

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

<b>1</b>	<b>Перевод статьи</b>	<b>3</b>
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
<b>2</b>	<b>Проблемы машинного перевода</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Оценка скорости реакции <math>^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}</math> в ядре массивной звезды (AGB) во время фаз горения гелия и углерода</b>	<b>5</b>
3.1	Обоснование	5
3.1.1	Цикл образования $^{22}\text{Ne}$	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 $\tau$	7
3.6.3	Определение фактора $\varphi$	7
3.6.4	Ширина реакции $\Gamma$	8
3.6.5	Численный расчёт скорости $p$	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 $\Gamma_\alpha$	9
3.7.4	Численный расчет	10

3.8	Концентрация нейтронов при резонансе . . . . .	10
3.8.1	Результат для области горения He в резонансном случае . . . . .	10
3.9	Расчет для области горения углерода . . . . .	10
3.9.1	Перерасчет параметра $\tau$ . . . . .	10
3.9.2	Перерасчет скорости для области горения C . . . . .	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 C . . . . .	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 C в резонансном случае . . . . .	12
4	<b>Заключение</b>	<b>13</b>
5	<b>Библиография</b>	<b>14</b>

# 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 список 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 энергосвечения в звездах основаны на ядерных процессах. В основном на, так называемых, термоядерных реакциях в недрах звезд и при Большом Взрыве и нетепловых реакциях скалывания (spallation), инициируемых космическими лучами. Особое внимание уделяется процессам синтеза элементов тяжелее железа: s-процесс, i-процесс, r-процесс и p-процесс. Подчеркивается, что моделирование, особенно r-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

Медленный процесс захвата нейтронов. Ядра медленно захватывают нейтроны. После захвата ядро становится нестабильным. Тогда происходит  $\beta$ -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 гелиево- и углеродно-богатые слои, что приводит к производству  $^{13}\text{C}$  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. Становятся сверхтяжелыми и очень нейтроноизбыточными. 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  $((\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, \alpha))$  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 соответствию, что в научном тексте приводит к грубым ошибкам, а также слепое копирование нетекстовых элементов и служебной информации.

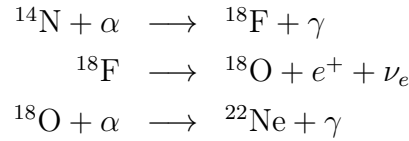
# 3. ОЦЕНКА СКОРОСТИ РЕАКЦИИ $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ В ЯДРЕ МАССИВНОЙ ЗВЕЗДЫ (AGB) ВО ВРЕМЯ ФАЗ ГОРЕНИЯ ГЕЛИЯ И УГЛЕРОДА

## 3.1 Обоснование

Одним из основных источников нейтронов для s-процесса, ключевого механизма синтеза элементов от стронция до свинца в массивных звёздах и AGB-звёздах, 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 $^{22}\text{Ne}$

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



Итого:



## 3.2 Постановка задачи

Рассматривается реакция  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$  в областях горения He и C, которые и предполагаются основным местом протекания этой реакции, в достаточно массивной звезде. Необходимо определить скорости реакции в резонансном и нерезонансном случаях для обеих областей, определить выход нейтронов для оценки эффективности реакции как источника 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 He

### 3.3.1 Температура и плотность

- **Температура:**  $T = 3 \times 10^8 \text{ K}$  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 He:**  $\rho = 10^4 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ .

### 3.3.2 Концентрации по массе

- **Концентрация  $^{22}\text{Ne}$ :**  $x(^{22}\text{Ne}) = 10^{-3}$ .  $^{22}\text{Ne}$  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 He его содержание может достигать  $\sim 0.1\%$  по массе.
- **Концентрация  $\alpha$ -частиц:**  $x_\alpha = 0.1$ . В зоне горения He гелий является основным горючим. Его концентрация уменьшается по мере выгорания, но для оценки можно взять значение  $\sim 10\%$  по массе (остальное —  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ , тяжелые элементы).

## 3.4 Исходные данные для фазы горения C

### 3.4.1 Температура и плотность

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

### 3.4.2 Концентрации по массе

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

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

### 3.6.2 Расчёт параметра $\tau$

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

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

Подставляем:

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

$$\frac{Z_1^2 Z_2^2 A}{1000 T_9} = \frac{1353.84}{300} \approx 4.5128$$

$$\left( \frac{Z_1^2 Z_2^2 A}{1000 T_9} \right)^{1/3} \approx 1.653$$

$$\tau = 42.7 \cdot 1.653 \approx 70.56$$

### 3.6.3 Определение фактора $\varphi$

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

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  $\varphi$  примем 7.5



### 3.6.4 Ширина реакции $\Gamma$

Для нерезонансного радиационного захвата  $\Gamma$  можно выразить как:

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

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

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

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

Итоговая оценка:  $\Gamma \approx 10^{-2}$  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 нейтронов

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

### 3.6.7 Средние сечения захвата для ядер s-процесса

Для температуры  $T_9 = 0.3$  характерные сечения захвата нейтронов 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  $\sigma v$  - скорость захвата нейтронов,  $n_{\text{ядер}}$  - 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 He

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  $E_r$ :

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

где  $\Gamma_\alpha$  - 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 $\Gamma_\alpha$

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

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

Скорость  $\alpha$ -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  $\Gamma_{\text{рез}} = 20$  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

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

### 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 $\tau$

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

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

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

### 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  $10^6 \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^3}$ .

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

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

$$\frac{E_r^1}{kT} = \frac{0.7}{0.17234} = 4.06$$

$$\frac{E_r^2}{kT} = \frac{1.0}{0.17234} = 5.8$$

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

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

### 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 переевод 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.