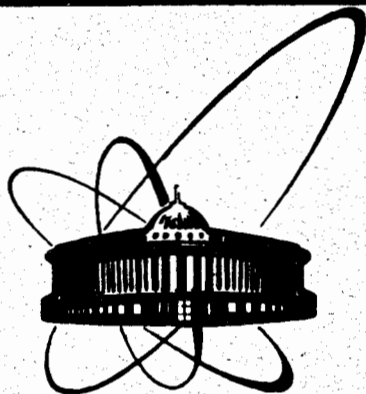


89-26



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

К 562

P9-89-26

А.Д.Коваленко

О ВОЗМОЖНОЙ КОНЦЕПЦИИ
УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР И ЭЛЕКТРОНОВ

1989

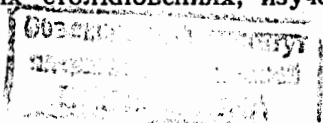
Объяснение природы и основных закономерностей ядерных сил на основе фундаментальных хромодинамических взаимодействий кварков и глюонов, учет кварковых степеней свободы при описании структуры ядер и динамики ядерных взаимодействий на малых расстояниях составляют главную перспективу исследований в области ядерной физики высоких энергий. Прогресс в решении этих задач непосредственно связан с созданием специализированных ускорителей с интенсивными и качественными пучками релятивистских ядер и электронов.

Начиная с 1970 г., когда на 10-Гэвном протонном синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ впервые были ускорены ядра дейтерия, а затем — после модернизации многих из его систем и развития инжекционного комплекса — и более широкий набор ядер (включая кремний) до энергии более 4 ГэВ/нуклон, в Дубне выполнена пионерская программа исследований релятивистских ядерных столкновений, сформировалась новая область исследований — релятивистская ядерная физика¹¹. Эксперименты на дубненском синхрофазотроне позволили впервые наблюдать проявление кварковых степеней свободы атомных ядер и установить, что автомобильный режим при столкновении релятивистских ядер существует и наступает уже при энергии ядра-снаряда $3,5 \div 4$ ГэВ/нуклон¹².

В 80-е годы интерес к проблемам и возможностям описания сильно возбужденной ядерной материи существенно возрос. Особое внимание в литературе уделяется проблемам хромоглазмы — предельному асимптотическому состоянию, характеризующемуся множественным деконфайнментом кварков и глюонов в столкновениях релятивистских ядер. Появились новые возможности для постановки экспериментов: релятивистские ядра с $E > 4$ ГэВ/нуклон получены на СПС ЦЕРНа, АGS БНЛ (США). Проектируется ряд систем для встречных АА-столкновений ($A \leq 238$) с энергией до 2×100 ГэВ/нуклон.

В Дубне с 1986 г. ведется сооружение сверхпроводящего жесткофокусирующего синхротрона релятивистских ядер — нуклотрона ($E_p \approx 12$ ГэВ), который обеспечит возможность ускорения ядер вплоть до урана с максимальной частотой повторения до 1 Гц¹³. Завершение работ по созданию всех систем нуклотрона планируется на 1990 г.

Нуклотрон сможет обеспечить исследование проблем хромодинамики с участием легких кварков. Для выхода в область далеких асимптотик в ядро-ядерных столкновениях, изучения систем с тяжелыми



кварками необходим ускоритель ядер на энергию масштаба $60 \div 70$ ГэВ/нуклон с возможностью организации встречных ядро-ядерных столкновений. Структура такой установки — комплекса супернуклотрона — прорабатывается. В состав комплекса должны входить: сверхпроводящий синхротрон, обеспечивающий ускорение ядер от ~ 6 ГэВ/нуклон до конечной энергии, растяжитель и система для накопления ускоренных пучков ядер и обеспечения их встречных пересечений. Тоннель для размещения элементов комплекса имеет вид рейстрека с радиусом дуг ~ 200 м и двумя длинными прямолинейными промежутками по ~ 200 м, в которых организуются места встречи пучков с малым значением β -функции.

Дополнение комплекса супернуклотрона ускорителем электронов на энергию $\sim 4 \div 6$ ГэВ с высокой средней интенсивностью пучка ($I \cong \cong 150 \div 200$ мкА в непрерывном режиме) обеспечило бы не только новые возможности в экспериментах с неподвижными мишенями, но и уникальные исследования на встречных e^-A^- , γA^- (A^- — ядра, включая уран) и $e^-d\uparrow$ -пучках.

Анализ различных вариантов электронных ускорителей показывает, что в максимальной степени обеспечивает требуемые параметры электронного пучка система, состоящая из двух (не считая инжектора), работающих в непрерывном режиме, сверхпроводящих линейных ускорителей на энергию $\sim 0,5$ ГэВ каждый с рециркуляцией пучка¹⁴. Центральным вопросом при этом является создание СП-высокочастотной ускоряющей структуры с высокими градиентом ускоряющего поля и добротностью. Технология изготовления таких структур, гарантирующая получение рабочих градиентов поля $E_p = 5$ МВ/м и добротности $Q = (2-4) \cdot 10^9$ (при $T = 2^\circ$ К) в диапазоне частот 500-1500 МГц, уже вполне освоена¹⁵. Если ориентироваться на получение среднего по ЛУ градиента ускоряющего поля $\sim 2,2 \div 2,5$ МэВ/м (с учетом свободных промежутков, конструктивных элементов и т.д.), то его длина при конечной энергии 0,5 ГэВ составит $200 \div 230$ м. Минимальный радиус орбит рециркуляции определяется допустимой величиной увеличения эмиттанса пучка за счет синхротронного излучения, и при энергии $4 \div 6$ ГэВ не должен быть менее 70-100 м. Необходимо отметить, что прогресс в технологии создания СП-высокочастотных структур может привести к увеличению рабочих градиентов ускоряющего поля в ЛУ до $10 \div 20$ МВ/м^{15,6}, т.е. с учетом перспективы повышения энергии электронов радиус дуг рециркуляции целесообразно выбрать большим.

Из приведенных выше оценок видно, что линейный ускоритель-рециркулятор электронов с указанными параметрами хорошо совмещается в одном тоннеле с супернуклотроном.

Общий для обеих установок вопрос состоит и в необходимости создания криогенной базы. Требуемая мощность рефрижератора для ЛУ составляет ~ 5 кВт ($T = 2$ К)¹⁴, а для супернуклотрона — $7,5 \div 9$ кВт (в зависимости от режима работы). В настоящее время в ЛВЭ имеется действующий рефрижератор мощностью 1,6 кВт ($T = 4,5$ К) и в рамках программы нуклотрона сооружаются еще две такие установки. Кроме того, при разработке и создании СП-синхротронов релятивистских ядер освоены как система погружного криостатирования, которая содержит внешний теплый вакуумный кожух, азотный экран и гелиевый сосуд с частично погруженными в жидкий гелий магнитными элементами, так и система прокачного типа, в которой, в отличие от погружной, охлаждение осуществляется посредством циркуляции двухфазного гелия по узким каналам в зонах наибольших тепловыделений (обмотка и ярмо магнитов). Для криостатирования ускоряющей структуры ЛУ более подходит погружная система. При частоте ускоряющего поля в ЛУ $f_0 \approx 1500$ МГц поперечные размеры резонаторов структуры таковы, что наружный вакуумный кожух криостата будет иметь диаметр $\sim 70 \div 75$ см. (Такой же диаметр имеет вакуумный кожух криостатных блоков СП-магнитов нуклотрона). Таким образом, в Дубне уже создан определенный уровень обеспеченности криогеникой и накоплен значительный опыт работы с крупными ожигательными и криостатными системами.

При разработке электрон-протонных (ядерных) ускорительных комплексов высоких и сверхвысоких энергий следует обратить внимание на то, что для ускорения релятивистских протонов и ядер вполне хорошо подходит структура с бегущей волной*, т.е. электроны и протоны можно ускорять в одном линейном ускорителе.

В супернуклотрон инжектируются релятивистские ядра ($\beta_p = = v/c = 0,9965$ для протонов и $\beta \sim 0,986$ для ядер с $Z/A = 0,5$), поэтому представляются интересными возможности использования элементов ускоряющей структуры линейного ускорителя как группирователя пучка ядер с целью увеличения светимости встречных соударений электрон-ядерных ступков или в качестве ускоряющей станции супернукло-

* В литературе, когда рассматриваются вопросы линейного ускорения ионов, обычно считается, что ионы нерелятивистские и обсуждение сводится к поиску структур с малым и переменным значением фазовой скорости волны β_v . В нашем случае для ускорения ядер достаточно хорошо подходят и интенсивно разрабатываемые сейчас пучково-волноводные и другие системы с темпом набора энергии \sim ГэВ/м.

Основные параметры пучков комплекса

Частицы	Энергия (ГэВ/ нуклон)	Интенсивность (част./с)	Энерг. разброс $\Delta E/E$	Эмиттанс ϵ (рад·м)	Светимость L ($\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$)
Протоны, p	12	$\sim 10^{12}$	10^{-3}	10^{-5}	—
Ядра: d	6	$\sim 10^{12}$	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-6}$	—
(d†)	—	(d† $\sim 10^9 \cdot 10^{10}$)	—	—	—
^{12}C	—	10^{10}	$2 \cdot 10^{-3}$	—	—
.
^{238}U	4	$10^8 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^{-3}$	—	—
Протоны, p	120	$\sim 10^{12}$ 1/цикл	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	—
ядра: d	60	$\sim 10^{12}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	—
^{12}C	60	$\sim 10^{10}$	$\sim 10^{-3}$	—	—
.
^{238}U	40	$10^8 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	—	—
Электроны, e	0,5 ÷ 4 (12)	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-9}$	—
ep	4 (12) x 120 ($\sqrt{s} \approx 44 (76)$)				$10^{30} \div 10^{31}$
eA	4 (12) x 60 (40)				$10^{30} \div 10^{27}$
(A=d,... U)					
pp	120 x 120				$\sim 10^{31}$
AA	60x60 (40x40)				$> 10^{26} \div 10^{27}$ (для тяжелых ядер)

трона. Такое же использование ЛУ представляется целесообразным для УНК ИФВЭ в связи с планируемой разработкой $e^-p(\gamma p)$ -коллайдера в ТЭВ-ной области энергий.

Весьма важным является вопрос получения максимальной конечной энергии электронного пучка в рециркуляторе. При заданных параметрах ЛУ она ограничивается возможным числом рециркуляций. Поскольку в данном ускорителе одновременно циркулируют сгустки частиц разных энергий, то необходимо соответствующее число магнитных дорожек. Описанная в работе¹⁴ установка содержит четыре дорожки, магнитные элементы которых располагаются на различных вертикальных уровнях, а перевод сгустков частиц в них осуществляется с помощью сепарирующих магнитов. Известна система (разрезной микротрон¹⁷), в которой число орбит существенно больше, однако ее использование целесообразно в ускорителе на невысокие энергии. Обеспечить рециркуляцию электронного пучка, по-видимому, можно, используя магнитную систему с постоянным полем и сильной фокусировкой. Такие системы, в частности, радиально-секторного типа, известны давно¹⁸ и в данном случае весьма привлекательны, т.к. позволяют иметь в одной плоскости набор устойчивых орбит для различных энергий, однако необходимо их более детальное рассмотрение.

Таким образом, видно, что для объединения в одном комплексе ускорителя ядер и электронов имеется ряд технико-экономических оснований.

В таблице приведены оценки для основных параметров пучков комплекса электронного рециркулятора и синхротрона тяжелых ионов, которые уточнятся после более детальной проработки. В связи с приведенными данными необходимо отметить:

- параметры пучков нуклотрона взяты в соответствии с проектными и с учетом развития инжекционного комплекса;
- для энергии пучков супернуклотрона указан нижний предел (при использовании СП-магнитов с железными сердечниками^{19,10}), а остальные параметры получены исходя из параметров нуклотрона;
- при оценке светимости встречных e^-p , e^-A -пучков эффективная площадь взаимодействия принималась равной 10^{-2} см. Для pp - и AA -пучков учитывался режим накопления.

Электронные пучки комплекса могут быть также использованы для получения γ -квантов и синхротронного излучения (СИ) в широком диапазоне длин волн, однако по сравнению со специализированными источниками интенсивность СИ без дополнительного накопления электронов существенно меньше.

Эффективность работы рассматриваемого комплекса на эксперимент будет весьма высокой, т.к. одновременно можно вести облучение как неподвижных мишеней пучками ядер и электронов различных энергий, так и реализовать встречные, например, e^-A -взаимодействия.

Комплекс обеспечит уникальные условия как для исследований ядерной материи в экстремальных условиях (центральные столкнове-

ния тяжелых ядер), так и для проведения прецизионных измерений формфакторов адронов и ядер, выявления тонких кварковых эффектов (в том числе с использованием поляризованных пучков и мишеней), а также гиперядерной спектроскопии высокого разрешения и целого ряда других фундаментальных, а также прикладных задач.

В заключение автор выражает признательность академику А.М.Балдину и коллегам по работе за интерес к постановке данной задачи и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baldin A.M. et al. – In: Proc. Rochester Meeting, APS/OPF, 1971, p.131.
2. Baldin A.M. – Nucl. Phys., 1985, A447, p.203c.
3. Смирнов А.А. и др. – ОИЯИ, 9-83-625, Дубна, 1983.
Baldin A.M. et al. – IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983, v.NS-30, No.4, p.3247.
4. Leeman C. – CEBAF-PR-88-001, Newport News, 1988.
5. Lengeler H. – CERN 87-10, Geneva, 1987, p.352.
6. Диденко А.Н. и др. – Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна: ОИЯИ, 1985, т.1, с.160.
7. Горбатов Ю.И. и др. Там же, т.2, с.53.
8. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. – Теория циклических ускорителей. М.: Физматиздат, 1962, с.298.
9. Аверичев С.А. и др. – ОИЯИ, P8-11700, Дубна, 1978.
10. Shelaev I.A. et al. – Abstracts for 1st Europe. Part. Acceler. Conf., EPAC, Rome, June 1988, p.67.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 января 1989 года.