

## О ПЛОТНОСТИ РЕЛИКТОВЫХ ЧАСТИЦ С НУЛЕВОЙ МАССОЙ ПОКОЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

В.Ф.Шварцман

До сих пор не исключено, что во Вселенной имеется большое количество труднонаблюдаемых частиц с нулевой массой покоя (ТНЧ), оставшихся от сверхплотной фазы (нейтрино, гравитонов и др.). Оценка их плотности по гравитационному влиянию на поздние стадии расширения приводит к величине [1]:

$$\rho_{m=0} < 3\rho_K \approx 5 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3$$

( $\rho_K$  — критическая плотность. С другой стороны, гравитационное действие подобных частиц на ранние стадии расширения, меняя темп расширения, меняет ход ядерных реакций в первичном веществе [4; 5]. В настоящей работе, развивая эту идею и учитывая, что содержание гелия в ряде звезд заведомо меньше 40%, для случая Фридмановской модели с малым или равным нулю "удельным" лептонным зарядом<sup>1)</sup> получен более сильный предел на плотность ТНЧ:

$$\rho_{m=0} < 5\rho_\gamma = 2 \cdot 10^{-33} \text{ г/см}^3, \quad (1)$$

где  $\rho_\gamma$  — плотность фонового радиоизлучения с температурой  $T = 2,7^\circ\text{K}$ .

Обратимся к формуле, связывающей температуру первичного вещества  $T$  с временем от начала расширения  $t$ :

$$\rho_\Sigma = \kappa\sigma T^4/c^2 = 3/32\pi G t^2. \quad (2)$$

Здесь  $\rho_\Sigma$  — плотность всей материи,  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана,  $G$  — гравитационная константа,  $\kappa$  — безразмерная величина, характеризующая отношение плотности всех частиц к плотности  $\gamma$ -квантов (равновесным  $\gamma, e^+, e^-, \nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$  соответствует  $\kappa = 9/2$ ). Отметим, что изменение  $\kappa$  влечет за собой изменение связи между  $T$  и  $t$ .

<sup>1)</sup> Речь идет о лептонном заряде электронных нейтрино и антинейтрино; малость его связана с условием:  $|\rho_{\nu_e} - \rho_{\bar{\nu}_e}| \ll \rho_{\nu_e} + \rho_{\bar{\nu}_e}$  ( $\rho$  — плотность). Напомним, что при этом  $\rho_{\nu_e} + \rho_{\bar{\nu}_e} = (7/8)(4/11)^{4/3}\rho_\gamma$ . Такова же доля мюонных нейтрино и антинейтрино при соответствующих ограничениях на их лептонный заряд.

При высоких температурах реакции



обеспечивают равновесное отношение концентрации нейтронов  $n$  к концентрации протонов  $p$ :

$$n/p = \exp(-\Delta mc^2 / kT).$$

Здесь  $\Delta m$  – разность масс нейтрона и протона.

Время установления равновесия

$$\tau = 1/\sigma n_e = \text{const} / T^3, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – сечение,  $n_e$  – плотность нейтрино; массой покоя электрона мы пренебрегли. В ходе расширения наступает момент  $t \approx \tau$ , когда равновесие перестает успевать устанавливаться: происходит "закалка" нейтронов [2]. Соответствующая температура легко оценивается из уравнений (2) и (3):

$$T = \text{const} \cdot \kappa^{1/6}.$$

$\rho_{m=0}/\rho_\gamma$	$(\kappa/4,5)_z$	$(n/p)_z$	$\text{He}^4$		
			$\rho_H = 3 \cdot 10^{-29}$	$\rho_H = 3 \cdot 10^{-30}$	$\rho_H = 3 \cdot 10^{-31}$
0,45	1	0,16	0,29	0,27	0,25
1,45	1,9	0,20	0,36	0,34	0,31
5,45	5,3	0,26	0,48	0,45	0,43
10,45	9,6	0,29	0,54	0,50	0,48

Итак, большим  $\kappa$  соответствуют более высокие температуры закалки: нейтронов остается больше. Рассмотрение дальнейших процессов показывает, что почти все нейтроны успевают соединиться с протонами и образовать ядра гелия; соответствующие оценки можно найти в таблице. Через  $\rho_H$  обозначена плотность нуклонов в настоящее время, определяющая удельную энтропию (см. [2]), через  $\rho$  – плотность трудно наблюдаемых форм материи с нулевой массой покоя, индекс "з" указывает на момент закалки. Мы уже упоминали, что содержание водорода в пражвездах заведомо превосходило 60%, следовательно,  $\rho_{m=0} < 5\rho_\gamma$

К каким частицам относится этот предел?

1. К мюонным нейтрино и антинейтрино. Отличие их плотности от равновесной связывается с возможностью большого лептонного (мюонного) заряда единицы сопутствующего объема Вселенной.

2. К гравитонам. Последние вообще не успевают придти в равновесие с первичным веществом [3], их количество определяется начальными условиями.

3. К пока неизвестным ультраслабовзаимодействующим частицам, оставшимся от сверхплотной фазы <sup>1)</sup>.

Вопрос об электронных нейтрино и антинейтрино требует отдельного рассмотрения. Дело в том, что наличие у  $\nu_e$  ( $\bar{\nu}_e$ ) хипотенциала приводит не только к увеличению их плотности, но и к непосредственному изменению динамики реакций (A), что может обусловить компенсацию указанного выше механизма и сколь угодно низкое содержание гелия [4]; последнее не противоречит наблюдениям. Иными словами, если удельный лептонный (электронный) заряд Вселенной велик, плотность ТНЧ может превосходить  $2 \cdot 10^{33}$  г/см<sup>3</sup>.

В заключение обратим внимание сторонников переменной гравитационной константы на то, что в формулу (2)  $G$  входит так же, как и  $\kappa$ , переменность  $G$  привела бы к совершенно иному ходу ядерных процессов в первичном веществе.

Автор искренне благодарит Я.Б.Зельдовича за внимание к работе и существенные замечания. Автор признателен также Р.А.Сюняеву за полезные дискуссии.

Московский  
государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Институт Прикладной математики

Поступило в редакцию  
20 января 1969 г.

#### Литература

- [1] Я.Б.Зельдович, Я.А.Сморodinский, ЖЭТФ, **41**, 907, 1961.
- [2] Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков, Релятивистская астрофизика, Изд. Наука, 1967.
- [3] Я.Б.Зельдович, УФН, **89**, 647, 1966.
- [4] R. V. Wagoner, W. A. Fowler. Ap. J., **148**, 3, 1967.
- [5] G. Dautcour, G. Wallis. Fortschritte der Physik, **16**, 545, 1968.

---

<sup>1)</sup> Отметим, что ограничение на число сортов неоткрытых ТНЧ слабее ограничения на их плотность: чем раньше частицы выходят из равновесия, тем меньшую долю общей энергии они забирают [3].