

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 15

ФЕВРАЛЬ, 1979

ВЫПУСК 1

УДК 523.877

О ПРОИСХОЖДЕНИИ ИЗБЫТКА ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗВЕЗДАХ ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

Ю. К. МЕЛИК-АЛАВЕРДЯН

Поступила 28 июля 1978

Выдвинуто предположение о том, что избыток элементов 5—6-го периодов периодической системы в S и некоторых C звездах связан с распадом сверхплотного дозвездного вещества. Приводятся доводы в пользу того, что аномалии химсостава и вспышки, наблюдаемые в поверхностных областях звезд, имеют общее происхождение.

Известно, что наряду со звездами, имеющими более или менее стандартный химсостав, существуют и звезды, обладающие существенными аномалиями химсостава. К последним относятся S и некоторые из C звезд, в которых заметно повышено содержание элементов 5-го и 6-го периодов периодической системы. Существует гипотеза о том, что эти элементы образовались в недрах звезд путем нейтронного захвата. Однако присутствие в атмосферах этих звезд Li, быстро выгорающего при внутризвездных температурах, делает такую гипотезу маловероятной. Приходится считать, что эти элементы образуются во внешних слоях звезд.

С другой стороны, для объяснения явления вспышек в звездах поздних спектральных классов В. А. Амбарцумян предположил, что во внешних слоях, так называемых, вспыхивающих звезд происходит распад некоторого сверхплотного вещества, сопровождающийся выделением значительной энергии [1]. Направивается мысль о том, что аномалии химсостава и явления вспышечной активности звезд поздних спектральных классов имеют общую природу — процессы распада во внешних слоях этих звезд.

О том, как происходят эти процессы распада, конечно, ничего не известно. Однако ясно, что в результате распада в конце концов образуются стабильные и долгоживущие элементы периодической системы. Причем на предыдущих стадиях распада могут образовываться и нестабильные элементы, которые в результате цепочек ядерных превращений образуют в ко-

нечном счете стабильные и долгоживущие элементы. В частности, какая-то часть распадающегося вещества может превращаться в подверженные спонтанному делению изотопы тяжелых элементов. Процессы деления многих таких изотопов в настоящее время достаточно подробно изучены. Например, в табл. 1 приводятся данные о средних значениях масс A_1 и A_2 осколков

Таблица 1
МАССЫ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ИЗОТОПОВ [2]

Спонтанное деление			Деление тепловыми нейтронами		
Изотоп	A_1	A_2	Изотоп	A_1	A_2
^{238}U	136,8	96,9	^{232}Th	143	87
^{249}Pu	140	100	^{233}U	140	94
^{242}Pu	140	102	^{235}U	140	96
^{243}Am	137,8	101,6	^{241}Pu	140	106
^{242}Cm	138	104	^{241}Pu	140	102
^{244}Cm	140	104	^{241}Am	141	101
^{246}Cm	141	107	Деление нейтронами спектра деления		
^{250}Cf	142	108			
^{252}Cf	144	108	Изотоп	A_1	A_2
^{254}Cf	143	111	^{231}Pa	140	92
^{255}Es	142	111	^{232}Th	139	92
^{254}Fm	142	112	^{238}U	139	98
			^{239}Pu	140	98

ков деления таких элементов, как U, Pu, Cf, Th и др. Для изотопа U^{233} в табл. 2 приводятся также процентные выходы p элементов, образующихся в процессе деления [2]. В приведенных данных о распаде ряда тяжелых элементов обращает на себя внимание то обстоятельство, что в результате

Таблица 2
ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОДУКТАХ
ДЕЛЕНИЯ U^{233} [2]

Элемент	Br	Se	Kr	Rb	Sr	Zr	Y	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn
p (%)	0,45	0,7	6,37	6,95	5,37	31,9	6,2	26,1	4,8	6,23	1,6	1,02	0,06	0,08	0,02	2,08

Элемент	Tc	J	Xe	Cs	La	Ce	Ba	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
p (%)	3,94	2,39	21,1	12,2	5,9	13,5	6,4	6,4	23,5	1,67	0,13	0,01

деления различных изотопов, спонтанного или вынужденного, образуются осколки деления с отношением масс примерно 1,5 к 1. Относительный выход элементов, образующихся при делении U^{235} , приводится также (в логарифмическом масштабе) на рис. 1, где стрелки указывают на элементы, имеющие повышенную распространенность в S звездах. Химсостав образующегося в результате деления вещества и наблюдающиеся в звездах типа S и C избыточные элементы показаны на рис. 1 для случая вполне типичной схемы деления U^{235} . Получающееся соответствие вряд ли является случайным и указывает на то, что этот избыток действительно мог образоваться путем деления. Подсчитаем, какая часть исходного вещества должна подвергнуться делению, чтобы осколки деления обеспечили бы наблюдаемый избыток элементов. Для этого обратимся к наблюдательным данным.

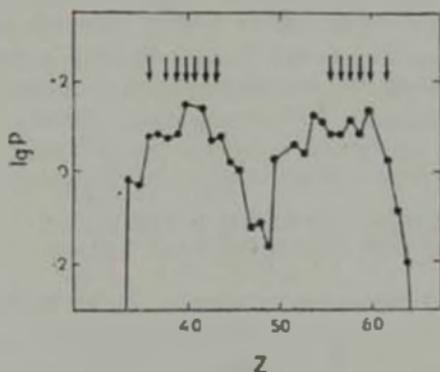


Рис. 1.

В каталоге [3] содержится список 741 звезды типа S. Однако лишь для весьма небольшого числа этих звезд выполнен детальный анализ химсостава [4, 5]. Одна из трудностей анализа химсостава звезд поздних спектральных классов заключается, как известно, в необходимости учета многочисленных молекул. Учет выполняется путем расчета диссоциативного равновесия. Этот расчет имеет весьма приближенный характер из-за неопределенностей, связанных с недостатком данных о константах диссоциации и, что еще более существенно, о содержании кислорода. В этом отношении лучше обстоит дело с исследованием химсостава C звезд, характеризующихся уменьшенным отношением содержания кислорода к содержанию углерода. В некоторых из этих звезд, как и в S звездах, также отмечается повышенное содержание элементов 5—6-го периодов, причем, из-за сравнительно низкого содержания кислорода, в молекулярном состоянии находится лишь небольшая часть этих элементов. Это обстоятельство дает

возможность для С звезд получить более точные данные о химсоставе, чем в случае S звезд. Такие данные приводятся, например, в [6]. Воспользовавшись этими данными, можно найти количество с избыточными атомами рас-сматриваемых элементов по формуле:

$$\lg\left(\frac{c}{c_H}\right) = \lg\left(\frac{c}{c_H}\right)^0 - \lg(10^a - 1), \quad (1)$$

где (c/c_H) — относительное число избыточных атомов по отношению к водороду, $(c/c_H)^0$ — средняя космическая распространенность данного элемента [7], a — логарифмический избыток данного элемента по отношению к средней космической распространенности.

Приведенные в табл. 3 результаты этих расчетов показывают, что относительный избыток элементов 5—6-го периодов по отношению к водороду может достигать величины порядка 10^{-2} . Следовательно, доля x образовавшихся путем деления элементов 5—6-го периодов составляет примерно 10^{-4} массы M всего вещества, участвующего в формировании спектра поглощения. Отсюда следует, что эффективность преобразования дозвездного вещества в элементы 5—6-го периодов должна быть не менее чем 10^{-4} .

Таблица 3

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ 5—6 ПЕРИОДОВ
В НЕКОТОРЫХ ЗВЕЗДАХ ТИПА С
 $\lg(c/c_H) + 12$

Звезда \ Элемент	W Ori	UU Aur	RV Mon	X Cen C	S Ser	TX Psc	VY UMa	BL Ori	SS Vir	J Tau	Z Psc	UX Dra	HD 50613	RR Her	P.S. Cyg
Sr	4.2	4.1	4.2	4.6	4.5	4.2	4.6	4.1	4.6	4.1	4.6	4.1	4.2	4.7	4.7
J	3.4	3.6	3.6	3.6	3.8	3.6	2.2	2.2	2.4	2.2	3.6	3.4	3.4	3.6	3.6
Zr	3.5	3.6	3.9	3.6	3.9	3.7	3.5	3.6	4.3	3.7	3.7	3.6	3.5	3.6	3.9
Ba	3.7	3.7	4.2	3.6	3.9	4.5	4.2	3.8	3.4	1.5	4.7	3.6	4.7	3.3	3.6
La	3.1	2.9	2.6	3.6	3.1	2.7	2.6	2.7	3.8	2.9	2.7	2.8	2.8	2.0	2.0
Ce	3.2	2.5	2.9	3.1	2.8	3.1	2.7	2.7	3.3	2.4	2.8	2.7	3.2	2.8	2.6
Pr	2.9	2.9	3.3	3.8	2.9	3.5	2.9	3.0	3.1	3.1	3.4	2.9	3.6	2.1	2.5
Nd	2.7	2.9	2.7	3.2	2.8	3.0	2.6	2.8	3.4	2.9	2.9	2.8	3.0	2.4	2.5
Sm	2.4	2.6	3.1	3.0	2.6	2.8	2.5	2.7	2.9	2.6	2.9	2.5	2.8	2.5	2.4

Приведем теперь некоторые оценки энергии деления и сравним эту энергию с той, которая выделяется при звездных вспышках. Известно, что при делении в виде кинетической энергии осколков выделяется $e \approx 10^{18}$ эрг на грамм. Допустим теперь, что вспышечная активность, на-

блюдаемая во вспышкающих звездах, связана с делением, в результате которого образуется также избыток элементов 5—6-го периодов, отмеченный в S и C звездах. В этом случае энергия, высвечиваемая в оптических вспышках, равна

$$E = \eta \epsilon M, \quad (2)$$

где η — коэффициент трансформации энергии деления в оптическое излучение вспышки, который можно принять равным 0.01, массу M для вспышкающих звезд следует приравнять массе вещества в конвективной зоне, которую можно принять равной 10^{31} г. Тогда по формуле (2) находим, что $E = 10^{41}$ эрг.

Далее, полагая длительность фазы вспышечной активности равной 10^7 лет, находим среднюю мощность оптических вспышек, связанных с ядерным делением:

$$P = \frac{E}{t} \approx 3 \cdot 10^{34} \text{ эрг./сек.} \quad (3)$$

Эта величина близка к мощности оптической вспышечной активности вспышкающих звезд.

Оценим теперь некоторые параметры вспышек, обусловленных ядерным делением. Радиус области вспышки можно оценить по формуле

$$l \approx \frac{1}{\sigma n}, \quad (4)$$

где n — концентрация атомов в области вспышки, а σ — тормозное сечение осколков деления, равное $0.56 \cdot 10^{-21}$ см² [2].

Сделаем теперь грубое предположение о равновесии излучения и вещества во вспышке. Тогда температуру вспышки можно оценить по формуле

$$T \approx \frac{A}{kN}, \quad (5)$$

где k — постоянная Больцмана, A — энергия вспышки, а N — число атомов в области вспышки, равное $4\pi l^3 n/3$.

Длительность вспышки можно оценить как время рекомбинации:

$$\tau \approx 2.5 \cdot 10^{10} \frac{lT}{n}. \quad (6)$$

Далее, исключая из вышеприведенных выражений температуру и плотность, найдем зависимость между энергией вспышки и ее длительностью:

$$A = \frac{0.9 \cdot 10^{-31} \tau^2}{\tau}. \quad (7)$$

Подставляя в соотношение (7) параметры типичной вспышки $A \approx 10^{31}$ эрг и $\tau \approx 10^2$ сек. находим, что это соотношение хорошо выполняется при равном приведенному выше тормозному сечению осколков деления. С другой стороны, если бы причиной вспышки являлись, к примеру, релятивистские электроны, с сечением тормозных потерь порядка 10^{-24} см², то соотношение (7) определенно противоречило бы наблюдательным данным.

Таким образом, приведенные здесь соображения показывают, что аномалии химсостава и вспышки звезд могут иметь общее происхождение. Конечно, необходимо подчеркнуть, что прямых подтверждений такой точки зрения в настоящее время еще нет, так как эти два явления наблюдаются в звездах разных классов светимости: звезды типа S с аномальным химсоставом являются гигантами, а вспыхивающие звезды являются карликами. Однако отсутствие данных об вспыхивающих звездах типа S или об избытке элементов 5—6-го периодов во вспыхивающих звездах вполне объяснимо. Дело в том, что почти невозможно выполнить точный количественный анализ атмосфер вспыхивающих звезд из-за их низкой светимости и почти невозможно обнаружить в S звездах такие вспышки, которые легко обнаруживаются в карликах, из-за большой светимости S звезд. Однако можно надеяться, что при использовании более чувствительных приемников эти наблюдательные задачи станут разрешимыми.

В заключение приношу благодарность академику В. А. Амбарцумяну за обсуждение и ценные замечания.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

ON THE ORIGIN OF EXCESS OF HEAVY ELEMENTS IN LATE-TYPE STARS

Yu. K. MELIK-ALAVERDIAN

It is proposed that the excess of heavy elements in late-type stars may be accounted by decay of superdense protostellar matter. Advance is given that the excess of heavy elements and flare of stars have the same origin.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Амбарцумян, Сообщ. Бюраканской обс., 13, 3, 1954
2. В. М. Горбачев, Ю. С. Замятин, А. А. Лбов, Взаимодействия излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер. Атомиздат, М., 1976.
3. С. В. Stephenson, Publ. Warner and Swasey obs., 2, 23, 1976.
4. Т. Тсуji, P. A. S. Japan, 14, 222, 1962
5. Т. Тсуji, P. A. S. Japan, 23, 275, 1971
6. К. Утиити, P. A. S. Japan, 22, 93, 1970
7. Л. А. Ис. Распространенность химических элементов, ИЛ, М., 1963.