

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D05308 – Ядерная физика»

ЕЛЕУШЕВА БАДИГУЛЬ МАРАТОВНА

Реакции радиационного захвата на легких ядрах в звездной и межзвездной плазме

Общая характеристика работы.

В диссертационной работе представлены модельные расчеты скоростей реакций радиационного захвата нейтронов на ядрах ${}^8\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ и ${}^{13}\text{B}$ и протонов на изотопе ${}^{15}\text{N}$ для оценки сценариев эволюции легких элементов в звездной и межзвездной плазме.

Актуальность исследований.

Современная ядерная астрофизика – область теоретических и экспериментальных исследований, охватывающая самые обширные аспекты фундаментальной и прикладной физики. Одно из направлений связано с изучением ядерных реакций на легких ядрах при низких энергиях. Это направление является путем решения различных астрофизических задач. Перечислим лишь некоторые из наиболее актуальных:

- теория формирования и эволюции ранней Вселенной находится в стадии становления и развития. Так, одним из важнейших вопросов, не нашедших пока однозначного решения, является вопрос о том, была ли первичная космологическая среда однородной или произошло расслоение протонных и нейтронных компонент;
- модели синтеза химических элементов в период нуклеосинтеза после Большого взрыва развиваются на основе определения и изучения температурных условий, соответствующих образованию различных цепочек ядерных реакций;
- на основе обоснованных ядерных цепочек строятся различные версии сетей, которые в итоге позволяют рассчитать массовые доли как стабильных ядер, так и радиоактивных изотопов, а также обосновать различные сценарии образования и, что очень важно, накопления тяжелых изотопов;

Лабораторные исследования ядерных реакций радиационного захвата существенно ограничены в своих возможностях в силу объективных причин. Сечения реакций с протонами сильно подавлены кулоновским барьером в диапазоне энергий, характерном для ядерных процессов в звездах. Экспериментальная база, обеспечивающая прямые и косвенные измерения сечений реакций радиационного захвата нейтронов, сегодня представлена множеством проектов и современных установок, оснащенных современной техникой. Однако при работе с короткоживущими изотопами возникает проблема. В противном случае они считаются предварительными и требуют дополнительной проверки. Следовательно, теоретические расчеты характеристик реакций становятся чрезвычайно востребованными.

Исследования проводимые по теме диссертации были направлены на изучения природы резонансных состояний в ядрах ${}^6\text{Li}$ и ${}^8\text{Be}$, что играют ключевую роль во многих вопросах как ядерной физики, так и в астрофизики. Обладая уникальными особенностями в своей структуре, данные ядра рассматривались как с использованием стандартных подходов для исследования ядерных резонансов, так и расширенных методов анализа.

Целью диссертационной работы являются модельные расчеты скоростей реакций радиационного захвата нейтронов на ядрах ${}^8\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ и ${}^{13}\text{B}$ и протонов на изотопе ${}^{15}\text{N}$ для оценки сценариев эволюции легких элементов в звездной и межзвездной плазме.

Основные задачи исследований:

1. Рассчитать полные сечения и скорость реакции ${}^8\text{Li}(n,\gamma_{0+1}){}^9\text{Li}$;
2. Рассчитать полные сечения реакции ${}^9\text{Be}(n,\gamma_{0+1+2+3+4+5}){}^{10}\text{Be}$ с образованием ${}^{10}\text{Be}$ в GS и пяти возбужденных состояниях, а также соответствующие скорости реакции;
3. Разработать обоснованный модельный подход для исследования реакции ${}^{13}\text{B}(n,\gamma_{0+1}){}^{14}\text{B}$ при астрофизических энергиях. Рассчитать полное сечение и скорость реакции;
4. Переоценить астрофизические S-факторы ${}^{15}\text{N}(p,\gamma){}^{16}\text{O}$ в МПКМ, включая эффекты интерференции и нерезонансный магнитный дипольный переход $M1$. Оценить влияние этих факторов на соответствующую скорость реакции.

Объектами исследований являются бинарные кластерные системы легких ядер и механизмы реакций радиационного захвата нуклонов при низких и сверхнизких энергиях.

Методы исследования: Алгебраические методы квантовой теории угловых моментов, методы квантовой теории рассеяния, численные методы решения уравнения Шредингера сплошных и связанных состояний, численное интегрирование.

Научная новизна результатов диссертационного исследования:

1. Получены полные сечения радиационного захвата $n{}^8\text{Li}$ в диапазоне энергий от 10 мэВ до 5 МэВ, которые в целом согласуются с результатами экспериментальных измерений. Впервые предложен безмодельный критерий оценки достоверности рассчитанных скоростей реакции по энергии связи в нуклонных каналах ${}^6\text{Li}(n,\gamma){}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Li}(n,\gamma){}^8\text{Li}$ и ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$.

2. Рассчитаны парциальные и полные сечения реакции ${}^9\text{Be}(n,\gamma_{0+1+2+3+4+5}){}^{10}\text{Be}$ в диапазоне энергий от 10^{-5} до 5 МэВ в МРСМ. Расширение диапазона энергий до 5 МэВ позволяет рассмотреть пять резонансов и оценить их сигнатуру в полном сечении. В качестве состояния предлагается резонанс $E_x = 0,730$ МэВ.

3. Полные сечения реакции ${}^{13}\text{B}(n,\gamma_{0+1}){}^{14}\text{B}$ впервые рассчитаны в МПКМ на основе переходов $E1$ и $M1$ от 10^{-2} эВ до 5 МэВ. В пределах изменения асимптотической константы предложен интервал для теплового сечения 5,1–8,9 мб. На основе теоретических полных сечений при энергиях от 0,01 эВ до 5 МэВ рассчитана скорость реакции в диапазоне температур от 0,01 до 10 T_9 .

Определены значения T_9 зажигания реакции $^{13}\text{B}(n,\gamma_{0+1})^{14}\text{B}$ в зависимости от плотности числа нейтронов $\sim 1022 \text{ см}^{-3}$.

4. Впервые переоценка астрофизического S-фактора и скорости реакции для реакции $^{15}\text{N}(p,\gamma)^{16}\text{O}$ в рамках МПКМ включает интерференцию низколежащих резонансов $^3\text{S}_1$ и магнитного нерезонансного перехода $M1$. Предложено моделирование учета экспериментально наблюдаемых каскадных переходов. Проведен сравнительный анализ скоростей реакций $^{12}\text{N}(p,\gamma)^{13}\text{O}$, $^{13}\text{N}(p,\gamma)^{14}\text{O}$, $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$, $^{15}\text{N}(p,\gamma)^{16}\text{O}$ вовлеченных в различные ветви цикла CNO, полученных в рамках одной и той же модели.

5. Впервые сформулирована закономерность «чем выше порог канала, тем выше скорость реакции» для соседних изотопов Li, B и N.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Найденны два критерия оценки скорости реакции $^8\text{Li}(n,\gamma_{0+1})^9\text{Li}$, которые позволяют сузить диапазон скоростей реакции и ограничить выбор асимптотических констант: значения тепловых сечений и корреляция между энергетическими порогами и порядком скоростей реакций при низких температурах на изотопах лития $^{6,7,8}\text{Li}$.

2. Рассчитанные парциальные и полные сечения реакции $^9\text{Be}(n,\gamma_{0+1+2+3+4+5})^{10}\text{Be}$ в диапазоне энергий от 10^{-5} до 5 МэВ позволяют рассмотреть пять $^3\text{D}_3^1$, $^3\text{F}_2^1$, $^3\text{F}_3$, $^3\text{F}_2^2$ и $^3\text{D}_3^2$ резонансов и оценить их сигнатуру в полном сечении. Включение резонансов показывает их влияние на скорость реакции в пределах фактора 4-5, возрастающего при $T_9 > 1$, сравнивая современные результаты Wallner et al., 2019 и Mohr et al., 2019.

3. Расчеты полных сечений реакции $^{13}\text{B}(n,\gamma_{0+1})^{14}\text{B}$, выполненные в МПКМ от 10^{-2} эВ до 5 МэВ, дают предложение для новых экспериментальных измерений ISOLDE. Представленные данные о скоростях реакции обосновывают роль реакции $^{13}\text{B}(n,\gamma_{0+1})^{14}\text{B}$ в цепочках Бор-Углерод-Азот, это не точка разрыва последовательности Бора.

Связь темы диссертационной работы с планами научно-исследовательских программ:

Научно-исследовательская работа проводится в соответствии со следующими программами:

1. «Study of the rates of some thermonuclear reactions in solar cycles and BBN» (IRN: AP09259021-OT-23, 2021–2023);

2. «Study of the processes of thermonuclear hydrogen combustion in the CNO cycle on the Sun and in stars» (IRN: AP19676483, 2023–2025);

Личный вклад автора:

Бадигуль Елеушева принимала участие во всех этапах исследований, в том числе в разработке реализации МПКМ для изучения астрофизических процессов реакций $^8\text{Li}(n,\gamma_{0+1})^9\text{Li}$, $^9\text{Be}(n,\gamma_{0+1+2+3+4+5})^{10}\text{Be}$, $^{13}\text{B}(n,\gamma_{0+1})^{14}\text{B}$ и $^{15}\text{N}(p,\gamma)^{16}\text{O}$.

Научная и практическая ценность работы:

Результаты расчетов сечений реакций $^8\text{Li}(n,\gamma_{0+1})^9\text{Li}$ и $^{13}\text{B}(n,\gamma_{0+1})^{14}\text{B}$ в рамках МПКМ фактически дают обоснование для постановки новых экспериментальных измерений как при тепловых энергиях, так и в расширенном

диапазоне до 5 МэВ. Для реакции ${}^9\text{Be}(n,\gamma_{0+1+2+3+4+5}){}^{10}\text{Be}$ также определены энергетические области, для которых требуются уточненные экспериментальные данные. Скорости реакций ${}^8\text{Li}(n,\gamma_{0+1}){}^9\text{Li}$, ${}^9\text{Be}(n,\gamma_{0+1+2+3+4+5}){}^{10}\text{Be}$, ${}^{13}\text{B}(n,\gamma_{0+1}){}^{14}\text{B}$ и ${}^{15}\text{N}(p,\gamma){}^{16}\text{O}$ рекомендуется включить в базы данных. Скорости реакций рассчитываются путем усреднения частиц по скоростям в плазме согласно равновесному распределению Максвелла. Это распределение предполагает однородную модель Вселенной. Важно продолжить исследования по проверке гипотезы, связанной с закономерностью «чем выше порог канала, тем выше скорость реакции» с использованием расширенных данных для соседних изотопов. модельных расчетов – уточнения параметров модели, так и для качественных оценок скоростей реакций при низких температурах.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов:

Достоверность результатов обусловлена тем, что в расчетах использованы алгебраические методы квантовой теории углового момента. Кроме того, построены потенциалы взаимодействия и расчеты характеристик реакций радиационного захвата на основе современных экспериментальных данных о спектрах уровней, их ширине, АК, сечениях и астрофизических S -факторах.

Апробация диссертационной работы:

Основные результаты диссертации опубликованы в зарубежных научных журналах с импакт-фактором: *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, *Chinese Physics C*; а также докладывались и обсуждались на следующих конференциях: № XXVII (2022) *European Academic Science and Research*, 25-я Европейская конференция по проблемам немногих тел в физике (EFB25) (30 июля – 4 августа 2023 г., Майнц, Германия).

Публикации:

Публикации в научных журналах, включенных и индексируемых в базе Scopus\Web of Science:

– Dubovichenko S.B., **Yelesheva V.M.**, Burkova N.A., Tkachenko A.S. The reaction rate of radiative $n{}^8\text{Li}$ capture in the range from 0.01 to 10T₉ // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. – 2023. – Vol. 10. – 1251743.

– Tkachenko A.S., Burkova N.A., **Yelesheva V.M.**, Dubovichenko S.B. Estimation of radiative capture ${}^{13}\text{B}(n,\gamma_{0+1}){}^{14}\text{B}$ reaction rate in the modified potential cluster model // *Chinese Physics C*. – 2023. – Vol. 47. – 104103.

– Dubovichenko S.B., **Yelesheva V.M.**, Burkova N.A., Tkachenko A.S. Radiative ${}^9\text{Be}(n,\gamma_{0+1+2+3+4+5}){}^{10}\text{Be}$ reaction rate in the potential cluster model // *Chinese Physics C*. – 2023. – Vol. 47. – 084105.

– Dubovichenko S.B., Tkachenko A.S., Kezerashvili R.Ya., Burkova N.A., **Yelesheva V.M.** Astrophysical S -factor and reaction rate for ${}^{15}\text{N}(p,\gamma){}^{16}\text{O}$ within the modified potential cluster model // *Chinese Physics C*. – 2024. – Vol. 48. – 044104.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из Введения, пяти разделов, Заключение, списка использованной литературы. Диссертация содержит 29 рисунков и 22 таблицы. Список использованной литературы состоит из 196 наименований. Диссертация изложена на 105 страницах печатного текста.