

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»»

УДК 524.86

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
НУКЛЕОСИНТЕЗ В ЗВЕЗДАХ

Научный руководитель
(проф., д.ф.-м.н., доц.)

_____ А. Л. Барабанов

Студент

_____ А. К. Григорьев

Москва 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1 Перевод статьи	3
1.1 Постановка задачи	3
1.2 Перевод текста	3
1.2.1 Краткий пересказ основного содержания статьи	3
1.2.2 Введение	3
1.2.3 Стадии звездного горения	3
1.2.4 s-процесс	4
1.2.5 i-процесс	4
1.2.6 r-процесс	4
1.2.7 p-процесс	4
2 Проблемы машинного перевода	4
3 Оценка скорости реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ в ядре массивной звезды (AGB) во время фаз горения гелия и углерода	5
3.1 Обоснование	5
3.1.1 Цикл образования ^{22}Ne	5
3.2 Постановка задачи	5
3.3 Исходные данные для фазы горения He	5
3.3.1 Температура и плотность	5
3.3.2 Концентрации по массе	6
3.4 Исходные данные для фазы горения C	6
3.4.1 Температура и плотность	6
3.4.2 Концентрации по массе	6
3.5 Параметры реакции	6
3.5.1 Заряды и массовые числа	6
3.5.2 Приведённая масса	6
3.6 Решение для фазы горения He	7
3.6.1 Формула для скорости реакции	7
3.6.2 Расчёт параметра τ	7
3.6.3 Определение фактора φ	7
3.6.4 Ширина реакции Г	8
3.6.5 Численный расчёт скорости r	8
3.6.6 Средняя скорость нейтронов	8
3.6.7 Средние сечения захвата для ядер s-процесса	8
3.6.8 Концентрации ядер-поглотителей	8
3.6.9 Суммарный захват	8
3.6.10 Концентрация нейтронов	9
3.6.11 Результат для области горения He	9
3.7 Резонансный случай в фазе горения гелия ($T_9 = 0.3$)	9
3.7.1 Энергия резонанса E_r	9
3.7.2 Экспоненциальный множитель $e^{-E_r/kT}$	9
3.7.3 Парциальная ширина Γ_α	9
3.7.4 Численный расчет	10

3.8	Концентрация нейтронов при резонансе	10
3.8.1	Результат для области горения Не в резонансном случае	10
3.9	Расчет для области горения углерода	10
3.9.1	Перерасчет параметра τ	10
3.9.2	Перерасчет скорости для области горения С	10
3.9.3	Средняя скорость нейтронов в фазе углерода	11
3.9.4	Средние сечения захвата для ядер s-процесса	11
3.9.5	Концентрации ядер-поглотителей	11
3.9.6	Концентрация нейтронов	11
3.9.7	Результат для области горения С	11
3.10	Резонансный случай в фазе горения углерода ($T_9 = 2$)	11
3.10.1	Экспоненциальный множитель $e^{-E_r/kT}$	11
3.10.2	Численный расчет	11
3.10.3	Концентрация нейтронов при резонансе	12
3.10.4	Результат для области горения С в резонансном случае	12
4	Заключение	13
5	Библиография	14

1. ПЕРЕВОД СТАТЬИ

1.1 Постановка задачи

Настоящая работа выполнена в рамках задания по подготовке перевода на русский язык научной статьи и его оформлению в соответствии с требованиями для последующего использования.

Для перевода выбрана следующая статья:

- Автор: S. Goriely.
- Название: "Nuclear properties for nuclear astrophysics studies".
- Выходные данные: *The European Physical Journal A* (2023) 59:16.
- DOI:<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-023-00931-x>

Требования: выполнение перевода текста статьи на русский язык с последующим оформлением .tex-файла. Включить в документ рисунки из оригинальной статьи и списком литературы на языке оригинала.

1.2 Перевод текста

Выполнен частичный перевод основного текста статьи.

1.2.1 Краткий пересказ основного содержания статьи

Статья посвящена критической проблеме ядерной астрофизики обеспечения моделей астрофизических процессов относительно точными параметрами реакций в почти полном отсутствии экспериментальных данных.

1.2.2 Введение

Происхождение почти всех нуклидов и механизмы энерговыделения в звездах основаны на ядерных процессах. В основном на, так называемых, термоядерных реакциях в недрах звезд и при Большом Взрыве и нетепловых реакциях скальвания (spallation), инициируемых космическими лучами. Особое внимание уделяется процессам синтеза элементов тяжелее железа: s-процесс, i-процесс, g-процесс и p-процесс. Подчеркивается, что моделирование, особенно g-процесса, требует данных о большом нестабильных ядер.

1.2.3 Стадии звездного горения

Эволюция центральных областей звезд представлена как последовательность стадий термоядерного горения, при котором устанавливаются механическое и энергетическое равновесие, разделенных фазами медленного гравитационного сжатия, приводящими к резкому росту температуры. Термоядерные стадии сопровождаются выработкой энергии и изменением состава ядра звезды. Последовательность развивается с ядерным топливом, зарядовое число которого растет, при температурах от десятков миллионов до примерно четырех миллиардов кельвинов. При этом продолжительность фаз горения сокращается из-за снижения выработки энергии на поздних стадиях и роста нейтринных потерь энергии при температурах выше примерно 500 миллионов кельвинов.

1.2.4 s-процесс

Медленны процесс захватят нейтронов. Ядра медленно захватывают нейтроны. После захвата ядро становится нестабильным. Тогда происходит β -распад, превращая один нейтрон в протон. Это медленный процесс, который происходит в спокойных, долгоживущих звездах, например, в красных гигантах. Данный процесс объясняет происхождение стабильных нуклидов тяжелее железа, расположенных в долине ядерной стабильности. В качестве возможных источников нейтронов рассматриваются две ядерные реакции: $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ и $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$. В массивных звездах (тяжелее 10 солнечных масс) s-нуклиды производятся в основном в гелиевых ядрах и, в некоторой степени, в углеродных оболочках через реакцию $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$.

1.2.5 i-процесс

i-процесс рассматривается как промежуточное звено между s- и r-процессами с концентрациями нейтронов примерно от 10^{13} до 10^{16} нейтронов на кубический сантиметр. Механизм, ответственный за такую продукцию, — это попадание протонов в гелиевые- и углеродно-богатые слои, что приводит к производству ^{13}C с последующим существенным выходом нейтронов через $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$.

1.2.6 r-процесс

Ядра захватывают десятки нейтронов подряд, быстрее, чем успевают распасться. Ставятся сверхтяжелыми и очень нейтронизбыточными. Когда поток нейтронов иссякает, неустойчивые ядра начинают долго и массово распадаться, в результате образуя стабильные тяжелые элементы, в том числе золото, уран и торий. Современное моделирование показывает трудности в получении подходящих условий для полноценного r-процесса в нейтринно-управляемом ветре без подгонки параметров. Считается, что r-процесс в NSM успешно воспроизводит солнечное распределение тяжелых элементов.

1.2.7 p-процесс

p-процесс направлен на объяснение происхождения стабильных нуклидов тяжелее железа с малым числом нейтронов по сравнению с протонами. Происходит реакциями (γ, n) , (γ, p) , (γ, α) на уже синтезированных s- и r-ядрах при характерных температурах порядка $2 - 3 \times 10^9$ К.

2. ПРОБЛЕМЫ МАШИННОГО ПЕРЕВОДА

Основные проблемы: буквализм и неадекватность в передаче научных терминов и конструкций. Машинные переводчики стремятся к дословному соответству, что в научном тексте приводит к грубым ошибкам, а также слепое копирование нетекстовых элементов и служебной информации.

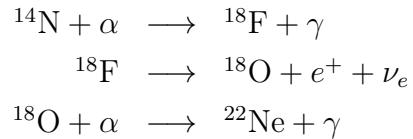
3. ОЦЕНКА СКОРОСТИ РЕАКЦИИ $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ В ЯДРЕ МАССИВНОЙ ЗВЕЗДЫ (AGB) ВО ВРЕМЯ ФАЗ ГОРЕНИЯ ГЕЛИЯ И УГЛЕРОДА

3.1 Обоснование

Одним из основных источников нейтронов для s-процесса, ключевого механизма синтеза элементов от стронция до свинца в массивных звёздах и AGB-звездах, предполагается реакция $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$. Эффективность этого процесса, а значит, и предсказание обилий s-нуклидов, прямо зависит от точного знания нейтронного потока, создаваемого данной реакцией в специфических звёздных условиях. Однако экспериментальная недоступность создаёт пробел в параметрах реакции, который может быть восполнен теоретическим моделированием.

3.1.1 Цикл образования ^{22}Ne

В зоне горения гелия после выгорания водорода ^{22}Ne образуется через последовательность реакций:



Итого:



3.2 Постановка задачи

Рассматривается реакция $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ в областях горения Не и С, которые и предполагаются основным местом протекания этой реакции, в достаточно массивной звезде. Необходимо определить скорости реакции в резонансном и нерезонансном случаях для обоих областей, определить выход нейтронов для оценки эффективности реакции как источник топлива для s-процесса.

Выражения для нахождения скоростей реакций, а также логика построения расчета, может быть найдена в статьях [3, 4, 5]. Значения сечений для оценок взяты с базы данных KADoNiS [5].

3.3 Исходные данные для фазы горения Не

3.3.1 Температура и плотность

- **Температура:** $T = 3 \times 10^8 \text{ К}$ или же $T_9 = \frac{T}{10^9} = 0.3 \text{ K}$.
Это значение соответствует фазе горения гелия в массивных звёздах.
- **Плотность в фазе горения Не:** $\rho = 10^4 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

3.3.2 Концентрации по массе

- **Концентрация ^{22}Ne :** $x(^{22}\text{Ne}) = 10^{-3}$. ^{22}Ne образуется в CNO-цикле через $^{14}\text{N}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}(\beta^+)^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$. В зоне горения Не его содержание может достигать $\sim 0.1\%$ по массе.
- **Концентрация α -частиц:** $x_\alpha = 0.1$. В зоне горения Не гелий является основным горючим. Его концентрация уменьшается по мере выгорания, но для оценки можно взять значение $\sim 10\%$ по массе (остальное – ^{12}C , ^{16}O , тяжелые элементы).

3.4 Исходные данные для фазы горения С

3.4.1 Температура и плотность

- **Температура:** $T = 2 \times 10^9 \text{ К}$ или же $T_9 = \frac{T}{10^9} = 2 \text{ K}$.
Это значение соответствует фазе горения углерода во внешних оболочках массивных звёздах.
- **Плотность в фазе горения С:** $\rho = 3 \times 10^5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

3.4.2 Концентрации по массе

- **Концентрация ^{22}Ne :** $x(^{22}\text{Ne}) = 10^{-2}$. ^{22}Ne накоплен в предыдущей фазе Не-горения.
- **Концентрация α -частиц:** $x_\alpha = 0.001$. Для оценки можно взять значение $\sim 0.1\%$ по массе (остальное – ^{12}C , ^{16}O и т.д.).

3.5 Параметры реакции

3.5.1 Заряды и массовые числа

$$\begin{aligned}Z_1 &= 10 \quad (\text{заряд } ^{22}\text{Ne}) \\Z_2 &= 2 \quad (\text{заряд } \alpha\text{-частицы}) \\A_1 &= 22 \quad (\text{массовое число } ^{22}\text{Ne}) \\A_2 &= 4 \quad (\text{массовое число } \alpha\text{-частицы})\end{aligned}$$

3.5.2 Приведённая масса

Приведённая масса в атомных единицах массы (m):

$$\mu = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} \cdot m$$

Численно:

$$A = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} = \frac{22 \cdot 4}{22 + 4} \approx 3.3846$$

Таким образом, $\mu \approx 3.3846 m$, где $m = 1.660539 \times 10^{-24} \text{ г}$.

3.6 Решение для фазы горения Не

3.6.1 Формула для скорости реакции

Число реакций на грамм вещества в секунду:

$$p = 5.3 \times 10^{25} \rho x_1 x_2 \Gamma \varphi(Z_1, Z_2, A) \tau^2 e^{-\tau} \text{ г}^{-1} \text{с}^{-1}$$

где:

- ρ - плотность $[\frac{\text{г}}{\text{см}^3}]$
- x_1, x_2 - концентрации по массе двух реагирующих ядер
- Γ - эффективная ширина реакции [эВ]
- $\varphi(Z_1, Z_2, A)$ - кулоновский фактор
- τ - параметр, определяющий вероятность подбарьерного проникновения

3.6.2 Расчёт параметра τ

$$\tau = 42.7 \left(\frac{Z_1^2 Z_2^2 A}{1000 T_9} \right)^{1/3}$$

Число 42.7 получается из комбинации констант e, \hbar, k, m .

Подставляем:

$$\begin{aligned} Z_1^2 Z_2^2 A &= 10 \cdot 2 \cdot 3.3846 = 1353.84 \\ \frac{Z_1^2 Z_2^2 A}{1000 T_9} &= \frac{1353.84}{300} \approx 4.5128 \\ \left(\frac{Z_1^2 Z_2^2 A}{1000 T_9} \right)^{1/3} &\approx 1.653 \\ \tau &= 42.7 \cdot 1.653 \approx 70.56 \end{aligned}$$

3.6.3 Определение фактора φ

$$\varphi = \frac{1}{A_1 A_2 (Z_1 Z_2 A)^3} \left(\frac{8R}{a} \right)^2 e^{2(\frac{8R}{a})^{1/2}}$$

где:

- R - суммарный радиус двух ядер:

$$R = 1.6 \times 10^{-13} (A_1 + A_2)^{\frac{1}{3}} \text{ см}$$

- a - боровский радиус системы:

$$a = \frac{\hbar^2}{\mu e^2 Z_1 Z_2}$$

Для $Z_1 Z_2 = 20$ и $A \sim 3.38$ значение φ примем 7.5

3.6.4 Ширина реакции Γ

Для нерезонансного радиационного захвата Γ можно выразить как:

$$\Gamma = \Gamma_\gamma \cdot P_{\text{нукл}}$$

где Γ_γ - ширина γ -распада составного ядра, а $P_{\text{нукл}}$ - вероятность того, что составное ядро распадётся именно путём испускания нейтрона, а не, например, протона.

Для Γ_γ : Из статьи Гамова-Теллера $\Gamma_\gamma \geq 10^{+14} \text{с}^{-1}$, что в единицах энергии $\sim 0.1 \text{ эВ}$.

Для $P_{\text{нукл}}$: Для реакции (α, n) вероятность испускания нейтрона может быть порядка 0.1-1.

Итоговая оценка: $\Gamma \approx 10^{-2} \text{ эВ}$.

3.6.5 Численный расчёт скорости p

Подстановка дает:

$$\begin{aligned} p &= 5.3 \times 10^{25} \cdot \rho \cdot x_1 x_2 \cdot \Gamma \cdot \varphi \cdot \tau^2 e^{-\tau} \\ p &\approx 5.3 \times 10^{25} \cdot 10^4 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-2} \cdot 7.5 \cdot 4.98 \times 10^3 \cdot 2.27 \times 10^{-31} \\ p &\approx 4.49 \times 10^{-3} \approx 4.5 \times 10^{-3} \text{ г}^{-1} \text{с}^{-1} \end{aligned}$$

3.6.6 Средняя скорость нейtronов

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_n}} \approx 3.0 \times 10^7 \text{ см/с.}$$

3.6.7 Средние сечения захвата для ядер s-процесса

Для температуры $T_9 = 0.3$ характерные сечения захвата нейtronов для ядер от железа до висмута можно оценить сверху с учетом их относительной концентрации в фазе гелия, тогда для упрощения оценки можно взять:

$$\langle \sigma \rangle \approx 10^{-25} \text{ см}^2.$$

3.6.8 Концентрации ядер-поглотителей

Для гелиевой фазы ($\rho = 10^4 \text{ г/см}^3$):

$$n_{\text{ядер}} \approx \frac{\rho \cdot x_{\text{ядер}}}{A \cdot m} \approx \frac{10^4 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 1.66 \times 10^{-24}} \approx 1 \times 10^{23} \text{ см}^{-3},$$

3.6.9 Суммарный захват

$$\sum_i \sigma_i n_i \approx \langle \sigma \rangle \cdot n_{\text{ядер}}.$$

3.6.10 Концентрация нейтронов

$$n_n = \frac{p \cdot \rho}{\sum_i \sigma_i n_i \cdot v}$$

где σv - скорость захвата нейтронов, $n_{ядер}$ - концентрация ядер, захватывающих нейтрон.

$$n_n = \frac{45}{10^{-2} \cdot 3 \times 10^7} = 15 \times 10^{-5} \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^3}$$

3.6.11 Результат для области горения Не

Это означает, что при температуре $T_9 = 0.3$ К нерезонансная реакция $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ практически не вносит вклад в s-процесс, для которого n_n необходима хотя бы порядка $10^6 \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^3}$ [1].

3.7 Резонансный случай в фазе горения гелия ($T_9 = 0.3$)

Оценим скорость реакции в резонансном случае для резонанса при энергии E_r :

$$p_{рез} = 5.3 \times 10^{25} \rho x_1 x_2 \Gamma_\alpha \varphi e^{-E_r/kT} [\text{Г}^{-1}\text{с}^{-1}]$$

где Γ_α - парциальная ширина.

3.7.1 Энергия резонанса E_r

Экспериментальный резонанс реакции: $E_r = 0.706$ МэВ.

Принимаем $E_r = 0.7$ МэВ.

3.7.2 Экспоненциальный множитель $e^{-E_r/kT}$

$$\frac{E_r}{kT} = \frac{0.7}{0.025852} = 27.3$$

Вычисляем экспоненту: $e^{-E_r/kT} = 1.39 \times 10^{-12}$

3.7.3 Парциальная ширина Γ_α

$\Gamma_\alpha = \Gamma_{рез} \cdot P_\alpha$, где P_α - проницаемость кулоновского барьера. Проницаемость по выражению Гамова:

$$P_\alpha \approx e^{-\frac{2\pi Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v}}$$

Скорость α -частицы при $E_r = 0.7$ МэВ:

$$\mu = Am = 3.384615 \times 1.660539 \times 10^{-24} = 5.619 \times 10^{-24} \text{ г}$$

$$E_r^{\text{эрг}} = 0.7 \times 1.602176 \times 10^{-6} = 1.1215 \times 10^{-6} \text{ эрг}$$

$$v = \sqrt{\frac{2E_r^{\text{эрг}}}{\mu}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.1215 \times 10^{-6}}{5.619 \times 10^{-24}}} = \sqrt{3.992 \times 10^{17}} = 6.318 \times 10^8 \text{ см/с}$$

$$\frac{v}{c} = \frac{6.318 \times 10^8}{2.9979 \times 10^{10}} = 0.021076$$

Тогда проницаемость $P_\alpha = 1.299 \times 10^{-19}$

Принимаем $P_\alpha = 1.3 \times 10^{-19}$. Ширина реакции при резонансе $\Gamma_{\text{рез}} = 20 \text{ кэВ}$, тогда:

$$\Gamma_\alpha = \Gamma_{\text{рез}} \cdot P_\alpha = 2.6 \times 10^{-15} \text{ эВ}$$

3.7.4 Численный расчет

Тогда подстановка дает:

$$p_{\text{рез}} = 5.3 \times 10^{25} \cdot 2.6 \times 10^{-15} \cdot 10^4 \cdot 10^{-4} \cdot 7.5 \cdot 1.39 \times 10^{-12}$$

$$p_{\text{рез}} = 1.436 \approx 1.44 \text{ г}^{-1}\text{с}^{-1}$$

3.8 Концентрация нейтронов при резонансе

$$n_n = \frac{1.44 \times 10^4}{10^{-2} \cdot 3 \times 10^7} = 0.05 \frac{\text{нейtron}}{\text{см}^3}$$

3.8.1 Результат для области горения Не в резонансном случае

При температуре горения гелия ($T_9 = 0.3$) резонансная скорость реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ все равно не дает достаточной концентрации нейтронов для полноценного s-процесса.

3.9 Расчет для области горения углерода

3.9.1 Перерасчет параметра τ

$$\tau = 42.7 \left(\frac{Z_1^2 Z_2^2 A}{1000 T_9} \right)^{1/3}$$

Подставляем:

$$Z_1^2 Z_2^2 A = 10 \cdot 2 \cdot 3.3846 = 1353.84$$

$$\frac{Z_1^2 Z_2^2 A}{1000 T_9} = \frac{1353.84}{2000} \approx 0.677$$

$$\left(\frac{Z_1^2 Z_2^2 A}{1000 T_9} \right)^{1/3} \approx 0.87804$$

$$\tau = 42.7 \times 0.87804 \approx 37.49$$

3.9.2 Перерасчет скорости для области горения С

Подстановка дает:

$$p = 5.3 \times 10^{25} \cdot \rho \cdot x_1 x_2 \cdot \Gamma \cdot \varphi \cdot \tau^2 e^{-\tau}$$

$$p \approx 5.3 \times 10^{25} \cdot 3 \times 10^5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-2} \cdot 7.5 \cdot 1.406 \times 10^3 \cdot 5.227 \times 10^{-17}$$

$$p \approx 8.76 \times 10^{11} \approx 8.8 \times 10^{11} \text{ г}^{-1}\text{с}^{-1}$$

3.9.3 Средняя скорость нейтронов в фазе углерода

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_n}} \approx 7.0 \times 10^8 \text{ см/с.}$$

3.9.4 Средние сечения захвата для ядер s-процесса

Для температуры $T_9 = 2$:

$$\langle \sigma \rangle \approx 10^{-25} \cdot \frac{0.3^{1/2}}{2^{1/2}} \text{ см}^2 \approx 3.9 \times 10^{-26} \text{ см}^2.$$

3.9.5 Концентрации ядер-поглотителей

Для гелиевой фазы ($\rho = 3 \times 10^5 \text{ г/см}^3$):

$$n_{\text{ядер}} \approx \frac{\rho \cdot x_{\text{ядер}}}{A \cdot m} \approx \frac{3 \times 10^5}{15 \cdot 1.66 \times 10^{-24}} \approx 1.2 \times 10^{28} \text{ см}^{-3},$$

3.9.6 Концентрация нейтронов

$$n_n = \frac{2.6 \times 10^{17}}{4.8 \times 10^2 \cdot 7 \times 10^8} = 0.7 \times 10^6 \frac{\text{нейtron}}{\text{см}^3}$$

3.9.7 Результат для области горения С

При температуре $T_9 = 2 \text{ К}$ нерезонансная реакция $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ вносит вклад в s-процесс по практически нижней границе диапазона концентрации нейтронов порядка $10^6 \frac{\text{нейtron}}{\text{см}^3}$.

3.10 Резонансный случай в фазе горения углерода ($T_9 = 2$)

3.10.1 Экспоненциальный множитель $e^{-E_r/kT}$

$$\begin{aligned} \frac{E_r^1}{kT} &= \frac{0.7}{0.17234} = 4.06 \\ \frac{E_r^2}{kT} &= \frac{1.0}{0.17234} = 5.8 \end{aligned}$$

Вычисляем экспоненты:

$$e^{-E_r/kT} = 1.724 \times 10^{-2}$$

$$e^{-E_r/kT} = 3.03 \times 10^{-3}$$

3.10.2 Численный расчет

Тогда подстановка дает:

$$p_{\text{рез}}^1 = 5.3 \times 10^{25} \cdot 2.6 \times 10^{-12} \cdot 3 \times 10^5 \cdot 10^{-5} \cdot 7.5 \cdot 1.724 \times 10^{-2}$$

$$p_{\text{рез}}^2 = 5.3 \times 10^{25} \cdot 1.57 \times 10^{-13} \cdot 3 \times 10^5 \cdot 10^{-5} \cdot 7.5 \cdot 3.03 \times 10^{-3}$$

$$p_{\text{рез}}^1 = 5.345 \times 10^{13} \approx 5.35 \times 10^{13} \text{ г}^{-1}\text{с}^{-1}$$

$$p_{\text{рез}}^1 = 1.87 \times 10^{13} \approx 1.9 \times 10^{13} \text{ г}^{-1}\text{с}^{-1}$$

$$p = p^1 + p^2 = 7.3 \times 10^{13} \text{ г}^{-1}\text{с}^{-1}$$

3.10.3 Концентрация нейтронов при резонансе

$$n_n = \frac{2.19 \times 10^{19}}{4.8 \times 10^2 \cdot 7 \times 10^8} = 6.5 \times 10^7 \frac{\text{нейtron}}{\text{см}^3}$$

3.10.4 Результат для области горения С в резонансном случае

При температуре горения углерода ($T_9 = 2$) резонансная скорость реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ дает достаточную концентрации нейтронов для полноценного s-процесса, что свидетельствует о преимуществе резонансной реакции в области горения С над нерезонансной в области С или резонансной и нерезонансной реакциями в области горения Не

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен частичный перевод статьи S. Goriely (2023), определены основные проблемы, связанные с машинным переводом.

Проведена оценка скорости реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ и концентрации нейтронов, генерируемых этой реакцией, в различных астрофизических условиях. Результаты показали, что в условиях горения гелия реакция является крайне неэффективным источником нейтронов для s-процесса. Это справедливо как для нерезонансного механизма протекания реакции, так и для резонансного. В то же время, в условиях горения углерода ситуация кардинально меняется. Даже нерезонансный механизм приводит к генерации достаточной для активации s-процесса концентрации нейтронов. Резонансный случай, существенно усиливающий сечение реакции, обеспечивает значительно более высокий нейтронный поток, что может приводить к заметному обогащению s-процесса и синтезу более тяжёлых нуклидов. Таким образом, основным астрофизическим местом для эффективной работы реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ в качестве нейтронного источника являются углеродно-горящие зоны массивных звёзд, а не гелиевые. Безусловно данная оценка достаточно груба и не учитывает вклады многих факторов, как иные источники нейтронов, и, вероятно, всех ядер, захватывающих нейтроны, в этих областях горения, однако качественно все же описывает условия, необходимые для моделирования s-процесса таким образом.

5. БИБЛИОГРАФИЯ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Goriely, *Nuclear properties for nuclear astrophysics studies*, Eur. Phys. J. A **59**, 16 (2023). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-023-00931-x>.
2. F. Käppeler, R. Gallino, S. Bisterzo, W. Aoki, *The s Process: Nuclear Physics, Stellar Models, Observations*, Rev. Mod. Phys. **83**, 157–193 (2011). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.157>.
3. H. A. Bethe, Energy production in stars, *Phys. Rev.* **55**, 434 (1939). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.434>.
4. G. Gamow and E. Teller, The rate of selective thermonuclear reactions, *Phys. Rev.* **53**, 608 (1938). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.53.608>.
5. KADoNiS – Karlsruhe Astrophysical Database of Nucleosynthesis in Stars, v0.3. URL: <https://www.kadonis.org/>.
6. Iliadis C. *Nuclear Physics of Stars*. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2015.