

Влияние выбора параметров статистической модели на выходы изотопов $^{180-190}\text{Tb}$ в r -процессе

В. В. Негребецкий,^{1, a} К. А. Стопани²

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики;*

² *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

Поступила в редакцию 24.10.2020, после доработки 17.11.2020, принята к публикации 03.01.2021.

Получены теоретические сечения реакции нейтронного захвата на нейтроноизбыточных изотопах $^{180-190}\text{Tb}$ при помощи статистической модели TALYS с использованием различных методов расчета ядерных масс и плотностей энергетических уровней. На основе этих данных вычислены значения скоростей реакций при температуре 1.2 ГК, соответствующей ситуации взрывной эволюции звезды. Полученные скорости использовались для расчета астрофизического r -процесса при помощи библиотеки моделирования звездных ядерных систем SkyNet. Вычислены отклонения концентраций продуктов r -процесса при использовании различных параметров статистической модели расчета сечений.

Ключевые слова: нуклеосинтез, r -процесс, нейтроноизбыточные изотопы.

УДК: 539.172.4. PACS: 26.30.+k.

ВВЕДЕНИЕ

По современным представлениям образование подавляющего числа тяжелых изотопов во Вселенной происходит за счет звездного r -процесса, представляющего собой цепочки интенсивных реакций нейтронного захвата и β -распадов. Протекание r -процесса возможно лишь в экстремальных астрофизических условиях. Различные расчеты [1–3] показали, что для синтеза таких тяжелых элементов, как уран, в r -процессе на одно зародышевое ядро должно приходиться до 150 нейтронов. Предлагаются различные сценарии, при которых могли бы достигаться требуемые плотности нейтронного потока, в частности взрывы сверхновых различных типов (например, [1, 4–6]), слияние нейтронных звезд [7], столкновение нейтронной звезды и черной дыры [8]. Исследование протекающих в ходе этих событий механизмов нуклеосинтеза возможно только посредством компьютерного расчета.

Симуляция астрофизической системы нуклидов является сложной математической задачей, для решения которой применяются неявные численные методы, вносящие в расчет существенные погрешности. Более того, моделирование осложнено неопределенностью входных данных, сведений о составе и состоянии вещества звезды. В частности, значения сечений астрофизических ядерных реакций, являющиеся важнейшими параметрами расчета, в основном являются результатом расчета с помощью тех или иных теоретических моделей. Это обусловлено тем, что в астрофизических условиях ядра находятся преимущественно в возбужденных состояниях и реакции на них не удается воспроизвести в лаборатории. Кроме того, в звездных ядерных процессах задействованы практически все существующие в природе изотопы, включая нестабильные и экзотические ядра: например, в ходе r -процесса ядро, интенсивно поглощающее нейтроны, существенно удаляется от долины стабильности в область нейтроноизбыточных изотопов, а p -процесс, наоборот, протекает в нейтронодефицитной области.

В настоящей работе исследуется влияние неопределенностей входных данных моделирования r -процесса, связанных с расчетом сечений реакций нейтронного захвата на нейтроноизбыточных изотопах тербия, на конечные массовые распределения продуктов нуклеосинтеза.

1. ОТБОР РАССМАТРИВАЕМЫХ ИЗОТОПОВ ТЕРБИЯ

Скоростью ядерной реакции λ_k называют вероятность ее протекания в единицу времени на единицу количества каждого исходного изотопа. Эта величина является важнейшим параметром расчета эволюции ядерной системы, так как явно входит в уравнение изменения концентрации изотопа:

$$\frac{dy_i}{dt} = \sum_{k \in K_i} \lambda_k g_k \prod_{l \in L_k} y_l,$$

где y_i — концентрация i -го изотопа, λ_k — скорость k -й реакции в данный момент времени, $g_k = \pm 1$ в зависимости от того, нарабатывается или расходуется i -й изотоп в k -й реакции, K_i — множество всех реакций, в которых i -й изотоп фигурирует в качестве исходного или продукта, L_k — множество исходных изотопов k -й реакции.

Как было сказано выше, почти все данные, необходимые для расчета λ_k , известны из теоретических моделей и их экспериментальная проверка затруднительна, вследствие чего в расчет вносятся существенные неопределенности. Для исследования влияния этих неопределенностей на результаты компьютерного моделирования звездного r -процесса необходимо проводить расчет величин λ_k с различными исходными параметрами, а для этого придется отобрать ряд реакций, изменение скоростей которых должно заметно сказываться на результатах симуляции звездного горения.

С этой целью нами было проведено первичное моделирование звездного r -процесса в приближении канонической модели [9], в соответствии с которой макроскопические параметры звездного вещества задаются температурой 1.2 ГК и плотностью 10^8 г/см³.

^a E-mail: negrebetckii.vv16@physics.msu.ru

В качестве исходного распределения ядер выступает однородная среда из ^{56}Fe . Выбор обусловлен тем, что железо является наиболее тяжелым элементом, который может быть в больших количествах наработан на стадии термоядерного нуклеосинтеза в звезде. Концентрации изотопов измеряются по прошествии 1 с с начала эволюции системы.

По современным представлениям r -процесс, требующий чрезвычайно интенсивных потоков нейтронов и высоких температур, может протекать в таких катастрофических событиях, как вспышки сверхновых или столкновения сверхкомпактных объектов — черных дыр и нейтронных звезд. Детальное моделирование любого из этих явлений само по себе представляет чрезвычайно сложную задачу. Каноническая модель r -процесса [9] является удобным базисным случаем для исследования механизма r -процесса, поскольку основывается на обобщенном и упрощенном сценарии нагрева и остывания вещества и не требует детального учета сложных условий, имеющих место в реальности.

Для моделирования ядерных реакций звездного r -процесса нами была использована библиотека моделирования астрофизических ядерных систем SkyNet [10]. В качестве источника величин скоростей ядерных реакций использована библиотека астрофизических скоростей ядерных реакций REACLIB [11], включенная в SkyNet по умолчанию. В решаемую систему уравнений входило 7836 изотопов, связанных между собой сетью из 145902 реакций.

В результате моделирования r -процесса в течение 1 с со скоростями реакций из библиотеки REACLIB были получены концентрации изотопов $y_j(t)$ в каждый момент времени, на основе которых были рассчитаны суммарные выходы каждой из задействованных реакций по формуле

$$N(A, Z) = \sum_i \int_0^T \lambda_i(t) \cdot \prod_j y_j(t) dt,$$

где T — время симуляции, $\lambda_i(t)$ — скорости протекания всех реакций, конечным ядром которых является данный изотоп, $y_j(t)$ — концентрация j -го задействованного изотопа. Величина суммарного выхода использовалась нами в качестве показателя, характеризующего интенсивность протекания реакции в ходе моделирования и, следовательно, ее влияние на результаты r -процесса при заданных условиях. Пользуясь данными о выходах реакций в r -процессе, можно отобрать из них те, неопределенность теоретических скоростей которых оказывает наибольшее влияние на итоговое распределение продуктов рассматриваемого механизма.

Результат расчета суммарных выходов реакций на изотопах в области $Z = 20-90$ и $N = 50-160$ показан на рис. 1. Из рисунка видно, что протекающие реакции сосредоточены в области нейтроноизбыточных изотопов, образованных в ходе интенсивных цепочек реакций нейтронного захвата. Отчетливо выделяются траектории r -процесса, вдоль которых происходит наработка ядер тяжелее железа.

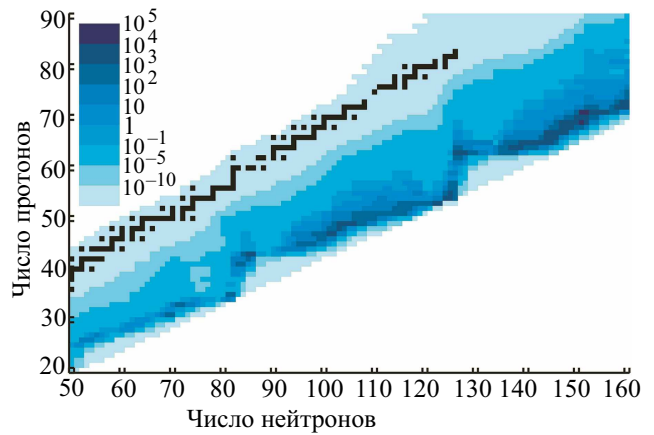


Рис. 1. Суммарные выходы реакций звездного r -процесса для задействованных в нем изотопов в области $Z = 20-90$ и $N = 50-160$, результат моделирования при помощи библиотеки SkyNet. Черным цветом обозначены стабильные изотопы. Наблюдается характерный вид треков r -процесса

В области протонных и нейтронных магических чисел наблюдаются характерное ступенчатое поведение траектории r -процесса: например, при $N = 82, 126$. Из приведенного графика следует, что значительную роль в r -процессе должны играть изотопы тербия с массовыми числами более 180, однако для более точного выбора диапазона изотопов необходимо детально рассмотреть соотношение между скоростями реакций в данной области.

На рис. 2 представлены выходы прямой и обратной реакции нейтронного захвата на изотопах тербия. Легко видеть, что для легких ядер выходы процессов пренебрежимо малы, поэтому точность используемых в моделировании значений скоростей реакций на них не играет существенной роли. Но начиная с массового числа 180 выходы реакций достигают достаточных значений, чтобы значительно влиять на результаты моделирования r -процесса. В то же время для изотопов тербия с массовыми числами более 190 суммарные выходы конкурирующих реакций (n, γ) и (γ, n) практически равны, что говорит

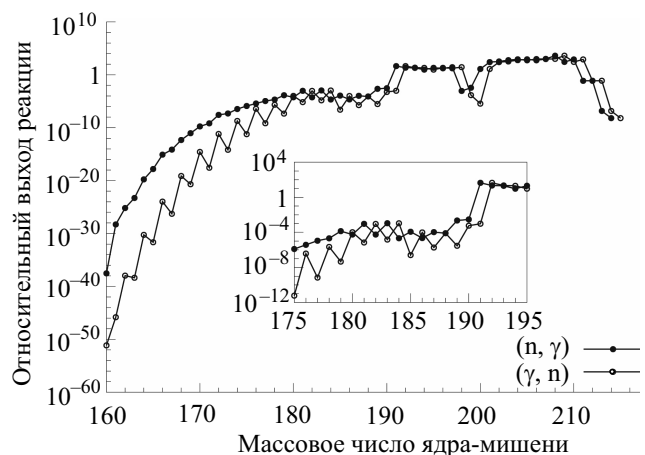


Рис. 2. Выходы прямой и обратной реакции (n, γ) на Тб. Интенсивность реакций на легких ядрах мала, в то время как для изотопов с $A > 190$ достигается статистическое равновесие. Тем самым наиболее чувствительны к вариации скоростей должны быть реакции на $^{180-190}\text{Tb}$

о достижении состояния статистического равновесия для данных изотопов, при котором количество нарабатываемых в единицу времени ядер равно числу уничтожаемых и полное количество ядер данного типа в дальнейшем перестает меняться со временем. Это значит, что сравнительно малое изменение скорости одной из них не приведет к значимым изменениям финальных распределений концентраций. Тем самым при исследовании влияния вариаций скоростей нейтронного захвата на изотопах тербия интереснее всего рассматривать ядра $^{180-190}\text{Tb}$.

Отобранные нами изотопы $^{180-190}\text{Tb}$ являются сильно нейтроноизбыточными. Это естественно, так как данные ядра возникают в r -процессе в результате интенсивного поглощения нейтронов исходным ядром. Получение таких экзотических ядер в лабораторных условиях невозможно, как и экспериментальное измерение сечений реакции нейтронного захвата на них. То же справедливо для большинства ядер-продуктов и реакций r -процесса. Между тем сечения входят в выражение для расчета скорости реакций (1) и потому чрезвычайно важны для моделирования эволюции ядерной системы.

2. РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИИ (n, γ) С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ TALYS

С целью расчета скоростей астрофизических реакций для каждого отобранного изотопа нами были вычислены теоретические сечения реакции (n, γ) на отобранных изотопах Tb. Расчет производился при помощи пакета моделирования ядерных реакций TALYS [12], основанного на статистическом подходе и широко применяющегося для анализа и оценки экспериментальных данных и создания библиотек теоретических сечений ядерных реакций. Модели, включенные в состав TALYS, обладают большим количеством настраиваемых параметров, существенно сказывающихся на результатах расчета. В настоящей работе производились расчеты и сравнение результатов, полученных с использованием TALYS при условии вариации важнейших из них: модели плотности энергетических уровней и таблицы масс ядер.

Рассматривались три модели плотности ядерных уровней, основывающиеся на приближении ферми-газа: модель константной температуры (СТМ) [13], модель BFM [14] и обобщенная модель сверхтекучей жидкости (GSM) [15]. Теоретические значения плотностей ядерных уровней используются в статистических моделях ядерных реакций на различных этапах: при расчете вероятностей распада составной системы на продукты, при оценке частично-дырочных плотностей экситонных состояний в модели предравновесной стадии реакции, при вычислении вероятностей каскада распадов состояний конечных продуктов реакции, а также при оценке заселенности возбужденных состояний начального ядра при астрофизических температурах.

Данные о массах ядер, участвующих в рассматриваемых процессах, также относятся к важнейшим параметрам модели, непосредственно определяющим энерговыделение реакции, и, следовательно, оказывают существенное влияние на результаты расчета.

Экспериментально измеренные массы изотопов тербия известны лишь вплоть до изотопа ^{165}Tb [16], поэтому в рассматриваемой нами области изотопов значения масс являются результатом того или иного теоретического расчета. В данной работе использовались три теоретические таблицы масс, рассчитанных по следующим моделям: основанная на вариации жидкокапельного приближения с оболочечными поправками модель FRDM2012 [17] и две модели, основанные на методе Хартри—Фока—Боголюбова, использующие потенциалы эффективного взаимодействия Скирма (SHFB) [18] и Гоньи (GHFB) [19].

В качестве примера результатов расчета на рис. 3 представлены сечения реакции нейтронного захвата на изотопе ^{186}Tb , полученные нами при помощи TALYS с использованием различных таблиц ядерных масс и моделью плотности уровней СТМ. Сплошной линией показаны сечения на основном состоянии ядра, пунктиром — на первом возбужденном. Как видно, различные таблицы масс дают существенно различающиеся сечения реакции (n, γ) . Это особенно заметно в низкоэнергетической области, где значения сечений могут расходиться вплоть до двух порядков. Для ядра ^{186}Tb рассмотренные нами массовые модели FRDM2012, SHFB и GHFB дают энергии связи, равные 1396.42 МэВ, 1397.25 МэВ и 1396.80 МэВ соответственно, а для ^{187}Tb — 1400.03 МэВ, 1401.38 МэВ и 1401.20 МэВ соответственно. Ясно, что вариация массы в пределах 1 МэВ дает весьма значительные отклонения сечений для реакции с низкой энергией налетающего нейтрона. С ростом энергии роль точности определения массы снижается и при 10 МэВ линии сечений практически сходятся, однако при температуре 1.2 ГК средняя кинетическая энергия нейтронов составляет порядка 100 кэВ, поэтому влияние неопределенности масс все же следует полагать большим.

Для сравнения на рис. 3 жирной линией представлены результаты статистической модели NON-SMOKER [20]. Скорости реакции (n, γ) на изотопах тербия, представленные в библиотеке REACLIB,

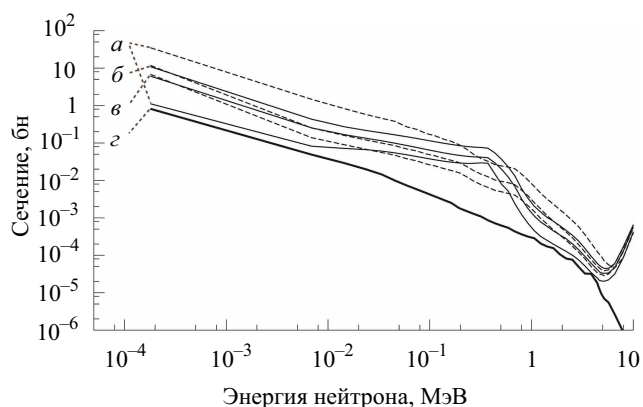


Рис. 3. Сечения реакции (n, γ) на изотопе ^{186}Tb , рассчитанные с помощью модели TALYS с вариацией массовой модели, а также данные модели NON-SMOKER: а — TALYS FRDM2012, б — TALYS GHFB, в — TALYS SHFB, г — NON-SMOKER. Пунктирной линией показаны результаты расчета TALYS для первого возбужденного состояния ядра-мишени

Таблица. Сравнение скоростей реакции (n, γ) на изотопах тербия $^{180-190}\text{Tb}$ при температуре 1.2 ГК, представленных в базе данных REACLIB и рассчитанных с помощью статистической модели TALYS. При варьировании модели плотности энергетических уровней использовалась таблица масс SHFB, при варьировании таблицы масс — модель плотности уровней СТМ

Мишень	Ск-ти, $10^3 \cdot \text{с}^{-1}$ на ед. конц. исх. ядер						
	REACLIB	TALYS					
		Модели плотности уровней			Модели масс		
		СТМ	BFM	GSM	FRDM2012	SHFB	GHFB
^{180}Tb	3644.27	1233.52	1051.97	712.23	351.38	1233.52	1117.60
^{181}Tb	628.86	5154.83	7997.78	5199.26	4666.53	5154.83	14365.30
^{182}Tb	1474.00	4537.37	2684.37	2619.16	484.52	4537.37	2496.17
^{183}Tb	379.50	2832.35	4354.29	3429.80	3339.90	2832.35	5165.92
^{184}Tb	1390.38	5807.90	3818.11	4278.38	3429.71	5807.90	4061.76
^{185}Tb	486.40	2976.05	4268.07	3986.38	7506.44	2976.05	5417.72
^{186}Tb	1198.49	5818.25	5467.48	5266.21	739.99	5818.25	9772.74
^{187}Tb	412.48	2117.58	3357.07	3042.43	6491.12	2117.58	931.51
^{188}Tb	1243.90	5390.77	6002.84	6243.99	2418.46	5390.77	5418.82
^{189}Tb	534.37	776.97	1032.77	1228.18	4207.72	776.97	2253.77
^{190}Tb	126.42	11739.50	14486.00	17525.00	2153.49	11739.50	14832.30

вычислены именно на ее основе. Как видно, NON-SMOKER дает значительно меньшие значения сечений, чем программа TALYS в любой рассмотренной параметризации. Также в области 10 МэВ при росте сечений TALYS график NON-SMOKER резко убывает, что объясняется отсутствием учета прямых и предравновесных процессов в модели NON-SMOKER. Отметим, что данная особенность не сильно влияет на результаты последующего расчета скоростей астрофизических реакций. Действительно, как уже было сказано, в рассматриваемых условиях средняя кинетическая энергия нейтронов составляет порядка 100 кэВ, а при таких энергиях налетающей частицы роль прямых и предравновесных реакций мала.

Для сечений TALYS в области 0.4 МэВ наблюдается особенность, отсутствующая на графике NON-SMOKER. Ярче всего она проявляется на основных состояниях ядра-мишени. Особенность эта может быть вызвана учетом некоего порогового эффекта или проявлением шивки в одной из составляющих статистической модели, например, в моделях плотности ядерных уровней, использующих переход к приближению Ферми-газа при достижении определенных энергий.

Подобные зависимости сечений от энергии налетающей частицы с вариацией таблицы масс были рассмотрены нами для всех изотопов $^{180-190}\text{Tb}$. Кроме того, аналогичные зависимости были получены нами с тремя упомянутыми выше моделями плотностей ядерных уровней: СТМ, BFM и GSM. Качественно полученные графики сечений совпадают с представленными на рис. 3.

3. РАСЧЕТ СКОРОСТЕЙ РЕАКЦИИ (n, γ) НА ОСНОВЕ ПОЛУЧЕННЫХ СЕЧЕНИЙ

Скорость ядерной реакции вычисляется сверткой сечений процесса по энергетическим распределениям исходных частиц при заданной температуре T :

$$\lambda(T) = \sqrt{\frac{8}{\pi m}} \frac{N_A}{(kT)^{3/2} G(T)} \times \int_0^\infty \sum_\mu \frac{(2I^\mu + 1)}{(2I^0 + 1)} \sigma^\mu(E) E \exp\left(-\frac{E + E_x^\mu}{kT}\right) dE, \quad (1)$$

где m — приведенная масса налетающей частицы и ядра-мишени, N_A — число Авогадро, k — постоянная Больцмана, $\mu = 0, 1, \dots$ — состояние рождающегося ядра, I^μ — соответствующий состоянию μ момент движения, $\sigma^\mu(E)$ — сечение рождения ядра в состоянии μ , E_x^μ — энергия возбуждения. Статистическая сумма $G(T)$ рассчитывается по формуле

$$G(T) = \sum_\mu \frac{(2I^\mu + 1)}{(2I^0 + 1)} \exp\left(-\frac{E_x^\mu}{kT}\right).$$

При помощи TALYS на основе полученных ранее сечений нами были вычислены скорости реакций (n, γ) при температуре 1.2 ГК на ядрах $^{180-190}\text{Tb}$ с использованием различных моделей плотности уровней и таблиц масс ядер. Результаты вычислений представлены в таблице. При варьировании модели плотности энергетических уровней использовалась таблица масс SHFB, при варьировании таблицы масс — модель плотности уровней СТМ (по этой причине столбцы SHFB и СТМ совпадают). Для сравнения в таблице также приведены стандартные значения скоростей реакций из библиотеки REACLIB.

Как видно, скорости REACLIB в целом ниже полученных при помощи TALYS, за исключением реакции на самом легком изотопе ^{180}Tb . Для REACLIB заметна более выраженная зависимость от четности числа нуклонов. Заметно также, что и результаты TALYS с различными входными параметрами расчета существенно, иногда на порядок отличаются друг от друга, причем наиболее заметные расхождения скоростей реакций связаны с вариацией массовой модели. Тем самым при моделировании r -процесса больших погрешностей концентраций продуктов следует ожидать именно при подборе таблицы масс.

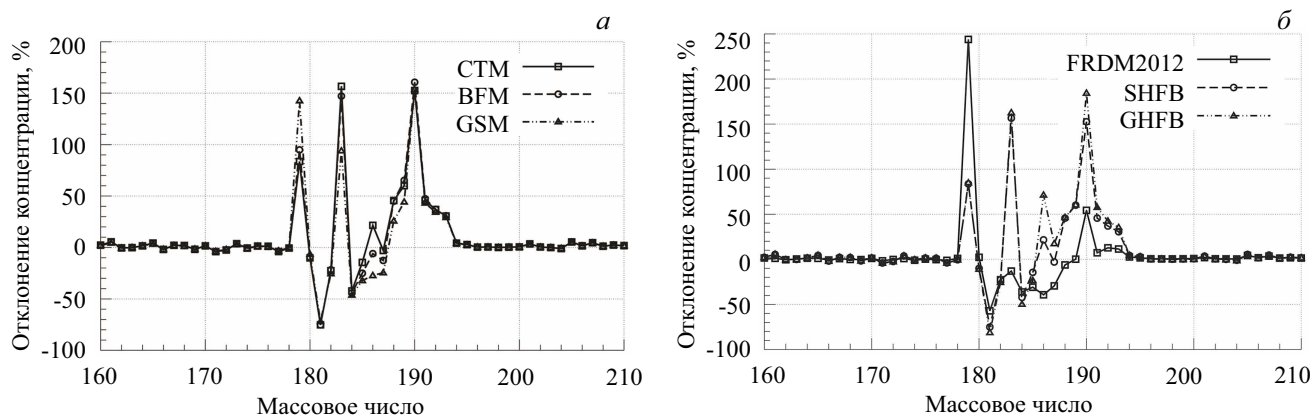


Рис. 4. Относительные изменения концентраций продуктов r -процесса при вариации скоростей реакции (n, γ) на изотопах тербия $^{180-190}\text{Tb}$, сравнение с результатами, полученными при использовании значений скоростей из библиотеки REACLIB. Расчет производился при помощи библиотеки SkyNet: *a* — вариации модели плотности (массовая модель Skyrme-HFB), *б* — вариации массовой модели (модель плотности CTM)

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ r -ПРОЦЕССА С ВАРИАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ

Основным результатом настоящей работы являются распределения отклонений результатов компьютерной симуляции r -процесса при вариации входных параметров: статистической модели, модели плотности энергетических уровней и ядерной модели, на основе которой рассчитываются массы исходных и конечных частиц. Описанный выше расчет r -процесса в приближении канонической модели с использованием библиотеки SkyNet повторялся нами для каждого вычисленного значения скоростей реакций из таблицы.

Результаты каждого расчета массовых распределений продуктов r -процесса сравнивались с исходным расчетом на основе данных REACLIB, описанным в разд. 1. При вариации скоростей каждой отобранной реакции по отдельности мы получили изменения концентраций продуктов вплоть до 20%, причем наибольший эффект наблюдался в области массовых чисел $A \pm 1$, где A — массовое число изотопа, скорость реакции (n, γ) на котором менялась в ходе расчета.

В реальной ситуации неопределенность, вносимая выбором параметров модели ядерных реакций, должна затрагивать не один отдельно взятый изотоп, а как минимум целые диапазоны массовых чисел. Поэтому нами также производился расчет влияния совместного изменения всех скоростей реакций нейтронного захвата на всех рассмотренных изотопах тербия. На рис. 4 представлены изменения (в процентах относительно исходного значения по расчету на основе REACLIB) концентраций r -процесса при вариации скоростей сразу всех отобранных реакций (n, γ) на изотопах тербия $^{180-190}\text{Tb}$. График на рис. 4, *a* соответствует случаю, когда использовались скорости, полученные при вариации модели плотности ядерных уровней. Как видно, изменения концентраций достигают 150%, имеют характер выраженных пиков и, кроме того, существенно затрагивают соседние изотопы, находящиеся вне выбранного нами диапазона массовых чисел $A = 180-190$. Даже для достаточно удаленных ядер можно наблюдать изменения на единицы процентов.

На рис. 4, *б* представлено относительное изменение массового распределения продуктов r -процесса в случае вариации таблицы масс. Видно, выбор таблицы масс влияет на конечные концентрации еще существеннее, чем модель плотностей уровней, наблюдаются скачки до 250%. При этом в остальном характер распределения напоминает график на рис. 4, *a*.

На наш взгляд приведенные результаты свидетельствуют о значительной неопределенности, вносимой используемыми параметрами моделей ядерных реакций в результаты моделирования r -процесса. Даже модификация входных данных на 10 изотопах тербия приводит к изменению массовых распределений в соответствующей области массовых чисел в несколько раз. Очевидно, что суммарный эффект одновременной модификации скоростей реакций на всех изотопах в данной массовой области, не ограничиваясь лишь изотопами тербия, будет еще более значительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большинство астрофизических ядерных реакций не может быть воспроизведено в земных условиях и потому данные об их сечениях рассчитывают на основе теоретических моделей. Проведенные нами вычисления сечений показывают, что результаты двух различных программ NON-SMOKER и TALYS для реакций нейтронного захвата на изотопах тербия $^{180-190}\text{Tb}$ существенно различаются между собой. Более того, сечения, полученные при помощи TALYS с различными входными параметрами (моделью плотностей энергетических уровней и таблицей масс ядер), также весьма значительно отличаются друг от друга. То же самое касается и значений скоростей ядерных реакций, которые вычисляются непосредственно из сечений процессов.

Скорости реакций являются важнейшими параметрами численного моделирования астрофизических ядерных систем и механизмов, так как явно входят в выражение для эволюции концентрации отдельного изотопа. Для исследования таких важных явлений, как r -процесс, который непосредственно определяет распространенность тяжелых ядер во Вселенной, необходимо знать эти величины с высокой

точностью. Мы убедились в том, что неопределенности в скоростях звездных ядерных реакций, вычисленных при помощи современных статистических моделей, приводят к большим погрешностям распределений продуктов r -процесса. В частности, при вариации скоростей реакции (n, γ) на ядрах $^{180-190}\text{Tb}$ мы наблюдали относительные изменения конечных распределений, полученных при моделировании r -процесса в приближении канонической модели с использованием библиотеки SkyNet, вплоть до 250%.

Минимизировать эти ошибки возможно лишь посредством уточнения существующих моделей ядерных реакций, особенно в области экзотических ядер, не наблюдающихся в лаборатории, однако играющих большую роль в звездных ядерных системах. При отсутствии экспериментальных данных это довольно сложная задача, однако она может быть упрощена развитием общедоступных баз данных астрофизических ядерных реакций, таких как REACLIB.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tompson T. A., Burrows A., Meyer B. S.* // ApJ. 2001. **562**. P. 887.
2. *Meyer B. S., Mathews G. J., Howard W. M.* et al. // ApJ. 1992. **399**. P. 656.
3. *Panov I. V., Janka H.-Th.* // Astron. Astrophys. 2009. **494**. P. 829.
4. *Sumiyoshi K., Terasawa M., Mathews G. J.* et al. // ApJ. 2001. **562(2)**. P. 880.
5. *Farouqi K., Kratz K.-L., Mashonkina L. I.* et al. // ApJL. 2009. **694(1)**. L49.
6. *Wheeler J. G., Cowan J. J., Hillebrandt W.* // ApJl. 1998. **493**. L101.
7. *Rosswog S., Liebendorfer M., Thielemann F.-K.* et al. // Astron. Astrophys. 1999. **341**. P. 499.
8. *Lattimer J. M., Schramm D. N.* // ApJ. 1976. **210**. P. 549.
9. *Arnould M., Goriely S., Takahashi K.* // Phys. Rep. 2007. **450**. P. 97.
10. *Lippuner J., Roberts L. F.* // ApJS. 2017. **233**. P. 1.
11. *Cybur R. H., Amthor A. M., Ferguson R.* et al. // ApJ. 2010. **189**. P. 240.
12. *Koning A. J., Rochman D., Sublet J.* et al // Nucl. D. Sheets. 2019. **155**. P. 1.
13. *Gilbert A., Cameron A. G. W.* // Can. J. Phys. 1965. **43**. P. 1446.
14. *Dilg W., Schantl W., Vonach H., Uhl M.* // Nucl. Phys. 1973. **A217**. P. 269.
15. *Ignatyuk A. V., Weil J. L., Raman S., Kahane S.* // Phys. Rev. 1993. **C47**. P. 1504.
16. *Wang M., Audi G., Kondev F. G.* et al. // Chin. Phys. 2017. **41**. 030002.
17. *Möller P., Sierk A. J., Ichikawa T., Sagawa H.* // ADNDT. 2016. **109-110**. P. 1.
18. *Goriely S., Chamel N., Pearson J. M.* // Phys. Rev. Lett. 2017. **102**. 152503.
19. *Goriely S., Hilaire S., Girod M., Peru S.* // Eur. Rev. J. 2016. **7**. P. 202.
20. *Rauscher T., Thielemann F.-K.* // ADNDT. 2001. **79**. P. 47.

The Influence of the Selection of the Parameters of a Statistical Model on the r -Process Yields of $^{180-190}\text{Tb}$

V. V. Negrebetskiy^{1,a}, K. A. Stopani²

¹Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics; ²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
E-mail: ^anegrebetckii.vv16@physics.msu.ru.

Theoretical cross sections of the neutron capture reaction on neutron rich isotopes $^{180-190}\text{Tb}$ have been obtained using the TALYS statistical model with various methods of calculating nuclear masses and energy level densities. On the basis of these data, reaction rates at a temperature of 1.2 GK corresponding to the explosive evolution of a star have been computed. The obtained rates were used to calculate the astrophysical r -process using the SkyNet Modular Nuclear Reaction Network Library. Concentrations deviations of r -process products were computed for different parameters of the statistical model for calculating cross sections.

Keywords: nucleosynthesis, r -process, neutron-rich isotopes.

PACS: 26.30.+k.

Received 24 October 2020.

English version: [Moscow University Physics Bulletin. 2021. 76, No. 1. Pp. 22–28.](#)

Сведения об авторах

1. Негребетский Василий Витальевич — студент магистратуры; e-mail: negrebetckii.vv16@physics.msu.ru
2. Стопани Константин Александрович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник.