

В. П. Саранцев, Э. А. Перельштейн

РАЗВИТИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ В ОИЯИ*

Коллективные методы ускорения в последние 20 лет неизменно занимают передовое положение среди новых эффективных методов ускорения заряженных частиц. Во многих научных центрах мира ведутся экспериментальные исследования по различным модификациям коллективного метода, создаются ускорительные установки, возникают новые концепции ускорения, обнаруживаются примеры коллективного ускорения частиц в природе, с коллективными методами связываются проекты ускорителей будущего на сверхвысокие энергии, множатся предложения по применению ускорителей, работа которых основана на коллективном методе (коллективных ускорителей).

Мощным стимулом для развития коллективных методов ускорения явились предложения, сделанные советскими физиками Г. И. Будкером, В. И. Векслером и Я. Б. Файнбергом на конференции 1956 г. в Женеве. По сути дела каждое из этих предложений послужило основой для главных направлений развития коллективных методов.

Г. И. Будкер предложил использовать собственное электромагнитное поле самофокусирующегося электронно-ионного кольца для удержания ионов на циклических орбитах и фокусировки их при ускорении до больших энергий — ускоритель с коллективной фокусировкой. Идея коллективной фокусировки ионов прорабатывается сейчас теоретически и экспериментально как для циклических, так и для линейных ускорителей ионов.

В. И. Векслер предложил использовать для ускорения ионов поля, возникающие при взаимодействии ионного сгустка с пучком электронов, потоком электромагнитного излучения, или собственные поля двухкомпонентного сгустка. Эта идея предопределила эксперименты по радиационному ускорению плазменных сгустков, по коллективному

*Орбиты сотрудничества. Дубна, 1987. С. 116–123. (Обзор работ по коллективным методам ускорения после 1987 г. содержится в работе: Fainberg Ya. B. Appearance and Development of Collective Acceleration Methods // The 50th Anniversary of the Discovery of Phase Stability Principle: Intern. Symp. Dubna, 1996. P. 165.)

ускорению ионов в сильноточных электронных пучках, по коллективному ускорению ионов электронными кольцами.

Предложение Я. Б. Файнберга об использовании для ускорения ионов волн пространственного заряда в плазме интенсивно развивалось в последующем, оно лежит в основе управляемых схем коллективного ускорения в сильноточных релятивистских электронных пучках.

Фактически повсеместные и интенсивные исследования коллективных методов ускорения инициированы работой, выполненной в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ и доложенной на конференции в Кембридже (США) в 1967 г. В докладе «Коллективное линейное ускорение ионов», представленном дубненской группой, содержались первые теоретические и экспериментальные результаты по ускорению ионов электронными кольцами. После тщательной проработки предложенной в Дубне концепции коллективного ускорителя, его принципиальной схемы и параметров на симпозиуме 1968 г. в Беркли (США) была признана перспективность нового направления и начаты работы по программе коллективного ускорения протонов до высоких энергий. Экспериментальные исследования электронных колец проводились также в ФРГ (Карлсруэ, Гаршинг), Японии, Италии, в институтах СССР (ИТЭФ (Москва), НИИЯФ (Томск)) и США (Мэриленд). Коллективные методы ускорения стали предметом обсуждения на многочисленных международных симпозиумах.

Коллективные ускорители по сравнению с традиционными имеют более высокий темп набора энергии ионов и, следовательно, большую экономичность и меньшие габариты. Такое преимущество достигается, в частности, в результате использования для ускорения собственного электромагнитного поля электронного сгустка.

Напряженность электрического поля, связанного с пространственным зарядом, внутри сгустка достигает колоссальных значений при сравнительно небольшой плотности заряда электронов. Так, для бесконечного цилиндрического шнура электронов кругового сечения с радиусом a при равномерном распределении заряда по сечению напряженность электрического поля

$$E = 2eN_{\text{л}}/a, \quad (1)$$

где e — заряд; $N_{\text{л}}$ — линейная плотность электронов. При $a \approx 0,1$ см и $N_{\text{л}} \approx 10^{11} - 10^{12}$ см $^{-1}$ напряженность поля $E \approx 10^5 - 10^6$ В/см.

Большие собственные электрические поля приводят к сильному расталкиванию электронов. Чтобы уменьшить этот эффект, в первой дубненской публикации предложено формировать сгусток в виде кольца релятивистских электронов. Тогда силы расталкивания, действующие

щие на электроны, ослаблены в γ^2 раз (γ — релятивистский фактор) и их можно компенсировать сравнительно небольшими внешними полями или полями самих ускоряемых ионов. При ускорении электронного кольца во внешнем поле в направлении, перпендикулярном плоскости кольца, невращающиеся ионы увлекаются сильным собственным полем электронов. Совместное движение электронов и ионов приводит к большому выигрышу в темпе ускорения по сравнению с непосредственным ускорением ионов во внешнем поле. Имея одну и ту же скорость движения (в направлении ускорения), ионы приобретают энергию в $AM/m\gamma$ раз большую, чем электроны (m и M — массы электрона и нуклона соответственно, A — массовое число иона). Для иона с зарядом Z набор энергии на нуклон на единице длины ускорения U , МэВ/(нуклон · м), равен

$$U \approx k(10^{-11} N_e / 2r_0 a) \frac{Z}{A}, \quad (2)$$

где $k \approx 1/4 - 3/4$ в зависимости от условий ускорения; N_e — число электронов; r_0 и a — средний радиус и характерный полуразмер сечения кольца (см). При типичных значениях параметров

$$N_e \approx 10^{13}, r_0 = 3,5 \text{ см}, a = 0,2 \text{ см}, Z/A = 0,1 \text{ и } k = 1/4$$

получаем $U \approx 2 \text{ МэВ/нуклон} \cdot \text{м}^1$.

Чтобы получать электронные кольца с перечисленными параметрами, в Дубне предложена компрессия колец в магнитном поле, растущем во времени, в установке, называемой адгезатором (адиабатическим генератором заряженных тороидов) или компрессором. В камеру адгезатора вводят прямолинейный релятивистский пучок электронов, который сворачивается в кольцо в слабофокусирующем магнитном поле. Магнитное поле нарастает во времени так, что кольцо сжимается в радиальном направлении. Одновременно при сжатии уменьшаются размеры сечения, примерно как средний радиус, а энергия электронов увеличивается обратно пропорционально радиусу кольца. Для установок ОНМУ ОИЯИ характерно большое сжатие: на модели коллективного ускорителя, прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов и коллективном ускорителе тяжелых ионов КУТИ-20 радиус колец уменьшается от 35–40 до 3,5–6 см. В компрессорах, построенных в Беркли (США) и Гаршинге (ФРГ), радиус колец меняется от 18–20 до

¹В традиционных ускорителях напряженности ускоряющих полей составляют 1–1,5 МВ/м, что соответствует $U \approx 0,1 - 0,15 \text{ МэВ/нуклон} \cdot \text{м}$.

2,5–3,5 см. В конце сжатия релятивистский фактор γ становится равным 20–50, т. е. инжектируемые электроны имеют энергию порядка нескольких мегаэлектронвольт. Для получения конечного полуразмера малого сечения около 0,1 см начальный полуразмер должен быть около 1–2 см.

Анализ параметров пучка показывает, что наиболее подходящим инжектором для коллективного ускорителя является линейный индукционный ускоритель, дающий большой ток электронов (примерно 1 кА) с малой длительностью импульса (десятки-сотни наносекунд) и малым относительным энергетическим разбросом (около 1 %). Для экспериментов по коллективному методу ускорения в Дубне сооружен совместно с НИИЭФА (Ленинград) линейный индукционный ускоритель ЛИУ-3000. В дальнейшем в ОНМУ ОИЯИ создан принципиально новый ускоритель индукционного типа СИЛУНД — сильноточный индукционный линейный ускоритель наносекундного диапазона, специально приспособленный к условиям инжекции в адгезатор. И наконец, в ОНМУ ОИЯИ разработан, изготовлен и в 1981 г. запущен линейный индукционный ускоритель электронов СИЛУНД-20. Ток пучка на выходе ускорителя достигает 1 кА, энергия электронов 2 МэВ, частота повторения импульсов 50 Гц, длительность импульса примерно 20 нс, эмиттанс около 3π см · мрад для 60 % тока пучка.

Основным коммутирующим элементом индукционных ускоряющих систем является созданный в СССР мощный тиратрон. Сжатое электронное кольцо в адгезаторе загружается ионами. Загрузка может осуществляться или при сжатии кольца в газовой смеси определенного состава, или с использованием пучков нейтральных атомов (молекул), пересекающих электронное кольцо. Ионизация происходит внутри кольца при соударениях релятивистских электронов с нейтральными атомами. Образующиеся ионы удерживаются в кольце его большим собственным пространственным зарядом, причем кратность ионизации растет со временем вследствие электронно-ионных столкновений. В ОНМУ ОИЯИ детально исследованы теоретические вопросы накопления ионов в электронных кольцах, созданы при участии МИФИ (Москва) уникальные источники нейтральных частиц, перекрывающие весь диапазон массовых чисел атомов вплоть до урана.

Для ускорения электронно-ионных колец в коллективных ускорителях используются два метода. В первом кольца ускоряются в статическом пространственно-неоднородном магнитном поле. Кольцо, как магнитный диполь, ускоряется в градиентном магнитном поле. Во втором методе электронно-ионные кольца ускоряются во внешнем электрическом поле.

Первое экспериментальное коллективное ускорение ионов осуществлено в ОНМУ ОИЯИ на модели коллективного ускорителя в 1971 г. В экспериментах были зарегистрированы ускоренные α -частицы с энергией 30 МэВ при длине ускорения в градиентном поле около 40 см. В конце 1974 г. подобный эксперимент был повторен в Гаршинге (ФРГ) на установке Schuko, где ионы легких элементов (протоны, α -частицы) коллективно ускорялись до энергии около 200 кэВ/нуклон. В конце 1977 г. в ОНМУ ОИЯИ на прототипе ускорителя тяжелых ионов магнитным способом были ускорены ионы азота и других элементов. Параметры электронных колец в экспериментах по ускорению ионов были следующими: $N_e = (1 \pm 0,3) \cdot 10^{13}$, радиус кольца $r_0 = 3$ см, полуразмеры малых сечений $a_r \approx a_z \approx 0,15 - 0,2$ см, в конце сжатия $\gamma \approx 40$. Энергию и число ускоренных ионов определяли впервые в применении к коллективным ускорителям в Дубне с помощью активационного анализа. Прирост энергии ускоренных ионов составлял 4 МэВ/нуклон \cdot м на длине около 0,5 м. Число ионов азота оценивалось как $5 \cdot 10^{11}$ в одном электронном кольце. В камеру адгезатора добавляли также аргон и ксенон, при этом наблюдались ускоренные ионы этих элементов — примерно $2 \cdot 10^{11}$ в кольце.

Повышение энергии при магнитном способе ускорения ограничивается расширением кольца в пространстве со спадающим магнитным полем. При создании коллективных ускорителей ионов на большие энергии необходимо переходить на ускорение колец в электрических полях. Для проверки возможности ускорения электронно-ионных колец в электрическом поле в ОНМУ ОИЯИ впервые была создана и опробована специальная индукционная ускоряющая секция со следующими основными параметрами: длина секции 1,2 м, эффективная напряженность электрического поля около 0,5 МВ/м, длительность ускоряющего импульса примерно 200 нс, индукция ведущего магнитного поля около 1 Тл. Прирост энергии коллективно ускоренных ионов азота соответствовал расчетному и составлял 1 МэВ/нуклон.

Теоретический анализ и эксперименты по формированию и сжатию колец в керамических камерах (Беркли) показали, что основной преградой на пути увеличения темпа ускорения электронных колец являются когерентные азимутальные неустойчивости кольца. Когда камера адгезатора не экранирует электромагнитные поля возмущений кольца, развивается радиационная неустойчивость, связанная с синхронным излучением азимутально-неоднородного кольца. Эта неустойчивость приводит к увеличению радиального размера сечения и соответственно к уменьшению напряженности собственного электрического поля кольца. Для подавления радиационной неустойчивости

следует экранировать ВЧ-поля возмущений так, чтобы азимутальная компонента электрического поля возмущения в области кольца была мала. Именно это обстоятельство было главной причиной выбора узкой металлической камеры адгезатора при переходе в ОНМУ ОИЯИ от модели коллективного ускорителя к прототипу коллективного ускорителя тяжелых ионов, сооружение которого началось в 1972 г. Коллективный метод ускорения тяжелых ионов привлекателен по следующим причинам. Во-первых, как уже отмечалось, коллективный метод дает выигрыш в эффективной напряженности ускоряющего поля. Во-вторых, выдерживая ионы внутри кольца длительное время, можно получать ионы с такой высокой степенью ионизации и в таком количестве, которые недостижимы в других источниках. Таким образом, эффективность коллективного ускорителя повышается и за счет увеличения отношения заряда иона к его массе. В-третьих, коллективный ускоритель обладает свойством универсальности по отношению к типу ускоряемых ионов. Практически на коллективном ускорителе тяжелых ионов можно ускорять ионы всех элементов периодической системы Д. И. Менделеева и, что очень существенно, получать большие интенсивности ионных пучков тяжелых элементов вплоть до урана (интенсивность уменьшается обратно пропорционально массовому числу ускоряемых ионов). В-четвертых, при ускорении тяжелых ионов легче выполняются условия стабильности электронно-ионных колец (например, ослабляются ограничения, связанные с когерентной поперечной электронно-ионной неустойчивостью).

При переходе на узкие металлические камеры адгезаторов, экспериментально реализованном только в ОНМУ ОИЯИ, выявились специфические проблемы и трудности. Источники магнитного поля, сжимающего кольцо, — токовые катушки — располагаются снаружи камеры, поэтому усложняется задача формирования поля с требуемыми пространственно-временными характеристиками. Металлическая камера экранирует импульсные магнитные поля, что ограничивает их допустимую частоту. Эффекты экранирования сильно проявляются на сжатии колец. Близкие к кольцу боковые металлические стенки адгезатора могут привести к неустойчивости кольца как целого при сдвиге его от медианной плоскости камеры. Развитие в ОНМУ ОИЯИ методики расчета импульсных магнитных полей, экранированных тонкими металлическими экранами, магнитной системы коллективного ускорителя и динамики электронно-ионных колец с учетом требований устойчивости позволило спроектировать и создать прототип коллективного ускорителя тяжелых ионов (КУТИ), на котором получены приведенные выше экспериментальные результаты.

В настоящее время в ОИЯИ сооружается коллективный ускоритель тяжелых ионов КУТИ-20, рассчитанный на получение пучков тяжелых ионов вплоть до урана с энергией 20 МэВ/нуклон и циклическостью $20 \div 50$ Гц (интенсивность $5 \cdot 10^{12}$ для ионов урана). Принципиальная схема КУТИ-20 соответствует схеме ее прототипа, параметры электронных колец этих ускорителей также совпадают. На прототипе КУТИ, работающем на частоте 0,5 Гц, изучены физические процессы, лежащие в основе коллективного ускорения тяжелых ионов, и выяснены главные физические ограничения, которые учитываются при создании КУТИ-20. В 1983 г. в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ при участии сотрудников Технического университета (Дрезден) создана и запущена головная часть ускорителя КУТИ-20. В разработку автоматической системы управления ускорителем внесли вклад научные сотрудники ИЯИЯЭ БАН и ЦИФИ ВАН. Создается индукционная ускоряющая система КУТИ-20, предназначенная для основного ускорения электронно-ионных колец в электрическом поле. Параметры ускоряющей системы следующие: средняя частота 20 Гц; максимальная частота 50 Гц; напряженность ускоряющего электрического поля 10 кВ/см; номинальная амплитуда напряжения на индукторах 50 кВ; длительность импульса напряжения на индукторах по основанию 200 нс, по вершине 70 нс; индукция ведущего магнитного поля 1,36 Тл; длина ускорения 16,6 м; общая длина 20 м; число ускоряющих секций 10.

Примерно через год после доклада дубненской группы по коллективному методу ускорения совершенно неожиданно в экспериментах С. Е. Грейбилла и Дж. Р. Углума (США) по прохождению сильноточных релятивистских пучков через газ низкого давления было обнаружено ускорение ионов до энергий, в несколько раз превосходящих энергию электронов пучка. Результаты подтвердились в многочисленных экспериментах других групп. Почва для понимания механизма ускорения как коллективного уже была подготовлена, вскоре появились и теоретические модели коллективного ускорения ионов в сильноточных пучках, дрейфующих через газ, хотя наблюдавшееся впервые в мире советским физиком А. А. Плюто коллективное ускорение в прямолинейных пучках в вакуумном диоде долгое время оставалось без должного внимания.

Эксперименты по коллективному ускорению ионов при инъекции сильноточных электронных пучков в газ показали, что ускорение носит нерегулярный характер, срывается на сравнительно небольшой длине и поэтому ускорение ионов до больших энергий получить не удастся. Наилучшие результаты по неконтролируемому коллективному ускоре-

нию в прямых электронных пучках получены на диоде Люса, в котором ионы вытягивались из поверхностной анодной плазмы самим пучком и ускорялись до энергий (20–25) ZW (W — энергия электронов). Предпринятые попытки простыми средствами управлять ускорением ионов не дали ожидаемых результатов.

В настоящее время кроме ускорителей с электронными кольцами разрабатываются главным образом три способа коллективного ускорения ионов до высоких энергий прямолинейными сильноточными электронными пучками.

В методе, предложенном К. Л. Олсоном (США), для коллективного ускорения ионов используется бегущая потенциальная яма на фронте электронного пучка. Движением фронта управляют с помощью лазерного луча, который создает узкую волну ионизации газа на фронте и регулирует движение пучка по тракту. Таким образом обеспечивается синхронность движения ионов с ускоряющим полем пучка.

В предложении М. Л. Слоана и В. Е. Драммонда (США) и его модификациях коллективное ускорение ионов осуществляется в поле замедленной циклотронной волны, возбуждаемой в электронном пучке. Фазовая скорость волны регулируется изменением внешнего продольного магнитного поля.

П. Спрэнгл (США) предложил ускорять ионы ленгмюровской волной, фазовая скорость которой изменяется при конусном сужении ускорительной трубки.

В заключение приведем некоторые примеры возможных приложений коллективного метода ускорения и сильноточных электронных колец. Прежде всего — это проекты коллективных ускорителей на высокие энергии, ускорителей тяжелых ионов на промежуточные энергии (около 300 МэВ/нуклон), коллективного ускорителя — инжектора частиц в тяжелоионный синхротрон. В ОНМУ ОИЯИ предложены сильноточный коллективный ускоритель ионов на низкие энергии на основе многократного использования одного электронного кольца, ускорение поляризованных ионов в электронных кольцах, источник многозарядных ионов на основе длительного удержания электронных колец в сжатом состоянии и др.

В последнее время широко обсуждается использование коллективных ускорителей ионов для решения проблем управляемого термоядерного синтеза, для различных прикладных и исследовательских задач в смежных областях науки и техники. После первых экспериментов в США по использованию электронного кольца как спектроскопического источника многозарядных ионов в ОНМУ ОИЯИ в сотрудничестве с Техническим университетом (Дрезден) проведены

экспериментальные и методические работы, открывающие новые возможности в важной и практически неисследованной области атомной физики — спектроскопии многозарядных тяжелых ионов.

В ОНМУ ОИЯИ совместно с ИПФ АН СССР (Горький) на базе индукционной ускоряющей секции на высоком уровне мощности (10–20 МВт) получено СВЧ-излучение в миллиметровом диапазоне длин волн. Эти эксперименты показали перспективность такой генерации СВЧ-излучения и его использования в новых схемах ускорения.

Разработка коллективных ускорителей существенно влияет на развитие физики и техники получения сильноточных пучков и их применение, на разработку традиционных ускорителей. В ближайшем будущем коллективные ускорители должны стать рабочим инструментом ядерной физики и техники.