

КОЛЛЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ

А.А.Коломенский

Физический институт им. П.Н.Лебедева АН СССР, Москва

Основные этапы развития коллективных методов ускорения, их классификации, а также физические идеи, лежащие в их основе, рассматривались ранее в обзорных статьях /1-4/. Современный этап в развитии коллективных методов начался примерно пять-десять лет тому назад. В течение этого времени были разработаны и задействованы мощные импульсные генераторы высокопоточных релятивистских электронных пучков (СРЭП) (см., например, /5/). Их параметры в основном заключены в пределах: энергия $E_e \sim 0,5-5,0$ МэВ; ток $I_e \sim 10$ кА-1 МА; время импульса $\tau \sim$ десятков нс. Для СРЭП характерна также сравнительно большая плотность электронов $\sim 10^{11}-10^{13}$ см⁻³, что само по себе важно для исследований по коллективным методам. Отметим, впрочем, что для развития этих методов важны не столько рекордные значения тока и других параметров, сколько качественные показатели - форма импульса, геометрические характеристики и т.п.

В течение последних 2-3 лет, прошедших после IX Международной конференции по ускорителям, исследования по коллективным методам ускорения развивались в основном по следующим направлениям: 1) развитие физики и техники высокопоточных пучков и их генерации, 2) ускорение частиц в прямых высокопоточных релятивистских электронных пучках (СРЭП), 3) формирование релятивистских электронных колец для ускорения ионов с их помощью. Была выполнена значительная экспериментальная и теоретическая работа. Некоторые её итоги были подведены на II Международном симпозиуме

по коллективным методам, состоявшемся в Дубне осенью 1976 г. В нашем докладе мы будем опираться на некоторые материалы этого симпозиума, а также на отдельные сообщения, специально представленные к данной конференции. При разнообразии уровней развития различных методов все они находятся в стадии поисковых исследований. В такой ситуации, ввиду сложности происходящих процессов, особенно ценными являются экспериментальные данные, позволяющие дать некоторые прогнозы о возможностях тех или иных направлений. Исходя из этих соображений, мы уделим больше внимания тем работам, которые доведены до экспериментов.

I. Ускорение ионов при пропускании СРЭП через газ

Интерес к этому явлению, обнаруженному первоначально чисто эмпирически /6/, не ослабевает, и его продолжают исследовать в ряде лабораторий. Упомянем Physics International Company /7,8/, Лабораторию Сандия /9,10/, Физический институт им. П.Н. Лебедева /11,12/, Калифорнийский университет (Ирвайн) /13/.

Ускорение ионов является лишь одним из явлений, сопровождающих распространение интенсивного электронного пучка в газе. В этом сложном процессе проявляются не только коллективные взаимодействия, но и ряд элементарных явлений, таких как ионизация первичными и вторичными электронами и ионами, рекомбинация, лавинные процессы и т.д. Наряду с продольным распространением пучка происходит также изменение его радиальных размеров: расширение под влиянием пространственного заряда и "схлопывание" (пинч-эффект) под действием образующихся ионов. При этом возникают ускоряющие (или замедляющие) электрические поля двух видов: поля, имеющие электростатическую природу, и поля, индуцированные благодаря временному изменению параметров (поперечных размеров, тока пучка). При всем разнообразии условий, имеющих в отдельных установках, распространение электронного пучка и ионизация газа в конечном счете приводят к формированию эффективной потенциальной ямы, в которую временно оказываются захваченными ионы. Механизм их ускорения может быть обязан как изменению формы ямы, так и ее перемещению как целого. Как правило, яма образуется вблизи фронта распространения СРЭП.

Проведенные эксперименты дали для протонов энергию 12–15 МэВ, а для дейтронов — до 5–6 МэВ при количестве ионов за им-

пульс 10^{11} – 10^{13} . Были также получены ускоренные более тяжелые ионы (He , N , Ar , Xe) с энергией, пропорциональной их заряду, но с интенсивностью значительно меньшей (до 10^9 за импульс для Ar). Указанные характеристики ионного пучка получались при довольно широком наборе параметров инжектируемого сильноточного электронного пучка $E_0 = 0,5$ – $5,0$ МэВ, $I_0 \sim 15$ – 250 кА и его формы импульса.

Характерной чертой процесса оказалось то, что при соответствующей "настройке" параметров можно было получить в отдельных местах дрейфовой камеры значительные поля порядка $0,1$ – $0,5$ МВ/см. Однако эффективная длина ускорения оказывается при этом сравнительно небольшой – порядка 10 см. Поэтому встала задача выяснить, можно ли подбором параметров или их вариации увеличить длину ускорения, то есть обеспечить лучшее взаимодействие между перемещающейся ямой и ионами.

Так, в работе /12/ проведено исследование ускорения ионов из смеси газов (селективное ускорение). Эксперименты показывали, что уже на малых расстояниях от анода фронт пучка в водороде опережает ионный ступок. С другой стороны, было получено, что скорость движения фронта пучка в дейтерии меньше скорости движения фронта в водороде, и этим, в принципе, можно воспользоваться для создания более благоприятных условий для ускорения протонов. Результаты проведенного эксперимента подтвердили, что при ускорении из смеси газов ($H_2 + D_2$) действительно преимущественно ускоряются протоны, даже в том случае если подавляющую часть смеси составляет дейтерий.

В /13/ в камеру с водородом вводился т.н. касп – область резкого изменения направления магнитного поля. Такая область в вакууме переводит часть продольного импульса электронов в поперечный, то есть вызывает вращение пучка. Это приводит к притормаживанию продольного распространения СРЭП и может вызвать повышение локальной плотности пространственного заряда. Результаты экспериментов показали, что в зависимости от величины магнитного поля каспа меняется, в первую очередь, интенсивность ускоренных ионов, причем не монотонным образом. Это, по-видимому, указывает на то, что при разных магнитных полях в игру вступают различные ускорительные механизмы.

В экспериментах /12, 14/ изучалось влияние градиента давления в дрейфовой камере на скорость фронта СРЭП и эффективность ускорения ионов. Эти и упомянутые выше эксперименты показали, что,

вводя различные модификации параметров, действительно можно влиять на процесс ускорения ионов, однако недостаточно кардинальным и однозначным образом. Наряду с такими "косвенными" методами нужно искать пути прямого управления перемещением ускоряющей потенциальной ямы. Можно, в частности, указать на рассмотренное нами сканирование хорошо сформированного СРЭП, пересекающего дрейфовую камеру (см. /15/) и играющего роль потенциальной ямы.

Для управления движением фронта ионизации можно применить перемещающийся лазерный луч, производящий фотоионизацию газа в дрейфовой камере. Эта интересная система, предложенная в /3, 10/, разрабатывается в Лаборатории Сандия. За перемещающимся фронтом ионизации, создаваемым светом, должен синхронно следовать фронт СРЭП, создавая потенциальную яму, движущуюся с заданной скоростью. Оптимальной в настоящее время признана двухступенчатая фотоионизация газообразного цезия. Давление газа должно выбираться таким, чтобы фотоионизация оказалась доминирующим процессом. Недавно в указанной лаборатории были выполнены эксперименты по исследованию торможения и транспортировки СРЭП в цезии, а также для сравнения в воздухе /16/. Это делалось с целью определения порогового значения давления, при котором возникает заметная ионизация паров цезия посредством СРЭП, и было показано, что порог возникает при достаточно высоких давлениях. Это позволяет надеяться, что ионизация, вызванная СРЭП, не будет мешать механизму управления фронтом ионизации с помощью лазерного пучка. В настоящее время начинаются эксперименты по исследованию указанного механизма посредством фотоионизации рабочего газа.

Отметим также совсем другой вариант управления перемещением ускоряющей потенциальной ямы на основе применения "газовой линзы", то есть слоя газа, через который должен проходить СРЭП /17/. Ввиду ионизации газа пучок пинчуется, а его фокус перемещается в вакууме в продольном направлении. Фокус образует потенциальную яму для ионов, и, выбирая параметры "линзы", можно достичь синхронизма между движением ямы и ионов.

2. Другие методы ускорения ионов в прямых СРЭП

Первые экспериментальные результаты по коллективному ускорению ионов в диодах были получены еще в 60-х гг. в Сухумском физико-техническом институте /18/, и с тех пор в ряде лабораторий бы-

ли реализованы различные модификации такого ускорения. Интересные результаты по так называемому вакуумному (или диодному) ускорению ионов были получены уже в последние годы с применением импульсных сильноточных генераторов. В этих экспериментах, минимизированных работой в Ливерморской лаборатории, ионы образуются в плазме на диэлектрических вставках в аноде или вблизи анода ^{/12,19,20/} под действием проходящего СРЭП. Последний проходит в вакуум и ускоряет ионы полем пространственного заряда, вероятно, с помощью механизма, связанного с образованием виртуального катода. Это обстоятельство делает вакуумное ускорение до некоторой степени похожим на ускорение ионов из газа, однако в вакуумном случае зарядовая нейтрализация СРЭП получается только благодаря диффузии ионов из анодной (или прианодной) плазмы. С помощью вакуумного ускорения были получены протоны с энергиями порядка десятков МэВ и тяжелые ионы ~ 5 МэВ/нуклон. В принципе, можно повысить эффективность метода, применяя ряд т.н. плавающих электродов, последовательное прохождение которых СРЭП и ионами могло бы привести к эффекту, напоминающему механизм действия резонансных линейных ускорителей.

В последние годы изучается возможность использования собственной циклотронной моды СРЭП, распространяющегося вдоль ведущего продольного магнитного поля ^{/21/}. Эта мода, которая фактически представляет собой волну плотности заряда, может служить как бегущая волна для ускорения протонов или других ионов. В принципе, механизм ускорения в этом случае похож на обычный резонанс в линейных ускорителях. Управление фазовой скоростью ускоряющей моды, необходимое для синхронизации с движением ионов, достигается за счет пространственного адиабатического изменения величины ведущего магнитного поля. Фазовая скорость изменяется обратно пропорционально магнитному полю. Существенно, что энергия ускоряющей волны является отрицательной, что означает экспоненциальный рост амплитуды волны. Таким образом, энергия будет автоматически извлекаться из СРЭП как для ускорения ионов, так и для поддержания поля волны. В Исследовательской компании Остин (США) разрабатывается большая модель, основанная на рассмотренном принципе ^{/22/}, рассчитанная на применение СРЭП с параметрами 3 МВ, 30 кА, 200 нс и получение протонного пучка 30 МэВ, 30 А на длине ~ 4 м в магнитном поле, изменяющемся в пределах 24–2 кГс. Необходимо подчеркнуть, что на пути реализации данного метода стоят сложные проб-

лемы, связанные, в частности, с необходимостью подавления опасных гидродинамических неустойчивостей и с получением достаточно быстрого нарастания амплитуды ускоряющей волны.

В Харьковском физико-техническом институте продолжались традиционные исследования по возбуждению плазменных волн с помощью электронных пучков ^{/23/}. Эксперименты по взаимодействию моноэнергетического пучка 2 МэВ, 1 А, 1 нс с плотной плазмой ($10^{15}-10^{17} \text{ см}^{-3}$) показали, что потери энергии пучка составляют десятки процентов, возникают локализованные рентгеновское и СВЧ излучения. Это один из этапов разработки ускорения частиц в плазменных волнах. Там же проведены модельные эксперименты по ускорению ионов в электронном пучке, модулированном в пространстве и во времени: энергия и ток электронов 3 кэВ и 0,1-0,5 А, энергия ионов 8,5 кэВ, а ее приращение в структуре 5 кэВ (см. ^{/24/}).

Отметим, что ионный сгусток, помещенный в электронный пучок даже в однородной системе, вызывает автомодуляцию пучка, что при определенных условиях ведет к появлению значительных когерентных ускоряющих сил. Этот механизм рассматривается в докладе А.Н.Лебедева и К.Н.Пазина из ФИАН.

3. Метод автоускорения частиц

Работы по автоускорению, начатые в нашей лаборатории в ФИАНе ^{/25-29/}, были вызваны стремлением повысить возможности сильноточных импульсных электронных ускорителей. Из-за трудностей, связанных с высоким напряжением и ростом масштаба установки, максимальная энергия частиц в них ограничивается, как правило, значениями порядка мегаэлектронвольт. В то же время для ряда задач желательно иметь ускорение значительных импульсных токов частиц ($\sim 10 \text{ кА}$) до гораздо больших энергий ($\geq 10-20 \text{ МэВ}$). В методе автоускорения эта задача должна решаться за счет перераспределения частиц в сильноточном пучке. Для этой цели могут быть использованы пассивные структуры типа резонаторов, волноводов, передающих линий. При взаимодействии пучка с ними определенная доля частиц может быть ускорена полем, генерируемым пучком, до энергий, на много превышающих начальную энергию, с которой они входят в данную структуру.

"Естественный" ход развития взаимодействия пучка с указанными структурами проходит несколько стадий. Максимальная энергия

частиц при этом ограничена значением, соответствующим стадии захвата частиц волной и обмена энергией между волной и пучком. С этим ограничением можно бороться за счет удаления низкоэнергетичных частиц, которое происходит частично и само по себе. Но можно принимать и специальные меры, например, применяя систему фольг, накладывая дополнительное знакопеременное магнитное поле и т.п.

В ряде экспериментов, выполненных в нашей лаборатории^{/28,29/}, было показано, что, используя процесс автоускорения, действительно можно "трансформировать" часть интенсивности пучка в энергию некоторой группы частиц. Было получено, что спектр электронного пучка, имевшего первоначально максимальную энергию $\sim 0,5$ МэВ, существенно смещается в сторону больших энергий, если пропустить его через дифрагмированный волновод и подвергнуть автоускорению. При этом примерно 10% электронов увеличивают энергию вдвое, а для 2% частиц энергия возрастает в три и более раза. Если же принять во внимание форму импульса напряжения, то энергия электронов, находящихся на заднем фронте импульса, возрастает в 4-6 раз. Важным сопровождающим явлением при этом было испускание интенсивного СВЧ излучения^{/29/}, полная измеренная мощность которого в указанных экспериментах составляла 0,4-0,5 ГВт, что соответствует около 20% мощности пучка на входе в волновод.

Теперь метод автоускорения развивается по разным направлениям в ряде центров СССР и США^{/30-33/}. Так, в экспериментах, выполненных в Военно-морской лаборатории в Вашингтоне^{/31/} по реализации идеи автоускорения, пучок 0,5 МэВ, 10 кА, 50 нс пропускался через резонансную полость, представляющую собой четвертьволновый коаксиальный резонатор. В результате длительность импульса уменьшалась в два раза, однако большая часть электронов почти удваивала свою энергию.

Эффективность автоускорения во многом зависит от формы импульса пучка. При определенных условиях выгодным может оказаться импульс тока с сильно затянутым передним фронтом τ_1 и коротким задним фронтом τ_2 ^{/32/}. Несколько условно можно разделить тогда процесс прохождения СРЭП через систему на два этапа: этап передачи энергии от пучка к резонаторной системе (запасаемая энергия $\sim LI^2/2$) и этап генерации напряжения $V \simeq L \frac{dI}{dt}$ и ускорения части электронов пучка, определяемых темпом спада тока и величиной индуктивности системы L . Эффективность ускорения может быть, в принципе, повышена за счет применения ферритов в волновод-

ной структуре, что повышает значение $L \sim \mu$, где μ — магнитная проницаемость ферритов. О некоторых работах в этом направлении будет рассказано в докладе В.В.Закутина и других из Харьковского физико-технического института.

Полученные пока результаты дают основание считать, что с помощью механизма автоускорения можно в достаточно широких пределах изменять также характеристики пучка электронов, как спектр, максимальную энергию, импульсную мощность. Использование этого механизма позволит значительно расширить области применения импульсных сильноточных ускорителей, в том числе и для развития коллективных методов ускорения. В настоящее время в различных местах прорабатываются варианты автоускорительных установок, дающие, в принципе, возможность увеличения первоначальной энергии электронов в сильноточном пучке на порядок (от нескольких до десятков МэВ).

4. Метод электронных релятивистских колец

Этот известный метод продолжает развиваться в ОИЯИ (Дубна, СССР) и в Институте физики плазмы (Гархинг, ФРГ), а также в Мерилендском университете (США), ИТЭФ (Москва, СССР) и некоторых других центрах.

В процессе исследований, проведенных на разных установках в прошлые годы, пришлось встретиться с разного рода неустойчивостями, и, естественно, основные усилия были направлены на то, чтобы их преодолеть или исключить.

В Дубне продолжалась работа по созданию прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов ¹³⁴. Он состоит из двух основных традиционных частей: линейного индукционного ускорителя-инжектора и компрессора. В последнем происходит формирование колец, а затем их ускорение в спадающем продольном магнитном поле. Главная цель исследований в последние годы заключалась в значительном повышении предельного количества электронов в кольце за счет оптимизации этапа инжекции пучка и этапа его сжатия. В частности, чтобы избежать опасных неустойчивостей, была сделана новая камера компрессора с проводящими сходящимися стенками для "сопровождения" сжимающегося кольца. В результате было сформировано кольцо с числом электронов $1,0-1,5 \cdot 10^{13}$ при геометрических параметрах, соответствующих напряженности ~ 50 МВ/м. Кольцо было выведено из компрессора и проведено вдоль участка ускорения со спадающим маг-

нитным полем до скорости 0,45 с. В настоящее время ведутся исследования влияния нагрузки кольца ионами. Более подробно о работе в ОИЯИ и достигнутых результатах будет рассказано в специальном докладе В.П.Саранцева.

В ИТЭФе сооружается экспериментальная установка для магнито-статического ускорения с внутренним ферромагнитным сердечником^{/35/}. Производится монтаж ЛИУ на 5 МэВ, 4 кА^{/36/}.

В Гархинге^{/37/} был ранее разработан и задействован быстрый компрессор "Шуко", для которого характерно настолько быстрое сжатие кольца, что бетатронные резонансы не успевают оказать вредного влияния. Протоны и альфа-частицы были ускорены в кольце до небольших энергий $\sim 200-400$ кэВ. В последнее время все силы сконцентрированы на подготовке к экспериментам на новой большой установке, т.н. Пустарекс (pulse + static + experiment). В ней должен использоваться опыт быстрой компрессии и система инжекции, аналогичная "Шуко", с электронным пучком $E_0 \sim 2$ МэВ, $I_0 \sim 200-300$ А. Ускорение кольца будет осуществляться в спадающем статическом магнитном поле ~ 20 кГс на длине $\sim 1,2$ м. После компрессии кольцо проходит область напуска газа, который ионизуется электронами кольца, и ионы захватываются в него. Далее располагается т.н. "камера ожидания", при подходе к которой кольцо замедляется и "стоит" в зеркально-ловушечном поле в течение примерно 10 мс. За это время циркулирующие электроны многократно ионизуют захваченные в кольцо ионы, доводя их до требуемых (достаточно высоких) зарядовых состояний. Планируется получить энергию ~ 5 МэВ/нуклон для легких ионов и ~ 2 МэВ/нуклон для тяжелых ионов. В основном сооружение Пустарекса закончено, вскоре начнутся эксперименты по формированию кольца, а первые опыты по компрессии планируются на конец 1977 года.

В Мерилендском университете^{/38,39/} продолжается проводимое в течение ряда лет исследование схемы формирования кольца при пропуске трубочатого электронного пучка через канал с постоянными во времени встречными магнитными полями (т.н. касп). Основным достижением за последнее время является подавление радиального "взрыва" пучка, главную роль в котором играла неустойчивость отрицательной массы. Она приводила к группировке пучка, интенсивному микроволновому излучению и существенному уширению пучка. Для борьбы с этим явлением пучок пропускался сквозь титановую фольгу, при этом электроны получали разброс по энергии и угловой частоте обра-

жения. В результате применения фольги мощность СВЧ излучения уменьшилась на два порядка, а радиальный "взрыв" пучка оказался подавленным. В настоящее время готовятся эксперименты по торможению трубчатого пучка в заданном месте, что должно уменьшить его продольные размеры и позволить осуществить нагрузку ионами. Для ускорения кольца создана область магнитного поля длиной 140 см. Поскольку энергия электронов сравнительно невелика $\sim 2,5$ МэВ, темп ускорения ожидается в пределах 1,0–4,0 МВ/м, что, по мнению авторов, достаточно для получения надежных методических данных.

В рамках нашего доклада невозможно охватить все проводимые по коллективным методам работы. Их поток с годами не иссякает, так же как не уменьшается разнообразие направлений, по которым ведутся исследования. Главное достижение последних лет – получение в экспериментах больших значений коллективных полей и удовлетворительного согласия экспериментальных и теоретических данных. Это важно для целенаправленной разработки специализированных ускорительных систем на коллективных принципах, хотя для создания таких систем предстоит решить еще серьезные технологические проблемы, касающиеся, в частности, качества используемых пучков. Однако полученные уже результаты позволяют рассчитывать на дальнейший прогресс коллективных методов и в конечном счете на их практическое применение в разных областях.

Литература

1. J.D.Lawson. Particle Accelerators, 3, 21 (1973).
2. А.А.Коломенский. Труды IX Международн.конф.по ускорит.,стр.254, Стенфорд (1974).
3. С.L.Olson. IEEE Trans.Nucl.Sci., NS-22, No.3, p.962 (1975).
4. С.Путнам. Труды II Симп. по колл.мет.ускор.,стр.136, ОИЯИ, Дубна (1976).
5. Л.Н.Казанский, А.А.Коломенский, Б.Н.Яблоков. Там же,стр.207.
6. S.Graybill, I.Uglum. J.Appl.Phys., 41, 236 (1970).
7. В.Ecker, S.Putnam, D.Drickey. IEEE Trans.Nucl.Sci., 20, 301 (1973).
8. Б.Экер, С.Путнам. Труды II Симп. по колл.мет.ускор., стр.152, ОИЯИ, Дубна (1976).
9. G.W.Kuswa, L.P.Bradley, G.Yonas. IEEE Trans.Nucl.Sci., 20, 305 (1973).

10. C. L. Olson. Proc. of Int. Conf. on Electr. Beam Technology, 2, 312, Albuquerque, USA (1974); Труды II Симп. по колл. мет. ускор., стр. 101, ОИЯИ, Дубна (1976).
11. А. А. Коломенский, В. М. Лихачев и др. ЖЭТФ, 68, 51 (1975).
12. В. Н. Иванов, А. А. Коломенский и др. Труды II Симп. по колл. мет. ускор., стр. 114, ОИЯИ, Дубна (1976).
13. C. W. Robertson, S. Eckhouse et al. Phys. Rev. Lett., 36, 1457 (1973).
14. G. W. Kuswa. Ann. New York Acad. Sci., 251, 514 (1975).
15. А. А. Коломенский, И. И. Логачев. ЖТФ, 46, 50 (1976); А. А. Коломенский. Труды IV Всес. совещ. по ускорит., I, 79 (1975).
16. C. L. Olson, J. W. Poukey et al. Paper presented at the Part. Acceler. Conf., Chicago, March 16-18 (1977).
17. А. В. Агафонов, А. А. Коломенский, И. И. Логачев. Письма в ЖЭТФ, 22, 478, 1975; Физика плазмы, 2, 953 (1976).
18. А. А. Плутто и др. Письма в ЖЭТФ, 6, 61 (1967).
19. J. S. Luce. Ann. New York Acad. Sci., 251, 217 (1975).
20. C. N. Boyer, H. Kim, G. T. Zorn. Proc. of Int. Conf. E-Beams, 2, 347, Albuquerque (1975).
21. M. L. Sloan, W. E. Drummond. Phys. Rev. Lett., 31, 1234 (1973); Proc. of IX Int. Conf. Acceler., p. 283, Stanford (1974).
22. M. L. Sloan, private communication.
23. В. А. Киселев, А. К. Березин, Я. Б. Файнберг. Труды II Симп. по колл. мет. ускор., стр. 121, ОИЯИ, Дубна (1976).
24. В. В. Беликов, А. Г. Лымарь, Н. А. Хижняк. Там же, стр. 172.
25. Л. Н. Казанский, А. В. Кислицев, А. Н. Лебедев. АЭ, 30, 27 (1971).
26. А. А. Коломенский. Труды I Симп. по колл. мет. ускор., стр. 79, ОИЯИ, Дубна (1972).
27. В. Г. Гапанович, А. Н. Лебедев. ЖТФ, 45(4), 844 (1975).
28. А. А. Коломенский, Г. О. Месхи и др. Письма в ЖТФ, I(21), 968 (1975); Труды IV Всес. совещ. по ускорит., II, 249 (1975).
29. А. А. Коломенский, Е. Г. Крастелев и др. Труды II Симп. по колл. мет. ускор., стр. 160, ОИЯИ, Дубна (1976).
30. R. G. Briggs et al. Proc. of IX Intern. Conf. Acceler., p. 278, Stanford, USA (1974).
31. W. Friedman. Phys. Rev. Lett., 32, (3), 92 (1974).
32. В. В. Закутин и др. Труды IV Всес. совещ. по уск., 2, 256, М., "Наука" (1975).

33. А.Н. Диденко, А.Г. Жерлицын и др. Там же, стр.259.
34. В.П. Саранцев. Труды IV Всес.совещ. по ускорит., I, 63, М., "Наука"; Труды II Симп. по колл. мет.ускор., стр.13, ОИЯИ, Дубна, (1976).
35. В.К. Плотников. Там же, стр.41.
36. А.И. Анацкий, О.С. Богданов и др. Там же, стр.234.
37. С. Andelfinger et al. Ibid, p.29, paper presented at the Part.Acceler.Conf., Chicago, USA, March, 16-18, 1977.
38. М. Райзер. Труды II Симп. по колл.мет.ускор., стр.55, ОИЯИ, Дубна (1976).
39. W.W. Destler et al. Paper presented at Part.Acceler.Conf. Chicago, USA, March, 16-18, 1977.

ДИСКУССИЯ

И.Н.Иванов: Какая экспериментальная ситуация в данный момент в области метода автоускорения?

А.А.Коломенский: В тех экспериментах, где целью была проверка принципа, достигалось увеличение энергии в 3-6 раз, но абсолютные значения энергии были невелики. В настоящее время разрабатываются и сооружаются ускорители на энергию до 20 МэВ.