

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

621.384.6(023)

УСКОРИТЕЛИ КОЛЛЕКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ *)*Д. Киф*

Для ускорения частиц с положительным зарядом до высоких энергий могут быть использованы коллективные «собственные» поля интенсивных электронных пучков. В одном из вариантов электроны предварительно свертываются в кольцевой сгусток.

Ускорение и управление движением электрически заряженных частиц осуществляется с помощью электрического и магнитного полей, сформированных в ускорителе. Заряженные частицы естественно обладают собственными полями, причем поля всех частиц суммируются. Можно ли использовать коллективные поля предварительно ускоренных и определенным образом движущихся частиц для ускорения других частиц? Такие ускорители, открывающие многочисленные возможности, интенсивно исследуются в ряде лабораторий мира.

Первая попытка ускорить одни частицы посредством коллективного воздействия другого вида частиц была сделана примерно 20 лет назад в Стокгольме Х. Альвеном и О. Вернхольмом. Они пытались ускорить положительные ионы, увлекая их внутри сфокусированных сгустков электронов. Эксперимент оказался неудачным, поскольку в то время не было возможности получить достаточно интенсивный пучок электронов. После длительного перерыва интерес к коллективным методам вспыхнул вновь, прежде всего благодаря двум достижениям. Во-первых, в течение последних нескольких лет значительных успехов достигла техника получения интенсивных электронных пучков. Во-вторых, оказалось, что ряд предложенных способов применения этого метода для ускорения частиц поддается теоретическому анализу. Эта статья касается в первую очередь использования коллективных эффектов в целях ускорения протонов и других положительных ионов. Чтобы дать некоторое представление о широких потенциальных возможностях, подсказанных этим новым мощным экспериментальным методом, будут также упомянуты совершенно иные приложения коллективных эффектов.

Начнем рассмотрение с некоторых наиболее существенных особенностей (и ограничений) обычных ускорителей, чтобы понять, что именно

*) Denis Keefe, Collective-effect Accelerators, Scientific American 226(4), 22 (April 1972). Перевод М. М. Фикса.

Денис Киф — руководитель группы в Лаборатории им. Лоуренса Калифорнийского университета в Беркли (США), занятой исследованиями ускорителей коллективного действия.

может дать коллективный подход. Все современные ускорители частиц высоких энергий обладают двумя общими свойствами: частицы ускоряются в электрическом поле, а магнитное поле обеспечивает их движение в нужном направлении. В линейном ускорителе частицы проходят последовательно через длинный ряд высокочастотных резонаторов; магнитное поле, направляющее их по прямой линии, сравнительно мало и создается с помощью магнитных «линз», помещенных между резонаторами. Типичные значения величины прироста энергии на единицу длины в линейном ускорителе составляют 7 Мэв/м и $1,5 \text{ Мэв/м}$ для электронов и протонов соответственно.

В случае ускорения частиц до очень высоких энергий линейные ускорители становятся непомерно длинными. Выход из этого затруднения появился с изобретением Э. Лоуренсом циклотрона в 1931 г. Частицы в циклотроне движутся по круговым орбитам в ведущем магнитном поле и периодически проходят через единственное небольшое высокочастотное устройство. Изобретение синхротрона, а позднее открытие принципа жесткой фокусировки привело к существенным упрощениям магнитной системы: громоздкий магнит циклотрона удалось заменить тонким кольцевым магнитом и достичь значительно больших энергий при разумной стоимости ускорителя. Типичная величина прироста энергии на единицу длины в протонном синхротроне составляет 40 Мэв/м . Например, большой протонный синхротрон с жесткой фокусировкой Брукхейвенской Национальной лаборатории, размещенный в тоннеле длиной 800 м, сообщает протонам энергию 30 Гэв . Скорость прироста энергии, измеренная в единицах Мэв/м — важный показатель, на который следует обратить внимание; он определяет качество ускорителя, поскольку полная стоимость установок на высокие энергии растет, грубо говоря, пропорционально длине сооружений (магнита, тоннеля, защиты, зданий и т. д.). Чем выше рассматриваемый показатель, тем дешевле ускоритель или, иначе говоря, при заданной стоимости можно достичь большей энергии частиц. С экономическими факторами тесно связаны технологические, которые ограничивают возможности традиционных ускорителей. Верхние границы «обычных полей» для краткости можно грубо определить следующими цифрами: напряженность электрического ускоряющего поля — примерно 10 миллионов в/м (предел по пробое), а ведущего магнитного поля — порядка 20 кэс. Быстрое совершенствование сверхпроводящих магнитов и сверхпроводящих резонаторов дает возможность надеяться, что с течением времени эти пределы возрастут приблизительно в два раза. По существу, технические возможности определяют как размеры, так и стоимость традиционных ускорителей.

Независимо от технологических проблем возникает вопрос: какие ограничения на характеристики пучка накладывают физические законы? В случае небольших токов, т. е. при малом количестве частиц, вопросы устойчивости движения как в линейных, так и в циклических ускорителях хорошо изучены в «одночастичном» приближении *). Например, известно, как выбрать ведущее и ускоряющее поля в линейном или циклическом ускорителе, чтобы частицы группировались в стабильные по размерам сгустки, движущиеся синхронно с высокочастотными полями. При этом все еще могут существовать силы, вызывающие размытие сгустков, что в конечном счете приводит к потерям частиц в результате их столкновений со стенками вакуумной камеры; однако эти силы можно устранить при конструировании.

*) В этом приближении предполагается, что частицы друг с другом не взаимодействуют, и движение каждой определяется только внешними полями. (Прим. перев.)

За последние 10 лет все большее значение приобретает другой класс проблем, связанных со стабильностью движения. Повышенный интерес к этим проблемам объясняется энергичными усилиями по увеличению интенсивности пучков в ускорителях и созданием накопительных колец, в которых необходимо иметь большие токи. Поскольку пучок представляет собой одновременно и линейный заряд и электрический ток, постольку он генерирует электрическое и магнитное поля. При определенном уровне

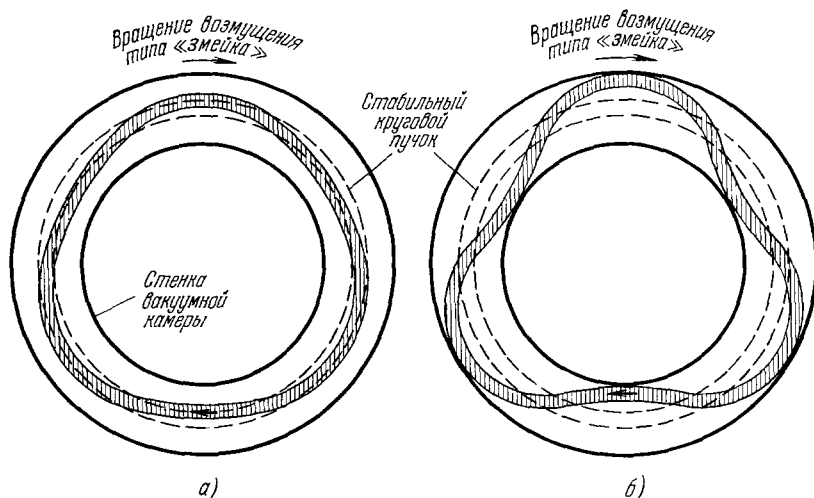


Рис. 1. Когерентная поперечная неустойчивость — пример нежелательного коллективного поведения, которое может ограничивать интенсивность пучка в обычных ускорителях частиц высокой энергии.

В этом случае круговой пучок как целое ведет себя подобно змее или канату, образуя целочисленное количество волнообразных отклонений от окружности (а). Амплитуда отклонений при развитии неустойчивости увеличивается до тех пор, пока пучок не начнет «тереться» о стенки вакуумной камеры (б). Эти неустойчивости могут стать опасными даже тогда, когда коллективные собственные поля, генерируемые пучком, еще очень малы по сравнению с внешними полями.

эти поля перестают быть пренебрежимо малыми и могут оказывать обратное воздействие на пучок, возмущая его различными способами. Эти коллективные собственные поля, генерируемые пучком как целым, т. е. как совокупностью заряженных частиц, могут привести к неприятным последствиям, когда они достигают величины, остающейся еще очень малой (порядка одного процента или менее) по сравнению с внешними лабораторными полями. Помимо рассмотренных в этой статье когерентной поперечной неустойчивости (рис. 1) и неустойчивости типа отрицательной массы (рис. 2), известно много видов «коллективных» неустойчивостей, но не все они изучены. Стоит подчеркнуть, что на сегодняшний день рабочие характеристики всех ускорителей и накопительных колец ограничиваются, по существу, неблагоприятными коллективными явлениями.

Сказанного достаточно, чтобы ощутить нежелательные последствия коллективного поведения. Поэтому можно себе представить, какой необходим гигантский интеллектуальный скачок, чтобы обсуждать способность пучков заряженных частиц создавать электрические и магнитные поля, величина которых составляет не малую часть по сравнению с обычно используемыми в лаборатории, но сравнима с ними и даже много больше их! Более двух десятков лет назад некоторые исследователи серьезно задумались о пользе, которую можно было бы извлечь из такого рода эффектов. Были предсказаны два основных достоинства метода получения сильных полей с помощью интенсивных пучков частиц. Во-первых, таким способом можно создавать магнитные или электрические поля специального

вида в областях пространства, куда нельзя ввести электроды или токовые магнитные катушки. Во-вторых, если можно было бы с помощью коллективных эффектов получить (и контролировать) значительно более сильные поля, сравнительно с теми, что обычно используются в лабораториях, мы сумели бы преодолеть технические барьеры, ограничивающие ведущее магнитное и ускоряющее электрическое поля в традиционных ускорителях. Это привело бы либо к более компактным устройствам, либо к ускорителям частиц на сверхвысокие энергии.

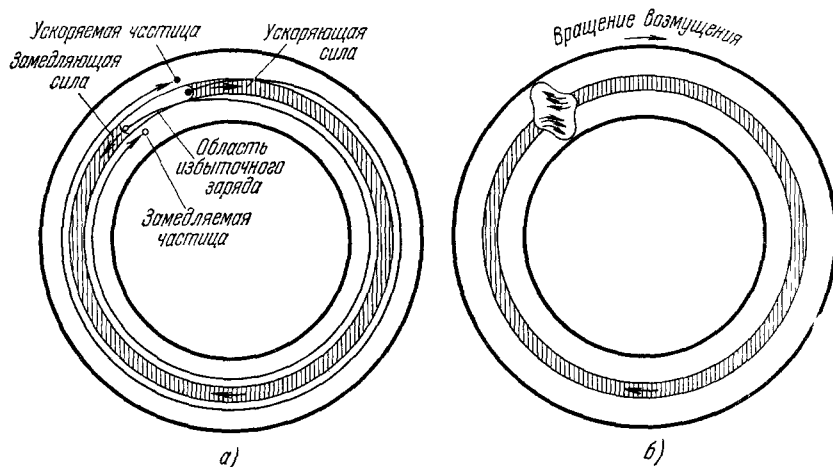


Рис. 2. Неустойчивость типа отрицательной массы — другое неприятное проявление коллективного поведения, которое может мешать нормальной работе обычного ускорителя частиц.

В циркулирующем круговом пучке из-за статистических флуктуаций может появиться избыток заряда (а). Электростатические силы будут ускорять частицы передней части зоны с повышенной плотностью и замедлять частицы на ее хвосте. Ускоренные частицы будут переходить на орбиту большего радиуса с более длительным периодом обращения и, таким образом, имеют тенденцию через оборот несколько отстать (т. е. приблизиться к центру сгустка). Наоборот, замедляемые частицы перейдут на орбиту меньшего радиуса с более коротким периодом обращения, и, следовательно, уйдут вперед (т. е. тоже приблизятся к центру сгустка). Так как ускоренные частицы отстают, а замедляемые уходят вперед, то этот, так называемый, эффект отрицательной массы может привести к большому радиальному расширению и разрушению пучка как непрерывного кольцевого образования (б).

Установленные в довольно общем виде, эти две выигрышные особенности коллективного метода лучше всего проиллюстрировать, рассмотрев несколько примеров (к вопросу о возможности создания и контроля сгустков с необходимой высокой концентрацией частиц мы еще вернемся). Хороший пример применений первого из названных преимуществ дает не область ускорителей, а исследовательская программа по контролируемому ядерному синтезу: имеется в виду установка для удержания плазмы, построенная Н. Кристофилосом в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса Калифорнийского университета и названная «Астрон».

В принципе, с помощью отдельного магнита соленоидного типа можно было бы создать подходящую для удержания плазмы заряженных частиц «магнитную бутылку», в которой ионы и электроны движутся по спирали вдоль замкнутых силовых линий, окружающих катушку. Практически такая установка не будет работать: плазма будет быстро утеряна из-за столкновений с витками катушки, механическими держателями и токонесущими проводами. Более того, в окончательном варианте термоядерного реактора катушки не смогут выдержать высокой температуры.

Предложенное Кристофилосом решение этого комплекса проблем состоит в создании подвешенного «нематериального» соленоида, образованного слоем вращающихся электронов, который он назвал *E*-слоем

(рис. 3). Чтобы создать этот слой, он инжектирует интенсивный пучок релятивистских электронов под углом к оси цилиндрической вакуумной камеры, расположенной внутри обычного соленоида. Под воздействием магнитного поля траектории электронов свертываются в круговые орбиты диаметром около метра; перемещаясь в аксиальном направлении, электроны образуют цилиндрический слой. Пара дополнительных катушек, играющих роль «зеркал», удерживает электроны, чтобы они не уходили слишком далеко вдоль оси соленоида. Если собрать в E -слое достаточно много электронов, то создаваемое ими магнитное поле может превзойти поле внешнего соленоида. В результате меняется направление магнитного поля вблизи оси, возникают магнитные силовые линии, замкнутые вокруг электронной оболочки, и магнитная бутылка готова.

Чтобы добиться желаемого результата, в существующем варианте «Астрона» необходимо увеличить электронный ток примерно в 10 раз. В эксперименте на малой модели Корнельского университета недавно было достигнуто изменение направления магнитного поля.

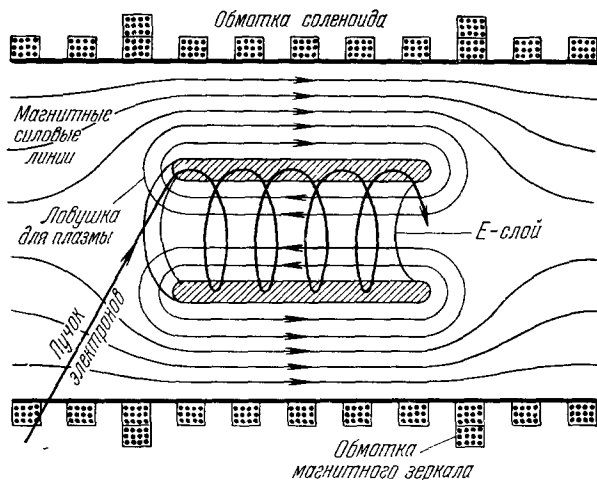


Рис. 3. Схема установки «Астрон».

Это устройство служит примером приложения принципа коллективного воздействия частиц к проблеме магнитного удержания горячей плазмы в исследованиях по управляемым термоядерным реакциям.

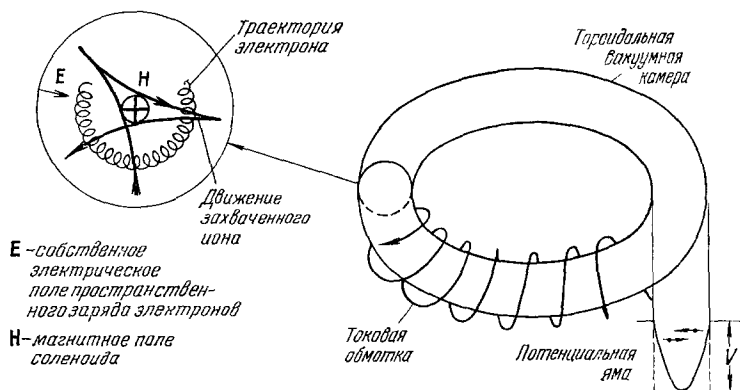


Рис. 4. ХИПАК — плазменный ускоритель тяжелых ионов.

Это пример такого применения коллективных эффектов, когда используется не магнитное, а электрическое поле, создаваемое электронами.

Другая установка из этого вида машин — плазменный ускоритель тяжелых ионов ХИПАК (HIPAC)* (рис. 4). В ней используется не магнитное, а электрическое поле, создаваемое электронами. Эта установка, построенная Р. Леви и сотрудниками в Исследовательской лаборатории в Эверетте, была охарактеризована как «настолярная плита для выпечки

* Аббревиатура английского названия «heavy-ion plasma accelerator». (Прим. перев.)

тяжелых ионов» Внутренний объем тороидальной вакуумной камеры заполнен электронами, обладающими сравнительно небольшой энергией. Вокруг камеры намотаны провода, по которым идет электрический ток, создающий магнитное поле соленоидного типа. Это поле заставляет электроны вращаться, удерживая их от столкновений со стенками и предотвращая потери. Внутрь камеры вводится небольшое количество газа, атомы которого ионизируются в результате столкновений с электронами. Атом потерявший электрон, становится положительным ионом и оказывается в глубокой электростатической потенциальной яме, созданной окружающим его морем отрицательных электронов. Положительные ионы удерживаются и, осциллируя в этой потенциальной яме, время от времени сталкиваются друг с другом. Первоначальной целью было создание столь глубокой потенциальной ямы (от 10 до 20 млн. e), чтобы энергии сталкивающихся ионов были достаточно велики для осуществления ядерных превращений и образования трансурановых элементов. Перед окончанием экспериментальной работы были достигнуты потенциалы примерно в 10 раз меньше желаемых.

Другая основная область приложений коллективных эффектов включает различные варианты преодоления существующих технических ограничений в традиционных ускорителях. Еще в 1956 г. советский физик Г. И. Будкер показал, как можно использовать интенсивный электронный пучок, чтобы создать ведущее магнитное поле для протонов в циклическом ускорителе. В одном из вариантов предполагалось использовать систему, состоящую из кольцевого магнита и обеспечивающую небольшие ускоряющие поля. В эту систему инжектируется пучок электронов огромной интенсивности (сила тока несколько тысяч ампер) с небольшой энергией частиц (несколько мегаэлектрон-вольт). Двигаясь в магнитном поле, электроны излучают энергию (синхротронное излучение). Можно показать, что процесс излучения приведет к уменьшению поперечного сечения пучка. Если начать с электронного пучка диаметром, скажем, несколько сантиметров, то с течением времени он сожмется в тонкую нить с поперечником много меньше миллиметра. Простые вычисления показывают, что магнитное поле вблизи поверхности столь интенсивного «волосяного» пучка может достигать миллиона гаусс! Даже очень энергичные протоны могут удерживаться таким полем и двигаться по круговым орбитам в ускорителе, осциллируя внутри электронной нити. Таким образом, можно создать компактный ускоритель протонов на очень высокие энергии. Хотя предложения Будкера в их первоначальной форме сейчас представляются практически неосуществимыми, они стимулировали большое количество новых теоретических и экспериментальных работ, в которых коллективные поля пучков одних частиц используются для управления другими частицами.

Последние исследования коллективных полей показывают, что усовершенствование ускоряющих систем (электрические поля) более перспективно, чем работа с управляющими системами (магнитные поля). В соответствии с этим оставшаяся часть этой статьи будет посвящена проектам, в которых предполагается использовать огромные собственные электрические поля пучков заряженных частиц. Эти проекты делятся на два основных класса: в основе одних лежит коллективное воздействие непрерывного потока электронов, а другие базируются на использовании сгустков с высокой плотностью электронов. Особое место среди ускорителей второго типа занимают установки, в которых электронный сгусток формируется в виде кольца.

За много лет до того, как интенсивные пучки электронов с весьма высокой энергией стали доступными в лабораторных условиях, существовало множество теоретических работ о поведении таких пучков при прохожде-

нии их через газ. Из этих работ следовало, что пучок электронов с энергией порядка миллиона электрон-вольт не сможет «распространяться» (т. е. сохранить свои характеристики в направлении движения), если сила тока превысит несколько десятков тысяч ампер. Х. Альвен и английский физик Д. Лоусон предположили, что при определенных условиях может существовать лишь ограниченный по величине ток, предельное значение которого в амперах примерно равно произведению 34 000 на энергию электронов в мегаэлектрон-вольтах; при такой величине тока коллективные поля могут буквально разорвать пучок на части. Чтобы понять, на чем основывались их предположения, попытаемся проанализировать, что происходит, когда пучок релятивистских электронов попадает из вакуума в область, заполненную газом. В вакууме кулоновское расталкивание зарядов одного знака (электростатические силы) стремится увеличить поперечные размеры пучка. В то же время притяжение параллельных токов, создаваемых движущимися зарядами



Рис. 5. В вакууме на пучок релятивистских электронов действуют силы двух типов.

Электростатические силы стремятся увеличить поперечный размер пучка, а магнитные силы стремятся уменьшить его. Силы отталкивания немного превосходят силы притяжения, в результате площадь поперечного сечения пучка медленно растет.

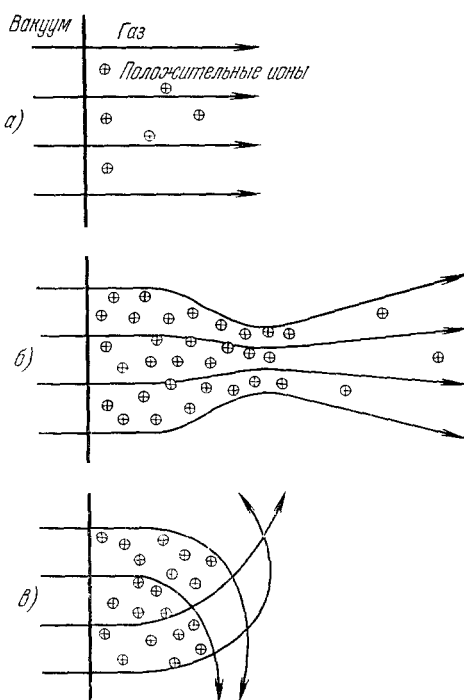


Рис. 6. Движение электронного пучка в газе.

Релятивистские электроны, сталкиваясь с атомами нейтрального газа, ионизуют их (а). После прохождения пучком некоторого расстояния в определенном месте (за фронтом пучка) образуется такое количество положительных ионов, что начинается нейтрализация пространственного заряда электронного пучка. В результате в этом месте возникает перетяжка (б). Когда плотность положительных ионов приближается к величине, достаточной для полной нейтрализации отрицательного заряда электронного пучка и ток равен предельному, собственное магнитное поле на краю пучка круто заворачивает электроны (в).

(магнитные силы), уменьшает эти размеры. Силы отталкивания всегда больше сил притяжения, но в случае релятивистского пучка это превышение весьма мало. Например, при энергии электронов 5 Мэв магнитное притяжение компенсирует 99% электрического отталкивания. Поэтому площадь поперечного сечения пучка будет расти очень медленно (рис. 5).

Когда пучок электронов проходит через газ, электроны сталкиваются с нейтральными атомами и выбивают атомные электроны (рис. 6, положение а). Вследствие сильного кулоновского отталкивания атомные электроны быстро выбрасываются из пучка, а сравнительно малоподвижные положительные ионы остаются в нем. После того, как определенная часть

пучка прошла через данную точку, в этом месте образуется достаточное количество положительных ионов, чтобы началась нейтрализация пространственного заряда электронного пучка. В результате уменьшаются силы расталкивания, расширяющие пучок, берут верх силы магнитного притяжения, сжимающие его, и пучок «схлопывается», до меньшего поперечного размера (рис. 6, б). Этот «пинч-эффект» может привести к драматическим последствиям, когда плотность положительных ионов приблизится к величине, достаточной для полной нейтрализации отрицательного

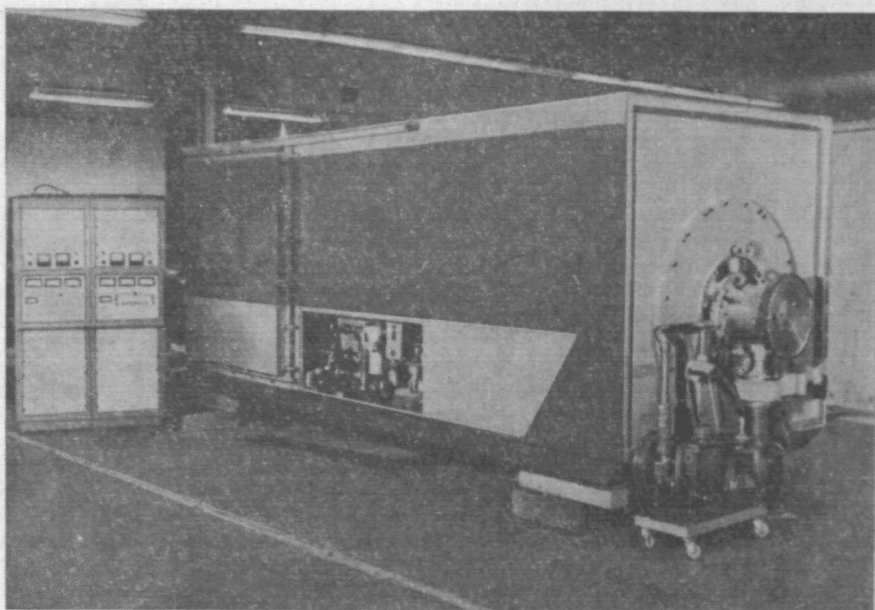


Рис. 7. Линейный ускоритель электронов — установка, которая используется в настоящее время для изучения коллективных эффектов, возникающих при прохождении интенсивных электронных пучков через газы.

Изображенный на рисунке ускоритель был спроектирован и построен «Международной физической компанией».

заряда электронного пучка. Как только величина тока достигает предельного значения Альвена — Лоусона, магнитное поле на краю пучка начинает «работать» в полную силу, круто заворачивая релятивистский электрон на 180 градусов в пределах диаметра пучка *) (рис. 6, в).

Экспериментальное изучение этих эффектов стало возможным лишь в последние несколько лет благодаря созданию сильноточных электронных ускорителей **). Недавно были получены токи релятивистских электронов интенсивностью более миллиона ампер. Саморазрушение пучков огромными коллективными полями действительно наблюдалось (рис. 8), однако оказалось, что пучки могут быть и устойчивыми (рис. 9). Было обнаружено успешное распространение пучков, интенсивность которых превышала в 10 раз токи, считавшиеся предельными. Эти результаты можно понять на основе более полного анализа, учитывающего ток, который возникает

*) Это не совсем точно. Если магнитное поле меняет направление движения электрона на противоположное, то это происходит в пределах, не превышающих радиуса пучка (Прим. перев.).

**) Один из них показан на рис. 7. (Прим. перев.)

благодаря движению медленных электронов и ионов и вызывает дополнительные нейтрализующие эффекты ***).

Исследуя явление пинча в пучке электронов с энергией $1,3 \text{ Мэв}$ и интенсивностью 40 к/а , С. Грейбил и Д. Углам, работающие в «Корпорации

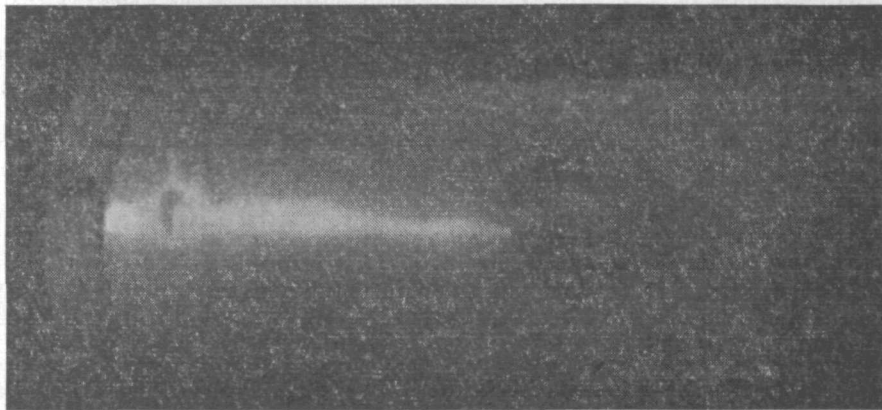


Рис. 8. На фотографии отчетливо видно быстрое разрушение интенсивного электронного пучка после его выхода из вакуума в газ.

Для съемки использовалось лишь излучение, возникающее в процессе рекомбинации молекул, ионизованных электронами пучка. Фотография сделана на пучке линейного электронного ускорителя Международной физической компании и соответствует рис. 6, в.

ионной физики», в начале 1969 г. с удивлением обнаружили, что при прохождении пучка через короткую трубку с газом появляются в значи-

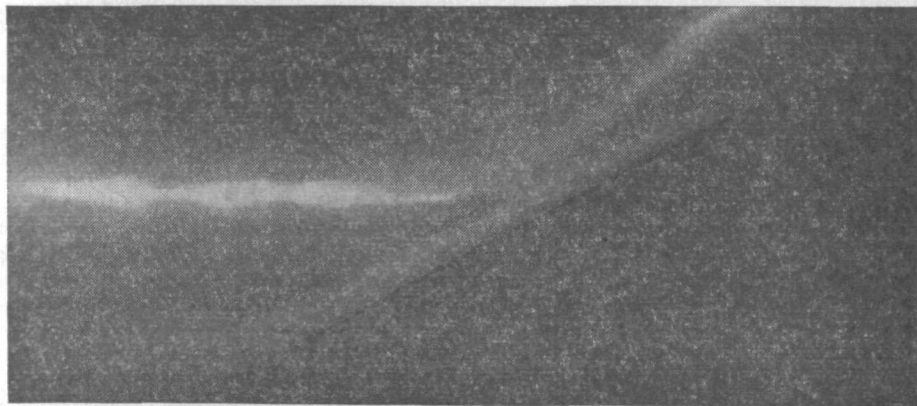


Рис. 9. Полученная на том же ускорителе фотография иллюстрирует любопытное поведение интенсивного пучка электронов высокой энергии в газе при низком давлении. Когда на пути такого пучка помещается наклонная металлическая пластина, возникающие в металле интенсивные электрические и магнитные «изображения» приводят к появлению больших сил, отклоняющих электроны. В результате пучок как бы откакивается от пластины, хотя в действительности электроны с ней не сталкиваются.

тельных количествах ионы с весьма высокой энергией. Наполняя трубку различными газами, они получали импульсные моноэнергетические пучки

*) Речь идет о компенсации магнитного поля электронного пучка магнитным полем, связанным с возникающим обратным током. Это обратное поле ослабляет пинч-эффект в пучке. (Прим. перев.)

протонов, дейтронов, ионов гелия или азота. Последующие расширенные эксперименты, подтверждающие результаты этой работы, были проделаны в «Международной физической компании» Дж. Ионасом и его сотрудниками. Они установили, что вблизи фронта пучка должны существовать очень сильные электрические поля (50 миллионов в/м), которые ускоряют ионы. Эти наблюдения являются очевидной и впечатляющей демонстрацией ускорения ионов до используемых в ядерной физике энергий с помощью коллективных полей, которые намного превышают электрические поля, обычно получаемые в лабораторных условиях.

Пока еще не совсем ясно, каким образом эти поля возникают и как они остаются сфазированными с ионами. Одно из объяснений, предложенное Н. Ростокером из Корнелльского университета, заключается в том, что изменение распределения ионизации приводит к образованию потенциальной электрической ямы, сравнительно медленно перемещающейся в направлении распространения электронного пучка *). Согласно другой гипотезе, выдвинутой С. Патнэмом из «Международной физической компании», электрическое поле индуцируется там, где возникают пинчи (как следствие нарастания энергии магнитного поля, связанного с пучком). Направление электрического поля таково, что электроны пучка замедляются, а положительные ионы ускоряются. Вопрос о механизме ускорения еще ожидает своего экспериментального решения. Надежные наблюдения указывают на высокую степень упорядоченности процесса ускорения; поэтому вполне вероятно, что в одном пучке процесс можно повторять для того, чтобы ускорять протоны или ионы до значительно более высоких энергий. Для создания модуляции плотности в продольном направлении (это эквивалентно локальной потенциальной яме) был предложен ряд методов с использованием внешних полей, что позволяет контролировать движение волны плотности.

Замечательное качество ускорителей коллективного действия состоит в том, что в них можно одновременно ускорять различные заряженные частицы. Это нельзя осуществить в обычных резонансных ускорителях: их настройка критически зависит от точного значения отношения заряда к массе ускоряемых частиц.

Привлекательность ускорения плотных сгустков электронов можно усмотреть из следующего рассуждения. Представим сферический сгусток диаметром, скажем, один сантиметр, содержащий 10^{13} электронов, в который введено небольшое количество протонов, например, путем ионизации водорода. Протоны оказываются захваченными в глубокую потенциальную яму и, чтобы выйти из нее, должны преодолеть огромные поля — напряженностью порядка 600 Мв/м . Если этот сгусток ускорить электрическим полем напряженностью $x \text{ в/м}$, созданным двумя электродами (рис. 10) или возбужденным в высокочастотном резонаторе, то каждый электрон на одном метре пути приобретает энергию $x \text{ эв}$. Между тем каждый увлекаемый внутри сгустка протон получит энергию в 1836 раз большую. Причина этого состоит в том, что при заданном изменении скорости изменение энергии пропорционально массе частицы, а масса протона в 1836 раз больше массы электрона. Если же ускорять «голый» протон, т. е. протон, не находящийся внутри сгустка, то прирост его энергии будет просто равен $x \text{ эв}$. Таким образом, использование коллективного воздействия вместо

*) Имеется в виду потенциальная яма, создаваемая электронами, на фронте ионизации, где еще не произошла компенсация пространственного заряда электронного пучка. В результате между фронтом пучка и той его частью, где компенсация заряда уже наступила, возникает разность потенциалов, под действием которой ионы ускоряются, а распространение фронта тормозится (Прим. перев.).

обычных электрических полей дало бы огромный выигрыш в приросте энергии: увеличение в 1836 раз.

К сожалению, рассмотренный пример практически невозможно реализовать. Большие электрические поля, которые удерживают захваченные протоны, расталкивают электроны сгустка, и поэтому компактная структура не может существовать. Правда, в быстро движущемся сгустке можно обеспечить сохранение поперечных размеров, добавляя достаточное количество ионов, чтобы вызвать пинч; однако в направлении движения большие электрические поля по-прежнему действуют в полную силу, расширяя

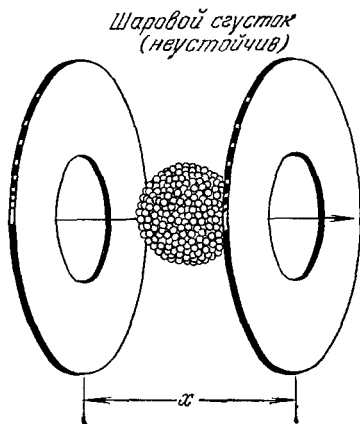


Рис. 10. Шаровой сгусток электронов можно ускорить электрическим полем напряженностью x в/м, созданным двумя электродами с круглыми отверстиями.

Прирост энергии каждого электрона на метре пути составил бы x эв. В то же время прирост энергии протона, помещенного в такой сгусток, был бы в 1836 раз большим. К сожалению, большие электрические поля, удерживающие захваченные протоны, стремятся раздуть электронный сгусток, и подобная компактная структура не может существовать.

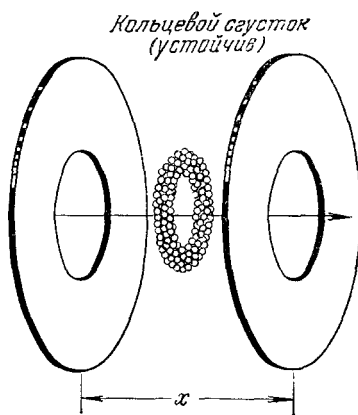


Рис. 11. Кольцевой сгусток электронов, вращающихся с релятивистскими скоростями, будет в том же электрическом поле устойчивым.

Когда такое кольцо ускоряется в направлении, перпендикулярном к своей плоскости, релятивистские эффекты приводят к тому, что масса вращающегося электрона оказывается примерно в 23 раза больше массы покоящегося. Поэтому прирост энергии протонов, увлекаемых внутри сгустка, составит на метре пути примерно $80x$ эв.

сгусток. Теперь легко понять всю прелесть самофокусирующегося сгустка — кольца вращающихся релятивистских электронов. Рассмотрим пучок электронов с энергией 10—20 Мэв, свернутый в кольцо в соответствующем магнитном поле. Как следует из предыдущего обсуждения поведения прямых пучков, магнитное притяжение параллельных электронных токов может скомпенсировать электрическое расталкивание примерно на 99,9 процента. Поэтому небольшая добавка протонов (несколько больше 0,1 процента от количества электронов) скомпенсирует оставшуюся часть сил отталкивания и уменьшит малый радиус кольца. Это протонное наполнение приводит к самофокусировке сгустка, в котором глубокая потенциальная яма реализуется в виде тора, заполненного вращающимися электронами.

Однако за стабилизацию такого типа приходится платить. Релятивистские эффекты приводят к тому, что вращающиеся электроны будут тяжелее по сравнению с покоящимися. Поэтому, когда кольцо ускоряется в направлении, перпендикулярном к его плоскости (рис. 11), кольцевой сгусток ведет себя во внешнем поле так, как если бы он состоял из «тяжелых» электронов, с массой, большей массы покоя примерно в 20—40 раз.

В соответствии с этим полный выигрыш энергии в 1836 раз получить нельзя; детальный анализ дает надежду на максимальный выигрыш, близкий к 80. Такой прирост энергии все еще заслуживает того, чтобы за него бороться. Если напряженность внешних полей составит 10^7 в/м, эффективное ускоряющее поле, действующее на протоны, будет в 80 раз больше, т. е. можно достичь прироста энергии 800 Мэв/м, а это было бы большим шагом вперед по сравнению с лучшим синхротроном.

Использование электронного кольца как средства ускорения дает неожиданное преимущество, поскольку появляется возможность ускорять кольцо с ионами в магнитном поле довольно простого вида. Поэтому

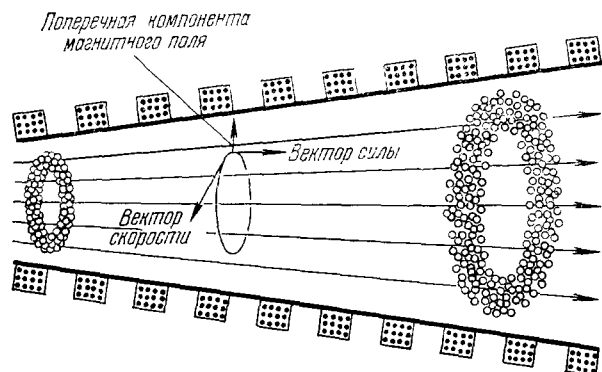


Рис. 12. Использование кольца для ускорения тяжелых ионов дает неожиданную выгоду.

Когда кольцо вводится в соленоид со спадающим по длине магнитным полем, сочетание вращательного движения электронов и небольшой поперечной компоненты магнитного поля порождает силу, ускоряющую кольцо вдоль соленоида. Тем самым утрачивается необходимость в ускоряющей системе электрического типа. Размеры кольца в процессе ускорения растут, а вращательная энергия электронов уменьшается.

можно обойти трудности, связанные с электрической ускоряющей системой. Когда кольцо вводится в соленоид, в котором аксиальное магнитное поле уменьшается по его длине (другими словами, соленоид, в котором магнитные силовые линии слегка расходятся), наличие вращательного движения электронов и небольшой радиальной компоненты магнитного поля приводит к появлению силы, ускоряющей кольцо вдоль соленоида (рис. 12). В процессе ускорения размеры кольца несколько увеличиваются, а энергия, запасенная в виде вращательного движения электронов, уменьшается и трансформируется в энергию продольного движения ускоренного кольца с ионами. Ускорение с помощью «магнитного расширения», возможно, будет применяться для получения протонов с энергией около 1 Гэв и тяжелых ионов с энергией порядка 500 Мэв/нуклон. Ускорители в этой области энергий могут иметь большое значение для пионной физики, биологических исследований, терапии рака и ядерной химии тяжелых и сверхтяжелых элементов.

Советским физиком В. И. Векслером впервые было предложено использовать кольца релятивистских электронов для ускорения протонов и положительных ионов. Он и его сотрудники в течение нескольких лет работали в Дубне над вопросами практического создания колец с необходимыми параметрами до опубликования их работы четыре года назад *). Физики других лабораторий были удивлены и пора-

*) Сообщение о работе было сделано на IV Международной конференции по ускорителям в сентябре 1967 г. К этому же времени относится и первая публикация работы. (Прим. перев.)

жены большими перспективами, которые открывали электронные кольца. Свойства и поведение таких колец в значительной мере поддавались детальному теоретическому анализу. Немедленно и повсеместно началась работа с электронными кольцами. Две группы были организованы в Соединенных Штатах: наша группа в Лаборатории им. Лоуренса в Беркли и другая — в университете штата Мэриленд. Кроме того, начались эксперименты

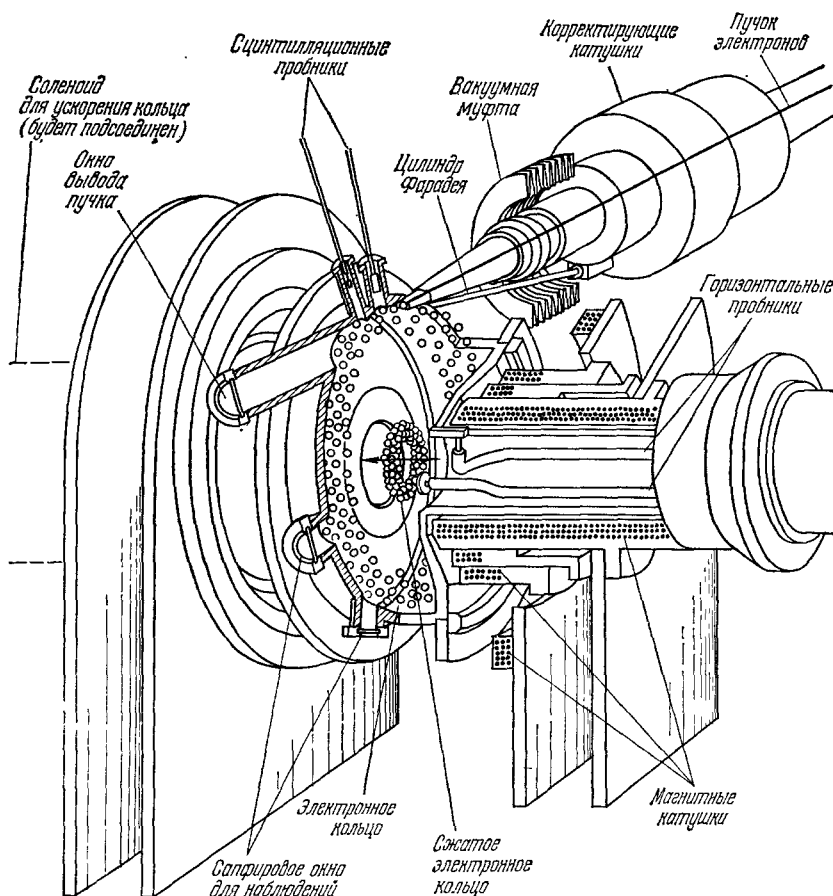


Рис. 13. На поперечном разрезе компрессора показана внутренняя часть вакуумной камеры, в которой сначала электронное кольцо формируется, а затем сжимается до малых размеров.

На рисунке видны также различные устройства с дистанционным управлением для введения пробников внутрь вакуумной камеры.

в Гаршинге и Карлеруэ в ФРГ, а несколько позднее начали работать небольшие группы во Франции, Италии и Японии. Тем временем в Советском Союзе большую программу исследований по ускорителям электронных колец начала еще одна группа, в Институте теоретической и экспериментальной физики в Москве.

В принципе можно представить, что формирование кольца с пригодными для ускорения ионов свойствами (большой радиус около четырех сантиметров, малый — около миллиметра) осуществляется путем инжекции примерно 10^{13} электронов с энергией порядка 15 Мэв в магнитное поле, в котором их траектории станут круговыми. Однако на сегодняшний день сделать это практически нельзя. Обычно поступают следующим образом. Сначала формируют в вакуумной камере (рис. 13), названной

компрессором*), кольцо значительно больших размеров (приблизительно таких, как у камеры велосипедного колеса). В мире существует несколько электронных инжекторов, которые в состоянии обеспечить необходимые для создания таких колец токи (сотни ампер) и энергии (2—4 Мэв). Магнитное поле в компрессоре создается с помощью набора медных витков с током. После инжекции первоначального большого кольца магнитное поле быстро увеличивают за время порядка одной десятой миллисекунды. Рост магнитного поля приводит к двум эффектам. Во-первых, вращающиеся электроны приобретают значительную энергию благодаря индукционному действию изменяющегося магнитного поля. Во-вторых, и большой и малый радиусы кольца существенно уменьшаются. Если параметры выбраны правильно, в результате сжатия первоначальное большое кольцо низкоэнергетических электронов превращается в маленькое тонкое кольцо электронов с высокой энергией, которое пригодно для ускорения протонов и более тяжелых ионов.

В конце процесса сжатия в компрессор вводится небольшое количество водорода (или другого газа). Вращающиеся электроны ионизуют часть газа и протоны (или тяжелые ионы) остаются захваченными потенциальной ямой, образуемой тонким кольцом, создавая в свою очередь необходимые условия для самофокусировки. Теперь, когда кольцо должным образом подготовлено, следующий шаг состоит в аккуратном изменении магнитного поля, чтобы вытолкнуть кольцо из компрессора и ввести его в ускоряющую систему. Изменение поля достигается путем увеличения тока в витках с одной стороны компрессора и уменьшением его в противоположных витках. В результате кольцо выталкивается из компрессора и попадает в короткий соленоид со спадающим магнитным полем, где обеспечивается его предварительное ускорение с помощью «магнитного расширения». После этого этапа появляется выбор: либо продолжать ускорение в спадающем магнитном поле в добавочных соленоидах, либо ввести электроды или высокочастотные резонаторы, чтобы ускорять кольцо электрическим полем.

В последние несколько лет в экспериментальных исследованиях ускорителей электронных колец достигнуты значительные успехи. Сжатые кольца с пригодными для ускорения ионов свойствами были получены и изучены в Дубне (рис. 14), Беркли (рис. 15, 16) и Гаршинге. Более того, группа советских физиков представила убедительные доказательства ускорения ионов гелия (α -частиц) до энергии 30 Мэв в коротком соленоиде со спадающим магнитным полем**). Полученной энергии ионов соответствуют весьма значительные коллективные ускоряющие поля — порядка 40 миллионов в/м. Сейчас эта группа в Дубне пытается провести кольцо через ряд высокочастотных резонаторов, чтобы дальше ускорять его электрическими полями.

Первые попытки нашей группы в Беркли вывести и ускорить кольцо в спадающем магнитном поле потерпели неудачу из-за коллективных неустойчивостей. Выше уже упоминалось о вредных коллективных эффектах в связи со сравнительно малоинтенсивными пучками в обычных ускорителях; в случае огромных токов, типичных для электронных колец, они могут вызывать значительно больше беспокойства. В последние несколько месяцев работа в Беркли была сконцентрирована на изучении и подавлении этих неустойчивостей. Была достигнута ясность и удалось контролировать

*) В литературе на русском языке употребляется введенный В. И. Векслером термин «Адгезатор» (аббревиатура от «адиабатический генератор заряженных торондов»). (Прим. перев.)

**) Публикация 1970 г. (Прим. перев.)

поперечную неустойчивость, однако эффект отрицательной массы все еще остается загадочным. Чрезвычайно важно понять количественно, как устранить неустойчивости такого типа, поскольку в конечном счете они определяют пределы того, как далеко можно продвинуться в получении «высококачественного» электронного кольца с глубокой потенциальной ямой.

Ускорение α -частиц в Дубне продемонстрировало осуществимость коллективного ускорения ионов до энергий, которые уже представляют интерес для ядерной химии. Будущие эксперименты должны ответить на оставшиеся вопросы: возникнут ли неожиданные трудности в процессе ускорения колец электрическими полями? Как далеко можно продвинуться в создании колец с большими коллективными ускоряющими полями, прежде чем возникнет проблема новых неустойчивостей, связанных с ион-электронным взаимодействием? Ответы на эти вопросы вскоре будут получены и появится возможность лучше оценить перспективы и ограничения этого нового метода ускорения частиц.

Очень важно иметь уверенность в том, что в ускорителе электронных колец сгусток не ускоряется столь энергично, что ионы его покинут. Хотя ионы удерживаются в глубокой потенциальной яме кольца мощными электрическими силами, слишком быстрое изменение ведущего магнитного поля может привести к отделению ионов от электронов. Однако нетрудно создать магнитные катушки в пределах необходимых допусков. На выходе ускорителя довольно легко отделить ионный пучок от транспортирующих его электронов: кольцо можно пропустить через обычные сильные магнитные линзы, которые разрушат кольцо, сфокусируют положительные ионы на мишень и отделят электроны.

Если электронные кольца используются для ускорения протонов до очень высоких энергий с целью изучения взаимодействия элементарных частиц, то вторичные пучки мезонов, гиперонов и любых других частиц, вылетающих из мишени, будут обладать одной характерной особенностью, а именно: они будут рождаться в виде импульсов очень малой длительности — менее одной триллионной секунды. В некоторых экспериментах это невыгодно и может привести к существенно уменьшенным скоростям счета. С другой стороны, эта особенность может упростить

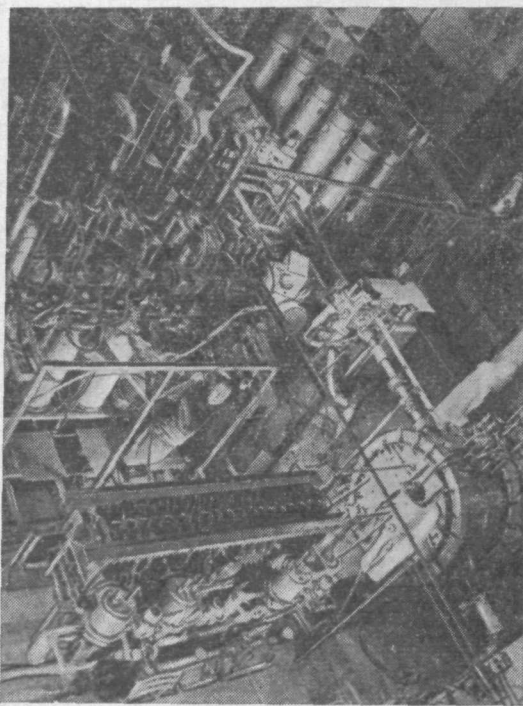


Рис. 14. Первый ускоритель электронных колец в Дубне (СССР) использовался недавно в эксперименте по ускорению ионов гелия (α -частиц) до энергии 30 миллионов электрон-вольт в коротком соленоиде со спадающим магнитным полем.

Общая схема этой установки: электронный инжектор (вверху), компрессор (ниже справа) и устройство для ускорения электронных колец (внизу слева). Эта фотография сделана во время испытаний системы высокочастотных резонаторов, предназначенной для ускорения кольца, выходящего из соленоида со спадающим магнитным полем.

другие эксперименты и открыть новые возможности, такие как измерение энергии нейтральных частиц с помощью времени-пролетной методики.

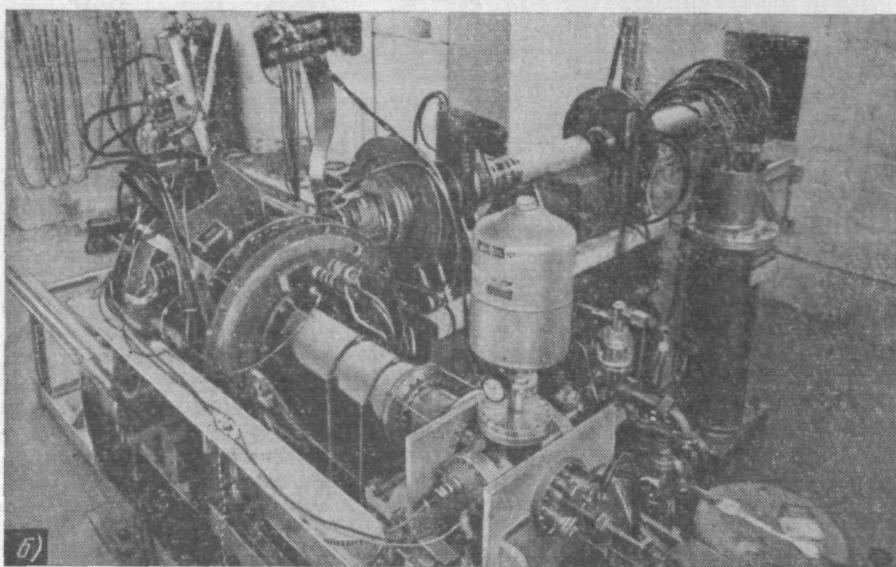
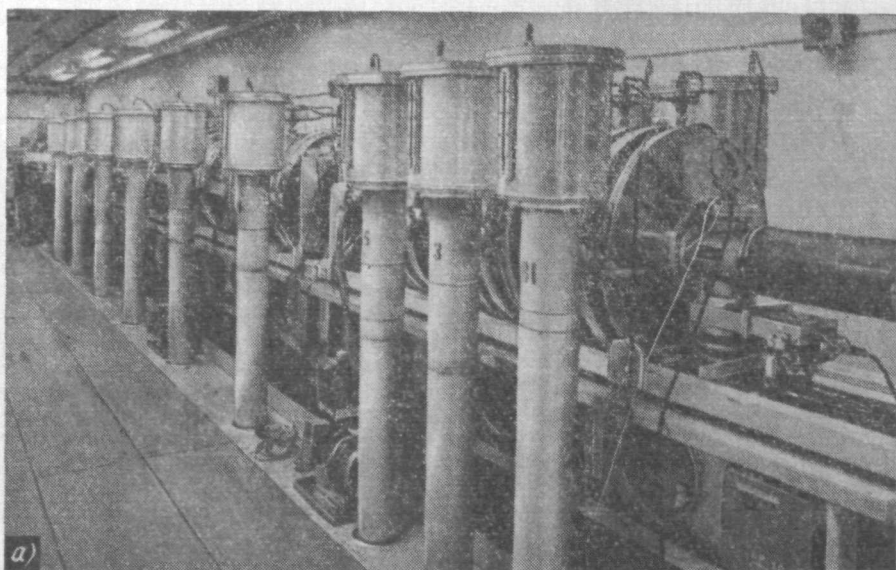


Рис. 15. Ускоритель электронных колец, на котором ведутся исследования в Беркли.

На рис. а) представлен инжектор электронов. Электроны получают импульсами большой интенсивности с помощью автоэмиссионного источника (виден на переднем плане). Затем электроны ускоряются в вакуумной камере рядом индукционных импульсных резонаторов, которые размещены внутри больших кольцевых камер. Последние соединены с вертикальными трубами (высокочастотные линии), расставленными по обе стороны вакуумной камеры. Пучок электронов высокой энергии после прохождения через отверстие в стене (на заднем плане) попадает в компрессор (б). Его детали и оборудование показаны на рис. 13 и схематически на рис. 16.

Кроме этого, коллективный метод, видимо, явится прямым путем к ускорению дейтонов, других ионов и, вероятно, поляризованных протонов.

Существует много теоретических предложений относительно различных вариантов сжатия кольца. Они отличаются от рассмотренного выше, в основе которого лежит использование импульсного магнитного поля. Особенно привлекательна идея компрессора со статическим магнитным полем, выдвинутая в различных формах, с одной стороны, Кристофилосом, а с другой, — Л. Ласлеттом и Э. Сесслером. Поскольку в таких компрессорах можно осуществлять сжатие без меняющегося во времени магнитного поля, то, вероятно, удастся создавать кольца с очень большой частотой повторения.

Другая новая система, на которой начались эксперименты в университете штата Мэриленд, основана на инжекции электронного пучка, имеющего форму полого цилиндра, в магнитное поле, созданное двумя соленоидами, совмещенными торцами так, чтобы поля были направлены к месту стыка (рис. 17). Электроны полого пучка движутся в первом соленоиде до тех пор, пока не достигнут области стыковки, где их траектории сильно искривляются, а большая часть энергии продольного движения переходит в энергию вращения. Дополнительные токовые катушки создают магнитное зеркало, отражающее электроны, которые группируются в кольцо. Чтобы предотвратить расплывание кольца, ионы вводятся в процессе формирования сгустка; в результате в сжатии кольца играет роль и пинч-эффект. По получении кольца с нужными параметрами магнитное зеркало убирается, что позволяет кольцу двигаться дальше вдоль соленоида в область ускоряющего поля.

Последние несколько лет явились свидетелями первых волнующих и важных шагов

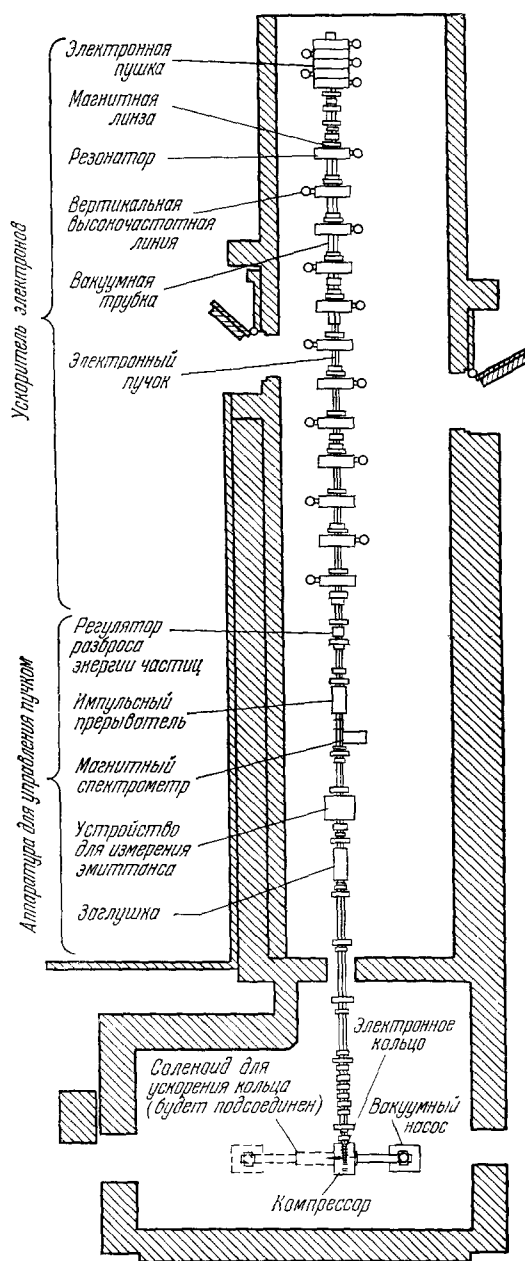


Рис. 16. Общая схема ускорителя электронных колец, построенного в Лаборатории им. Лоуренса в Беркли группой ученых во главе с автором.

Линейный индукционный ускоритель, который используется для инжекции электронов в компрессор, обеспечивает получение пучка электронов с энергией 4,25 миллиона электрон-вольт и интенсивностью 1000 а. 17 ускоряющих резонаторов питаются вертикальными передающими линиями. Перед входом пучка в компрессор его характеристики регулируются с помощью аппаратуры, размещенной непосредственно у стены. Для ускорения колец вскоре будет добавлен соленоид со спадающим магнитным полем.

в новой обширной области коллективного ускорения частиц. Решительным образом была продемонстрирована возможность применения мощных электрических и магнитных полей, создаваемых интенсивными электронными пучками и электронными кольцами, и, вероятно, не так уж далеко

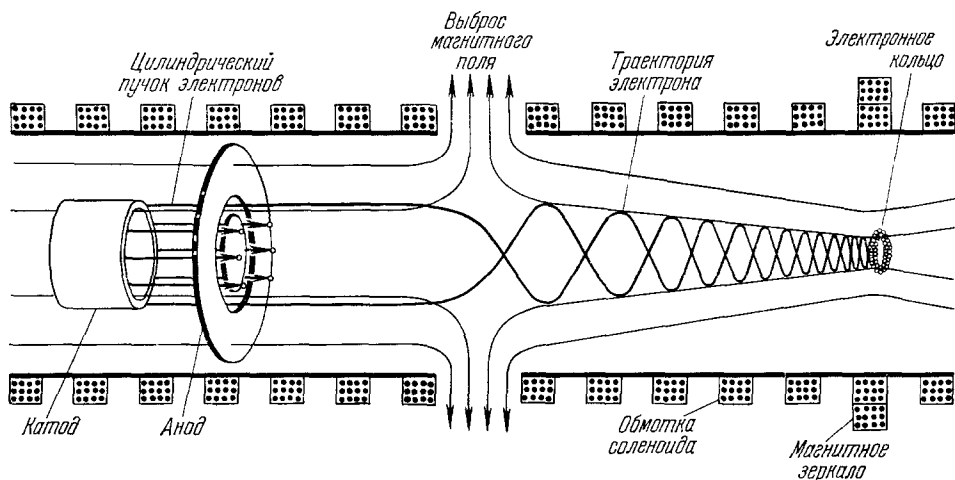


Рис. 17. Схема формирования электронных колец в статическом магнитном поле.

до использования коллективных методов в практических целях. Продолжающаяся работа над этими двумя основными направлениями, несомненно, приведет в будущем к новым попыткам извлечь пользу из коллективных эффектов, используя ту или иную из многих экзотических идей, лишь кратко упомянутых в этой статье.

ЛИТЕРАТУРА

Symposium on Electron Ring Accelerators (Lawrence Radiation Laboratory, 1968). UCRL-18103, University of California at Berkeley, 1968.— The Acceleration of Particles by Collective Fields, I. A. M. Sessler, Comm. Nucl. Part. Phys. 3, 93 (1969); II. L. J. Lasslett, A. M. Sessler, *ibid.* 4, 211 (1970).— D. Keefe, Part Acceler. 1, 1 (1970).— J. D. Lawson, 3, 21 (1972).