

СЗ45(04)  
М-431

**X** МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО УСКОРИТЕЛЯМ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ



**X** INTERNATIONAL CONFERENCE  
ON HIGH ENERGY  
ACCELERATORS

ТРУДЫ  
X МЕЖДУНАРОДНОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ  
ПО УСКОРИТЕЛЯМ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

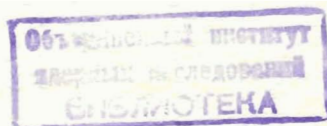
Протвино, июль 1977

Том I

Vol. I

PROCEEDINGS  
OF THE X INTERNATIONAL  
CONFERENCE  
ON HIGH ENERGY  
ACCELERATORS

Protvino, July 1977



С е р п у х о в 1 9 7 7

109218

## УСКОРЕНИЕ ЛЕГКИХ ЯДЕР НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ЛВЭ ОИЯИ

А.М.Балдин, Ю.Д.Безногих, В.И.Волков, Е.Д.Донец,  
Л.П.Зиновьев, И.Ф.Колпаков, Л.Г.Макаров, В.А.Мончинский,  
А.И.Пикин, И.Н.Семенюшкин, Е.А.Силаев

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

Одним из наиболее радикальных усовершенствований Дубненского синхрофазотрона со времени его запуска в 1957 году стало осуществление режима ускорения ядер<sup>/1/</sup>. Это позволило развернуть в ЛВЭ ОИЯИ широкую программу исследований в новой перспективной области науки — релятивистской ядерной физике.

Возможность ускорения в существующем инжекторе синхрофазотрона — линейном ускорителе протонов на 20 МэВ — более тяжелых частиц с  $Z/A = 0,5$  в режиме его работы на 2-й кратности дрейфа определяет требования к источнику ионов. Наиболее полно условиям получения максимальной зарядности ионов с высокой интенсивностью отвечают источники, использующие лазерное излучение<sup>/2/</sup> и электронно-лучевой источник "Крион"<sup>/3-6/</sup>.

В 1976 году на линейном ускорителе ЛУ-20 — инжекторе синхрофазотрона ОИЯИ — были проведены совместно с МИФИ эксперименты по ускорению ядер углерода, которые были получены в источнике из лазерной плазмы, образованной взаимодействием мощного лазерного излучения с веществом мишени. Использовался твердотельный лазер на неодимовом стекле, состоящий из генератора и четырех каскадов усилителей.

Таблица I

## Параметры лазерной установки

1. Длина волны излучения	1,06 мкм
2. Энергия светового импульса	30 Дж
3. Длительность светового импульса	25 нс
4. Площадь сфокусированного пятна на мишени	$10^{-4}$ см <sup>2</sup>
5. Плотность светового потока на графитовой мишени при получении ядер углерода	$(0,5 \pm 1) \cdot 10^{13}$ Вт/см <sup>2</sup>
6. Частота срабатывания лазерной установки	1 имп/мин

На рис. I показана принципиальная схема лазерного источника, которая использовалась в указанных экспериментах.

На рис. 2 показана осциллограмма импульса тока ускоренного пучка ядер углерода на выходе линейного ускорителя ЛУ-20 ( $E = 5$  МэВ/нукл.). При длительности импульса тока  $\tau = 5$  мкс число ядер углерода в импульсе составляет  $\sim 5 \cdot 10^8$ .

После получения устойчивого режима ускорения в ЛУ-20 пучок  $C_{12}^{+6}$  был инжектирован в камеру синхрофазотрона и ускорен до 60 ГэВ. Интенсивность в конце ускорения составила  $10^6$  ядер/импульс.

Лазерная установка устойчиво отработала 20 часов, необходимых для облучения фотоэмюльсий на выведенном из синхрофазотрона пучке ядер углерода.

В марте 1977 года на синхрофазотроне были ускорены ядра углерода и кислорода, полученные из источника Крион-I. В этом источнике образование высокозарядных ионов происходит в результате длительного (до 100 мс и более) времени взаимодействия низкозарядных вначале ионов с плотным электронным пучком. Такие времена взаимодействия обеспечиваются удержанием ионов в потенциальной яме, образованной в радиальном направлении полем пространственного заряда электронного пучка, проходящего внутри системы секций дрейфовой трубки, а в аксиальном направлении — подъемом потенциала на крайних секциях дрейфовой трубки. Управление вводом ионов рабочего вещества и временем ионизации производится путем изменения аксиального распределения потенциалов на секциях дрейфовой трубки с помощью внешнего устройства. Крион является

криогенным вариантом электронно-лучевого источника, в котором магнитное поле создается сверхпроводящим соленоидом, работающим в режиме замороженного тока.

Эксплуатационные характеристики источника Крион-1 следующие:

1. Общее время работы источника Крион-1 на ускорителе составило более 500 часов, при этом источник ни разу не вскрывался, и его ресурс не был исчерпан.

2. Для подливки жидкого гелия и азота делались остановки каждые двое суток на два часа. В это же время производился параметров источника.

3. Переход к ионизации нового вещества занимал несколько часов.

4. В процессе ускорения нестабильность заряда ускоренных ядер на выходе ЛУ-20 не превышала 20%.

Таблица 2

Рабочие параметры источника Крион-1  
во время сеанса ускорения

№№ п/п	Наименование параметра	Величина
1.	Электронный ток	60 мА
2.	Плотность электронного тока	60 А/см <sup>2</sup>
3.	Энергия ионизирующих электронов	5,5 кВ
4.	Время ионизации	(60±150) мс
5.	Напряженность магнитного поля фокусирующего соленоида	12,8 кЭ
6.	Суммарный ионный заряд на выходе оптической системы источника	(1±2,5) · 10 <sup>9</sup> эл. зар.
7.	Длительность ионного импульса (по полуширине)	35 мкс
8.	Частота работы источника	0,12 Гц

Угловые характеристики ионного пучка из источника Крион-1 таковы, что при ускорении на форинжекторе ЛУ-20 до 80% ионного заряда было сосредоточено на цилиндре Фарадея диаметром 10 мм, что вместе с оставшимися ионами точно соответствует ионному заряду, прошедшему оптическую систему источника.

На линейном ускорителе были ускорены ядра углерода, азота,

кислорода и неона до энергии 5 МэВ/нуклон. На кольце синхрофазотрона были ускорены до энергии соответственно 60 и 80 ГэВ ядра углерода, кислорода и сделана попытка ускорить ядра неона.

Измерение интенсивности, профиля и положения пучка ускоренных ядер проводилось с помощью 10-канального детектора, основанного на сборе ионов, образовавшихся в результате ионизации остаточного газа в камере ускорителя и последующего усиления заряда с помощью вторично-электронных умножителей (ВЭУ). Применение этого детектора позволило наблюдать процесс ускорения ядер при интенсивностях пучка вплоть до  $10^3$  част./цикл, что недоступно для других известных видов измерителей.

Сигналы с ВЭУ (рис.3) выводились из камеры ускорителя, усиливались и формировались по амплитуде дифференциальным усилителем-формирователем (ДУФ), который имел порог регистрации 6 мВ при относительном подавлении синфазной помехи на входе свыше 60 дБ. Далее через драйвер-формирователь (ДФ) сигналы по кабельной линии длиной около 400 м передавались на центральный пульт ускорителя, где поступали на приемники-формирователи (ПФ) и затем на счетчики (СЧ). Со счетчиков информация поступала в ЭВМ ЕС 1010 и после обработки выдавалась на экран графического дисплея. Созданное для ЭВМ программное обеспечение позволило представлять информацию о параметрах циркулирующего пучка как на начальном этапе (рис.4), так и во всем цикле (рис.5) ускорения.

Таблица 3

Сводная таблица интенсивности ускоренных ядер

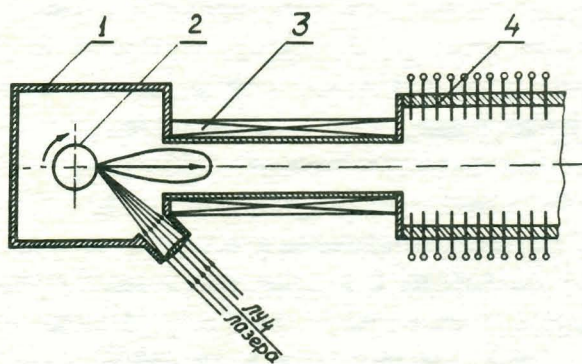
№ пп	Ускоряемые ядра	Интенсивность на выходе фор-инжектора (элемент. зарядов)	Интенсивность на выходе ЛУ-20 (кол-во ядер)	Интенсивность на выходе канала медленного вывода (кол-во ядер)
1.	Углерод	$1,7 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^7$	до $2,8 \cdot 10^4$
2.	Азот	$2 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^6$	
3.	Кислород	$2,5 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^6$	до $5 \cdot 10^3$
4.	Неон		$4,4 \cdot 10^5$	индикаторное количество

Из таблицы 3 видно, что максимальная интенсивность ядер углерода в канале медленного вывода составила  $2,8 \cdot 10^4$  ядер в импульсе. При имеющейся интенсивности на выходе линейного ускорителя и существующем вакууме в камере кольца можно было бы ожидать на выходе ускорителя не менее  $1 \cdot 10^5$  ядер в импульсе в случае оптимальной настройки режима работы синхрофазотрона.

На рис.6 приведены спектры ускоренных на синхрофазотроне ядер углерода, кислорода и неона, полученные с помощью спектрометра  $dE/dX$  на выходе канала медленного вывода. Вследствие больших потерь в результате подхвата электронов ядрами на начальном ускорения в кольце условия для ускорения кислорода значительно хуже, чем для углерода. Тем не менее, доля ядер кислорода в спектре составила больше 80%, основной конкурирующей линией является углерод. Впервые в мире было проведено облучение пропановой пузырьковой камеры (рис.7) и стримерной камеры СКМ-200 ядрами углерода с энергией 50 ГэВ, а также были облучены фотоэмульсии ядрами углерода и кислорода. При ускорении неона потери в результате подхвата ядрами электронов значительно больше, чем в случае кислорода, и получить удовлетворительную интенсивность ускоренного пучка не удалось.

#### Литература

1. А.М.Балдин и др. Препринт ОИЯИ, 1970, P9-5442.
2. О.Б.Аваньян и др. Письма в ЖЭТФ, 1974, т.19, стр.19.
3. Е.Д.Донец, А.И.Пикин. ЖТФ, XV, 2373, 1975.
4. В.Г.Аксенов, Е.Д.Донец, А.Г.Зельдович, А.И.Пикин, Ю.А.Шишов. ОИЯИ P8-8563, 1975.
5. Е.Д.Донец, В.П.Овсянников. ОИЯИ P7-9799, 1976.
6. E.D.Donets. IEEE Trans. Nucl. Sci., 23, 897 (1976).



- 1 - камера источника.
- 2 - мишень из углерода.
- 3 - соленоид
- 4 - трубка форинжектора.

Рис.1. Принципиальная схема лазерного источника ядер.

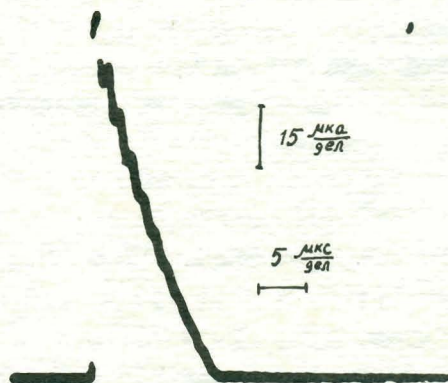


Рис.2. Осциллограмма импульса тока ускоренного пучка ядер углерода на выходе линейного ускорителя.

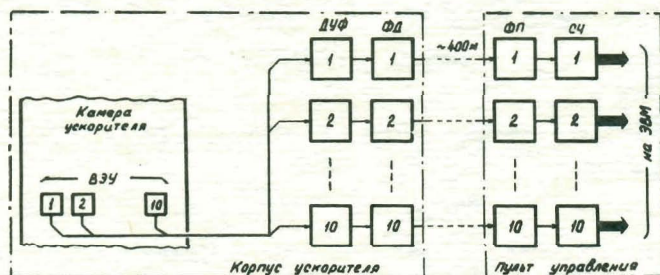


Рис.3. Блок-схема регистрации параметров пучка ускоряемых ядер.



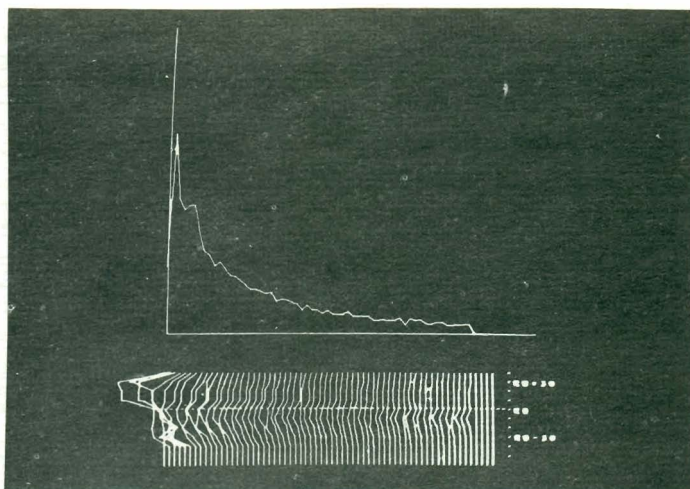


Рис. 4. Диаграмма интенсивности (верхняя часть рисунка) и горизонтальные профили пучка на начальном этапе (20 мс) ускорения.

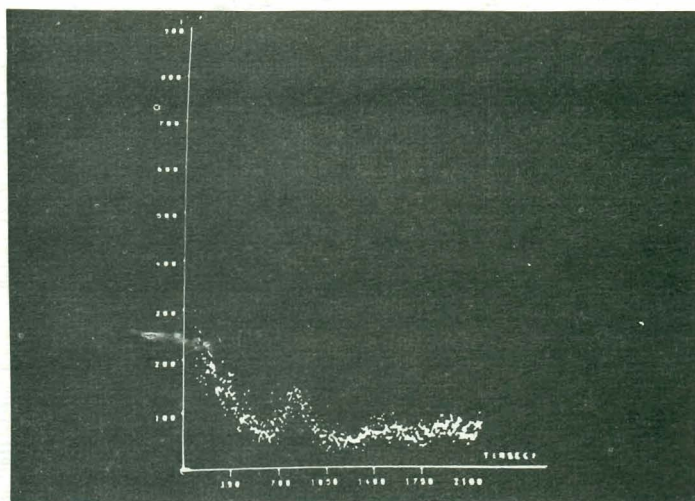
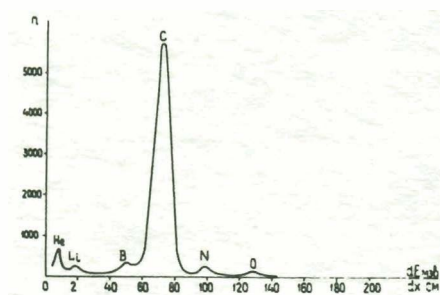
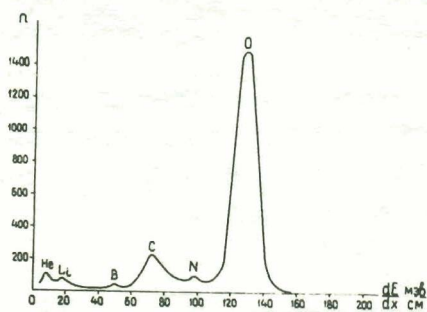


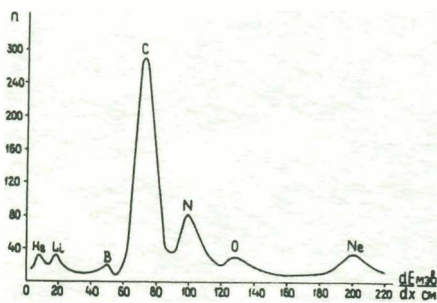
Рис. 5. Диаграмма интенсивности циркулирующего пучка в цикле ускорения.



а



б



в

Рис. 6. Спектры ускоренных на синхрофазотроне ядер  
а - азота, б- кислорода, в - неона.

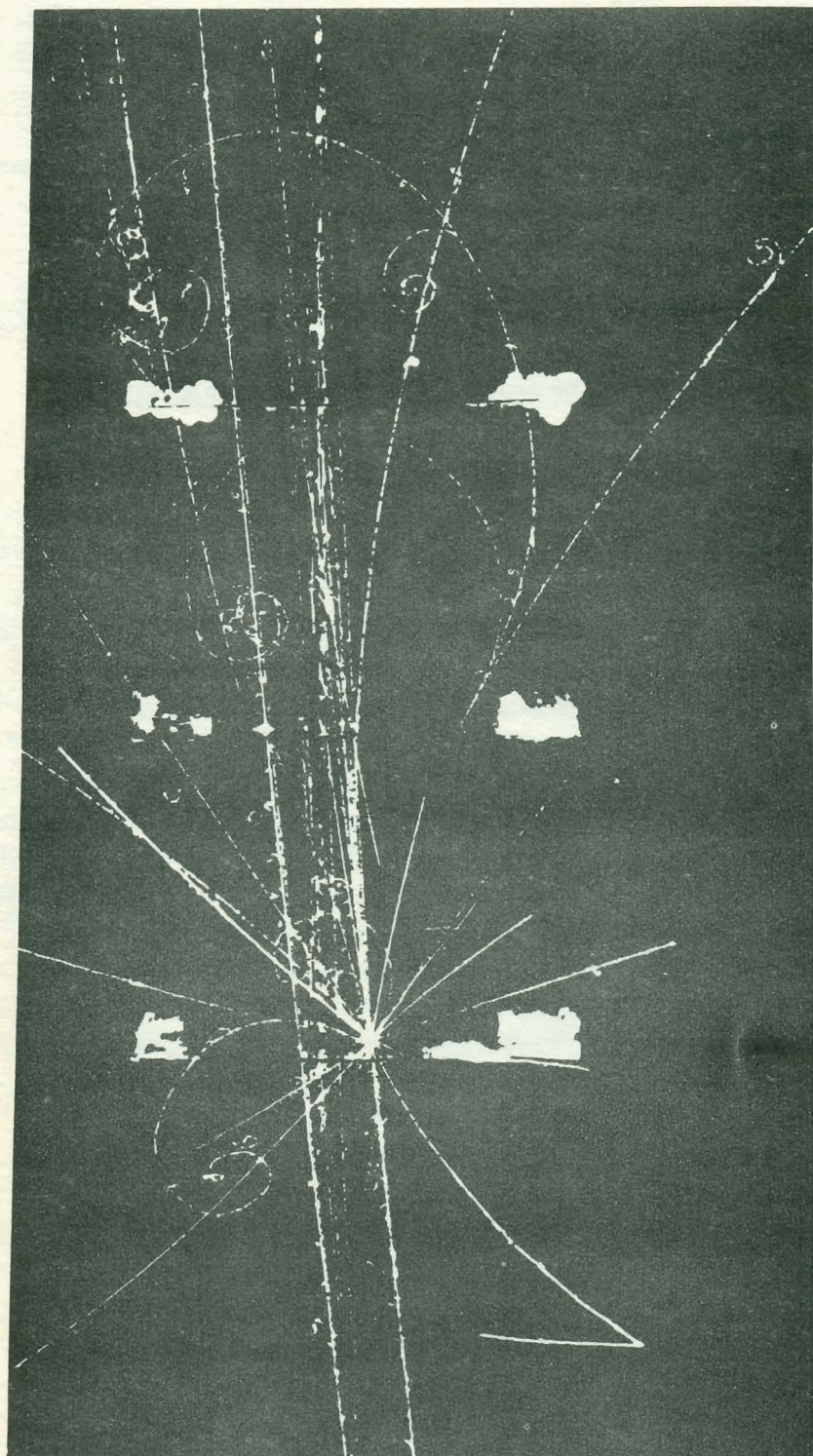


Рис. 7. Фотография взаимодействия ядер углерода с веществом в пропановой камере.