

ЦИКЛИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ (ЦУ)

Циклические ускорители. Линейные ускорители дают возможность получить большие токи в пучке. Но при высоких энергиях это преимущество сводится на нет, сильно возрастающими размерами машин. Эту трудность можно преодолеть, если с помощью магнитного поля заставить частицы вращаться и проходить ускоряющий промежуток много раз. Этот принцип впервые был применен в циклотроне (рис1, а). Частицы, вылетающие из ионного источника, расположенного между полюсами магнита, ускоряются высокочастотным электрическим полем в промежутке между двумя электродами, называемыми дуантами. Так как энергия частиц постепенно увеличивается, то под действием магнитного поля они летят по раскручивающейся спирали. При правильном выборе частоты приложенного ускоряющего поля и величины магнитного поля частица должна всегда проходить промежуток между дуантами во время ускоряющей фазы высокочастотного напряжения. Иначе говоря, в ЦУ заряженные частицы набирают большую энергию в результате многократного пересечения ускоряющего зазора, к которому приложена сравнительно небольшая разность потенциалов. Энергия, полученная частицей к концу цикла ускорения складывается т.о., из большого числа малых порций. Причиной, заставляющей частицу многократно проходить ускоряющий зазор, является магнитное поле. Вид траекторий не обязательно имеет форму раскручивающейся спирали как у циклотрона. Например, в микротроне траектория ускоряемых частиц (электроны) имеет вид спирали (Рис.1,б), состоящей из ряда окружностей (орбит) с общей точкой касания внутри ускоряющего зазора (УЗ). При каждом прохождении электронов через УЗ происходит увеличение их энергии E и радиуса орбиты. В другом ЦУ электронов (бетатроне)- частицы движутся в течение всего времени ускорения по окружности неизменного радиуса (Рис.1,в); ускорение электронов осуществляется вихревым электрическим полем, действующем внутри круговой орбиты.



Рис1,а. Циклотрон



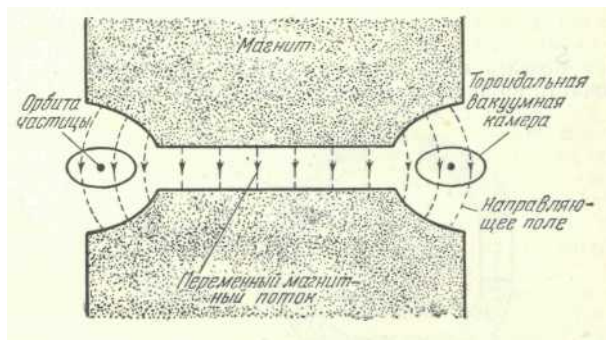
Рис.1,б. Микротрон

Однако рассмотренный принцип может быть применен только к нерелятивистским частицам. С ростом энергии частиц увеличивается их масса, а угловая скорость уменьшается настолько, что они выпадают из резонанса с высокочастотным полем. Этой трудности можно избежать в *фазотроне*, или в циклотроне с модулированной частотой, применяя нужную модуляцию частоты ускоряющего поля. В этом случае пучок

ускоренных частиц состоит из серии последовательных импульсов с частотой, соответствующей циклу частотной модуляции. При таком способе ускорения максимальная достижимая энергия увеличивается, но уменьшается ток пучка.

Из сказанного следует, что электроны не могут ускоряться по циклотронному принципу; однако их релятивистское поведение может быть выгодно использовано при циклическом ускорении в *микротроне* (рис. 1-б). Электроны вырываются полем из стенок полого резонатора; их кинетическая энергия при этом равна энергии покоя электрона, т. е. 511 кэВ. Сделав один оборот в магнитном поле, электроны возвращаются к резонатору в фазе, соответствующей ускоряющему полю, и получают новую порцию энергии, равную энергии покоя. Таким образом, их угловая скорость уменьшается при каждом последующем обороте от ω_0 до $\omega_0/2$, $\omega_0/3$ и т. д., где ω_0 - приложенная частота.

Другим циклическим ускорителем электронов является **бетатрон**. В этом ускорителе (рис. 1-в) электроны, как отмечено выше, разгоняются на постоянной орбите под действием растущего переменного магнитного поля, которое одновременно оказывает и направляющее воздействие на пучок. Действие бетатрона аналогично работе трансформатора; электронный пучок играет роль тока во вторичной обмотке. Электроны с помощью электронной пушки подаются в тороидальную вакуумную камеру.



Как известно, на частицу с зарядом q , движущуюся в магнитном поле с индукцией \mathbf{B} , действует сила Лоренца $\vec{F}_M = q [\mathbf{v}\mathbf{B}]$. Как видно из приведенного выражения, эта сила перпендикулярна к векторам \mathbf{v} и \mathbf{B} . Она не производит работы, а лишь искривляет траекторию частиц. Если частица движется с постоянной скоростью v перпендикулярно к силовым линиям однородного магнитного поля, то её траектория является окружностью. Сила Лоренца направлена к центру окружности и равна в этом случае $F_M = q v B$.

С другой стороны, как известно, движение любого материального тела с массой m по круговой орбите радиуса r происходит в том случае, если к нему приложена центростремительная сила $F_c = mV^2/r$ поэтому условие движения заряженной частицы по круговой орбите в магнитном поле записывается в виде

$$q v B = mV^2/r \text{ откуда } q v B = mV/r \text{ и } v/r = q B / m$$

Отношение v/r представляет собой круговую частоту обращения частицы. Обозначив её через ω получим $\omega = q B / m$

Из этого выражения следует, что частота обращения заряженной частицы зависит от величины индукции магнитного поля \mathbf{B} и удельного заряда частицы q / m и не зависит от её скорости. Для периода обращения получаем выражение

$$T = 2\pi / \omega = 2\pi m / (q B).$$

Через одинаковые промежутки времени T , частица будет возвращаться в одну и ту же точку своей траектории. Т.о. магнитное поле обеспечивает цикличность движения заряженной частицы по равновесной окружности. Если на пути частицы расположен УЗ, то она будет многократно его пересекать. К электродам, образующим зазор, прикладывается переменное напряжение. Частоту этого напряжения и режим обращения частицы по орбите выбирают такими, чтобы при пересечении зазора частица каждый раз ускорялась. В результате энергия частицы будет постепенно увеличиваться. Такой способ ускорения частиц называется **резонансным**. В современных ЦУ ускоряющие магнитные поля могут быть самой различной пространственной конфигурации: однородное, коаксиально-симметричное и т.д. Во времени они могут быть постоянными и изменяющимися.

Определим энергию, до которой можно разогнать частицу в ЦУ. Для этого воспользуемся соотношением, определяющим связь между полной энергией релятивистской частицы W_p и её импульсом p :

$$W_p^2 = c^2 p^2 + W_0^2$$

Где W_0 – энергия покоя частицы.

Обозначив кинетическую энергию частицы через W_1 это соотношение можно переписать в виде

$$p^2 = \frac{W_p^2 - W_0^2}{c^2} = \frac{(W + W_0)^2 - W_0^2}{c^2} = \frac{W(W + 2W_0)}{c^2}$$

Из формулы, определяющей условие движения частицы по круговой орбите, следует, что

$$p = mV = qBr$$

Тогда получим

$$W(W + 2W_0) = c^2 q^2 B^2 r^2$$

В этом случае кинетическая энергия частицы во много раз больше энергии покоя, величиной $2W_0$ по сравнению с W можно пренебречь и выражение для W примет вид

$$W = c q B r$$

Для однократно заряженной частицы после подстановки значений скорости света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с и заряда $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ К, получим

$$W = 4,8 \cdot 10^{-11} r \text{ В (Дж, Тм)}$$

Если энергию измерять в МэВ ($1\text{МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж) то формула запишется в виде

$$W = 300 B r \text{ (МэВ Т м)}$$

Из этого соотношения следует, что для получения большой энергии в У необходимо иметь высокие значения магнитной индукции и обеспечить возможность движения частицы по орбитам большого радиуса.

Важным вопросом является орбитальная устойчивость движения частиц. В реальных У существуют многочисленные причины, заставляющие частицы отклоняться от

равновесной орбиты. К ним относятся столкновения частиц с молекулами остаточного газа в вакуумной камере, силы кулоновского расталкивания, неточность сборки электромагнита и тдр. Если частица, которая отклонилась, не будет возвращена к равновесной орбите, то она будет бесполезно утрачена на стенках камеры. В современных У применяют два типа фокусировки **слабую и сильную**. Не вдаваясь в детали, отметим различия в обоих видах фокусировки.

Поперечное отклонение частицы от круговой, равновесной орбиты может произойти в любом направлении. Однако его всегда можно представить как результат двух независимых смещений; **радиального** в плоскости равновесной орбиты и вертикального отклонения от этой плоскости. Поэтому в У должны быть обеспечены соответственно радиальная и аксиальная (вертикальная) фокусировки.

Оказывается, что движение частиц и в радиальном и в вертикальном направлениях является устойчивым в том случае, если индукция убывает при увеличении радиуса по закону

$$B = B_0 (r_0/r)^n, \quad 0 < n < 1 \quad (1)$$

Здесь B – индукция при произвольном значении r ;

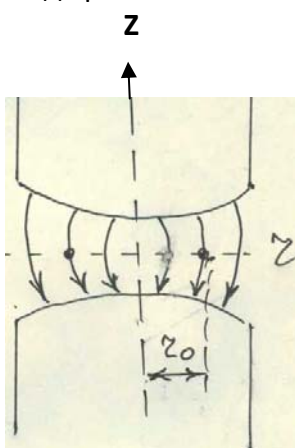
B_0 – индукция при равновесной орбите, радиуса r_0 ;

n – показатель спада магнитного поля.

Ускорители, магнитное поле которых характеризуется соотношением (1), называются слабофокусирующими. Если обозначить постоянную величину $B_0 r_0^n$ через K , то для индукции B получим формулу

$$B = K / r^n, \quad 0 < n < 1 \quad (2)$$

Поле, описываемое выражением (2), образуется между полюсами магнита ускорителя, когда расстояние между ними постепенно увеличивается от центра к краям



Магнитное поле, спадающее по радиусу, характеризуется

Бочкообразной формой магнитных силовых линий.

Благодаря такой форме силовых линий осуществляется аксиальная фокусировка частиц.

Для усиления радиальной фокусировки, желательно было бы иметь магнитное поле, резко возрастающее по радиусу, т.е. $n \ll 0$

Однако это привело бы к сильной аксиальной дефокусировке. Поэтому для обеспечения обоих видов фокусировки приходится ограничивать n значениями $0 < n < 1$.

Необходимо подчеркнуть, что в области $0 < n < 1$ существует целый ряд запретных значений n , при которых наблюдаются резонансные явления, приводящие к увеличению

амплитуды колебаний и попаданию частиц на стенки ускорительной камеры. Например, при $n = 0,5$ наблюдается резонанс вида $\omega_z = \omega_r$. Запретными значениями n являются также $0,2$; $0,25$; $0,75$ и др. при которых происходят резонансы других видов. Фактически для ускорителей с мягкой фокусировкой величину n можно выбрать лишь в узких областях, лежащих между указанными запретными значениями. Конечная энергия релятивистских заряженных частиц, которую можно получить в слабофокусирующем У, пропорциональна величине индукции магнитного поля и радиусу равновесной орбиты:

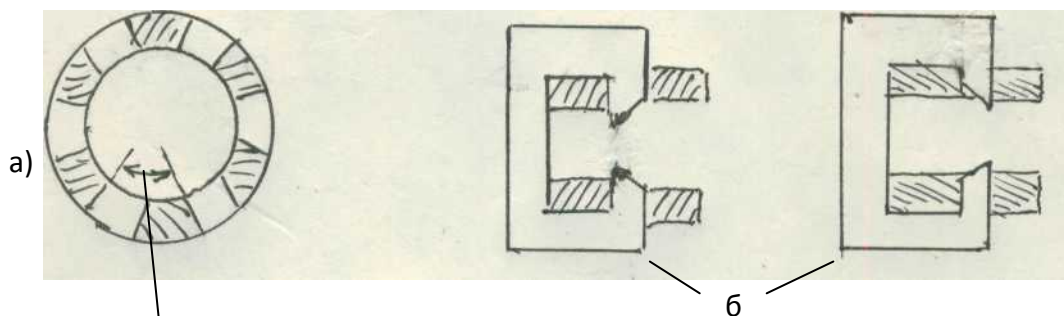
$$W = 300 B_0 r_0$$

Поэтому увеличить энергию частиц можно путем увеличения индукции B_0 и радиуса r_0 . Значение индукции для магнитопровода из стали не может превышать $1,5 - 2$ Т, следовательно, конечная энергия частиц может быть повышена лишь при увеличении радиуса равновесной орбиты. Но с ростом r_0 растут амплитуды

аксиальных и радиальных колебаний частиц. Чтобы частицы не попадали на стенки ускорительной камеры, ее сечение приходится увеличивать. Поэтому с ростом γ_0 увеличиваются размеры U и в аксиальном и в радиальном направлениях. Слабофокусирующий U на большие энергии – чрезвычайно дорогое и технически сложное сооружение.

СИЛЬНАЯ ФОКУСИРОВКА

При описании принципа слабой фокусировки было показано, как влияет характер изменения поля в зазоре электромагнита на орбитальную устойчивость частиц. Мы видели, что для усиления аксиальной фокусировки желательно иметь магнитное поле, индукция которого резко падает по радиусу ($n \gg 1$). Однако в таком поле частицы сильно дефокусируются в радиальном направлении. Наоборот, для улучшения радиальной фокусировки необходимо использовать поля, круто нарастающие с увеличением радиуса ($n \ll 0$). Но при этом частицы резко дефокусируются в аксиальном направлении. В 1950 году Кристофилос (Греция), а в 1952 году независимо от него Курант, Ливингстон и Снайдер (США) показали, что чередуя вдоль орбиты частиц участки магнитного поля с ($n \gg 1$) и ($n \ll 0$), можно при определенных условиях значительно усилить фокусировку частиц в обоих направлениях – аксиальном и радиальном. Такой метод обеспечения орбитальной устойчивости получил название **сильной фокусировки**.



Элемент периодичности

Схема расположения (а) и сечение (б) секторов электромагнита ускорителя с сильной фокусировкой.

В простейшем случае в сильнофокусирующем ускорителе используют электромагнит (а), состоящий из большого числа секторов одинаковой протяженности. Эти секторы (б) выполняют двух типов: с резко нарастающим ($n \ll 0$), и резко спадающим ($n \gg 1$) по радиусу магнитными полями. Сектора расположены в чередующейся вдоль орбиты последовательности. Два сектора образуют **Элемент периодичности** магнита. Проходя через элемент периодичности, частицы в одном из секторов будут фокусироваться в радиальном и дефокусироваться в аксиальном направлении, а в другом - фокусироваться в аксиальном и дефокусироваться в радиальном направлении. Поперечные силы, действующие на частицу, пропорциональны ее удалению от оси элемента периодичности. Т.к. в фокусирующем секторе частица всегда находится дальше от оси, чем в рассеивающем, то силы фокусировки преобладают над силами дефокусировки, и результирующее действие пары секторов оказывается фокусирующим в обоих направлениях.

Величина n в современных сильнофокусирующих ускорителях обычно порядка нескольких сотен. Благодаря этому силы фокусировки в них оказываются значительно выше, а амплитуды бетатронных колебаний – во много раз меньше, чем в ускорителях со

слабой фокусировкой. Это позволяет использовать для ускорения частиц вакуумную камеру малого сечения и относительно легкий электромагнит.

Преимущества сильной фокусировки наглядно иллюстрируются данными табл.1, в которой приведены некоторые технические характеристики двух синхрофазотронов с различными типами фокусировки.

Табл. 1.

Технические характеристики синхрофазотронов с различными типами фокусировки.

Параметры	Слабофокусирующий	Сильнофокусирующий
	Бэватрон, Беркли, США	ИТЭФ, Москва, Россия
Максимальная энергия, ГэВ	6,2	7
Показатель магнитного поля, n	0,6	460
Радиус орбиты, м	15	30
Вакуумная камера:		
Ширина, м	1,15	0,11
Высота, м	0,3	0,08
Вес электромагнита, Тс	9700	2500
Вес обмотки (медь) Тс	350	120

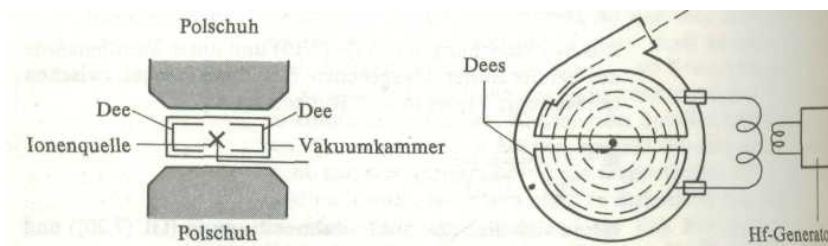
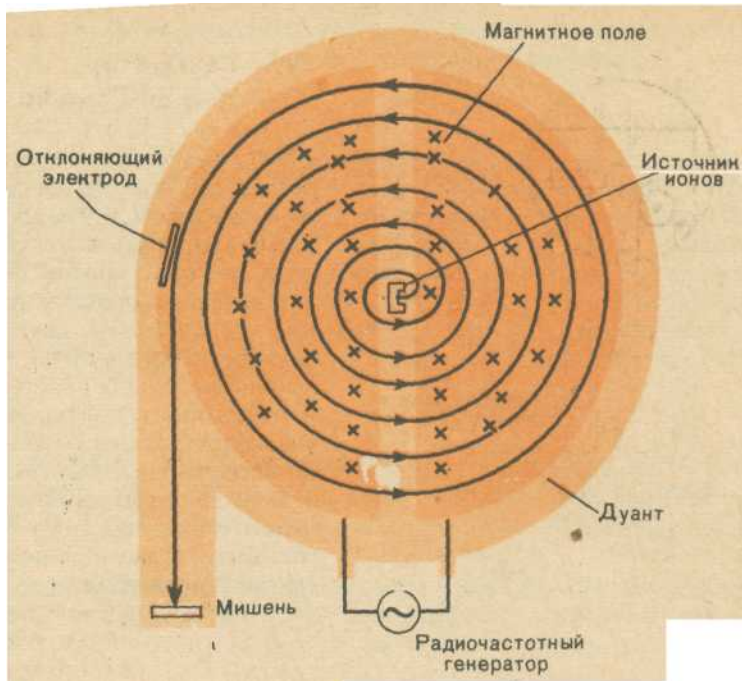
По принципу сильной фокусировки построены У на очень большие энергии. В США-синхрофазотрон, ускоряющий протоны до 200 ГэВ. Его параметры: диаметр магнита 2000 м, сечение вакуумной камеры (12,5 x 5 см), вес электромагнита 9000 Тс.

Следует отметить, что условие орбитальной устойчивости в сильнофокусирующих ускорителях имеет значительно более сложный вид, чем в слабофокусирующих.

Циклотрон

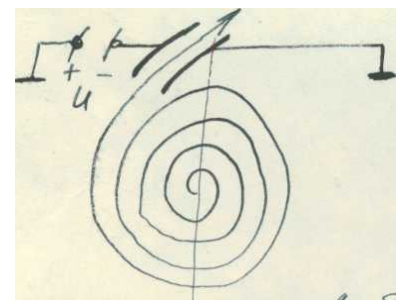
Практически одновременно с первыми высоковольтными машинами Лоуренс и Ливингстон в Калифорнийском университете в Беркли успешно испытали еще одну машину – циклотрон. Существенная часть циклотрона – две полые металлические коробки, называемые дуантами (см. рис 1 , а). Дуанты немного раздвинуты по диаметру друг от друга и подключены к радиочастотному генератору, работающему на частоте примерно 10^6 Гц. Дуанты помещают в эвакуированное вакуумное пространство между полюсами мощного магнит, который создает магнитное поле с индукцией на несколько тесла.

Выше было отмечено, что частицы ускоряются в промежутке между двумя электродами (дуантами). Процесс повторяется многократно. Ускоряемый ион движется в резонанс с изменением высокочастотного электрического поля и дважды за период обращения проходит ускоряющий зазор. Поскольку энергия частиц все время возрастает, они движутся по раскручивающейся спирали. Ускоренные частицы могут быть либо выведены из вакуумной камеры, либо использованы внутри для бомбардировки мишени.



Для вывода частиц из ускорителя применяют специальное выводное устройство, называемое дефлектором. Оно состоит из двух изогнутых пластин, в пространство между которыми ионы попадают в результате движения по спиральной траектории

Между пластинами приложено высокое Постоянное напряжение. Ионы отклоняются Электростатическим полем дефлектора и Попадают в вакуумную трубку ионпровода, по которому направляются к месту использования. Иногда роль заземленной пластины выполняет Соответствующая часть дуанта.



Внутренняя мишень, часто используемую в циклотронах обычно устанавливают в зазоре между дуантами. Её располагают на таком расстоянии, от оси, на котором ионы имеют требуемую для эксперимента энергию.

Выражение для энергии частиц, ускоренных в циклотроне имеет следующий вид:

$$W = \frac{q^2}{2m} (B r)^2$$

Т.к. энергия ускоренных ионов пропорциональна квадрату произведения $(B r)$, которое называется **магнитной жесткостью** частицы, то для увеличения энергии, как уже было отмечено, нужно повышать индукцию в зазоре электромагнита и увеличивать диаметры его полюсов. Индукция магнитного поля в циклотронах обычно составляет около 1,5 Т. Обеспечить существенно большие значения индукции не удастся из-за насыщения полюсных наконечников магнитов.

Увеличение диаметра полюсов электромагнита тоже возможно лишь до определенной величины. Причина этого заключается в следующем. Чем дальше от центра вакуумной камеры

находится ион, тем выше его скорость. Но увеличение скорости частицы приводит, как известно, к релятивистскому возрастанию её массы

$$m = m_0 / (1 - \beta^2)^{1/2}$$

где m_0 – масса покоя частицы; $\beta = v/c$ – отношение скорости частицы к скорости света.

Рост массы приводит к увеличению периода обращения иона и нарушению условия резонансного ускорения. Поэтому существует предельно значение энергии $W_{\text{пред}}$, которую ионы могут получить в циклотроне. Эта энергия лежит в пределах 20-25 МэВ. По указанной причине циклотрон оказывается непригодным для ускорения легких частиц – электронов. Уже при малых энергиях электронов их масса заметно отличается от массы покоя.

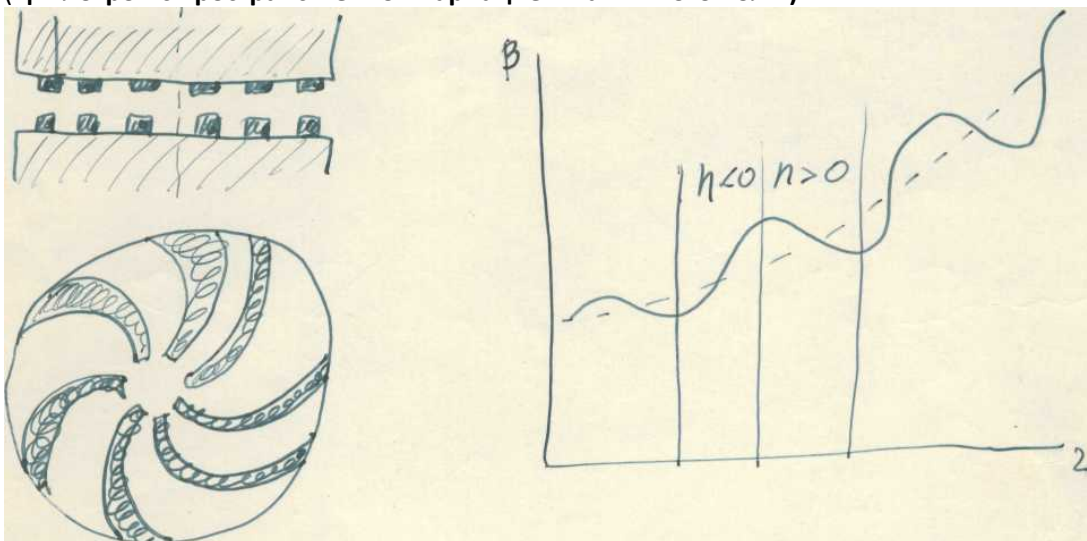
**Циклотрон с пространственной вариацией магнитного поля
(изохронный циклотрон)**

Предел энергии, достижимый ионами в циклотроне, обусловлен релятивистским возрастанием их массы и уменьшением магнитной индукции с радиусом. Несмотря на то, что этот предел (он составляет, как уже указывалось 20-25 МэВ давно перекрыт современными ускорителями других типов, интерес к циклотрону не ослабевает и делаются многочисленные попытки расширить его энергетический диапазон. Причина повышенного внимания к циклотрону заключается в том, что он позволяет получить большие токи частиц. По этому параметру циклотрон значительно превосходит другие ЦУ. Кроме того, он прост по конструкции и удобен в эксплуатации.

Чтобы процесс ускорения в циклотроне не нарушался, необходимо обеспечить постоянство частоты обращения ионов.

$$\omega = qB/m = \text{const}$$

Однако, по мере ускорения частицы, (т.е. удаления её от центра вакуумной камеры) происходит релятивистское возрастание массы m . Следовательно, это условие можно выполнить лишь в том случае, если магнитная индукция B возрастает с радиусом по тому же закону, по которому в зависимости от r увеличивается масса частицы. Но в обычном циклотроне применить возрастающее по радиусу магнитное поле нельзя, т.к. это приведет к нарушению аксиальной фокусировки частиц. Оказывается, что оба противоречивых требования (обеспечения фокусировки и постоянства частоты обращения) могут быть удовлетворены, если создать определенную структуру поля в области движения частиц. Для решения этой задачи на полюсах магнита укрепляют стальные спиральные накладки прямоугольного сечения, называемые шимами. Вследствие этого между полюсами образуются спиральные области, в которых индукция усилена. Области усиленной индукции называют горбами, а области более слабой индукции – впадинами. Величина индукции магнитного поля в зазоре в этом случае периодически меняется (варьируется) как по радиусу, так и по азимуту (отсюда произошло название ускорителя - (Циклотрон с пространственной вариацией магнитного поля.)



Форма полюсов магнита циклотрона

Изменение магнитной индукции вдоль радиуса в циклотроне со спиральными

накладками .

Справа, на рис. показана радиальная вариация поля в изохронном циклотроне. Структуру поля подбирают т.о., чтобы среднее значение B увеличивалось с увеличением радиуса. Из рис. Видно, что в межполюсном зазоре ускорителя чередуются области с нарастающей и спадающей по радиусу магнитной индукцией. Эти области характеризуются показателями спада, соответственно $n < 0$ и $n > 0$. При орбитальном движении по спирали ионы поочередно пересекают фокусирующие и дефокусирующие сектора (см. сильная фокусировка). Недостатком такой схемы фокусировки являются очень высокие требования к юстировке системы.

Стремясь справиться с трудностями, обусловленными зависимостью массы частицы от её скорости, ученые создали различные типы импульсных циклических ускорителей, в которых в процессе ускорения меняются частота ускоряющего напряжения или величина магнитного поля. Как установили советский физик В. И. Векслер и американский ученый Э. Макмиллан, движение частиц в таких ускорителях при определенных условиях автоматически подстраивается так, что частицы все время будут находиться в фазе с ускоряющим полем. Это так называемый принцип автофазировки, благодаря которому становится возможным ускорять частицы до релятивистских энергий. Так, фазотроны, предназначенные для ускорения тяжелых частиц (протонов и ионов) до энергий ~ 1 ГэВ, напоминают циклотроны, но отличаются от последних тем, что у них частота ускоряющего поля не постоянна, а постепенно уменьшается по мере ускорения данного сгустка частиц и затем возрастает при захвате следующего сгустка. В синхротроне — ускорителе, предназначенном для ускорения электронов, — полюса электромагнита образуют кольцо, а вакуумная камера имеет форму полой баранки. Траектория частиц в синхротроне неизменна — это окружность, проходящая посередине вакуумной камеры. По мере ускорения сгустка частиц магнитное поле на «кольцевой дорожке» синхротрона соответствующим образом возрастает. Так как скорость электронов очень быстро становится близкой к скорости света, частота их обращения по орбите синхротрона не меняется с ростом энергии. Поэтому в синхротроне частота ускоряющего электрического поля — постоянная величина. У крупных синхротронов, ускоряющих электроны до энергий ~ 10 ГэВ, длина кольцевой траектории достигает километров. Кольцевой электромагнит состоит из тысяч отдельных блоков. За цикл ускорения частица совершает в синхротроне сотни тысяч оборотов.

Для ускорения тяжелых частиц до очень высоких энергий используют синхрофазотроны — кольцевые ускорители, у которых в процессе ускорения в строгом соответствии друг с другом меняются одновременно и величина магнитного поля, и частота ускоряющего напряжения, так что радиус орбиты частиц остается постоянным при росте их энергии. Специальная конфигурация магнитного поля не позволяет частицам отклониться далеко от этой орбиты (применяется жесткая фокусировка), и поэтому ширина магнитной дорожки может быть небольшой. Синхрофазотрон в Серпухове позволяет реализовать энергию протонов 76 ГэВ. Длина его кольцевой вакуумной камеры, находящейся в магнитном поле, составляет 1,5 км; в поперечном сечении камера имеет форму эллипса с осями 17 и 11,5 см. Существуют синхрофазотроны и с еще большей энергией — до 400 - 500 ГэВ. В настоящее время сооружаются и проектируются огромные ускорители нового поколения, в которых уже должны быть использованы сверхпроводящие магнитные поля. Энергия ускоренных частиц в этих «суперсинхрофазотронах» превысит 1ТэВ.

Большие надежды ученых связаны с использованием ускорителей навстречных пучков. В обычных ускорителях пучок ускоренных частиц направляют на неподвижную мишень. При этом характер взаимодействия частиц пучка с частицами мишени определяется лишь малой частью энергии ускоренных частиц, основная же часть этой энергии переходит в кинетическую энергию продуктов реакции. В связи с этим родилась идея использовать встречные пучки ускоренных частиц. Например, два встречных протонных пучка от Серпуховского ускорителя на 76 ГэВ могли бы дать такой же эффект, какой можно было бы ожидать от протонного пучка с энергией 12 000 ГэВ в случае неподвижной водородосодержащей мишени. Основным недостатком ускорителей на встречных пучках — низкая плотность частиц в пучке по сравнению с плотностью частиц в неподвижной (например, твердой) мишени. Чтобы увеличить плотность частиц в пучке, применяют

так называемые накопительные кольца, где ускоренные частицы накапливаются за счет многих циклов ускорения. Кроме того, принимаются меры к фокусировке пучков с тем, чтобы максимально сжать пучки в месте их взаимной встречи. В настоящее время во всем мире существуют более десятка ускорителей со встречными e^+e^- -пучками с энергией каждого пучка вплоть до 18 ГэВ. В Новосибирске работают два таких ускорителя с пучками по 700 МэВ и по 7 ГэВ. В Европе (ЦЕРН, Швейцария — Франция) работают ускорители со встречными протонными пучками по 30 ГэВ и с протон-антипротонными пучками по 270 ГэВ. Именно на последнем ускорителе недавно были открыты новые очень тяжелые частицы (их масса составляет 10^2 протонных масс) — так называемые промежуточные бозоны. Сейчас планируется создание новых ускорителей со встречными протонными (или протон-антипротонными) пучками с энергией до нескольких ТэВ и со встречными e^+e^- -пучками с энергией до 150 ГэВ.