

ПОСТОЯННА ЛИ КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ?

А.Д.Линде

Показано, что калибровочные теории элементарных частиц со спонтанным нарушением симметрии приводят к космологическому члену в уравнениях тяготения, меняющемуся со временем. За время эволюции Вселенной это изменение составляет, по крайней мере, 49 порядков.

Как известно, уравнения тяготения Эйнштейна

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \kappa T_{ik} + g_{ik} \Lambda \quad (1)$$

содержат в общем случае член с космологической постоянной Λ . Эта величина считается универсальной константой, не зависящей от состояния Вселенной [1, 2].

Цель настоящей работы – показать, что неизбежным следствием идей строящейся сейчас единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий является зависимость Λ от температуры среды. Для эволюционирующей горячей Вселенной это означает зависимость Λ от времени.

1. Если, как обычно, понимать под T_{ik} тензор энергии-импульса вещества и излучения, то величину $g_{ik} \Lambda / \kappa$ можно трактовать как тензор энергии-импульса вакуума [2]. Однако в теории элементарных частиц энергия вакуума и его давление (равное взятой со знаком минус плотности его энергии) определяются лишь с точностью до произвольной постоянной. Поэтому "старые" теории элементарных частиц не давали никакой информации о величине Λ .

Положение существенно изменилось с появлением калибровочных теорий со спонтанным нарушением симметрии, которые, как можно с большим основанием надеяться, составят основу будущей единой теории слабых, электромагнитных и, возможно, сильных взаимодействий [3]. По

самоу смыслу спонтанного нарушения симметрии, оно возникает как результат нестабильности "обычного" вакуума, который, перестраиваясь, переходит в новое, энергетически более выгодное состояние. Соответствующее изменение энергии вакуума зависит от температуры среды, уменьшаясь с ее ростом и исчезая при некоторой критической температуре T_c [4]. Тем самым возникает зависимость от температуры энергии вакуума, следовательно, и космологической постоянной Λ . Хотя эта последняя величина по-прежнему определена лишь с точностью до произвольного постоянного слагаемого, однако разность $\Lambda_{(T)} - \Lambda_{(0)}$ имеет уже вполне определенное значение. Именно об этой разности и будет идти речь ниже.

2. Для того, чтобы выяснить характер зависимости Λ от температуры T , рассмотрим модель, которая (с небольшими вариациями) входит как составная часть во все модели единой теории, обеспечивая спонтанное нарушение симметрии. Лагранжиан этой модели имеет вид

$$L = \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi + \mu^2 \phi^* \phi - \lambda (\phi^* \phi)^2, \quad (2)$$

где ϕ — комплексное скалярное поле. Из-за "неправильного" знака члена $\mu^2 \phi^* \phi$ обычное решение дает при $T = 0$ частицы с мнимой массой $m_\phi = i\mu$, т. е. тахионы. Это решение неустойчиво; для нахождения устойчивого решения нужно сделать замену $\phi = (1/\sqrt{2})(\phi_1 + i\phi_2 + \sigma)$, после чего L переходит в L_σ [3]:

$$L_\sigma = \hat{L}_\sigma + \frac{\mu^2 \sigma^2}{2} - \frac{\lambda \sigma^4}{4}, \quad (3)$$

где \hat{L}_σ — операторная часть L_σ , а $\frac{\mu^2 \sigma^2}{2} - \frac{\lambda \sigma^4}{4}$ — числовое слагае-

мое, соответствующее изменению плотности энергии вакуума (с обратным знаком). Параметр нарушения симметрии $\sigma = \sigma_{(T)}$ зависит от температуры, причем $\sigma_{(0)} = \mu/\sqrt{\lambda}$ [3], а при возрастании T величина $\sigma_{(T)}$ уменьшается, обращаясь в нуль всюду при $T > T_c$, где $T_c \sim \sigma_{(0)}$ [4].

Обозначим плотность энергии вакуума при температуре T через $\epsilon_{(T)}$. Тогда из (3) следует, что

$$\epsilon_{(T)} = \epsilon_{(0)} + \frac{\lambda}{4} (\sigma_{(0)}^2 - \sigma_{(T)}^2)^2$$

откуда

$$\Lambda_{(T)} = \Lambda_{(0)} + \frac{\lambda \kappa}{4} (\sigma_{(0)}^2 - \sigma_{(T)}^2)^2.$$

3. Для численной оценки примем $\sigma_{(0)}$ таким же, как в модели Вайнберга [5]: $\sigma_0 \sqrt{2}/G \sim 250 \text{ Гэв}$ (здесь G — фермиевская константа слабого взаимодействия). На величину λ имеется экспериментальное ограничение $\lambda \gtrsim 10^{-6}$ [6]. Тогда $\epsilon_{(T)}$ при $T > T_c$ возрастет по сравнению с $\epsilon_{(0)}$ на величину $\gtrsim 10^{42} \text{ эрг/см}^3$ или, в граммах, на величину $\gtrsim 10^{21} \text{ г/см}^3$. В настоящее время, по-видимому, ϵ по абсолютной величине не превышает 10^{-28} г/см^3 . Таким образом, при достаточно высокой температуре $\Lambda_{(T)} \gg \Lambda_{(0)}$, т. е. мы можем сказать, чему равня-

лось $\Lambda_{(T)}$, несмотря на наше незнание $\Lambda_{(0)}$: $\Lambda_{(T)} \approx \Lambda_{(T)} - \Lambda_{(0)}$. В частности, из полученных оценок следует $\Lambda_{(T > T_c)} = \Lambda_{(T_c)} > 10^{-6} \text{ см}^{-2}$, в то время как сейчас $|\Lambda| \lesssim 10^{-55} \text{ см}^{-2}$. Это значит, что за время эволюции Вселенной космологическая постоянная изменилась более чем на 49 порядков.

Правда, почти все это изменение происходит вблизи $T_c \cdot 10^{15} \div 10^{16} \text{ град}$. [4]. В этой области плотность энергии вакуума оказывается меньше плотности энергии вещества и излучения, и поэтому зависимость Λ от температуры не оказывает определяющего влияния на начальную стадию эволюции Вселенной. Вместе с тем факт обязательного отличия от нуля величины Λ в определенный период существования Вселенной делает более правдоподобными спекуляции о возможном неравенстве Λ нулю и в настоящую эпоху. Во всяком случае, из сказанного выше следует, что, отбрасывая с самого начала космологический член в уравнениях Эйнштейна, как это было общепринято еще несколько лет назад (см. также [7]), мы вступили бы в конфликт с современными идеями теории элементарных частиц.

Более полный анализ фазового перехода в калибровочных теориях со спонтанным нарушением симметрии и его следствий для космологии будет приведен в последующих публикациях.

В заключение выражаю глубокую признательность Д.А.Киржницу, деятельность которого по изучению фазового перехода в калибровочных теориях и постоянное внимание к работе автора стимулировали появление данной работы.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
22 января 1974 г.

Литература

- [1] Дж. Л. Синг. Общая теория относительности, М., ИИЛ, 1963.
- [2] Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков. Теория тяготения и эволюции звезд, М., изд. Наука, 1971.
- [3] G.'t Hooft. Nucl. Phys., B35, 167, 1971; B.W.Lee. Phys. Rev., D5, 823, 1972; И.В.Тютин, Е.С.Фрадкин, ЯФ, 16, 835, 1972; B.W.Lee, Preprint NAL-THY-92, 1972; С.Н.Llewellyn Smith. Preprint Th-1710, CERN, 1973.
- [4] Д.А.Киржниц. Письма в ЖЭТФ, 15, 745, 1972; D.A.Kirzhnits, A.D.Linde. Phys. Lett., 42B, 471, 1972.
- [5] S.Weinberg. Phys. Rev. Lett., 19, 1264, 1967.
- [6] Е.Б.Богомольный. ЯФ, 18, 574, 1973.
- [7] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля, М., изд. Наука, 1973.