

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

621.384.6

**РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ  
УСКОРИТЕЛЕЙ***А. Л. Мицу*

Основополагающий принцип автофазировки частиц в резонансных циклических ускорителях, открытый В. И. Векслером, позволил устранить ограничение по энергии частиц, имеющее место в классических циклотронах, и тем самым преодолеть, так сказать, «релятивистский барьер». По мере дальнейшего повышения энергии протонов свыше  $10 \text{ Гэв}$  в синхротронах со слабой фокусировкой, неизбежно обладающих значительным сечением апертуры магнитного зазора, а следовательно, и большим весом электромагнита и большой мощностью его питания, появился новый барьер в сооружении ускорителей — «экономический барьер».

Предложение Кристофилосом, Снайдером, Ливингстоном и Курантом принципа сильной фокусировки существенно улучшило положение и позволило значительно снизить размеры и мощность питания электромагнита. Так, например, электромагнит протонного синхротрона в ЦЕРНе имеет вес  $4000 \text{ т}$  при максимальной энергии частиц  $30 \text{ Гэв}$ , тогда как у беватрона, рассчитанного на энергию протонов  $6,2 \text{ Гэв}$ , вес электромагнита достигал  $10\,000 \text{ т}$ , т. е. при энергии в 5 раз большей ускоритель с сильной фокусировкой имеет вес электромагнита в 2,5 раза меньше, чем в случае ускорителя со слабой фокусировкой; как видно, соотношение получается в пользу системы с сильной фокусировкой (примерно в 12 раз).

В настоящее время подходит к концу сооружение серпуховской машины, рассчитанной на ускорение протонов до  $70 \text{ Гэв}$ . Этот ускоритель с сильной фокусировкой является крупнейшим в мире и, по-видимому, в течение ряда лет будет оставаться самой большой установкой для экспериментов в области физики высоких энергий.

Переход к еще большим энергиям протонов, порядка сотен миллиардов электрон-вольт и до  $1000 \text{ Гэв}$ , можно себе представить только с использованием принципа сильной фокусировки. Однако и в этом случае стоимость ускорителей будет чрезмерно высокой. Более того, чрезвычайно жесткие требования к структуре магнитного поля, а следовательно, исключительно трудно достижимые допуски при изготовлении, установке и последующей эксплуатации элементов электромагнита, при дальнейшей попытке уменьшить апертуру магнитного зазора, приводят к появлению нового барьера — «барьера технической реализации», т. е. к вопросу о реальной осуществимости проекта такого ускорителя и его эксплуатационной устойчивости во времени.

Для преодоления этого барьера Э. Л. Бурштейном, А. А. Васильевым, В. А. Петуховым, С. М. Рубчинским и автором в 1961 г. был предложен принцип автокоррекции магнитного поля по данным о положении орбиты ускоряемых частиц в вакуумной камере, помещенной в зазоре электромагнита. После предварительной публикации, сделанной в 1961 г., принципы построения кибернетического ускорителя на энергию до  $1000 \text{ Гэв}$

были доложены на Международной конференции по ускорителям в Дубне (1963 г.). С тех пор в Радиотехническом институте АН СССР интенсивно ведутся теоретические и проектные работы для создания ускорителя протонов на 1000 Гэв и его модели на 1 Гэв. Существенное участие в развертывании проектных работ принимают также научные работники Московского инженерно-физического института и Объединенного института ядерных исследований.

Этим проектным работам предшествовали серьезные дискуссии в СССР, на специальной конференции в ЦЕРНе (Швейцария) и Брукхэйвене (США) по вопросу целесообразности разработки и создания ускорителей на сверхвысокие энергии. Все три группы (СССР, европейская группа (ЦЕРН) и США) пришли к одному ответу: создание протонных ускорителей на энергии до 1000 Гэв при интенсивности  $10^{13}$ – $10^{14}$  частиц в импульсе является целесообразным и необходимым.

В результате начальных исследований для ускорителей на 1000 Гэв с автокоррекцией магнитного поля мы приняли в качестве вариантов для дальнейшей разработки:

1) двухступенную систему с линейным ускорителем-инжектором протонов с энергией 200 Мэв и большой кольцевой системой, в которой энергия частиц возрастает от 200 Мэв до 1000 Гэв;

2) двухступенную систему с линейным ускорителем-инжектором протонов с энергией 1 Гэв и большой кольцевой системой, доводящей энергию частиц до 1000 Гэв,

и 3) трехступенную систему с линейным ускорителем-инжектором протонов с энергией 200 Мэв, промежуточным кольцевым ускорителем-бустером, в котором частицы приобретают энергию от 200 Мэв до 6 Гэв, и большой кольцевой системой, в которой энергия частиц доводится от 6 до 1000 Гэв.

Во всех трех вариантах было принято максимальное значение напряженности магнитного поля в зазоре электромагнита — 13 кэ, радиус кривизны орбиты 2570 м, а сечение вакуумной камеры от 6 до 20 см<sup>2</sup>. Дальнейшая разработка этого вопроса, проведенная во время эскизного проектирования кибернетического ускорителя на 1000 Гэв в Радиотехническом институте АН СССР, а также исследования магнитных блоков модели этого ускорителя на 1 Гэв показали возможность увеличить напряженность магнитного поля в зазоре электромагнита до 16 кэ. Это обстоятельство позволило для заданной энергии 1000 Гэв несколько уменьшить радиус кривизны орбиты до 2080 м, а также снизить длину орбиты с 20,0 до 15,55 км.

Анализ показал, что энергию инжекции следует повысить до 18 Гэв. Эта величина определяет выходные параметры кольцевого ускорителя-бустера.

Вакуумная камера в зазоре большого электромагнита будет иметь эллиптическое сечение при высоте камеры 40 мм и радиальной протяженности 66 мм, т. е. 26,0 см<sup>2</sup>.

Прирост энергии частиц за оборот в большом кольце равен 56 Мэв. Модуляция частоты ускоряющего напряжения составляет 0,12% (это может быть достигнуто достаточно простым образом).

Время ускорения — 1 сек при 20 циклах ускорения в минуту.

Суммарная мощность, потребляемая ускоряющей системой, — 23 Мвт.

В кольцевых ускорителях протонов выполнение требований автофазировки, в соответствии с теорией В. И. Векслера, приводит к необходимости одновременного изменения напряженности магнитного поля и частоты ускоряющего напряжения по известному закону, который вытекает из того факта, что по мере роста энергии, а следовательно, и

и массы частиц, радиус орбиты должен оставаться неизменным. Несоблюдение этого требования приводит к тому, что частицы высадятся на стенки вакуумной камеры и перестанут участвовать в дальнейшем процессе ускорения. Это требование тем труднее выполнить, чем больше радиус орбиты пучка частиц и чем меньше размеры, определяющие сечение вакуумной камеры или, что то же, апертуры зазора электромагнита. Предусмотренная в ускорителе система автоматического регулирования положения орбиты имеет назначение обеспечить коррекцию магнитного поля ускорителя с целью обеспечения надежного прохождения пучка частиц вблизи оси вакуумной камеры. Принцип действия системы заключается в обработке сигналов датчиков поперечных координат пучка и использовании полученной информации о состоянии магнитного поля для его коррекции.

В кибернетическом ускорителе существенную роль играет выбор метода компенсации искажений конфигурации магнитного поля. Для этой цели предусматривается система корректирующих линз (квадрупольных и секстипольных). Предусмотрено два этапа регулирования смещений орбиты: поперечных отклонений пучка частиц в период инжекции и поперечных отклонений мгновенной равновесной орбиты в течение периода ускорения. Система автоматического регулирования положения орбиты содержит 264 датчика отклонения пучка, 528 корректирующих устройств с усилителями, питающими их обмотки, и вычислительное устройство, определяющее необходимые величины токов в обмотках корректирующих магнитов и линз с учетом сигналов датчиков пучка.

Высокая надежность системы регулирования орбиты обеспечивается автоматическим отключением неисправных элементов и совместным действием исправных элементов, количество которых выбрано с учетом необходимого резервирования.

Отклонение показателя спада магнитного поля в блоках электромагнита приводит к изменению частоты бетатронных колебаний и появлению резонансных возбуждений пучка, что обуславливает жесткие допуски для коэффициента спада поля. Коррекция градиента магнитного поля по информации о движении пучка ускоряемых частиц позволяет существенно смягчить эти допуски.

Принцип действия системы регулирования частоты бетатронных колебаний заключается в следующем. Сгусткам ускоряемых частиц при помощи специального возбудителя сообщаются бетатронные колебания. На расстоянии от возбудителя, равном целому числу полуволн бетатронных колебаний плюс одна четверть длины волны, устанавливаются сигнальные электроды, напряжение на которых пропорционально смещению центра тяжести сгустка. Из напряжения, возникающего на сигнальных электродах, выделяется некоторая спектральная составляющая. Частота этой составляющей сравнивается с величиной, которой она должна быть равна по проекту. Сигнал рассогласования управляет током в квадрупольных линзах, корректирующих градиент управляющего поля ускорителя. Возмущающее действие, возбуждающее бетатронные колебания центра тяжести сгустка, должно быть таким, чтобы, с одной стороны, эти колебания существовали в моменты измерения частоты в течение всего времени ускорения, а с другой, чтобы поперечные размеры пучка к концу цикла ускорения не превысили поперечных размеров сечения вакуумной камеры ускорителя.

Регулирование пространственных гармоник градиента достигается за счет использования информации, полученной в результате выделения и обработки гармоник бетатронных колебаний пучка, соответствующих параметрическому возбуждению, для компенсации пространственных

гармоник с частотами  $2Q$  и  $2Q \pm 1$ , где  $Q$  — число бетатронных колебаний.

Хотелось бы добавить, что в Радиотехническом институте построена модель кибернетического ускорителя на  $1 \text{ Гэв}$ , которую предполагается использовать для экспериментального исследования совместной работы систем автоматического регулирования параметров ускорителя по информации о пучке, которые затем должны применяться в большом ускорителе.

Ускоритель на  $1 \text{ Гэв}$  сам по себе может явиться прототипом маленького ускорителя для исследовательских целей. В этой модели впервые предусмотрено автоматическое регулирование положения орбиты ускоряемых частиц, что дало возможность уменьшить апертуру вакуумной камеры и снизить строгие требования к постоянству фундамента ускорителя.

Процесс ускорения протонов здесь состоит из четырех этапов:

1) проводки пучка на уровне энергии инжекции через кольцевую камеру ускорителя (отработка первого оборота); на этом этапе система регулирования компенсирует неточности изготовления и расстановки магнитных блоков;

2) однооборотной инжекции ( $4 \text{ мксек}$ );

3) ускорения ( $0,4 \text{ сек}$ ); на этом этапе происходит увеличение энергии частиц от  $1 \text{ Мэв}$  до  $1,1 \text{ Гэв}$ ;

4) вывода ускоренных частиц.

В настоящее время полностью завершены изготовление и монтаж всех элементов ускорителя. Налажена работа вакуумной камеры и вакуумной системы. Рабочий вакуум лучше  $1 \cdot 10^{-6} \text{ мм ртутного столба}$ . При столь малом сечении вакуумной камеры это достигается присоединением к ней в ряде ее сечений вакуумного коллектора с большим диаметром, к которому присоединены пять систем высоковакуумных агрегатов с титановыми ионно-сорбционными насосами.

Решена проблема первого оборота. Кроме того, получена циркуляция пучка (до 20 оборотов) с очень малыми потерями частиц.

В качестве электронной вычислительной управляющей машины применена ЭВМ «Днепр» с довольно скромными показателями (быстродействие 4000 операций в секунду).

Элементы электромагнита выполнены в экспериментальных мастерских Радиотехнического института с большой степенью точности. Каждый блок электромагнита подвергался тщательным измерениям и испытаниям. Это было сделано для того, чтобы провести большую программу исследований по сознательному и точно контролируемому изменению положения электромагнитов для выявления действительных допусков, которые еще могут быть исправлены системами автоматического регулирования.

Приведем некоторые данные модели кибернетического ускорителя на  $1 \text{ Гэв}$ :

1. Средний радиус орбиты ( $8,5 \text{ м}$ ) определяется размерами испытательного зала института.

2. Энергия инжекции —  $1 \text{ Мэв}$ . В качестве инжектора применяется изготовленный у нас электростатический генератор Ван-де-Граафа на рабочее напряжение  $1 \text{ Мэ}$ .

3. Индукция магнитного поля при инжекции —  $250 \text{ гс}$ .

4. То же при эжекции —  $10 \text{ кгс}$ .

5. Число магнитных блоков — 100; охлаждение их обмоток водяное.

6. Длина блоков —  $35 \text{ см}$ .

7. Число бетатронных колебаний за один оборот —  $6,25$ .

8. Апертура вакуумной камеры  $1,6 \times 2,2 \text{ см}^2$ . Камера выполнена из овальной трубки из тонкой нержавеющей стали. Уплотнения между секциями выполнены из индия.

9. Частота обращения частиц при инжекции — 260 *кгу*.
10. То же при эжекции — 4,8 *Мгу*.
11. Прирост энергии за один оборот — 1000 *эв*.
12. Кратность радиочастоты — 5.
13. Вес железа всего магнита — 12 *т*.
14. Вес меди магнита — 4 *т*.
15. Число пар электростатических электродов — 20.
16. Число комплектов корректирующих магнитов — 20.
17. Точность измерения положения орбиты по радиусу и вертикали — 0,25 *мм*.
18. Число инжектируемых частиц при однооборотной инжекции —  $(2,5 \div 5) \cdot 10^{10}$ .
19. Число ускорительных радиочастотных станций — 10.

В заключение хотелось бы особо остановиться на влиянии основных идей В. И. Векслера на разработку идеи кибернетического ускорителя.

В начале своего сообщения я уже указывал, что из трех барьеров при создании циклических ускорителей протонов на высокие и сверхвысокие энергии самым первым и важнейшим является релятивистский барьер. Ни принцип сильной фокусировки, ни автокоррекция магнитного поля не могут найти применения, если не решен основополагающий вопрос об автофазировке частиц. Это основа основ построения циклических ускорителей резонансного типа. Поэтому имена Лоуренса и Векслера всегда будут в истории науки сиять немеркнущим светом. Предложенный в свое время классический циклотрон Лоуренса заложил основу создания первых ускорителей для изучения физики атомного ядра. Идеи же Векслера породили ряд классов циклических ускорителей легких и тяжелых частиц и многозарядных ионов. Синхротроны, синхроциклотроны, или, как их назвал В. И. Векслер, фазотроны, микротроны, протонные синхротроны или синхрофазотроны со слабой и сильной фокусировкой, кибернетические ускорители — все это племя ускорительных установок, помогающее нашей отечественной и мировой науке производить фундаментальные исследования в области физики высоких энергий для блага человечества, является результатом открытия В. И. Векслером принципа автофазировки. Поэтому мы все с таким большим удовлетворением восприняли присуждение В. И. Векслеру международной премии «Атом для мира».

Хотелось бы посвятить это скромное сообщение о наших работах светлой памяти В. И. Векслера. Его уход из жизни мы всегда будем ощущать с чувством глубокой горечи, а его славные дела — с чувством большой благодарности и гордости.