

СУЩЕСТВУЮТ ЛИ ДОМЕНЫ АНТИВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ?

В. А. Кузьмин, И. И. Ткачев, М. Е. Шапошников

Предложен механизм образования доменов вещества и антивещества во Вселенной, в котором не возникает проблемы стенок между вакуумными доменами с различной CP -четностью.

Синтез объединенных калибровочных теорий (ОКТ) и теории горячей Вселенной позволяет качественно и количественно объяснить [1] величину барионной асимметрии вселенной (БАВ), которая, как мы теперь думаем, могла возникнуть за счет несохранения барионного числа на ранних неравновесных этапах расширения Вселенной при температурах $T \sim 10^{15}$ ГэВ.

Ответ на вопрос, является ли Вселенная асимметричной глобально или она состоит из доменов, наполненных веществом и антивеществом, зависит в этой картине от природы CP -нарушения при сверхвысоких энергиях. Если оно явное, то знак CP -нарушения в различных областях пространства одинаков и, тем самым, Вселенная в целом будет иметь избыток материи. В случае же спонтанного нарушения CP за счет комплексного вакуумного среднего некоторого поля следует ожидать доменной структуры вакуума с различной CP -четностью в разных пространственных областях ниже точки соответствующего фазового перехода. В вакуумных доменах, отличающихся знаком CP , генерация БАВ идет по-разному — в одних распады лептокварков приводят к избытку барионов над антибарионами, а в других наоборот [2, 3]. Поэтому теории со спонтанным CP -нарушением могут приводить к глобально симметричной Вселенной островного типа [2, 3].

Развитие концепции глобально-симметричной Вселенной на основе спонтанного CP -нарушения, однако, сталкивалось до сих пор с двумя нерешенными проблемами. Первая связана с тем, что доменная структура вакуума приводит к существованию массивных стенок между доменами [4], которые радикально изменяют эволюцию Вселенной и при-

водят к следствиям, находящимся в противоречии с наблюдениями [4]. Вторая состоит в том, как получить нужные размеры доменов.

Настоящая работа посвящена решению первой из указанных проблем. Мы рассмотрим вопрос, как можно было бы совместить картину глобально-симметричной Вселенной с отсутствием на поздних этапах расширения вакуумных CP -доменов и стенок. Одним из основных пунктов нашего рассмотрения, таким образом, будет требование отсутствия спонтанного нарушения CP при нулевой температуре и его нарушение на некотором этапе расширения Вселенной за счет эффектов конечных температур [5]. Явное нарушение CP , не противоречащее как групповой структуре, так и эрмитовости лагранжиана, естественно, допускается.

Рассмотрим ОКТ на группе $SU(5)$, [6], содержащую три 5-плета скалярных полей ϕ_1, ϕ_2, χ . В области температур $T \ll 10^{15}$ ГэВ можно работать в рамках эффективной низкоэнергетической электрослабой модели $SU(2) \times U(1)$ с тремя хиггсовскими дублетами. Следуя [7], мы выбрали потенциал их взаимодействия в виде:

$$\begin{aligned}
 V(\phi_1, \phi_2, \chi) = & -\mu_1^2(\phi_1^+ \phi_1 + \phi_2^+ \phi_2) + \lambda_1[(\phi_1^+ \phi_2)^2 + (\phi_2^+ \phi_1)^2] + \\
 & + 2\lambda_3(\phi_1^+ \phi_1)(\phi_2^+ \phi_2) + 2\lambda_4(\phi_1^+ \phi_2)(\phi_2^+ \phi_1) + \lambda_5[(\phi_1^+ \phi_2)^2 + \text{э.с.}] + \\
 & + \lambda_6(\phi_1^+ \phi_1 + \phi_2^+ \phi_2)(\phi_1^+ \phi_2 + \phi_2^+ \phi_1) - \mu_2^2 \chi^+ \chi + \delta(\chi^+ \chi) + 2\alpha(\chi^+ \chi)(\phi_1^+ \phi_1 + \\
 & + \phi_2^+ \phi_2) + 2\beta[(\phi_1^+ \chi)(\chi^+ \phi_1) + (\phi_2^+ \chi)(\chi^+ \phi_2)]. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Выбор затравочных масс $\mu_1^2 < 0$, $\mu_2^2 > 0$, в отличие от использованных в [7] значений $\mu_i^2 > 0$ для всех полей, приводит к радикальным изменениям в поведении вакуумных средних скалярных полей: теперь в нуле температуры минимум потенциала реализуется на полях:

$$\langle \phi_i \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \chi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}, \quad (2)$$

в то время, как при высоких температурах $T > T_2 \approx 300$ ГэВ структура вакуумных средних имеет вид

$$\langle \phi_1 \rangle^T = (0, \rho_1) \quad \langle \phi_2 \rangle^T = (0, \rho_2 e^{i\theta}) \quad \langle \chi \rangle^T = (0, 0), \quad (3)$$

где

$$\theta = \pm \arccos(-\lambda_6/2\lambda_5).$$

Неоднозначность выбора угла θ означает существование двух вакуумов с одинаковой энергией, но разными значениями CP -четности. При температурах $T \gtrsim 10^{15}$ ГэВ вклад в эффективный потенциал скалярных полей будут вносить также и сверхтяжелые частицы из полной калибровочной группы $SU(5)$, что приводит к восстановлению симметрии при некоторой температуре T_1 .

Таким образом, в данной модели в интервале температур $T_2 < T < T_1$ может существовать CP -доменная структура вакуума.

В такой теории при расширении Вселенной из сингулярности ход событий был бы следующим. При температурах $T > T_1 > M$, где M — масса лептокварка, присутствует лишь явное CP -нарушение, однако, генерация БАВ еще не происходит¹⁾. При температуре T_1 происходит первый фазовый переход, при котором образуются домены с разным CP -нарушением, так что в интервале $T_2 < T < T_1$ CP -нарушение имеет два источника: оно как явное, так и спонтанное. При дальнейшем падении температуры $T_2 < T < M$ генерация БАВ происходит обычным образом [1], причем, схематически,

$$n_B/n_Y \equiv \Delta = \Delta_{\text{явн}} + \Delta_{\text{спонт}} + (\text{интерференция}), \quad (4)$$

где n_B и n_Y — концентрации барионов и антибарионов соответственно, $\Delta_{\text{явн}}$ определяется комплексностью констант связи, а источником $\Delta_{\text{спонт}}$ служит спонтанное нарушение CP , $\Delta_{\text{спонт}} \sim \theta$ [3]. Заметим, что $\Delta_{\text{явн}}$ не зависит от точки пространства, тогда как $\Delta_{\text{спонт}}$ является случайной величиной и меняет свой знак при переходе от одного домена к другому. В зависимости от соотношения между $\Delta_{\text{явн}}$ и $\Delta_{\text{спонт}}$ возможны, вообще говоря, три случая. Первый, при котором $\Delta_{\text{явн}} \ll \ll \Delta_{\text{спонт}}$, приводит к картине глобально-симметричной Вселенной с доменной структурой вещества и антивещества. Случай $\Delta_{\text{явн}} \gg \Delta_{\text{спонт}}$ соответствует обычной картине [1] глобально-асимметричной Вселенной. Наконец, случай $\Delta_{\text{явн}} \sim \Delta_{\text{спонт}}$ соответствует сильной интерференции между этими двумя источниками CP -нарушения и приводит к возникновению неоднородностей на ранней стадии расширения глобально-асимметричной в среднем Вселенной.

Для нас особый интерес представляет вопрос о стенках между доменами. При температуре $T \sim T_2$ стенки доменов становятся очень широкими, а в пределе нулевого вакуумного среднего $\rho = 0$ — бесконечными, и мы приходим к трансляционно-инвариантному вакууму. Островная структура материи при этом, естественно, сохраняется, если обеспечен надлежащий рост доменов.

Вопрос о размерах доменов и выживаемости островной структуры Вселенной требует дальнейшего специального исследования. Отметим, пока лишь, что в рассмотренной модели при соответствующем выборе хиггсовских констант связи при спонтанном CP -нарушении за счет 5-плета $SU(5)$ -симметрия сначала нарушается до $SU(4)$, а затем до $SU(3) \times U(1)$ вакуумным средним 24-плета. Переохлаждение на стадии $SU(4)$ приводит к экспоненциальному росту CP -доменов [8] с последующей после выделения скрытого тепла генерацией барионной (антибарионной) асимметрии в каждом домене.

Мы благодарны Д.А.Киржицу, М.А.Маркову и В.А.Рубакову за интерес к работе и полезные обсуждения.

Институт ядерных исследований
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
12 марта 1981 г.

¹⁾ Известно, что возникновение БАВ возможно лишь при $T < M$ [1].

Литература

- [1] А.Д.Сахаров. Письма в ЖЭТФ, 5, 32, 1967; В.А.Кузьмин. Письма в ЖЭТФ, 13, 335, 1970; A.Yu.Ignatiev, N.V.Krasnikov, V.A.Kuzmin, A.N.Tavkhelidze. Proc. Int. Conf. "Neutrino-77", v.2, p. 293; Moscow, Nauka, 1978; Phys. Lett., B76, 436, 1978; M.Yoshimura. Phys. Rev. Lett., 41, 381, 1978; 42, 746(E), 1979; S.Dimopoulos, L.Susskind. Phys. Rev., D18, 4500, 1978; J.Ellis, M.K.Gaillard, D.V.Nanopoulos. Phys. Lett., B80, 360, 1979; B82, 446(E), 1979; S.Weinberg. Phys. Rev. Lett., 42, 850, 1979; A.Yu.Ignatiev, V.A.Kuzmin, M.E.Shaposhnikov. Phys. Lett., B87, 114, 1979; А.Ю.Игнатъев, В.А. Кузьмин, М.Е.Шапошников. Письма в ЖЭТФ, 30, 726, 1979; А.Д.Долгов, Я.Б.Зельдович. УФН, 130, 559, 1980.
- [2] R.W.Brown, F.W.Stecker. Phys. Rev. Lett., 43, 315, 1979.
- [3] G.Senjanovic, F.W.Stecker. Phys. Lett., B96; 285, 1980.
- [4] Я.Б.Зельдович, И.Ю.Кобзарев, Л.Б.Окунь. ЖЭТФ, 67, 1, 1974.
- [5] Д.А.Киржниц. Письма в ЖЭТФ, 15, 745, 1972; D.A.Kirzhnitz, A.D.Linde. Phys. Lett., B42, 471, 1972; S.Weinberg. Phys. Rev., D9, 3357, 1974; L.Dolan, R.Jackiw. Phys. Rev., D9, 2904, 1974.
- [6] H.Georgi, S.L.Glashow. Phys. Rev. Lett., 32, 43, 1974.
- [7] R.H.Mohapatra, G.Senjanovic. Phys. Rev. Lett., 42, 1651, 1979.
- [8] K.Sato. Nordita Preprint 80-31, 1980.
-