Моделирование синтеза тяжелых ядер в r-процессе Бакалаврская работа

Негребецкий В.В.

студент IV курса Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Кафедра общей ядерной физики

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Стопани К.А.

Введение

- Одним из важнейших механизмов астрофизического нуклеосинтеза является *r*-процесс, отвечающий за образование основной массы тяжелых изотопов во Вселенной.
- Экстремальность требуемых для протекания *r*-процесса условий ограничивает доступные методы его исследования компьютерным моделированием.
- В первой части настоящей работы исследуется влияние параметров расчета сечений ядерных реакций на результаты компьютерной симуляции r-процесса.
- Вторая часть работы посвящена численным методам моделирования астрофизического нуклеосинтеза, ставится задача реализации эффективной схемы расчета, которую можно было бы внедрять в глобальные системы моделирования звездной эволюции.

Звездный нуклеосинтез

Наблюдаемая распространенность ядер в Солнечной системе



Массовое распределение изотопов в Солнечной системе по данным Lodders, K. ApJ 591 (2003) 1220 и уд. энергии связи по данным AME2016.

Звездный нуклеосинтез

Механизм r-процесса



Схематическое изображение треков *r*-процесса.

Сценарии r-процесса: вспышки сверхновых, столкновения нейтронных звезд, черных дыр. $T\sim 10^9 {\rm K},~\rho_n\sim 10^{20} {\rm cm}^{-3}$

Расчет r-процесса

Рассматриваемая система уравнений

В пределах одной зоны внутризвездного горения изменение концентраций изотопов задается системой ОДУ:

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

▶
$$y_i$$
 – концентрация i -го изотопа

$$\blacktriangleright \lambda_k$$
 — скорость протекания k -ой реакции

•
$$g_k=\pm 1$$
 (накопление или распад изотопа)

- К_i множество реакций, задействующих *i*-й изотоп
- *L_k* множество исходных изотопов *k*-й реакции

В реальной астрофизической системе изотопов тысячи \Rightarrow столько же уравнений.

Расчет r-процесса

Результирующее распределение концентраций в канонической модели r-процесса



Результаты расчета r-процесса с помощью библиотеки SkyNet в приближении канонической модели (CAR): длительность симуляции 1 секунда, температура 1.2 ГК, плотность вещества 10^8 г/см³, исходное ядро ⁵⁶ Fe.

Расчет r-процесса

Карта суммарных выходов реакций в CAR с исходными данными REACLIB



 $N(A,Z)=\sum_i\int_0^T\lambda_i(t)\cdot\prod_jy_j(t)dt,$ T— время симуляции, λ_i — ск-ть *i*-й реакции, y_j — концентрация j-го изотопа.

7 / 20

Отбор реакций для расчета скоростей



Выходы реакций (n,γ) и (γ,n) на изотопах тербия.

- $A \lesssim 170$: почти нулевые интегральные выходы реакций
- $A \gtrsim 200$: состояние статистического равновесия
- Реакции на изотопах ^{187÷193}Тb наиболее чувствительны к изменению скоростей.

Статистические модели ядерных реакций

Прямое измерение $\approx 10^5$ величин λ невозможно: при $T\sim 10^9$ К заселены возб. состояния ядер, большинство изотопов являются экзотическими \Rightarrow источник λ — модели.

Рассмотренные входные данные стат. моделей TALYS и NON-SMOKER:

Вариации Ферми-газовой модели плотностей уровней $ho(E_x,J,\Pi)$

- Модель постоянной температуры (СТМ)
- Модель BFM
- Модель сверхтекучей жидкости (GSM)

Массовые модели в области экзотических ядер

- Микро-макроскопическая модель FRDM
- ▶ Модель Skyrme-HFB
- ▶ Модель Gogny-HFB

Сечения реакций и отклонения от эталонного распределения с разл. моделями ho



 $^{188}Tb + n \rightarrow ^{189}Tb$

Пример расчета для ¹⁸⁸ Tb

Суммарные отклонения от эталонного распределения с разл. моделями ρ



Суммарное отклонение для реакций (n,γ) на $^{187 \div 193} {
m Tb}$

Сечения реакций и отклонения от эталонного распределения с разл. моделями масс



¹⁸⁸Tb + n → ¹⁸⁹Tb

Пример расчета для ¹⁸⁸ Tb

Суммарные отклонения от эталонного распределения с разл. моделями масс



Суммарное отклонение для реакций (n,γ) на $^{187 \div 193} \mathrm{Tb}$

Численные методы моделирования нуклеосинтеза Якобиан системы уравнений

Задача термоядерного горения относится к классу жестких.

К жестким задачам применяют неявные методы:

- Неявный метод
 Эйлера (SkyNet)
- Метод переменного порядка (MESA), *Timmes, F.X. ApJ 124 (1999) 241*



Однако неявные методы обладают повышенной трудоемкостью.

Численные методы моделирования нуклеосинтеза Специальные явные методы

Учет особенностей задачи может позволить добиться условной устойчивости явного метода на ней.

Разделение членов, отвечающих за генерацию и расход изотопа:

$$rac{dy_i}{dt}=$$
 "накопление" — "расход"

Подход применялся к задачам химической кинетики:

Специальная явная схема

Белов, А. А. Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша 71 (2015) 12

Метод QSS

Mott, D. dissertation (1999)

В данной работе эти методы были применены к задаче термоядерного горения.

Численные методы моделирования нуклеосинтеза

Расчет модельной системы из 31 изотопа с помощью специальной схемы



Численные методы моделирования нуклеосинтеза Расчет модельной системы из 31 изотопа с помощью схемы MESA



Численные методы моделирования нуклеосинтеза Расчет «горячего» CNO-цикла с помощью методов QSS и MESA



Итоги работы

- Проведен расчет сечений и скоростей реакции нейтронного захвата на изотопах ^{187÷193}Tb с помощью модели TALYS. Полученные результаты сравнивались с расчетом NON-SMOKER.
- Установлено, что вариация параметров модели ядерных реакций при расчете сечений (n, γ) на изотопах Тb приводит к изменению распределения концентраций продуктов r-процесса до 30 ÷ 50%.
- Зависимость изменения концентраций продуктов *r*-процесса от вариации скоростей реакции (*n*, *γ*) является сильно нелинейной.
- Реализованы две явные схемы решения жестких ОДУ задачи нуклеосинтеза, которые могли бы использоваться для расчета реалистичных ядерных систем.
- Расчет показал, что точность специальной явной схемы является недостаточной для задачи исследования процессов нуклеосинтеза. Метод QSS показал себя как простой и эффективный метод, однако работа над его оптимизацией еще не завершена.

Спасибо за внимание!