

О РАЗВИТИИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЛВЭ ОИЯИ И ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

А.М.Балдин

ОИЯИ, Лаборатория высоких энергий

Как хорошо известно участникам совещания, группа сотрудников ОИЯИ и Радиотехнического института АН СССР выступила с инициативой создания на базе дубненского синхрофазотрона криогенного ускорителя релятивистских ядер - нуклотрона^{/1/}. Проектируемый ускоритель должен ускорять ядра вплоть до тяжелых с энергией около 20 ГэВ на нуклон и с интенсивностью примерно $10^{12}/\text{с}$ ядер в цикле.

Напомним основные аргументы в пользу создания такого ускорителя.

Необходимость создания ускорителя релятивистских ядер диктуется требованиями развития физики сильных взаимодействий, основной проблемой которой стало исследование сложных составных систем. Здесь физика так называемых элементарных частиц смыкается с ядерной физикой высоких энергий.

Особое значение исследования в этой области приобрели с возникновением и развитием в ЛВЭ нового научного направления - релятивистской ядерной физики, в настоящее время разрабатываемой также в США и Западной Европе. Как будет показано ниже, развитие этого нового направления требует создания ускорителя для получения пучков ускоренных ядер существенно большей энергии, а также больших интенсивностей и в более широком диапазоне масс ядер, чем могут быть получены на существующих ускорителях ядер высоких энергий (синхрофазотрон ЛВЭ в Дубне и беватрон в Беркли).

Помимо общих научных аргументов о необходимости создания

ускорителя релятивистских ядер, имеется ряд решающих, по нашему мнению, аргументов в пользу создания этого ускорителя именно в ЛВЭ ОИЯИ на базе существующего синхрофазотрона. Эти аргументы связаны с общей перспективой развития в ОИЯИ физики высоких энергий, с имеющимися в ЛВЭ опытом и традициями исследований по релятивистской ядерной физике, которые ведутся и в течение предстоящих лет будут развиваться на синхрофазотроне, и с тем весьма существенным обстоятельством, что использование для создания нуклотрона имеющихся ресурсов ЛВЭ (здание, энергохозяйство, экспериментальная аппаратура и т.д.) позволит осуществить сооружение нуклотрона с наименьшими материальными затратами и в кратчайшие возможные сроки.

Рассмотрим эти аргументы несколько более подробно.

К началу восьмидесятых годов дубненский синхрофазотрон полностью выработает свои ресурсы, и ОИЯИ лишится собственной ускорительной базы. Такому крупному международному институту, как ОИЯИ, необходимо своевременно позаботиться о создании достаточно современного ускорителя в области физики высоких энергий. Выход на другие крупнейшие ускорители мира принес ОИЯИ хорошие плоды. Создание Лабораторией высоких энергий крупнейших установок и двух пузырьковых камер на серпуховском ускорителе в период, когда этот ускоритель обладал рекордными параметрами пучков, позволило не только получить ряд важных результатов, но и обеспечить лаборатории стран-участниц ОИЯИ уникальной информацией. Хорошо развитая методическая база ЛВЭ позволила также провести первые эксперименты на крупнейшем в мире ускорителе в Батавии. Вместе с тем работа на "чужих" ускорителях продемонстрировала недостаточность для ОИЯИ этой формы проведения исследований.

Для постановки экспериментов на значительном расстоянии от основной базы необходимо иметь возможность не только полностью отладить и откалибровать установки, но и испытать их в рабочих условиях. Проведение экспериментов на "чужих" ускорителях требует слишком больших усилий и не позволяет полностью использовать потенциальные возможности установок. Создание нуклотрона потребует относительно скромных затрат, так как предполагается максимально использовать развитие существующей площадки, имеющиеся сооружения, коммуникации и аппаратуру синхрофазотрона, а также накопленный в лаборатории опыт, традиционные направления научных и технических исследований.

Развитые в лаборатории методики, функциональные службы и специализированные подразделения составляют важнейший ресурс, для создания которого заново необходимы десятилетия. Этот ресурс, с одной стороны, нуждается во всемерной поддержке и развитии, с другой стороны, он позволит очень быстро освоить нуклотрон.

Релятивистская ядерная физика имеет хорошие перспективы развития на действующем синхрофазотроне. За время создания нуклотрона будут развиты новые методики и имеющиеся установки приспособлены к условиям исследований в этой новой области.

Важным фактором, обеспечивающим успех ускорения ядер, является создание интенсивных импульсных источников полностью ионизованных атомов. Благодаря помощи и инициативе ЛЯР ОИЯИ и участия в этих работах МИФИ, ЛВЭ занимает лидирующее положение в этой области. К моменту создания нуклотрона в ЛВЭ будет накоплен большой опыт по созданию источников, транспортировке и инъекции ядер в синхрофазотрон.

Применение криогеники, автоматизации и других достижений современной техники обеспечит снижение эксплуатационных расходов по сравнению с расходами на эксплуатацию существующего синхрофазотрона. Важным моментом сооружения ускорителя является освоение и развитие специалистами стран-участниц ОИЯИ новой техники, в особенности криогенной техники, что будет способствовать повышению научно-технического потенциала социалистических стран. Особое значение имело бы такое развитие ОИЯИ для создания в будущем ускорителей или накопителей на сверхвысокие энергии. Разработка и эксплуатация элементов нуклотрона даст чрезвычайно ценный опыт работы в этой области. Если принять энергичные меры по быстрой реализации предложения, то нуклотрон будет первым ускорителем, специально сооружаемым для ускорения релятивистских ядер, что обеспечит ему уникальность и высокую конкурентоспособность.

О проблематике исследований на нуклотроне

Задача настоящего совещания – рассмотрение возможной программы физических исследований на нуклотроне. Очевидно, что многие из предложений, которые нам предстоит рассмотреть, можно будет реализовать на пучках релятивистских ядер синхрофазотрона уже в ближайшее время, хотя синхрофазотрон, конечно, не даст таких замечательных возможностей, которые открываются с созданием нуклотрона. О планируемых параметрах нуклотрона, технических и технологических возможностях его реализации расскажет И.Н.Семенюшкин. Я кратко остановлюсь на физических идеях, ко-

торые были нами положены в основу разработки предложений по развитию физики релятивистских ядер.

Релятивистскую ядерную физику мы определяем как область многобарьонных явлений, задаваемую условием:

$$\xi = \frac{P^2}{m^2} \gg 1, \quad (I)$$

где P^2 - квадраты импульсов частиц, а m^2 - квадраты их масс.

В этой области применима масштабная инвариантность, что существенно упрощает теоретическое рассмотрение. Условие (I) позволяет рассматривать асимптотику матричных элементов. В частности, оно позволяет дать строгое определение кумулятивного эффекта, т.е. такого столкновения релятивистских ядер, когда энергия группы нуклонов релятивистского ядра передается одной частице. Если разложить инвариантное сечение инклюзивного процесса при больших энергиях сталкивающихся частиц ($S \rightarrow \infty$)

$$\text{то степеням } 1/S, \quad E \frac{d\sigma}{d^3q} = f(S, X, q_{\perp}^2)$$

$$f(S, X, q_{\perp}^2) = f_0(X, q_{\perp}^2) + 1/S f_1(X, q_{\perp}^2) + 1/S^2 f_2(X, q_{\perp}^2) + \dots,$$

то можно показать, что все эффекты, связанные с внутренним движением, убывают минимум как $1/S^2$ вне области фазового пространства однуклонных столкновений, т.е. в области масштабной переменной $X = q_{\perp}^2 / 2p > 0,5$; P - импульс, приходящийся на нуклон релятивистского ядра. N -ый порядок кумулятивного эффекта можно определить, как $f_0(X_N, q_{\perp}^2)$ при $X_N = q_{\perp}^2 / N P$, лежащем в интервале $\frac{(N-1)P}{N \cdot P} < X_N < 1 \rightarrow (1 - \frac{1}{N}) < X_N < 1$. Кумулятивный эффект, как всякий процесс множественного образования частиц, необычайно многообразен. Первые эксперименты по его обнаруже-

нию и установлению основных свойств были проведены и ведутся в настоящее время группой В.С.Ставинского в ЛВЭ.

Как видно из определения кумулятивного эффекта, чистота его выделения определяется параметром $\frac{1}{\xi}$. Для дубненского синхрофазотрона это 0,04, для беватрона 0,17, для нуклотрона этот параметр составит $\sim 10^{-3}$.

Как показывает анализ существующего экспериментального материала, параметр $\frac{1}{\xi}$ несколько занижает границу области, где хорошо выделяется предельная фрагментация - член $f_0(x, q_0^2)$. По-видимому, область, где f_0 составляет $\sim 90\%$ от сечения, лежит при энергиях выше 4-5 ГэВ на нуклон, т.е. на верхнем пределе энергий, достигнутых на синхрофазотроне. Таким образом, для детального изучения наиболее интересной асимптотической области столкновений релятивистских ядер необходимо иметь энергию как минимум 10-15 ГэВ на нуклон, что и является главным физическим аргументом в пользу сооружения нуклотрона. Область применимости асимптотических соотношений и особенно масштабной инвариантности позволит развить совершенно новые подходы к моделям ядерной физики.

Кумулятивный эффект является хотя, может быть, и наиболее ярким, но частным случаем процессов множественного рождения частиц при столкновении релятивистских ядер. Процессы множественного рождения частиц являются в настоящее время наиболее интенсивно изучаемыми процессами физики высоких энергий. Тенденция увеличения значимости исследования процессов множественного рождения, несомненно, сохранится на многие годы, ибо эти процессы необычайно сложны и многообразны. Изучение столкновений релятивистских ядер дает возможность нетривиального подхода к многочастичным процессам. Очень важными особенностями,

составляющими специфику исследований столкновений релятивистских ядер по сравнению со столкновениями частиц являются следующие:

- 1) внутренняя структура сталкивающихся объектов известна хотя бы в нерелятивистском пределе;
- 2) Имеется возможность в широких пределах варьировать квантовые числа сталкивающихся объектов;
- 3) Предоставляется возможность исследовать множественные процессы, когда не только в конечном состоянии процесса присутствует много частиц (кумулятивные эффекты);
- 4) Имеется возможность более обоснованного применения статистического и гидродинамического подходов (значительно больше число конфигураций, по которому происходит усреднение).

Помимо исследования неупругих столкновений и процессов множественного образования частиц, большой интерес представляет изучение поведения полных сечений взаимодействия ядро-ядро (особенно факторизации), бинарных реакций, упругого рассеяния с большими передачами импульса. Эти реакции имеют большое значение с точки зрения проверок ряда моделей, используемых в теории элементарных частиц, ибо ядра могут служить реалистической "кварковой" моделью релятивистского протяженного объекта. Причем мы можем в широких пределах варьировать структуру наших объектов, выбирая разные пучки и мишени. Область этих явлений чрезвычайно многообразна, а проблема описания структуры частиц становится все более важной, ибо уже в настоящее время в физике высоких энергий мы имеем дело с длинами волн частиц, значительно меньшими их размеров. Актуальность этих исследований к моменту создания нуклотрона возрастет.

Важно подчеркнуть, что создание нуклотрона существенно расширит по сравнению с синхрофазотроном как область доступ-

ных энергий, так и набор ускоряемых ядер и интенсивности пучков. Получение ускоренных ядер среднего веса, а возможно и тяжелых, позволит не только достигнуть высоких порядков кумулятивности, но и реализовать идеи, имеющие большое значение с точки зрения понимания структуры ядра.

Эти идеи связаны главным образом с возможностью индивидуального наблюдения ядер и групп движущихся барионов в трековых приборах с определением заряда и массы каждого отдельного ядра. Традиционные методы нерелятивистской ядерной физики этого не позволяют. Это принципиально новая возможность изучения короткоживущих ядерных состояний с временами жизни от 10^{-6} до 10^{-12} сек, а также наблюдения гиперядер и изоядер. Изучение изоядер и возбужденных состояний гиперядер связано с возможностью применения традиционных для физики высоких энергий трековых методик и изучения резонансных состояний с временами жизни вплоть до 10^{-24} сек. Как показывают оценки, при ускорении ядер среднего веса можно получить квазистабильные ядра, содержащие, помимо протонов и нейтронов, несколько лямбда-частиц (см., например, доклад Б.А.Шахбазяна). Многие из этих явлений до создания нуклотрона на существующих ускорителях вообще невозможно изучать. В частности, несмотря на значительные усилия, до сих пор фактически не обнаружено ни одно возбужденное состояние гиперядер, в то же время гиперядерная и изоядерная спектроскопии — существенно новые направления в ядерной физике, имеющие большую перспективу.

Пока почти совершенно нетронутой областью исследований остается получение сверхсильных электромагнитных полей, которые возникают при сближении двух зарядов большой величины, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Эти задачи

представляют большой интерес, однако соответствующие постановки экспериментов отсутствуют. Я не сомневаюсь, что уже на нашем совещании мы услышим, помимо отмеченных выше, целый ряд принципиально новых идей в области релятивистской ядерной физики. Приведенный выше обзор только демонстрирует, что мы имеем дело лишь с самыми первыми шагами в новой и очень перспективной области науки.

Использование ускоренных ядер имеет также большое прикладное значение. Прохождение через вещество релятивистских многозарядных частиц практически не изучено. Без детального исследования процессов атомного столкновения релятивистских ядер трудно рассчитывать на прецизионные измерения ядерных взаимодействий. Изучение прохождения многозарядных частиц через вещество представляет большой интерес с точки зрения проверки существующих представлений о составе и природе космического излучения, о радиационной безопасности космонавтов и космических аппаратов (как известно, релятивистские ядра в определенных условиях представляют в космосе наибольшую радиационную опасность). Для исследования космических лучей особенно желательно было бы дойти до ускорения железа, что невозможно на синхрофазотроне и, по-видимому, возможно для нуклотрона.

Основным мотивом для получения пучков релятивистских ядер в США была возможность исследования ряда медико-биологических проблем. Как показано было американскими физиками и биологами, пространственное распределение ионизации вдоль направления движения многозарядных ионов чрезвычайно благоприятно для решения целого ряда проблем. В настоящее время ими разработана обширная программа исследований: от изучения радиационных воздействий на клетку, до облучения семенного зерна и лечения рака.

Эта тема частично будет обсуждаться на настоящем совещании

в докладе проф. А.И.Рудермана. Очевидно, что при формировании системы пучков нуклотрона необходимо учесть потребность в медико-биологических пучках и выделить эти пучки как самостоятельные. Пучки нуклотрона могут иметь также промышленные применения.

Наконец, помимо отмеченных выше уникальных качеств, нуклотрон будет обладать всеми качествами современного протонного ускорителя на энергию 40-50 ГэВ. Область энергий ниже 25 ГэВ - область обильного рождения резонансов. Необходимо отметить, что сечения рождения резонансов падают примерно как квадрат энергии налетающей частицы, и, следовательно, для их изучения высокие энергии не нужны. Даже в области энергий ниже 10 ГэВ можно предложить обширные программы исследований, которые заведомо не будут исчерпаны за ближайшие 5-7 лет и вряд ли потеряют свою исключительную актуальность. Следует также отметить, что специфика нуклотрона обеспечивает очень хорошие пространственно-временные характеристики пучков. Последнее особенно касается такого важного параметра, как большая временная растяжка, недостижимая для существующих ускорителей.

Уже из приведенного выше обзора физических идей, возникающих при первых обсуждениях нуклотрона, видно, что с созданием этого ускорителя ОИЯИ получит вполне современную ускорительную базу в области физики высоких энергий. Эта база позволит обеспечить потребности физиков, ориентирующихся на ОИЯИ, широким спектром пучков.

Литература

1. В.П.Алексеев и др. Сообщение ОИЯИ, 9-7148, Дубна, 1973.