

P10-2002-192

П. Шаланьски<sup>1</sup>, М. Стемпиньски<sup>1</sup>, Ю. Марганец<sup>1</sup>,  
Ю. М. Гледенов, П. В. Седышев, Р. Машрафи, А. Опря,  
И. Падуреану<sup>2</sup>, Д. Арангхэль<sup>2</sup>

**ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ОБЛАСТИ СЕРЫ  
И ХЛОРА ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЕРОДА  
В МАССИВНЫХ ЗВЕЗДАХ.  
ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ  
В МОДЕЛИРОВАНИИ СЕТИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ**

---

<sup>1</sup>Лодзинский университет, Польша

<sup>2</sup>Институт физики и ядерной техники, Бухарест

## ***Введение***

Массивные звезды, заканчивающие свою жизнь взрывом сверхновой, играют ключевую роль в развитии Вселенной. Они поставляют материал для рождения новых звезд и галактик и создают элементы, необходимые для жизни человека. После взрыва из их остатков образуются такие экзотические объекты как нейтронные звезды и черные дыры. Поэтому процессы нуклеосинтеза, которые в них происходят, являются предметом многолетних исследований ядерной астрофизики.

Настоящая работа является продолжением работ по моделированию нуклеосинтеза в звездах массой  $25M_{\odot}$ . В [1,2] был проведен расчет образования элементов в области  $S-CI$  под действием нейтронов ( $s$ -процесс) на стадии гидростатического горения гелия. Задачей данной работы является анализ фазы горения углерода, в частности астрофизическая интерпретация новых экспериментальных данных, полученных в работе [3], которые не учитывали работы [4,5]. Мы также хотели проверить возможности используемой компьютерной системы, для чего к уравнениям, описывающим сеть реакций рис. 1, были добавлены уравнения для определения основных ветвей  $s$ -процесса в производстве  $^{36}S$  и вычисления интегральных потоков учитываемых реакций. В нашей работе мы не занимаемся физическими процессами, происходящими в таких звездах [6], для расчетов нуклеосинтеза принимаем модель, описанную в работах [7,8] с некоторыми упрощениями, принятыми в работах [4,5]. Поскольку горение углерода выступает после горения гелия, представляем результаты, полученные для обеих стадий.

## ***Характеристика анализируемой звездной среды***

Основные условия горения гелия описаны в работе [1]. Горение углерода в звездах массой  $25M_{\odot}$  происходит в относительно стабильных условиях, а сам процесс детально изложен в [8]. Прежде всего, на протяжении этой фазы эволюции, в течение приблизительно 0.66 года, в рассматриваемом объеме звезды

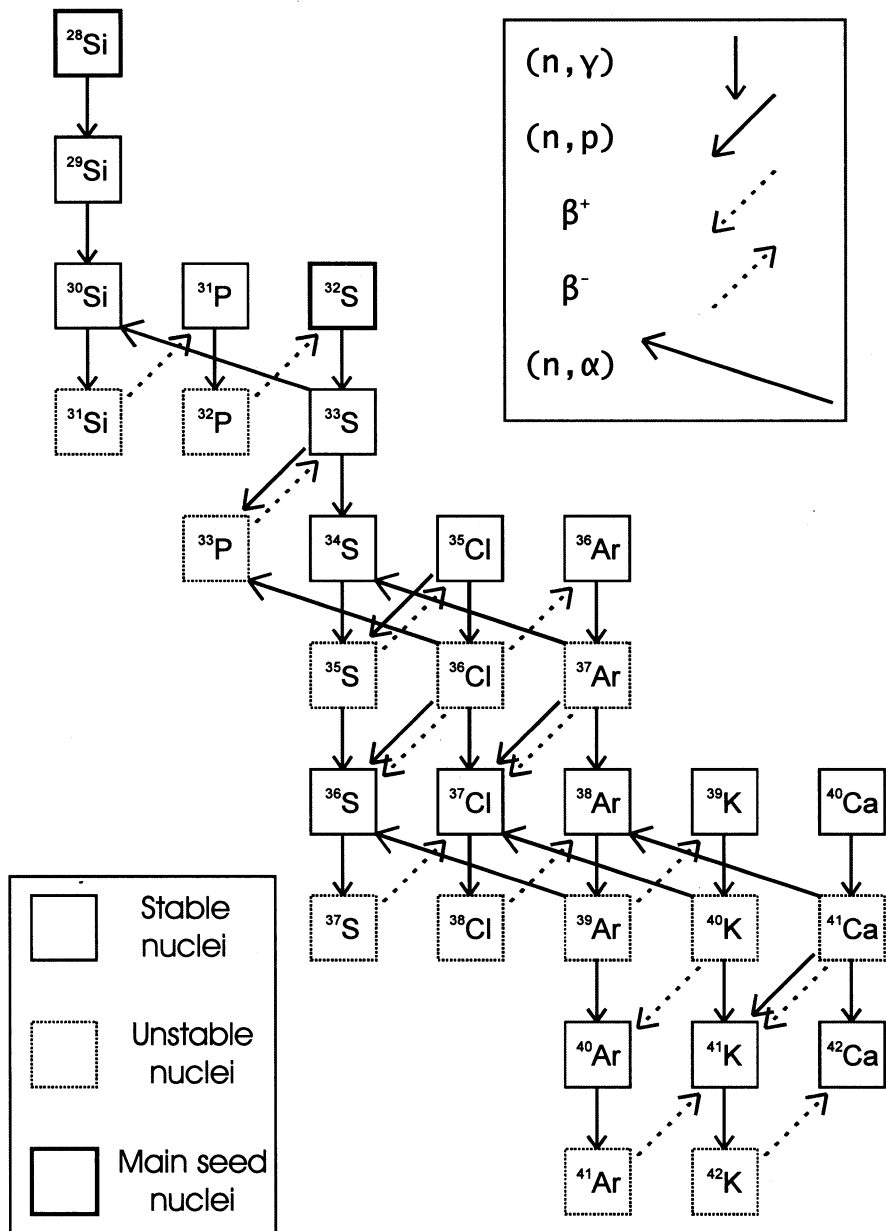


Рис. 1. Сетка реакций, используемая в расчетах

температура практически не меняется и соответствует  $kT=86$  кэВ. Начальная распространенность изотопов соответствует распространенности нуклидов после окончания горения гелия. Реакции с заряженными частицами на стадиях гидростатического горения  $C$  практически не изменяют распространенность зародышевых элементов. Кроме рассматриваемых изотопов (рис.1) для анализа такой среды основное значение имеют только два дополнительных фактора: постоянная, высокая плотность электронов, порядка  $3 \cdot 10^{28} \text{ см}^{-3}$ , которая может существенно менять время жизни нестабильных нуклидов [9], и уменьшающаяся со временем плотность нейтронов (рис. 2). Как видно, суммарные нейтронные экспозиции во время горения гелия и углерода остаются такого же масштаба. Основным источником нейтронов на этой стадии считается реакция  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ , но и ряд других реакций с  $\alpha$ -частицами, протонами и  $^{12}\text{C}$  дает существенный вклад в производство нейтронов.

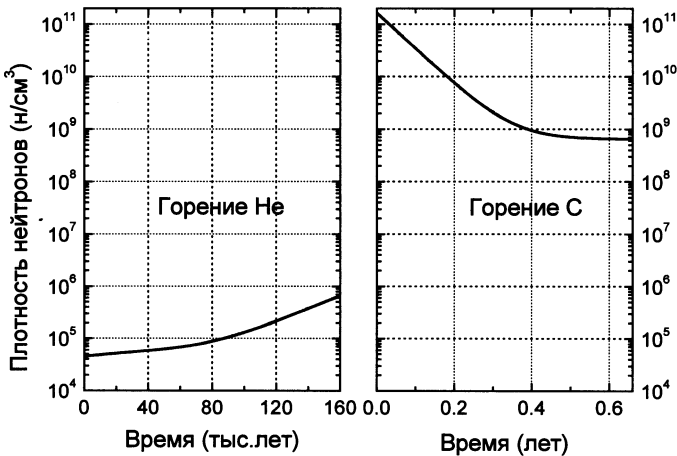


Рис. 2. Принятая в расчетах зависимость плотности нейтронов от времени

## Результаты вычислений

Полный набор данных, принятых в наших расчетах: максвелловские средние сечения (*MACS*), постоянные распадов и начальная распространенность изотопов, представлен в приложении 1, как часть используемой нами программы. Ссылки соответствуют литературе в работе [1], NACRE обозначает данные, полученные с электронной базы: <http://www-astro.ulb.ac.be>. Изменение концентрации рассматриваемых изотопов описывалось системой дифференциальных уравнений согласно сетки реакций рис. 1, задача решалась с использованием программы «Математика» (подробнее см. [1]).

Полученная нами зависимость распространенности ряда изотопов от времени при горении *He* и *C* представлена на рис. 3 и 4, факторы перепроизводства ( $N_{fin}/N_{ini}$ ,  $N_{ini} \equiv N_{\odot}$ ) для ряда изотопов после стадии горения *He* и *C* – на рис. 5, интегральный поток реакций, вызванных нейтронами, – в табл. 1, главные ветвления на пути нуклеосинтеза – в табл. 2, относительный вклад ветвей *s*-процесса в производство  $^{36}\text{S}$  – в табл. 3.

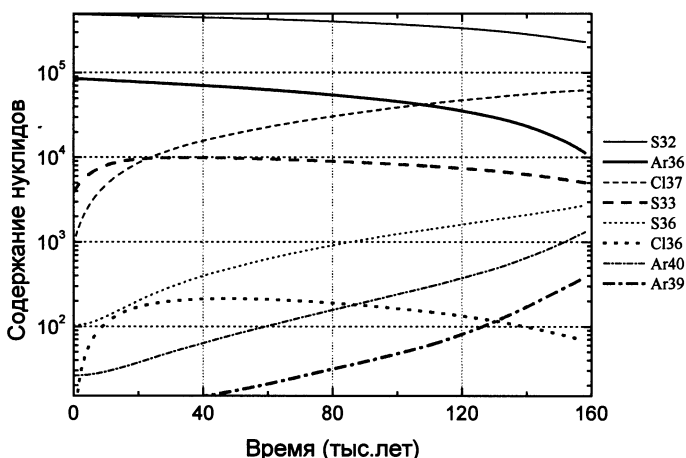


Рис. 3. Зависимость распространенности ряда изотопов от времени при горении *He*

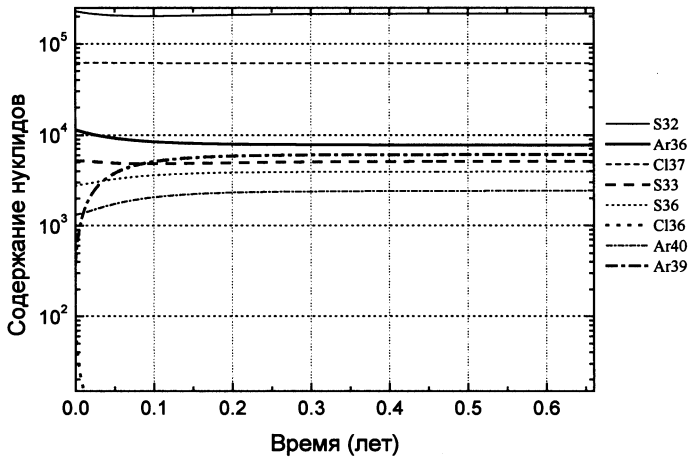


Рис. 4. Зависимость распространенности ряда изотопов от времени при горении *C*

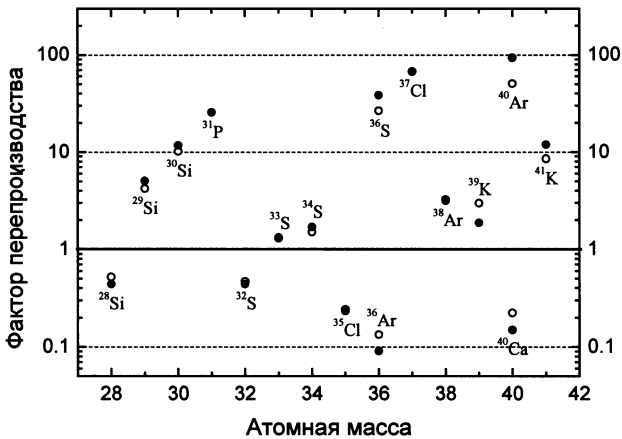


Рис. 5. Факторы перепроизводства для ряда изотопов после стадии горения *He* (○) и *C* (●)

Таблица 1. Интегральный поток реакций, вызванных нейтронами  
(начальная распространенность атомов  $Si \approx 10^6$ )

№	Тип реакции	Горение He	Горение C	Горение He и C
1	$^{28}\text{Si}(n,\gamma)$	$4.40 \cdot 10^5$	$7.71 \cdot 10^4$	$5.17 \cdot 10^5$
2	$^{29}\text{Si}(n,\gamma)$	$2.90 \cdot 10^5$	$3.80 \cdot 10^4$	$3.28 \cdot 10^5$
3	$^{30}\text{Si}(n,\gamma)$	$2.97 \cdot 10^5$	$4.21 \cdot 10^4$	$3.39 \cdot 10^5$
4	$^{31}\text{P}(n,\gamma)$	$4.32 \cdot 10^5$	$4.14 \cdot 10^5$	$8.47 \cdot 10^5$
5	$^{32}\text{S}(n,\gamma)$	$3.03 \cdot 10^5$	$5.52 \cdot 10^4$	$3.58 \cdot 10^5$
6	$^{33}\text{S}(n,\gamma)$	$1.19 \cdot 10^4$	$1.54 \cdot 10^3$	$1.34 \cdot 10^4$
7	$^{34}\text{S}(n,\gamma)$	$9.04 \cdot 10^2$	$7.70 \cdot 10^2$	$1.67 \cdot 10^3$
8	$^{35}\text{S}(n,\gamma)$	$5.20 \cdot 10^{-3}$	$5.20 \cdot 10^2$	$5.20 \cdot 10^2$
9	$^{36}\text{S}(n,\gamma)$	$6.24 \cdot 10^1$	$2.11 \cdot 10^1$	$8.35 \cdot 10^1$
10	$^{35}\text{Cl}(n,\gamma)$	$3.07 \cdot 10^3$	$2.20 \cdot 10^2$	$3.29 \cdot 10^3$
11	$^{36}\text{Cl}(n,\gamma)$	$3.41 \cdot 10^2$	$6.63 \cdot 10^0$	$3.47 \cdot 10^2$
12	$^{37}\text{Cl}(n,\gamma)$	$2.13 \cdot 10^4$	$3.76 \cdot 10^3$	$2.51 \cdot 10^3$
13	$^{36}\text{Ar}(n,\gamma)$	$7.37 \cdot 10^4$	$3.67 \cdot 10^3$	$7.73 \cdot 10^4$
14	$^{37}\text{Ar}(n,\gamma)$	$1.30 \cdot 10^{-1}$	$2.27 \cdot 10^2$	$2.27 \cdot 10^2$
15	$^{38}\text{Ar}(n,\gamma)$	$2.55 \cdot 10^4$	$7.32 \cdot 10^3$	$3.28 \cdot 10^4$
16	$^{39}\text{Ar}(n,\gamma)$	$2.48 \cdot 10^2$	$1.05 \cdot 10^3$	$1.30 \cdot 10^3$
17	$^{40}\text{Ar}(n,\gamma)$	$3.05 \cdot 10^2$	$3.48 \cdot 10^2$	$6.53 \cdot 10^2$
18	$^{39}\text{K}(n,\gamma)$	$1.79 \cdot 10^4$	$3.97 \cdot 10^3$	$2.18 \cdot 10^4$
19	$^{40}\text{K}(n,\gamma)$	$6.63 \cdot 10^3$	$1.42 \cdot 10^3$	$8.05 \cdot 10^3$
20	$^{41}\text{K}(n,\gamma)$	$6.84 \cdot 10^3$	$2.15 \cdot 10^3$	$8.98 \cdot 10^3$
21	$^{40}\text{Ca}(n,\gamma)$	$4.60 \cdot 10^4$	$4.40 \cdot 10^3$	$5.04 \cdot 10^4$
22	$^{41}\text{Ca}(n,\gamma)$	$3.90 \cdot 10^3$	$9.20 \cdot 10^2$	$4.82 \cdot 10^3$
23	$^{33}\text{S}(n,p)$	$7.70 \cdot 10^2$	$8.50 \cdot 10^2$	$1.62 \cdot 10^4$
24	$^{35}\text{Cl}(n,p)$	$5.75 \cdot 10^2$	$6.11 \cdot 10^1$	$6.36 \cdot 10^2$
25	$^{36}\text{Cl}(n,p)$	$2.59 \cdot 10^3$	$2.67 \cdot 10^2$	$2.85 \cdot 10^3$
26	$^{37}\text{Ar}(n,p)$	$7.04 \cdot 10^{-1}$	$9.94 \cdot 10^1$	$1.00 \cdot 10^2$
27	$^{40}\text{K}(n,p)$	$1.35 \cdot 10^3$	$4.11 \cdot 10^2$	$1.76 \cdot 10^3$
28	$^{41}\text{Ca}(n,p)$	$1.08 \cdot 10^3$	$1.23 \cdot 10^3$	$2.31 \cdot 10^3$
29	$^{33}\text{S}(n,\alpha)$	$2.90 \cdot 10^5$	$5.36 \cdot 10^4$	$3.44 \cdot 10^5$
30	$^{36}\text{Cl}(n,\alpha)$	$2.56 \cdot 10^1$	$2.93 \cdot 10^0$	$2.85 \cdot 10^1$
31	$^{37}\text{Ar}(n,\alpha)$	$1.91 \cdot 10^1$	$3.29 \cdot 10^3$	$3.31 \cdot 10^3$
32	$^{39}\text{Ar}(n,\alpha)$	$9.91 \cdot 10^1$	$4.44 \cdot 10^2$	$5.43 \cdot 10^2$
33	$^{40}\text{K}(n,\alpha)$	$8.34 \cdot 10^3$	$2.55 \cdot 10^3$	$1.09 \cdot 10^4$
34	$^{41}\text{Ca}(n,\alpha)$	$4.00 \cdot 10^4$	$1.74 \cdot 10^4$	$4.17 \cdot 10^4$

Таблица 2. Ветвления на пути нуклеосинтеза

Нуклид	Тип реакции	Интегральный поток (%)	
		Горение He	Горение C
<sup>33</sup> S	(n,α)	95.83	95.73
	(n,γ)	3.92	2.75
	(n,p)	0.25	1.52
<sup>35</sup> S	(β)	100.00	66.86
	(n,γ)	3.5·10 <sup>-4</sup>	33.14
<sup>35</sup> Cl	(n,γ)	84.2	78.24
	(n,p)	15.8	21.76
<sup>36</sup> Cl	(n,p)	86.09	96.55
	(n,γ)	11.35	2.39
	(β)	1.70	1.8·10 <sup>-11</sup>
<sup>39</sup> Ar	(n,α)	0.85	1.06
	(β)	98.62	7.82
	(n,γ)	0.99	64.74
	(n,α)	0.39	27.44

Таблица 3. Относительный вклад ветвей s-процесса в производство <sup>36</sup>S

Тип реакции	Вклад в %		
	Горение He	Горение C	Горение He и C
<sup>36</sup> Cl(n,p)	94.51	21.70	72.82
<sup>39</sup> Ar(n,α)	3.62	36.06	13.87
<sup>33</sup> S(n,γ)	1.9·10 <sup>-4</sup>	42.23	13.28
<sup>36</sup> Cl(β)	1.87	1.9·10 <sup>-5</sup>	0.03
В полное производство	68.95	31.05	100.00

В данных расчетах, как и в работе [1], мы хотели не только получить распространенность изотопов, но также и исследовать зависимость образования <sup>36</sup>S от вариаций первоначальной распространенности изотопов и возможных изменений, принятых в расчетах величин MACS. Для этого было введено два коэффициента:

$\alpha$  - показывает изменение конечного содержания <sup>36</sup>S, если одно из значений MACS увеличить (+) или уменьшить (-) в два раза;



$\beta$  - показывает изменение конечного содержания  $^{36}\text{S}$ , если в два раза увеличить (+) или уменьшить (-) начальную распространенность одного из изотопов. Результаты их вычислений представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4. Чувствительность конечной распространенности  $^{36}\text{S}$  в зависимости от значений *MACS*

№	Тип реакции	$\alpha(+)$	$\alpha(-)$
1	$^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$	1.132	0.752
2	$^{34}\text{S}(n,\gamma)^{35}\text{S}$	1.147	0.924
3	$^{36}\text{Cl}(n,p)^{36}\text{S}$	1.078	0.873
4	$^{36}\text{Cl}(n,\gamma)^{37}\text{Cl}$	0.906	1.054
5	$^{39}\text{Ar}(n,\alpha)^{36}\text{S}$	1.035	0.981
6	$^{33}\text{S}(n,\gamma)^{34}\text{S}$	1.026	0.985
7	$^{33}\text{S}(n,\alpha)^{30}\text{Si}$	0.985	1.023
8	$^{36}\text{S}(n,\gamma)^{37}\text{S}$	0.977	1.010
9	$^{32}\text{S}(n,\gamma)^{33}\text{S}$	1.017	0.987
10	$^{40}\text{Ca}(n,\gamma)^{41}\text{Ca}$	1.005	0.992

Таблица 5. Чувствительность конечной распространенности  $^{36}\text{S}$  в зависимости от начальной распространенности зародышевых ядер

№	Нуклид	$\beta(+)$	$\beta(-)$
1	$^{35}\text{Cl}$	1.774	0.611
2	$^{34}\text{S}$	1.121	0.938
3	$^{32}\text{S}$	1.027	0.985
4	$^{40}\text{Ca}$	1.018	0.989
5	$^{38}\text{Ar}$	1.008	0.995

## Выводы

С точки зрения ядерной астрофизики наши расчеты показали, что полученные в работе [3] значения *MACS* для реакций  $^{37}\text{Ar}(n,p)^{37}\text{Cl}$  и  $^{37}\text{Ar}(n,\alpha)^{34}\text{S}$  практически не влияют на образование изотопа  $^{36}\text{S}$  во время горения углерода в звездах массой  $25 M_{\odot}$ .

Результаты нашей работы в основном совпадают с выводами работ [4,5], в частности, подтверждают, что:

- основными точками ветвления на пути образования  $^{36}\text{S}$  являются изотопы:  $^{33}\text{S}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  и  $^{39}\text{Ar}$  (см. табл. 2);
- главный вклад в производство  $^{36}\text{S}$  вносит реакция  $^{36}\text{Cl}(n,p)$ , которая, однако, доминирует только во время горения гелия, когда во время горения углерода большой вклад дают реакции  $^{35}\text{S}(n,\gamma)$  и  $^{39}\text{Ar}(n,\alpha)$  (см. табл. 3);
- наиболее влияющим на образование изотопа  $^{36}\text{S}$  фактором является величина  $MACS$  для реакции  $^{34}\text{S}(n,\gamma)^{35}\text{S}$ . С этой точки зрения очень полезно повторное проведение измерений для этой реакции, поскольку единственный экспериментальный результат оказался приблизительно в 13 раз меньше предсказываемого теоретическими расчетами [5]. Также имеется значительная неопределенность сечения реакции  $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$ , что может существенно влиять на финальную распространенность  $^{36}\text{S}$  (см. табл. 4);
- выход  $^{36}\text{S}$  на стадии горения гелия очень чувствителен к первоначальной распространенности  $^{35}\text{Cl}$  (см. табл. 5). Поэтому необходимо провести анализ нейтронного нуклеосинтеза с учетом имеющихся данных наблюдений по содержанию  $^{35}\text{Cl}$  в массивных звездах и/или более аккуратно проследить возможное изменение первоначальной распространенности  $^{35}\text{Cl}$  в реакциях с заряженными частицами в процессе горения  $H$  и  $He$ ;

Вычисление интегральных потоков учитываемых реакций позволяет точно определить основные ветви  $s$ -процесса и в итоге детально проанализировать процессы нуклеосинтеза. На практике это выразилось в увеличении числа дифференциальных уравнений примерно с 30 до 80, что не оказалось однако существенным для времени вычислений и использования операционной памяти. Это позволяет нам ожидать, что планируемое последующее расширение сетки ядерных реакции для изотопов с атомной массой до  $\sim 80$ , является задачей вполне реальной для персонального компьютера.

В настоящей работе мы не занимались проблемой определения неточности наших вычислений, связанной с большими погрешностями используемых величин  $MACS$ . Заинтересованным данным вопросом предлагаем обратиться к работам [10,11].

Технически подобная методика может быть распространена и для решения других задач, таких как активационный анализ и трансмутация тяжелых элементов. Мы планируем также использовать ее для дальнейшего исследования *s*- и *r*-процессов нуклеосинтеза.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Европейской комиссии, грант *CEX-IDRANAP № ICA1-CT-2000-70023*.

## **Приложение 1**

**( \* Full data set \* )**

**( \* Helium burning \* )**

**( \* MACS for (n,g) reaction at kT=30 keV [mb] \* )**

**Si28ngSi29 = 2.9 ( \* Bao 2000 \* )**  
**Si29ngSi30 = 7.9 ( \* Bao 2000 \* )**  
**Si30ngSi31 = 6.5 ( \* Bao 2000 \* )**  
**P31ngP32 = 1.74 ( \* Bao 2000 \* )**  
**S32ngS33 = 4.1 ( \* Bao 2000 \* )**  
**S33ngS34 = 7.40 ( \* Bao 2000 \* )**  
**S34ngS35 = 0.145 ( \* Reifarth 2000 \* )**  
**S35ngS36 = 3.9 ( \* Woosley 1978 \* )**  
**S36ngS37 = 0.171 ( \* Bao 2000 \* )**  
**Cl35ngCl36 = 10 ( \* Bao 2000 \* )**  
**Cl36ngCl37 = 12 ( \* Bao 2000 \* )**  
**Cl37ngCl38 = 2.15 ( \* Bao 2000 \* )**  
**Ar36ngAr37 = 9 ( \* Bao 2000 \* )**  
**Ar37ngAr38 = 7 ( \* Woosley 1978 \* )**  
**Ar38ngAr39 = 3 ( \* Bao 2000 \* )**  
**Ar39ngAr40 = 8 ( \* Bao 2000 \* )**  
**Ar40ngAr41 = 2.6 ( \* Bao 2000 \* )**  
**K39ngK40 = 11.8 ( \* Bao 2000 \* )**  
**K40ngK41 = 31 ( \* Bao 2000 \* )**  
**K41ngK42 = 22 ( \* Bao 2000 \* )**  
**Ca40ngCa41 = 6.7 ( \* Woosley 1978 \* )**  
**Ca41ngCa42 = 30 ( \* Bao 1987 \* )**

(\* MACS for (n,p) reactions at kT=30 keV [mb] \*)

S33npP33 = 0.48 (\* Woosley 1978 \*)

Cl35npS35 = 1.87 (\* Druyts 1994 \*)

Cl36npS36 = 91 (\* Schatz 1995 \*)

Ar37npCl37 = 38 (\* Goeminne 2000 \*)

K40npAr40 = 6.3 (\* Bao 1987 \*)

Ca41npK41 = 8.3 (\* Woosley 1978 \*)

(\* MACS for (n,a) reactions at kT=30 keV [mb] \*)

S33naSi30 = 181 (\* Schatz 1995 \*)

Cl36naP33 = 0.9 (\* Schatz 1995 \*)

Ar37naS34 = 1030 (\* Goeminne 2000 \*)

Ar39naS36 = 3.2 (\* Woosley 1978 \*)

K40naCl37 = 39 (\* Bao 1987 \*)

Ca41naAr38 = 308 (\* Reifarth 2000 \*)

(\* ln2/b- decay rates [1/s] \*)

Si31rbP31 = Log[2] / 9438

P32rbS32 = Log[2] / 1232000

P33rbS33 = Log[2] / 2189000

S35rbCl35 = Log[2] / 7561000

S37rbCl37 = Log[2] / 303

Cl36rbAr36 = Log[2] / 9492000000000

Cl38rbAr38 = Log[2] / 2234.4

Ar39rbK39 = Log[2] / 8483000000

Ar41rbK41 = Log[2] / 6561

K42rbCa42 = Log[2] / 44490

(\* ln2/b+ decay rates [1/s] \*)

Cl36bpS36 = Log[2] / 9492000000000

Ar37bpCl37 = Lbg[2] / 3027000

Ca41bpK41 = Log[2] / 3248000000000

(\* Carbon burning \*)

(\* MACS for (n,g) reaction at kT=86 keV [mb] \*)

Si28ngSi29 = 2.11 (\* interpolation of Bao 2000 \*)

Si29ngSi30 = 2.12 (\* interpolation of Bao 2000 \*)

Si30ngSi31 = 1.504 (\* interpolation of Bao 2000 \*)

P31ngP32 = 1.9 (\* interpolation of Bao 2000 \*)

S32ngS33 = 3.18 (\* interpolation of Bao 2000 \*)

S33ngS34 = 3.75 (\* interpolation of Bao 2000 \*)

S34ngS35 = 0.268 (\* interpolation of Bao 2000 \*)

$S35ngS36 = 0.00755 \times 1.058 \times 10^7 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $S36ngS37 = 0.0782$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $Cl35ngCl36 = 4.59$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $Cl36ngCl37 = 5.76$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $Cl37ngCl38 = 0.74$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $Ar36ngAr37 = 4.72$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $Ar37ngAr38 = 0.00755 \times 1.119 \times 10^7 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $Ar38ngAr39 = 1.74$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $Ar39ngAr40 = 3.62$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $Ar40ngAr41 = 2.4$  (\* extrapolation of Bao 2000 \*)  
 $K39ngK40 = 5.8$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $K40ngK41 = 12.4$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $K41ngK42 = 9.87$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $Ca40ngCa41 = 4.9$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 $Ca41ngCa42 = 14.4$  (\* interpolation of Bao 2000 \*)  
 (\* MACS for (n,p) reactions at kT=86 keV [mb] \*)  
 $S33npP33 = 0.00755 \times 5.248 \times 10^5 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $Cl35npS35 = 0.00755 \times 3.236 \times 10^5 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $Cl36npS36 = 0.00755 \times 5.888 \times 10^7 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $Ar37npCl37 = 0.00755 \times 4.898 \times 10^6 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $K40npAr40 = 0.00755 \times 9.078 \times 10^5 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $Ca41npK41 = 0.00755 \times 4.898 \times 10^6 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 (\* MACS for (n,a) reactions at kT=86 keV [mb] \*)  
 $S33naSi30 = 0.00755 \times 3.311 \times 10^7 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $Cl36naP33 = 0.00755 \times 6.456 \times 10^5 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $Ar37naS34 = 0.00755 \times 1.622 \times 10^8 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $Ar39naS36 = 0.00755 \times 3.89 \times 10^5 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $K40naCl37 = 0.00755 \times 5.623 \times 10^6 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 $Ca41naAr38 = 0.00755 \times 6.919 \times 10^6 \times \sqrt{(273 / 1000000000)}$  (\* recalculated from NACRE \*)  
 (\* ln2/b- decay rates [1/s] at 86 keV \*)  
 $Si31rbP31 = 8.63 \times 10^{-5}$   
 $P32rbS32 = 3.67 \times 10^{-7}$   
 $P33rbS33 = 3.16 \times 10^{-7}$   
 $S35rbCl35 = 1 \times 10^{-7}$   
 $S37rbCl37 = 0.00265$   
 $Cl36rbAr36 = 2.21 \times 10^{-19}$   
 $Cl38rbAr38 = 3.16 \times 10^{-4}$   
 $Ar39rbK39 = 1.09 \times 10^{-9}$   
 $Ar41rbK41 = 1.315 \times 10^{-4}$   
 $K42rbCa42 = 1.09 \times 10^{-5}$

(\* ln2/b+ decay rates [1/s] at 86 keV \*)

Cl36bpS36 =  $5.48 \times 10^{-11}$

Ar37bpCl37 =  $1.603 \times 10^{-12}$

Ca41bpK41 =  $4.56 \times 10^{-15}$

(\* Starting abundances of nuclides [atoms/10 e6 Si], Anders 1989 \*)

Si28[0] = 922000

Si29[0] = 46700

Si30[0] = 31000

Si31[0] = 0

P31[0] = 10400

P32[0] = 0

P33[0] = 0

S32[0] = 489000

S33[0] = 3860

S34[0] = 21700

S35[0] = 0

S36[0] = 103

S37[0] = 0

Cl35[0] = 2860

Cl36[0] = 0

Cl37[0] = 913

Cl38[0] = 0

Ar36[0] = 85000

Ar37[0] = 0

Ar38[0] = 16000

Ar39[0] = 0

Ar40[0] = 26

Ar41[0] = 0

K39[0] = 3516

K40[0] = 0.44

K41[0] = 253.7

K42[0] = 0

Ca40[0] = 59200

Ca41[0] = 0

Ca42[0] = 395

(\* End of the data set \*)

## Литература

1. Шаланьски П., Стемпиньски М., Малька А., Гледенов Ю. М., Седышев П. В., Машрафи Р., Падуреану И., О возможности моделирования нуклеосинтеза с помощью компьютерных систем - образование элементов в области хлора и серы при горении гелия в звездах массой 25  $M_{\odot}$ , Сообщение ОИЯИ P10-2001-161, Dubna.
2. Szalanski P., Padureanu I., Stepinski M., Arangel D., Gledenov Yu. M., Sedyshev P. V., Machrafi R., Solving Nuclear-Reaction Networks Using Integrated Mathematical Systems. Element Production in Cl-S Region, During the He and C Burning in 25  $M_{\odot}$  Stars, Report WP13 IDRANAP 24-02/2002, Bucharest-Magurele.
3. Goeminne G., Wagemans C., Wagemans J., Serot O., Loiselet M., Gaelens M., "Investigation of the  $^{37}\text{Ar}(n,p)^{37}\text{Cl}$  and  $^{37}\text{Ar}(n,\alpha)^{34}\text{S}$  Reactions in the Neutron Energy Range from 10 meV to 100 keV", Nuclear Physics, vol. 678 (2000), pp. 11-23.
4. Schatz H., Jaag S., Linker G., Steininger R., Käppeler F., Koehler P.E., Graff S.M., Wiescher M., "Stellar Cross Sections for  $^{33}\text{S}(n,\alpha)^{30}\text{Si}$ ,  $^{36}\text{Cl}(n,p)^{36}\text{S}$ , and  $^{36}\text{Cl}(n,\alpha)^{33}\text{P}$  and the Origin of  $^{36}\text{S}$ ", Physical Review C, vol. 51 (1995), pp. 379-391.
5. Reifarth R., Schwarz K., Käppeler F., "The Stellar Neutron-Capture Rate of  $^{34}\text{S}$ : The Origin of  $^{36}\text{S}$  Challenged", Astrophysical Journal, vol. 528 (2000), pp. 573-581.
6. Odegaard K., "Structure and evolution of massive stars", PHD Thesys, University of Oslo, 1994.
7. Raitieri C., Busso M., Gallino R., Picchio G., Pulone L., "s-process Nucleosynthesis in Massive Stars and the Weak Component. I. Evolution and Neutron Captures in a 25  $M_{\odot}$  Stars", Astrophysical Journal, vol. 367 (1991), pp. 228-238.
8. Raiteri C., Gallino R., Busso M., Neuberger D., Käppeler F., "The Weak s-component and Nucleosynthesis in Massive Stars", Astrophysical Journal, vol. 419 (1993), pp. 207-223.
9. Käppeler F., "The Origin of the Heavy Elements: The s-process", Progress in Particle and Nuclear Physics, vol. 43 (1999), pp. 419-483.
10. Thompson W., Iliadis C., "Error Analysis for Resonant Thermonuclear Reaction Rates", Nuclear Physics A, vol. 647 (1999), pp. 259-279.
11. Tachihara H., Sekimoto H., "Exact Error Estimation for Solution of Nuclide Chain Equations", Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 36 (1999), pp. 1176-1185.

Получено 8 августа 2002 г.

Шаланьски П. и др.

P10-2002-192

Образование элементов в области серы и хлора при горении углерода в массивных звездах.  
Применение компьютерных систем в моделировании сети ядерных реакций

В работе представлены результаты вычислений образования элементов в области серы и хлора при горении гелия и углерода в звездах массой  $25M_{\odot}$ , полученные с использованием интегрированных математических систем. Авторы также рассматривают применение данного метода в ряде других физических задач.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Szalanski P. et al.

P10-2002-192

Element Production in the S-Cl Region During Carbon Burning in Massive Stars.  
Using Computer Systems for Modeling of the Nuclear-Reaction Network

This paper presents results of calculations for nuclear network in S-Cl region during helium burning in massive stars ( $25M_{\odot}$ ) using integrated mathematical systems. The authors also examine other application of presented method in different physical tasks.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002



**Редактор *М. И. Зарубина***  
**Макет *Н. А. Киселевой***

**Подписано в печать 02.10.2002.**

**Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.**  
**Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 315 экз. Заказ № 53544.**

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований**  
**141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.**