

## МАССА ПОКОЯ МИОНОВОГО НЕЙТРИНО И КОСМОЛОГИЯ

С.С.Герштейн, Я.Б.Зельдович

Экспериментальные оценки массы покоя нейтрино имеют малую точность [1] для электронного нейтрино  $m(\nu_e) < 200 \text{ эв}/c^2$  и для мионного нейтрино  $m(\nu_\mu) < 2,5 \cdot 10^6 \text{ эв}/c^2$ .

Космологические соображения, связанные с горячей моделью Вселенной [2], позволяют существенно усилить второе неравенство. Так же,

как в работе Я.Б.Зельдовича и Я.А.Смородинского [3], рассмотрим гравитационное действие нейтрино на динамику расширяющейся Вселенной. Возраст известных астрономических объектов не меньше  $5 \cdot 10^9$  лет, постоянная Хаббла  $H$  не меньше  $75 \text{ км/сек} \cdot \text{Мпарсек} = (13 \cdot 10^9 \text{ лет})^{-1}$ . Отсюда следует, что плотность всех видов веществ во Вселенной в настоящее время<sup>1)</sup>

$$\rho < 2 \cdot 10^{-28} \text{ г/см}^3.$$

В настоящее время окружающее нас пространство заполнено равновесным излучением при температуре  $3^0\text{K}$  [4]. Предполагается, что это излучение является "реликтовым", свидетельствует о высокой температуре плазмы в дозвездном периоде при большой плотности.

При температуре порядка 3 Мэв для  $\nu_e$  и порядка 15 Мэв для  $\nu_\mu$  имело место полное термодинамическое равновесие между  $\nu$ ,  $\gamma$ ,  $e^+$  и  $e^-$ . Количество других частиц в этом равновесии мало, кроме, может быть, гравитонов, которые, однако, не влияют на дальнейшее. В термодинамическом равновесии отношение числа фермионов и антифермионов со спином 1/2 и числа квантов равно

$$[\nu_e] + [\bar{\nu}_e] = [\nu_\mu] + [\bar{\nu}_\mu] = [e^+] + [e^-] = 2 \frac{\int (e^{x+1})^{-1} x^2 dx}{\int (e^{x-1})^{-1} x^2 dx} [\gamma] = 1,5 [\gamma].$$

Однако в ходе охлаждения от  $T > m_e c^2$  (для которого выписаны соотношения) до настоящего времени, когда  $T \ll m_e c^2$ , эти соотношения меняются, так как аннигиляция пар  $e^+ e^-$  увеличивает число квантов, не меняя количества нейтрино в единице сопутствующего объема [5]. Для настоящего времени следует ожидать

$$[e^+] + [e^-] = 0, [\nu_\mu] + [\bar{\nu}_\mu] = [\nu_e] + [\bar{\nu}_e] = 0,5 [\gamma].$$

При  $3^0\text{K}$   $[\gamma] = 550 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ , откуда для нейтрино получим в настоящее время

$$[\nu_\mu] + [\bar{\nu}_\mu] = [\nu_e] + [\bar{\nu}_e] = 300 \text{ см}^{-3}.$$

Сопоставляя с приведенным выше пределом плотности, получим

$$m_o(\nu_\mu) < 7 \cdot 10^{-31} \text{ г} = 400 \text{ эв/с}^2$$

и то же для  $m_o(\nu_e)$ . Таким образом, для электронного нейтрино мы не получили новой информации; однако для мюонного нейтрино космологические соображения снижают верхнюю границу массы покоя на три порядка.

Рассматривая вопрос о возможной массе нейтрино, мы, естественно, применяли статистические формулы для четырехкомпонентных ( $m \neq 0$ ) частиц. Но мы знаем, что в соответствии с  $(V - A)$ -теорией в слабом взаимодействии участвуют преимущественно нейтрино определенной поляризации. Равновесие для нейтрино противоположной поляризации устанавливается лишь при более высокой температуре. Впрочем это может изменить предел массы не более чем вдвое.

Нейтрино с иерархией нулю массой покоя могут аннигилировать по диаграмме  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu \xrightarrow{\text{слабое}} \mu^+ + \mu^- \xrightarrow{\text{св.магн}} \gamma + \gamma$  при  $m(\nu_\mu) > m(e^\pm)$  и на  $3\gamma$  или по квадрату слабого взаимодействия на пару  $\nu_e + \bar{\nu}_e$ , если предположить  $m(\nu_\mu) > m(\nu_e)$ . Сечение аннигиляции при  $v < c$  идет как  $1/v$ . Однако оценки показывают, что в ходе космологического расширения заметная аннигиляция не успевает произойти.

Импульс невзаимодействующих частиц в ходе расширения меняется  $\sim 1/R$ , где  $R$  - линейный масштаб независимо от наличия и величины массы покоя частиц. В настоящее время импульс нейтрино должен быть того же порядка (несколько меньше), что и импульс реликтовых квантов, т.е.  $\bar{p} \approx 5 \cdot 10^{-4}$  эв/с.

Если нейтрино обладают массой покоя, то их скорость и скорость звука в нейтринном газе порядка  $p/m$ , т.е., например, 30 км/сек при  $m = 5$  эв/с<sup>2</sup> и 3 км/сек при  $m = 50$  эв/с<sup>2</sup>. Такой газ должен подвергаться сильным гравитационным возмущениям со стороны галактик. Возможно, что более детальное рассмотрение этих процессов позволит понизить сделанную выше оценку верхней границы массы нейтрино.

Данная заметка возникла в стимулирующей обстановке летней школы в Балатон-Вилагоше, пользуемся случаем выразить благодарность организаторам школы.

Поступило в редакцию  
4 июня 1966 г.

## Литература

- [1] A.H.Rosenfeld, A.Barbaro Galtieri, W.H.Barkas, P.L.Bastien, I.Kirz, M.Roos. Tables. Revs. Mod. Phys., 27, 633, 1965.
- [2] G.Gamov. Phys. Rev., 70, 572, 1946; 74, 505, 1948; Revs. Mod. Phys., 21, 367, 1949; G.Gamov. Vistas in Astronomy, 2, 1726, 1956; R.Dicke, P.Y.E.Peebles, P.G.Roll, D.T.Wilkinson. Astrophys. J. 142, 414, 1965. Я.Б.Зельдович, Успехи физ.-наук т.89, вып. 4, 1966.
- [3] Я.Б.Зельдович, Я.А.Смородинский. ИЭТФ, 41, 907, 1961.
- [4] A.A.Penzias, R.W.Wilson. Astrophys. J., 142, 419, 1965.
- [5] P.I.E. Peebles. Phys. Rev., Lett., 16, 410, 1966.

1) Используем асимптотическую формулу

$$T = \frac{\pi}{2H\sqrt{\rho/\rho_c}}; \quad \rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}; \quad \rho = \frac{3\pi}{32G T^2}.$$

Другие более сложные оценки по исследованию далеких объектов дают сходный результат:

$$\eta_0 = \frac{\rho}{2\rho_c} < 2,5; \quad H \leq 120 \text{ км/сек.Мпарсек},$$

$$\rho_c \leq 2,5 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3, \quad \rho < 1,25 \cdot 10^{-28} \text{ г.см}^{-3}.$$