

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ НАБЛЮДЕНИИ ОДНОВРЕМЕННОГО УСКОРЕНИЯ И МЕДЛЕННОГО ВЫВОДА НЕСКОЛЬКИХ ПУЧКОВ ИОНОВ С БЛИЗКИМИ ОТНОШЕНИЯМИ ЗАРЯДА К МАССЕ НА НУКЛОТРОНЕ ЛФВЭ ОИЯИ

*Д. С. Коровкин¹, В. И. Астахов, А. А. Балдин,
А. В. Бутенко, А. В. Белобородов, Д. Н. Богословский,
Е. Е. Донец, А. В. Щипунов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Описывается система диагностики выведенного пучка нуклотрона от места вывода пучка до фокуса Ф-3. Представлен анализ экспериментальных данных по измерениям и мониторингованию выведенных пучков нуклотрона в ходе 55-го сеанса в 2018 г. Проанализированы особенности временных характеристик ускоренных и выведенных ионов. Показано, что одновременно с ускорением ядер углерода ускорялись и выводились на экспериментальные установки ядра азота и кислорода, имеющие близкие отношения заряда к массе.

The diagnostic system of the Nuclotron extracted beam from the beam output point to the F-3 focus is described. An analysis of experimental data on the measurements and monitoring of the extracted Nuclotron beams during the 55th session in 2018 is presented. The features of the time characteristics of accelerated and extracted ions are analyzed. It is shown that simultaneously with the acceleration of carbon nuclei, nitrogen and oxygen nuclei, which have similar charge-to-mass ratios, were also accelerated and extracted to the experimental setups.

PACS: 52.59.Bi; 29.20.dk; 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

Надежная диагностика пучков ускоряемых ионов, выводимых из нуклотрона, представляет актуальную задачу как для интерпретации данных физических экспериментов, так и в связи с вводом в эксплуатацию бустера и планируемым запуском ускорительного комплекса NICA. Особенно актуальна эта задача в связи с переходом к ускорению тяжелых ионов, изотопный и зарядовый состав которых весьма широк.

В данной работе описывается серия измерений характеристик выведенного пучка нуклотрона, проведенная в сеансе 55 в 2018 г. Рассматриваются экспериментальные

¹E-mail: korovkin@jinr.ru

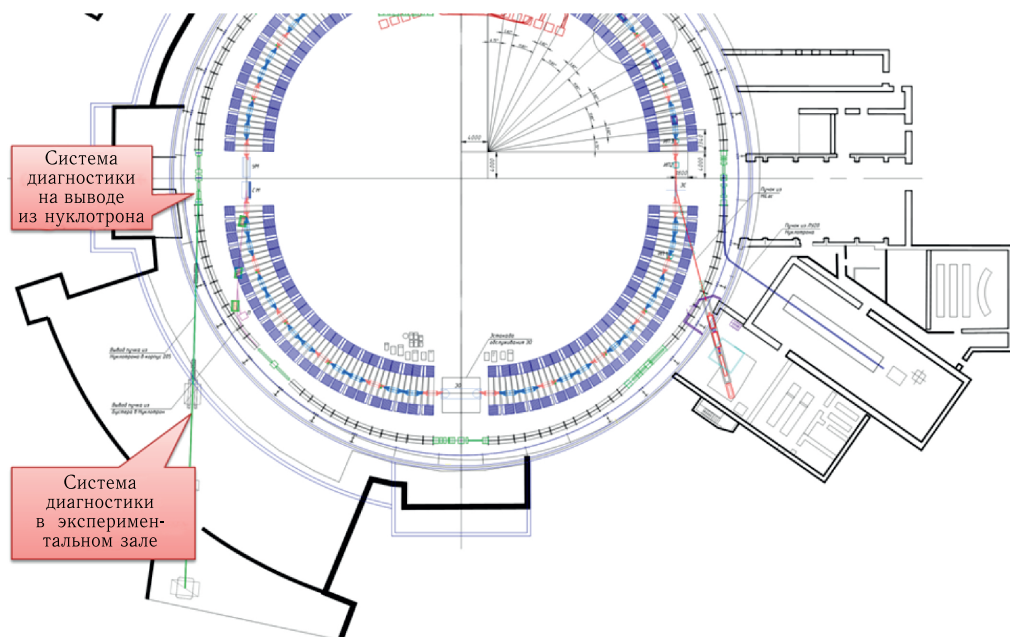


Рис. 1. Место расположения детекторов системы для диагностики выведенных пучков нуклотрона

результаты, полученные с помощью системы времени пролета на выводном канале нуклотрона (рис. 1) на основе сцинтилляционных счетчиков с регистрацией амплитуд импульсов.

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА

На выходе из нуклотрона была создана мишенная и детекторная станция с дистанционным перемещением детекторов. Такая система позволяет измерять пространственное распределение частиц в пучке на основе сцинтилляционных годоскопов, интенсивность выведенного пучка с помощью газовой ионизационной камеры, а также определять состав пучка выведенных ядер с помощью времяпролетных и амплитудных измерений. Все детекторы могут дистанционно позиционироваться на пучке и независимо выводиться из пучка (рис. 2).

В данной работе рассматривается система времени пролета для идентификации частиц, состоящая из двух сцинтилляционных детекторов: счетчика 1 непосредственно на выводе пучка из нуклотрона размерами 20×20 мм и толщиной 2 мм и сцинтилляционного счетчика 2 размерами 40×40 мм и толщиной 4 мм, расположенного в фокусе Ф-3 медленного вывода пучков нуклотрона (рис. 3). Размеры пучка (FWHM) в месте расположения счетчика 2, оцененные с помощью ядерных фотоэмульсий, составляли 7×7 мм.

База времени пролета — 36,76 м. Данная времяпролетная система использовалась в сеансе 55 для измерения амплитудных и временных спектров выведенных частиц.



Рис. 2. Мишенная и детекторная станция с дистанционным управлением положением детекторов

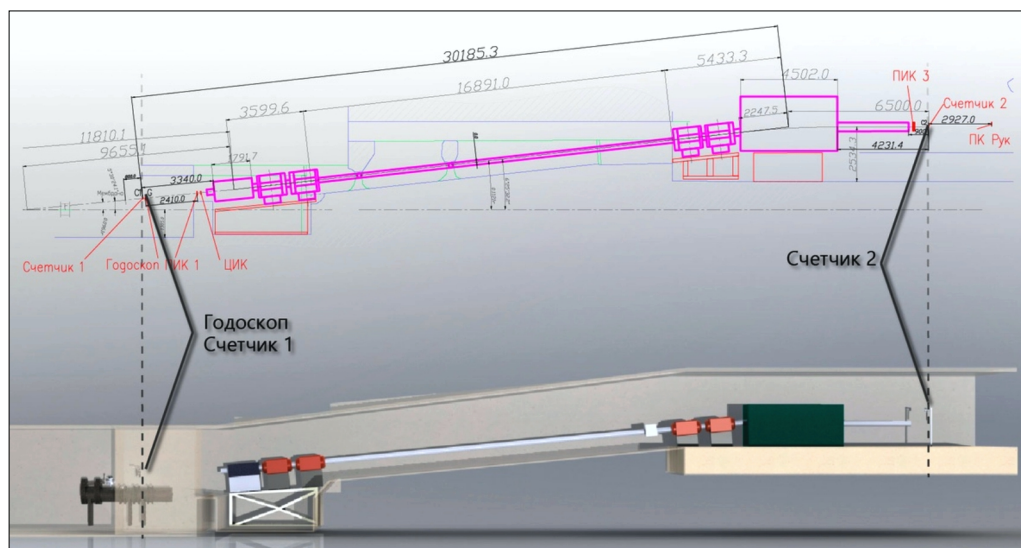


Рис. 3. Схема расположения двух счетчиков системы времени пролета

ЭЛЕКТРОНИКА СЧИТЫВАНИЯ

Для измерения времени пролета использовалась система сбора данных на основе модуля TQDC16VS — 16-канального дискриминатора с функциями АЦП и ВЦП, разработанного в ОИЯИ [1]. Модуль TQDC16VS выполнен в формате VME. Для считывания данных используется интерфейс Ethernet, а от крейта VME берется питание для модуля. Модуль TQDC16VS использовался для считывания информации со счетчиков 1 и 2. Также использовался 4-канальный модуль DRS4 как в самостоятельном режиме регистрации сигналов со счетчиков 1 и 2, так и параллельно

Таблица 1. Характеристики TQDC16VS

Параметр	Значение
Количество каналов	16
Входной коннектор	LEMO
Входной импеданс, Ом	50
Длина сигнала, количество точек	8192
Частота дискретизации АЦП, $M_{\text{выб}}/с$	125
Частота дискретизации ВЦП, $\Gamma_{\text{выб}}/с$	40
Разрешение АЦП, бит	14
Разрешение ВЦП, бит	20
Напряжение питания, В	9,0–15,0
Входная мощность, Вт	35

с TQDC16VS. Для одновременной работы обеих систем сигналы со счетчиков делились пассивным делителем по стандартной схеме «звезда». Характеристики используемого модуля приведены в табл. 1.

Для настройки модуля TQDC16VS и чтения данных с него использовалась программа AFI-TQDC2 для операционной системы Linux, разработанная в ОИЯИ. Важным параметром модуля TQDC16VS является временное разрешение. Точность определения временного интервала между двумя импульсами для модуля TQDC16VS была протестирована с помощью генератора импульсов с амплитудами, близкими к регистрируемым. Полученное таким образом временное разрешение составило 50 пс, что является удовлетворительной точностью измерения временной метки для системы времени пролета. Отметим, что данный модуль может давать временное разрешение 30 пс.

Ниже приводятся экспериментальные результаты, полученные с помощью TQDC16VS.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В эксперименте измерялись временной и амплитудный сигналы со сцинтилляционных счетчиков 1 и 2. Амплитудные спектры с первого и второго детекторов представлены на рис. 4.

Данные спектры демонстрируют несколько пиков, которые соответствуют ионизационным потерям различных частиц в веществе детектора. Предполагая, что основной пик соответствует ионам углерода с зарядностью $6+$, можно оценить заряд других пиков. Энерговыведение иона в сцинтилляторе пропорционально квадрату заряда этого иона (для достаточно высоких энергий частиц). Более аккуратное моделирование проведено с использованием программы SRIM [2] (табл. 2).

Разумеется, энерговыведение частицы в сцинтилляторе связано с регистрируемым сигналом достаточно сложным нелинейным образом (см., например, [3]). Однако в узком диапазоне параметров можно с точностью, близкой к экспериментальной, описать относительное расположение пиков линейной зависимостью от квадрата заряда, что подтверждается данными, представленными в табл. 2.

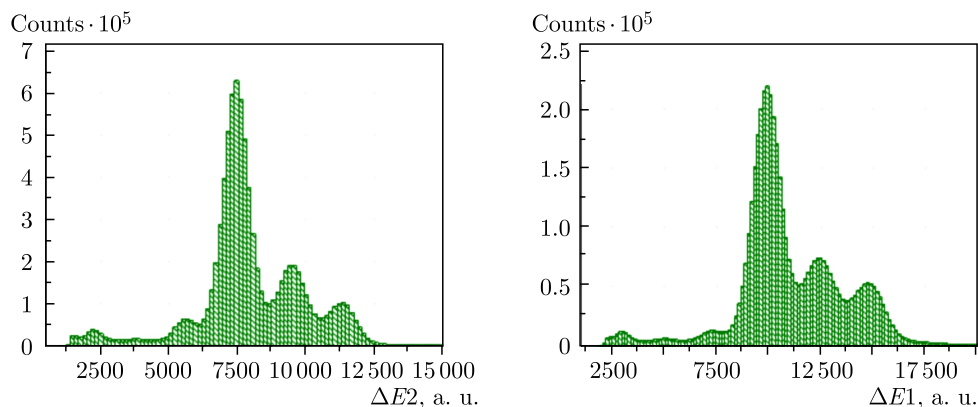


Рис. 4. Амплитудные спектры с детекторов 1 (слева) и 2 (справа)

Таблица 2. Расчетное и измеренное энерговыделение иона в сцинтилляторе

Элемент	Атомный номер	Заряд	Энерговыделение в сцинтилляторе			TOF, нс
			Расчетное, МэВ/мм	Измеренное среднее, усл. ед.		
				Счетчик 1	Счетчик 2	
Углерод	12	6+	11,9	9902	7460	125,986
Азот	14	7+	27,5	12 387	9480	126,066
Кислород	16	8+	36,0	14 769	11 297	126,162

Таким образом, можно с достаточной степенью достоверности принять, что второй и третий пики правее углеродного соответствуют ионам азота с зарядностью 7+ и кислорода с зарядностью 8+. Частицы с меньшими ионизационными потерями (пики слева от углеродного), соответствующие продуктам развала ядер углерода (рис. 5), в данной работе не анализируются.

Наиболее интересным является распределение зарегистрированных ионов по времени пролета, полученное с высоким временным разрешением — около 50 пс. Данные, приведенные на рис. 6, показывают распределения по времени пролета одновременно ускоренных и выведенных ионов трех типов (C, N, O). Времена пролета частиц между счетчиками определялось с учетом потерь энергии при прохождении расстояния между ними. Для каждого типа частиц распределение времен пролета аппроксимировалось функцией Гаусса. Учитывались те частицы, которые были зарегистрированы в обоих счетчиках. Кроме того, учитывались частицы с разумно узкими разбросами времен пролета как участвовавшие в процессе ускорения в нуклотроне [4].

Из рис. 6 и 7 видно, что полученного временного разрешения достаточно, чтобы разделить эти ионы по энергиям. Для этих рисунков время пролета вычислялось как разность между временами прихода на второй и первый счетчики, т. е. $TOF = T_2 - T_1$, где TOF — время пролета (time of flight), T_1 — временная метка зарегистрированной частицы на первом детекторе, T_2 — временная метка зарегистрированной частицы на втором детекторе. Отсюда видно, что частицы, расположенные на графике рис. 6 левее, более быстрые (ионы углерода летят с большей скоростью, чем ионы азота и кислорода).

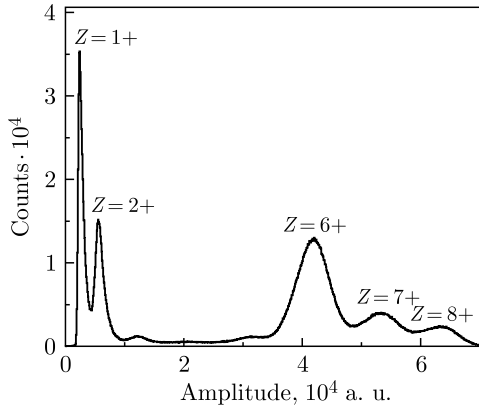


Рис. 5. Амплитудный спектр с обозначенными зарядностями

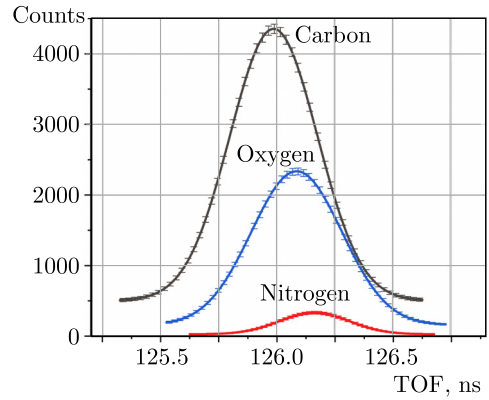


Рис. 6. Время пролета частиц углерода, азота и кислорода на базе 37 м

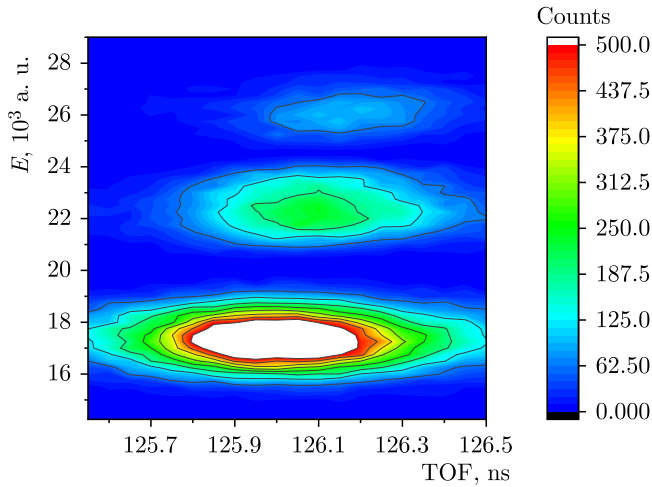


Рис. 7. Зависимость амплитуды частицы от времени пролета на базе 37 м

Для наглядности на рис. 7 представлен двумерный график зависимости времени пролета от амплитуд зарегистрированных частиц по двум детекторам. Хорошо видно разделение трех типов ионов не только по амплитудам, но и по времени пролета.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возможность ускорения многокомпонентных пучков в ионных синхротронах была теоретически предсказана В. А. Михайловым в его диссертационной работе [5], где обосновано, что пучок, парциальный состав которого характеризуется близким отношением заряда к массовому числу, будет беспрепятственно циркулировать в нуклотроне.

Частота и скорость обращения ионов растут с увеличением магнитного поля ускорителя и выходят на плато при достижении ускоряемыми частицами скорости,

Таблица 3. Параметры ускорения ионов углерода, азота, кислорода в 55-м сеансе нуклотрона для максимального значения магнитного поля $B = 12\,120$ Гс

Параметр	C^{6+}	N^{7+}	O^{8+}
Отношение заряда к массе, ед./а. е. м.	0,49918 (= 6/12,0197)	0,49976 (= 7/14,0067)	0,50003 (= 8/15,999)
Средняя кинетическая энергия иона, эВ	$3,167 \cdot 10^9$	$3,169 \cdot 10^9$	$3,171 \cdot 10^9$
Время пролета на базе 36,76 м, нс	125,903	125,900	125,897

близкой к скорости света. Значения их близки, поскольку близки отношения заряда к массе.

Приведем значения энергии ускоренных ионов, частоты и скорости обращения для трех типов ионов в 55-м сеансе нуклотрона, принимая, что величина магнитного поля составляет 12 120 Гс (табл. 3).

Для ответа на естественно возникающий вопрос об изначальном происхождении трех разных сортов ядер, ускоренных в нуклотроне, необходимо обратиться к деталям работы использованного источника ионов. В 55-м сеансе нуклотрона в инжекционном комплексе использовался источник высокозарядных ионов «Крион-6Т» (см. [6, 7] и ссылки в них), являющийся в настоящее время основным источником тяжелых высокозарядных ионов в проекте NICA/MPD. Известно, что в криогенной ионной ловушке источника «Крион-6Т» в дополнение к рабочему газу (в данном сеансе в качестве рабочего газа, из которого образуются ядра углерода, был использован метан CH_4) всегда присутствует некоторое количество остаточного газа (преимущественно азот N_2 и углекислый газ CO_2). Этот остаточный газ не является помехой для ионизации рабочих элементов, он также ионизируется и выводится из источника вместе с основными ионами рабочего элемента. Как правило, если в качестве рабочего элемента для ускорения выбраны ионы с определенным соотношением заряда к массе Z/A ($Z/A > 1/3$ для линейного ускорителя ЛУ-20), то все ионы с отличным от выбранного для рабочего элемента соотношением Z/A , в том числе и ионы остаточного газа, не захватываются в ускорение.

Но в данном случае источник «Крион-6Т» по соображениям увеличения энергии ускоренных ионов был настроен на получение ионов максимально возможной зарядности углерода — «голых» ядер углерода $^{12}C^{6+}$. Ионы остаточного газа (азот и кислород) также за время ионизации рабочего элемента углерода ионизовались в источнике «Крион-6Т» до состояния «голых» ядер $^{14}N^{7+}$ и $^{16}O^{8+}$. Поскольку отношение заряда к массе с точностью до релятивистских поправок к массам для всех трех ядер $^{12}C^{6+}$, $^{14}N^{7+}$ и $^{16}O^{8+}$ одинаково ($Z/A = 1/2$), то все три ядра были ускорены и в ЛУ-20, и в нуклотроне.

Следует отметить, что распределение ионов по времени пролета зависит от режима ускорения и вывода частиц. На рис. 8 приводятся распределения по времени пролета ионов для трех разных режимов работы нуклотрона, наблюдавшихся в сеансе 55. Видно, что, с одной стороны, все три типа ионов могут быть успешно ускорены, а с другой стороны, они, по-видимому, занимают разные орбиты (сепаратрисы) и, соответственно, выводятся с разными энергиями.

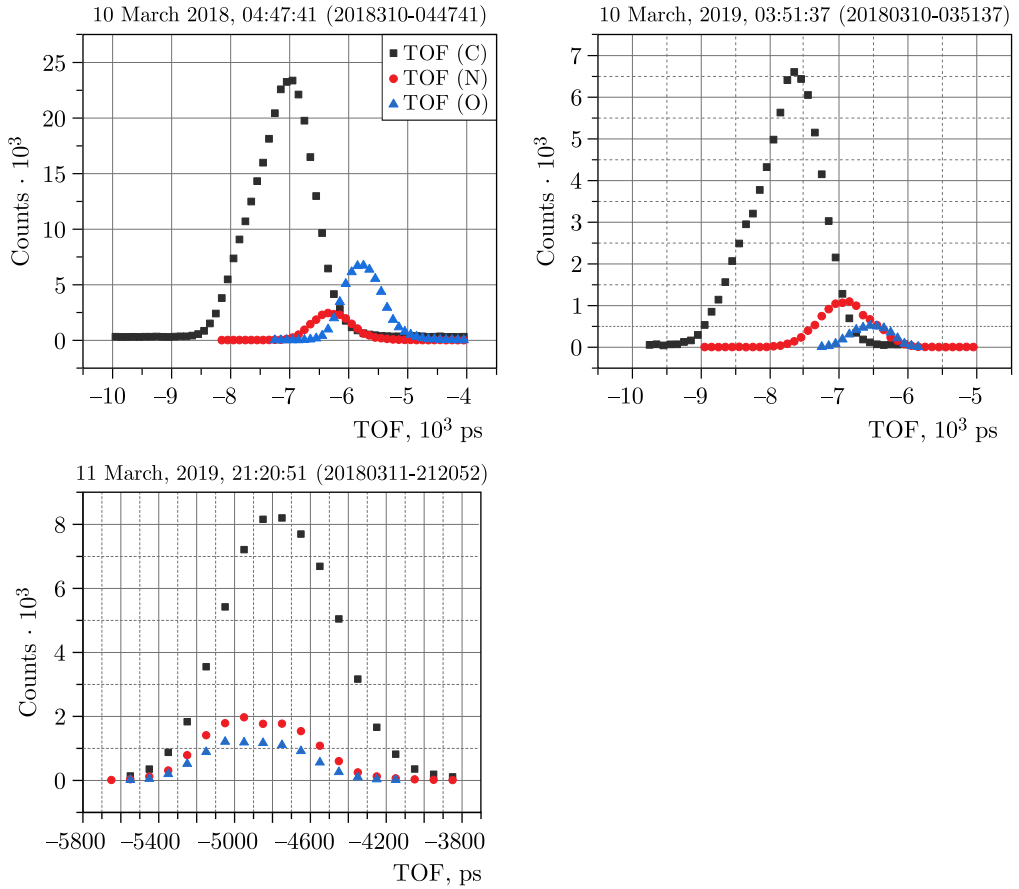


Рис. 8. Примеры экспериментальных TOF-спектров трех компонентов выведенного пучка

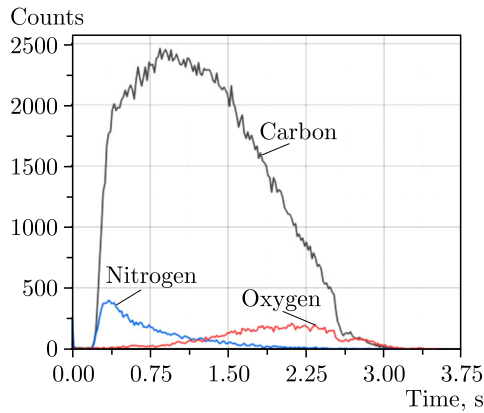


Рис. 9. Состав выведенного пучка как функция времени с начала медленного вывода из нуклотрона (два режима работы)

Важно отметить, что такие различия в режимах работы надежно измеряемы в описываемой постановке эксперимента.

Отметим еще одну наблюдающуюся особенность: медленный вывод разных типов ионов в течение времени (порядка 3 с) неоднороден (рис. 9).

Из рис. 9 видно, что соотношение числа выведенных ионов разных типов может существенно различаться для разных режимов работы ускорителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены экспериментальные данные, полученные в 55-м сеансе нуклотрона по одновременному ускорению и выводу ионов углерода, азота и кислорода. Проанализированы особенности распределений ионов во времени в процессе ускорения и вывода. Показана возможность надежной идентификации и измерения времяпролетных спектров выведенных пучков из нуклотрона.

В связи с тем, что в ближайших планах работы ускорительного комплекса ЛФВЭ NICA — ускорение и вывод тяжелоионных пучков вплоть до золота, описанная методика анализа выведенных пучков представляется весьма актуальной.

Как показали длительные полномасштабные исследования кумулятивных и подпороговых процессов, важнейшей особенностью являются необычно усиленные A -зависимости таких реакций. Причем A -зависимости могут иметь существенно асимметричный вид относительно налетающего ядра и ядра-мишени (см., например, [8]). Учитывая вышеизложенные результаты, можно рассмотреть проведение новых экспериментов, в которых на одной и той же установке с одной и той же мишенью измеряются реакции, в которых участвуют одновременно ускоренные углерод, азот и кислород с одинаковой энергией на нуклон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Документация по TQDC16. Научно-экспериментальный отдел автоматизации физических исследований, ОИЯИ. <https://afi.jinr.ru/TQDC-16> (дата обращения: 08.08.24).
2. *Ziegler J. F.* Collection of Software Packages which Calculate Many Features of the Transport of Ions in Matter. <http://www.srim.org/> (дата обращения: 08.08.24).
3. *Samedov V. V.* Why Do We Need a Standard Theory of Scintillation Spectrometers with Several Photodetectors? // *Phys. At. Nucl.* 2021. V. 84. P. 1713–1728.
4. *Коровкин Д. С., Балдин А. А.* Определение момента временной привязки сигналов методом двойного дифференцирования и интерполяции для времяпролетных измерений // *Вестн. Междунар. ун-та природы, общества и человека «Дубна»*. 2020. № 2(47). С. 23–28.
5. *Михайлов В. А.* Обоснование и расчет динамических параметров магнитной структуры нуклотрона: Дис. . . канд. техн. наук. Дубна: ОИЯИ, 1985.
6. *Donets E. D.* Electron Beam Ion Sources in the Reflex Mode of Operation (Review and Progress Report) // *Rev. Sci. Instrum.* 2000. V. 71. P. 810–815.
7. *Boytsov A. Yu., Donets D. E., Donets E. D., Donets E. E., Katagiri K., Noda K., Ponkin D. O., Ramzdorf A. Yu., Salnikov V. V., Shutov V. B.* Electron String Ion Sources for Carbon Ion Cancer Therapy Accelerators // *Rev. Sci. Instrum.* 2015. V. 86. P. 083308.
8. *Baldin A., Baldina E.* Self-Similarity Approach for Prediction and Analysis of Experiments at the Accelerator Complex NICA // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2019. V. 204. P. 07003.

Получено 9 сентября 2024 г.