

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА ВСЕЛЕННОЙ МЕТОДАМИ ЯДЕРНОЙ ГЕОХРОНОЛОГИИ

© 2004 г. В. С. Аракелян

Представлено академиком Н.П. Лаверовым 30.09.2003 г.

Поступило 02.10.2003 г.

Для определения возраста астрономических объектов (планет, Солнца, звезд, Галактики) и Вселенной в целом используются методы, которые по заложенному в их основу принципу можно подразделить на две группы. К одной из них относятся методы наблюдательной астрономии (в том числе наземной и внеатмосферной); к второй – методы ядерной космохронологии. Последние, основы которых разработаны У. Фаулером, предполагают определение относительного содержания долгоживущих (в масштабе 10^9 лет) радиоактивных изотопов, изменяющегося с временем вследствие радиоактивного распада и(или) других ядерных превращений в условиях продолжающегося нуклеосинтеза. Зная закон изменения относительных концентраций изотопов, можно определить возраст рассматриваемого объекта.

С использованием данных, полученных методами ядерной космохронологии, сформированы современные представления о происхождении химических элементов [1]. Зависимость скорости галактического нуклеосинтеза от времени по Фаулеру отображена на рис. 1, заимствованном из [2]. Значения возраста вещества Галактики, полученные ядерно-космохронологическими методами, в полном согласии с результатами определения возраста Вселенной методами наблюдательной астрономии укладываются в интервал от 10 до 20 млрд. лет (заметим, что возраст вещества Галактики t_G примерно равен возрасту самой Галактики T_G ; в свою очередь, $T_G \approx T_U$, где T_U – так называемое “время Хаббла”, или возраст Вселенной).

В последнее время на основе астрономических наблюдений удалось существенно сузить временной диапазон, соответствующий возрасту Вселенной, ограничив его значениями от 12.5 до 14 млрд. лет. В связи с этим особую актуальность приобретает уточнение возраста Вселенной независимо от астрономических методами ядерной хроно-

метрии. Попытке решить эту задачу и посвящена предлагаемая работа.

Один из главных вопросов в решении поставленной задачи заключался в выборе методики,

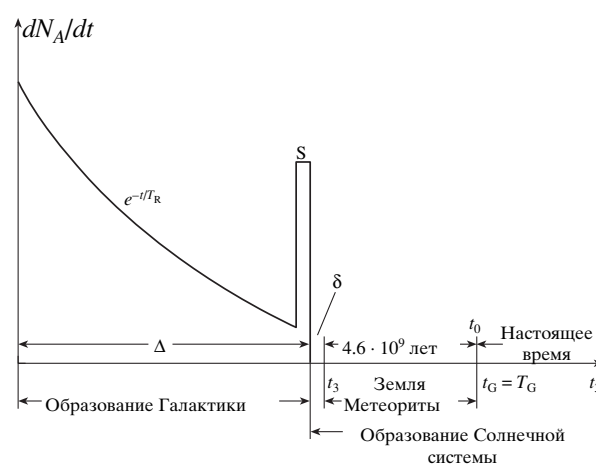


Рис. 1. Зависимость скорости галактического нуклеосинтеза от времени (по Фаулеру). Солнце, Земля и все другие планеты Солнечной системы образовались в межзвездном пространстве под действием сил гравитации и вращения из газовой протосолнечной туманности, состоящей из водорода и гелия, возникших в первые минуты горячей и плотной стадии расширяющейся Вселенной (т.е. в так называемом “Большом взрыве”), а также из элементов, синтезированных предыдущими поколениями звезд Галактики. Нуклеосинтез в звездах до элементов группы железа осуществлялся в процессах горения водорода и гелия, сменяемых горением углерода, неона, кислорода и кремния. Более тяжелые ядра были образованы посредством процессов медленного (s) и быстрого (r) захвата нейтронов ядрами уже синтезированных элементов. Интенсивность нуклеосинтеза в r-процессе уменьшается от момента образования Галактики ($t = 0$) до $t = \Delta$ (Δ – продолжительность нуклеосинтеза) по экспоненциальному закону с временной постоянной T_R , N_A – концентрация ядра с данным массовым числом A ; δ – длительность конденсации вещества, предшествовавшей образованию Солнечной системы; S – вклад от всплеска интенсивности нуклеосинтеза, возможно вызванного близким взрывом сверхновой звезды, произошедшим до или во время образования Солнечной системы; t_G – возраст вещества Галактики, примерно равный возрасту самой Галактики T_G (предположительно $10 < T_G < 20$ млрд. лет).

обеспечивающей существенно более высокую точность определения возраста, чем это было ранее. В целом этому требованию отвечали многие из методов ядерной геохронологии, давно и успешно используемые для определения возраста геологических объектов и метеоритов (см., например, [3]). Однако имелись достаточно обоснованные сомнения в возможности использования ядерно-геохронологических методов для решения масштабных космохронологических задач. Известно, что для определения возраста геологических объектов устанавливают количества содержащихся в образце долгоживущего радионуклида R и изотопа M, являющегося продуктом радиоактивного распада R и накопившегося в образце за время его существования t . Если известна постоянная распада λ рассматриваемого радионуклида, то время распада, равное возрасту образца t , вычисляется по формуле

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{[M]}{[R]} + 1 \right), \quad (1)$$

где [R] и [M] – найденные экспериментально количества изотопов R и M. Одна из основных трудностей, с которой нередко сталкиваются при использовании методов ядерной геохронологии, заключается в следующем. В общем случае экспериментально определяемая величина [M] представляет собой сумму

$$[M] = [M_R] + [M_0], \quad (2)$$

где $[M_R]$ – количество изотопа M, образовавшегося в образце вследствие распада содержащегося в нем радионуклида R за время t ; $[M_0]$ – количество того же изотопа M, попавшего в образец еще на стадии его образования. Поскольку для вычисления времени t с использованием формулы (1) необходимо определить радиогенную составляющую $[M_R]$, в практике геологических исследований обычно изыскиваются возможные способы устранения влияния нерадиогенной составляющей путем внесения возможных поправок на наличие $[M_0]$. Когда речь идет об определении возраста элементов, выполнение требуемого условия $[M] = [M_R]$ может быть достигнуто подбором возможной системы, в которой единственным механизмом образования дочернего изотопа M является распад материнского радионуклида R. Имелись основания предполагать, что удовлетворительное значение возраста элементов может быть получено стронциевым методом на основании известных данных о распространенностях изотопов ^{87}Sr и ^{87}Rb (отметим, что относительное содержание указанных нуклидов в природной смеси изотопов составляет 7.00 и 72.17% соответственно, а период полураспада ^{87}Rb равен $4.88 \cdot 10^{10}$ лет). Дело в том, что в со-

ответствии с [4] изотоп ^{87}Sr образован в s-процессе*, т.е. является исключительно продуктом β^- -распада ^{87}Rb , образовавшегося вследствие медленного захвата нейтрона изотопом ^{86}Kr . Подставив в формулу (1) взятые из [4] данные о распространенности изотопов в Солнечной системе (в частности, $[^{87}\text{Sr}] = 1.51$ и $[^{87}\text{Rb}] = 1.82$), получим $t = 42.5$ млрд. лет, что существенно больше полученных самыми разными методами данных о возрасте Вселенной, укладывающихся в интервал от 10 до 20 млрд. лет. Объяснить это несоответствие можно наличием неучтенного нерадиогенного ^{87}Sr (M_0), по-видимому образовавшегося вследствие (n, γ)-реакции из ^{86}Sr , относительное содержание которого в природной смеси изотопов составляет 9.86%.

По данным [4] нуклеосинтез основных изотопов калия и аргона связывается с взрывным горением кислорода и кремния, тогда как образование ^{40}Ar – с s-процессом, осуществлявшимся в массивных звездах. Иначе говоря, предполагается, что ^{40}Ar является исключительно продуктом распада ^{40}K (схему распада ^{40}K см. на рис. 2а), образовавшегося из ^{39}K по (n, γ)-реакции**. Это предположение согласуется с наблюдаемыми чрезвычайно низкими распространенностями в Солнечной системе ^{40}K и ^{40}Ar в сравнении с другими изотопами этих элементов (табл. 1). То, что в отличие от солнечного земной аргон практически полностью представлен изотопом ^{40}Ar , находит естественное объяснение. По-видимому, при формировании Земли в сфере ее притяжения сохранилась лишь небольшая часть захваченных химически инертных газов (и аргона в том числе). За время

*В образование тяжелых элементов ($A \geq 60$) определяющий вклад вносят два принципиально различающихся процесса, которые основаны на присоединении нейтронов к зародышевым ядрам и на последующем β^- -распаде образовавшихся нуклидов. Это так называемые медленный (slow – s) и быстрый (rapid – r) процессы. В s-процессе невозможен захват второго нейтрона, так как он происходит медленнее, чем β^- -распад нуклида, образовавшегося после захвата первого. И это при том, что период полураспада этого нуклида может исчисляться многими десятками и более лет. В отличие от s-процесса, который протекает в недрах звезд при их эволюции, в r-процессе, благодаря огромной концентрации нейтронов, возникающих в момент взрыва звезд, зародышевое ядро быстро захватывает более одного нейтрона. Количество поглощенных нейтронов может оказаться столь значительно, что время существования образовавшегося нуклида будет исчисляться долями секунды.

**В соответствии с определением в s- и r-процессах неустойчивые нуклиды, образованные вследствие захвата нейтронов, являются β^- -активными. В сравнительно редких случаях, как правило касающихся нечетно-нечетных ядер, располагающихся в полосе стабильности, их переход в стабильное состояние происходит не только в результате β^- -распада, но и посредством захвата электрона (ЭЗ). В качестве еще одного примера на рис. 2б приведена схема распада изотопа ^{186}Re , располагающегося в полосе стабильности между ^{185}Re и ^{187}Re . Как видно из рис. 2, лишь небольшая часть (около 10%) радионуклидов ^{40}K и ^{186}Re , образовавшихся в результате захвата нейтронов стабильными изотопами K и Re соответственно, распадается посредством ЭЗ.

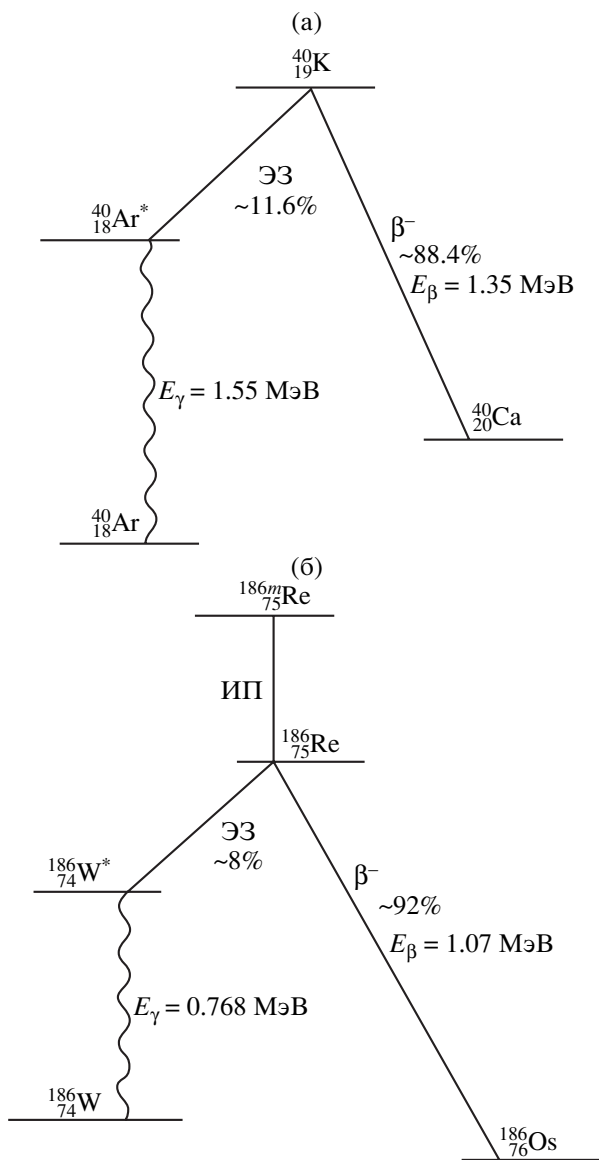


Рис. 2. Схемы радиоактивного распада изотопов ^{40}K (а) и ^{186}Re (б). ИП – изомерный переход.

существования Земли (4.6 млрд. лет) количество накопившегося радиогенного аргона стало столь значительным, что по сравнению с ним относительное содержание основных изотопов этого элемента (^{36}Ar и ^{38}Ar) оказалось пренебрежимо малым. Если это действительно так, то расчетное значение t , полученное с использованием отношения $[\text{Ar}^{40}]$ к $[\text{K}^{40}]$, должно соответствовать возрасту Земли в случае, касающемся данных о распространенностях указанных изотопов в земной коре, и возрасту рассматриваемых элементов – в случае, касающемся их распространенности в Солнечной системе. Поскольку радионуклиды ^{40}K , распадаясь, превращаются в ^{40}Ar и ^{40}Ca с разной вероятностью (рис. 2а), для вычисления t по

отношению $[\text{Ar}^{40}]/[\text{K}^{40}]$ используется формула, несколько отличающаяся от (1) [3],

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{ЭЗ}}} \frac{[\text{Ar}^{40}]}{[\text{K}^{40}]} + 1 \right). \quad (3а)$$

Аналогично для расчета t по отношению $[\text{Ca}^{40}]/[\text{K}^{40}]$ можно записать

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\beta^-}} \frac{[\text{Ca}^{40}]}{[\text{K}^{40}]} + 1 \right). \quad (3б)$$

В этих формулах λ – постоянная распада изотопа ^{40}K , равная $\lambda = \lambda_{\text{ЭЗ}} + \lambda_{\beta^-} = (0.581 + 4.962) \cdot 10^{-10} = 5.543 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$, где $\lambda_{\text{ЭЗ}}$ и λ_{β^-} – константы распада ^{40}K посредством электронного захвата и β^- -излучения соответственно. Результаты расчетов по формулам (3а) и (3б) обобщены в табл. 2. Как видно из табл. 2, полученное по (3а) значение $t = 3.11$ млрд. лет заметно меньше возраста Земли, оцениваемого в 4.6 млрд. лет. Это различие можно объяснить тем, что некоторая часть аргона, не удерживаясь в земной коре, перераспределяется в атмосферу. В отношении возраста $t = 10.8$ млрд. лет, полученного по формуле (3а), имеются два замечания. Во-первых, как отмечено в [4], распространенность ^{40}Ar в Солнечной системе, принятая равной 200, является оценочной. В связи с этим уместно заметить, что увеличение (уменьшение) значения $[\text{Ar}^{40}]$ вдвое приводит к росту (снижению) возраста t всего на 12%. Во-вторых, сравнение изотопных составов калия в Солнечной системе и земной коре (табл. 1) показывает, что отношение $\xi = c(\text{S})/c(\text{E})$, где $c(\text{S})$ и $c(\text{E})$ – процентные содержания данного нуклида в Солнечной системе и земной коре соответственно, для стабильных изотопов калия (^{39}K и ^{41}K) весьма близко к единице, тогда как для радионуклида ^{40}K оно равно $\xi = 11.7$. По-видимому, это различие возникло после завершения основных стадий галактического нуклеосинтеза и обусловлено вкладом от всплеска интенсивности нуклеосинтеза, вызванного возможным близким взрывом сверхновой звезды, предположительно произошедшим до или во время образования Солнечной системы [1]. Результатом некоторого увеличения общего содержания ^{40}K в Солнечной системе, обусловленного внесением около 5 млрд. лет назад указанного дополнительного вклада этого радионуклида, является занижение расчетного значения $t = 10.8$ млрд. лет. Это дает основание считать, что действительный возраст элементов несколько больше указанного значения.

Таблица 1а. Распространенность изотопов аргона, калия и кальция в Солнечной системе [4] и земной коре [5]

Элемент	A	Процентное содержание нуклида в смеси изотопов		ξ	Распространенность нуклида	
		Солнечная система $c(S)$	земная кора $c(E)$		в Солнечной системе (относит. [Si] = 10^6)	в земной коре $\frac{c(E) \cdot N(E)}{100}$, %
^{18}Ar	36	84.09	0.337	250	$8.93 \cdot 10^4$	$40.44 \cdot 10^{-8}$
	38	15.72	0.063	250	$1.67 \cdot 10^4$	$7.56 \cdot 10^{-8}$
	40	0.19	99.600	$1.9 \cdot 10^{-3}$	200	$1.20 \cdot 10^{-4}$
^{19}K	39	92.98	93.258	0.997	3258	1.958
	40	0.14	0.012	11.7	4.8	$2.46 \cdot 10^{-4}$
	41	6.88	6.730	1.022	241	0.141
^{20}Ca	40	96.97	96.941	1.000	$6.06 \cdot 10^4$	3.975
	42	0.64	0.647	0.99	400	0.0265
	43	0.145	0.135	1.07	91	0.0055
	44	2.06	2.086	0.99	1290	0.0855
	46	0.0033	0.004	0.82	2.06	0.00016
	48	0.185	0.187	0.99	116	0.00767

Таблица 1б. Изотопы рения и осмия, распложенные в полосе стабильности

Элемент	A	Тип излучения	Период полураспада	Процентное содержание нуклида в смеси изотопов		Процесс [4]	Распространенность нуклида	
				Солнечная система	земная кора		в Солнечной системе [4]	в земной коре [5], %
^{75}Re	185	Стабильное		35.20	37.40	s, r	0.0189	$1.5 \cdot 10^{-8}$
	186m	ИП	$2 \cdot 10^5$ лет					
	186	β^- , ЭЗ	3.718 дня					
^{76}Os	187	β^-	$4.4 \cdot 10^{10}$ лет	64.80	62.60	s, r	0.0348	$2.5 \cdot 10^{-8}$
	184	Стабильное		0.02	0.02		0.000124	
	186	Стабильное		1.30	1.58	s	0.00890	
	187	Стабильное		1.18	1.6	s	0.0081	
	188	Стабильное		13.4	13.3	s, r	0.0917	
	189	Стабильное		16.2	16.1	s, r	0.111	
	190	Стабильное		26.6	26.4	s, r	0.182	
	192	Стабильное		41.3	41.0	r	0.283	

Примечание. Главным источником данных о нелетучей составляющей вещества Солнечной системы и первичной туманности служили углистые хондриты типа C1. Содержания летучих газов определены на основе соответствующих данных по Солнцу [4]. Распространенности в земной коре $N(E)$ аргона, калия, кальция, рения и осмия равны: $1.2 \cdot 10^{-4}$, 2.1, 4.1, $4.0 \cdot 10^{-8}$ и $\sim 10^{-8}$ % соответственно. Распространенность нуклида в земной коре вычислена умножением распространенности $N(E)$ на относительное содержание этого нуклида в смеси изотопов, равное $c(E)/100$. ИП – изомерный переход.

Прежде чем оценить результаты определения t кальциевым методом (табл. 2), необходимо вспомнить, что изотоп ^{40}Ca , которым на 97% представлен природный кальций, в основном образован в процессе взрывного горения кислорода и кремния [4]. Что касается вклада радиогенного ^{40}Ca (образованного вследствие β^- -распада ^{40}K) в общее количество этого нуклида, то он играет

подчиненную роль. Это свидетельствует, что в рассматриваемом значении распространенности ^{40}Ca доля обыкновенной составляющей существенно больше радиогенной, и вычисленный по формуле (3б) возраст намного превосходит действительное его значение.

Обобщая данные, полученные аргоновым и кальциевым методами (табл. 2), приходим к за-

Таблица 2. Результаты определения возраста вещества Галактики

Метод определения возраста	Свойства радиоактивного изотопа				Стабильный изотоп М	$\frac{[M]}{[R]} = \frac{[M_R] + [M_O]^*}{[R]}$		Результаты расчета			Возраст вещества Галактики, млрд. лет
	радионуклид R	период полураспада $T_{1/2}$, млрд. лет	тип излучения	постоянная распада λ , год ⁻¹		Солнечная система	земная кора	№ формулы	t, млрд. лет по данным для		
								Солнечной системы	земной коры		
Аргоновый	$^{40}_{19}\text{K}$	1.25	ЭЗ	$0.581 \cdot 10^{-10}$	$^{40}_{18}\text{Ar}$	41.67 ([M _O] = 0; [M] ≤ [M _R])	0.4864 ([M _O] = 0; [M] < [M _R])	3а	10.8	3.11	≥ 10.8
Кальциевый	$^{40}_{19}\text{K}$	1.25	β ⁻	$4.962 \cdot 10^{-10}$	$^{40}_{20}\text{Ca}$	$1.262 \cdot 10^4$ ([M] > [M _R])	$1.618 \cdot 10^4$ ([M] > [M _R])	3б	17.2	17.68	< 17.2
Осмиевый	$^{187}_{75}\text{Re}$	44.0	β ⁻	$0.158 \cdot 10^{-10}$	$^{187}_{76}\text{Os}$	0.2328	Оценочные данные	1	13.3	–	≤ 13.3

* Установленная эмпирически распространенность дочернего изотопа М в общем случае равна сумме $[M] = [M_R] + [M_O]$, где $[M_R]$ и $[M_O]$ – распространенности радиогенной и нерадиогенной (обыкновенной) составляющих этого нуклида.

ключению, что возраст вещества Галактики укладывается в интервал

$$10.8 \leq t_G < 17.2 \text{ млрд. лет,}$$

что согласуется с приведенными выше последними данными о возрасте Вселенной (12.5–14.0 млрд. лет), полученными методами наблюдательной астрономии.

В [1] содержится краткий обзор исследований, которые посвящены ядерной космохронологии, включающей радиогенный ^{187}Os , образовавшийся во время нуклеосинтеза в Галактике при β⁻-распаде ^{187}Re (период полураспада этого радионуклида равен $4.4 \cdot 10^{10}$ лет). В обсуждаемых работах главное внимание уделялось ядерно-физическим аспектам возможных процессов синтеза указанных элементов. Представляло интерес с использованием формулы (1) вычислить значение t на основе данных о распространенностях в Солнечной системе изотопов ^{187}Os и ^{187}Re , приведенных в табл. 1б. Как отмечено в [4], откуда заимствованы эти данные, изотопы ^{187}Os так же, как и ^{186}Os , образованы исключительно в s-процессе. В случае ^{186}Os имеется в виду медленный захват нейтрона изотопом ^{185}Re с образованием короткоживущего радионуклида ^{186}Re , который, распадаясь по схеме, отображенной на рис. 2б, и превращается в ^{186}Os . Как видно из рис. 2б, ^{186}Re был образован из долгоживущего изомера ^{186m}Re . По-видимому, из этого же изомера в результате медленного захвата им нейтрона возник и ^{187}Re , β⁻-распад которого является источником накопле-

ния радиогенного ^{187}Os . Поэтому интересно отметить близость друг к другу относительных содержаний ^{186}Os и ^{187}Os в смеси изотопов осмия (табл. 1). Подставив в формулу (1) соответствующие численные данные, получим

$$t = \frac{4.4 \cdot 10^{10}}{\ln 2} \ln \left(\frac{0.0081}{0.0348} + 1 \right) = 13.3 \text{ млрд. лет.}$$

Поскольку не может быть исключена вероятность образования также и нерадиогенного ^{187}Os по реакции $^{186}\text{Os}(n, \gamma)^{187}\text{Os}$, значение t , вычисленное по отношению $[^{187}\text{Os}]/[^{187}\text{Re}]$, может быть больше действительного возраста Галактики t_G . С учетом результата, полученного аргоновым методом, можно заключить, что возраст Галактики укладывается в интервал

$$10.8 \leq T_G \leq 13.3 \text{ млрд. лет,}$$

т.е. в рассматриваемом приближении практически совпадает с уточненным возрастом Вселенной, оцениваемым в 12.5–14.0 млрд. лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаулер У.А. // УФН. 1985. Т. 145. В. 3. С. 441–488.
2. Физическая энциклопедия. Ст. Космохронология. М.: Сов. энциклопедия, 1990. Т. 2. С. 480–482.
3. Старик И.Е. Ядерная геохронология. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 630 с.
4. Камерон А.Дж.У. В сб.: Ядерная астрофизика. М.: Мир, 1986. 519 с.
5. Эмсли Дж. Элементы. М.: Мир, 1993. 256 с.