

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.83

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИОНОВ НА МАГНИТНОМ СПЕКТРОМЕТРЕ ФРАГМ

© 2022 г. Б. М. Абрамов^а, Ю. А. Бородин^а, С. А. Булычёв^а, И. А. Духовской^а, В. В. Куликов^а, А. А. Куликовская^{а, *}, А. П. Крутенкова^а, М. А. Мартемьянов^а, М. А. Мацюк^а, Е. Н. Турдакина^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*E-mail: annkul316@mail.ru

Поступила в редакцию 23.02.2022 г.

После доработки 25.02.2022 г.

Принята к публикации 28.02.2022 г.

Эксперимент ФРАГМ, проводимый на базе многоцелевого ускорительного комплекса ИТЭФ–ТВН, генерировал пучки протонов и ионов для различных исследований в области ядерной физики. В данной статье представлена методика идентификации фрагментов в пучках вторичных ионов на основе анализа корреляционных распределений по времени пролета и амплитуды сигнала с сцинтилляционных детекторов. Экспериментальные данные были получены при фрагментации пучка углерода с энергией в 300 МэВ/нуклон при сканировании по жесткости магнито-оптического канала с шагом в 50 МэВ/с. На примере изотопов бериллия были получены дифференциальные сечения процесса рождения ионов. Приводится сравнение полученных результатов с предсказаниями модели бинарного каскада.

Ключевые слова: эксперимент ФРАГМ, ион-ионные взаимодействия, перезарядка нуклонов, модель бинарного каскада

DOI: 10.56304/S2079562922030010

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение механизмов ядро-ядерных взаимодействий — это одно из основных направлений современной ядерной физики. В последние годы, особое внимание уделяется не только исследованиям фундаментальных свойств взаимодействия ионов, но и точным феноменологическим описаниям таких процессов, что важно для таких областей прикладной науки, как радиационная защита, адронная и ионная терапии [1]. Для этих целей было создано немало программ, описывающих ядро-ядерные взаимодействия для различных энергетических диапазонов. Все они требуют экспериментальной проверки, а также совершенствования основных теоретических подходов. Многообразие экспериментальных данных по фрагментации различных ионов позволит существенным образом улучшить качество и согласованность различных моделей. Одна из задач эксперимента ФРАГМ состояла в точных измерениях выходов фрагментов при энергиях от 0.2 до 3.2 ГэВ/нуклон. Измерения проводились по фрагментации ионов углерода на различных мишенях, причем регистрировался широкий набор родившихся частиц от пионов и протонов до изотопов углерода. Данная работа содержит описание методики выделения протонов и ионов с помощью магнито-оптического канала эксперимента ФРАГМ на экспериментальном материале,

полученном при энергии в 300 МэВ/нуклон и дополняет аналогичные работы по фрагментации ионов углерода [2–4]. В качестве примера получены экспериментальные и модельные дифференциальные сечения рождения изотопов бериллия под углом в 3.5°.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперимент ФРАГМ был выполнен в Институте теоретической и экспериментальной физики (НИЦ “Курчатовский институт” — ИТЭФ) на базе многоцелевого ускорительного комплекса ИТЭФ–ТВН (Тера–Ваттный Накопитель), который ускорял пучки протонов до 10 ГэВ/нуклон и пучки ионов до 4 ГэВ/нуклон. Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой двухступенчатый магнито-оптический канал длиной в 42 м, расположенный под углом в 3.5° по отношению к пучку ускорителя [5]. В качестве внутренней мишени использовалась узкая вертикальная полоска из 50-мкм бериллиевой фольги, что позволяло одновременно иметь как высокую светимость за счет многократного прохождения ионов через мишень, так и малые размеры источника для полного использования высокого импульсного разрешения канала. В качестве монитора использовался телескоп из трех сцинтилляционных счетчиков, ориентированных под углом

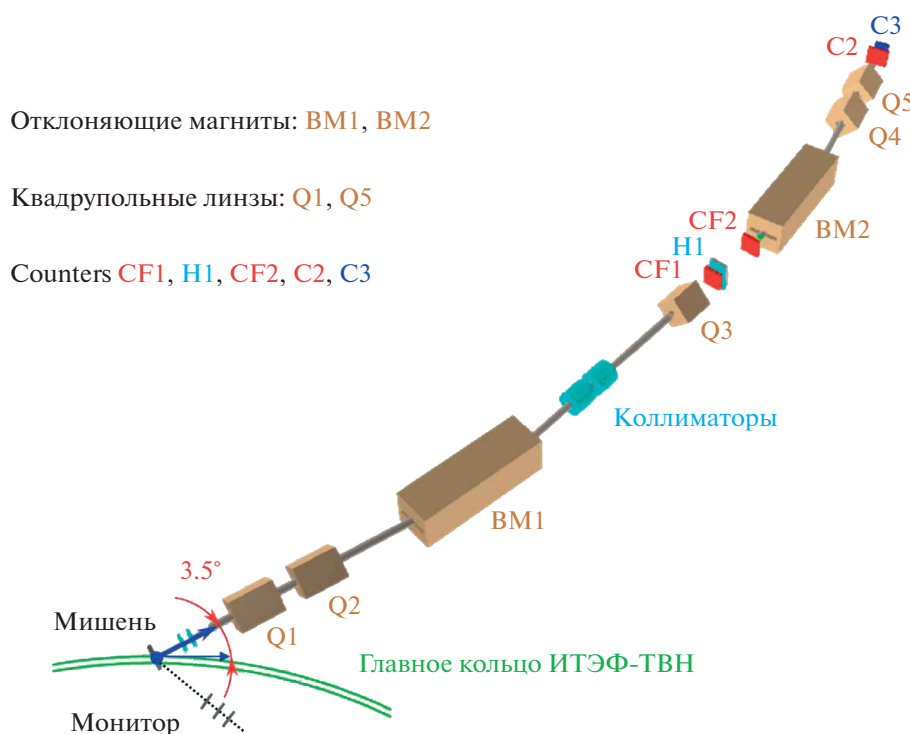


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ФРАГМ.

в 2° по отношению к мишени. Первая ступень установки состояла из дублета квадрупольных линз Q1 и Q2, отклоняющего магнита BM1, системы коллиматоров и полевой квадрупольной линзы Q3, предназначенной для улучшения импульсного разрешения пучка и расположенной в первом фокусе канала на расстоянии в 26 м от мишени. Вторая ступень включала в себя дублет квадрупольных линз (Q4 и Q5), поворотный магнит BM2, и была предназначена для фокусировки пучка в область расположения сцинтилляционных счетчиков (C2 и C3). В первом фокусе был установлен годоскоп H1 и два сцинтилляционных счетчика CF1 и CF2. Годоскоп состоял из двадцати вертикальных и восьми горизонтальных элементов размером $20 \times 1 \times 1$ см³ и предназначался как для измерения профиля пучка, так и для уточнения импульса фрагмента до 0.2% с учетом фокусирующих свойств магнито-оптического канала. Сцинтилляционные счетчики в каждом фокусе предназначались для амплитудных и времяпролетных измерений. Каждый счетчик просматривался двумя ФЭУ с противоположных сторон для компенсации их геометрических размеров при времяпролетных измерениях. В качестве триггера использовалось совпадение сигналов со счетчиков первого и второго фокуса. По сигналу триггера необходимая информация считывалась с системы САМАС на диск компьютера.

3. МЕТОДИКА АНАЛИЗА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

В данной работе представлена методика отбора ионов (изотопов бериллия) при энергии в 300 МэВ/нуклон. Измерения были получены при сканировании по жесткости магнито-оптического канала от 0.9 до 2.8 ГэВ/с с шагом в 50 МэВ/с. Отбор фрагментов производится по корреляционным распределениям времени пролета (TDC) и амплитуды сигнала с зарядово-цифрового преобразователя (QDC) при различных настройках магнито-оптического канала по жесткости, представленные на рис. 2. Временные измерения определены таким образом, что ионы с большим импульсом имеют меньшую величину в каналах TDC. На первом этапе ионы выделяются по заряду в области, ограниченной двумя линиями, как показано на рис. 2 сверху, которые имеют одинаковый наклон в зависимости от жесткости канала. Проекция отобранных данных на ось времени позволяет выделить искомым фрагмент. На рис. 2 снизу показаны распределения времени пролета в области регистрации изотопа ^{10}Be . Видно, что сигналы от разных ионов хорошо разделены, а число зарегистрированных событий определяется суммой событий в распределении. Фон от соседних изотопов пренебрежимо мал и на рис. 2 не виден. Также рис. 2 демонстрирует возможность регистрации установкой изотопа ^{11}Be , содержа-

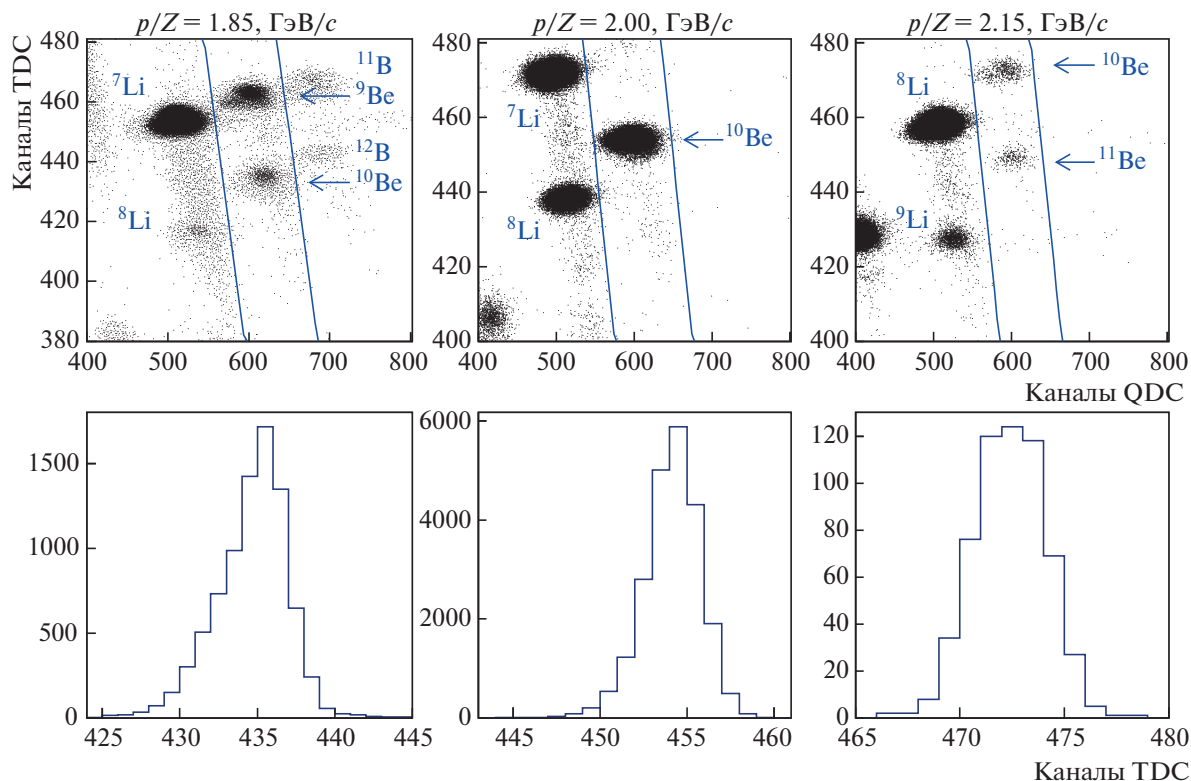


Рис. 2. На верхних графиках представлены корреляционные распределения времени пролета (TDC) и амплитуды сигнала (QDC) при различных настройках магнито-оптического канала по жесткости (p/Z). Нижний ряд графиков показывает проекцию на ось времени пролета корреляционного распределения в области регистрации изотопа ^{10}Be .

щего семь нейтронов и образующегося в процессе однократной перезарядки нуклонов налетающего ядра углерода.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПУЧКА ИОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ФРАГМ

Магнито-оптический канал установки ФРАГМ обладает особыми конструктивными особенностями. Заряженные частицы при своем движении вдоль канала проходят сквозь коллиматоры, сцинтилляционные счетчики, разрывы вакуумпровода в области счетчиков, что влияет на интенсивность и энергию пучка. Очевидно, что при проводке пучка необходимо учитывать такие процессы, как многократное рассеяние, ионизационные потери и неупругое взаимодействие частиц со средой. Для расчета эффективности регистрации протонов и широкого набора ионов было проведено моделирование эксперимента. Программа моделирования эксперимента была создана на базе приложения Geant4 (версия 4.10.07) [6]. Код программы включал точное описание геометрических параметров элементов магнито-оптического канала и сцинтилляционных счетчиков, измеренные карты магнитных полей отклоняющих магнитов и квадрупольных линз.

Для учета взаимодействия ионов с веществом был использован набор физических процессов QGS_BIC, где в качестве описания процессов неупругого взаимодействия используется модель бинарного каскада (BC) [7]. Магнитные поля и градиенты квадрупольных линз задавались в соответствии с настройкой канала на определенную жесткость (p/Z). Начальные кинематические условия для протонов и ионов включали ограничения по углу $\theta < 1^\circ$ и импульсу $dp/p = 3.5\%$, что соответствовало угловому и импульсному захвату установки. Исследуемая область по жесткости определялась стабильностью источников питания при малых токах и предельной рассеиваемой мощностью отклоняющих магнитов и была выбрана в пределах от 0.6 до 6 ГэВ/с. Регистрация заряженной частицы осуществляется в том случае, если она проходит через счетчики как в первом, так и во втором фокусе. Эффективность регистрации протонов, дейтронов и изотопов бериллия (^7Be и ^{10}Be) в зависимости от жесткости канала представлена на рис. 3. Модельные данные могут быть хорошо описаны функцией $f(x) = p_2 \exp[-p_0/(x - p_1)^2]$, где $x = p/Z$, p и Z — импульс и заряд фрагмента, p_0 , p_1 , p_2 — свободные параметры. Поправка на эффективность играет

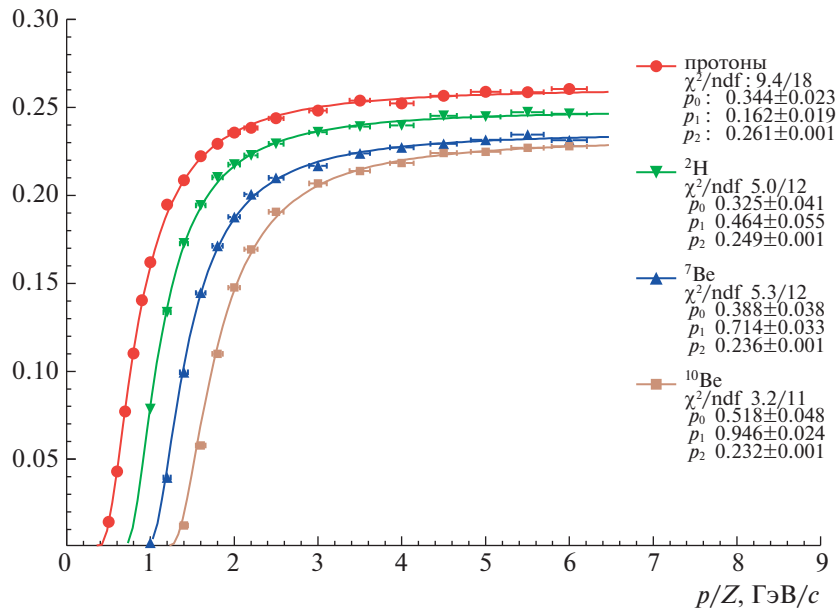


Рис. 3. Эффективность регистрации ионов магнито-оптическим каналом установки ФРАГМ.

существенную роль при жесткости до 3 ГэВ/с и может существенным образом изменить импульсный спектр ионов. В области больших значений по p/Z эффективности протонов и ионов выходят на плато, причем для протонов она примерно на 20% больше, чем для бериллия.

5. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ БЕРИЛЛИЯ

Относительные выходы фрагментов вычислялись нормировкой числа зарегистрированных ионов на показания монитора с учетом эффективности их регистрации. Для получения абсолютных величин дифференциальных сечений $d^2\sigma/dpd\Omega$ была проведена нормировка на полное сечение взаимодействия ионов углерода и бериллия. Следует отметить, что до сих пор не существует соответствующих экспериментальных данных, однако энергонезависимое приближение полного сечения σ_{tot} может быть вычислено по формуле [8]:

$$\sigma_{\text{tot}} = \pi r_0^2 [A_p^{1/3} + A_t^{1/3} - b_0(A_p^{-1/3} + A_t^{-1/3})]^2, \quad (1)$$

$$b_0 = 1.581 - 0.876(A_p^{-1/3} + A_t^{-1/3}),$$

где $r_0 = 1.36$ фм, $A_p = 12$ и $A_t = 9$ — массовые числа налетающего ядра и мишени. Данная формула справедлива для энергий налетающего иона превышающих 100 МэВ/нуклон [9] и дает в нашем случае $\sigma_{\text{tot}} = 776.8$ мбн. Более детальный расчет сечения, которое зависит от энергии налетающего иона дает

модель LAQGSM/MCNP6 [10], $\sigma_{\text{tot}} = 772.8$ мбн при кинетической энергии $T = 300$ МэВ/нуклон. Сечения для данной модели приведены на рис. 4 для соответствующих энергий набора данных в эксперименте. На рис. 5 представлены измеренные и модельные дифференциальные сечения в зависимости от лабораторного импульса для ^7Be , ^9Be и ^{10}Be , полученные нормировкой на сечение рождения дейтрона. Сечения перекрывают до пяти порядков величины, причем распределение каждого фрагмента имеет гауссову форму, где макси-

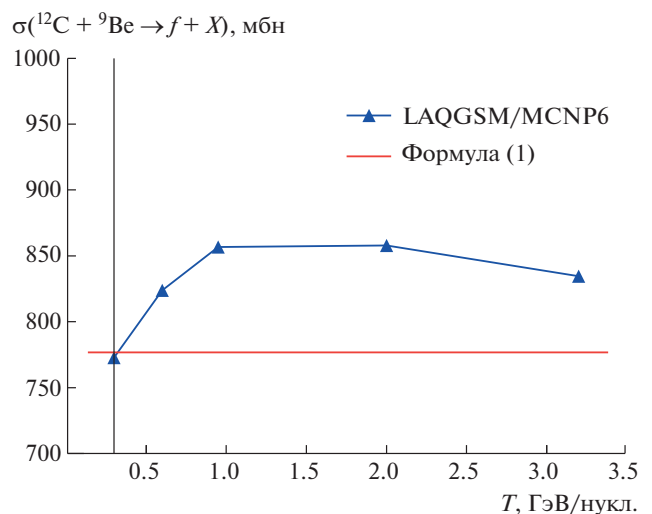


Рис. 4. Полное сечение взаимодействия ионов углерода с бериллиевой мишенью в зависимости от энергии налетающего иона.

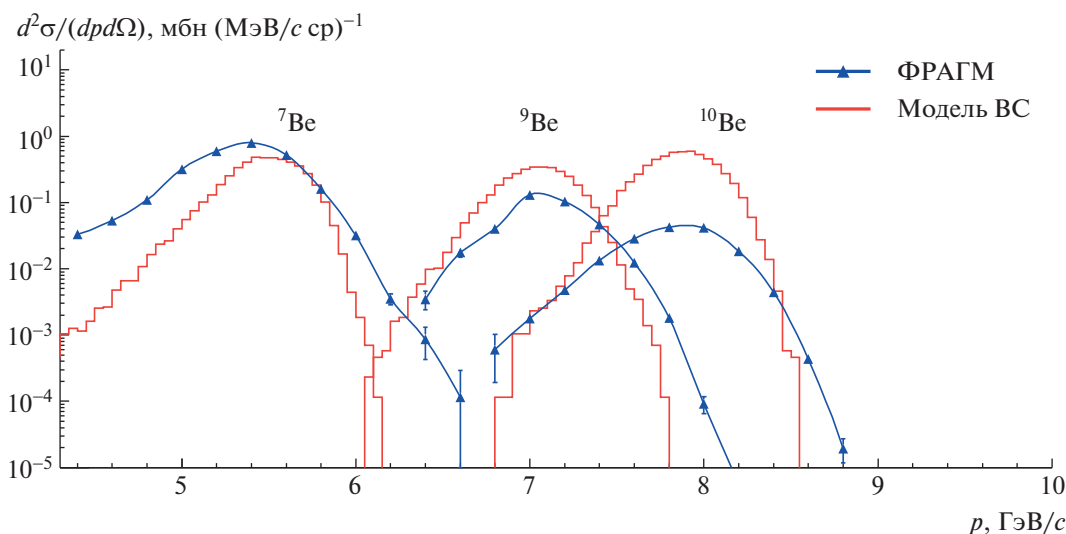


Рис. 5. Дифференциальные сечения выходов ионов бериллия в зависимости от импульса фрагмента, полученные на экспериментальных данных и модели бинарного каскада (BC).

мум в импульсе на нуклон близок к величине импульса на нуклон налетающего ядра углерода. Модельные данные получены в рамках модели ВС, причем они хорошо согласуются с экспериментальными данными в смысле среднего значения и формы распределения. Различие по величине сечения ожидаемо, поскольку в [11] показано, что предсказания моделей ион-ионных взаимодействий сильно различаются, эта разница возрастает с увеличением массы фрагмента при фиксированном угле регистрации, что связано с различиями в угловых зависимостях выхода фрагментов в моделях.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была представлена методика идентификации фрагментов в пучках ионов на основе анализа корреляционных распределений времени пролета и амплитуды сигнала с сцинтилляционных детекторов в эксперименте ФРАГМ. Экспериментальные данные были получены при фрагментации ионов углерода с энергией в 300 МэВ/нуклон при сканировании по жесткости магнито-оптического канала с шагом в 50 МэВ/с, при анализе данных были отобраны изотопы бериллия (^7Be , ^9Be , ^{10}Be). Для определения эффективности регистрации ионов в зависимости от его импульса, было проведено моделирование эксперимента с помощью программного пакета Geant4. При вычислении дифференциальных сечений была проведена была проведена нормировка на полное сечение взаимодействия ионов углерода и бериллия. Дифференциальные сечения процесса рождения ионов бериллия в зависимости от импульса приведены совместно с теоре-

тическими предсказаниями, полученными в рамках модели бинарного каскада.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны персоналу ускорительного комплекса ИТЭФ-ТВН и техническому персоналу эксперимента ФРАГМ за большой вклад в проведение измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Napoli M.D. et al. // Phys. Med. Biol. 2012. V. 57. P. 7651.
2. Abramov B.M. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012077.
3. Abramov B.M. et al. // EPJ Web Conf. 2017. V. 138. P. 03002.
4. Абрамов Б.М. и др. // Ядерная физика. 2015. Т. 78. С. 403 [Abramov B.M. et al. // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78. P. 373].
5. Абрамов Б.М. и др. // Журн. эксп. теор. физ. 2013. Т. 97. С. 509 [Abramov B.M. et al. // JETP Lett. 2013. V. 97. P. 439].
6. Agostinelli S. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2003. V. 506. P. 250.
7. Folger G., Ivanchenko V.N., Wellisch J.P. // Eur. Phys. J. A. 2004. V. 21. P. 407.
8. Barshay S., Dover C.B., Vary J.P. // Phys. Lett. C. 1975. V. 11. P. 360.
9. Sihver L. et al. // Phys. Rev. C. 1993. V. 47. P. 1226.
10. Mashnik S.G. // Eur. Phys. J. Plus. 2011. V. 126. P. 49.
11. Abramov B.M. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1390. P. 012004.

Ion Identification Using a FRAGM Magnetic Spectrometer

**В. М. Abramov¹, Yu. A. Borodin¹, S. A. Bulychjov¹, I. A. Dukhovskoy¹, V. V. Kulikov¹,
A. A. Kulikovskaya¹*, A. P. Krutenkova¹, M. A. Martemianov¹, M. A. Matsyuk¹, and E. N. Turdakina¹**

¹*National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia*

**e-mail: annkul316@mail.ru*

Received February 23, 2022; revised February 25, 2022; accepted February 28, 2022

Abstract—The FRAGM experiment was carried out on the multipurpose accelerator complex ITEP–TWAC, which generated of protons and ions beams for various research in the nuclear physics. This article presents a technique for identifying fragments in secondary ion beams based on analysis of correlation distributions in time-of-flight and amplitude signal from scintillation detectors. The experimental data were obtained by fragmentation of a carbon beam with an energy of 300 MeV/nucleon at scanning the rigidity of the magneto-optical channel with a step of 50 MeV/c. Differential cross sections were obtained using the beryllium isotopes ion production process. The obtained results are compared with predictions of the binary cascade model.

Keywords: experiment FRAGM, ion-ion interaction, nucleon charge exchange, binary cascade model