

ИЗУЧЕНИЕ НУКЛОННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В ДИССОЦИАЦИИ НЕЙТРОНО-ДЕФИЦИТНЫХ ИЗОТОПОВ Be, B, C и N НА УСТАНОВКЕ СФЕРА

Программа исследований на установке СФЕРА с Магнитным Анализом Радиоактивных Изотопов (МАРИЯ)

Цель исследования состоит в получении экспериментальной информации о каналах периферической диссоциации и распадов ядер Be, B, C и N, расположенных на границе протонной стабильности. Изучение диссоциации радиоактивных ядер ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^9\text{C}$ и ${}^{12}\text{N}$ в масштабах возбуждения характерных для нуклонной и кластерной структуры ядра представляет интерес для ядерной астрофизики. Установленные топологии могут оказаться полезными для прояснения вариантов синтеза ядер, как процессов обратных процессам их фрагментации. Должна быть изучена возможность извлечения сечений слияния легких ядер из релятивистских процессов диссоциации. В таблице приведены периоды полураспада этих ядер.

| | ${}^7\text{Be}$ | ${}^8\text{B}$ | ${}^9\text{C}$ | ${}^{12}\text{N}$ |
|---------------------------------------|---|---|---|--|
| $T_{1/2}$ | Стабилен без e^- | 770 ms | 126.5 ms | 11 ms |
| Энергетический порог возбуждения, МэВ | ${}^7\text{Be}^* \rightarrow {}^3\text{He}^4\text{He}$ 1.59 ${}^7\text{Be}^* \rightarrow {}^6\text{Li}$ 5.61 ${}^7\text{Be}^* \rightarrow {}^d{}^5\text{Li}$ 8.77 ${}^7\text{Be}^* \rightarrow n{}^6\text{Be}$ 10.68 | ${}^8\text{B}^* \rightarrow p{}^7\text{Be}$ 0.138 ${}^8\text{B}^* \rightarrow p{}^3\text{He}^4\text{He}$ 1.73 ${}^8\text{B}^* \rightarrow p{}^5\text{Li}$ 3.41 | ${}^9\text{C}^* \rightarrow p{}^8\text{B}$ 1.30 ${}^7\text{Be}^* \rightarrow {}^3\text{He}^6\text{Be}$ 4.39 ${}^9\text{C}^* \rightarrow {}^3\text{He}^3\text{He}^3\text{He}$ 15.87 | ${}^{12}\text{N}^* \rightarrow p{}^{11}\text{C}$ 0.60 ${}^{12}\text{N}^* \rightarrow {}^4\text{He}^8\text{B}$ 8.01 ${}^{12}\text{N}^* \rightarrow {}^3\text{He}^9\text{B}$ 10.01 ${}^{12}\text{N}^* \rightarrow d{}^{10}\text{C}$ 11.50 |

При фрагментации этих ядер в процессах с удалением нейтрона образуются ядра ${}^6\text{Be}$, ${}^7\text{B}$, ${}^8\text{C}$ и ${}^{11}\text{N}$ нестабильные к протонному распаду. Изучение распадов из основных состояний таких ядер даст уникальную информацию о структуре слабосвязанных систем с большим избытком протонов, что может оказаться важным для понимания нуклеосинтеза в протяженных астрофизических объектах.

| | ${}^6\text{Be}$ | ${}^7\text{B}$ | ${}^8\text{C}$ | ${}^{11}\text{N}$ |
|----------------------|--|--|--|---|
| Ширина, Г, МэВ | 0.092 | 1.4 | 0.23 | 1.58 |
| Энергия распада, МэВ | ${}^6\text{Be} \rightarrow pp{}^4\text{He}$ -1.372 ${}^6\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He}^3\text{He}$ 11.48 | ${}^7\text{B} \rightarrow p{}^6\text{Be}$ -2.21 ${}^7\text{B} \rightarrow ppp{}^4\text{He}$ -3.58 | ${}^8\text{C} \rightarrow pp{}^6\text{Be}$ -2.14 ${}^8\text{C} \rightarrow p{}^7\text{B}$ 0.065 | ${}^{11}\text{N} \rightarrow p{}^{10}\text{C}$ -2.29 ${}^{11}\text{N} \rightarrow ppp{}^8\text{Be}$ 1.59 ${}^{11}\text{N} \rightarrow pp{}^9\text{B}$ 1.76 |

Необходимым практическим шагом для выполнения этого круга задач является формирование вторичных пучков обогащенных ядрами ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^9\text{C}$ и ${}^{12}\text{N}$ на канале 4В установки СФЕРА. В этом отношении основная идея состоит в использовании магнитных элементов каналов ВП1 и 4В как сепараторов нейтроно-дефицитных ядер, образовавшихся при фрагментации ядер первичного пучка на мишени в фокусе ФЗ. При этом настройка канала транспортировки пучка производится на первичном пучке. После этого импульс первичного пучка повышается в такой пропорции, чтобы уже настроенный канал пропускал только ядра с заданным отношением к полному импульсу на единицу заряда. Рассмотрим более подробно особенности формирования каждого из пучков.

Ускорение ${}^7\text{Li}$

${}^7\text{Be}$. В 2002 г. эмульсия была облучена ядрами ${}^7\text{Be}$ с энергией 1.23 А ГэВ, пучок которых был сформирован на канале 4В на основе реакции перезарядки ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be}$. Доля сечения

перезарядки по опубликованным данным сотрудничества ГИБС составляет величину 10^{-3-4} от неупругого сечения. Доля сопутствующих ядер ${}^6,{}^7\text{Li}$ составляла порядка 30%. Для генерации вторичного пучка в фокусе Ф4 устанавливалась мишень из полиэтилена. По мнению С. А. Хорозова при использовании всего канала ВП1 пучок будет практически чистым. Для освоения работы с пучком ${}^7\text{Be}$ предлагается:

1. **Проводка ${}^7\text{Li}$** ; выполнить проводку первичного пучка ${}^7\text{Li}$ с импульсом $P=2$ А ГэВ/с ($T_{\text{кин}}=1.274$ А ГэВ) до установки СФЕРА и провести установку детекторов на максимум пучка;
2. **Эффект мишени**; установить мишень толщиной 1 г/см² и выяснить роль ионизационных потерь в ней на профиль пучка;
3. **Формирование ${}^6\text{Li}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^7\text{Li}$ с импульсом $P=2.33$ А ГэВ/с ($T_{\text{кин}}=1.576$ А ГэВ) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^6\text{Li}$; интересно проверить наличие остаточной примеси ${}^6\text{Li}$;
4. **“Формирование” ${}^6\text{Be}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^7\text{Li}$ с импульсом $P=3.11$ А ГэВ/с ($T_{\text{кин}}=2.31$ А ГэВ) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке несвязанного ядра ${}^6\text{Be}$;
5. **Формирование ${}^7\text{Be}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^7\text{Li}$ с импульсом $P=2.67$ А ГэВ/с ($T_{\text{кин}}=1.895$ А ГэВ) и идентифицировать поток ядер с $Z=4$ на месте прохождения пучка в п.2.
6. **Распады ${}^6\text{Be}$** ; далее можно выполнить подготовительные работы к идентификации каналов ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Be}(n) \rightarrow p\text{r}{}^4\text{He}(n)$, ${}^3\text{He}{}^3\text{He}$ сопровождаемого фрагментацией ядра мишени, инициированной нейтроном.

Ускорение ${}^{10}\text{B}$

${}^{10}\text{B}$. В марте 2004 г. при ускорении на нуклотороне ядер ${}^{10}\text{B}$ с импульсом 2.0 А ГэВ/с и интенсивностью около 10^8 ядер в цикл на канале ЗВ был сформирован пучок вторичных ядер с магнитной жесткостью соответствующей отношению $Z/A = 5/8$ (фрагментация ${}^{10}\text{B} \rightarrow {}^8\text{B}$). Получен облученный материал по взаимодействиям ${}^8\text{B}$ в эмульсии. Мишень помещалась в фокус Ф3. По зарядовому спектру был виден небольшой вклад в на уровне 4:1 от ${}^7\text{Be}$. В области малых амплитуд присутствовал пик от ${}^3\text{He}$ сравнимый с ${}^8\text{B}$. Для освоения работы с пучком ${}^8\text{B}$ предлагается:

1. **Проводка ${}^{10}\text{B}$** ; выполнить проводку первичного пучка ${}^{10}\text{B}$ импульсом $P=2$ А ГэВ/с ($T_{\text{кин}}=1.274$ А ГэВ) до установки СФЕРА и провести установку детекторов на максимум пучка;
2. **Эффект мишени**; установить мишень толщиной 1 г/см² и выяснить роль ионизационных потерь в ней на профиль пучка;
3. **“Формирование” ${}^9\text{B}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{10}\text{B}$ с импульсом $P=2.22$ А ГэВ/с ($T_{\text{кин}}=1.476$ А ГэВ) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке несвязанного ядра ${}^9\text{B}$; интересно проверить появление примеси ${}^7\text{Be}$;
4. **Формирование ${}^7\text{Be}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{10}\text{B}$ с импульсом $P=2.28$ А ГэВ/с ($T_{\text{кин}}=1.536$ А ГэВ) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^7\text{Be}$; интересно проверить появление примеси ${}^3\text{He}$;
5. **Формирование ${}^{10}\text{C}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{10}\text{B}$ с импульсом $P=2.4$ А ГэВ/с ($T_{\text{кин}}=1.64$ А ГэВ) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^{10}\text{C}$; интересно проверить появление примеси ${}^8\text{B}$;
6. **Формирование ${}^8\text{B}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{10}\text{B}$ с импульсом $P=2.5$ А ГэВ/с ($T_{\text{кин}}=1.736$ А ГэВ) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^8\text{B}$; интересно проверить появление примеси ${}^7\text{Be}$ и ${}^3\text{He}$;
7. **Формирование ${}^9\text{C}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{10}\text{B}$ с импульсом $P=2.67$ А ГэВ/с ($T_{\text{кин}}=1.897$ А ГэВ) и идентифицировать поток ядер на месте

- прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^9\text{C}$; интересно проверить существование комбинированного процесса фрагментации и перезарядки;
8. **“Формирование” ${}^7\text{B}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{10}\text{B}$ с импульсом $P=2.857 \text{ А ГэВ/с}$ ($T_{\text{кин}}=2.073 \text{ А ГэВ}$) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке несвязанного ядра ${}^7\text{B}$;
 9. **Формирование ${}^8\text{B}$** ; повторить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{10}\text{B}$ с импульсом $P=2.5 \text{ А ГэВ/с}$ ($T_{\text{кин}}=1.736 \text{ А ГэВ}$) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^8\text{B}$; интересно проверить появление примеси ${}^7\text{Be}$ и ${}^3\text{He}$;
 10. **Распады ${}^7\text{B}$** ; далее можно выполнить подготовительные работы к идентификации каналов ${}^7\text{B} \rightarrow {}^6\text{Be} \rightarrow \text{ppp}{}^4\text{He}$.

Ускорение ${}^{12}\text{C}$

${}^9\text{C}$ и ${}^{12}\text{N}$. В марте 2004 г. при ускорении на нуклотороне ядер ${}^{12}\text{C}$ с импульсом 2.0 А ГэВ/с и интенсивностью около 10^8 ядер в цикл на канале ЗВ был сформирован пучок вторичных ядер с магнитной жесткостью соответствующей отношению $Z/A = 6/9$ (фрагментация ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^9\text{C}$). Получен облученный материал по взаимодействиям ${}^8\text{B}$ в эмульсии. Мишень помещалась в фокус Ф3. По зарядовому спектру был виден небольшой вклад в на уровне 4:1 от ${}^8\text{B}$. В области малых амплитуд присутствовал пик от ${}^3\text{He}$ сравнимый с ${}^9\text{C}$. Для освоения работы с пучком ${}^9\text{B}$ предлагается:

1. **Проводка ${}^{12}\text{C}$** ; выполнить проводку первичного пучка ${}^{12}\text{C}$ импульсом $P=2 \text{ А ГэВ/с}$ ($T_{\text{кин}}=1.274 \text{ А ГэВ}$) до установки СФЕРА и провести установку детекторов на максимум пучка;
2. **Эффект мишени**; установить мишень толщиной 1 г/см^2 и выяснить роль ионизационных потерь в ней на профиль пучка;
3. **Формирование ${}^9\text{Be}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{12}\text{C}$ с импульсом $P=1.5 \text{ А ГэВ/с}$ ($T_{\text{кин}}=0.834 \text{ А ГэВ}$) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^9\text{Be}$; интересно проверить появление примеси ${}^{11}\text{B}$ и ${}^7\text{Li}$;
4. **Формирование ${}^7\text{Be}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{12}\text{C}$ с импульсом $P=2.28 \text{ А ГэВ/с}$ ($T_{\text{кин}}=1.531 \text{ А ГэВ}$) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^7\text{Be}$; интересно проверить появление примеси ${}^{11}\text{C}$ и ${}^{10}\text{C}$;
5. **Формирование ${}^{12}\text{N}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{12}\text{C}$ с импульсом $P=2.33 \text{ А ГэВ/с}$ ($T_{\text{кин}}=1.578 \text{ А ГэВ}$) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^{12}\text{N}$ образованных в реакции перезарядки ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N}$; интересно проверить появление сигнала от $Z=7$;
6. **Формирование ${}^8\text{B}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{12}\text{C}$ с импульсом $P=2.5 \text{ А ГэВ/с}$ ($T_{\text{кин}}=1.737 \text{ А ГэВ}$) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^8\text{B}$;
7. **Формирование ${}^9\text{C}$** ; осуществить вывод на мишень в фокусе Ф3 первичного пучка ${}^{12}\text{C}$ с импульсом $P=2.67 \text{ А ГэВ/с}$ ($T_{\text{кин}}=1.897 \text{ А ГэВ}$) и идентифицировать поток ядер на месте прохождения пучка в п.2; этот режим соответствует проводке ядра ${}^9\text{C}$; интересно проверить появление примеси ${}^8\text{B}$ и ${}^7\text{Be}$;
8. **Распады ${}^8\text{C}$** ; далее можно выполнить подготовительные работы к идентификации каналов ${}^8\text{C} \rightarrow \text{pppp}{}^4\text{He}$.