

О МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Д. Сахаров

Американскими исследователями недавно обнаружено космическое радиоизлучение с эффективной температурой $3,5^{\circ}\text{K}$ при длине волны $7,3\text{ см}$ [1]. Если подтвердится предполагаемый тепловой характер этого излучения (максимум при $0,1\text{ см}$), то естественней всего интерпретировать это излучение как остаточное фотонное поле, сохранившееся от начального сингулярного состояния расширяющейся Вселенной, которое в этом случае следует предполагать обладающим бесконечной плотностью энтропии ("горячая" модель расширяющейся Вселенной; наряду с фотонным полем в этой модели следует предполагать также наличие остаточного гравитонного газа и газа из пар двух сортов нейтрино с приблизительно такой же средней энергией и нетепловым спектром).

В связи с этими гипотезами представляет интерес рассмотрение свойств горячего вещества при очень больших плотностях, в том числе и при таких, при которых существенно гравитационное взаимодействие фотонов (число фотонов в единице объема порядка гравитационной единицы $n_0 = c^{3/2} \hbar^{3/2} G^{-3/2} = 2,4 \cdot 10^{98} \text{ см}^{-3}$, сравни с работой автора [2], где рассматривается холодное вещество).

Обозначим плотность энергии ϵ . Полная энергия сферы радиуса R , выделенной в изотропном пространстве, содержит члены, пропорциональные разным степеням R

$$E = \frac{4\pi}{5} R^3 \dot{R}^2 \epsilon - \frac{32\pi^2 GR^5}{15} \epsilon^2 + \frac{4\pi}{3} \epsilon R^3$$

(принято $c = 1$)

Первые два члена $\sim R^5$ (их сумма обращается в 0 для плоского пространства). Для нахождения величины \mathcal{E} необходимо выделить те члены в гравитационном взаимодействии частиц, которые пропорциональны объему (корреляционное и обменное взаимодействия).

Пренебрегая для простоты всеми эффектами образования барионных и лептонных пар, имеем в рамках гравитационной теории возмущений следующее разложение в ряд по степеням

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)^{2/3} = G \hbar^{-1} c^{-1} n^{2/3}$$

(ниже положено $\hbar = c = 1$; $n_0 = G^{-3/2}$).

$$\mathcal{E} = A n^{4/3} - B G n^2 - C G^2 n^{8/3}. \quad (1)$$

Первый член - степен-больцмановское выражение; второй - обменная поправка, она уменьшает энергию для притягивающихся бозонов. Следующие члены - корреляционная поправка, она уменьшает энергию в силу вариационного принципа (и для бозонов и для фермионов). Коэффициенты $A, B, C \sim 1$ и > 0 .

При n порядка n_0 и больше теория возмущений неприменима, но несомненно энергия, приходящаяся на один фотон, \mathcal{E}/n , не может быть меньше по порядку величины, чем энергия гравитационного взаимодействия двух "соседних" фотонов с энергией \mathcal{E}/n

$$\frac{\mathcal{E}}{n} \gtrsim G \left(\frac{\mathcal{E}}{n}\right)^2 n^{1/3},$$

т.е. $\mathcal{E} \lesssim n^{2/3} n_0^{2/3}. \quad (2)$

Таким образом, при высоких плотностях фотонного газа возрастание \mathcal{E} по закону $n^{4/3}$ сменяется более медленным возрастанием по закону $n^{2/3}$, и производная $d\mathcal{E}/dn$ достигает в некоторой точке $n \sim n_0$ максимума, а затем убывает (неравенство (2) не исключает также убывания и самой величины \mathcal{E} ; этот важный для космологии вопрос более сложен для выяснения, чем вопрос о производной $d\mathcal{E}/dn$).

При пренебрежении взаимодействием фотонов $n = 0,244 T^3$, плотность энтропии $S = 0,874 T^3$ (температура T в см^{-1}), т.е. $S = 3,58n$.

Эта пропорциональность S и n сохраняется и при наличии взаимодействия фотонов, так как полное число фотонов есть адиабатический инвариант сжатия и, следовательно, плотность фотонов и плотность энтропии при адиабатическом сжатии обратно пропорциональны удельному объему.

Согласно термодинамике температура $T = \left. \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial S} \right|_V$, т.е. (для теплового излучения) $T = \frac{1}{3,58} \frac{d\mathcal{E}}{dn}$ и достигает максимума $T_{\text{макс}}$ порядка гравитационной единицы T_0 при n порядка n_0 .

$$T_0 = k^{-1} c^{5/2} \hbar^{4/2} G^{-1/2} = 1,42 \cdot 10^{32} \text{ градусов.}$$

$T_{\text{макс}}$ порядка T_0 следует рассматривать как абсолютный максимум температуры для любого вещества, находящегося в равновесии с излучением.

Приведенное рассуждение, конечно, может оказаться несостоятельным при необходимости пересмотра основных принципов или основных представлений физики при $n \sim n_0$.

Поступило в редакцию

1 апреля 1966 г.

Литература

- [1] A.A.Penzias, R.W.Wilson. *Astrophys. J.*, 142, 419, 1965.
- [2] А.Д.Сахаров. *ЖЭТФ*, 49, 345, 1965.