

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ELISE И EXL НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ИТЭФ

*А. Е. Большаков, А. А. Голубев,
П. Р. Зенкевич¹, М. М. Кац, А. А. Коломиец*

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Рассмотрена возможность проведения в ИТЭФ экспериментов по исследованию столкновений ядер радиоактивных фрагментов с электронами (ELISE и EXL). Выбрана схема ускорения ионов урана в ускорительном комплексе ИТЭФ, и показано, что после модификации комплекса и сооружения нового инжектора в нем возможно ускорять ионы урана с интенсивностью $\sim 1 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. Приведены основные характеристики модифицированного комплекса и схема размещения мишени для генерации радиоактивных фрагментов, сепаратора и накопительных колец (CR, RESR, NESR и ER) на площадке ИТЭФ.

A possibility is studied to perform experiments on collisions of radioactive fragments of nuclei with electrons (ELISE and EXL) in ITEP. The scheme of uranium nuclei acceleration in ITEP acceleration complex is chosen and it is shown that after the complex modification and construction of new injector we will be able to accelerate in the complex the beam of uranium ions with intensity about $\sim 1 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$. The characteristics of the modified complex and scheme of new facilities location (target for generation of the radioactive fragments, separator and storage rings (CR, RESR, NESR and ER) on ITEP site are given.

PACS: 07.77.-n

ВВЕДЕНИЕ

В ускорительно-накопительном комплексе FAIR [1] предполагалось провести эксперименты (ELISE и EXL) по исследованию столкновений ядер радиоактивных фрагментов с электронами. К сожалению, пока эта часть проекта опущена из-за нехватки средств и людских ресурсов. ИТЭФ получил официальное письмо от экспериментальных коллабораций ELISE и EXL с просьбой рассмотреть возможность проведения таких экспериментов на базе ускорительного комплекса ИТЭФ, что и выполнено в настоящей работе.

Рассмотрим вкратце схему проведения экспериментов в FAIR. Выведенный из синхротрона СИС-100 пучок ионов урана с энергией 1,5 ГэВ/нуклон направляется на мишень,

¹E-mail: Zenkevich@itep.ru

из которой вылетают радиоактивные элементы, образовавшиеся при столкновении урана с мишенью. Эти элементы проходят через сепаратор радиоактивных фрагментов (SFRS) и направляются последовательно в три ионных накопительных кольца: CR, RESR и NESR. Кроме того, проект включает также электронное накопительное кольцо (ER). Первое из колец CR (Collimator Ring) используется для захвата фрагментов и их быстрого стохастического охлаждения при постоянной энергии 740 МэВ/нуклон. Ионы затем инжектируются во второе кольцо RESR (Accumulator Ring), функцией которого является быстрое замедление изотопов от энергии 740 МэВ/нуклон до энергии 100–500 МэВ/нуклон, необходимой для эксперимента. Затем ионы направляются в NESR (New Experimental Storage Ring), в котором они сталкиваются с электронами, циркулирующими в ER (Electron Ring). В данной работе предполагалось, что разработанная в FAIR конструкция этих колец остается неизменной. Рассматривались три задачи:

1. Схема ускорения ионов урана в УК ИТЭФ до энергии 1,5 ГэВ/нуклон с максимальной интенсивностью;
2. Размещение колец на площадке ИТЭФ;
3. Расчет фокусировки ионов урана на мишень и сепаратора фрагментов.

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ УРАНА

Ускорительный комплекс ИТЭФ по структуре полностью аналогичен ускорительному комплексу FAIR. Комплекс включает два синхротрона: бустер (магнитная жесткость $B\rho = 13,4$ Тл·м) и основное кольцо (магнитная жесткость $B\rho = 34$ Тл·м). Ранее в ИТЭФ рассматривался проект ускорения ионов урана, в котором предполагалось использовать лазерный источник ионов с накопленной энергией 100 Дж и линейный резонаторный ускоритель И-3. Производительность комплекса в этой схеме составляет $\sim 5 \cdot 10^9$ с⁻¹, что явно недостаточно для проведения экспериментов ELISE и EXL.

Анализ возможных вариантов повышения интенсивности комплекса показал, что необходимо сооружение нового инжектора, близкого по своим характеристикам и структуре к инжектору УК FAIR — линейному ускорителю UNILAC. Требуемую интенсивность может обеспечить только источник типа MEVVA, который используется в сильноточном инжекторе (HSI) линейного ускорителя UNILAC. Основным его недостатком является низкий заряд ионов — +4.

Минимальный заряд ионов, необходимый для получения требуемой энергии 1,5 ГэВ/нуклон, $Z_i = +53$. Мы выбрали схему, при которой перезарядка ионов от заряда $Z_i = +4$ до заряда $Z_i = +53$ происходит при энергии 2,2 МэВ/нуклон. Параметры перезарядной мишени были найдены путем экстраполяции экспериментальных данных, приведенных в работе [2].

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ

ЛУ состоит из двух частей (рис. 1): низкочарядной части (до перезарядки) и высокозарядной части (после перезарядки).

Начальная низкочарядная часть ЛУ включает в себя структуру с пространственно-однородной фокусировкой (RFQ), разработанную в ИТЭФ новую гибридную структуру

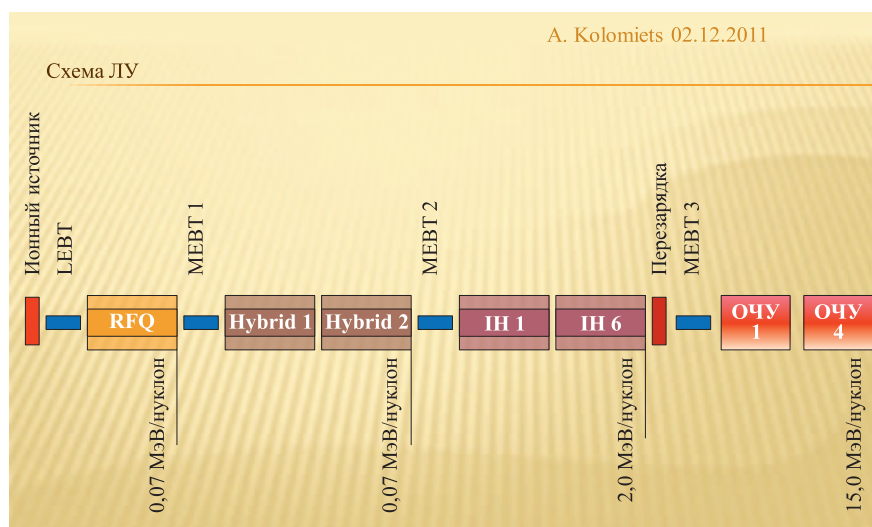


Рис. 1. Блок-схема ЛУ

(Hybrid), в которой объединены ускоряющие зазоры, формируемые обычными трубками дрейфа, и высокочастотные квадрупольные линзы, а также структуры с трубками дрейфа с электромагнитными квадрупольями, размещенными между резонаторами (ИН). Для того чтобы повысить энергию ускорителя, предполагается применить новые (по сравнению с ЛУ UNILAC) решения:

1. В RFQ использован более эффективный профиль модуляции электродов. Переход на более эффективную структуру производится на меньшей энергии;
2. Снижена выходная энергия RFQ;
3. Использована новая гибридная структура после RFQ;
4. Повышена частота в резонаторах с трубками дрейфа.

После прохождения обдирочной станции ток пучка увеличивается примерно в три раза. Необходимое увеличение жесткости фокусировки можно обеспечить, еще раз применяя гибридную структуру с удвоенной частотой ВЧ-поля. Инжектор ионов урана представляет собой сложную установку, которая включает в себя 14 ВЧ-резонаторов разных типов с соответствующим количеством мощных ВЧ-усилителей. Общая длина резонаторов составляет примерно 50 м. С учетом длин каналов транспортировки между резонаторами и длины станции перезарядки полную длину ЛУ можно оценить в 70–80 м. Параметры пучка на выходе ЛУ приведены в таблице.

Параметры пучка на выходе ЛУ

Зарядовое число урана	+53
Количество ионов в импульсе	$5,4 \cdot 10^{10}$
Энергия ионов, МэВ/нуклон	15,0
Длительность импульса тока пучка, мкс	42,0
Нормализованный поперечный эмиттанс, $\pi\beta\alpha$ мм · мрад	$\leq 2,0$

УСКОРЕНИЕ В КОЛЬЦАХ УК ИТЭФ

Схема модифицированного УК ИТЭФ изображена на рис. 2.

Для заполнения бустера (период обращения в бустере $T_b = 4,2$ мкс) предполагается использовать 10-оборотную поперечную инжекцию. При эмиттансе пучка на выходе ЛУ $2 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ и коэффициенте разжигения $D = 2,5$ эмиттанс пучка будет составлять $50 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, что вполне допустимо. Основной проблемой является кулоновский сдвиг бетатронной частоты при инжекции в бустер («ласлеттовский сдвиг»), который определяется следующей формулой:

$$\Delta Q_{x,y} = - \frac{r_i N_b}{2\pi\beta^2\gamma^3\varepsilon_{x,y} \left(1 + \sqrt{\frac{\varepsilon_{y,x}}{\varepsilon_{x,y}}}\right)} F_b. \quad (1)$$

В этой формуле β, γ — релятивистские параметры; N_b — число частиц в сгустке; $\varepsilon_{x,y}$ — среднеквадратичный эмиттанс инжектируемого пучка по двум поперечным степеням свободы; $r_i = Z_i^2 \cdot r_p / A_i$, Z_i и A_i — заряд и атомный номер иона; r_p — классический радиус протона. Фактор группировки $F_b = \frac{C_{\text{ring}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_s}$, где C_{ring} — длина кольца, σ_s — среднеквадратичный продольный размер сгустка. Оценки показывают, что при разумном значении $F_b = 3$ кулоновский сдвиг $\Delta Q = 0,24$, т.е. находится в допустимых пределах. На выходе бустера энергия ионов $W = 358 \text{ МэВ/нуклон}$.

Заметим, что магнитная система бустера состоит из магнитов бустера ИФВЭ, которые позволяют работать с частотой повторения $f_b = 10 \text{ Гц}$. Это позволяет инжектировать

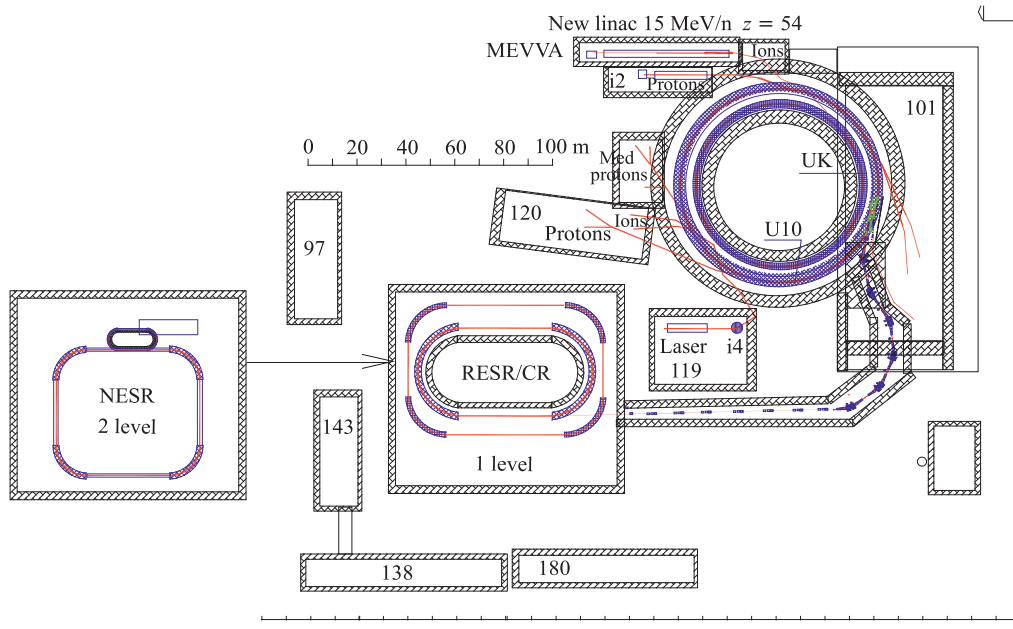


Рис. 2. План размещения оборудования на площадке ИТЭФ

в У-10 10 сгустков от бустера на площадке длительностью 0,9 с. Для эксплуатации бустера в таком режиме необходимо изготовить следующие системы: 1) новую систему питания магнитов бустера, работающую на частоте 10 Гц; 2) новую ускоряющую систему с амплитудой напряжения около 80 кВ. После окончания цикла ускорения в бустере ионы собираются в один сгусток и инжектируются в основное кольцо. Длительность площадки магнитного поля в У-10 составляет 1 с. Фазовый объем инжектируемого пучка на выходе бустера с учетом адиабатического затухания равен $5,6 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. Длительность цикла ускорения в основном кольце равна 2 с; необходимая амплитуда ВЧ-поля (при длительности ускорения 0,5 с) — 20 кВ.

Циркуляция ионов U^{53+} потребует значительного улучшения вакуума ввиду больших потерь на перезарядке на газе. Другой проблемой, которая требует тщательного изучения, является качество магнитного поля. Необходимо тщательное численное моделирование потерь частиц на циркуляции и, вероятно, компенсация опасных резонансов поперечных бетатронных колебаний.

По окончании цикла ускорения предполагается выполнить обычную фазовую гимнастику, сгруппировав частицы в один короткий сгусток. Для последней операции необходим резонатор с высокой амплитудой напряжения (около 500 кВ).

Оценим производительность комплекса. Предполагая, что коэффициент пропускания кольцевых ускорителей составляет 0,5, найдем, что число ускоренных ионов равно $1,3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, что сравнимо с производительностью СИС100.

РАЗМЕЩЕНИЕ КОЛЕЦ И МАГНИТНЫЕ КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИОНОВ ОТ У-10 ДО НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОЛЕЦ

Задача состояла в выборе места для расположения накопительных колец (CR, RESR, NESR), в расчетах магнитных каналов для транспортировки ионов, выведенных из синхротрона-накопителя У-10 в накопительное кольцо CR. Размеры помещения для колец CR и RESR были оценены из отчета FAIR как $80 \times 80 \text{ м}$. Ввиду ограниченной площади участка предложено расположить это оборудование на двух уровнях. На нижнем заглубленном этаже предложено расположить кольца CR и RESR.

Выбранный план размещения комплекса изображен на рис. 2.

Согласно оценкам, выведенный из У-10 ионный пучок будет иметь фазовый объем около $2 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. Этот пучок можно сфокусировать на мишень в пятно с размерами $2 \times 4 \text{ мм}$ при помощи теплых квадрупольных линз (20К100 и 10К100). Мишень надо расположить не в кольцевом зале ускорителей, а за кольцевой стеной, в специально защищенном помещении. Магнитная жесткость спектрометра выбрана равной жесткости накопительного кольца CR, равной 12 Тл·м. Выбраны параметры линз и магнитов и рассчитаны параметры линз и магнитов при разбросе по импульсам $\pm 3\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимая модификация УК ИТЭФ включает:

- новый линейный ускоритель — инжектор тяжелых ионов (масштаба UNILAC). Этот ускоритель должен быть размещен в новом здании;
- новую систему питания магнитов бустера с частотой повторения 10 Гц;

- новую систему ускорения бустера с амплитудой напряжения 80 кВ;
- резонаторы для группировки пучка в один сгусток в бустере и основном кольце;
- новую камеру и вакуумную систему основного кольца для обеспечения вакуума порядка 10^{-11} Торр;
- улучшение качества поля в основном кольце для предупреждения потерь на циркуляции и создание систем коррекции опасных резонансов.

Кроме того, необходимы технические и строительные работы для выполнения экспериментов. Эти работы включают:

- создание системы фокусировки выведенного пучка ионов урана для фокусировки на мишень;
- сооружение сепаратора радиоактивных фрагментов и здания, в котором он будет размещен;
- строительство двухуровневого здания для размещения колец и экспериментального оборудования. На первом уровне будут размещены CR и RESR, на верхнем уровне кольцо NESR (в котором производятся эксперименты), электронное кольцо ER и детектор;
- создание пространственного ионопровода для транспортировки фрагментов из RESR в NESR.

Все эти системы должны быть размещены в новых зданиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный проект, в принципе, осуществим на площадке ИТЭФ (возможным препятствием может явиться защита от излучения), хотя он и требует значительных материальных, технических и интеллектуальных усилий. Особого внимания требует также не рассмотренная в данной работе проблема защиты от излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. FAIR Technical Design Report. GSI: Germany, 2006.
2. Scheidenberger C. et al. Charge States of Relativistic Heavy Ions in Matter // Nucl. Instr. Meth. B. 1998. V. 142. P. 441–462.
3. Belyaev O. K. et al. IHEP Experience on Creation and Operation of RFQs // MOD21. LINAC2000. Monterey, California; <http://www.JACOW.org>.
4. Ostroumov P. N., Kolomiets A. A. New Concept for Acceleration of Slow, Low-Charge-State Ion Beams // Proc. of the 2001 Part. Accel. Conf. Chicago, 2001. P. 4077.