

548405-745

PI-165

Радиальный институт им. В. Г. Хлопина

Я. М. Крамаровский, В. П. Чечев

**РОЛЬ ТРОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ
В СИНТЕЗЕ ОБОИДЕННЫХ ЯДЕР**

Ленинград—1963

Всесоюзный институт им. В. И. Ленина

А. М. Красковский, В. Н. Чума

РОЛЬ ТЕОРИИ ИДЕИИ
В СИСТЕМЕ ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

Крамаровский Я. М., Чечев В. П. Роль тройного деления в синтезе обойденных ядер. - РИ-165. - Л.: Радиевый ин-т им. В. Г. Хлопина, 1983. - 10 с.

Рассматривается возможное влияние тройного деления с вылетом обогащенных нейтронами легких заряженных частиц на синтез обойденных нуклидов. Показано, что этот механизм не в состоянии объяснить концентрации обойденных изотопов, однако он может дать определенный вклад, если вероятность тройного деления для сверхтяжелых ядер резко возрастает с параметром Z^2/A .

Учет β -запаздывающего деления также способствует смещению осколков тройного деления в область изотопов, обогащенных нейтронами.

Последовательное рассмотрение роли тройного деления в нуклеосинтезе возможно только при существенном накоплении экспериментального и теоретического материала по этому процессу, особенно для ядер с $Z > 100$.

Kramarovskii Ya. M., Chечev V. P. The role of ternary fission in the synthesis of bypassed nuclei. - РИ-165. - Leningrad: V. G. Khlopin Radium Institute, 1983. - 10 p.

A possible influence of ternary fission with escape of neutron-enriched light charged particles on the synthesis of bypassed nuclides is considered. It is shown that this concept cannot give explanation of bypassed isotope concentrations, but it can make some contribution, if the probability of ternary fission for superheavy nuclei grows sharply with Z^2/A parameter.

The account of β -delayed fission contributes to the shift of ternary fission fragments into the region of neutron-deficient isotopes.

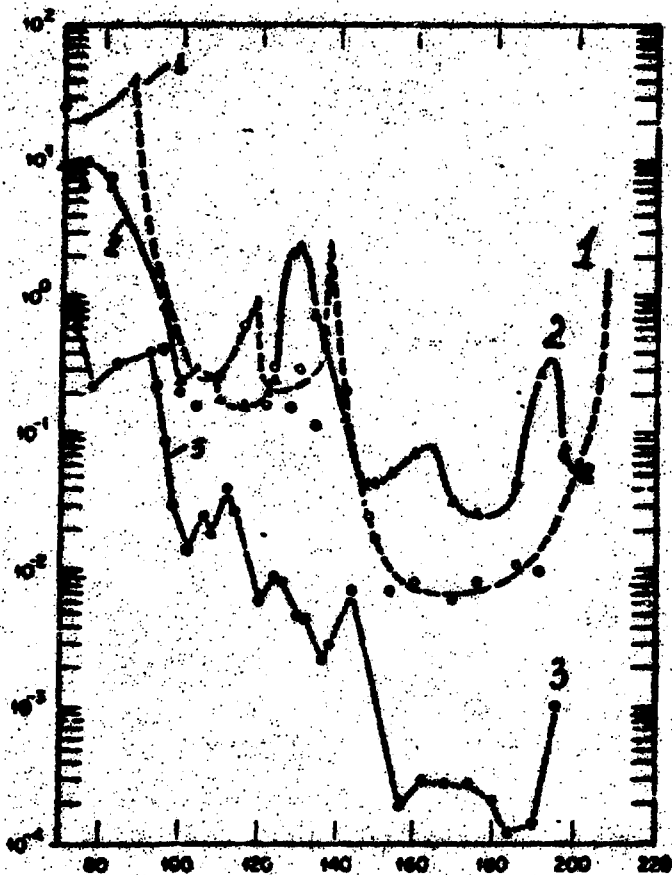
Consistent consideration of the ternary fission role in the nucleosynthesis is possible only with an important accumulation of experimental and theoretical data on this process, particularly for the nuclei with $Z > 100$.

ВВЕДЕНИЕ

Синтез ядер тяжелее железа осуществляется в природе в основном с помощью процессов нейтронного захвата. Стабильные изотопы, образовавшиеся в s - и r -процессах нейтронного захвата, обогащены нейтронами. Процесс деления ядер также приводит к образованию осколков с избытком нейтронов.

Стабильные изотопы тяжелых элементов, начиная с селена, обедненные нейтронами (^{74}Se , ^{76}Kr , ^{84}Zr и т. д.), оказываются в стороне от пути нейтронного захвата. Такие ядра получили название "обедненных".

Наблюдаемые изотопы обедненных ядер в солнечной системе выложены на рисунке. На этом рисунке представлены также изотопы, связанные с массовым числом $70 \leq A \leq 220$ в s - и r -процессе. Кривая изотопов обедненных ядер обнаруживает сходство с кривой распространяемости ядер, образующихся в процессах нейтронного захвата (с учетом деления тяжелых ядер), но изотопы обедненных ядер существенно меньше (на два-три порядка). Отклонения изотопов обедненных ядер к низкому ядру, образованному в результате нейтронного захвата, уменьшаются с увеличением массового числа.



Распределение нуклидов в солнечной системе /1/:

- 1 - ядра, образованные в процессе медленного захвата нейтронов;
- 2 - ядра, образованные в процессе быстрого захвата нейтронов;
- 3 - обобщенные ядра

Способы образования обобщенных ядер

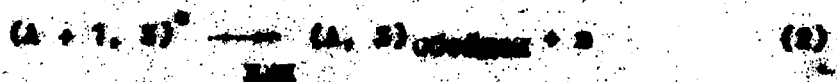
Упомянутые выше особенности кривой выхода обобщенных ядер привели к предположению, что в образовании этих ядер существенную роль играют процессы захвата протонов (p-процессы /2/).

Синтезные условия, необходимые для осуществления p-процесса, требуют плотности протонов $\sim 100 \text{ г/см}^3$ и температуры $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ К}$. При этом для образования различных обобщенных нуклидов легче или тяжелее суметь с наблюдаемой распространён-

ности необходимо рассмотрение внутризвездных областей с разной температурой /3/.

Нагреть пластину водородную оболочку звезды до температуры $\sim 3 \cdot 10^9$ К может только мощная ударная волна. Кроме того, расчеты поздних стадий эволюции звезд показывают, что суммарные у звезды водородной оболочки со средней плотностью ~ 100 г/см³ весьма маловероятно /4/. В работах /3, 5-7/ исследована роль термоядерных реакций (p, n), (p, p) и (γ, p) в синтезе обобщенных ядер. Предполагается, что термодинамическое равновесие (p, γ) \rightleftharpoons (γ, p) не реализуется, и образование обобщенных нуклонов происходит обособить с помощью (p, n), (p, 2n)-реакций, которые осуществляются под действием не-тепловых протонов. В этом случае трудно обеспечить достаточное количество звездного вещества, из которого синтезируются обобщенные нуклиды. Труман и Камерон /8/ установили, что превращение всех первичных продуктов нейтронного захвата (α- и γ-процессом) в обобщенные ядра потребовало бы $\sim 10-15\%$ массы звезд с M = 4-6 M_⊙. Эта оценка сделана для 100%-ной эффективности превращения продуктов нейтронного захвата в обобщенные ядра. С учетом 25-50%-ной эффективности требуется масса вещества возрастает до $\sim 20-50\%$ массы звезды. Таким образом, механизм образования обобщенных ядер с помощью p-процесса связан со значительными трудностями в реализации соответствующих физических условий в звездах.

Г. В. Демоганин и Д. К. Наркин /4/ предположили способ излучения обобщенных нуклонов под действием нейтрона. Через нейтронно-поглощающий при транзитном захвате нейтронного ядра звезды, может происходить в веществе оболочки звезды ядерные превращения, которые приводят к образованию обобщенных нуклонов. Например,



Возможны также цепочки последовательных превращений:

$$\gamma + (A + 2, Z - 2) \rightarrow (A + 2, Z - 1) + e^-; \quad (4)$$

$$(A + 2, Z - 1) \rightarrow (A + 1, Z - 1) + n; \quad (5)$$

$$\gamma + (A + 1, Z - 1) \rightarrow (A + 1, Z) + e^-; \quad (6)$$

$$(A + 1, Z) \rightarrow (A, Z) + n. \quad (7)$$

Количественная оценка эффекта образования обобщенных ядер под действием нейтрально выходящих авторов в предположении, что: 1) энергия падающих при столкновении нейтрально $E_\gamma = 12 \text{ MeV}$ и 2) весь дефект массы нейтральных звезд находится в виде нейтрально различных сортов.

Расчет выполнен при весьма грубых оценках скоростей указанных выше процессов. Результаты его в определенной степени воспроизводят ход кривой распространенности обобщенных ядер за исключением ^{135}La , ^{180}Ta , ^{190}Pt и др. Однако приближенный характер сделанных оценок не позволяет установить точный вид участка нейтрально в процессе синтеза ядер, хотя, конечно, этот вид следует учитывать.

Тройное α -распады в нуклеосинтезе

β -процессы нуклеосинтеза могут быть синтезируемыми элементами в области массовых чисел $A > 200$. Верхний предел массовых чисел синтезируемых нуклидов, так же как и вся доработа γ -процессов, в значительной степени зависит от формы кривой функции β -распада^{*}.

^{*} Возможно, основная роль антинейтрально, возникающих при столкновении нейтральных оболочек звезд, сводится не к синтезу ядер, а к реакции $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$, которая может служить мощным источником нейтрально для α -, γ -процессов и деления под действием нейтрально.

^{**} Спектральная функция β -распада $s_\beta(Z)$ оценивает распределение интенсивности β -распада на уровне дочернего ядра и определяется как $s_\beta(Z) = \sum_i f_i(Z) \nu_i(Z) M_i$,

где $s_\beta(Z)$ - обратная величина G на I MeV энергии возбуждения;

$f_i(Z)$ - величина энергии в дочернем ядре;

M_i - приведенная вероятность перехода в состоянии i с энергией возбуждения E_i и спином J_i .

До последнего времени для расчета спектров функций использовались значительно упрощенные предположения /7, 9-11/.

В настоящее время существуют микроскопические расчеты форм-спектров функций /12, 13/, что позволяет уточнить периоды полураспада нейтронноактивных ядер, которые систематически меньше периодов, предсказанных ранее в /7, 9-11/. Благодаря более коротким периодам полураспада γ -процесс при взрывном горении галлия в Сверхновой не обрывается при $Z \approx 100$, а успевает достигнуть значений $Z \approx 112$ и, возможно, даже больше. Во время последующего охлаждения γ -процесса трансформационные ядра испытывают различные формы распадов: фотопадение, испускание, мезонное нейтроны и мезонное β -распады (β -западение). Значительную роль при этом играют β -западения ядра /13/.

Выход продуктов распада определяет существование линий на кривой распространения функций, образованных в γ -процессе в области массовых чисел $80 \leq A \leq 120$. Например, ядра $A \approx 150$ имеют выход составляет $\sim 30\%$ полного выхода элементов /14/.

Далее на два порядка - размерное деление - является наиболее вероятным. Вероятность тройного деления с вылетом двух заряженных частиц от ${}^1_1\text{H}$ до ${}^{92}_{44}\text{Ru}$ обычно не превышает $3 \cdot 10^{-3}$ для ядер от урана до калифорния в основном состоянии /15, 16/.

Однако с ростом параметра Z^2/A вероятность такого деления возрастает. В недавней работе /17/ Ханлот и др. наблюдали значительный дефицит ($\sim 40\%$) нейтронной энергии осколков деления ${}^{239}\text{Pu}$ относительно деления ${}^{238}\text{Pu}$, ${}^{239}\text{Pu}$. Авторы объясняют этот дефицит тройным делением с вылетом двух заряженных частиц (протонов). Тройное деление ядер с $Z > 100$ может дать гораздо больший выход в осколы элементов с $80 \leq A \leq 120$, чем обычно предполагалось. Согласно данным /18/, вероятность тройного деления с вылетом ${}^2_1\text{He}$ при делении от ${}^{238}\text{Pu}$ и ${}^{239}\text{Pu}$ (Z^2/A возрастает на 86) увеличивается в 6 раз. Линии в тройном делении более легкой заряженной частицы (${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{He}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^6_3\text{Li}$) много больше по абсолютному значению, но их выход с увеличением параметра Z^2/A существенно падает.

Тройное деление в синтезе обобщенных ядер

Для того чтобы в тройном делении (спонтанном, под действием нейтронов или β -запаздыванием) образовались осколки относительно обедненные нейтронами, необходимо вылет заряженной частицы, обогащенной нейтронами, типа ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^3\text{Li}$ и т. д.

Рассмотрим для определенности тройное деление с вылетом ${}^6\text{He}$ и будем считать, что ход массовой кривой в таком делении по сравнению с бинарным сохраняется, но при этом вся кривая сдвигается в сторону обобщенных ядер за счет уменьшения в осколках числа нейтронов. Поскольку выходы осколков тройного деления неизвестны, мы используем данные по выходам в двойном делении ядер-"аналогов", т. е. тех осколков двойного деления, которые по сравнению с обобщенными ядрами имеют заряд на две единицы больше, а число нейтронов - на 6.

Перечень ядер-аналогов для некоторых обобщенных нуклидов и оценка их выходов при двойном делении ${}^{233}\text{U}$ тепловыми нейтронами приведены в таблице.

Выходы ядер-аналогов

Обобщенное ядро	Ядро-аналог при вылете ${}^6\text{He}$	Близкий нуклид и его выход, %	Кумулятивный выход истинного аналога, %
1	2	3	4
${}^{74}\text{Se}$	${}^{82}\text{Kr}$		0,5
${}^{78}\text{Kr}$	${}^{86}\text{Sr}$	${}^{86}\text{Rb}$, $2,3 \cdot 10^{-4}$	
${}^{80}\text{Kr}$	${}^{88}\text{Sr}$		3,4
${}^{84}\text{Sr}$	${}^{92}\text{Zr}$		6,6
${}^{92}\text{Mo}$	${}^{100}\text{Ba}$	${}^{100}\text{Mo}$, 4,4	
${}^{96}\text{Ba}$	${}^{104}\text{Pd}$	${}^{104}\text{Ba}$, 0,94	
${}^{98}\text{Ba}$	${}^{106}\text{Pd}$	${}^{106}\text{Ba}$, 0,23	
${}^{106}\text{Ce}$	${}^{114}\text{Ba}$	${}^{114}\text{Ce}$, 0,66	
${}^{112}\text{Ba}$	${}^{120}\text{Ba}$	${}^{120}\text{Ba}$, $1,5 \cdot 10^{-2}$	

I	2	3	4
^{120}Te	^{128}Xe	^{128}Te , 0,4	
^{124}Xe	^{132}Ba	^{132}Xe , 4,4	
^{126}Xe	^{134}Ba	^{134}Xe , 6,8	
^{130}Ba	^{138}Ce	^{138}Ba , 6,4	
^{132}Ba	^{140}Ce		6,2
^{138}La	^{146}Pr		2,6
^{136}Ce	^{144}Nd		4,6
^{138}Ce	^{146}Nd		2,7
^{144}Sm	^{152}Gd	^{152}Sm , 0,22	

В синтезе обобщенных ядер участвуют в основном тяжелые ядра с $Z \geq 100$, данные по которым отсутствуют. Поэтому можно сделать лишь приближенную оценку вероятности образования обобщенных ядер в тройном процессе элементов с $Z \geq 100$.

$$\frac{\text{Выход обобщенного ядра } (Z, A_{\text{обобщ}})}{\text{Выход "необобщенного" ядра } (Z, A)} = 1/3 \cdot K \cdot \tau \cdot \frac{Y_2}{X} \quad (8)$$

Здесь $1/3$ - коэффициент, учитывающий выход реакции в общий выход ядер с A от 100-180 в пульсационном режиме; X - коэффициент, учитывающий увеличение вероятности тройного процесса для ядер с $Z > 100$; $\tau = Y_1/Y_2$ - относительная вероятность тройного процесса с изотопом ^8He ; Y_2 - вероятность образования дивалентного в бинарном процессе; X - выход "необобщенных" ядер того же элемента в бинарном процессе.

Если $Y_2/X \approx 1$, то выход тройного процесса в синтезе обобщенных ядер становится сопоставимым при $K \approx 10^3$.

Литература

1. Самарин А. Г. В. - Space Sci. Rev., 1970, vol. 15, p. 181.
2. Burbridge G. H., Burbridge G. L., Fowler W. A., Hoyle F. - Rev. Mod. Phys., 1957, vol. 29, p. 547.

3. Ito K. - *Progr. Theor. Phys.*, 1961, vol. 26, p. 990.
4. Дологанский Г. В., Мамкин Л. К. - *Доклады ИИИ АН СССР*, № 94. - М., 1976.
5. Франк-Каменецкий Д. А. - *Астроф. журн.*, 1961, т. 38, с. 91.
6. Allen B. J., Gibbons J. H., Macklin R. L. *Nucleosynthesis and neutron-capture cross sections.* - In: *Advances in nuclear phys.* N. Y. - L., 1971, vol. 4, p. 205.
7. Cameron A. G. W. et al. *CERN-report 70-30.* - 1970, vol. 2, p. 735.
8. Truran J. W., Cameron A. G. W. - *Astrophys. J.*, 1972, vol. 171, p. 89.
9. Klapdor H. V. *CERN-report 76-13.* - 1976, p. 311.
10. Sato K. - *Progr. Theor. Phys.*, 1974, vol. 51, p. 726.
11. Kodama T., Takahashi K. - *Nucl. Phys.*, 1975, vol. A239, p. 489.
12. Klapdor H. V., Oda T. - *Astrophys. J.*, 1980, vol. 42, p. L49.
13. Кузнецов В. И. - *ЭЧАЯ*, 1981, вып. 6, с. 1285.
14. Ohnishi T. - *Astr. Space Sci.*, 1978, vol. 58, p. 149.
15. Вальский Г. В. - *Яд. физика*, 1976, т. 24, с. 270.
16. Лбов А. А. - *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Фундаментальные константы*, 1978, вып. 2, с. 70.
17. Hulet E. K. et al. - *Pure Appl. Chem.*, 1981, vol. 53, p. 973.
18. Madland D. G., Stewart L., LA-6783-MS, 1977.

Редактор Н. Н. Волынец

Изд. в печ. 10.II.82. Т-19797. Серия 60 x 90 1/16

Офсет. печ. Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,10. Тираж 100 экз.

Заказ № 163 Цена 6 коп. ISBN 5-824

Оптический и Радарный отделы им. Н. П. Хвостова

197022, Ленинград, П-82, ул. Ревюева, д. 1