

ЕСТЬ 300 ГэВ !

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ УГЛЕРОД В ГНЦ ИФВЭ: УСКОРЕНИЕ И ВЫВОД ИЗ У-70, ТРАНСПОРТИРОВКА ПО КАНАЛУ №22 И РЕГИСТРАЦИЯ НА УСТАНОВКЕ ФОДС

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В последние годы Ускорительный комплекс У-70 ГНЦ ИФВЭ, разработанный для ускорения протонов, успешно используется для ускорения легких ионов — дейтронов и углерода ^{12}C . Программа работ с ускоренными ядрами делится на два больших направления:

1. Радиобиологические и другие прикладные исследования с пучком углерода, ускоренным до энергии 450–455 МэВ/нуклон (удельная кинетическая). Основная цель — развитие методов ионной терапии онкологических заболеваний.
2. Экспериментальные исследования с пучками ультрарелятивистских легких ядер, ускоренных до высоких энергий, вплоть до 35 ГэВ/нуклон. Эти эксперименты нацелены на решение ряда актуальных задач в области фундаментальной физики:
 - исследование свойств горячей и плотной ядерной материи при энергии нуклон-нуклонных взаимодействий в области возможного фазового перехода;
 - исследование флуктуаций ядерной плотности;
 - исследование структуры легких экзотических ядер.

В 2011 году в рамках работ по первому направлению была решена важнейшая задача — медленный вывод из ускорителя У-70 пучка ^{12}C при энергии 454 МэВ/нуклон. В настоящее время на базе этого вывода создается новый специализированный канал №25 для радиобиологических исследований и решения других прикладных задач.

Одна из задач первого сеанса 2012 года состояла в ускорении и выводе из У-70 пучка ^{12}C , ускоренного до полной энергии 25 ГэВ/нуклон, исследовании характеристик этого пучка и развитии методов работы с таким пучком. Следует отметить, что на других ускорителях нет пучков легких ядер с параметрами, сопоставимыми с теми, что достигаются на Ускорительном комплексе У-70.

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

24 апреля 2012 года в Ускорительном комплексе У-70 ГНЦ ИФВЭ (в каскаде резонансных ускорителей И-100–У-1.5–У-70) получено устойчивое ускорение сгустка ядер углерода ^{12}C до удельной кинетической энергии 24.1 ГэВ/нуклон (магнитное поле 8590 Гс). Максимальная ускоренная интенсивность пучка достигла $5 \cdot 10^9$ ядер в цикле длительностью около 8 с.

Параметры ключевых точек цикла ускорения приведены в таблице 1.

Таблица 1: Характеристики цикла ускорения пучка ядер ^{12}C

Точка цикла ускорения	Магнитное поле, Гс	Удельная кинетическая энергия, ГэВ/нуклон	Радиочастота, МГц	Полная длина сгустка по основанию, нс
Плато ввода	352.5	0.454	4.48746	120
Критическая энергия	3019	7.90	6.02793	12
Плато вывода	8590	24.1	6.05752	20

В крейсерском режиме импульсный ток ионов $^{12}\text{C}^{6+}$ на выходе из линейного ускорителя И-100 составил 12–14 мА. Токпрохождение пучка по каналу перевода от И-100 до вводного ударного магнита (УМЗ) кольцевого бустера У-1.5 достигало 90%.

Был найден новый режим работы источника ионов $^{12}\text{C}^{5+}$ с CO_2 лазером, позволивший существенно продлить его непрерывную работу. Эксплуатационный ресурс рабочей точки на графитовой мишени составил примерно 4000 импульсов лазерного излучения (более 8 ч работы).

В кольцевом бустере У-1.5 выход на крейсерский режим работы прошел гладко. Сказался приобретенный ранее опыт работы с пучками дейтронов и углерода. Интенсивность пучка достигла $6 \cdot 10^9$ ядер углерода в цикле ускорения длительностью 60 мс.

В 18 ч 47 м 24.04.2012 на комплексе У-70 был **впервые** осуществлен **быстрый** однооборотный **вывод** пучка ядер ^{12}C (24.1 ГэВ/нуклон) на внешнюю мишень-поглотитель в канале транспортировки №22.

В период 25–27.04.2012 ускоренный пучок ядер углерода ^{12}C также **впервые** был успешно выведен с использованием всех трех имеющихся систем **медленного вывода** частиц из кольца У-70:

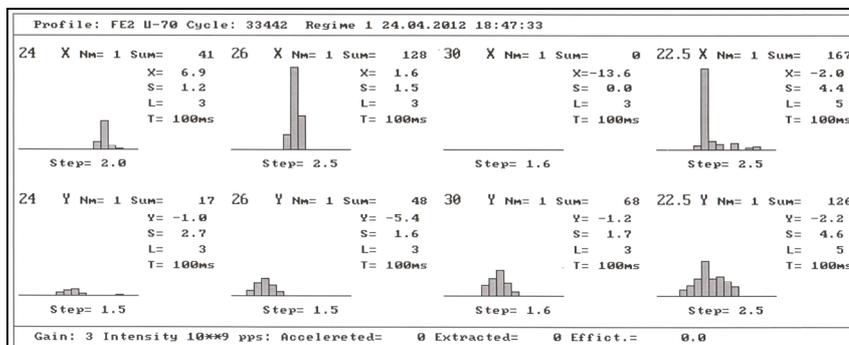
1. Классического резонансного медленного вывода КМВ с наведением через квадрупольную линзу Q38.
2. Стохастического (шумового) медленного резонансного вывода СМВ. (Потребовался переход с 990-й на 991-ю гармонику частоты обращения для колебания 200 МГц, несущего фазовый шум наведения.)
3. Медленного вывода МВК с использованием дефлектора из изогнутого монокристалла (станция СКД22, кремний, длина по пучку 2 мм, высота 40 мм, угол изгиба 0.9 мрад).

В последнем случае впервые успешно осуществлено отклонение пучка ядер углерода (24.1 ГэВ/нуклон) с помощью кристаллического дефлектора в режиме каналирования, хотя пока остался неизученным вопрос о доле фрагментов ядер углерода в выводимой фракции, возможно появляющихся при многократном взаимодействии первичного циркулирующего углеродного пучка с кристаллом.

По общему мнению, успешной работе с пучком ядер углерода способствовал 2-суточный период подготовительной работы с пилотным

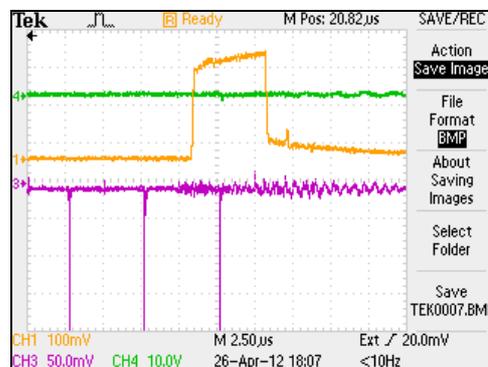
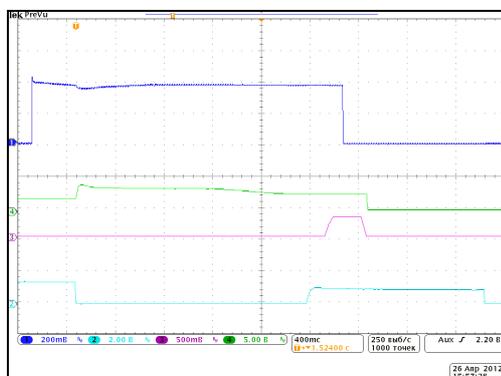
пучком протонов с энергией 49.1 ГэВ (кинетической, магнитное поле 8590 Гс) и пониженной интенсивностью от $1 \cdot 10^{11}$ до $3 \cdot 10^9$ протонов в цикле (соответствует ожидаемой интенсивности сгустка ионов углерода). Такой пучок использовался для настройки систем ускорителя и канала транспортировки и калибровки детекторов экспериментальной установки.

Работа комплекса ускорителей в ионной моде в весеннем (2012 г.) сеансе иллюстрируется рис. 1–6 для режимов вывода БВ, СМВ и МВК.



Изображение пучка на профилометрах вдоль трассы вывода: 24 – на входе в септум-магнит ОМ-24, 225 – на выходе магнитооптического тракта головной части канала, X – горизонтальный размер, Y – вертикальный размер, STEP – шаг профилометра в мм.

Рис. 1: Первый в истории синхротрона У-70 вывод ускоренного пучка ядер углерода с удельной кинетической энергией 24.1 ГэВ/нуклон.



Лучи сверху вниз: Первый – интенсивность сгустка, измеренная электростатическим датчиком пучка. Второй – программа изменения амплитуды ускоряющего электрического поля. Третий – ток волнового магнитного бампа быстрого вывода (БВ). Четвертый – сигнал обратной связи, стабилизирующей магнитные площадки. Интенсивность $1.7 \cdot 10^9$ ядер углерода в сгустке.

Лучи сверху вниз: Второй – ток ударного магнита КМ-16, осуществляющего быстрый вывод. Третий – циркулирующий сгусток ядер углерода, 3 последовательных оборота до момента вывода включительно, сигнал сгустка инвертирован.

Рис. 2: Ускорение и быстрый вывод сгустка ядер углерода в синхротроне У-70.

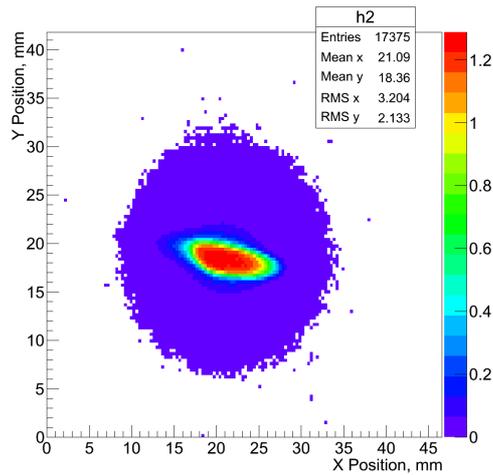
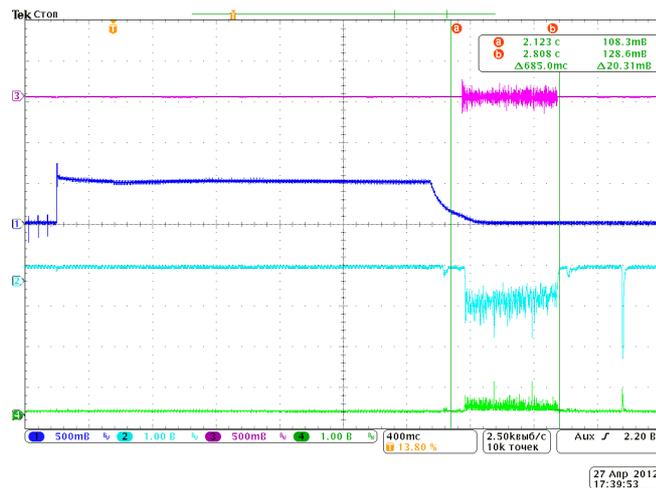


Рис. 3: Интегральный поперечный профиль быстро выведенных сгустков ядер углерода за 10 последовательных циклов синхротрона У-70. Суммарная интенсивность $1.32 \cdot 10^{10}$ ядер углерода.



Лучи сверху вниз: Первый – сигнал шума наведения, модулированный по амплитуде (мощности), подаваемый на станцию 200 МГц. Второй – интенсивность сгустка, измеренная электростатическим датчиком пучка. Сигнал спадает из-за выключения ускоряющего поля и размытия сгустка по всей орбите. Третий – суммарный сигнал обратной связи (по постоянной и переменной составляющим тока сброса), модулирующий амплитуду шума. Четвертый – сигнал, пропорциональный току медленно выведенного пучка, измеренный с помощью монитора вторичных частиц в 106-м прямолинейном промежутке. Интенсивность $2.1 \cdot 10^9$ ядер углерода, медленно выведенных в данном цикле.

Рис. 4: Стохастический медленный вывод (растяжка 600 мс) предварительно разгруппированного сгустка ядер углерода в канал №22.

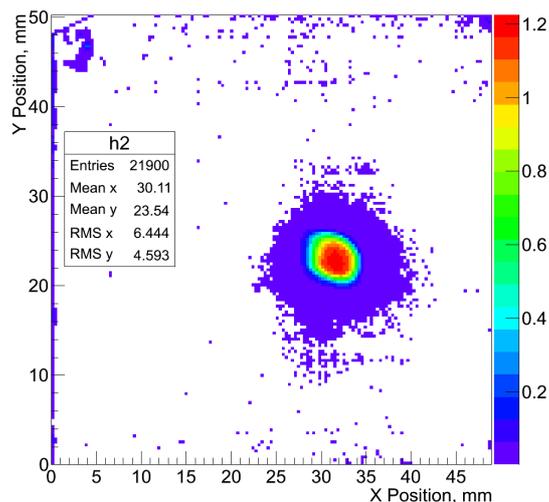


Рис. 5: Интегральный поперечный профиль медленно выведенных ядер углерода за 10 последовательных циклов синхротрона У-70. Суммарная интенсивность $2.95 \cdot 10^9$ ядер углерода.

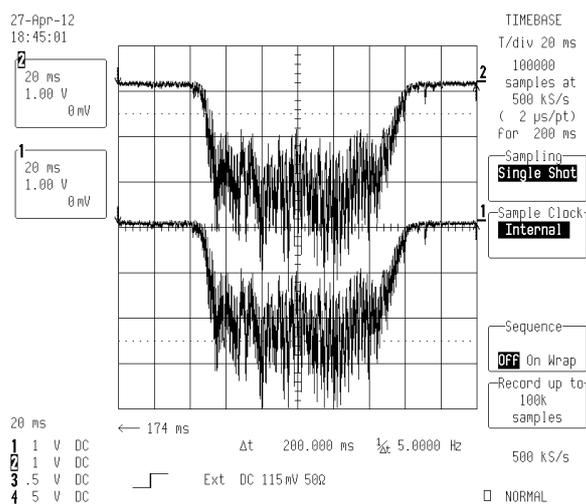


Рис. 6: Медленный вывод углеродного пучка с помощью кристаллического дефлектора СКД22.

КАНАЛ №22 И УСТАНОВКА ФОДС

Характеристики выведенного пучка углерода изучались на канале №22 с использованием части оборудования установки ФОДС — системы сцинтилляционных счетчиков, calorimetра, системы мониторингования и системы сбора данных. Счётчики и calorimetр предварительно облучались пучком протонов с импульсом 50 ГэВ/с для калибровки.

Канал №22 был настроен на импульс протонов 50 ГэВ/с, что соответствует импульсу 25 ГэВ/с на нуклон для ядер ^{12}C и других ядер с равным числом протонов и нейтронов ($A/Z = 2$) — ^2D , ^4He , ^6Li , ^{10}B .

Амплитудный спектр с адронного калориметра при выводе углеродного пучка показан на рис. 7. В этом спектре хорошо видны пики с энергией 300 ГэВ (12 нуклонов по 25 ГэВ: ^{12}C), 100 ГэВ (^4He) и 50 ГэВ (^2D).

Спектр со сцинтилляционного счётчика приведен на рис. 8. Согласно калибровке на протонах, первый пик после пьедестала соответствует частице с зарядом 1 и второй пик — частице с зарядом 2, что согласуется с ^2D и ^4He . Амплитудное распределение для углерода лежит за пределами гистограммы, его максимум должен находиться в 9250-м канале.

Фрагменты ^2D и ^4He образуются, видимо, в веществе оборудования системы вывода, находящемся перед входом в канал №22 (септумы, пучковые мониторы, фланцы и воздух).

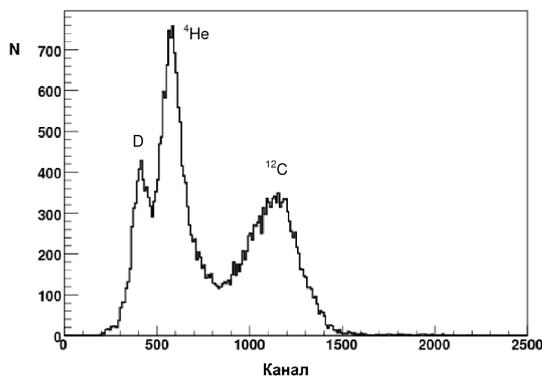


Рис. 7: Амплитудный спектр с адронного калориметра. Пучок ^{12}C .

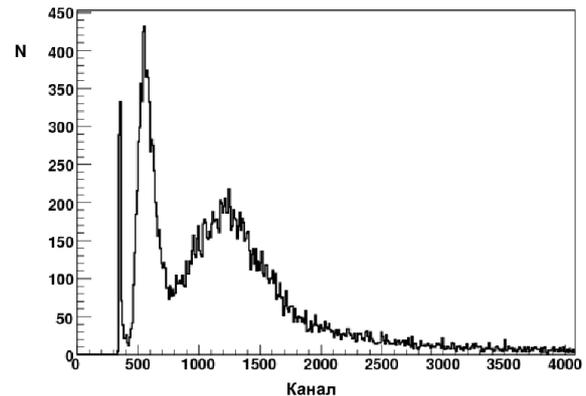


Рис. 8: Амплитудный спектр со сцинтилляционного счётчика S_3 .

Для того, чтобы увидеть фрагменты с неравным количеством протонов и нейтронов, канал №22 был настроен на импульс 60 ГэВ/с с $\Delta p/p = \pm 1\%$ для частиц с единичным зарядом. При такой настройке из продуктов фрагментации ^{12}C через канал проходят только ядра ^7Li — этот канал является прекрасным сепаратором фрагментов.

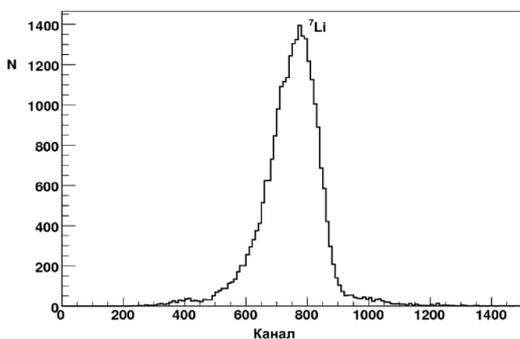


Рис. 9: Амплитудный спектр с адронного калориметра. Цена канала 3.2 канал/ГэВ, пьедестал в 250-м канале.

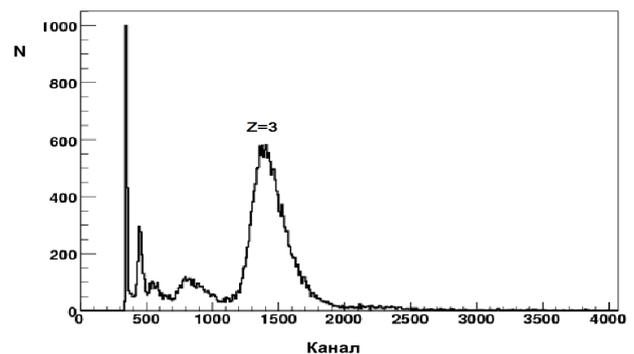


Рис. 10: Амплитудный спектр со сцинтилляционного счётчика S_3 . Основной сигнал соответствует заряду $Z = 3$. Сигналы с меньшей амплитудой связаны с развалом ядра ^7Li в веществе перед счетчиком.

На рис. 9 показан амплитудный спектр с адронного калориметра при установке на канале №22 импульса 60 ГэВ/с. Амплитудное распределение со сцинтилляционного счётчика S₃ (рис. 10) соответствует частице с зарядом 3, а энергосодержание в адронном калориметре (примерно 170 ГэВ) соответствует 7 нуклонам, что указывает на фрагмент ⁷Li.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в весеннем сеансе 2012 года получен важный результат — ускоренные до полной энергии 300 ГэВ ионы углерода выведены из ускорителя У-70, продемонстрированы возможности канала №22 в качестве сепаратора фрагментов.

Полученный в этом сеансе опыт работы с высокоэнергичными пучками ионов углерода и продуктами их фрагментации позволяет уверенно планировать дальнейшие эксперименты в области релятивистской ядерной физики на крупнейшем в России Ускорительном комплексе У-70 ГНЦ ИФВЭ.