

ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ЦИРКОНИЯ В S-ЗВЕЗДАХ ISOTOPIC COMPOSITION OF Zr IN S-STARs

Ю. К. МЕЛИК-АЛАВЕРДЯН

Бюраканская астрофизическая обсерватория

Резюме. Показано, что профили полос поглощения окиси циркония в HR 1105—звезде класса S—могут быть интерпретированы в рамках допущения о наличии в атмосфере этой звезды заметного количества циркония, образовавшегося путём деления тяжёлых элементов. Наилучшее объяснение указанных абсорбционных полос получено в предположении, что цирконий, входящий в состав рассматриваемых молекул на 60% имеет обычный изотопный состав, соответствующий s—процессу, а на 40%—изотопный состав спектра деления.

Abstract. It is shown that ZrO bands profiles in the S-star HR 1105, can be interpreted in the view at the presence of some Zr in the atmosphere which appears to be the product of heavy-elements decay. The best explanation of absorption bands profiles was obtained assuming, that 60 % of Zr have isotopic composition corresponding to the s-process and 40 % of the isotopic composition of heavy-elements of decay spectra.

Изучение химического состава звезд и межзвездной среды дает ценные сведения относительно происхождения и эволюции звезд. В частности, содержание тяжелых элементов в звездах является основанием для их классификации по возрасту. К звездам подсистемы I относят в основном те звезды, относительно содержание тяжелых элементов у которых сравнительно велико. Эти звезды являются, как правило, более молодыми, чем звезды подсистемы II, характеризующейся пониженным содержанием тяжелых элементов. Химический состав звезд и межзвездной среды указывает на характер ядерных процессов, ответственных за происхождение химических элементов. Наблюдаемые в ряде звезд аномалии химсостава играют весьма существенную роль в проверке правильности наших представлений о происхождении и эволюции звезд. К таким аномальным звездам относятся, в частности, Ар-звезды, углеродные звезды, S-звезды.

Наиболее многочисленную группу аномальных звезд составляют углеродные звезды, то есть звезды с повышенным содержанием углерода. S-звезды менее многочисленны и характеризуются повышенным содержанием элементов 5—6 периодов таблицы Менделеева, таких элементов, в частности, как Zr, Ba, La [1—3]. Согласно, распространенной точке зрения, как C-, так и S-звезды являются, гигантами, далеко продвинувшимися в своей эволюции и в которых внешние слои обогащены вырабатываемыми в их недрах продуктами термоядерного синтеза. С этой точки зрения S-звезды, в частности, считаются звездами, в недрах которых путем s-процесса образуются тяжелые элементы, выносящиеся на поверхность конвекцией.

Такая точка зрения на природу химических аномалий встречается с определенными трудностями, отмеченными впервые в [4]. В частнос-

ти, наличие в атмосферах многих звезд с аномальным химическим составом лития—элемента, быстро выгорающего при внутризвездных температурах—ставит серьезные проблемы перед теорией конвективного перемешивания рассматриваемых звезд [5—7]. Наличие в S-звездах нестабильного элемента технеция, а также наблюдаемая в FG Sge скорость обогащения элементами 5—6 периодов вряд ли могут быть объяснены конвективным выносом этих элементов на поверхность [8].

Такого рода факты заставляют нас обратиться к другой, неоднократно высказываемой, хотя и менее разработанной точке зрения на природу данных химических аномалий. А именно, допустим, что причиной появления на поверхности звезд избыточного количества тяжелых элементов являются процессы, происходящие во внешних слоях этих звезд. В качестве такого процесса можно представить, например, так называемый «холодный» синтез. Другая возможность указана в [4]: это распад гипотетического сверхплотного дозвездного вещества, сопровождаемый вспышками молодых звезд. Предположение о том, что на поверхности S-звезд может происходить распад сверхплотного дозвездного вещества представляется вполне допустимым.

Действительно, по своим пространственно кинематическим характеристикам S-звезды могут быть отнесены к молодым звездам [9]. Кроме того, как показано в [10], химический состав избыточного вещества в S-звездах определенно напоминает спектр масс осколков деления тяжелых элементов, таких, например, как уран. Учитывая все это, мы примем в качестве рабочей гипотезы, (подлежащей проверке), что на поверхности S-звезд происходит распад сверхплотного дозвездного вещества, частично непосредственно в стабильные изотопы, частично в нестабильные, которые путем последовательных распадов и делений в конце концов превращаются в стабильные. Кроме того, примем, что спектр масс осколков деления сверхплотного дозвездного вещества подобен спектру масс осколков деления какого либо из самых тяжелых известных элементов, например, урана. Принимая во внимание достаточно хорошее сходство спектров масс осколков деления целого ряда тяжелых элементов, мы считаем такое допущение вполне приемлемым. Это допущение дает нам возможность рассчитать изотопный состав образующихся путем деления элементов и сравнить его с наблюдаемым.

Расчет изотопного состава. За основу расчетов возьмем спектр масс осколков деления ядра U^{235} нейтронами, возникающими в результате деления [11]. Результаты расчетов приведены в табл. 1, где в первом столбце приводится обозначение изотопа, во втором его вычисленное относительное содержание, а в третьем для сравнения указаны средние космические распространенности соответствующих изотопов [12].

Расчет спектра поглощения молекулы ZrO . Для оценки наблюдаемого изотопного состава циркония можно использовать абсорбционные спектры молекулы ZrO . Рассмотрим γ -систему полос, соответствующих переходу $A^3F-X^3\Delta$. Энергетические уровни можно рассчитать по формуле [13]:

$$v = v_0 + B'_0 J'(J'+1) - D'_0 \left(J' + \frac{1}{2} \right)^4 - B''_0 J''(J''+1) + D''_0 \left(J'' + \frac{1}{2} \right)^4, \quad (1)$$

где J' , J'' вращательные верхнее и нижнее квантовые числа, а B'_0 , B''_0 , D'_0 и D''_0 постоянные.

Для молекул ZrO иного изотопного состава эти постоянные должны быть пересчитаны по формулам [13]:

Изотопный состав элементов, образующихся при делении U^{235}

Изотоп	Относительное содержание		Изотоп	Относительное содержание		Изотоп	Относительное содержание	
	вычисл.	набл.		вычисл.	набл.		вычисл.	набл.
^{84}Sr	0	0.01	^{96}Ru	0	0.06	^{141}Pr	1.00	1.00
^{86}Sr	0	0.10	^{98}Ru	0.21	0.02			
^{87}Sr	0	0.06	^{99}Ru	0.20	0.13	^{142}Nd	0	0.27
^{88}Sr	1.00	0.83	^{100}Ru	0.20	0.13	^{143}Nd	0.29	0.12
			^{101}Ru	0.18	0.17	^{144}Nd	0.25	0.24
^{89}J	1.00	1.00	^{102}Ru	0.15	0.32	^{145}Nd	0.19	0.08
			^{104}Ru	0.03	0.19	^{146}Nd	0.15	0.17
^{90}Zr	0.24	0.52				^{148}Nd	0.08	0.06
^{91}Zr	0.27	0.11	^{130}Ba	0	0.00	^{150}Nd	0.04	0.06
^{92}Zr	0.23	0.17	^{132}Ba	0	0.00			
^{94}Zr	0.25	0.17	^{134}Ba	0	0.02	^{144}Sm	0	0.03
^{96}Zr	0.00	0.03	^{135}Ba	0.33	0.07	^{147}Sm	0.62	0.16
			^{136}Ba	0	0.08	^{148}Sm	0	0.11
^{93}Nb	1.00	1.00	^{137}Ba	0.34	0.11	^{149}Sm	0.21	0.14
			^{138}Ba	0.33	0.72	^{150}Sm	0.16	0.07
^{92}Mo	0	0.16				^{152}Sm	0	0.27
^{94}Mo	0	0.09	^{136}Ce	0	0.00	^{154}Sm	0.02	0.23
^{95}Mo	0.26	0.16	^{138}Ce	0	0.00			
^{96}Mo	0	0.15	^{140}Ce	0.53	0.89	^{151}Eu	0.71	0.48
^{97}Mo	0.25	0.09	^{142}Ce	0.47	0.11	^{153}Eu	0.29	0.52
^{98}Mo	0.24	0.24						
^{100}Mo	0.25	0.10	^{138}La	0	0.00			
			^{139}La	1.00	1.00			

$$v_0^* = v_0 + \frac{1}{2} (\rho - 1)(\omega_e' - \omega_e^*). \quad (2)$$

$$B_0^* = \rho^2 B_0, \quad (3)$$

$$D_0^* = \rho^4 D_0, \quad (4)$$

где

$$\rho^2 = \frac{m(^{90}\text{Zr})m(^{16}\text{O}) [m(^{94}\text{Zr}) + m(^{96}\text{O})]}{m(^{94}\text{Zr})m(^{96}\text{O}) [m(^{90}\text{Zr}) + m(^{16}\text{O})]}. \quad (5)$$

Принимая $m(^{16}\text{O}) = 15,99491$ можно по формуле (5) вычислить ρ^2 .

Приведенные выше данные дают возможность вычислить оптическую толщину τ_λ в полосе поглощения молекулы ZrO некоторого однородного слоя, содержащего N молекул на луче зрения:

$$\tau_\lambda = \text{const} \cdot N \cdot \sum_I \sum_B \sum_J F(I) S(J, B) \exp\left(-\frac{E(J)}{kT}\right) \exp\left\{-\left[\frac{\lambda - \lambda(J, B, I)}{\Delta\lambda}\right]^2\right\}, \quad (6)$$

где $F(I)$ — относительное количество молекул ZrO , содержащих изотоп Zr , $S(J, B)$ — фактор Хэлла-Лондона рассматриваемого перехода, множитель $\exp\left(-\frac{E(J)}{kT}\right)$ выражает больцмановское распределение молекул по вращательным уровням, последний множитель учитывает гауссовский профиль линии поглощения, а параметр $\Delta\lambda$ обусловлен тепловым движением и турбулентностью.

Индекс B в (6) указывает на наличие трех ветвей полосы поглощения P , Q и R . Соответствующие значения факторов $S(J, B)$ будут [15]:

$$S(J, P) = \frac{(J-3)(J-2)}{J}, \quad (7)$$

$$S(J, Q) = \frac{(J-2)(J+3)(2J+1)}{J(J+1)}, \quad (8)$$

$$S(J, R) = \frac{(J+3)(J+4)}{J+1}, \quad (9)$$

где J —вращательное квантовое число нижнего уровня.

Приведенные формулы дают возможность вычислить оптическую толщину τ_λ для любого изотопного состава циркония. Зная τ_λ мы можем найти глубину поглощения R_λ по формуле:

$$\frac{1}{R_\lambda} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{\tau_\lambda}, \quad (10)$$

где R_c —остаточная интенсивность при бесконечно большой оптической толщине τ_λ .

Анализ наблюдательных данных. Учитывая данные табл. 1, а также принимая во внимание относительную распространенность перечисленных в ней элементов и изученность их спектров (как в теоретическом, так и в наблюдательном плане), мы выбрали для дальнейшего анализа приведенные в [14] наблюдаемые профили полос поглощения молекул. Эти данные получены для одной из звезд типа S —HR1105. Из приведенных в [14] абсорбционных полос окиси циркония наиболее свободными от блендирования являются две. Первая из них расположена у λ 6368А и состоит из линий P_{36} , Q_{62} и R_{105} , а вторая—у λ 6377А и содержит линии P_{48} , Q_{75} и R_{116} . Указанные длины волн относятся к воздуху.

Сравнивая приведенные в [14] наблюдаемые положения линий поглощения с рассчитанными по формулам предыдущего раздела, находим поправку $\lambda_{\text{вак}} - \lambda_{\text{возд}} = 1,761 \text{ \AA}$. С учетом этой поправки профили интересующих нас абсорбционных деталей из [14] могут быть представлены следующим образом (табл. 2).

Таблица 2

Наблюдаемые глубины поглощения полос молекулы ZrO

λ R_λ	6370.163 0.08	6370.257 0.20	6370.351 0.32	6370.445 0.39	6370.539 0.14	6370.633 0.06
λ R_λ	6378.453 0.02	6378.547 0.12	6378.641 0.16	6378.735 0.26	6378.829 0.20	

Приведенные в табл. 2 спектральные профили можно сравнить с рассчитанными по формуле (10). Для расчетов возьмем ряд моделей изотопного состава циркония. В первой из этих моделей принято относительное содержание изотопов циркония, соответствующее s —процессу (после распада ^{93}Zr). Во второй модели принят изотопный состав циркония, являющегося на 90% продуктом s —процесса, а на 10%—ре-

зультатом деления. В следующей модели относительная доля циркония, образовавшегося в результате деления увеличена на десять процентов и так далее. В последней, одиннадцатой модели изотопный состав циркония соответствует делению (табл. 3).

Таблица 3

Модели изотопного состава циркония

№ модели	^{90}Zr	^{91}Zr	^{92}Zr	^{93}Zr	^{94}Zr	$N_{\text{дел}} : N_{\text{захв}}$
1	0.50	0.09	0.16	0.25	0.00	0:10
2	0.474	0.108	0.167	0.250	0.000	1:9
3	0.449	0.126	0.175	0.250	0.000	2:8
4	0.423	0.144	0.182	0.250	0.000	3:7
5	0.398	0.162	0.190	0.250	0.000	4:6
6	0.372	0.180	0.197	0.250	0.000	5:5
7	0.346	0.200	0.204	0.251	0.000	6:4
8	0.321	0.217	0.212	0.251	0.000	7:3
9	0.295	0.235	0.219	0.251	0.000	8:2
10	0.270	0.253	0.227	0.251	0.000	9:1
11	0.244	0.271	0.234	0.251	0.000	10:0

Для всех приведенных в табл. 3 моделей изотопного состава по формулам (6) были вычислены τ_i (T и $\Delta\lambda$ взяты те же, что в [14]). Полученные значения τ_i содержат постоянный множитель, который определяется из условия нормировки:

$$\sum_i [\tau_i(\text{набл}) - \tau_i(\text{расч})] = 0, \quad (11)$$

где $\tau_i(\text{набл})$ — вычисляется по формуле (10), при $R_c=1$. Для сравнения расчетных значений τ_i с наблюдаемыми вычислялось среднеквадратичное отклонение σ :

$$\sigma = \left\{ \sum_i [\tau_i(\text{набл}) - \tau_i(\text{расч})]^2 \right\}^{1/2}. \quad (12)$$

Сравнивая между собой полученные значения σ мы нашли, что изотопный состав циркония, соответствующий s — процессу, лучше согласуется с наблюдательными данными, чем соответствующий делению. Однако добавление к цирконию s — процесса некоторого количества циркония спектра деления не приводит к противоречию с наблюдательными данными. Более того, наилучшее согласие расчетных и наблюдательных данных относительно полос поглощения окиси циркония получается в том случае, если допустить, что из общего количества циркония 60% образовалось в результате s — процесса, а 40% — в результате деления.

Обсуждение. Таким образом, сравнение наблюдаемых профилей полос поглощения окиси циркония с их расчетными значениями показывает, что наблюдательные данные не противоречат предположению о наличии на поверхности звезд заметного количества продуктов деления тяжелых ядер. Более того, наилучшее объяснение наблюдаемых профилей полос поглощения получается в том случае, если допустить, что примерно половина наблюдаемого количества циркония соответствует s — процессу, а вторая половина — спектру осколков деления тяжелых ядер.

Этот результат свидетельствует о том, что за наблюдаемые аномалии химического состава S-звезд могут быть ответственны, по край-

ней мере отчасти, процессы деления. Вместе с тем, проведенный выше анализ показывает, что наблюдаемое в S-звездах «избыточное» вещество не могло образоваться путем только деления. Определенную роль в образовании элементов 5—6 периодов играют по-видимому, и процессы нейтронного захвата. Вполне вероятно, что в ходе деления, сопровождающегося выделением значительной энергии, в том числе и в виде потока нейтронов, могут происходить и процессы нейтронного захвата. Поэтому точный изотопный состав образовавшегося при делении вещества может быть получен только с учетом динамики всего процесса.

В заключение заметим, что хотя для расчетов использовались данные относительно спектра масс осколков деления урана, однако деление других тяжелых элементов также приводит к сходному изотопному составу продуктов деления. Уран или подобные урану по спектру деления тяжелые элементы из-за своей малой распространенности не могут, очевидно, быть первичным материалом для образования элементов 5—6 периодов. Если эти элементы действительно образуются путем деления, то исходным материалом для такого процесса могло бы быть сверхплотное дозвездное вещество [4], распадающееся непосредственно на те же элементы, что и известные подверженные делению ядра, либо распадающиеся через промежуточную стадию деления—тяжелые элементы вроде урана.

В настоящей работе рассмотрена одна сторона вопроса, а именно, относительное распределение изотопов циркония. Вторая сторона вопроса—о химическом составе избыточного вещества,—рассматривалась нами ранее [10], где отмечалось, что этот химсостав определенно напоминает спектр масс осколков деления тяжелых элементов. Однако точный сравнительный анализ в этом случае затруднен различием потенциалов ионизации и возбуждения рассматриваемых элементов, различием постоянных диссоциации образуемых ими молекул и рядом других причин. В случае же изотопов одного и того же элемента можно предпринять более или менее количественный анализ содержания, что и было сделано в настоящей работе.

В заключение приношу благодарность академику В. А. Амбарцумяну за обсуждение работы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. P. C. Keenan, Ap. J., 120, 484, 1957.
2. T. B. Ake, Ap. J., 234, 538, 1979.
3. P. C. Keenan, P. C. Boeshaar, Ap. J. Suppl., 43, 379, 1980.
4. В. А. Амбарцумян, Сообщ. Бюраканской обс., 13, 1, 1954.
5. J. G. Cohen, P. A. S. P., 86, 31, 1974.
6. H. R. Johnson, W. L. Kelch, Bull. A. A. S., 4, 323, 1972.
7. A. M. Boesgaard, Ap. J., 161, 1003, 1970.
8. G. E. Langer, R. P. Kraft, K. S. Anderson, Ap. J., 189, 509, 1974.
9. V. M. Blanco, Galactic Structure, eds. A. Blaauw, M. Schmidt, Univ. of Chicago Press, Chicago, 1965, p. 241.
10. Ю. К. Мелик-Алавердян, Астрофизика, 15, 129, 1979.
11. В. М. Горбачев, Ю. С. Замятин, А. А. Лбов, Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер. Атомизд. Москва, 1976.
12. К. Ленг, Астрофизические величины. Мир, Москва, 1978.
13. Г. Герцберг, Спектры и строение двухатомных молекул, ИЛ, Москва, 1949.
14. A. Schadee, D. N. Davies, Ap. J., 152, 169, 1968.
15. J. D. Tatum, M. N. 141, 459, 1968.