

УДК 523.9-54

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ С МАЛЫМ $Z$ НА СОЛНЦЕ В ТЕЧЕНИИ ВСЕЙ ПРОГНОЗИРУЕМОЙ ЭВОЛЮЦИИ

© 2018 М. Х. Талафа<sup>1\*</sup>, М. А. Аль-Вардат<sup>2</sup>, Н. М. Эршайдат<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Университет Этвоша Лорана, Будапешт, 1117 Венгрия

<sup>2</sup>Университет Аль аль-Бейт, Мафрак, 25113 Иордания

<sup>3</sup>Иорданский университет, Амман, 11942 Иордания

Поступила в редакцию 23 ноября 2017 года; принята в печать 23 февраля 2018 года

Исследование химического состава звезд и галактик является ключевым моментом для понимания их происхождения и эволюции. В данной работе представлены результаты расчетов солнечного содержания изотопов  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  в течение четырех фаз жизни Солнца: горения водорода, всплеска быстрого роста и стадии красного гиганта, горения и истощения гелия. Для этой цели мы использовали пакет программ с открытым исходным кодом «NucNet Tools» от группы Webnucleo из Клемсонского университета, Южная Каролина, США. Результаты по всем изотопам представлены в таблицах для последующего использования. Найденные содержания, в целом, достаточно хорошо согласуются с теми, что предсказаны в литературе. Полученные по последним двум фазам результаты уникальны и не имеют аналогов.

Ключевые слова: *Солнце: содержание—Солнце: эволюция*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

После более шестидесяти лет постоянной разработки основные постулаты теории звездной эволюции уже считаются устоявшимися, что подтверждается различными экспериментальными проверками [1]. Благодаря работам Бете [2, 3] и многих других ученых исследования химического состава звезд и галактик сыграли ключевую роль в понимании происхождения и эволюции этих удаленных объектов [4, 5]. Инструментами для исследования звездной эволюции являются: 1) атомная спектроскопия, которая позволяет определять химическое содержание звезд, межзвездного газа и галактик и 2) ядерная масс-спектрометрия, которая используется для точного определения большинства содержаний изотопов в земных, лунных и метеоритных образцах. Содержание элемента — это относительное количество (или доля) этого элемента в образце данного вещества. Оно может быть выражено как в относительных величинах по отношению к содержанию какого-нибудь ключевого элемента, например, наиболее обильного элемента в образце, так и в абсолютных величинах (определение, принятое в настоящей работе), т.е. по отношению к полному количеству вещества в образце. Содержание выражается в виде массовой доли, т.е. отношения массы определенного нуклида к полной

массе звезды. Измерения содержания кислорода в звездах или досолнечных зернах разных возрастов дают важные сведения о химической эволюции Галактики [6]. Изотопы кислорода являются решающим инструментом диагностики процессов ядерного синтеза и химической эволюции Галактики. В основном это объясняется высоким содержанием кислорода.  $^{16}\text{O}$  является третьим наиболее распространенным элементом солнечной системы, хотя он и значительно менее изобилен чем водород и гелий (которые главным образом произошли в эпоху первичного нуклеосинтеза). Согласно сборнику Лоддерса [7], количество кислорода почти равно количеству всех остальных тяжелых элементов (элементов с атомным числом больше чем у гелия) вместе взятых [8].

Несмотря на относительно низкие содержания  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$ , они все равно достаточно обильны, чтобы проводить измерения их содержания в звездных атмосферах. Содержания изотопов кислорода также легко измерить в досолнечных зернах в метеоритах и межпланетной пыли. Эти измерения дают ключевые ограничения на нуклеосинтез и звездную эволюцию [9]. Три стабильных изотопа кислорода, в основном, производятся на разных эволюционных эпохах горения вещества в звезде, что добавляет значимости этому элементу в качестве диагностического инструмента.  $^{17}\text{O}$  производится, в основном, на стадии горения водорода,  $^{18}\text{O}$  — на

\*E-mail: m.talafha@astro.elte.hu

ранних стадиях горения гелия, а  $^{16}\text{O}$  — на более поздних стадиях горения гелия. Таким образом, изотопный состав звездной атмосферы или досолнечного зерна является ключом для выяснения той области звезды, где была синтезирована основная часть вещества [10].

Наконец, третий важный аспект роли кислорода как инструмента для изучения нуклеосинтеза и химической эволюции галактики — это первичны эти изотопы или вторичны.  $^{16}\text{O}$  является первичным изотопом, т.е. изотопом, который может быть синтезирован в звезде, изначально состоящей только из водорода, в то время как  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  — вторичные изотопы, что означает, что их формирование требует наличия уже существующих ядер, синтезированных предыдущими поколениями звезд [6]. Как следствие, содержание  $^{16}\text{O}$  относительно содержания  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  меняется со временем в истории Галактики. 4.56 миллиардов лет назад в Солнце зажегся водород, вследствие чего оно вышло на Главную последовательность. Эта фаза будет продолжаться еще по крайней мере 6.34 миллиардов лет до тех пор, пока не выгорит водород [11]. В настоящей работе мы представляем теоретические расчеты содержаний изотопов  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  для всего времени жизни Солнца, т.е. для четырех фаз: стадии горения водорода, зрелого возраста, стадии быстрого роста и фазы красного гиганта (КГ), горения гелия, истощения запасов гелия [11].

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ

### 2.1. Расчет содержания

Для того, чтобы вычислить содержание некоего элемента сначала нужно определить цепочку ядерных реакций, приводящую к его синтезу и распаду. Это приводит к системе парных дифференциальных уравнений, известных как уравнения Бэйтмена [12]. Эти уравнения решаются в общем виде численно, при конкретных значениях температуры и плотности в качестве начальных условий. Для этой цели был использован пакет программ с открытым кодом «NucNet Tools»<sup>1</sup>, разработанный в рамках проекта Webnucleo под руководством Брэдли С. Мейера из группы астрономии и астрофизики при Клемсонском университете, Южная Каролина, США. Помимо прочего, «NucNet Tools» позволяет определять содержания элементов в звездах. В качестве примера во многих программах, входящих в состав пакета, используется Солнце [13]. В настоящей работе, вычисление содержания элементов с малым атомным номером  $Z$ , а именно:  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,

$^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  и изотопов кислорода  $^{15}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  в ядре Солнца было выполнено с помощью «NucNet Tools.» Ряд программ используется для вычисления цепочек, ведущих к синтезу и распаду изотопа. Для решения системы уравнений с целью вычисления содержания изотопа используется метод Ньютона-Рафсона с необходимым числом итераций, пока не будет достигнут определенный уровень сходимости. Процедура детально объяснена в работе [13]. Как упоминалось выше, температура и плотность — основные начальные параметры вычислений. Оба этих параметра зависят, в основном, от времени расширения  $\tau$ , которое можно определить как [13]:

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

Таким образом, плотность меняется как:

$$\rho(t) = \rho_0 \exp(-t/\tau) \quad (2)$$

а температура  $T_9 = T/10^9$  К такова, что  $\rho \propto T_9^3$  [13].

Время расширения  $\tau$  принято равным бесконечности. Этот выбор означает, что температура  $T$  и плотность  $\rho$  в центре Солнца остаются постоянными во времени. Начальные значения  $T$  и  $\rho$  составляют, соответственно,  $1.548 \times 10^7$  К,  $1.505 \times 10^2$  г см<sup>-3</sup> на момент времени  $t = 10.9$  млрд лет.

Соответствующие данные о нуклидах и реакциях были взяты из базы JINA (Joint Institute for Nuclear Astrophysics) [14].

### 2.2. Синтез и распад изотопов кислорода

Вклад в образование изотопов кислорода вносят следующие реакции [6]:  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ ,  $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ ,  $^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ , а также две реакции распада:  $^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e$  и  $^{18}\text{F} \rightarrow ^{18}\text{O} + e^+ + \nu_e$ .

Реакции распада всегда имеют постоянную скорость протекания. «NucNet Tools» позволяет вычислять скорости подобных реакций. Мы установили, например, что реакции  $^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e$  и  $^{18}\text{F} \rightarrow ^{18}\text{O} + e^+ + \nu_e$  имеют скорости  $1.0746 \times 10^{-2}$  и  $1.0518 \times 10^{-4}$  соответственно.

Следует отметить, что скорости реакции на выходе являются произведением  $N_A \langle v \rangle$  в единицах см<sup>3</sup> моль<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>, где  $N_A$  — число Авогадро, сечения реакции  $\sigma$  и скорости частицы  $v$ . Распад изотопов кислорода может происходить с участием нескольких реакций, таких как:  $^{16}\text{O}(p, \gamma)^{17}\text{F}$ ,  $^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$ ,  $^{17}\text{O}(p, \alpha)^{14}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}(p, \gamma)^{19}\text{F}$  и  $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$ . Некоторые

<sup>1</sup><https://sourceforge.net/p/libnucnet/home/Home/>

**Таблица 1.** Фазы Солнца. Начальные условия для каждой фазы жизни Солнца

| Фаза                              | Длительность | Температура, $10^9$ К | Плотность, $\text{г см}^{-3}$         | Начальное содержание                   |
|-----------------------------------|--------------|-----------------------|---------------------------------------|--|
| (1)                               | (2)          | (3)                   | (4)                                   | (5)                                    |
| Горение водорода                  | 10.9 Гуг     | 0.0154                | $\rho_0 = 150.5$                      | Лоддерс [7]                            |
| Зрелый возраст, быстрый рост и КГ | 1301 Муг     | 0.0154                | $\rho = (2.3)^3 \rho_0 = 1831.1335$   | Последний этап в фазе горения водорода |
| Горение гелия                     | 110 Муг      | 0.1                   | $\rho = (9.5)^3 \rho_0 = 129034.9375$ | Последний этап в пред. фазе            |
| Истощение гелия                   | 20 Муг       | 0.6                   | $\rho = (18)^3 \rho_0 = 877716$       | Последний этап в пред. фазе            |
| Сумма                             | 12.331 Гуг   |                       |                                       |  |

**Таблица 2.** Начальные значения ( $t = 0$ ) содержания исследуемых элементов из [7]

| Элемент                        | $^1\text{H}$ | $^4\text{He}$ | $^{12}\text{C}$ | $^{14}\text{N}$ | $^{15}\text{O}$        | $^{16}\text{O}$ | $^{17}\text{O}$       | $^{18}\text{O}$       |
|--------------------------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| Начальное значение ( $t = 0$ ) | 0.7109       | 0.2741        | 0.0025          | 0.0008          | $1.18 \times 10^{-25}$ | 0.0066          | $2.62 \times 10^{-6}$ | $1.49 \times 10^{-5}$ |

из этих реакций включают в себя протон или альфа частицу и дают новый, более тяжелый элемент, а некоторые являются реакциями распада с постоянной скоростью при любой температуре, например  $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$  со скоростью  $5.6816 \times 10^{-3}$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Вычисление проводились для всего времени жизни Солнца. Первые две колонки в Таблице 1 показывают последовательные фазы жизни нашего солнца и их продолжительность [11]. Начальные значения итеративных параметров, конкретно температура ( $10^9$  К), плотность ( $\text{г см}^{-3}$ ) и начальное содержание, также приводятся в Таблице 1.

*Предварительная замечание:* рисунки, приведенные здесь, иллюстрируют наиболее значимые результаты. Начальные значения содержаний исследуемых изотопов показаны в Таблице 2. Все результаты собраны в единой Таблице 3.

Вычисления проводятся для бесконечного времени расширения  $\tau$ . Кроме того, принимаются начальные условия из Таблицы 2. В этих вычислениях мы не принимаем в расчет экранирование электронами и ядерные статистические коррекции. Радиус Солнца меняется в разные фазы, соответственно ему меняется и плотность. Последняя в фазы II, III и IV принимается равной  $\rho = \rho_0 \times r^3$ , где  $r$  — радиус Солнца в единицах реального радиуса  $R_\odot$  в начале каждой фазы [11].

#### 3.1. Фаза I: горение водорода

Горение водорода является первой фазой в жизни Солнца, в течение которой водород выгорает и производит гелий, и продолжается в течении 10.9 млрд лет. Рисунки 1a–1e показывают изменение в течение фазы массовых долей изотопов  $^1\text{H}$  и  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  и изотопов кислорода  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  соответственно. Из рисунков видно, что для последнего временного отрезка в вычислении (10.9 млрд лет) содержание  $^1\text{H}$  составляет  $X = 0.1121$ , для  $^4\text{He}$  оно равно  $Y = 0.8725$  и  $6.86 \times 10^{-6}$  для  $^{12}\text{C}$ . Эти результаты вместе с содержанием  $^{14}\text{N}$  и изотопов кислорода ( $^{15}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$ ) показаны в Таблице 3.

#### 3.2. Фаза II: зрелый возраст, начало быстрого роста, фаза КГ (1.301 млрд лет)

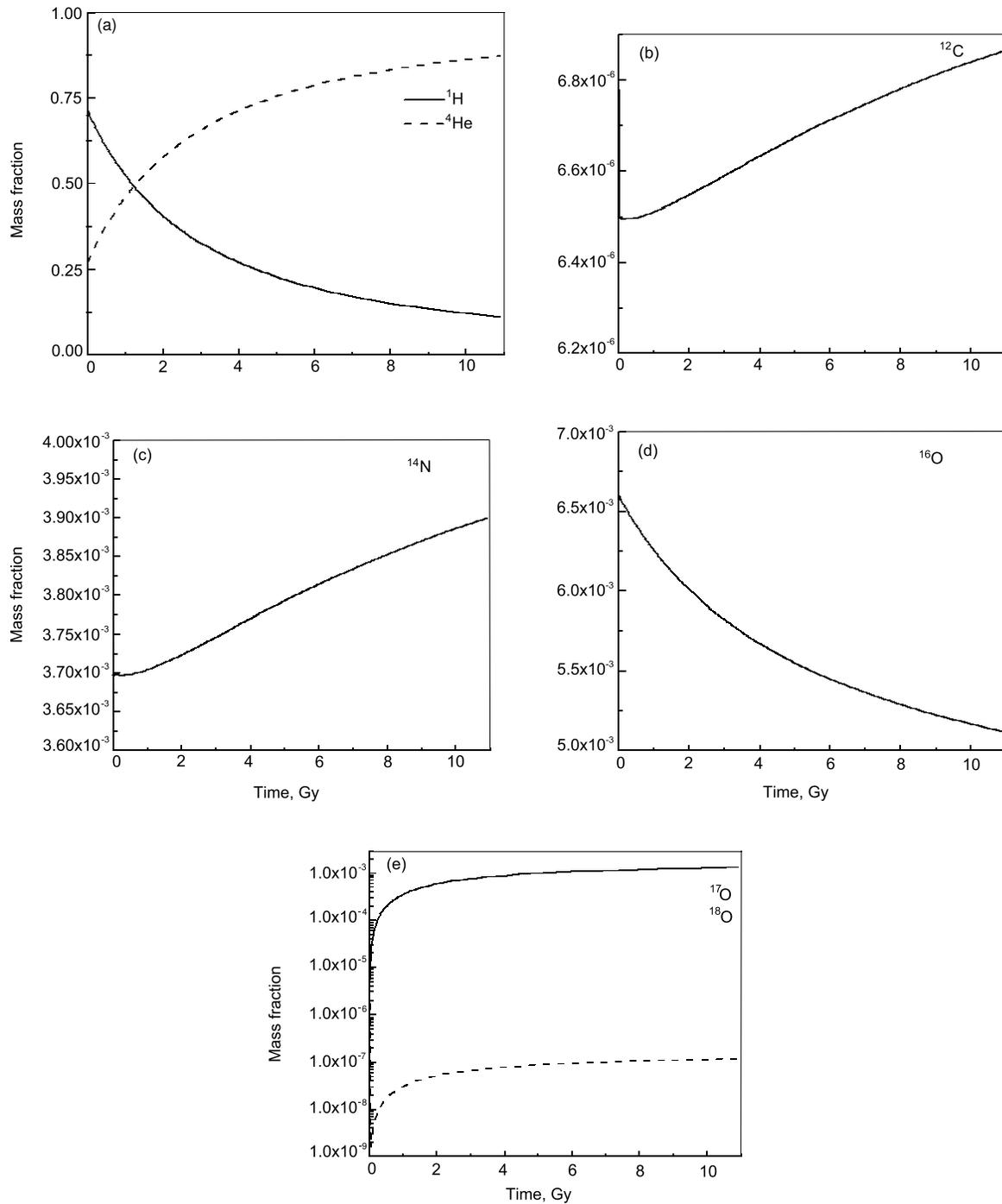
После истощения водородного ядра атомы гелия теряют равновесие и начинают сжиматься под собственным весом, что разогревает ядро и делает его более плотным, в то время как оставшийся водород вытесняется в тонкий слой, окружающий гелиевое ядро. Следующие 700 млн лет (фаза заканчивается на 11.6 млрд лет) эволюция протекает медленно, яркость остается постоянной, радиус увеличивается, а Солнце становится субгигантом. В течение следующего 601 млн лет (12.201 млрд лет после рождения) Солнце начинает резко увеличиваться в размере. В это время появляется звездный ветер, который выдувает внешние части оболочки звезды. После 12.233 млрд лет Солнце переходит в фазу красного гиганта, становится ярче и больше,

Таблица 3. Содержание исследуемых элементов в конце каждой из четырех фаз и комментарии

| Элемент         | Фаза     | Содержание                | Комментарии   |
|-----------------|----------|---------------------------|---|
| $^1\text{H}$    | I        | 0.1121                    | Массовая доля уменьшается в фазы I, II. В конце фазы IV водород почти отсутствует.  |
|                 | II       | 0.0441804                 |   |
|                 | III      | $1.23 \times 10^{-25}$    |   |
|                 | IV       | $1.99 \times 10^{-26}$    |   |
| $^4\text{He}$   | I        | 0.8725                    | Массовая доля $^4\text{He}$ увеличивается и достигает максимума в конце фазы III. Спустя 20 млн лет, т.е. в конце последней фазы (IV), происходит т.н. гелиевая вспышка. Эта фаза не входит в область нашего исследования.  |
|                 | II       | 0.940427                  |   |
|                 | III      | 0.3187                    |   |
|                 | IV       | $8.78 \times 10^{-18}$    |   |
| $^{12}\text{C}$ | I        | $6.86 \times 10^{-6}$     | Массовая доля $^{12}\text{C}$ очень медленно увеличивается и достигает максимума в конце фазы III. В последней фазе (IV) $^{12}\text{C}$ все еще присутствует, его доля гораздо больше $^1\text{H}$ .   |
|                 | II       | $6.90 \times 10^{-6}$     |   |
|                 | III      | 0.3893                    |   |
|                 | IV       | 0.00198                   |   |
| $^{14}\text{N}$ | I        | 0.0039                    | Массовая доля $^{14}\text{N}$ почти постоянна на протяжении первых двух фаз (12.201 млрд лет); затем она возрастает и достигает максимума в конце фазы III. В последней фазе (IV) $^{14}\text{N}$ почти исчезает.   |
|                 | II       | 0.004                     |   |
|                 | III      | $8.37 \times 10^{-3}$     |   |
|                 | IV       | $5.49 \times 10^{-11}$    |   |
| $^{15}\text{O}$ | I        | $1.60 \times 10^{-17}$    | Массовая доля $^{15}\text{O}$ ведет себя стабильно на протяжении всех четырех фаз. Она постоянно уменьшается до очень малого значения. Это ожидаемо, т.к. этот изотоп нестабилен (период полураспада = 122 с)   |
|                 | II       | $7.10 \times 10^{-17}$    |   |
|                 | III      | $1.72 \times 10^{-26}$    |   |
|                 | IV       | менее $1 \times 10^{-30}$ |   |
| $^{16}\text{O}$ | I        | $5.10 \times 10^{-3}$     | Массовая доля $^{16}\text{O}$ почти стабильна вплоть до конца фазы III. Сильный спад наблюдается в течении последних 20 млн лет. Тем не менее, данный изотоп все еще присутствует в конце четвертой фазы.   |
|                 | II       | $4.81 \times 10^{-3}$     |   |
|                 | III      | 0.2775                    |   |
|                 | IV       | 0.030                     |   |
| $^{17}\text{O}$ | I        | 0.0013                    | Массовая доля $^{17}\text{O}$ почти постоянна вплоть до конца фазы II. Этот стабильный изотоп все еще присутствует в конце первых трех фаз. Тем не менее, сильный спад наблюдается во время последней фазы, как и ожидалось.  |
|                 | II       | 0.0015                    |   |
|                 | III      | $1.08 \times 10^{-9}$     |   |
|                 | IV       | $1.20 \times 10^{-9}$     |   |
| $^{18}\text{O}$ | I        | $1.17 \times 10^{-7}$     | Массовая доля $^{17}\text{O}$ очень мала по сравнению с $^{16}\text{O}$ . Его содержание выше в первых двух фазах, как было указано в тексте. Очевидные вариации от фазы к фазе вызваны реакциями его синтеза и распада. Это может быть уточнено в будущем исследовании, посвященном вычислению скоростей реакций изотопов кислорода. |
|                 | II       | $1.33 \times 10^{-7}$     |   |
|                 | III      | $7.80 \times 10^{-4}$     |   |
|                 | IV       | $2.55 \times 10^{-11}$    |   |
| $^{19}\text{O}$ | Все фазы | Ничтожно малые следы      |   |

поглощает Меркурий. Гелиевое ядро достигает температуры в 100 млн градусов, начинается горение гелия, в результате которого образуются углерод и кислород [11]. Расчеты не показывают значительных вариаций массовых долей всех исследуемых элементов на протяжении периода в 1301 млн лет. Таким образом, два предыдущих периода были

сгруппированы в одну фазу (фаза II длительно-стью 1.301 млрд лет). Вычисления показывают, что для последнего временного отрезка (1301 млн лет) содержание  $^1\text{H}$  составляет  $X = 1.62 \times 10^{-13}$ , для  $^4\text{He}$  —  $Y = 0.8736$ . Соответствующее содержание  $^{12}\text{C}$  —  $6.87 \times 10^{-6}$ . Эти результаты вместе



**Рис. 1.** Содержания элементов с малым  $Z$  во время пяти фаз жизни Солнца: (а) —  $^1\text{H}$  и  $^4\text{He}$  на стадии H-горения, (б) —  $^{12}\text{C}$  на стадии H-горения, (с) —  $^{14}\text{N}$  на стадии H-горения, (д) —  $^{16}\text{O}$  на стадии H-горения, (е) —  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  на стадии H-горения.

с содержанием  $^{14}\text{N}$  и изотопов кислорода ( $^{15}\text{O}$ ,

$^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$ ) представлены в Таблице 3. Как и предполагалось, в звезде выгорает весь водород, и горение гелия становится основным источником энергии.

### 3.3. Фаза III: фаза горения гелия

Достигнув 12.201 млрд лет красный гигант «успокаивается» и на протяжении следующих 110 млн лет продолжает вести себя как стабильная звезда на стадии горения гелия. К концу этого периода в ядре гиганта, наконец, заканчивается

гелий и остатки СО начинают быстро коллапсировать [11]. В Таблице 3 приведены массовые доли исследуемых элементов во время этой фазы.

### 3.4. Фаза IV: фаза истощения гелия

Наконец, вычисления в последний раз применяются для фазы истощения He, которая продолжается в течение 20 млн лет. Массовые доли всех исследуемых элементов во время стадии истощения гелия приводятся и комментируются в Таблице 3. На последнем временном отрезке фазы истощения гелия содержания элементов будут следующими:  $X = 8.22782 \times 10^{-34}$  для  $^1\text{H}$ ,  $Y = 3.469325 \times 10^{-20}$  для  $^4\text{He}$  и  $2.20796 \times 10^{-14}$  для  $^{12}\text{C}$ . Расчеты также проводились для  $^{19}\text{O}$ , тем же образом, что и для других изотопов. Расчеты дали пренебрежимо малые массовые доли для всех четырех фаз. Для простоты и ясности, мы решили добавить обсуждение результатов настоящей работы в Таблицу 3.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были вычислены содержания изотопов  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  в ядре Солнца за период в 12.331 млрд лет. Основным инструментом, использовавшимся в работе — пакет программ с открытым кодом «NucNet Tools» от группы Webnucleo из Клемсонского университета, Южная Каролина, США. Предсказанное время жизни Солнца было поделено на четыре основные фазы, а именно: 1) горение водорода, 2) зрелый возраст, начало быстрого роста и стадия красного гиганта, 3) горение гелия и 4) истощение гелия (Таблица 1). Начальные содержания элементов были взяты из сборника Лоддера для прото-Солнца. Полученные в настоящей работе результаты подтверждают предсказания моделей ядерной физики. Для простоты, мы отсылаем читателя к последней колонке в Таблице 3, которая повторяет

все выводы данной работы. В целом, можно сказать, что вычисления согласуются с теоретическими предсказаниями содержания изотопов исследуемых элементов, особенно изотопов кислорода в ядре Солнца.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Salaris and S. Cassisi, *Evolution of Stars and Stellar Populations* (Wiley, 2006).
2. H. A. Bethe, *Physical Rev.* **55**, 103 (1939).
3. E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, and F. Hoyle, *Rev. Modern Physics* **29**, 547 (1957).
4. M. Gargaud, R. Amils, J. C. Quintanilla, et al., *Encyclopedia of Astrobiology* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011).
5. G. Wallerstein, I. Iben, Jr., P. Parker, et al., *Rev. Modern Physics* **69**, 995 (1997).
6. B. S. Meyer, L. R. Nittler, A. N. Nguyen, and S. Messenger, *Rev. Mineralogy Geochemistry* **68**, 31 (2008).
7. K. Lodders, *Astrophys. J.* **591**, 1220 (2003).
8. H. Yurimoto, K. Kuramoto, A. N. Krot, et al., in *Proc. Conf. on Protostars and Planets V*, Ed. by V. B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil (Univ. Arizona Press, Tucson, 2007), pp. 849–862.
9. K. Lodders, H. Palme, and H.-P. Gail, *Landolt-Börnstein — Group VI Astronomy and Astrophysics* **4B**, 44L (2009).
10. M. F. El Eid, B. S. Meyer, and L.-S. The, *Astrophys. J.* **611**, 452 (2004).
11. <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Lectures/vistas97.html>
12. K. S. Krane and W. G. Lynch, *Physics Today* **42**, 78 (1989).
13. B. Meyer, in *Proc. 12th Intern. Symp. on Nuclei in the Cosmos (NIC XII)*, Cairns, Australia, 2012, <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=146,id.96>.
14. B. Côté, C. Ritter, F. Herwig, et al., in *Proc. 14th Intern. Symp. on Nuclei in the Cosmos (NIC2016)*, Ed. by S. Kubono, T. Kajino, S. Nishimura, et al. (2017), p. 020203.

Перевела Е. Чмырева

## A Study of the Abundance of Low-Z Elements in the Sun During its Whole Predicted Life

M. H. Talafha, M. A. Al-Wardat, N. M. Ershaidat

The study of the chemical composition of stars and galaxies is a key topic for understanding their origin and evolution. In this study, we present the results of the calculation of solar abundances of the isotopes  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ , and  $^{18}\text{O}$  during the four phases of the solar life: hydrogen burning, onset of rapid growth and red giant, helium burning and helium exhaustion. The open source package `jjNucNet Tools` from the Webnucleo Group in Clemson University, SC, USA was used for this purpose. The results for all isotopes are listed in tables for future use. Abundances found, globally, agree fairly well with those predicted in the literature. Results obtained for the last two phases have no equivalents elsewhere.

Keywords: *Sun: abundance—Sun: evolution*