

Моделирование нуклеосинтеза обойдённых изотопов в бинарных системах нейтронная звезда – черная дыра

И.В. Копытин, e-mail: i-kopytin@yandex.ru

Т.А. Крыловецкая, e-mail: tkrylovetskaya@gmail.com

А.А. Крыловецкий, e-mail: aakryl@cs.vsu.ru

И.С. Забалуев, e-mail: igor9765414@gmail.com

Воронежский государственный университет

Аннотация. С помощью вычислительного эксперимента проведено изучение роли столкновительного бета-распада в синтезе р-изотопов в звездном веществе, находящемся в экстремальных условиях при поглощении нейтронной звезды черной дырой. Были вычислены сечения таких процессов для бета-стабильных ядер, температурная зависимость полученных сечений была параметризована через 7 параметров для включения реакций СБР в библиотеку JINA REACLIB для дальнейшего использования при вычислениях в пакете SkyNet.

Ключевые слова: моделирование нуклеосинтеза, бинарные системы, нейтронная звезда, черная дыра, столкновительный бета-распад, Nuclear Reaction Network, программный пакет SkyNet, библиотека REACLIB.

Введение

Данное исследование посвящено исследованию с помощью вычислительного эксперимента возможности синтеза так называемых “обойденных” ядер, или р-ядер, во время катастрофического астрофизического процесса – при поглощении нейтронной звезды черной дырой.

Объяснение наблюдаемых распространённостей химических элементов до сих пор остается актуальной задачей современной ядерной астрофизики. В настоящее время считается, что многие средние и некоторые тяжелые элементы образуются на квазиравновесных стадиях эволюции массивных звезд в реакциях s-захвата нейтронов атомными ядрами. Это так называемый медленный (в сравнении со скоростью обычно конкурирующего с ним ядерного бета-распада) процесс. Именно с его участием образуется примерно половина наблюдаемого количества элементов с $A > 60$. Большинство же тяжелых ядер, в том числе, практически все ядра тяжелее изотопа ^{209}Bi , образуются в г-процессе. Это быстрый (опять-таки в сравнении со скоростью ядерного бета-распада) последовательный захват нескольких нейтронов. Он возможен только на катастрофических стадиях эволюции звезд. В настоящее

время роль γ -процессов довольно хорошо изучена и показано, что в нуклеосинтезе тяжелых ядер она существенна для этапа взрыва сверхновых.

Несмотря на успехи стандартной теории нуклеосинтеза, в рамках указанных выше процессов образование ряда изотопов не может быть объяснено. Они называются r -, или обойденными, ядрами и их больше трех десятков. В этих ядрах имеет место относительный избыток протонов и они бета-стабильны. Если основываться на картине s -процесса, то можно увидеть, что эти ядра возникли как бы без участия естественного бета-распада – каким-то образом он обойден. Анализ конкретных ситуаций показывает, что причиной его исключения из процесса синтеза является энергетический порог на предпоследнем этапе стандартного пути – захват нейтрона и цепочка последовательных бета-распадов. Поэтому главная задача теории синтеза r -ядер – предложить путь преодоления указанного энергетического порога, высота которого не мала и обычно составляет от 1 МэВ до 3 МэВ, а иногда и больше.

Наблюдаемые распространенности обойденных ядер, как правило, на два-три порядка меньше, чем у ядер, полученных в s - и γ -процессах. Тем не менее, теоретически удовлетворительные количественные результаты для распространенностей всех r -ядер пока получить не удалось, хотя предлагались различные физические механизмы их синтеза в условиях квазиравновесных этапов эволюции звезд. Поэтому в последнее время стали активно разрабатываться модели образования r -изотопов в условиях γ -процесса.

Моделирование процесса нуклеосинтеза в бинарных системах

Моделирование нуклеосинтеза в бинарных системах типа нейтронная звезда – нейтронная звезда или нейтронная звезда – черная дыра является одним из передовых в современной ядерной астрофизике. В настоящей работе моделируются реакции образования химических элементов за время поглощения нейтронной звезды черной дырой [1]. За основу процесса ядерного нуклеосинтеза был взят столкновительный бета-распад (СБР), позволяющий преодолеть вышеуказанный энергетический барьер, продолжить прерванную им бета-распадную цепочку и в итоге привести к появлению r -ядра. Можно исследовать роль нескольких видов этого процесса: протон-ядерные, нейтрон-ядерные и ядро-ядерные столкновения. В настоящем исследовании был рассмотрен бета-распад, стимулированный столкновением частицы с зарядовым числом Z с протоном или другой частицей с зарядовым числом Z' . Аналитическое выражение для сечения такого процесса было получено в работе [2]:

$$\langle \sigma \cdot v \rangle = \left(\frac{8}{\pi \mu T^3} \right)^{1/2} \int_{\Delta + \Delta_f + 1} \sigma_{\beta}^{(col)}(\beta_f) \exp(-\varepsilon / T) d\varepsilon, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_{\beta}^{(col)}(\beta_f) &= \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{g_v^2 \alpha_e^4 Z(Z+1)Z'^4 \mu^{9/2}}{\varepsilon_i^{3/2} (1 - \exp(-2\pi\lambda_i))} \xi_{\beta}(\beta_f) \times \\ &\times \int_0^{\varepsilon_i - \Delta - \Delta_f} \frac{\Phi(E_f) d\varepsilon_f}{(\exp(2\pi\lambda_f) - 1) k_f (k_i - k_f)^4 (k_i + k_f)^2} \times \\ &\times \int_{x_0}^0 \frac{|F(-i\lambda_i, -i\lambda_f, 1; x)|^2}{(1-x)^2} dx, \\ &x_0 = -4k_i k_f / (k_i - k_f)^2 \\ \Phi(E) &= \frac{1}{60} (E^2 - 1)^{1/2} (2E^4 - 9E^2 - 8) + \frac{1}{4} E \ln(E + (E^2 - 1)^{1/2}), \\ E_f &= \varepsilon_i - \varepsilon_f - \Delta - \Delta_f, \\ \lambda_i &= \frac{ZZ'e^2\mu}{\hbar^2 k_i}, \lambda_f = \frac{(Z+1)Z'e^2\mu}{\hbar^2 k_f}. \end{aligned}$$

Здесь индексы i и f отмечают начальное и конечное состояния столкновительной системы соответственно, $\hbar k_s$ – относительный импульс в состоянии столкновительной системы, μ – ее приведенная масса, Δ – пороговая энергия, определяемая разностью энергий связи дочернего ($A, Z+1$) и материнского (A, Z) ядер, Δ_f – энергия состояния дочернего ядра, отсчитанная от его основного состояния, α_e – постоянная тонкой структуры, g_v – бета-распадная константа, $g_v^2 \xi_{\beta}(\beta_f)$ – ядерный матричный элемент β -перехода $|\beta_i\rangle \rightarrow |\beta_f\rangle$, ε_s – энергия относительного движения в столкновительной системе, e – элементарный заряд.

Определенную проблему представляет расчет ядерных матричных элементов β -переходов. Он неизбежно связан с определенными модельными предположениями о структуре ядерных состояний, между которыми осуществляется переход. В настоящее время надежной расчетной схемы или универсальной модели ядра, позволяющей получить реалистичные волновые функции ядерных состояний, не

существует, исключая простейшие случаи, например, зеркальных β -переходов. Ситуация станет еще более сложной, если рассматривать β -переходы из возбужденных состояний (или в возбужденные). Эти ядерные состояния могут быть самой разной природы, и здесь при расчете интегралов перекрытия ядерных волновых функций на β -распадном операторе ошибка может быть особенно велика. Поэтому мы для столкновительных β -переходов использовали значения экспериментальных матричных элементов, полученные из известных значений $\lg f_0 t$, так как в этом случае нередко ядро $(A, Z+1)$, наряду с β^- -распадом, испытывает и естественный β^+ -распад $(A, Z+1) \rightarrow (A, Z)$ с известными значениями $\lg f_0 t$, что позволяет получить экспериментальные матричные элементы.

Моделирование нуклеосинтеза в неравновесных системах представляет собой достаточно сложную задачу, состоящую в решении огромного числа связанных нелинейных дифференциальных кинетических уравнений. Для описания эволюции астрофизических объектов и происходящих с ними событий необходимо учесть протекающие при этом ядерные реакции. Количество участвующих или образующихся в них нуклидов может составлять от тысяч до десятков тысяч, а число возможных реакций — сотни тысяч. Всю совокупность основных ядерных реакций, определяющих эволюцию звездного вещества, и всевозможные их связи можно рассмотреть на основе кинетической теории. Обычно при таком подходе астрофизический объект или объекты, участвующие в каком-либо событии, рассматриваются как однородная система частиц различных типов, которые в результате взаимодействий могут превращаться друг в друга. Решая численно систему кинетических уравнений, можно найти временную зависимость количества нуклидов каждого типа. Совокупность математических уравнений и вычислительных алгоритмов, позволяющая проследить временную эволюцию системы большого числа нуклидов, получила название Nuclear Reaction Network (NRW, сеть ядерных реакций).

В недавней работе [3] была реализована NRW в виде, получившим название SkyNet. Соответствующий программный пакет с открытым исходным кодом получил такое же наименование. Первоначально SkyNet разрабатывался с целью моделирования синтеза ядер в моделях γ -процесса, однако, благодаря своей модульной архитектуре и гибкости, данное программное обеспечение может быть использовано для решения и более общих задач астрофизики. SkyNet

позволяет моделировать эволюцию системы, задавая произвольный набор изотопов и разнообразные ядерные реакции с их участием. В качестве библиотеки ядерных реакций используются данные формата открытой базы реакций JINA REACLIB [4].

Для включения реакций СБР в NRW программного пакета SkyNet необходимо вычислить параметры температурной зависимости их сечений для всех представляющих интерес изотопов и сформировать файл данных, описывающих соответствующие реакции в формате JINA REACLIB. Сечение каждой реакции было рассчитано для температур $T = T_9 \times 10^9 \text{ К}$ с 24 значениями параметра 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. Используя температурную зависимость найденных сечений процесса СБР, методом наименьших квадратов были найдены величины коэффициентов a_i для следующей параметризации температурной зависимости:

$$N_A \langle \sigma v \rangle = \exp(a_0 + a_1 T_9^{-1} + a_2 T_9^{-1/3} + a_3 T_9^{1/3} + a_4 T_9 + a_5 T_9^{5/3} + a_6 \ln T_9), \quad (3)$$

которая содержит семь параметров a_i , $i = 0, \dots, 6$ (N_A - число Авогадро, $T_9 = T \cdot 10^{-9} \text{ К}$, T - температура среды).

Таблица

Примеры коэффициентов реакций СБР

$p + {}^{112}\text{Cd} \rightarrow {}^{112}\text{In} + p + e^-$		$p + {}^{130}\text{Xe} \rightarrow {}^{130}\text{Cs} + p + e^-$	
a_0	7.743250×10^1	a_0	8.953832×10^1
a_1	-1.283204×10^1	a_1	-1.880849×10^1
a_2	-3.479972×10^2	a_2	-3.395520×10^2
a_3	1.743615×10^2	a_3	1.454416×10^2
a_4	-4.165798×10^0	a_4	-2.214546×10^0
a_5	8.405687×10^{-2}	a_5	-4.313749×10^{-2}
a_6	-1.347518×10^2	a_6	-1.222853×10^2

Заключение

Для всех рассмотренных реакций СБР с использованием найденных коэффициентов a_i подготовлены описания в формате библиотеки REACLIB. Полученные результаты для СБР были также включены в сеть реакций, протекающих при слиянии нейтронной

звезды и черной дыры, и могут использоваться далее при вычислениях в пакете SkyNet.

Литература

1. Foucart, Francois. Neutron star-black hole mergers with a nuclear equation of state and neutrino cooling: Dependence in the binary parameters [Текст] / Francois Foucart, M. Brett Deaton // Phys. Rev. D.—2014.—Vol. 90.
2. Копытин И.В. Столкновительный β -распад ядер в кулоновском поле и проблема происхождения обойденных изотопов / И.В.Копытин, Т.А.Крыловецкая // Ядерная физика.- 1998.- Т.61.- №9.- С. 1589-1599.
3. Lippuner, Jonas. r-Process Nucleosynthesis in Neutron Star Mergers with the New Nuclear Reaction Network SkyNet [Текст] : Ph. D. thesis / Jonas Lippuner ; California Institute of Technology. — [S. l. : s. n.], 2018.
4. The jina reaclib database: Its recent updates and impact on type-I X-ray bursts [Текст] / R. H. Cyburt, A. M. Amthor, Z. Meisei, S. Warren // The Astrophysical Journal Supplement Series.—2010.