

宇宙创生于真空涨落的一个可能方案

原初暴涨宇宙模型

刘 辽 蒋 元 方

(北京师范大学物理系) (华东师范大学物理系)

黄 超 光 钱 振 华

(中国科学院高能物理研究所) (华东师范大学物理系)

1987 年 5 月 4 日收到

提 要

大爆炸宇宙模型的成功说明宇宙有可能是创生出来的. 宇宙究竟是创生于“无”, 还是创生于真空涨落? 这是目前正在热烈讨论的问题^[1]. 本文提出宇宙创生于真空涨落的一种可能的方案. 我们提出, 在单圈近似下的真空涨落创生了原初暴涨宇宙—原初 de Sitter 宇宙, 这时 SO_{11} , SU_{14} 或 $E_6 \times E_6$ 对称性成立. 由于规范耦合常数 g 和 Higgs 场自耦合常数 λ 的渐近自由, 将使得原初大统一破缺发生一级相变, 相变时释放出的潜热化为宇宙的原初物质, 以使宇宙升温到接近 Planck 温度. 这样所创生的宇宙即由原初暴涨阶段过渡到以辐射为主的标准模型. 此后, 例如 SU_{GUT} 成立, 在创生后的 10^{-35} 秒, 将发生熟知的第二次暴涨.

大爆炸宇宙模型的成功强烈地启示我们, 宇宙可能是有始的, 如果宇宙有始, 就必然存在宇宙的创生问题. 宇宙究竟创生于“无”, 还是创生于真空? 这是近十多年来一直在热烈讨论的问题^[1]. 本文将提出宇宙创生于真空的一个可能的模式.

Starobinsky 首先指出^[1], 原初暴涨宇宙可以产生于单圈近似下的真空涨落, 现在的问题是, 我们的宇宙及其全部物质是否有可能产生于真空和真空涨落? 这是一个迄今并未得到很好解决的问题^[2].

我们考虑如下的 Robertson-Walker 宇宙度规:

$$dS^2 = b^2(\eta)[d\eta^2 - d\chi^2 - f(\chi)(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)], \quad (1)$$

式中

$$f(\chi) = r = \begin{cases} \sin \chi & k = +1 \\ \chi & k = 0 \\ \sinh \chi & k = -1 \end{cases},$$

$$d\eta = a^{-1}(t)dt, \quad a(t) = b(\eta(t)),$$

t 即宇宙时.

当我们考虑共形不变物质场的单圈效应时, 无宇宙因子项的半经典 Einstein 引力场方程可以写为^[3]

$$-6\dot{b}^2 - 6b^2\dot{k} + 6\alpha\dot{b}\ddot{b}/b^2 - 12\alpha\dot{b}^2\ddot{b}/b^3 - 3\alpha(\ddot{b}/b)^2 - 6\alpha(\dot{b}/b)^2\dot{k} + 3\beta(\dot{b}/b)^4 - 4\beta(\dot{b}/b)^2\dot{k} = 0. \quad (2)$$

注意在上述方程中, 我们已令宇宙的原初物质密度 ρ 处处为零, 式中 α, β 由下式决定:

$$(2880\pi^2)^{-1} \times \begin{array}{cc} \alpha & \beta \\ \left\{ \begin{array}{ll} 1 \cdot N_0 & 1 \cdot N_0 \\ 6 \cdot N_{1/2} & 11 \cdot N_{1/2} \\ 12 \cdot N_1 & 62 \cdot N_1 \end{array} \right. & \begin{array}{l} \text{—— 无质量标量场;} \\ \text{—— Weyl 场;} \\ \text{—— 规范场.} \end{array} \end{array} \quad (3)$$

式中 $N_0, N_{1/2}$ 和 N_1 分别表示共形不变标量场、Weyl 场和规范场的种类数目.

不难相信, de Sitter 度规

$$dS^2 = dt^2 - e^{2Ht} [dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)] \quad (4)$$

的确是场方程 (2) 的一个解, 式中

$$H = 1/A, \quad A = (\beta/2)^{1/2}. \quad (5)$$

这一结果告诉我们, 一个空的无物质的 de Sitter 宇宙的确可以从共形不变物质场的单圈真空涨落中创生出来.

为了进一步探讨物质如何从空的 de Sitter 宇宙中创生出来这一难题, 我们合理地假设, 在原初 de Sitter 宇宙中存在一个原初的大统一场论. 熟知, 在单圈近似下, 上述原初大统一非阿贝耳规范群的重整化有效势为^[4]

$$\begin{aligned} V_{\text{eff}} &= V_{\text{classical}} + V_{\text{gauge}}^{(\text{one-loop})}(\varphi) \\ &= \frac{\lambda}{4!} \varphi^4 + B \varphi^4 \left[\ln \frac{\varphi^2}{\sigma^2} - \frac{25}{6} \right] + \varepsilon_0. \end{aligned} \quad (6)$$

式中我们仅计及了规范场单圈对有效势的贡献. 这是由于与它相比, Higgs 场和费密场的单圈对有效势的贡献可忽略不计. 为使非对称真空的有效势为零, 我们取 $\varepsilon_0 = -\frac{1}{2} \times B\sigma^4$, 其中常数 B 由规范群决定, $\varphi = \sigma$ 是 V_{eff} 的整体极小处. 由

$$\left. \frac{dV_{\text{eff}}}{d\varphi} \right|_{\varphi=\sigma} = 0,$$

得到

$$\lambda = 88B. \quad (7)$$

因而

$$V_{\text{eff}} = B \varphi^4 \left[\ln \frac{\varphi^2}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right] + \varepsilon_0. \quad (8)$$

但一般有

$$B \sim g^4.$$

式中 g 为原初 GUT 规范群的规范耦合常数. 因此, 一般应存在关系

$$\lambda \sim g^4, \quad (9)$$

令

$$\alpha = g^2/4\pi$$

对于一般规范群, 存在^[5]

$$\frac{1}{\alpha(Q^2)} = \frac{1}{\alpha(M^2)} + 4\pi b \ln \frac{M^2}{Q^2} \quad (10)$$

和

$$b = -\frac{1}{(4\pi)^2} \left[\frac{11}{3} C_2(G) - \frac{4}{3} T_f \right]. \quad (11)$$

式中 M 为原初 GUT 能标, Q 为任一能标, $C_2(G)$ 为原初 GUT 群 G 的伴随表示的平方 Casimir 算符, T_f 为与费密子味数成正比的量. 如果费密子的味数足够少, 就有

$$b < 0.$$

因而在原初 GUT 能标之上 ($Q > M$), g 具有渐近自由 (AF), 由 (9) 式知 Higgs 场的自耦合常数 λ 也应具有 AF, 这样, 当原初暴涨宇宙的固有体元 ($\sim a^3(t)$) 足够小而能量足够高时, 无质量的 Higgs 场由于 AF, 将趋于共形不变标量场, 而原初创生的整个 de Sitter 宇宙将处于这一标量场的对称真空中.

考虑到 de Sitter 时空的 Hawking 温度效应, 应把有效势修改为^[4]

$$V_{\text{eff}} = B\varphi^4 \left(\ln \frac{\varphi^2}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right) + cT_H^2 \cdot \varphi^2 + \varepsilon_0, \quad (12)$$

式中, $T_H = H/2\pi k$ 为 de Sitter 时空的 Hawking 温度, H 由 de Sitter 时空的真空能密度 ε_0 决定, 即

$$H = \left(\frac{8\pi}{3} G\varepsilon_0 \right), \quad \varepsilon_0 = \rho_0 + \varepsilon_0, \quad (13)$$

式中 ρ_0 来自单圈真空涨落的贡献, ε_0 来自对称真空与不对称真空势能之差. $c \sim g^2$ 为一个由规范群决定的常数.

当原初 de Sitter 宇宙暴涨, 体元增大, 自耦合常数 λ 由于 AF, 也将增大, 以便共形不变标量场转化为无质量的 $\lambda\varphi^4$ 场, 宇宙的有效势将如图 1 所示.

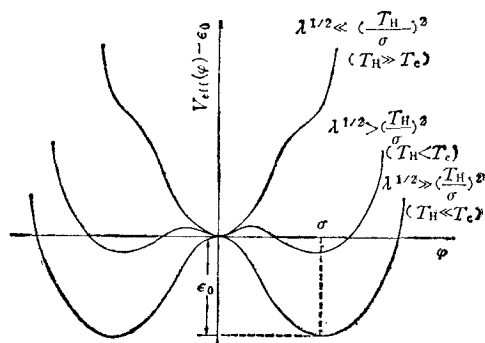


图 1

注意, 在图 1 中, 我们形式地引入了一个原初 GUT 相变温度 T_c :

$$T_c^2 = \frac{B\sigma^2}{2c} \sim \sigma^2 \lambda^{1/2}. \quad (14)$$

由于 λ 的 AF 所引起的 T_H 与 T_c 间相对大小的改变, 即可绘出在各种情况下的有效势能曲线. 应强调, 在一个原初是空无一物的 de Sitter 宇宙中, 除了 Hawking 温度外, 并不存在一般的温度, 只是由于自耦合常数 λ 的 AF, 才使得我们可以形式地引入一个有效相变温度 T_c .

当 $T_c \geq T_H$ 或 $\lambda^{1/2} \geq T_H^2/\sigma^2$ 时, 势能曲线出现了不对称真空, 原初 GUT 破缺, 宇宙发生原初一级相变, 处于对称假真空的 de Sitter 宇宙将通过量子涨落或量子隧道效应跃迁到不对称真真空而放出它的“潜热”(真空能) $\varepsilon_0 = \frac{1}{2} B\sigma^4$, 以产生原初的物质, 并加热宇宙, 以使原初创生的“冷”宇宙达到极高的温度, 从而使宇宙过渡到宇宙因子 $\Lambda_{\text{eff}} \approx 0$ 的辐射为主的标准模型——Friedmann 模型.

注意到

$$\Lambda_{\text{eff}} = 3H^2 = 6/\beta, \quad (15)$$

及含宇宙因子 Λ_{eff} 的 Einstein 引力方程的牛顿近似为

$$\Delta\chi = -4\pi G \left(\mu + \frac{\Lambda_{\text{eff}} \cdot c^2}{4\pi G} \right), \quad (16)$$

式中 χ 为牛顿引力势, μ 为质量密度. 可知, 宇宙因子 Λ_{eff} 对真空能密度的贡献为

$$\rho_0 = \frac{\Lambda_{\text{eff}} \cdot c^4}{4\pi G} = \frac{3}{2\pi} \beta^{-1}, \quad (17)$$

但

$$\beta = (2880\pi^2)^{-1}(N_0 + 11 \cdot N_{1/2} + 62N_1) \simeq (2880\pi^2)^{-1} \cdot 62 \cdot N_1,$$

要使真空能密度 ρ_0 不超过 Planck 能密度 ρ_P , 应有

$$\rho_0 \simeq \frac{3}{2\pi} \frac{2880\pi^2}{62 \cdot N_1} \leq \rho_P$$

或

$$N_1 \geq 219. \quad (18)$$

可知, 最小的原初 GUT 规范群为

$$SO_{11} \text{ 或 } SU_{14} \text{ 或 } E_8.$$

现在, 我们可以对极早期宇宙的演化图象作如下的描述:

泰初的真空涨落创生了一个约为 Planck 尺度的原初暴涨宇宙——原初 de Sitter 宇宙, 这时宇宙处于 SO_{11} , SU_{14} 或 E_8 的原初大统一状态, 这是一个“冷”的暴涨宇宙, 由于规范耦合常数和自耦合常数的渐近自由, 共形不变标量场将很快地转化为 $\lambda\phi^4$ 场, 当

$$\lambda^{1/2} \geq (T_H/\sigma)^2$$

时, 原初大统一破缺, 原初暴涨宇宙通过一级相变跃迁到宇宙因子不为零而以辐射为主, 密度在 Planck 量级的 Friedmann 宇宙, 此后直到 Guth 等人所讨论过的 SU , GUT 相变为止, 宇宙均按标准模型演化.

如果宇宙是有始的, 看来, 整个宇宙有可能是由真空涨落创生的.

参 考 文 献

- [1] E. P. Tryon, *Nature*, **246**(1973), 396; A. A. Starobinsky, *Phys. Lett.*, **91B**(1980), 99; A. Vilenkin, *Phys. Rev.*, **27D**(1983), 2848; J. B. Hartle, S. W. Hawking, *Phys. Rev.*, **28D**(1983), 2960.
- [2] J. B. Hartle, in “The very early universe”, edited by Gibbons, Hawking, Siklos, Cambridge University Press, (1982), p. 86.
- [3] M. V. Fischett, J. B. Hartle, B. L. Hu, *Phys. Rev.*, **20D**(1979), 1757; D. Y. Xu, Liao Liu, *Scientia Sinica*, **XXVII**(1) (1984), 81.
- [4] R. H. Brandenberger, *Rev. Mod. Phys.*, **57**(1985), 1.
- [5] P. Langacker, *Phys. Reports*, **72**(1981), 247.

A POSSIBLE PROPOSAL FOR THE CREATION OF UNIVERSE FROM VACUUM FLUCTUATION

LIU LIAO

(Department of Physics, Beijing Normal University)

JIANG YUAN-FANG

(Department of Physics, East China Normal University, Shanghai)

HUANG CHAO-GUANG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

QIAO ZHEN-HUA

(Department of Physics, East China Normal University, Shanghai)

ABSTRACT

The success of the Big Bang model strongly suggests that the universe may be created, but whether the universe is created from nothing or from vacuum is a problem of controversy. In this paper, we put forth a possible proposal for the creation of universe from vacuum fluctuation. We note that the primordial inflationary universe-primordial de Sitter Universe, could be created from the vacuum fluctuation in one-loop approximation, where the SO_{11} , SU_{14} or $E_8 \times E_8$ symmetry hold. By way of the asymptotic freedom of the gauge coupling g and Higgs self coupling λ , the primordial GUT breaks down and the latent heat releases during the first order phase transition. The released heat will heat the 'cold' universe to Planck temperature, so the created inflationary universe will pass into the standard model dominated by radiation. Thereafter, for example, the SU_3 GUT holds and the well known second inflation will appear at 10^{-35} seconds after the creation.