеличивается с ростом радиуса (энергии), что и является основным преимуществом спиральной структуры.

Резонансы. Независимо от структуры магнитного поля (азимутально-однородное или с вариацией) в плоскости симметрии имеются все (низшие, как правило) гармоники, связанные с ошибками магнитного поля. Это означает, что в общем случае на каждом радиусе дополнительно к формируемому полю имеются поля

$$B_z = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin(k\varphi + \alpha_k). \quad (2.18)$$

Соответствующее линейное уравнение радиального движения будет иметь вид

$$\rho'' + \nu_r^2 \rho = -R \frac{B_k}{\bar{B}(R)} \sin(k\varphi + \alpha_k), \quad (2.19)$$

где \bar{B} — среднее значение поля на радиусе R . Если $\nu_r = k$, то соответствующая k -я гармоника приводит к линейному нарастанию амплитуды вынужденных радиальных колебаний за один оборот на величину

$$\Delta a_0 = \frac{\pi R}{k} \frac{B_k}{\bar{B}}. \quad (2.20)$$

Вблизи резонансного значения амплитуда вынужденных колебаний равна

$$\alpha_0 = R \frac{B_k}{B} \frac{1}{|k^2 - \nu_r^2|}.$$

Характерной особенностью вынужденных колебаний является совпадение их частоты и фазы с частотой вынуждающей силы (т.е. соответствующей гармонике поля).

Численная оценка прохождения зоны целочисленного резонанса в циклотроне по формуле (2.20) показывает, что даже при относительной величине резонансной гармонике 10^{-4} допустимое число оборотов в зоне резонанса не должно превышать 10.

Второй возможностью резонансного возбуждения свободных колебаний в рамках линейной теории является параметрический резонанс, вызываемый градиентом амплитуды и фазы гармоник. Если предположить зависимость амплитуды и фазы k -й гармоники от радиуса, то в правой части уравнения (2.19) появятся дополнительные члены, которые в линейном приближении пропорциональны отклонению ρ частицы от замкнутой орбиты:

$$\begin{aligned} \rho'' + \nu_r^2 \rho = & - \frac{R}{B} \left(\frac{dB_k}{dr} \right)_{r=R} \rho \sin(k\varphi + \alpha_k) - \\ & - \frac{RB_k}{B} \left(\frac{d\alpha_k}{dr} \right)_{r=R} \rho \cos(k\varphi + \alpha_k). \end{aligned} \quad (2.21)$$

Так как по структуре оба члена в правой части идентичны, достаточно рассмотреть только один из них с большей амплитудой. Тогда после замены $k\varphi + \alpha_k = 2\xi$ (или $k\varphi + \alpha_k - \pi/2 = 2\xi$) уравнение (2.21) преобразуется к уравнению Матье

$$\frac{d^2 \rho}{d\xi^2} + \left(\frac{4\nu_r^2}{k^2} + 2q \cos 2\xi \right) \rho = 0. \quad (2.21')$$

При каком угодно малом значении q возбуждается параметрический резонанс, если $\nu_r = k/2$, т.е. опасными являются полуцелые значения собственных частот колебаний.

Полоса, внутри которой имеет место параметрическое возбуждение колебаний, ограничена величиной

$$\Delta\nu = q/2k.$$

Показатель экспоненциального роста амплитуды свободных колебаний при $q \ll 1$ равен $q/2$. Численные оценки показывают, что в резонансной зоне можно допустить десятки оборотов без заметного увеличения амплитуды.

Изложенные выше результаты основаны на исследовании решений линейаризованных уравнений движения.

В общем случае структура отброшенных нелинейных членов может быть представлена в виде $\rho^p z^q \sin(N\varphi + \alpha_N)$, p и q — целые положительные числа. В резонансных зонах можно рассматривать только один резонансный член, так что система (2.13) будет эквивалентна системе

$$\begin{aligned}\rho'' + \nu_r^2 \rho &= \varepsilon_\rho \rho^{p-1} z^q \sin(N\varphi + \alpha_N), \\ z'' + \nu_z^2 z &= \varepsilon_z z^{q-1} \rho^p \sin(N\varphi + \alpha_N).\end{aligned}\quad (2.22)$$

Из такой формы записи уравнений непосредственно видно, что «нелинейных» резонансов следует ожидать при выполнении условия

$$p\nu_r \pm q\nu_z = \pm N, \quad (2.22')$$

где N может быть как основной гармоникой поля, так и гармоникой поля возмущения. Величина $(p + q)$ называется порядком нелинейного резонанса.

Естественно, наибольший эффект будет наблюдаться на основной гармонике, амплитуда которой на два-три порядка превышает амплитуду возмущений. Для внутренних нелинейных резонансов, которые обязательно проходятся пучком в изохронных циклотронах из-за растущего по радиусу магнитного поля, из (2.22') следует, что $\nu_r = N/p$, а их эффективность определяется уравнением

$$\rho'' + \nu_r^2 \rho = \frac{\varepsilon_p}{R^{p-1}} \rho^{p-1} \sin(N\varphi + \alpha_N). \quad (2.23)$$

Ширина резонанса $\Delta = \nu_r p - N$ равна

$$\Delta = \pm \varepsilon_p a_0^{p-2} / 2^p R^{p-2} \nu_r. \quad (2.23')$$

Пространственный заряд пучка. Рассмотренная выше теория описывает динамические характеристики *одной частицы*.

Магнитное поле на основании этой теории определяет временную структуру пучка: *непрерывную*, где сгустки следуют с частотой обращения частиц на замкнутых орбитах (циклотронный режим), и *дискретную*, где сгустки заключены в макроимпульсы, следующие с периодом модуляции частоты ускоряющего напряжения (фазотронный режим).

Никаких ограничений на интенсивность пучка одночастичная теория, естественно, не устанавливает. Эти ограничения возникают только при учете пространственного заряда пучка. При этом появляются дополнительные силы, связанные с электрическим и магнитным полями пучка, действие которых проявляется, в первую очередь, в изменении частот свободных поперечных колебаний, определенных ранее по одночастичной теории. Так как допуски на частоты поперечных колебаний из-за наличия резонансных эффектов являются наиболее жесткими, то изменение собственных частот под действием собственного поля пучка определяет, как правило, предельные плотности частиц и, тем самым, предельные интенсивности.

Компоненты собственного электромагнитного поля пучка определяются системой уравнений

$$\varepsilon_0 \operatorname{div} \boldsymbol{\varepsilon} = \rho, \quad \mu_0 \varepsilon_0 = \frac{1}{c^2}, \quad \varepsilon_0 \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{B} = j, \quad (2.24)$$

где ρ — плотность заряда пучка; $j = \rho \mathbf{v}$, \mathbf{v} — продольная скорость частиц в пучке; ε_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная удельные проницаемости вакуума; c — скорость света.

Для цилиндрического бесконечного пучка с постоянной плотностью ρ имеются (отличные от нуля) радиальная компонента электрического поля

$$\varepsilon_r = \frac{\rho}{2\varepsilon_0} r \quad (2.25)$$

и азимутальная компонента магнитного поля

$$B_\varphi = \frac{\rho v}{2\varepsilon_0 c^2} r. \quad (2.26)$$

Обе эти компоненты создают радиальную силу, действующую на каждую частицу пучка:

$$F_r = q\varepsilon_r - qvB_\varphi = \frac{q\rho}{2\varepsilon_0} (1 - \beta^2) r = \frac{q\rho}{2\varepsilon_0 \gamma^2} r. \quad (2.27)$$

Для тонкого плоского пучка, если его высота (как это имеет место в циклотроне) много меньше его размеров в плоскости, возникающая под действием пространственного заряда сила

$$F_z = \frac{q\rho}{\varepsilon_0 \gamma^2} z. \quad (2.28)$$

Из структуры вышеприведенных формул видно, что электростатическое расталкивание при увеличении энергии (γ) уменьшается магнитным сжатием, однако сам эффект расталкивания остается. Предельно достижимая плотность ограничивается потерей устойчивости, когда сила расталкивания становится равной фокусирующей силе структуры магнитного поля. Структурная сила $F = m_0 \gamma \omega^2 \nu_z^2 z$, откуда находим

$$\rho_{\text{пред}} = \frac{m_0}{q} \gamma^3 \varepsilon_0 \omega^2 \nu_z^2 = \frac{q}{m_0} \gamma^3 \varepsilon_0 B_0^2 \nu_z^2, \quad (2.29)$$

где q и m_0 — заряд и масса покоя частицы; B_0 и ω — среднее магнитное поле в центре циклотрона и круговая частота обращения частицы; ν_z — частота аксиальных колебаний. Соответствующий предельной плотности ток пучка

$$i_{\text{пред}} = \rho_{\text{пред}} V \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\varepsilon_0}{2\pi} \gamma^3 V B_0 \omega^2 \nu_z^2, \quad (2.30)$$

где V — объем сгустка (банча).

Для типичных параметров циклотрона ($B_0 \cong 1,2$ Тл, частота обращения $\omega/2\pi \cong 18$ МГц, $\nu_z \leq 0,5$) и объема сгустка, равного нескольким кубическим сантиметрам, предельный ток может достигать 10 мА.

Заметим, что формулы (2.29) и (2.30) оценивают ограничение предельной интенсивности действием пространственного заряда. Есть и другие ограничения, связанные с процессами инжекции и вывода пучка, которые (ограничения) могут оказаться более жесткими (см., например, [48]).

Оценка предельного тока в циклотроне, приведенная выше, сделана в приближении постоянных размеров сгустка и постоянной частоты вертикальных колебаний. Чтобы учесть изменение этих величин во времени, Вернер Йохо [52] решал (применительно к циклотрону) самосогласованные уравнения Власова–Капчинского (в англоязычной литературе Lapostolle–Sacherer equations [53]) для амплитуд свободных колебаний. Он получил решение в аналитическом виде в предположении равенства амплитуд, эмиттансов и частот вертикальных и горизонтальных колебаний:

$$I_T = \frac{a^2 \nu}{R} \beta^3 \gamma^3 \frac{\Delta\Phi}{2\pi} I_0, \quad I_0 = \pi \cdot 10^7 \text{ А}, \quad \omega = \frac{I}{I_T}, \quad (2.31)$$

$$a^2(I) = a_0^2 \left[\omega + \sqrt{1 + \omega^2} \right], \quad \nu(I) = \nu_0 \left[\sqrt{1 + \omega^2} - \omega \right],$$

где a — средняя амплитуда колебаний; a_0 — начальная амплитуда; R — радиус орбиты; $\Delta\Phi$ — азимутальный размер сгустка; ν — частота поперечных колебаний; ν_0 — начальное значение частоты; ω — безразмерный параметр, равный отношению среднего тока пучка I к критическому току I_T .

Для циклотронов PSI (72-МэВ циклотрона-инжектора и 590-МэВ кольцевого циклотрона) при величине нормализованного эмиттанта $1\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ и $\omega = 0,4$ формулы (2.31) дают ток пучка 5 и 20 мА соответственно.

3. СТАТУС НЕКОТОРЫХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЦИКЛОТРОНОВ

В этом разделе приводятся сведения о статусе и планах развития и усовершенствования некоторых действующих циклотронов. В п. 3.1 описаны циклотроны, предназначенные для исследований по ядерной физике, хотя на некоторых из них ведутся также и прикладные работы. П. 3.2 посвящен описанию циклотронов, предназначенных для исследований в прикладных областях или проведения прикладных работ. Приводимые в этом разделе сведения взяты главным образом из трудов двух последних международных конференций по циклотронам и их применениям: конференции 2004 г. в Токио (обозначаемой в ссылках этого обзора как «Cyclotrons-2004») и конференции 2007 г. на Сицилии («Cyclotrons-2007»).

В приложении 2 приведены технические характеристики некоторых из этих циклотронов.

3.1. Циклотроны для ядерной физики

1. *Комплекс циклотронов GANIL (Франция) [54].* Ускорительный комплекс состоит из трех циклотронов, обозначаемых как C0, SSC1 и SSC2. Схема комплекса показана на рис. 4.

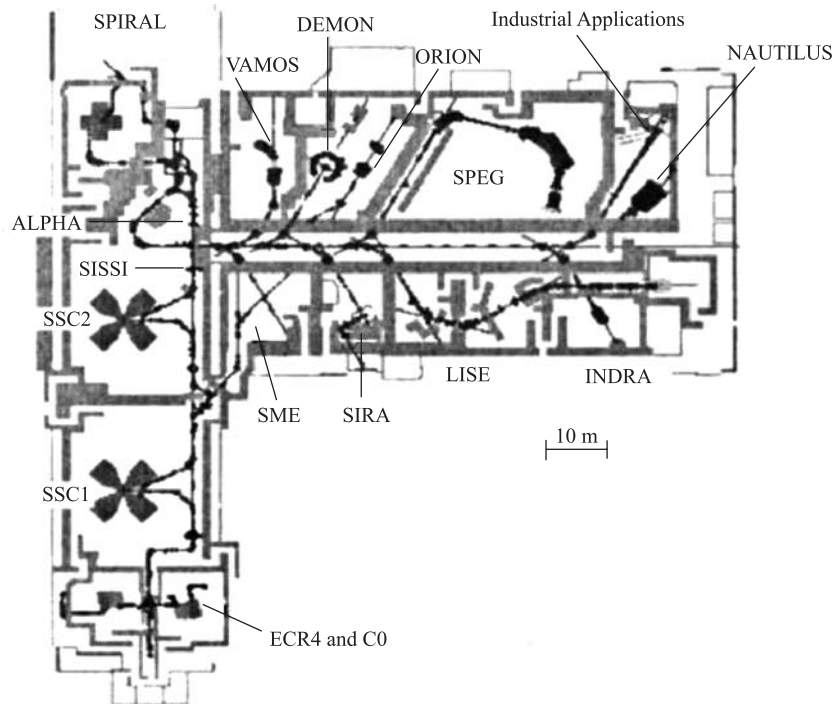


Рис. 4. Схема комплекса GANIL

Для инъекции в 1-й циклотрон (C0) используются ECR-источники. Комплекс производит широкий спектр ионных пучков от углерода ^{12}C до урана ^{238}U с различными энергиями (максимальная энергия 96 МэВ/нукл.) с высокой интенсивностью. Пучки используются в области ядерной и атомной физики, радиологии и материаловедения. С 2001 г. установка SPIRAL (толстая мишень + ECR-источник + циклотрон SIME), используя пучки ионов от GANIL, производит радиоактивные атомы с энергией 1,7–25 МэВ/нукл. Технические данные циклотронов см. в приложении 2.

2. *Циклотронный комплекс MSU (Michigan State University) (США) [55].* Был завершен в 2001 г. Состоит из двух сверхпроводящих циклотронов K500 и K1200. Ускоряет 14 различных пучков от кислорода до висмута (см. при-

ложение 2) до энергий 80–160 МэВ/нукл. Ускоренный пучок ионов падает на мишень, производящую вторичные пучки стабильных или радиоактивных ионов, для разделения и исследования которых используется сепаратор фрагментов А1900.

Основное время работы посвящено исследованию радиоактивных ионов. Только 5 % пучкового времени используется для экспериментов с первичными пучками.

Циклотрон К1200 используется в тандеме с К500 и как самостоятельный ускоритель; во втором случае пучок в К1200 инжектируется из ECR-источника. Небольшая часть времени (4 %) тратится также на облучение различного рода образцов для специальных применений (электроника, биологические объекты, моделирование эффектов космических лучей). Комплекс работает около 5500 ч/год (пучковое время).

3. *Циклотрон PSI, Виллиген (Швейцария)* [56]. Циклотронный комплекс состоит из форинжктора (высоковольтного каскадного ускорителя на энергию 870 кэВ), секторного циклотрона-инжектора на энергию 72 МэВ и основного кольцевого восьмисекторного циклотрона на энергию 590 МэВ. Максимальная интенсивность выведенного протонного пучка с энергией 590 МэВ равна 2 мА (мощность пучка 1,18 МВт). Создавался как мезонная фабрика. Технические параметры см. в приложении 2.

Проводимые исследования — в области физики промежуточных энергий. Используется как источник нейтронов, генерируемых мегаваттным протон-

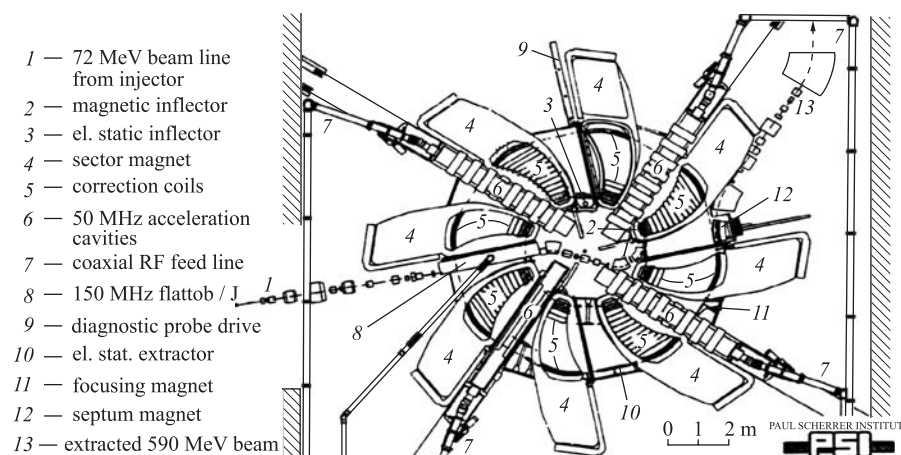


Рис. 5. Общий вид главного кольца циклотрона PSI. В нем ускоряется интенсивный (2 мА) протонный пучок до энергии 590 МэВ, производящий интенсивные потоки мезонов и нейтронов

ным пучком во внешней мишени. Часть пучкового времени раньше использовалась для протонной терапии. Схема основного кольца показана на рис. 5. Полезное время (6000 ч/год) составляет 86–89 % от планируемого.

При запуске ускорителя в 1974 г. интенсивность 590-МэВ протонов составляла 200 мкА; за 30 лет она увеличена в 10 раз благодаря постоянно проводимой работе по совершенствованию инжектора, ускоряющей и выводной систем.

Так, увеличение амплитуды ускоряющего напряжения в инжекторе (на 3 %) привело к заметному улучшению (уменьшению) аксиального эмиттанса и, как следствие, уменьшению потерь пучка при выводе из основного кольца. Это явилось одним из существенных факторов в увеличении интенсивности до 2 мА. В 2004 г. началось изготовление новых высокочастотных резонаторов основного кольца, ускоряющее напряжение на каждом из которых будет равно 1 МВ. Два (из четырех) таких резонатора изготовлены и испытаны на стенде. Получены проектные параметры (напряжение 1,4 МВ). В апреле 2004 г. один резонатор установлен в кольцо взамен одного из старых и работает с пучком (при напряжении на резонаторе ~ 830 кВ). В 2006 г. установлен второй резонатор.

4. *Сверхпроводящий циклотрон в Катании (Италия)* [57]. Введен в эксплуатацию в 1994 г. Сооружение циклотрона началось в 1981 г. в Милане, где он и был изготовлен. При запуске циклотрона в Милане возникли большие трудности с выводом ускоренного пучка (из-за невозможности получить проектную величину напряжения на дефлекторе выводной системы).

В 1991 г. циклотрон был перевезен и смонтирован в Катании, в LNS (Laboratori Nazionali del Sud), где в 1994 г. был получен первый пучок.

Сверхпроводящий циклотрон в Катании — это трехсекторный компактный циклотрон, в котором ускоряются многозарядные ионы. Первоначально в качестве инжектора использовались 15-МэВ тандем-генератор и радиальная инжекция. В 1990 г. радиальная инжекция была заменена аксиальной от ECR-источника, что позволило увеличить энергию ускоряемых ионов (за счет увеличения зарядности инжектируемых ионов). Кроме того, появилась возможность инжектировать молекулярный водород H_2^+ , который на выходе (после прохождения обдирочной фольги) превращается в 2 протона. Протонный пучок используется для протонной терапии меланомы. За 3 года (2002–2004 гг.) было облучено 76 пациентов, у 39 из которых через 6 месяцев размер опухоли уменьшился.

Были изготовлены и установлены новые (медные) дуанты (взамен алюминиевых). После продолжительных исследований удалось повысить напряженность электрического поля в дефлекторе до 110 кВ/см (при зазоре 6 мм). В результате была увеличена энергия ускоренных ионов и ускорен углерод ^{13}C , который используется для получения вторичного пучка радиоактивного ^8Li с интенсивностью $10^5\text{--}10^6$ с $^{-1}$.

5. *Сверхпроводящий циклотрон AGOR, Гронинген (Нидерланды)* [58]. AGOR — трехсекторный компактный сверхпроводящий циклотрон. Сконструирован и изготовлен в Орсе (Франция) в 1987–1993 гг. Первый пучок ускорен в 1996 г. Ускоряет протоны до энергии 120–190 МэВ, многозарядные ионы до энергий от 6 (тяжелые) до 90 МэВ/нукл. (легкие). Ускоряются поляризованные протоны и дейтроны (интенсивность $\sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$).

Выполняется программа по улучшению вакуума, ECR-источника, системы вывода. Цель программы — увеличение интенсивности ускоряемых пучков ионов до 10^{13} с^{-1} и уменьшение потерь частиц при ускорении и выводе.

6. *Циклотрон K130, Ювяскюля (Финляндия)* [59]. Компактный четырехсекторный циклотрон K130 ускоряет ионы от H^- (45 МэВ, $6,2 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$) до криптона (9,4 МэВ/нукл.; $2,2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$). Работает с 1992 г. в среднем 6000 ч/год. Оборудован двумя ECR-источниками (6,4 и 14 ГГц) для тяжелых ионов и одним multicusp-источником для H^- -ионов. Планируется модернизация оптики линии инжекции для увеличения интенсивности. Интенсивность пучка H^- -ионов в линии инжекции ограничивается пространственным зарядом [59]:

$$I_{\max} = 140 \sqrt{\frac{Q}{A} U_{k\beta}^{3/2} \left(\frac{R}{L}\right)^2} \quad (\text{мА}),$$

здесь U — энергия (в кВ); R — радиус пучка; L — длина линии инжекции. При $U = 30 \text{ кВ}$ и $R/L = 0,01$ $I_{\max} = 20 \text{ мА}$.

Планируется также создание нанометрических протонных пучков для литографии. Это пучки малой интенсивности, но с малыми эмиттансом и энергетическим разбросом.

7. *Циклотронный комплекс для ускорения многозарядных ионов, ОИЯИ, Дубна (Россия)* [60]. В Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова находятся 4 ускорителя тяжелых ионов, два из них — У-400 и У-400М — используются для научных исследований, на циклотроне У-200 производится наработка изотопов в основном для физических экспериментов, циклотрон ИЦ-100 был создан целевым образом для выполнения программы прикладных исследований и производства трековых мембран.

1) Циклотрон У-400 запущен в 1978 г. с внутренним источником ионов типа PIG, в 1996 г. был реконструирован. На нем был установлен внешний источник ионов электрон-циклотронного резонанса и создана система аксиальной инжекции пучка. Циклотрон имеет четырехсекторную магнитную структуру (диаметр полюса магнита 4 м), два дуанта. В настоящее время циклотрон способен ускорять ионы от лития до висмута с энергией от 3 до 20 МэВ/нукл. с интенсивностями $6 \cdot 10^{13}$ – $3,6 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Получен пучок ^{48}Ca (5,4 МэВ/нукл.) с интенсивностью $1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$, который используется в экспериментах по синтезу сверхтяжелых элементов. Циклотрон оборудован физическими установками VASSILISSA, GFRS, MSP-144, каналом для про-

изводства трековых мембран. Циклотрон работает 5000–6000 ч/год. Основные эксперименты — синтез трансурановых элементов.

2) Циклотрон У-400М был создан на базе магнита циклотрона У-300. Первый пучок получен в 1991 г. Циклотрон имеет магнитную структуру из четырех спиральных секторов (диаметр полюса магнита 4 м), 4 дуанта с амплитудой напряжения 120–140 кВ. Инжекция пучка в циклотрон осуществляется из внешнего ECR-источника по каналу аксиальной инжекции. Циклотрон имеет две моды ускорения на 2-й и 4-й гармонике ускоряющего ВЧ-поля, что позволяет получать ионы в диапазоне энергий от 5 до 100 МэВ/нукл. Основные эксперименты проводятся на пучках от лития до аргона с энергией 30–54 МэВ/нукл. на физических установках COMBAS, FOBOS, ACCULINA. В стадии монтажа находится канал пучков ионов низкой энергии и сепаратор MASHA, где планируется программа экспериментов по синтезу и изучению свойств новых изотопов на пучках ионов с энергией 5–6 МэВ/нукл. С помощью специализированного источника ионов на У-400М получены ионы трития с энергией 19 МэВ/нукл. и интенсивностью 10^9 с⁻¹. Время работы ускорителя на физический эксперимент — более 3000 ч/год.

3) Циклотрон У-200 запущен в 1968 г. Разработан для получения пучков ионов с энергией от 4 до 16 МэВ/нукл. В настоящее время циклотрон используется в основном для производства изотопов на интенсивных (до 100 мкА) пучках He с энергией 9 МэВ/нукл. Работает 500–1000 ч/год.

4) Специализированный циклотрон ИЦ-100 был создан в 1985 г. для прикладных исследований и производства трековых мембран на пучках тяжелых ионов с фиксированной энергией 1,2 МэВ/нукл. В 2003–2005 гг. был реконструирован, на нем был установлен сверхпроводящий ECR-источник, разработанный в ЛЯР, и создана система аксиальной инжекции пучка. На ускорителе получены ионы Kr, Xe, I, W и других элементов с интенсивностью $8 \cdot 10^{11}$ – $3 \cdot 10^9$ с⁻¹. Время работы ускорителя — около 1500 ч/год.

В Лаборатории ядерных реакций реализован проект ускорения пучков ⁶He и ⁸He в схеме ISOL с использованием ускорителей У-400 и У-400М. У-400М используется для генерации радиоактивных ядер, У-400 — как постускоритель. В настоящее время ведутся эксперименты на пучках ⁶He (60 МэВ) с интенсивностью $4 \cdot 10^7$ с⁻¹, планируется увеличить интенсивность до 10^{10} с⁻¹ и получить пучок ⁸He с интенсивностью 10^8 с⁻¹.

8. *Циклотронный комплекс RCNP (Research Centre for Nuclear Physics), Осака (Япония)* [61]. Циклотронный комплекс состоит из инжекторного AVF-циклотрона K140 и кольцевого циклотрона K400.

Трехсекторный компактный циклотрон-инжектор для кольцевого циклотрона ускоряет протоны (энергия 80 МэВ), ³He (энергия 53 МэВ/нукл.), ⁴He (энергия 35 МэВ/нукл.) с интенсивностью $3 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ для этих трех ионов и кислород ¹⁸O⁺⁶ (энергия 13,7 МэВ/нукл., интенсивность $3 \cdot 10^{11}$ с⁻¹). Создан в 1973 г.

Кольцевой шестисекторный циклотрон ускоряет поляризованные протоны до энергии 420, ионы ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ до энергии 150 и 100 МэВ/нукл. соответственно, с интенсивностью $2,5 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ для каждого из этих ионов; 6-зарядные ионы кислорода до 60 МэВ/нукл. с интенсивностью $3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. Создан в 1991 г.

Комплекс предназначен для снабжения различных экспериментов пучками высокого качества — поперечные эмиттансы пучка не превышают $1\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Работает 6840 ч/год, в том числе 42 % — на исследования и 27 % — на усовершенствование и развитие комплекса (остальное время — профилактика оборудования и настройка пучка).

В 2004 г. осуществлена программа усовершенствования инжекторного циклотрона, а также заменено устаревшее оборудование некоторых его систем. В частности, увеличено ускоряющее напряжение с 60 до 100 кВ. К дуанту в дополнение к напряжению основной частоты подведено напряжение гармоник (5–9) для работы во flat-top режиме.

Установлен новый сверхпроводящий 18-ГГц ECR-источник для генерации высокозарядных тяжелых ионов. Разработан ионный источник ионов поляризованного Li^{3+} .

За счет более тщательного формирования изохронного магнитного поля, а также уменьшения фазовой протяженности инжектируемого в AVF-циклотрон пучка достигнуты хорошее разделение орбит и однооборотный вывод при энергии 65 МэВ. В результате энергетический разброс 400-МэВ протонов уменьшился до 20–30 кэВ.

9. Тяжелоионный комплекс HIRFL (*Heavy Ion Research Facility in Lanzhou*), Китай [62]. Комплекс состоит из трехсекторно-фокусирующего компактного циклотрона-инжектора SFC и кольцевого основного четырехсекторного циклотрона SSC (separated sector cyclotron).

Циклотрон-инжектор ускоряет многозарядные ионы от кислорода до свинца до энергий 8–1 МэВ/А с интенсивностями от $1,5 \cdot 10^{13}$ до $3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, инжектором в него служит ECR-источник. Реконструирован в 1984–1987 гг.

Кольцевой циклотрон ускоряет ионы от ${}^{12}\text{C}$ до ${}^{136}\text{Xe}$ до энергий от 80 до 15 МэВ/А с интенсивностями от $4 \cdot 10^{11}$ до $2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$.

В апреле 2002 г. комплекс был остановлен для модернизации циклотрона-инжектора и монтажа канала транспортировки пучка от циклотронного комплекса к накопительному кольцу CSR (cooling storage ring). В течение года произведен ряд значительных улучшений в циклотроне-инжекторе SFC, а именно:

- модернизация вакуумной камеры с целью улучшения вакуума на порядок,
- увеличение дуантного напряжения до 90 кВ,
- установка дополнительного банчера в линии аксиальной инжекции,

— замена на новые практически всех источников питания, в том числе и на SSC.

В результате интенсивность SFC была значительно увеличена (по сравнению с предшествующим периодом).

В августе 2004 г. после двухлетнего перерыва комплекс вновь начал работать. Хотя после проведенной модернизации интенсивность комплекса увеличилась, но она все еще недостаточна для инъекции в накопительное кольцо.

Поэтому следующая программа модернизации включает в себя:

- замену (на новую) линии аксиальной инъекции в SFC,
- увеличение эффективности вывода из SFC,
- детальное изучение и модернизацию систем инъекции и вывода основного кольца SSC.

Проект HIRFL–CSR стартовал в 2000 г. К настоящему времени установлен тракт инъекции из SSC в главное кольцо CSRm, установлено также само кольцо, монтируется сепаратор радиоактивных пучков (RIR) и экспериментальное кольцо CSRe [62]. Запуск всего комплекса был запланирован на конец 2004 г.

10. *Циклотрон TRIUMF, Ванкувер (Канада)* [63]. Это самый большой (диаметр ~ 17 м) 6-секторный циклотрон (см. рис. 6), ускоряющий H^- -ионы, в том числе поляризованные, до энергии 65–520 МэВ. Отличительной чертой циклотрона TRIUMF является очень низкое (0,3–0,46 Тл) магнитное поле. Из ускорителя выводятся протоны, образующиеся при перезарядке H^- -ионов на обдирочной фольге, с помощью которой осуществляется вывод ускоренных частиц из камеры ускорителя. Энергия частиц (протонов) регулируется путем перемещения обдирочной фольги по радиусу (и углу) ускорителя. Одновременно протоны выводятся в трех направлениях за счет установки фольг на разных радиусах (и на разной высоте). В одном направлении выводятся пучки низких энергий 65–115 МэВ с интенсивностью до 100 мкА для производства изотопов или протонной терапии, в другом — пучки высоких энергий 180–520 МэВ для производства мезонов (200 мкА); в третьем направлении — пучок низкой интенсивности для ядерной физики, радиохимии и астрофизических исследований.

Эффективность вывода 99,95%. Ускоряются также поляризованные H^- -ионы (интенсивность 25 мкА). Имеется 2 источника H^- -ионов — CUSP и источник поляризованных H^- -ионов (лэмбовский сдвиг, оптическая накачка).

Энергия инъекции 300 кэВ (радиус инъекции 25 см), эффективность инъекции 95%. Ускоритель работает с декабря 1975 г. Пучковое время превышает 5000 ч/год, причем одновременно может работать до восьми экспериментальных установок [63].

В 1995 г. начал реализовываться проект ISAC-I (Isotope Separator and Accelerator) для производства редких изотопов, как стабильных, так и ра-

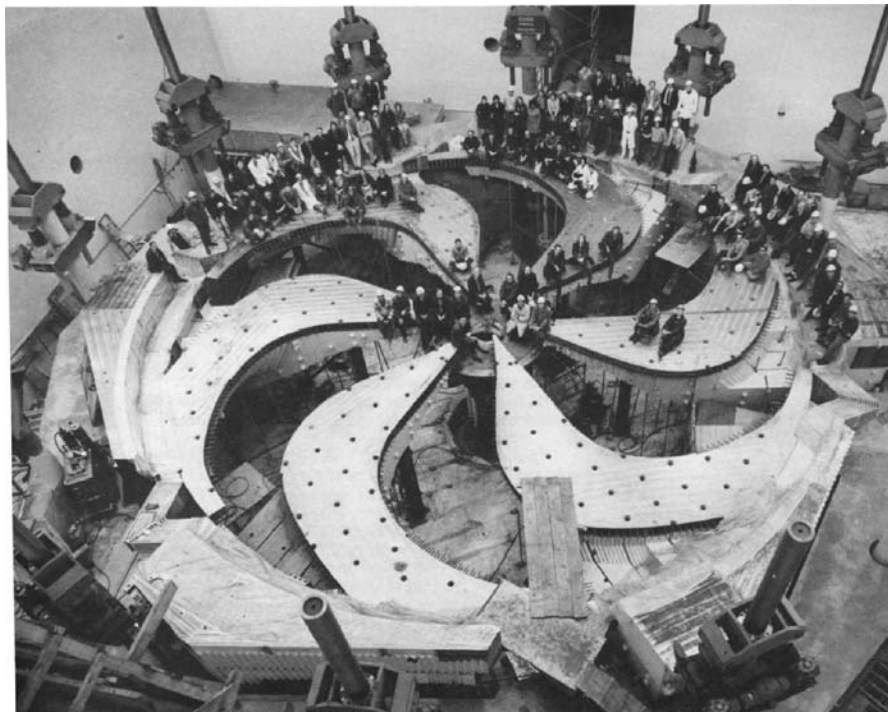


Рис. 6. Магнит циклотрона TRIUMF в процессе сборки

диоактивных. Создаваемые пучком 500-МэВ протонов в толстой мишени изотопы ускоряются сначала в RFQ (radiofrequency quadrupole) до энергии 2 кэВ/А, а затем в линейном ускорителе с трубками дрейфа до энергий 0,15–1,8 МэВ/А. Ускоренные ионы используются в астрофизических экспериментах. Линейный ускоритель работает в непрерывном режиме. Сооружается сверхпроводящий линейный ускоритель ISAC-II, в котором редкие изотопы будут ускоряться до энергий 6,5 МэВ/А [63].

11. Циклотроны Лаборатории RIKEN (Япония)

1) AVF-циклотрон — четырехсекторный компактный циклотрон. Сооружен в 1987–1989 гг., ускоряет легкие многозарядные ионы, а также протоны и дейтроны до энергий 5–14 МэВ/А с интенсивностями $3 \cdot 10^{12}$ – $6 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Большую часть времени используется как циклотрон-инжектор в кольцевой циклотрон RRC.

2) Кольцевой циклотрон RRC [64] сооружен в 1980–1986 гг. В качестве инжектора вначале использовался линейный ускоритель RILAC, а в настоящее время — как AVF-циклотрон, так и RILAC.

Ускоряет протоны (энергия 210 МэВ, интенсивность $2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$), дейтроны, ^{12}C и ^{20}Ne (энергия 135 МэВ/А, интенсивность $1,3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$), ^{40}Ar (энергия 24 и 95 МэВ/А, интенсивность $1,3 \cdot 10^{13}$ и $4 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$) и ^{136}Xe (энергия 26 МэВ/А, интенсивность $6 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$). Работает 6700 ч/год, 50 % времени используется для фундаментальных исследований в области ядерной физики, биологии, радиохимии и атомной физики. Большая часть времени посвящается экспериментам с пучками радиоактивных ионов, производимых в сепараторе RIPS (projectile-fragment separator).

В 1995 г. стартовал проект фабрики пучков радиоактивных ионов RIBF. Цель проекта — расширение диапазона масс радиоактивных ионов. Комплекс RILAC–RRC используется в качестве инжектора для RIBF. Дополнительно планируется построить промежуточный кольцевой циклотрон IRC, кольцевой циклотрон с фиксированной частотой fRC и сверхпроводящий кольцевой циклотрон SRC.

3) IRC-циклотрон — четырехсекторный кольцевой циклотрон. Четыре его секторных магнита общим весом 2800 т были установлены на площадке Лаборатории RIKEN в сентябре-октябре 2003 г. [64]. Три высокочастотных резонатора (два основных и один flat-top) были установлены и соединены с вакуумными камерами секторных магнитов в августе 2004 г.

IRC является четвертым ускорителем в каскаде ускорителей фабрики пучков радиоактивных ионов RIBF. Его наладку с пучком планировалось начать в 2006 г.

4) Кольцевой циклотрон с фиксированной частотой fRC [64]. Четырехсекторный циклотрон fRC располагается между RRC и IRC; предназначен для доускорения пучков очень тяжелых ионов, таких как ксенон и уран, до энергии 50,7 МэВ/А. На рис. 7 показана схема каскада ускорителей фабрики пучков RIBF.

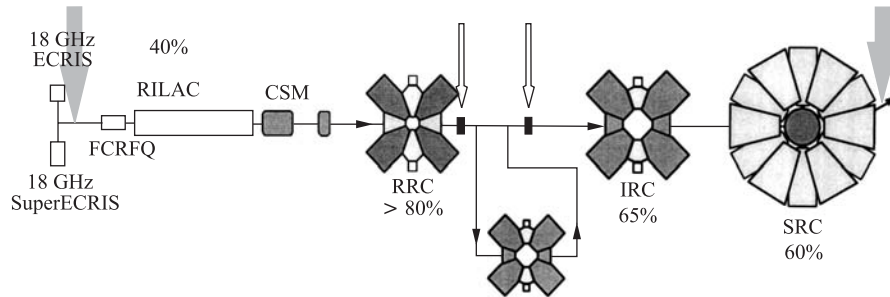


Рис. 7. Схема каскада ускорителей RIBF

С целью экономии расходов частота ускоряющего напряжения в fRC фиксирована (не перестраивается при ускорении различных ионов; это значит, что все ускоряемые в этом ускорителе ионы должны иметь почти одну и ту

же величину отношения электрического заряда к массе $q/m \cong \text{const}$). Как видно из рис. 7, среднетяжелые ионы (ниже ксенона) обдираются до высокого зарядового состояния до инъекции в RRC, ускоряются в нем до энергии 46,3 МэВ/А и направляются прямо в IRC. Для очень тяжелых ионов это сделать невозможно, поэтому они ускоряются в RRC только до 11 МэВ/А, а недостающую энергию получают в fRC.

5) Сверхпроводящий кольцевой циклотрон SRC (Superconducting Ring Cyclotron) — последний в каскаде фабрики RIBF. Он должен ускорить 88-зарядные ионы урана-238 до энергии 350 МэВ/А. Это будет первый в истории сверхпроводящий кольцевой циклотрон с величиной $K = 2600$ МэВ. Его магнит состоит из шести секторных магнитов (рис. 8). Максимальное магнитное поле в секторе 3,8 Тл. Общий вес магнита 8300 т. Наружный диаметр равен 19 м, высота 8 м. Изготовлен и собран на месте фирмами «Hitachi» и «Mitsubishi». В циклотроне будут установлены 4 резонатора. Система инъекции включает специальный сверхпроводящий магнит. Фабрика пучков радиоактивных ионов [65], которая сооружается в Лаборатории RIKEN, является высококлассной установкой, предназначенной для производства пучков ионов радиоактивных изотопов.

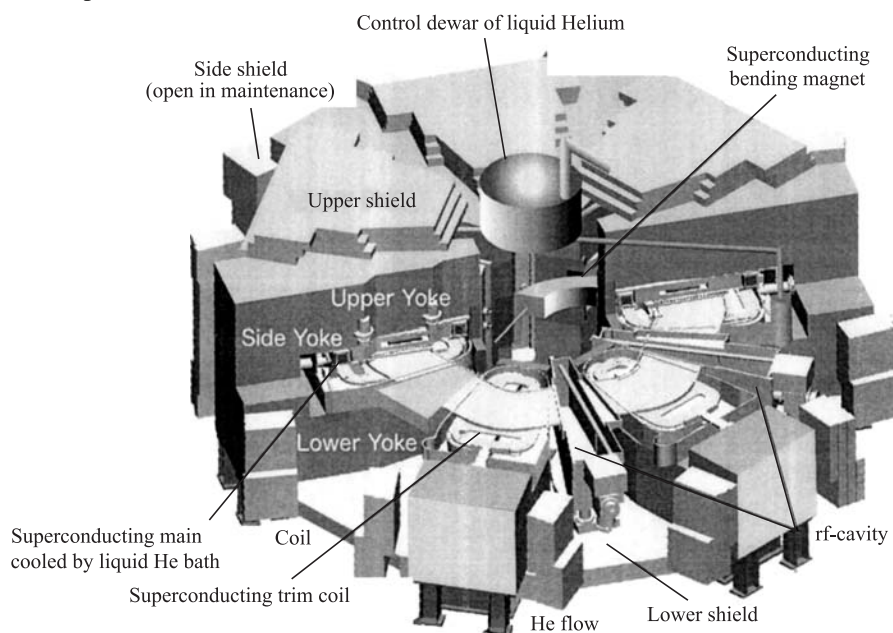


Рис. 8. Магнит SRC

Этот новый каскад циклотронов, инжектором в который является действующий кольцевой циклотрон RRC, увеличит энергию легких ионов до

440 МэВ/А и очень тяжелых ионов до 350 МэВ/А в магнитном поле 3,8 Тл. Пуск RIBF состоялся в 2006 г. Были ускорены ионы $^{238}\text{U}^{86+}$ до энергии 345 МэВ/А.

3.2 Циклотроны для прикладных применений. В этом пункте дано краткое описание некоторых специализированных циклотронов для практических применений, сведения о которых были доступны автору.

Уже на одном из первых циклотронов (см. [1, гл. 1]) проводились эксперименты по использованию пучка ускоренных в циклотроне частиц для целей, не связанных с ядерно-физическими исследованиями. Пучок дейтронов с энергией 13 МэВ использовался для генерации нейтронов, применявшихся для лечения онкологических заболеваний [66].

Гарвардский циклотрон, построенный в 1949 г. для ядерной физики, сыгравший заметную роль в Манхэттенском проекте, в последнее десятилетие (до 2002 г.) использовался для протонной терапии.

В 70-х гг. прошлого века на циклотронах, созданных для ядерно-физических исследований, начали проводить исследования в области биологии, медицины, материаловедения и др. Исследования в области протонной терапии проводились на синхроциклотронах в Орсе (Франция), Дубне, Гатчине и на циклотронах.

На некоторых из них (фазотрон, TRIUMF, PSI) и в настоящее время продолжается эта работа. Коммерческие фирмы «Scanditronix», «Thomson», «Cyclotron Corporation», а несколько позже IBA, EBSCO, «Sumitomo» также наладили выпуск циклотронов для производства медицинских радиоизотопов и протонной терапии.

Ниже приводится краткое описание некоторых специализированных циклотронов, используемых для медицинских и других приложений.

1. *Циклотрон C-230, производство фирмы IBA.* Ускоряет протоны до энергии 230 МэВ, интенсивность 300 нА. Установлен в Массачусетском госпитале, Бостон (США) [67].

Используется для протонной терапии с конца 2001 г. Поскольку циклотрон ускоряет протоны до фиксированной энергии, для регулирования энергии используется углеродный замедлитель. Одним из недостатков ускорителя является низкая эффективность вывода (20%). За 3 года лечение прошли примерно 1000 пациентов. Циклотрон, использующийся в госпитале, должен иметь высокую степень автоматизации и стабилизации параметров циклотрона и пучка за счет обратных связей. За время эксплуатации многие компоненты циклотрона были заменены с целью повышения надежности, которая к настоящему времени (2004 г.) приблизилась к 95%. Существенное улучшение стабильности было достигнуто за счет замены масляных диффузионных насосов вакуумной системы на криогенные насосы. Стабильность амплитуды ускоряющего напряжения все еще недостаточна.

2. *Циклотроны в Лаборатории iThemba (ЮАР) [68].* В Лаборатории iThemba (прежнее наименование National Accelerator Centre), расположенной вблизи Кейптауна, работают 3 циклотрона — 2 компактных циклотрона-инжектора SPC1 и SPC2 и кольцевой циклотрон SSR.

SPC1 ускоряет протоны до энергии 3,15 МэВ с интенсивностью $2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ и до 8 МэВ (интенсивность $8 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$), а также дейтроны (1,9 МэВ, $1,9 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$) и гелий (2,5 МэВ, $9,3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$). Запущен в 1983 г.

SPC2 ускоряет $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (энергия 0,36 МэВ/А, интенсивность $9,3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$) и $^{129}\text{Xe}^{22+}$ (энергия 0,32 МэВ/А, интенсивность $5,7 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$).

SSR ускоряет протоны (200 МэВ, $1,87 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ и 66 МэВ, $6,24 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$), $^{129}\text{Xe}^{22+}$ (энергия 6,1 МэВ/А, интенсивность $1,4 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$).

Протоны, ускоренные в кольцевом SSR-циклотроне до энергии 66 МэВ (при инжекции из SPC1), используются для производства радионуклидов и для нейтронной терапии. Протонная терапия осуществляется протонным пучком с энергией 200 МэВ, ускоренным в том же SSR-циклотроне. Могут быть получены также низкоинтенсивные пучки легких и тяжелых ионов, в том числе поляризованные протоны, для ядерно-физических исследований. Циклотроны работают почти непрерывно (время работы SSR ~ 8400 ч/год).

Проводится модернизация циклотронов и линий транспортировки пучков для увеличения интенсивности пучка, используемого в производстве радионуклидов. В том числе создаются flat-topping системы как для инжекторного циклотрона, так и для кольцевого циклотрона. Ожидается, что после установки этих систем, а также дополнительного банчера в линии транспортировки пучка от инжектора к кольцевому циклотрону интенсивность выведенного из SSR 66-МэВ пучка будет увеличена до 400 мкА (сейчас 100 мкА). Кроме того, планируется увеличить количество мишеней и построить новые каналы пучков для увеличения производства радиоизотопов. Рассматривается предложение о приобретении коммерческого циклотрона для протонной терапии с целью увеличения ежегодного количества пациентов с 50 до 1500.

3. *Медицинский циклотрон Университета Вашингтонского медицинского центра в Сиэтле (США) [69].* Компактный трехсекторный циклотрон с регулируемой энергией производится фирмой «Scanditronix». Максимальная энергия протонов 50,5 МэВ, интенсивность выведенного пучка 80 нА.

Его главная цель — производить 50,5-МэВ протонный пучок для генерации быстрых нейтронов, использующихся в радиационной терапии рака.

Терапия осуществляется в палате, оборудованной изоцентрическим гантри (устройством для вращения пучка вокруг пациента) с многолепестковым коллиматором длиной 65 см. Нейтроны генерируются протонным пучком, падающим на бериллиевую мишень. Вторая палата с фиксированным горизонтальным пучком используется для исследования характеристик нейтронного пучка и радиологических экспериментов. Кроме того, протонный пучок ис-

пользуется для получения экспериментальных (новых) ПЕТ (positron emission thomography) радионуклидов.

В частности, начато экспериментальное производство изотопа ^{211}At (с использованием 28-МэВ пучка альфа-частиц). Обычные ПЕТ-изотопы производятся на новом циклотроне STI Eclipse (11-МэВ протоны, 50–100 мкА, компактный, трехсекторный).

Нейтронная терапия используется, в первую очередь, для лечения опухолей слюнных желез. Это сравнительно редкое заболевание, однако более 70 % пациентов попадает в эту категорию. Нейтроны используются также для лечения некоторых типов сарком и меланом, рака легких, почек и др.

Последние несколько лет число пациентов составляло 90 человек в год. Общее число пациентов за 20 лет равно 2731. Оборудование работает надежно, отказы не превышают 2 %, количество отмененных из-за отказа оборудования сеансов менее 1 %.

4. *Циклотрон NIRS-930 Национального института радиологии (NIRS), Чикаго (Япония)* [70]. Компактный четырехсекторный циклотрон с внешней аксиальной инжекцией от ECR-источника использует также внутренний источник PIG. Диаметр полюсов 2,15 м. Изготовлен фирмой «Thomson-CSF» в 1973 г. Ускоряет протоны до энергий 6–70 МэВ/А ($1,2 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$), дейтроны (6–25 МэВ/А, $2 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$), ^3He (6–48 МэВ/А, $3 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$), ^4He (6–25 МэВ/А), а также $^{12}\text{C}^{4+}$ (6–12 МэВ/А).

Кроме циклотрона NIRS-930 в лаборатории находится также небольшой циклотрон HM-18 фирмы SHI (Sumitomo Heavy Ions), который ускоряет протоны до 18 МэВ и дейтроны до 9 МэВ. Имеется также 9 экспериментальных каналов выведенных пучков. NIRS-930 использовался для производства новых короткоживущих радионуклидов, биофизических исследований и разработки и исследования (калибровки) детекторов для космических применений. Лечение меланомы глаза, осуществлявшееся в течение 18 лет, прекращено в конце 2003 г.

Циклотрон HM-18 работал непрерывно, производя короткоживущие ПЕТ-радионуклиды. В связи с тяжелоионной терапией на медицинском ускорителе тяжелых ионов HEIMAC [71] в Чикаго производившиеся радиоизотопы, такие как ^{11}C , ^{15}O , ^{18}F , использовались, главным образом, в нейропсихофармакологии и диагностике рака. ^{11}C и ^{18}F регулярно производились для исследования эффективности терапии рака на HEIMAC. Меченные углеродом ^{11}C фармацевтические препараты производились и использовались для диагностики шизофрении, депрессий, болезни Альцгеймера. Для измерения спектра нейтронов от нескольких до 100 МэВ на полетных высотах для защиты экипажей был разработан специальный phoswich нейтронный детектор, позволяющий отличать протоны и альфа-частицы от нейтронов по форме импульса. Детекторы калибровались 70-МэВ протонами от NIRS-930.

5. *Циклотроны TR30/15 и TR13 фирмы «EBCO Industries Ltd, Richmond, B.C.» (Канада) [72, 73].* Расширяющийся рынок радиоизотопов нуждается в новом поколении циклотронов, разработанных специально для этой цели. TRIUMF в кооперации с компанией EBCO разрабатывает и сооружает такой циклотрон. Это четырехсекторный H^- -циклотрон с multiCUSP-ионным источником на 5 мА (при энергии 25 кэВ), ускоряющий H^- -ионы до энергии 30 МэВ. Вывод пучка протонов за счет перезарядки на углеродной фольге толщиной 200 мкг/см² обеспечивает два высокоинтенсивных пучка с регулируемой энергией от 15 до 30 МэВ с интенсивностью каждого пучка до 200 мкА.

Диаметр полюсов магнита циклотрона TR30 \sim 160 см. Магнитное поле в холме 1,9 Тл, в долине — 0,58 Тл. Два ускоряющих дуанта расположены в противоположных долинах. В четырех вертикальных отверстиях в ярме располагаются четвертьволновые коаксиальные линии для настройки дуантов на резонансную частоту 74 МГц (4-я гармоника). Напряжение на дуантах 50 кВ. Один из таких циклотронов установлен в 1993 г. в Институте ядерно-энергетических исследований (INER, Тайвань) и используется для производства и снабжения госпиталей Тайваня радиоизотопами, такими как галлий-201, галлий-67 и фтор-18.

Циклотрон TR13 для производства PET-изотопов работает в Лаборатории TRIUMF с 1989 г. Ускоряет H^- -ионы до энергии 13 МэВ с интенсивностью 100 мкА. Протонный пучок выводится в двух направлениях с помощью перезарядных фольг с эффективностью 99 %.

6. *Циклотрон ЦИТРЕК для производства мембран [74].* Циклотрон разработан и изготовлен Лабораторией ядерных проблем ОИЯИ для фирмы «Traskpore Technolodgy» в 2001–2002 гг. Предназначен для облучения ионами $^{84}Kr^{17+}$ или $^{40}Ar^{8+}$ с энергией 2,4 МэВ/А полимерной пленки, которая затем используется для производства фильтров, применяемых в медицине и промышленности. В августе 2002 г. из циклотрона был выведен 200-нА пучок ионов аргона с эффективностью 50 %.

ЦИТРЕК — четырехсекторный компактный циклотрон (рис. 9) с внешней аксиальной инжекцией от ECR-источника производства НИИЭФА. Диаметр полюсов магнита 160 см, среднее поле 1,48 Тл, вес магнита 83 т, потребляемая мощность 25 кВт. Для ускорения используются два 45° дуанта с напряжением 50 кВ, настраиваемых на резонансную частоту 18,26 МГц (4-я гармоника) четвертьволновыми коаксиальными линиями. Суммарная потребляемая высокочастотная мощность равна 17 кВт.

Вывод пучка осуществляется двумя электростатическими дефлекторами и пассивным магнитным каналом. Канал транспортировки выведенного пучка к облучательной установке включает в себя сканирующий магнит, перемещающий пучок поперек движущейся со скоростью 0–80 см/с полимерной пленки.

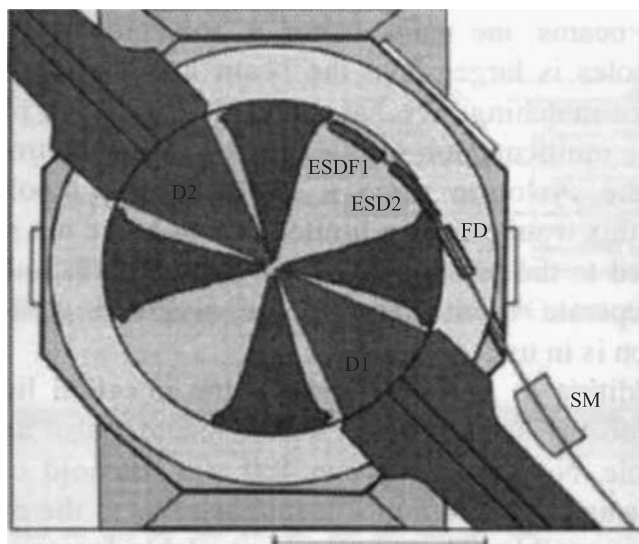


Рис. 9. План циклотрона ЦИТРЕК: ESD1, ESD2 — электростатические дефлекторы; FD — фокусирующий канал; D1, D2 — дуанты; SM — отклоняющий магнит

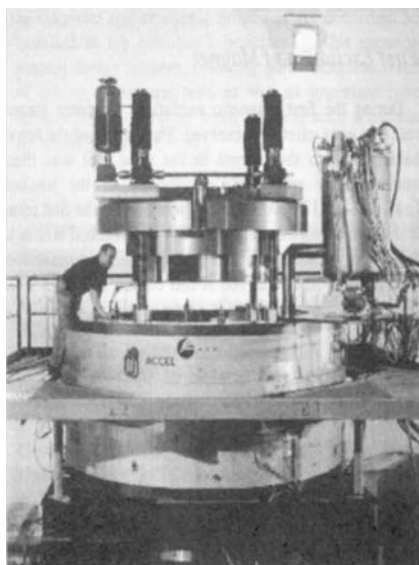


Рис. 10. Циклотрон ACCEL

7. *Сверхпроводящий 250-МэВ медицинский циклотрон ACCEL* [75]. Сверхпроводящий циклотрон для протонной терапии разрабатывался с 2001 г. фирмой ACCEL в сотрудничестве с NSCL MSU. В последние годы два таких циклотрона были изготовлены и установлены у заказчиков. Один из них (рис. 10) установлен весной 2004 г. в лаборатории института PSI (Виллиген, Швейцария) в рамках проекта PROSCAN. Второй — в центре протонной терапии (RPTC) в Мюнхене (Германия).

Основные параметры циклотрона: изохронный компактный сверхпроводящий четырехсекторный, общий вес 90 т, наружный диаметр 3,1 м, энергия 250 МэВ, интенсивность выведенного пучка 500 нА, магнитное поле в центре

2,4 Тл, мощность криогенераторов 40 кВт, частота ускоряющего напряжения 72,8 МГц (2-я гармоника), число дуантов — 4, потребляемая ВЧ-мощность 100 кВт, внутренний источник протонов с холодным катодом; система вывода состоит из двух электростатических дефлекторов и нескольких магнитных элементов.

Для охлаждения установленного в PSI циклотрона потребовалось около одной недели, 1400 л жидкого азота для достижения температуры жидкого азота и 1000 л жидкого гелия для достижения температуры жидкого гелия.

8. *Циклотрон JAERY (Такасаки, Япония) для производства микропучков тяжелых ионов* [76]. Тяжелоионные пучки с энергией в сотни МэВ являются превосходным инструментом в биотехнологии. Они обладают высокой линейной передачей энергии вдоль ионного трека в изучаемом веществе. Проходя через клетку, тяжелый ион вызывает сильные повреждения ДНК, заключенной в ядре клетки, таким образом можно исследовать отклик клетки на облучение. Для этих целей нужен тяжелоионный пучок диаметром меньше 1 мкм с энергетическим разбросом $2 \cdot 10^{-4}$.

AVF-циклотрон JAERY — компактный четырехсекторный циклотрон, ускоряющий ионы от гелия-4 до золота-197 с энергиями 2,5–18 МэВ/А.

Чтобы довести качество пучков до требуемых значений, осуществляется программа модернизации систем ускорителя. Для уменьшения энергетического разброса в ускоряющую систему введена, наряду с основной, пятая гармоника ускоряющего напряжения. При этом в «эффективном» ускоряющем напряжении образуется плоская вершина, обеспечивающая постоянный (с точностью $2 \cdot 10^{-4}$) набор энергии частицами ступка с фазовой протяженностью 10° .

Чтобы исключить скольжение фазы ступка в процессе ускорения, флуктуации магнитного поля во времени не должны превышать $2 \cdot 10^{-5}$. Это было достигнуто стабилизацией температуры ярма магнита. Была также модернизирована центральная область ускорителя таким образом, чтобы фазы захватываемых в ускорение ионов не выходили за пределы 8-градусной плоской вершины ускоряющего напряжения. За счет этих мер увеличилось расстояние между орбитами в зоне вывода, так что стал возможным однооборотный вывод ускоренных частиц, что является непременным условием достижения требуемого энергетического разброса $2 \cdot 10^{-4}$. Тестовые испытания с 260-МэВ пучком $^{20}\text{Ne}^{7+}$ показали, что диаметр пучка составляет 10–30 мкм. Работы по уменьшению диаметра пучка продолжаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

78 лет тому назад (1930 г.) был изобретен классический (conventional) циклотрон. Более 70 лет назад (1937 г.) был построен классический (37-дюймовый) циклотрон, который стал удобным, надежным, универсаль-

ным поставщиком снарядов, позволяющих не только изучать строение ядра, но и превращать одни химические элементы в другие. Он был простым и дешевым и, главное, управляемым инструментом, ответившим на потребность родившейся науки — ядерной физики. С его помощью можно было ускорять разные (правда, только легкие) снаряды — протоны, дейтроны и α -частицы — до разных энергий в необходимом количестве (до 10^{15} с⁻¹).

Еще через десять лет, в 1947 г. был создан синхроциклотрон, увеличивший энергию этих снарядов до сотен МэВ, а еще через несколько лет — синхротрон (энергия 3–10 ГэВ). Эти ускорители — своего рода микроскоп, позволяющий разглядеть устройство и свойства частиц, из которых состоит ядро (нуклонов), и других, которые удерживают нуклоны в ядре. Так появились на свет дети (синхроциклотроны) и внуки (синхротроны) циклотрона.

Сам циклотрон тоже не стоял на месте, продолжая совершенствоваться и расширять свои возможности. Сначала он преодолел присущее ему ограничение энергии из-за релятивистского роста массы ускоряемой частицы. В 1958 г. появился (в Делфте, Нидерланды) первый циклотрон с азимутальной вариацией, а в 1959 г. (в Дубне, СССР) — первый циклотрон с пространственной вариацией (спиральной) магнитного поля — изохронные циклотроны, энергия которых не ограничивается релятивистским возрастанием массы. Затем, в начале 1960-х гг. циклотрон начал увеличивать ассортимент ускоряемых снарядов, ускоряя все более и более тяжелые ионы. Первые специализированные ускорители тяжелых ионов появились в начале 1960-х гг. К концу 2000 г. стало возможным ускорять ионы всех существующих элементов вплоть до урана. Как энергия, так и интенсивность ускоряемых ионов постоянно увеличиваются. Главные средства на этом пути:

- 1) циклотронные комплексы (каскады), количество циклотронов в каскаде постоянно увеличивается;
- 2) сверхпроводящие магниты;
- 3) ECR-источники многозарядных ионов.

Каскадная схема ускорения тяжелых ионов позволила довести энергию ускоренных ионов урана-238 до 350 МэВ/нукл. Как и в начале пути, за повышение энергии приходится расплачиваться уменьшением интенсивности. Основной проблемой здесь является переход из ступени в ступень, т. е. эффективность вывода пучка из предыдущей ступени и эффективность инжекции в следующую ступень.

Последний (введенный в действие в 2006 г.) циклотронный комплекс RIBF (RIKEN, Япония) состоит из шести ступеней. Суммарная эффективность пока не превышает 1 %, есть над чем работать и что изобретать.

Расширяется область применения циклотронов. Рожденные как инструменты ядерной физики, они уже нашли применение в медицине (как в диагностике, так и в терапии), в материаловедении. Исследуются возможности использования циклотронов в космических исследованиях, в изменении струк-

туры материалов (нанотехнологии), в генетике, в контроле за перемещением ядерных материалов и взрывчатых веществ.

Новая страница в ядерной физике может быть открыта ускорением в циклотронах пучков радиоактивных ионов.

Получение на мезонных фабриках пучков ускоренных протонов мощностью в 1 МВт открывает потенциальную возможность использования этих пучков для трансмутации радиоактивных отходов ядерных реакторов и для управления подкритическими ядерными сборками.

В 2010 г. в Ланьчжоу в Китае будет проведена 19-я Международная конференция по циклотронам и их применениям. Есть надежда услышать на ней сообщения о новых применениях циклотронов и о новых «внуках» старых (но все еще молодых) циклотронов.

В заключение автор выражает свою признательность и благодарность Г. Г. Казаковой за подготовку рукописи этого обзора и Б. Н. Гикалу за критические замечания, особенно по п. 3.1 (7), в котором описаны циклотроны ЛЯР.

Приложение 1 КОНФЕРЕНЦИИ ПО ЦИКЛОТРОНАМ

Номер	Место	Год	Организатор	Число участников	Количество циклотронов
1	Исландия	1959	ORNL	85	14
2	Лос-Анджелес	1962	UCLA	139	21
3	Женева	1963	CERN	146	42
4	Гатлинбург	1966	ORNL	224	61
5	Оксфорд	1969	AERE Harwell	202	72
6	Ванкувер	1972	TRIUMF	195	70+17FM*
7	Цюрих	1975	SIN	231	74+14FM*
8	Блумингтон	1978	IUCF	205	95+14FM*
9	Кан	1981	GANIL	225+GANIL персон.	106+11FM*
10	Ист-Лансинг	1984	MSU	222	111+11FM*
11	Токио	1986	INS, RIKEN, RCNP	206	131+12FM*
12	Берлин	1989	HMI	213	131+9FM*
13	Ванкувер	1992	TRIUMF	241	199+7FM*+4C/B
14	Кейптаун	1995	NAC	204	202+5FM*+4C/B
15	Кан	1998	GANIL	240	209+4FM*
16	Ист-Лансинг	2001	MSU	185	85+3FM*
17	Токио	2004	RIKEN	210	91+3FM*
18	Сицилия	2007	LNS	241	87+3FM*

*FM — синхротроны; C/B — кулеры/бустеры.

Приложение 2 ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЦИКЛОТРОНОВ

В столбце 1 указан номер циклотрона в списке циклотронов конференции «Cyclotrons 2004».

В столбце 3 указаны: тип магнита (разделенные секторы (раздел. сект.) или цельный магнит с круглым полюсом (компакт.); сверхпроводящий магнит (сверхпрров.); диаметр полюса D и (или) радиус вывода R_e в метрах; число секторов N ; угол спиральности α (если сектора прямые, $\alpha = 0$); вертикальный зазор в секторе h и в долине v в метрах (для раздельно-секторных циклотронов $v = \infty$).

В столбце 7 указаны: тип инжекции — внутренний источник или внешняя инжекция (аксиальный или радиальный); тип источника (ECR, CUSP, multiCUSP — для аксиальной инжекции или название циклотрона-инжектора); тип поворотного устройства для аксиальной инжекции — электростат. инжектор; напряжение на источнике ионов в кВ или энергия инжекции в МэВ/нукл.; эффективность инжекции — отношение величины захватываемого в ускорение тока к току инжектора.

В столбце 8 указаны компоненты системы вывода: обдир. фольга — перезарядная фольга; электростат. дефл. — электростатический дефлектор и напряжение на нем или напряженность электрического поля; магн. канал — магнитный канал и средняя эффективность вывода. Иногда указывается область применения.

Номер	Страна, город, институт, название циклотрона, год пуска	Тип магнита, $D_{\text{пол}}, R_{\text{ext}}, N, \alpha, h_M/v_M$	Ускоряемые ионы, зарядность	Макс. энергия, МэВ/нукл., или диапазон	Макс. интенсивность, с^{-1} или мкА, нА	Тип инжекции, инжектор, энергия, эффектив.	Элементы системы вывода, эффективность
C01	Бельгия Лувен-ля-Нев UCL Cyclone 110 1972	Компакт. $D=2,15, R=0,92$ $N = 4, \alpha = 53^\circ$ 0,165/0,405	p тяжелые ионы радиоактивные ионы	20–75 2,3–27 0,6–27 0,6–5	$2 \cdot 10^{14}$ $2 \cdot 10^{14}$ $1 \cdot 10^{13}$ $1 \cdot 10^9$	1. Внутренний (p, d) 2. Аксиальный (тяж. ионы) ECR 6–15 кВ 5–20%	Электростат. дефл. Магн. канал 60%

Продолжение табл.

Номер	Страна, город, институт, название циклотрона, год пуска	Тип магнита, $D_{\text{пол}}, R_{\text{ext}}, N, \alpha, h_M/v_M$	Ускоряемые ионы, зарядность	Макс. энергия, МэВ/нукл., или диапазон	Макс. интенсивность, с^{-1} или мкА, на	Тип инжекции, инжектор, энергия, эффектив.	Элементы системы вывода, эффективность
C03	Канада Ванкувер TRIUMF TRIUMF 1974	Сект. фок., $D = 17,$ $R_c = 3,8-19$ $N = 6, \alpha = 70^\circ$ $0,528/\infty$	Выводимые ионы p^+ p^+ $p_{\text{пол}}$	65–115 180–520 180–520	210 мкА 100 мкА 25 мкА	Аксиальный $R_i = 0,25 \text{ м}$ 300 кэВ 1. CUSP 2. Polaris IS 95 %	Обдир. фольга 99, 95 %
C05	Китай Ланьчжоу IMP HIRFL 1988	Раздел. сект. $7,17, R = 3,2$ $N = 4, \alpha = 0$ $0,1/\infty$	^{12}C ^{22}Ne ^{36}Ar ^{136}Xe	80 70 69 15	$4,2 \cdot 10^{11}$ $2,0 \cdot 10^{11}$ $1,1 \cdot 10^{11}$ $2 \cdot 10^9$	Радиальный $R_i = 1 \text{ м}$ SFC- циклотрон 30–40 %	Электростат. канал; магн. канал; откл. магн. 35–45 %
C06	Чехия Ржеж Nucl. Phys. Inst. U-120M 1977	Компакт. $D = 1,2, R_e = 0,5$ $N = 4, \alpha = 70^\circ$ $0,08/0,12$	p H^- D^+ $^3\text{He}^{2+}$ $^4\text{He}^{2+}$	10–37 10–37 6–10 6–18 6–10	$6 \cdot 10^{14}$ $1,6 \cdot 10^{14}$ $4 \cdot 10^{14}$ $1,3 \cdot 10^{14}$ $1,3 \cdot 10^{14}$	Внутр. PIG внешн. CUSP 10–30 кВ 6 %	3 электростат. дефл. обдир. фольга (для H^-) 25/99 %

Продолжение табл.

Номер	Страна, город, институт, название циклотрона, год пуска	Тип магнита, $D_{\text{пол}}, R_{\text{ext}}, N, \alpha, h_M/v_M$	Ускоряемые ионы, зарядность	Макс. энергия, МэВ/нукл., или диапазон	Макс. интенсивность, с^{-1} или мкА, на	Тип инжекции, инжектор, энергия, эффективность	Элементы системы вывода, эффективность
C07	Финляндия Ювяскюля Университет К-130 1992	Компакт. $D = 2,4, R_e = 0,94$ $N = 3, \alpha = 58^\circ$ 0,174/0,330	$p(\text{H}^-)$ Ag Ni Kr	45 5 4,7 9,4	$6,2 \cdot 10^{14}$ $2,7 \cdot 10^{13}$ $2,8 \cdot 10^{12}$ $2,2 \cdot 10^{12}$	Аксиальный 1. ECR 2. MultCUSP 0–20 кВ 30–70 %	Электростат. дефл. электромагн. канал обдир. устр. (для H^-) 70–100 % 100 %
C10	Франция Кан GANIL C-02 1982	Компакт. $R_e = 0488$	^{12}C ^{238}U	1 0,3	$5 \cdot 10^{13}$ $1 \cdot 10^{11}$	Аксиальный 25 кВ ECR Muller инфл. 25 %	Электростат. дефл. электростат. квадруполь 90 %
C11	Франция Кан GANIL SSC-1 1982	Раздел. сектора $D = 6, R_e = 3$ $N = 4, \alpha = 0$ 0,01/ ∞	^{12}C ^{238}U	13,7 5,5	$2 \cdot 10^{13}$ $5 \cdot 10^{10}$	Радиальный 1 МэВ Инфл. + 4 магн. канала, C02- циклотрон 100 %	Электростат. дефл. 4 магн. канала 90 %

Продолжение табл.

Номер	Страна, город, институт, название циклотрона, год пуска	Тип магнита, $D_{\text{пол}}, R_{\text{ext}}, N, \alpha, h_M/v_M$	Ускоряемые ионы, зарядность	Макс. энергия, МэВ/нукл., или диапазон	Макс. интенсивность, с^{-1} или мкА, нА	Тип инжекции, инжектор, энергия, эффективность	Элементы системы вывода, эффективность
C14	Германия Юлих IKR Julic 1968	Цельн. классич. $D = 3,3$ $R_e = 1,54$ $N = 3, \alpha = 0$ $0,084/0,24$	H_2^+ H^- H^- polaris	22,5–45 22,5–45 22,5–45	10 мкА 10 мкА 1 мкА	Аксиальный $R_i = 0,03$ MultiCUSP 4,5 кВ/ H^- 30 %	Электростат. дефл.+ магн. канал. 60 %
C15	Германия Берлин HMI ISL (Viesi) 1972	Раздел. сект. $D = 1,71,$ $R_e = 1,71$ $N = 4, \alpha = 0$ $0,06/\infty$	p ^{12}C ^{40}Ar ^{129}Xe	72 4–32 1,3–13 2,0–4,5	0,5 p мкА 0,5–0,01 0,1–0,001	Радиальный 2 магн. элек- тростат. инфл. $R_i = 0,43$ 70 %	Электростат. дефл.+ септум. магн. 100 %
C18	Италия Катания LNS SC Cyclotron 1994	Сверхпров. компакт. $D = 1,8, R_e = 0,87$ $N = 3, \alpha = 69^\circ$ $0,086/0,916$	H_2^+ $^{13}\text{C}^{4+}$ $^{58}\text{Ni}^{19+}$ $^{112}\text{Sn}^{31+}$ $^{197}\text{Au}^{36+}$	80 45 45 43,5 23	5 e нА 700 e нА 10 e нА 5 e нА 5 e нА	Аксиальный ECR $R_i = 0,018$ 26 кВ 36 %	2 электростат. дефл. 7 магн. кана- лов 30 %
C20	Япония Такасаки JAERI AVF Cyclotron 1991	Компакт. $D = 2,15$ $R_e = 0,92$ $N = 4, \alpha = 53^\circ$ $0,166/0,405$	H^+ $^{12}\text{C}^{5+}$ $^{40}\text{Ar}^{13+}$ $^{129}\text{Xe}^{23+}$ $^{197}\text{Au}^{31+}$	90 18,3 11,5 3,5 2,5	10 e мкА 1,0 0,045 0,20 0,038	Аксиальный MultiCUSP 3–20 кВ	Электростат. канал. электроманг. канал 60 %

Продолжение табл.

Номер	Страна, город, институт, название циклотрона, год пуска	Тип магнита, $D_{\text{пол}}, R_{\text{ext}}, N, \alpha, h_M/v_M$	Ускоряемые ионы, зарядность	Макс. энергия, МэВ/нукл., или диапазон	Макс. интенсивность, с^{-1} или мкА, на	Тип инжекции, инжектор, энергия, эффективность	Элементы системы вывода, эффективность
C22	Япония Ибараки RCNP Ring cyclotron 1991	Раздел. сект. $R_e = 4$ $N = 6, \alpha = 30^\circ$ $0,06/\infty$	p ^3He ^4He $^{18}\text{O}^{6+}$	420 150 100 60	$3 \cdot 10^{12}$ $2,5 \cdot 10^{12}$ $2,5 \cdot 10^{12}$ $3 \cdot 10^{11}$	Аксиальный AVF-циклотрон $R_i = 2$	2 электростат. дефл. 2 магн. канала 70 %
C23	Япония Вако RIKEN AVF Cyclotron 1989	Компакт. $D = 1,72,$ $R_e = 0,714$ $N = 4, \alpha = 50^\circ$ $0,128/0,300$	p D $^{12}\text{C}, ^{14}\text{N}$ ^{40}Ar	4–14,5 4–9,5 4–7 4,5–5,2	$6 \cdot 10^{13}$ $6 \cdot 10^{13}$ $1 \cdot 10^{13}$ $3 \cdot 10^{12}$	Аксиальный ECR 10 кВ $R_i = 0,016$ 20–30 %	Электростат. дефл. магн. канал 40 %
C24	Япония Вако RIKEN Ring Cyclotron 1986	Раздел. сект. $R_e = 3,56$ $N = 4, \alpha = 0$ $0,08/\infty$	p $D, ^{12}\text{C}$ ^{40}Ar ^{136}Xe	210 135 95 26	$2 \cdot 10^{11}$ $1-3 \cdot 10^{12}$ $4 \cdot 10^{11}$ $6 \cdot 10^{11}$	Радиальный 1. AVF-циклотрон 2. Linac $0,5/0,7$ МэВ/нукл. $R_i = 0,89$ 70 %	Электростат. канал магн. канал 80 %

Продолжение табл.

Номер	Страна, город, институт, название циклотрона, год пуска	Тип магнита, $D_{\text{пол}}, R_{\text{ext}}, N, \alpha, h_M/v_M$	Ускоряемые ионы, зарядность	Макс. энергия, МэВ/нукл., или диапазон	Макс. интенсивность, с^{-1} или мкА, на	Тип инжекции, инжектор, энергия, эффектив.	Элементы системы вывода, эффективность
С31	Россия Дубна ЛЯР, ОИЯИ У-400М 1991	Компакт. $D = 4, R_e = 1,75$ $N = 4, \alpha = 40^\circ$ 0,1/0,5	${}^7\text{Li}^{2+}$ ${}^{11}\text{B}^{3+}$ ${}^{12}\text{C}^{4+}$ ${}^{18}\text{O}^{5+}$ ${}^{40}\text{Ar}^{12+}$	35 32 47 33 40	$6 \cdot 10^{13}$ $4 \cdot 10^{13}$ $4 \cdot 10^{13}$ $2,5 \cdot 10^{13}$ $7 \cdot 10^{11}$	Аксиальный ЕСR 20 %	Обдир. фольга 70 %
С32	Россия Дубна ЛЯР, ОИЯИ У-400 1978	Компакт. $D = 4, R = 1,8$ $N = 4, \alpha = 0$ 0,042/0,3	${}^7\text{Li}^{+}$ ${}^{40}\text{Ar}^{5+}$ ${}^{48}\text{Ca}^{5+}$ ${}^{84}\text{Kr}^{8+}$ ${}^{208}\text{Bi}^{19+}$	8,6 7,2 5,4 3,0 3,4	$6 \cdot 10^{13}$ $5 \cdot 10^{12}$ $5 \cdot 10^{12}$ $6,3 \cdot 10^{11}$ $3,6 \cdot 10^{10}$	Аксиальный ЕСR 4М 20–60 %	Обдир. фольга 25–100 %
С39	ЮАР Кейптаун iThembaLab SSC 1985	Раздел. сект. $D = 4,43$ $N = 4, \alpha = 0$ 0,066/ ∞	p p ${}^{18}\text{O}^{4+}$ ${}^{129}\text{Xe}^{22+}$	200 66 4,7 6,1	$1,87 \cdot 10^{13}$ $6,24 \cdot 10^{14}$ $3,1 \cdot 10^{11}$ $1,4 \cdot 10^{10}$	Радиальный циклотрон- инжектор SPS 1,4–8 МэВ 100 %	2 сектум. магн. 99,8 %

Продолжение табл.

Номер	Страна, город, институт, название циклотрона, год пуска	Тип магнита, $D_{\text{пол}}, R_{\text{ext}}, N, \alpha, h_M/v_M$	Ускоряемые ионы, зарядность	Макс. энергия, МэВ/нукл., или диапазон	Макс. интенсивность, с^{-1} или мкА, нА	Тип инжекции, инжектор, энергия, эффективность	Элементы системы вывода, эффективность
C40	Швеция Упсала Svedberg Lab. Gustav Werner Cycl. 1951, 1986	Компакт. $D = 2,8, R = 1,17$ $N = 3, \alpha = 55^\circ$ $0,2/0,38$	p p $^{14}\text{N}^{7+}$ $^{129}\text{Xe}^{27+}$	178 98 45 8,33	$3 \cdot 10^{12}$ $4 \cdot 10^{13}$ $2 \cdot 10^{11}$ $1 \cdot 10^9$	Внутр. ист. PIG аксиальный ECR 5–10 %	Электростат. дефл. электромагн. канал регенератор 50 %
C41	Швейцария Виллинген PSI 590 МэВ Ring 1974	Раздел. сект. $D = 9, R = 4,45$ $N = 8, \alpha = 35^\circ$ $(0,05-0,09)/\infty$	p	590	2 мА	Радиальный инжектор 2 72 МэВ $R_i = 2,1$ 99,8 %	Электростат. канал септум. магн. 99,97 %
C42	Швейцария Виллинген PSI Injector 2 1984	Раздел. сект. $D = 7, R = 3,3$ $N = 4, \alpha = 0$ $0,035/\infty$	p	72 МэВ	2,2 мА	Радиальный 0,87 МэВ $R_i = 0,44$ 20 %	Электростат. дефл. + септум магн. 99,97 %
C44	Тайвань Longtan Iner TR 30/15 1993	Компакт. $D = 0,78$ $N = 4, \alpha = 0$ $0,05/0,18$	H^- D^-	15–30 8–15	0,500 мА 0,150 мА	Аксиальный CUSP 25 кэВ 20 %	Обдир. фольга 95 %

Продолжение табл.

Номер	Страна, город, институт, название циклотрона, год пуска	Тип магнита, $D_{\text{пол}}, R_{\text{ext}}, N, \alpha, h_M/v_M$	Ускоряемые ионы, зарядность	Макс. энергия, МэВ/нукл., или диапазон	Макс. интенсивность, с^{-1} или мкА, на	Тип инъекции, инжектор, энергия, эффективность.	Элементы системы вывода, эффективность
C45	США Milo Sampson Indiana Univ. Cyclotron 1975	Раздел. сект. $R_{\text{ex}} = 3,3,$ $N = 4, \alpha = 0$ $0,76/\infty$	H^+	205 МэВ	$3 \cdot 10^{13}$	Радиальный 0,75 МэВ $R_i = 1$ ECR 75 %	Электростат. дефл. + магн. дефл. 99 %
C46	США Детроит Harper Hospi- tal 1980	Сверхприв. компакт. $D = 1,3$ $N = 3, \alpha = 0$ $0,038/0,406$	D^+	485	15 мкА	Внутренний источник с холодным кагодом	Терапия
C47	США Беркли Lawrence Laboratory 88-inch Cycl. 1962	Компакт. $D = 2,24$ $R = 1,0$ $N = 3, \alpha = 55^\circ$ $0,19/03$	p $^{16}\text{O}^{6+}$ $^{40}\text{Ar}^{9+}$ $^{48}\text{Ca}^{10+}$ $^{86}\text{Kr}^{19+}$ $^{136}\text{Xe}^{28+}$ $^{238}\text{U}^{47+}$	1–55 10 5 6 5 5 4,1	$1,6 \cdot 10^{14}$ $2 \cdot 10^{13}$ $2 \cdot 10^{13}$ $2 \cdot 10^{12}$ $2 \cdot 10^{12}$ $6 \cdot 10^{12}$ $1,9 \cdot 10^9$	Аксиальный 2ECR 10–14 кВ 30–50 %	3 электростат. дефл. 60 %

Продолжение табл.

Номер	Страна, город, институт, название циклотрона, год пуска	Тип магнита, $D_{\text{пол}}, R_{\text{ext}}, N, \alpha, h_M/v_M$	Ускоряемые ионы, зарядность	Макс. энергия, МэВ/нукл., или диапазон	Макс. интенсивность, с^{-1} или мкА, на	Тип инжекции, инжектор, энергия, эффектив.	Элементы системы вывода, эффективность
C48	США Ист-Лансинг MSU K500 1982, 1998	Компакт. $D = 1,42$ $R = 0,66$ $N = 3, \alpha = 120^\circ$ $0,06/0,9$	$^{16}\text{O}^{3+}$ $^{40}\text{Ar}^{7+}$ $^{48}\text{Ca}^{8+}$ $^{86}\text{Kr}^{14+}$ $^{124}\text{Xe}^{20+}$ и др.	11 12 12 12 12	$4,7 \cdot 10^{12}$ $2,5 \cdot 10^{12}$ $29 \cdot 10^{11}$ $9,0 \cdot 10^{12}$ $6,0 \cdot 10^{10}$	Аксиальный ECR 30 кВ max 25 %	2 электростат. дефл. 100 кВ/см магн. канал 75 % магн. поле 3–5 Тл
C49	США Ист-Лансинг MSU K1200 1988, 2000	Сверхпров. компакт. $D = 2,2, R = 0,03$ $N = 3, \alpha = 176^\circ$ $0,076/0,914$	$^{16}\text{O}^{8+}$ $^{40}\text{Ar}^{18+}$ $^{48}\text{Ca}^{20+}$ $^{86}\text{Kr}^{34+}$ $^{124}\text{Xe}^{48+}$ и др.	150 140 140 140 140	$1,3 \cdot 10^{12}$ $4,2 \cdot 10^{11}$ $1,0 \cdot 10^{11}$ $1,4 \cdot 10^{11}$ $1,8 \cdot 10^{11}$	Радиальный K500 обдир. фольга $R_i = 0,32$ 60 %	2 электростат. дефл. 130 кВ/см магн. канал 70 % магн. поле 3–5,5 Тл
C50	США Окридж ORNL ORIC 1963	Компакт. $D = 1,93,$ $R = 0,81$ $N = 3, \alpha = 30^\circ$ $0,19/0,71$	p D α	52 25 25	$9,38 \cdot 10^{13}$ $9,38 \cdot 10^{13}$ $1,56 \cdot 10^{13}$	Внутр. ИИ ИИ Пеннинга	Электростат. дефл. коакс. магн. канал 55 % фунд. исслед. 70 %

Окончание табл.

Номер	Страна, город, институт, название циклотрона, год пуска	Тип магнита, $D_{\text{пол}}/R_{\text{ext}}$, N , α , h_M/v_M	Ускоряемые ионы, зарядность	Макс. энергия, МэВ/нукл., или диапазон	Макс. интенсивность, с^{-1} или мкА, нА	Тип инжекции, инжектор, энергия, эффективность.	Элементы системы вывода, эффективность
C51	США Техас Университет K500 1988	Сверхпров. компакт. $D = 1,42$, $R = 0,67$ $N = 3$, $\alpha = 169,4^\circ$ 0,06/0,9	$^{16}\text{O}^{8+}$ $^{40}\text{Ar}^{13+}$ $^{84}\text{Kr}^{27+}$ $^{197}\text{Au}^{33+}$	60 40 40 10,5	$1,3 \cdot 10^{11}$ $7,2 \cdot 10^{11}$ $2,3 \cdot 10^8$ $3,3 \cdot 10$	Аксиальный ECRIS 2–15 кВ 10–25 %	2 электростат. дефл. 5 магн. каналов 50–60 % фунд. исслед. 41 %

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nahmias M.-E.* Le Cyclotron / Ed. de la Revue d'Optique, theoretique et instrumentale, 1945; рус. пер.: Ливингстон М., Розе М., Намиас М. Циклотрон: Сб. ст. / Под ред. П. А. Черенкова. М.; Л.: ОТИЗ, ГИТТЛ, 1948. С. 134.
2. *Lawrence E. O., Edelfsen N. E.* // Science. 1930. V. 72. P. 376.
3. *Lawrence E. O., Livingston M. S.* // Phys. Rev. 1931. V. 37. P. 1707.
4. *Lawrence E. O., Livingston M. S.* // Phys. Rev. 1932. V. 40. P. 19.
5. *Lawrence E. O., Livingston M. S.* // Ibid. V. 42. P. 1950.
6. *Lawrence E. O., Livingston M. S.* // Phys. Rev. 1934. V. 45. P. 608.
7. *Rukavishnikov V. N.* // Phys. Rev. 1937. V. 52. P. 1077.
8. *Mann W. B.* // Reports of Progress in Physics. 1939. V. 6. P. 125.
9. *Lawrence E. O. et al.* Initial Performance of 60-inch Cyclotron // Phys. Rev. 1939. V. 56. P. 124.
10. *Dunning J. R., Anderson H. L.* // Phys. Rev. 1938. V. 53. P. 334.
11. *Livingston M. S., Holloway M. G., Baker C. P.* // RSI. 1939. V. 10. P. 63.
12. *McMillan E. M., Salisburg W. W.* // Phys. Rev. 1939. V. 56. P. 836.
13. *McMillan E. M.* History of Cyclotrons // Physics Today. 1959. V. 12, No. 10. P. 24.
14. *Nahmias M. E.* // Phys. Rev. 1937. V. 52. P. 666.
15. *Rose M.* // Phys. Rev. 1938. V. 53. P. 392.
16. *Thomas L. H.* The Path of Ions in the Cyclotron // Phys. Rev. 1938. V. 54. P. 580–598.
17. *Векслер В. И.* // ДАН. 1944. Т. XLIII, № 8. С. 346;
Veksler V. I. // Phys. USSR. 1945. V. 9. P. 153.
18. *McMillan E. M.* // Phys. Rev. 1945. V. 68. P. 143.
19. *Richardson J. R. et al.* // Phys. Rev. 1941. V. 69. P. 669.
20. *Brobeck W. M. et al.* Initial Performance of the 184-inch Cyclotron of the University of California // Phys. Rev. 1947. V. 71, No. 7. P. 449.
21. *Мецзяков М. Г.* К 90-летию со дня рождения. Дубна, 2000.
22. *Дмитриевский В. П.* Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. М.: МИФИ, 1953.
23. *Онищенко Л. М.* Фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля. Дис. . . . д-ра физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 1955.
24. *Heyn F. et al.* // RSI. 1958. V. 29. P. 662.
25. *Courant E. D., Livingston M. S., Snyder H. S.* The Strong-Focusing Synchrotron — a New High Energy Accelerator // Phys. Rev. 1952. V. 88. P. 1190–1196.
26. *Kerst L. W. et al.* Fixed Field Alternating Gradient Accelerator with Spirally Ridged Pole // Phys. Rev. 1955. V. 98, No. 4. P. 1152–1153.

27. *Дмитриевский В. П.* О предельной энергии частиц в циклотроне с пространственной вариацией. Отчет ИЯП АН СССР № 1675 от 19 ноября 1955 г.
28. *Danilov V. I. et al.* Cyclotron with Space Variation of the Magnetic Field // Proc. of Intern. Conf. on High Energy Accelerators. CERN, 1959. P. 211–225;
См. также *Василевская Д. П. и др.* // АЭ. 1959. Т. 6. С. 657.
29. Cyclotrons. Berlin, 1989. Cyclotron List.
30. *Дмитриевский В. П.* Релятивистский циклотрон с пространственной вариацией магнитного поля. Дис. . . . д-ра физ.-мат. наук по совокупности работ. Дубна, 1961. Не опубликовано.
31. *Livingston R. S., Martin J. A.* An Isochronous Cyclotron Meson Factory // Intern. Conf. on High Energy Accelerators. Dubna, 1963. P. 561.
32. *Richardson J. R. et al.* General Design and Features of Negative Ion Cyclotrons // Ibid. P. 568.
33. *Willax H.* Proposal for a 500 MeV Isochronous Cyclotron with Ring Magnet, ETH, Zurich // Intern. Conf. on Sector-Focused Cyclotrons, CERN, April 1963. P. 386.
34. *Онищенко Л. М.* Разработка систем и исследование динамики пучка в электронной модели кольцевого циклотрона. Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. Дубна, 1972.
35. *Самсонов Е. В.* Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. Дубна, 1986.
36. *Вялов Г. Н.* Ускоритель тяжелых ионов (У-300, ЛЯР) // Природа. 1966. Т. 10. С. 42.
37. *Geler R., Jacquot B., Pontonnier M.* Status of the Multiply Charged Heavy-Ion Source MINIMAFIOS // Rev. Sci. Instr. 1985. V. 56 (8);
Burdet R., Consoli T., Geler R. // Acad. C. R. Sci. 1964. V. 259. P. 1044;
Lyneis C. ECR Ion Sources // Cyclotrons. Vancouver, 1992. P. 301.
38. *Mandrillon P.* Injection into Cyclotron // CERN Accelerator School. CERN 96-02. 1996. P. 153.
39. *Belmont J. L.* Axial Injection and Central Region of the AVF // Cyclotron Summer School on Accelerator Technol. RCNP, Osaka, 1986.
40. *Powell W. B., Reece B. L.* Injection of Ions into a Cyclotron from an External Source // Nucl. Instr. Meth. 1965. V. 32. P. 325–332;
Ehlers K. W et al. // Nucl. Instr. Meth. 1963. V. 22. P. 87;
Cox A. J. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1962. V. 18–19. P. 25.
41. *Blosser H.* // Proc. of Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Tokyo, Oct. 18–22, 2004. P. 531;
42. *Adam S. et al.* // IEEE Trans. 1981. NS-28(3) P. 272.
43. *Вялов Г. Н., Оганесян Ю. Ц., Флеров Г. Н.* Метод вывода тяжелых ионов из циклотрона. Препринт ОИЯИ 1884. Дубна, 1964.
44. *Шелаев И. А. и др.* Эксперименты по ускорению ионов ксенона на циклотронах ОИЯИ. Препринт ОИЯИ Р9-6166. Дубна, 1971.

45. *Неменов Л. М.* История развития циклотронов за 50 лет // УФН. 1981. Т. 133, №3. С. 525–541.
46. *Sessler A., Wilson A.* Engines of Discovery // A Century of Particle Accelerators. World Sci. 2007. V. 16. P. 196.
47. *Гринберг А. П.* К истории изобретения и разработки ускорителей // УФН. 1975. Т. 117, №2. С. 333.
48. *Onischenko L. M., Samsonov E. V.* Current Limit in the Compact Cyclotron with External Injection // Proc. of Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Giardini Naxos, Sicily, Italy, 2007.
49. *Дмитриевский В. П.* Мезонные фабрики // Тр. I Междунар. шк. молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. Ужгород, сент. 1975 г. Дубна, 1976. С. 168–194.
50. *Stambach T.* Introductions to Cyclotrons // CAS of CERN Accelerator School. Geneva, 1996. P. 113–138.
51. *Мак-Лахлан Н. В.* Теория и приложения функций Матье. М.: Изд-во иностр. лит., 1953.
52. *Joho W.* High Intensity Problems in Cyclotrons // Proc. of Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Caen, France, 1981. P. 332.
53. *Lapostole P. M.* // IEEE Trans. 1971. NS-18. P. 110;
Sacherer P. // Ibid. P. 1105.
54. *Jacquot B. et al.* GANIL Status Report // Proc. of Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Tokyo, 2004. P. 57.
55. *Miller P., Marti F. et al.* Status of the Coupled Cyclotron Facility at NSCL // Ibid. P. 62.
56. *Fitze H. et al.* Developments at PSI // Ibid. P. 67–71.
57. *Riffugiato D., Calabretta L., Cuttone G.* (INFN-LNS, Catania) Ten Years of Operation with the LNS Super Conducting Cyclotrons // Ibid. P. 118–120.
58. *Brandenburg S. et al.* AGOR Status Report // Ibid. P. 90–92.
59. *Heikkinen P.* Status and Future Plans of the Jyvaskyla K130 Cyclotron // Ibid. P. 93–95;
Heikkinen G. P. // Nucleonika. 2003. V. 46 (supper). P. 21–24.
60. *Gikal B. N.* Dubna Cyclotrons — Status and Plans, FLNR, JINR // Proc. of the Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Tokyo, Oct. 18–22, 2004. P. 100–104.
61. *Hatanaka K. et al.* Upgrade Project RCNP AVF Cyclotron Facility, RCNP University // Ibid. P. 115–117.
62. *Zhao H. W. et al.* HIRFL Operation and Upgrade, IMP, Lanzhou, China // Ibid. P. 121–123;
Zhah W. I. et al. Progress of the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou // Ibid. P. 174–177.

63. *Dutto G. et al.* TRIUMF High Intensity Cyclotron Development for ISAC, TRIUMF, Vancouver // *Ibid.* P. 82–86;
Dutto G. et al. Recent Performance of the TRIUMF Cyclotron and Status of the Facility // *Proc. of the Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications*, Cape Town, 1995. P. 61–65;
Schmor P. W. TRIUMF: ISACII and beyond, TRIUMF, Canada // *Proc. of the Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications*, Tokyo, Oct. 18–22, 2004. P. 523–527.
64. *Kase M. et al.* Present Status of the RIKEN Ring Cyclotron, RIKEN, Wako, Japan // *Ibid.* P. 160–162;
Ohnishi J. et al. Construction Status of the RIKEN Intermediate stage RING Cyclotron (IRC), RIKEN, Wako, Japan // *Ibid.* P. 197–199;
Inabe N. et al. Fixed Frequency Ring Cyclotron (fRC) in RIBF, RIKEN, Japan // *Ibid.* P. 200–202;
Okuno H. et al. Magnets for the RIKEN Superconducting RING Cyclotron, RIKEN, Japan // *Ibid.* P. 373–377.
65. *Yano Y.* RI BEAM Factory Project at RIKEN, Wa ko-shi, Japan // *Ibid.* P. 169.
66. *Wilson R. R.* // *Radiology*. 1996. V. 47. P. 487–496.
67. *Flant J. B.* Operation of a Cyclotron Based Proton therapy Facility // *Proc. of the Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications*, Tokyo, Oct. 18–22, 2004. P. 3–5.
68. *Conradie J. L. et al.* Cyclotrons at iThemba LABS, Somerset West, South Africa // *Ibid.* P. 105–109.
69. *Risler R. et al.* 20 Years of Clinical Operation with the Fast Neutron Therapy System in Seattle, University of Washington Medical Centre, Seattle, USA // *Ibid.* P. 151–153.
70. *Honma T. et al.* Improvements and Applications at NIRS Cyclotron Facility, Chiba, Japan // *Ibid.* P. 154–156.
71. *Ymada S. et al.* // *Proc. 1995 PAC*, Dallas, 1995.
72. *Milton B. F. et al.* A 30 MeV H^- Cyclotron for Isotope Production, TRIUMF, Vancouver, Canada // *Proc. of the Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications*, Berlin, 1989. P. 145–148.
73. List of Cyclotrons // *Proc. of the Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications*, Tokyo, Oct. 18–22, 2004. P. 617.
74. *Onischenko L. M. et al.* Cyclotron CYTRACK for Membrane Production, Dubna // *Ibid.* P. 96–99.
75. *Geisler A. et al.* Status report of the ACCEL 250 MeV Medical Cyclotron, ACCEL Instruments GmbH, Germany // *Ibid.* P. 178–182.
76. *Fukuda M. et al.* Microbeam Production at JAERI AVF Cyclotron Facility, JAERI, Takasaki, Japan // *Ibid.* P. 133–137.