

КОНДЕНСАЦИЯ ФОТОНОВ В ГОРЯЧЕЙ ВСЕЛЕННОЙ И ПРОДОЛЬНОЕ РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В. А. Кузьмин, М. Е. Шапошников

В предположении, что масса фотона отлична от нуля, высказывается гипотеза о существовании во Вселенной на ранних этапах расширения фотонного конденсата. Испарение конденсата за счет взаимодействия с заряженными частицами приводит к образованию продольного реликтового излучения, составляющего, возможно, основную массу Вселенной.

В настоящей работе мы рассмотрим некоторые космологические и астрофизические следствия, вытекающие из предположения о ненулевой массе фотона $m_\gamma \neq 0$. При этом нам будет безразлично, каким образом возникла масса фотона, т. е. имеем ли мы дело с массивной электродинамикой или фотон приобретает массу в результате спонтанного нарушения симметрии в калибровочной теории. Возникающее в последнем случае слабое несохранение тока не отразится на наших выводах. Мы покажем, что, несмотря на сильные экспериментальные ограничения на массу фотона, $m_\gamma < 10^{-49}$ г [1, 2] предположение о конечности m_γ может привести к далеко идущим космологическим следствиям.

Начнем с замечания, что массивный фотонный газ может испытывать фазовый переход, при котором часть фотонов выпадает в бозе-эйнштейновский конденсат с температурой вырождения (в ультрарелятивистском приближении)

$$T_0 = \hbar c \left(\frac{\pi^2}{g \zeta(3)} \rho \right)^{1/3}, \quad (1)$$

где ρ — полное число фотонов в 1 см^3 , g — статистический фактор, $g = 3$, $\zeta(x)$ — функция Римана. При ограничении $m_\gamma < 10^{-49}$ г это приближение справедливо при $T_0 \gg 10^{-15}$ К. Сравнивая (1) с выражением для температуры фотонного газа

$$T = \hbar c \left(\frac{\pi^2}{g \zeta(3)} \rho_{p>0} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где $\rho_{p>0}$ — число фотонов с ненулевым импульсом, видим, что отношение $(\rho_{p>0}/\rho)^{1/3} \approx T/T_0$ является свободным параметром теории, не фиксируемым заданным значением температуры фотонного газа T . Число фотонов в конденсате определяется выражением

$$\rho_{\text{конденс}} = \rho (1 - (T/T_0)^3).$$

Применяя эти соображения к теории горячей Вселенной на ранней стадии расширения, видим, что в случае $m_\gamma \neq 0$ мог бы существовать целый класс космологических моделей, характеризуемых, помимо всего прочего, значением параметра T/T_0 , задающего степень вырождения.

Существенным для решения вопроса о возможности выпадения фотонов в конденсат является рассмотрение условий термодинамического равновесия массивного фотонного газа с веществом во Вселенной. Для поперечно-поляризованных фотонов¹⁾ условия равновесия выполняются при $10^{-45} \text{ сек} < t < 10^{12} \text{ сек}$; вопрос о том, имеет ли место равновесие между заряженными частицами и фотонами вблизи сингулярности, остается открытым (см. [3]). Сечение взаимодействия продольно-поляризованного фотона с заряженной частицей составляет

$$\sigma_{\parallel} \sim (m_\gamma/\omega)^2 \sigma_{\perp}, \quad (3)$$

где σ_{\perp} — сечение взаимодействия поперечно-поляризованного фотона, ω — энергия фотона в СЦИ. Сечение образования продольного фотона также отличается от сечения образования поперечного фотона на фактор $(m_\gamma/\omega)^2$. Можно показать, что для продольных фотонов в расширяющейся Вселенной термодинамическое равновесие могло бы иметь место при

$$t > 10^{54} (m_0/m_\gamma)^2 \text{ сек}, \quad m_0 = 10^{-49} \text{ г}$$

(см. аналогичное рассмотрение в [5]). Таким образом, ни в какие времена, кроме, может быть, самых ранних стадий расширения Вселенной, продольные фотоны не находятся в равновесии с заряженными частицами. Однако, не исключено, что вблизи сингулярности, при $t < (G\hbar/c^5)^{1/2} \approx 10^{-43} \text{ сек}$, продольные фотоны находятся в равновесии с веществом за счет гравитационных взаимодействий (обсуждение вопроса о термодинамическом равновесии для гравитонов см. в [3]). Будем полагать, что временем закалки для гравитонов является $t \sim 10^{-43} \text{ сек}$. Тогда фотонный конденсат мог образоваться не позже этого времени.

Предположим, что конденсат образовался, и проследим его дальнейшую судьбу. Рассмотрим процесс испарения конденсата с момента закалки продольной компоненты (принимая $t \approx 10^{-43} \text{ сек}$). Заряженные частицы, взаимодействуя с конденсатом, удаляют из него фотоны, поперечная часть которых затем возвращается обратно в конденсат, так как условия термодинамического равновесия для них не нарушаются вплоть до $t \sim 10^{12} \text{ сек}$. Продольные же фотоны далее ни с чем не взаимодействуют, и, таким образом, происходит эффективная пере-

¹⁾ Ввиду исключительной малости массы фотон эффективно "запоминает" свою поляризацию. Так, лоренц-преобразование оператора рождения продольного фотона имеет вид: $U a_{\parallel}^{\dagger} U^{-1} \sim -m_\gamma/\omega (\sin \alpha + \sin^2 \alpha) a_{\perp}^{\dagger} + (1 - \cos \alpha) a_{\parallel}^{\dagger}$, где α — угол между импульсом фотона и направлением движения новой системы координат.

качка энергии плазмы в продольные фотоны. Изменение плотности конденсата и охлаждение плазмы за счет расширения и нагревания конденсата описываются приближенной системой уравнений

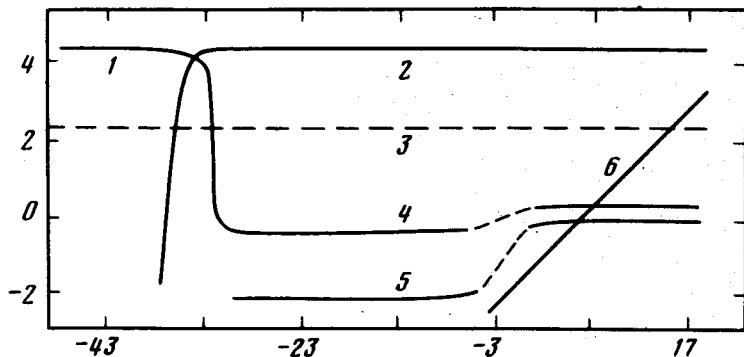
$$\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon}{t} - \sigma_{\perp} c m_{\gamma} \rho_{\text{конденс}}$$

$$\frac{d\rho_{\text{конденс}}}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{\rho_{\text{конденс}}}{t} - \rho_{\text{конденс}} c \sigma_{\perp} n(t) \left(\frac{m_e}{\epsilon}\right)^2 \quad (4)$$

где ϵ — средняя энергия частицы, m_e — масса электрона, n — концентрация заряженных частиц. Грубая оценка для характерного времени испарения конденсата дает

$$t^* \sim 10^{-33} \text{ сек}$$

так что в эпоху $t > t^*$ конденсата уже не остается, он весь перешел в газ продольных фотонов. Можно показать, что обратный процесс — взаимодействие продольных фотонов с веществом — идет крайне медленно (изменение плотности газа продольных фотонов за счет взаимодействия с веществом составляет $\Delta\rho_{\parallel}/\rho_{\parallel} \sim 10^{-16}$). Общая картина изменения со временем плотности газа продольных фотонов (поперечного) реликтового излучения и вещества приведена на рисунке. Мы произвели нормировку так, чтобы полная плотность составляла $\rho_{\text{кр}} \sim 1 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3$.



Изменение со временем: кривая 1 — полной плотности энергии (Σ), 2 — продольного излучения, возникшего в результате испарения конденсата (ϵ_{\parallel}), 3 — теплового продольного излучения ($\epsilon_{\parallel}^{\text{тепл}}$); 4 — полной плотности за вычетом продольного излучения ($\Sigma - \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\parallel}^{\text{тепл}}$), а после $t \sim 10^6 \text{ сек}$ — и вещества; 5 — поперечного реликтового излучения, 6 — вещества (ρ_m). По оси абсцисс откладывается $\lg(t/\text{сек})$ по оси ординат — $\lg(\epsilon/\rho_m^{4/3})$

Как видно, газ продольных фотонов составляет при этом во все времена основную массу Вселенной. Кривая 3 на рисунке относится к тепловому продольному реликтовому излучению с температурой $T \sim 10\text{ К}$, закалившемуся в момент $t \sim 10^{-43} \text{ сек}$. Грубая оценка средней энэ-

гии продольных фотонов дает $\bar{\epsilon}_\gamma \sim 10^{-6}$ эв (m_γ/m_e), $m_e = 10^{-49}$ г, что приводит к их плотности $n_\gamma \sim \rho_{\text{кр}}/\epsilon_\gamma \sim 10^{11}$ см⁻³ (m_e/m_γ). Противоречит ли чему-нибудь столь большая плотность (и плотность энергии) газа продольных фотонов? Можно показать, что такая плотность не влияет по крайней мере на распространение космических лучей во Вселенной.

Таким образом, нам представляется вполне возможным, что в случае, если m_γ не равна нулю, Вселенная заполнена газом продольных фотонов, образовавшимся от испарения фотонного конденсата, причем этот газ может играть определяющую роль в расширении Вселенной.

В заключение отметим, что конечность массы фотона должна привести к излучению потоков продольных фотонов Солнцем, Землей, к дополнительному процессу переноса тепла в недрах Солнца и другим эффектам, которые мы рассмотрим в отдельной работе.

Экспериментальные поиски потоков продольных фотонов (продольных радиоволн) вследствие слабости их поглощения веществом требуют, по-видимому, обеспечения низкофоновых условий, и могли бы проводиться, например, глубоко под землей.

Авторы благодарны В.С.Березинскому, А.Ю.Игнатьеву, Г.Т.Зацепину, Я.Б.Зельдовичу, И.Д.Новикову, А.Н.Тавхелидзе и К.Г.Четыркину за интерес к работе и полезные обсуждения.

Институт ядерных исследований
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 апреля 1978 г.

Литература

- [1] L.Davis, Jr., A.S.Goldhaber, M.M.Nieto. Phys. Rev. Lett., 35, 1402, 1975.
 - [2] A.S.Goldhaber, M.M.Nieto. Rev. Mod. Phys., 43, 277, 1971.
 - [3] Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков. Стрoение и эволюция Вселенной, М., изд. Наука, 1975.
 - [4] L.Bass. E.Schrödinger. Proc. Roy Soc., A232, 1, 1955.
-