

и звёзд, а следовательно, и соотношения масса—величины, по к-рому строится диаграмма Герцшпрунга—Ресселла. С учётом времени, ушедшего на образование шаровых скоплений, значение возраста Вселенной, установленного этим методом, составляет 11—18 млрд. лет.

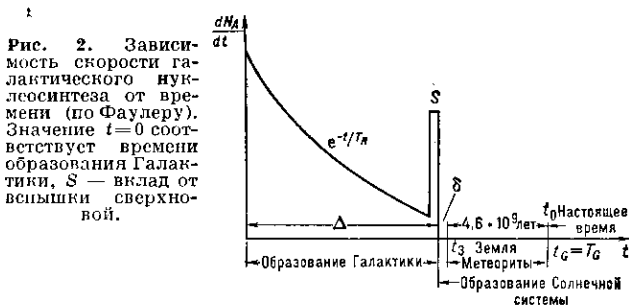
Третий метод определения возраста — метод ядерной К.—основан на исследовании относит. содержания радиоактивных долгоживущих изотопов, к-рое меняется со временем как из-за радиоакт. распада ядер, так и вследствие др. радиоакт. превращений в процессе продолжающегося *нуклеосинтеза*. Знание закона изменения относит. концентраций изотопов позволяет определить возраст исследуемого объекта. Для анализа времён порядка млрд. лет и больше используются ядра-хронометры с длит. периодом полураспада (табл. 1).

Табл. 1. — Долгоживущие ядра-хронометры

Ядро	Продукт распада	Период полураспада, млрд. лет	В каких процессах образуется
<sup>40</sup> K	<sup>40</sup> Ca, <sup>40</sup> Ar	1,28	s
<sup>87</sup> Rb	<sup>87</sup> Sr	48	r, s
<sup>113</sup> Cd	<sup>113</sup> In	9·10 <sup>6</sup>	s
<sup>123</sup> Tc	<sup>123</sup> Sb	1,24·10 <sup>4</sup>	s
<sup>138</sup> La	<sup>138</sup> Ba	135	p*
<sup>144</sup> Nd	<sup>144</sup> Ce	2,1·10 <sup>6</sup>	s, r
<sup>147</sup> Sm	<sup>147</sup> Nd	106	s, r
<sup>148</sup> Sm	<sup>148</sup> Nd	7·10 <sup>6</sup>	s
<sup>152</sup> Gd	<sup>152</sup> Sm	1,1·10 <sup>6</sup>	s
<sup>176</sup> Lu	<sup>176</sup> Hf	36	s
<sup>180</sup> Os	<sup>182</sup> W	2,0·10 <sup>6</sup>	s
<sup>187</sup> Re	<sup>187</sup> Os	50	s, r
<sup>190</sup> Pt	<sup>186</sup> Os	610	p*
<sup>232</sup> Th	<sup>208</sup> Pb	14,05	r
<sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb	0,704	r
<sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb	4,468	r

\* Обогащённые протонами нуклиды.

Наиб. широко из представленных в табл. изотопов для определения возраста Вселенной применяют изотопы U и Th, к-рые образуются только в быстром ядерном процессе — r-процессе (r-rapid), протекающем при высоких темп-рах, больших плотностях свободных нейтронов и сопровождающемся многократными нейтронными захватами с образованием нейтроноизбыточных ядер (см. *Ядерная астрофизика*).



Использование для К. более лёгких изотопов из табл. 1 требует учёта также и медленного процесса — s-процесса (s-slow) нейтронного захвата, протекающего при гораздо меньших темп-рах и плотностях свободных нейтронов. Хотя одновременный учёт влияния как r-, так и s-процессов на образование ядер-хронометров сложен, данные о  $T_U$ , полученные методами ядерной К., укладываются в интервал 10—20 млрд. лет и пока не дают большей точности. Надежды на более точное определение  $T_U$  связывают с U—Th-методом потому, что изотопы <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U и <sup>232</sup>Th образуются в одном

r-процессе, теория которого достаточно полно разработана.

Метод определения возраста по анализу содержания в них урана предложил Э. Резерфорд (E. Rutherford, 1929). Совр. основы методов ядерной К. разработал У. Фаулер (W. Fowler, 1957—61). Согласно Фаулеру, интенсивность нуклеосинтеза ядер в r-процессе уменьшается от момента образования Галактики ( $t=0$ ) до момента  $t=\Delta$  ( $\Delta$  — продолжительность нуклеосинтеза) по экспоненциальному закону с временной постоянной  $T_R$  (рис. 2). Образованию Солнечной системы в момент  $t_3$  предшествовал период конденсации вещества, начавшийся после окончания нуклеосинтеза (его длительность на рис. обозначена  $\delta$ ). Развитием экспоненциальной модели Фаулера явилось введение всплеска интенсивности нуклеосинтеза ( $S$ ). Пик нуклеосинтеза  $S$  был введён из-за обнаружения в метео-

Табл. 2. — Короткоживущие ядра-хронометры

Ядро	Продукт распада	Период полураспада, млн. лет	В каких процессах образуется
<sup>26</sup> Al	<sup>26</sup> Mg	0,72	p
<sup>53</sup> Mn	<sup>53</sup> Cr	3,7	p
<sup>107</sup> Pd	<sup>107</sup> Ag	6,5	s
<sup>129</sup> I	<sup>129</sup> Xe	17	s, r
<sup>148</sup> Sm	<sup>142</sup> Nd	103	p
<sup>203</sup> Pb	<sup>203</sup> Tl	14	s
<sup>244</sup> Pu	<sup>238</sup> Th	82	r
<sup>247</sup> Cm	<sup>243</sup> U	16	r

ритном веществе следов относительно короткоживущих (в масштабе  $10^{10}$  лет) изотопов <sup>244</sup>Pu, <sup>129</sup>I и др. (табл. 2), что, возможно, вызвано близким взрывом *сверхновой звезды*, произошедшим до или во время образования Солнечной системы.

Зависимость скорости нуклеосинтеза от времени, представленная на рис. 2, описывается ур-нием для концентрации  $N_A$  ядра с данным массовым числом  $A$ :

$$\frac{dN_A}{dt} = -\frac{N_A}{\tau_A} + \lambda_A \cdot e^{-t/T_R} + \lambda_A \Delta_S \delta(t - \Delta); \quad 0 \leq t \leq \Delta, \quad (2)$$

где  $\tau_A$  — период полураспада ядра  $A$ ,  $\lambda_A$  — скорость его образования,  $\Delta_S$  — продолжительность нуклеосинтеза в  $S$ -пике, определяемая тем, что произведение  $\lambda_A \Delta_S$  даёт число образовавшихся ядер с данным значением  $A$ . До формирования Галактики ядра тяжелее <sup>4</sup>He не синтезировались, поэтому  $N_A(t=0) = 0$ . Ур-ние (2) решается аналитически и содержит для двух изотопных отношений

$$\lambda_{58} = N(^{235}\text{U})/N(^{238}\text{U}) \text{ и } \lambda_{28} = N(^{232}\text{Th})/N(^{238}\text{U})$$

четыре неизвестных параметра:  $\Delta$ ,  $T_R$ ,  $S$  и  $\delta$ . Зная из наблюдений значения  $\lambda_{28} = 3,75$  и  $\lambda_{58} = 0,007253$  и используя закон радиоакт. распада (см. *Радиоактивность*), можно определить **относит.** концентрации изотопов в момент  $\Delta + \delta$ . Хотя период  $\delta < 2 \cdot 10^8$  лет относительно мал и на обилие U и Th существенно не влияет, величина  $\delta$  определяется тем не менее довольно успешно (по анализу продуктов распада короткоживущих изотопов-хронометров, представленных в табл. 2). Из трёх оставшихся неопределённых параметров два фиксируются отношением  $T_R/\Delta = 0,43$ , полученным Фаулером из анализа относит. концентрации <sup>187</sup>Re/<sup>187</sup>Os и <sup>176</sup>Lu/<sup>176</sup>Hf хронометрич. пар Re—Os и Lu—Hf. Оставшаяся неопределённость во влиянии  $S$ -пика (взрыва сверхновой на наблюдаемую *распространённость элементов*) может быть снята при получении более точных данных об относит. концентрациях <sup>244</sup>Pu, а возможно также <sup>247</sup>Cm и др. ядер из табл. 2. Многочисл. расчёты возраста вещества Галактики  $t_G$  уран-ториевым методом дают у разных исследователей различающиеся значения, но укладываемые в основном в определё-