

Диссертация допущена к защите
зав. кафедрой

«_____» _____ 2019 г.

Моделирование нуклеосинтеза в звездах

Тема:

Направление: _____

Магистерская программа: _____

Выполнил студент гр. _____

Введение

Данная работа рассматривает процесс синтеза ядер, а именно возникновение элементов в ходе эволюции нейтронной звезды. Преобразования, приводящие к появлению легких элементов (легче железа) известны и хорошо изучены. Распространенность элементов, расположенных в области за железом, относительно слабо зависит от массового числа A . Это свидетельствует об изменении механизма образования этих элементов. Образование их в результате взаимодействия заряженных частиц сильно подавлено из-за кулоновского барьера. Фактор, который также необходимо принять во внимание, состоит в том, что большинство тяжелых элементов являются β -радиоактивными. По современным представлениям тяжелые элементы образуются в реакциях захвата нейтронов. Обычно различают быстрый (r) и медленный (s) процессы захвата нейтронов (от английских слов rapid и slow). Эти два механизма различаются отношением скорости захвата нейтронов (реакция (n, γ)) к скорости бета-распада. По современным представлениям примерно половина наблюдаемого количества элементов с $A > 60$ образуется в результате s -процесса. В настоящее время общепризнанно, что многие ядра тяжелее железа, включая все ядра тяжелее ^{209}Bi , образуются в r -процессе путем быстрого последовательного захвата большого количества нейтронов. Главное условие - скорость захвата нейтронов должна быть больше скорости β -распада.

Однако есть также некоторые элементы, возникновение которых не может происходить через эти процессы. Такие элементы являются обойденными.

В данной работе, будут моделироваться реакции, приводящие к появлению обойденных ядер, а именно - столкновительный β -распад, с использованием открытой библиотеки реакций REACLIB, в основе которой лежит построение сечения зависимостью от температуры по 7 параметрам. Данная библиотека уже включает в себя некоторый набор реакций, приво-

дящий к появлению обойденных ядер, но в данной работе нас интересует исследование только влияние СБР на эволюцию системы.

Основной целью работы является построение сечений для столкновительного β -распада для столкновении элементов с протоном, а также оценка влияния этих реакций на полученную распространенность элементов в результате всех процессов за промежуток времени.

Сам процесс моделирования будет выполняться с помощью открытой библиотеки SkyNet, написанную Jonas Lippuner с дополнением ее своим набором реакций.

1. Столкновительный β -распад

Данный процесс является одним из процессов, приводящих к появлению обойденных ядер.

Обойдённые ядра - устойчивые атомные ядра, лежащие в стороне от всех возможных путей образования тяжёлых ядер из более лёгких в процессе последовательного захвата последними нейтронов [1]. Распространённость обойденных ядер, как правило, примерно на два порядка величины ниже, чем у близких к ним ядер, лежащих на пути нейтронного захвата. К таковым относятся: ^{74}Se , ^{78}Kr , ^{80}Kr , ^{84}Sr , ^{92}Mo , 94 , ^{96}Ru , ^{98}Ru , ^{102}Pd , ^{106}Cd , ^{108}Cd , ^{113}In , ^{112}Sn , ^{114}Sn , ^{115}Sn , ^{120}Te , ^{124}Xe , ^{126}Xe , ^{130}Ba , ^{132}Ba , ^{136}Ce , ^{138}Ce , ^{144}Sm , ^{152}Gd , ^{152}Dy , ^{158}Dy , ^{162}Er , ^{164}Er , ^{168}Yb , ^{174}Hf , ^{180}W , ^{184}Os , ^{190}Pt , ^{196}Hg [2].

Столкновительный β -распад стабильных ядер, инициируемый их кулоновскими столкновениями с другими ядерными частицами звездной среды, может быть основой модели процесса синтеза обойденных ядер. Проблема их синтеза на основе физического механизма захвата нейтронов (s - или r -процесса) состоит в прерывании цепочки последовательных β -распадов на β -стабильном ядре (A, Z).

Процесс СБР стабильных ядер, о котором говорилось выше, для нук-

лидов главной последовательности предоставляет еще одну возможность преодолеть энергетический порог и осуществить переход

$$(A, Z) \xrightarrow{\beta^-} (A, Z + 1)$$

, открывая путь к последующему естественному β -переходу

$$(A, Z + 1) \xrightarrow{\beta^-} (A, Z + 2)$$

Может оказаться, что при этом малость сечений для процесса такого рода уже не будет играть особой роли, если будут не малы плотность вещества в недрах звезды и временная протяженность квазиравновесной стадии звездной эволюции.

Расчеты показывают, что модель синтеза обойденных элементов в звездном веществе на этапе квазиравновесной стадии, основанная на явлении СБР стабильных ядер главной последовательности, качественно, а в ряде случаев и количественно, способна воспроизвести нерегулярный ход кривой относительной распространенности обойденных ядер. Этот факт можно расценивать как косвенное свидетельство в пользу реальности явления столкновительного β -распада стабильных ядер [3].

В случае столкновительного β -распада возможно несколько видов процессов, а именно: протон-ядерные, ядро-ядерные и процесс, стимулированный нейтронами. Рассчитанные сечения для протон-ядерных и ядро-ядерных оказались невелики (менее 10^{-50}cm^2), и процесс пока не доступен для прямого наблюдения, но при помощи программного обеспечения, позволяющего моделировать данные процессы мы можем оценить влияние их на конечные распространенности элементов [4]. Наряду с кулоновскими столкновениями ядер можно предложить механизм СБР, не связанный с кулоновскими силами и в то же время незамаскированный возможным появлением продуктов β -распада за счет ядерных реакций. Речь идет о процессе СБР

ядра, стимулированном столкновениями с нейтронами.

Данная работа рассматривает в первую очередь влияние протон-ядерного столкновения на процессы, протекающие в нейтронных звездах, а именно γ -process, так как концентрация протонов при этом достаточно велика, чтобы это влияние оказалось существенным.

Сечение для столкновительного β распада получим через формулу (1).

$$P_{\beta}((A, Z) \rightarrow (A, Z + 1)) = \left(\frac{8}{\pi \mu_{AA'} T^3} \right)^{1/2} \times \int_{\Delta + \Delta_f + 1} \sigma_{\beta}^{(col)}(\beta_f) \exp(-\epsilon/T) \epsilon d\epsilon \quad (1)$$

В данной формуле $\sigma_{\beta}^{(col)}$ представляет из себя (2):

$$\sigma_{\beta}^{(col)}(\beta_f) = \frac{4\sqrt{2} g_v^2 \alpha_e^4 Z(Z+1) Z'^4 \mu^{9/2}}{\pi \epsilon_i^{3/2} (1 - \exp(-2\pi \lambda_i))} \xi_{\beta}(\beta_f) \times \int_0^{\xi_i - \Delta - \Delta_f} \frac{\Phi(E_f) d\epsilon_f}{(\exp(2\pi \lambda_f) - 1) k_f (k_i - k_f)^4 (k_i + k_f)^2} \times \int_{x_0}^0 \frac{|F(-i\lambda_i, -i\lambda_f, 1; x)|^2}{(1-x)^2} dx, \quad (2)$$

где $E_f = \epsilon_i - \epsilon_f - \Delta - \Delta_f$, $x_0 = -4k_i k_f / (k_i - k_f)^2$, а функция $\Phi(E)$ имеет вид (3):

$$\Phi(E) = \frac{1}{60} (E^2 - 1)^{1/2} (2E^4 - 9E^2 - 8) + \frac{1}{4} E \ln(E + (E^2 - 1)^{1/2}) \quad (3)$$

$$\lambda_i = \frac{ZZ'e^2\mu}{\hbar^2 k_i}, \lambda_f = \frac{(Z+1)Z'e^2\mu}{\hbar^2 k_f} \quad (4)$$

$$\epsilon_i = \frac{\hbar^2 k_i^2}{2\mu}, \epsilon_f = \frac{\hbar^2 k_f^2}{2\mu} \quad (5)$$

Для возможности использования полученных сечений вместе с другими библиотеками ядерных реакций необходимо привести их к единому формату. Данным форматом был выбран REACLIB.

2. REACLIB

База данных JINA REACLIB представляет из себя список ядерных реакций. Для каждой реакции в библиотеке представлен ее тип (chapter), выражающий количество участников, который может быть:

- 1 участник, 1 продукт
- 1 участник, 2 продукта
- 1 участник, 3 продукта
- 2 участника, 1 продукт
- 2 участника, 2 продукта
- 2 участника, 3 продукта
- 2 участника, 4 продукта
- 3 участника, 1 продукт
- 3 участника, 2 продукта
- 4 участника, 2 продукта
- 1 участника, 4 продукта

База полностью открыта и доступна для сообщества через интернет. Текущая версия библиотеки хранит показатели реакций, таких как зависимость от температуры через семи-параметрическое приближение [5], тип реакции (резонирующая, нерезонирующая, слабая, спонтанный распад), значение температуры, переданное среде, а также параметр ν указывающий, являются ли показатели a_0, \dots, a_6 обратными. В подавляющем большинстве реакций показатели представляют из себя параметризацию сечения в зависимости от температуры:

$$\lambda = \exp \left[a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i T_9^{\frac{2i-5}{3}} + a_6 \ln T_9 \right]$$

Чтобы получить параметры a_0, \dots, a_6 для каждой из наших реакций мы воспользуемся статистической моделью.

Модель представляет из себя усредненные коэффициенты перехода T . Они не отражают резонансное поведение, но описывают эффект поглощения через мнимую часть в (оптическом) ядро-ядро потенциале, что приводит к известному выражению:

$$\begin{aligned} \sigma^{\mu\nu} = & \\ = & \frac{\pi \hbar / (2\mu_{ij} E_{ij})}{(2J_i^\mu + 1)(2J_j + 1)} \sum_{J, \pi} (2J + 1) \\ & \times \frac{T_j^\mu(E, J, \pi, E_i^\mu, J_i^\mu, \pi_i^\mu) T_0^\nu(E, J, \pi, E_m^\mu, J_m^\nu, \pi_m^\nu)}{T_{tot}(E, J, \pi)} \end{aligned} \quad (6)$$

для сечения $\sigma^{\mu\nu}$ реакции $i^\mu(j, o) m^\mu$ из состояния i^μ в состояние m^ν конечного ядра с центром энергии масс E_{ij} и уменьшенной массой μ_{ij} .

Показатели реакций были посчитаны для набора из 24 температур: $T_9 = 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0$. Для простого применения в астрофизических исследованиях все виды реакций $((n, \gamma), (n, p), (p, \alpha), (p, \gamma), (p, n), (p, \alpha),$

$(\alpha, \gamma), (\alpha, n), (\alpha, p), (\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, \alpha)$ аппроксимируются через единое приближение вида

$$\left. \begin{array}{c} N_A \langle \sigma v \rangle \\ \lambda_\gamma \end{array} \right\} = \exp(a_0 + a_1 T_9^{-1} + a_2 T_9^{-1/3} + a_3 T_9^{1/3} + a_4 T_9 + a_5 T_9^{5/3} + a_6 \ln T_9) \quad (7)$$

с 7 открытыми параметрами $a_0 - a_6$, где T_9 это 10^9K .

Данное приближение является достаточно гибким чтобы удовлетворить различным температурным зависимостям для различных видов реакций в промежутке температур $0.001 \leq T_9 \leq 10$ [6].

3. SkyNet

Программный пакет SkyNet представляет из себя обще-целевую сеть ядерных реакций, специально разработанную для моделирования г-процесса, но она также применима к другим астрофизическим сценариям [7].

SkyNet написан на языке C++ и имеет модульную архитектуру. Помимо сети ядерных реакций, он также включает в себя модуль решения ядерного статистического равновесия (!!! Nuclear Statistical equilibrium), уравнение состояния Гельмгольца. SkyNet также моделирует эволюцию температуры, отслеживая изменение энтропии при ядерных реакциях и распадах.

SkyNet также имеет обертку для использования ее с Python, что делает очень удобным использование его через интерактивные оболочки.

Важно отметить, что SkyNet успешно прошел сравнения с другими аналогичным ПО (WinNet, XNet) и даже, приблизился к симуляции Seitenzahl [8].

При использовании данного пакета были внесены изменения в исходный код, а именно добавлена функция для чтения файлов REACLIB ново-

го формата не построчно, а набором из 4 строк, аналогичная которой была добавлена в исходный код самого проекта.

(!!! мало информации, нужно найти больше)

4. Построение СБР

Итак, мы пришли к тому, что для добавления новых реакций СБР мы должны построить сечение по формуле (1). Для упрощения расчетов, а именно, уменьшения количества операций, связанных с умножениями на константы, было принято решение перейти к системе единиц СГС ($m_e = \hbar = c = 1$). Тогда $\alpha = \frac{e}{\hbar c}$. Таким образом, (4) принимает вид

$$\lambda_i = \frac{ZZ'e^2\mu}{\hbar^2 k_i} = \frac{ZZ'e^2\mu}{\sqrt{2\mu\epsilon_i}} = ZZ'e^2 \sqrt{\frac{\mu}{2\epsilon_i}} = ZZ'\alpha \sqrt{\frac{\mu}{2\epsilon_i}} \quad (8)$$

$$\lambda_i = \frac{(Z+1)Z'e^2\mu}{\hbar^2 k_f} = (Z+1)Z'e^2 \sqrt{\frac{\mu}{2\epsilon_f}} = ZZ'e^2 \sqrt{\frac{\mu}{2\epsilon_i}} = ZZ'\alpha \sqrt{\frac{\mu}{2\epsilon_i}} \quad (9)$$

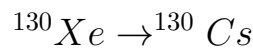
$$\mu = m_n \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} \quad (10)$$

, где $m_n = 1,835 \times 10^3 = m_n$

m_e

5. Расчеты

Сначала были получены сечения столкновительного бета-распадов при столкновении ядра с протоном, такие как, например:



Для этого была написана программа, в результате работы которой, был построен график (рис. 1). Полученные 24 значения температур являются

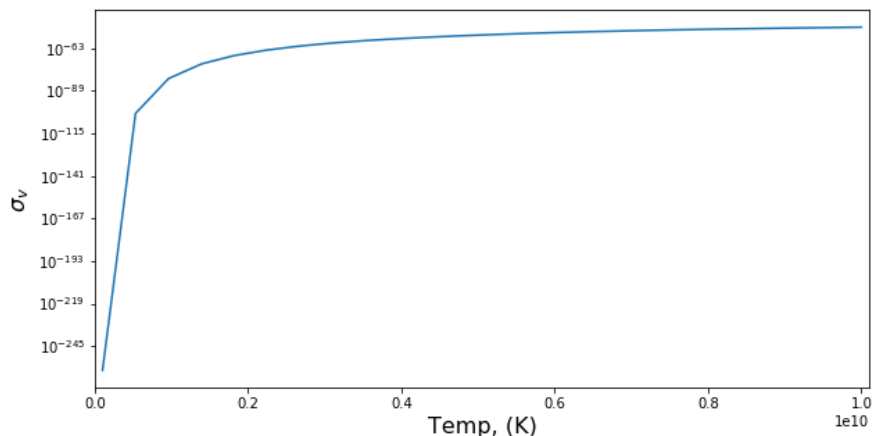


Рис. 1. Сечение для СБР при столкновении ^{130}Cs с протоном

избыточными в нашем случае, так целью является параметризация данной зависимости через 7 параметров a_0, \dots, a_6 (7). То есть мы имеем 17 лишних уравнений. Поэтому для решения переопределенной системы воспользуемся методом наименьших квадратов (2).

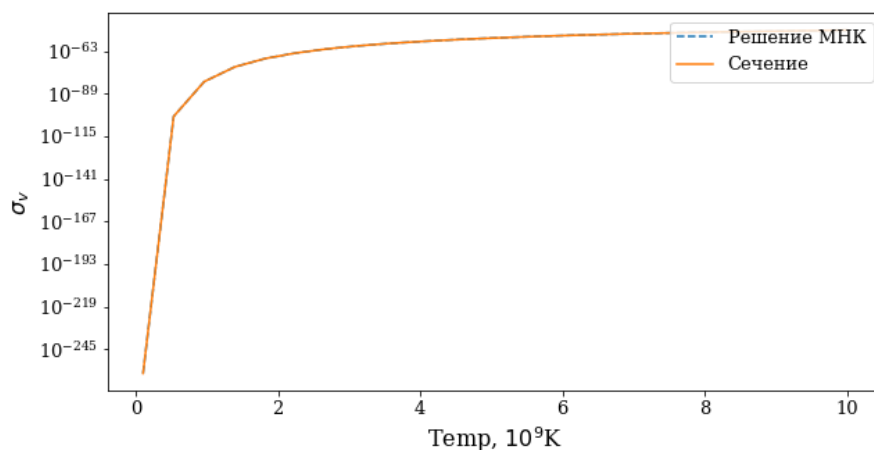


Рис. 2. Сравнение решения методов наименьших квадратов с полученным сечением

Далее, составим необходимый для REACLIB файл библиотеки реакций. Для перехода $^{130}\text{Xe} \rightarrow ^{130}\text{Cs}$ получаем строки вида:

5

pXe130Cs130 p cleaw

0.00000e+00

$$3.631089e+01 - 2.513083e+01 - 3.379005e+02 \quad 1.434772e+02 \\ - 2.028014e+00 - 6.306473e-02 - 1.208779e+02$$

В данном файле стоит отметить факт явного указания p - протона в качестве участника реакции, так как сечение СБР зависит от концентрации протонов.

Построим также графическое представление параметров a для некоторых реакций (!!! смотри другую сторону) (рис. 3).

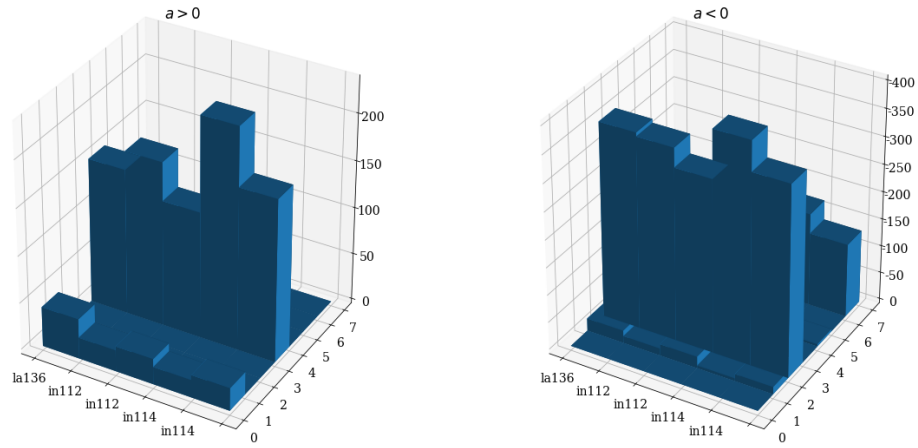


Рис. 3. Значения параметров a для некоторых столкновительных процессов

Для моделирования ядерных реакций воспользуемся включенной в SkyNet моделью r-process. Она содержит список из 7836 ядер, участвующих в реакциях, начальные распространенности этих ядер, а также зависимости плотности и температуры от времени. Эволюция протекает в промежутке времени от $1.21 \times 10^{-3}c$ до 5×10^8c .

Изначально, если оставлять файл JINA REACLIB в таком виде, в котором он присутствует в библиотеке, влияние добавленных мною реакций отсутствовало. Это связано с тем, что в сети уже присутствовали реакции с этими элементами, но гораздо большим сечением, которое перекрывает наши реакции. Добится хоть какого-то влияния на небольших температурах невозможно, так как по характеру графика на рисунке (1) можно заме-

тить его быстрое затухание при стремлении температуры справа к $10^8 K$, а именно при относительно низких ($10^9 K$) температурах протекает большая часть эволюции.

Для того, что проверить влияние, было решено учесть только те реакции, приводящие к образованию обойденных ядер, которые представляют из себя разрешенный β -распад. Для этого из библиотеки REACLIB были исключены реакции вида (11), то есть 168 реакций.

$${}^{79}\text{Br} \rightarrow {}^{78}\text{Br} + n \quad (11)$$

Полученные данные представляют из себя иерархический формат данных h5. Извлекая конечные распространенности, видим результат для всех обойденных ядер (рис. 4):

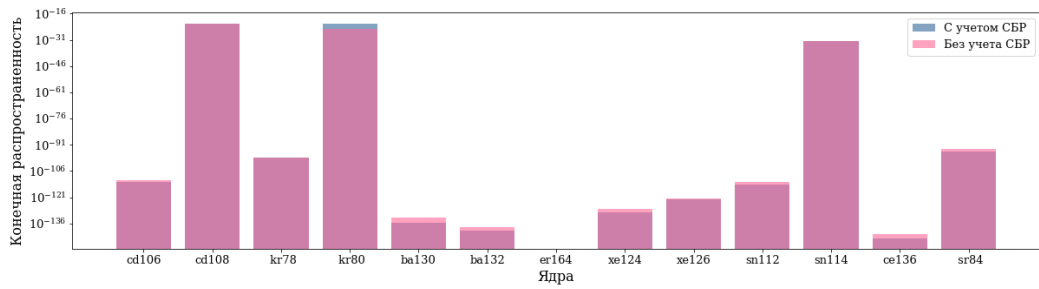


Рис. 4. Конечные распространенности обойденных ядер

Построим график относительной ошибки между эволюцией элементов с нашей библиотекой реакций и тем, что присутствовало в изначальной версии REACLIB (рис. 5):

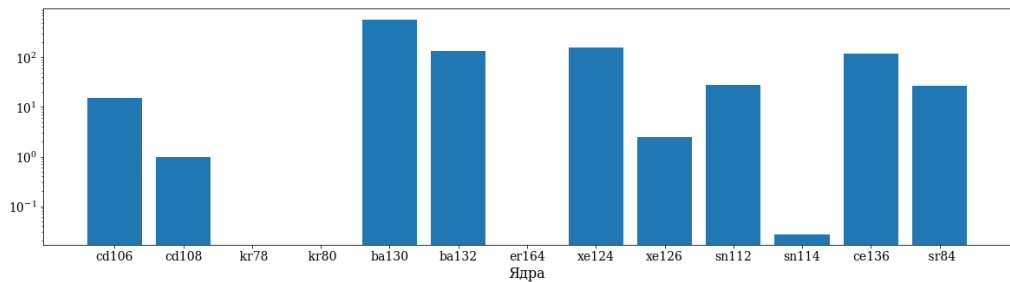


Рис. 5. Относительная ошибка при сравнении стандартной библиотеки реакций SkyNet и библиотеки, учитывающей только СБР для образования обойденных изотопов

С учетом того, что мы полностью удалили все реакции, приводящие к возникновению обойденных β ядер из сети реакций, полученная разница в их распространенностях оказалась не так велика, что говорит о том, что наши реакции действительно учитывались и смогли смоделировать возникновение некоторого количества обойденных ядер.

6. Заключение

В данной работе было рассмотрено влияние столкновительного бета распада на эволюцию звездных процессов. На языке Python был получено сечения для столкновительного процесса некоторых ядер с протоном. При помощи программного пакета SkyNet, а также дополнения библиотеки JINA REACLIB было подтверждено, что СБР может являться источником обойденных ядер и при больших значениях сечения это влияние существенно, но конкретно для ситуации столкновения с протоном, это влияние невелико даже для γ -процесса. Чтобы увидеть эти изменения, пришлось учесть только реакции, приводящие к образованию обойденных ядер, которые представляют из себя разрешенный β -распад

Данная работа рассматривает только часть образований материнских ядер, причем при столкновении с протоном. Также, для расширения списка реакций необходимо добавить столкновительные реакции для других ядер, а также нейтронов, сечения для которых намного выше, ввиду отсутствия Кулоновского барьера.

Список литературы

1. Франк-Каменецкий Д. А. Реакции (p, n) и $(p, 2n)$ и происхождение обойдённых ядер // Астрономический журнал. 1961. Т. 38, № 1. с. 91.
2. Role of core-collapse supernovae in explaining solar system abundances of p nuclides / C. Travaglio, T. Rauscher, A. Heger [и др.] // Astrophysical Journal. 2018. Т. 18, № 854.
3. Крыловецкая Т. А. Столкновительный бета-распад ядер и проблема происхождения обойденных изотопов. Ph.D. thesis: ВГУ. 1998.
4. статья Та сама.
5. The jina reaclib database: Its recent updates and impact on type-I X-ray bursts / R. H. Cyburt, A. M. Amthor, Z. Meisei [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2010.
6. Rauscher T., Thielmann F. Astrophysical reaction rates from statistical model calculations: Tech. Rep.: : Universita Basel, 2000.
7. Lippuner Jonas. r -Process Nucleosynthesis in Neutron Star Mergers with the New Nuclear Reaction Network SkyNet. Ph.D. thesis: California Institute of Technology. 2018.
8. Nuclear statistical equilibrium for Type Ia supernova simulations / Ivo R. Seitenzahl, Dean M. Townsley, Fang Peng [и др.] // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 2008. № 95. С. 96–114.