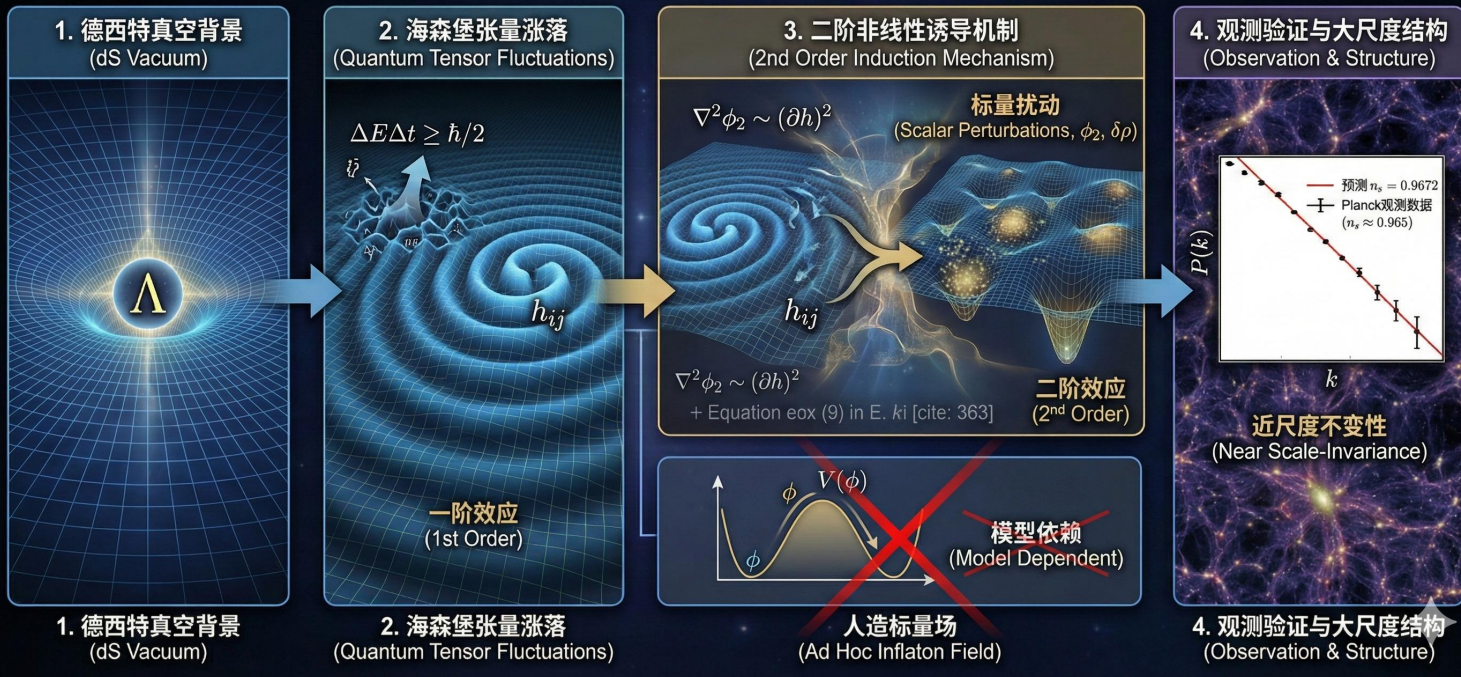


纯几何量子暴胀机制示意图

无暴胀子纯几何量子暴胀 = 德西特真空背景 + 海森堡张量涨落 + 一阶张量源二阶标量扰动 - 人造标量场模型依赖 + 谱指数0.9672观测一致



无暴胀子的暴胀

Daniele Bertacca,^{1,2,3} Raul Jimenez,^{4,5} Sabino Matarrese,^{1,2,3,6} 以及 Angelo Ricciardone^{7,8}

¹帕多瓦大学物理与天文学系“伽利略·伽利雷”，Via Marzolo 8, I-35131, 帕多瓦，意大利

²INFN，帕多瓦分部，via Marzolo 8, I-35131, 帕多瓦，意大利

³INAF-帕多瓦天文台，Vicolo dell'Osservatorio 5, I-35122 帕多瓦，意大利

⁴巴塞罗那大学 ICC，Martí i Franquès, 1, E08028 巴塞罗那，西班牙

⁵ICREA, Pg. Lluís Companys 23, 巴塞罗那，08010, 西班牙

⁶大萨索科学研究所，Viale F. Crispi 7, I-67100 拉奎拉，意大利

⁷比萨大学物理系“恩里科·费米”，Largo B. Pontecorvo 3, I-56127 比萨，意大利

⁸INFN 比萨分部，Largo B. Pontecorvo 3, I-56127 比萨，意大利

我们提出了一个新颖的方案，在该方案中，作为宇宙大尺度结构种子的标量扰动是在不依赖标量场（即暴胀子）的情况下生成的。在这一框架下，暴胀由德西特时空 (dS) 驱动，其中张量度规涨落（即引力波）自然地产生于真空量子振荡，而标量涨落则通过二阶张量效应生成。我们计算了此类标量涨落的功率谱，并证明其与近尺度不变性是一致的。我们导出了标量扰动变得显著且远大于张量模态的必要条件，并确定了一种通过过渡到辐射主导阶段来结束暴胀的自然机制。我们提出的机制可以消除对模型依赖方案（即选择特定标量场作为暴胀子）来驱动暴胀的需求。

I. 引言

暴胀范式 [1 – 9] 仍然是解释宇宙起源、演化及其大尺度结构 [4] 最成功的候选者。这导致了在基础粒子物理学中寻找暴胀标量场的尝试。然而，到目前为止，还没有任何明确的理论论据指向单一的暴胀子候选者；事实上，即使在弦理论等基础理论中，也有可能构建出符合观测数据的任何暴胀势：即观测到的标量涨落谱倾斜、暴胀能量标度的上限（尚未发现的张量模态）[10, 11] 以及非高斯 $1 - n_s$ 信号（例如，[12]）。这也许是暴胀范式的主要弱点，因为它依赖于模型相关的构造。因此，寻找完全独立于模型的方案是很有意义的，从而使暴胀成为一种理论而非仅仅是一个模型。沿着这条思路，在被称为量子费舍尔宇宙学 (QFC) 的框架下 [13 – 15] 已经进行了一些尝试。研究表明，仅通过考虑测量 dS 时间的海森堡不确定性原理，就可以预测原始标量功率谱的倾斜度为 $n_s = 0.9672$ 。

在这里，我们关注在纯量子物理框架内，以不依赖模型的方式如何生成标量扰动。我们展示了标量扰动作为张量扰动的二阶效应出现，并可以显著增强，从而使其在 dS 中固有的线性张量模态中占据主导地位。从张量扰动生成二阶标量模态的研究最早见于 [16 – 18]。最近，[19, 20] 对后暴胀时期的张量诱导标量扰动进行了定量分析。我们的方案依靠类似的机制来产

生标量扰动。此外， dS 空间的不稳定性 [21 – 24] 既为暴胀的优雅退出提供了自然方式，也提供了进入辐射主导时期的手段。

【高三解读】

高三物理与宇宙学前沿深度解读

1. 核心概念：什么是“暴胀”(Inflation)？

在高中物理学习中，我们了解了宇宙大爆炸理论。而“暴胀”是指宇宙在极早期（约 10^{-36} 秒）经历的一次指数级的极速膨胀。它解决了宇宙学中的平坦性问题和视界问题。传统理论认为这种膨胀是由一种叫做“暴胀子”的标量场驱动的。本文的突破点在于探讨：如果没有这个标量场，宇宙还能暴胀吗？

2. 跨学科知识点：标量 vs 张量（物理量的本质）

- **标量 (Scalar)**：只有大小没有方向。文中指“标量扰动”，它是宇宙物质密度分布不均的种子，最终演化成了我们看到的星系和恒星。
- **张量 (Tensor)**：描述空间几何属性的量。文中指“张量涨落”，本质上就是引力波。在高三物理的《机械波》和《电磁波》基础上，可以把引力波理解为“时空的涟漪”。
- **关联**：本文提出，宇宙的物质分布（标量）可能是由空间的扭曲（张量）经过“二阶效应”产生的，这是一种更高阶的物理关联。

3. 数学模型：海森堡不确定性原理的应用

文中提到利用海森堡不确定性原理预测标量功率谱倾斜度 $n_s = 0.9672$ 。

- **知识点回顾**：
 Δx
 Δp
 g
 $\frac{1}{4\pi}$ 。
- **学科思维**：在微观尺度上，能量和时间是不确定的。这种微小的量子涨落，在暴胀过程中被拉伸到了整个宇宙的尺度。这体现了“微观决定宏观”的深刻物理思想，是高考物理中关于物质观、宇宙观考察的高级素材。

4. 关键数值解读： $n_s = 0.9672$

- 这个数值被称为“标量谱指数”。如果 $n_s = 1$ ，说明各尺度上的扰动强度相同（尺度不变性）。

- 文中得到的 0.9672 与目前普朗克卫星 (Planck) 观测到的实验值 (约 0.965) 高度吻合。这证明了作者提出的“无暴胀子”理论在实验上的可行性。

5. 常见解题陷阱与思维误区

- **误区**：认为宇宙早期的物质产生一定需要某种物质实体（如场或粒子）。
- **纠正**：本文告诉我们，**纯粹的时空几何涨落（引力波）**通过非线性相互作用，就能产生我们今天看到的物质结构。这提醒学生在处理力学或场论问题时，要注意系统内部的能量转换机制，不一定要引入外力。

6. 学科背景：模型依赖 (Model-dependent) vs 模型独立 (Model-independent)

这是一个非常重要的科学方法论。高三学生在做物理实验探究题时，往往需要建立模型。如果一个结论换个模型就不成立，那它就不够鲁棒。本文追求的是“模型独立”，即通过最基础的量子力学原理得出结论，这比设定某种特定的“势能函数”更有说服力。

第 2 页

【原文翻译】

2

对于其霍金温度下的量子/热涨落是不稳定的，在任意点成核产生一种真空泡，打破了全局德西特 (dS) 不变性 [26]。另见最近的研究 [27, 28]。

本信函的目的是介绍这种新颖的机制及其主要预测。我们推导了二阶标量势能的精确表达式，以及由二阶张量扰动产生的标量功率谱。我们证明了后者与观测中预期的近标度不变性一致，为后续众多的电势研究和扩展铺平了道路。

II. 来自张量模的标量扰动

我们在纯 dS 度规下工作，该度规在 d 维空间中由双曲面 $(dS)_\alpha = -X_0^2 + X_1^2 + \dots + X_d^2$ 定义，在笛卡尔坐标系下， $ds^2 = dt^2 - e^{2t/\alpha}(dx^2 + dy^2 + dz^2)$ ，其中 $\alpha \equiv (3/\Lambda)^{1/2}$ ，且 Λ 是真空能量。我们假设爱因斯坦引力。

为了通用性，在爱因斯坦方程的等号右侧 (RHS)，我们允许能量-动量张量的存在，它说明了驱动我们 dS 膨胀的宇宙学常数的总和，以及一个具有能量密度 ρ 、各向同性压强 p 、四元速

度 u^μ 和各向异性应力张量 π^μ_ν 的通用流体，即：

$$T^\mu_\nu = -\frac{\Lambda}{8\pi G}\delta^\mu_\nu + (\rho + p)u^\mu u_\nu + p\delta^\mu_\nu + \pi^\mu_\nu \quad (1)$$

正如我们将在下面看到的，所考虑的流体不可避免地源于来自引力波（GW）的爱因斯坦张量二阶贡献的真空期望值，这在子视界尺度上导致了非零的能量、压强和各向异性应力。仅考虑张量贡献，在这样一个 GW 流体的共动框架中，我们有：

$$u^\mu = \frac{1}{a}(\delta^\mu_0 + \frac{1}{2}v^\mu_2) \quad (2)$$

由此我们可以计算出 u_μ 为：

$$u_0 = g_{0\rho}u^\rho = a(-1 - \frac{1}{2}\psi_2); u_i = \frac{1}{2}a\omega_{2i} + a(\frac{1}{2}v_{2i}) \quad (3)$$

对于二阶的 00 分量，我们发现：

$$\frac{1}{2}\delta^2 T^0_0 = -\frac{1}{2}\delta^2 \rho \quad (4)$$

T^μ_ν 的其他分量由以下公式给出：

$$\frac{1}{2}\delta^2 T^i_0 = -(1+w)\bar{\rho}[\frac{1}{2}v^i_2] \quad (5)$$

$$\frac{1}{2}\delta^2 T^i_j = +\frac{1}{2}\delta^2 p\delta^i_j + \frac{1}{a^2}\frac{1}{2}\delta^2 \pi^i_j \quad (6)$$

其中 w 是背景能级的状态方程，各向异性应力张量在每一阶可以分解为一个无迹标量部分 Π 、一个矢量部分 Π_i 和一个张量部分 Π_{ij} ，根据：

$$\pi_{ij} = a^2[\Pi_{,ij} - \frac{1}{3}\nabla^2\Pi\delta_{ij} + \frac{1}{2}(\Pi_{i,j} + \Pi_{j,i}) + \Pi_{ij}] \quad (7)$$

$$\frac{1}{a^2}\delta^2 \pi_{ij} = [\Pi_{2,ij} - \frac{1}{3}\nabla^2\Pi_2\delta_{ij} + \frac{1}{3}(\Pi_{2i,j} + \Pi_{2j,i}) + \Pi_{2ij}] \quad (8)$$

我们可以将特异速度 v^i_2 分解为 $v_{2i} = v_{2,i} + v^\perp_{2i}$ ，其中 v^\perp_{2i} 是螺线管（无散或横向）矢量。

考虑到一个具有通用 w 和 c_s 的引力子扰动，其中 $\delta^2 p = c_s^2 \delta^2 \rho$ ，通过处理爱因斯坦方程，我们找到了 ϕ_2 的势能方程，即：

$$\begin{aligned}
& \phi_2'' + 3(1 + c_s^2)H\phi_2' + [2H' + (1 + 3c_s^2)H^2]\phi_2 - c_s^2\nabla^2\phi_2 = 8\pi Ga^2[2H' + 3(1 + c_s^2)H^2]\Pi \\
& + \frac{8\pi G}{3}a^2\nabla^2\Pi_2 + 8\pi Ga^2H\Pi_2' - \frac{3}{2}[2H' + (1 + 3c_s^2)H^2]\nabla^{-4}\partial_i\partial^j A_j^i - \frac{3}{2}H\nabla^{-4}\partial_i\partial^j A_j^{i'} \\
& - [2H' + (1 + 3c_s^2)H^2]\nabla^{-2}\left[-\frac{3}{4}\chi_1^{lk,m}\chi_{1kl,m} - \frac{1}{2}\chi_1^{kl}\nabla^2\chi_{1lk} + \frac{1}{2}\chi_{1,l}^{km}\chi_{1m,k}^l + \frac{1}{2}\chi_{1km}'\chi_1^{km} - \frac{3}{2}\right. \\
& + \frac{3}{8}\chi_{1,k}^{ml}\chi_{1lm}^k - \frac{3}{8}\chi_1^{kl'}\chi_{1kl}' - \frac{1}{4}\chi_{1k,l}^m\chi_{1,m}^{lk} - H\nabla^{-2}\left[-\frac{3}{2}\chi_1^{lk,m'}\chi_{1kl,m} + \frac{1}{2}\chi_1^{kl'}\nabla^2\chi_{1lk} - \frac{1}{2}\chi_1^{kl}\nabla^2\chi_{1l}' \right. \\
& + \frac{1}{2}\chi_{1,l}^{km}\chi_{1m,k}^{l'} - 2H\chi_{1km}'\chi_1^{km'}\left.] + 3H\nabla^{-4}(-2H\chi_{1k,j}'\chi_{1k,j}^{i'} + \chi_{1k,j}'\nabla^2\chi_{1k,j}^i) + \frac{1}{2}\nabla^{-2}\partial_i\partial_j(\chi_1^{ik'}\chi_{1i}^{j'}) \right. \\
& \left. + c_s^2\left[-\frac{1}{8}\chi_1^{ik'}\chi_{1ki}' - H\chi_1^{ik'}\chi_{1ki} + \frac{1}{2}\chi_1^{mk}\nabla^2\chi_{1mk} + \frac{3}{8}\chi_{1,k}^{ml}\chi_{1lm}^k - \frac{1}{4}\chi_{1k,l}^m\chi_{1,m}^{lk}\right], \right.
\end{aligned}$$

【高三解读】

这份学术文本探讨了宇宙学中极其前沿的课题：**引力波（张量模）如何诱导产生标量扰动**。对于高三学生，理解这些复杂的数学推导并非重点，关键在于把握其背后的物理思想和与基础物理知识的联系。

1. 核心知识点解析

- **德西特（de Sitter, dS）宇宙模型**：这是一种描述由于宇宙学常数（类似于暗能量）驱动而加速膨胀的宇宙模型。在高三地理或物理的简史介绍中，大家知道宇宙在膨胀，而 dS 模型是这种膨胀的一种理想数学描述。
- **微扰理论（Perturbation Theory）**：这是处理复杂物理系统的标准方法。想象平静的湖面（背景），丢下一颗石子产生的涟漪（扰动）。在宇宙尺度上，这些“涟漪”演变成了后来的星系和宇宙结构。文中提到的“二阶（second-order）”意味着研究的是更细微、更深层次的相互作用。
- **爱因斯坦场方程**：方程 (1) 展示了物质和能量（右边）如何决定时空的几何属性（左边）。这体现了广义相对论的核心思想：“物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质如何运动”。

2. 学科背景与解题思维

- **跨学科联系**：方程 (9) 虽然看起来极其复杂，但它的结构类似于高三物理中的**简谐运动或受迫振动方程**。左侧是关于时间（用导数表示）的演化项，右侧则是驱动项（源项）。在物理竞赛或物理综合题中，理解“源（source）”产生“场（field）”的逻辑非常重要。
- **张量、矢量与标量**：
 - **标量**：只有大小，如温度、能量密度 ρ 。
 - **矢量**：既有大小又有方向，如速度 v^i 。

- **张量**：更复杂的物理量，用于描述应力等在不同方向上的分布情况。

本文的精髓在于：通常认为这几种模是独立的，但本文证明了在二阶效应下，**张量模（引力波）可以产生标量模（密度波动）**。

3. 常见陷阱与误区

- **符号误区**：在广义相对论中，上下角标（如 u^μ 和 u_μ ）具有不同的几何意义，不能简单混淆。这提醒我们在做物理题时，一定要分清物理量的矢量性或标量性。
- **单位与量纲**：观察方程 (1)，每一项的单位必须是一致的。比如 $\frac{\Lambda}{8\pi G}$ 的量纲必须与动量张量一致。在处理复杂公式时，**量纲分析**是高三学生检查答案正确性的有力工具。

4. 学习建议

面对这种级别的科研论文，不要被复杂的数学符号吓倒。高三学生应重点关注**物理建模的过程**：从最基本的度规定义出发，代入守恒定律和场方程，最终推导出描述系统演化的动力学方程。这种“定义-建模-推导-预测”的逻辑是科学研究的通用范式。

第 3 页

【原文翻译】

其中

$$A_j^i = \frac{1}{2} \chi_1^{lk,i} \chi_{1kl,j} + \chi_1^{kl} \chi_{1lk,j}^i - \chi_1^{kl,i} \chi_{1ll,jk} - \chi_1^{kl} \chi_{1lj,k}^i + \chi_1^{kl} \chi_{1j,kl}^i + \chi_{1,l}^{ik} \chi_{1jk}^l - \chi_{1,l}^{ki} \chi_{1j,k}^l$$

(10)

利用 ij 分量的无迹部分，我们得到

$$\psi_2 = \phi_2 - 8\pi G a^2 \Pi_2 - \frac{F_\chi}{4}$$

(11)

其中

$$F_\chi = 4 \nabla^{-2} \left(\frac{3}{4} \chi_1^{lk,m} \chi_{1kl,m} + \frac{1}{2} \chi_1^{kl} \nabla^2 \chi_{1lk} - \frac{1}{2} \chi_{1,l}^{km} \chi_{1m,k}^l \right) - 6 \nabla^{-4} \partial_i \partial^j A_j^i$$

(12)

并且，仅考虑张量贡献，等密度超平面上的规范不变曲率扰动为

$$\zeta_2 = -\phi_2 - \frac{H}{\bar{h}o} \delta^2 \rho$$

(13)

寻找 ϕ_2 为常数的特解，即在极大尺度上，利用能量-动量约束方程，我们得到

$$\frac{8\pi G}{H_\Lambda^2} \Pi_2 = \eta_{\text{in}}^2 \left[\frac{8\pi G}{\eta_{\text{in}}^2 H_\Lambda^2} \Pi_{2\text{in}} - \left(\phi_2 - \frac{1}{4} F_\chi \right) \left(\frac{\eta}{\eta_{\text{in}}} \right)^{(5+3c_s^2)} + \left(\phi_2 - \frac{1}{4} F_\chi \right) \eta^2 \right]$$

(14)

$$\psi_2 = \left[-\frac{8\pi G}{\eta_{\text{in}}^2 H_\Lambda^2} \Pi_{2\text{in}} + \left(\phi_2 - \frac{1}{4} F_\chi \right) \right] \left(\frac{\eta}{\eta_{\text{in}}} \right)^{3(1+c_s^2)}$$

(15)

我们可以快速验证前两个方程可以再次组合以恢复通常的关系

$$\frac{8\pi G}{\eta_{\text{in}}^2 H_\Lambda^2} \Pi_2 + \psi_2 \left(\frac{\eta}{\eta_{\text{in}}} \right)^2 = \left(\phi_2 - \frac{1}{4} F_\chi \right) \left(\frac{\eta}{\eta_{\text{in}}} \right)^2$$

(16)

注意到如果

$$\left(\phi_2 - \frac{1}{4} F_\chi \right) = \frac{8\pi G}{\eta_{\text{in}}^2 H_\Lambda^2} \Pi_{2\text{in}}$$

(17)

我们将始终有 $\psi_2 = 0$ 且 $\phi_2 = F_\chi/4$ ；这也可能是我们情景中的一个解。这里， η_{in} 是一个合适的初始条件。准确地说， η_{in} 是假设 ϕ_2 随时间恒定的假设仍然正确的初始时刻。现在，仅考虑给定共动 k 的模式，我们知道这个假设在视界交叉后是合理的。 η_{in} 必须取决于共动 k （即对于不同的 k ，我们应该有一个合适的 η_{in} ）。在这种情况下，作为第一步近似，我们可以令 $|\eta_{\text{in}}(k)| \simeq 1/c_s k$ 。如果我们对所有这些变量进行傅里叶变换，我们得到

$$\tilde{\psi}_2 \simeq \left[-\frac{8\pi G}{H_\Lambda^2} c_s^2 k^2 \tilde{\Pi}_{2\text{in}} + \left(\tilde{\phi}_2 - \frac{1}{4} \tilde{F}_\chi \right) (c_s k |\eta|) \right]^{3(1+c_s^2)}$$

(18)

现在，在超视界尺度上，仍然假设 ϕ_2 为常数， ζ_2 变为

$$\zeta_2 = -\phi_2 + \frac{3H^3}{4\pi G a^2 \bar{h}o} \psi_2 = -\phi_2 - \frac{H_\Lambda^2}{4\pi G (1+w) \bar{h}o} \psi_2$$

(19)

其中我们将 w 保持为通用的，并且让我们强调，它与 c_s^2 不同。将方程 (18) 和

$$\bar{h}o(\eta) = \bar{h}o_{\text{in}} \left(\frac{\eta}{\eta_{\text{in}}} \right)^{3(1+w)} = \bar{h}o_{\text{in}} (c_s k \mid \eta \mid)^{3(1+w)}$$

代入方程 (19)，在傅里叶空间中，它变为

$$\tilde{\zeta}_2 - \tilde{\phi}_2 = -\frac{H_\Lambda^2}{4\pi G(1+w)\bar{h}o} \tilde{\psi}_2 = -\frac{H_\Lambda^2}{4\pi G(1+w)\bar{h}o_{\text{in}}} \times \left[-\frac{8\pi G}{H_\Lambda^2} c_s^2 k^2 \tilde{\Pi}_{2\text{in}} + \left(\tilde{\phi}_2 - \frac{1}{4} \tilde{F}_\chi \right) \right] \quad (20)$$

现在我们需要知道在给定模式 k 下 c_s 和 ρ_{in} 的值。显然， $w - c_s^2 > 0$ 才能使标量波动大于张量波动。这可以通过在德西特阶段产生的相同引力子来实现 [29]。对于状态方程为 $1/3$ 的纯辐射，标量扰动将不再增长。这为结束暴胀提供了一条自然的途径。

III. 功率谱

作为一个简单的分析实例，让我们考虑 $\psi_2 = 0$ 的情况，即当 $\phi_2 = F_\chi/4$ 且我们只关注 (12) 中的第一项时；第二项将给出类似的依赖性。那么标量涨落 ϕ 的原始功率谱是

$$\langle \phi(\mathbf{k}) \phi(\mathbf{k}') \rangle = \frac{1}{4} \langle \phi_2(\mathbf{k}) \phi_2(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta^{(3)}(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P_\phi(k)$$

(21)

且

$$P_\phi(k) = \frac{1}{64(2\pi)^3} \frac{1}{k^4} \int d^3k_1 d^3k_2 \delta^{(3)}[\mathbf{k} - (\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2)] \times K_h(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, k^2) P_h(k_1) P_h(k_2)$$

(22)

其中内核由下式给出

【高三解读】

这部分内容涉及宇宙学中最前沿且具挑战性的领域：早期宇宙的扰动理论。对于高三学生来说，虽然其中的张量微积分和量子引力背景超出了教学大纲，但我们可以通过以下几个核心物理逻辑来理解其本质：

- 从“平滑”到“结构”：**高三物理中我们学习万有引力，通常假设星体是均匀的质点。但在宇宙学中，科学家研究的是宇宙初期微小的密度不均匀性（即标量扰动 ϕ ）是如何演变成今天星系结构的。文中的 ζ_2 和 ψ_2 就代表了这些微小的“涟漪”。
- 傅里叶变换的直观理解：**文中频繁出现共动波数 k 和傅里叶空间。这在物理学中是一种极强大的工具，就像我们将复杂的乐声分解为不同频率（音调）的简谐波一样，科学家将宇宙中的密度分布分解为不同波长（尺度）的波动。 k 越大，波长越短，代表越小的尺度。

3. **视界 (Horizon) 的概念**: 方程 (18) 提到了视界交叉。你可以把视界想象成信息的“光速边界”。在宇宙暴胀期间, 某些扰动被拉扯得比视界还要大 (超视界尺度), 这导致了方程 (19) 和 (20) 中讨论的特殊演化行为。
4. **功率谱 (Power Spectrum) 与统计特性**: 方程 (21) 和 (22) 描述了功率谱。在高中数学中我们学过概率统计, 功率谱本质上是描述这些宇宙微波背景或物质分布扰动在不同尺度上的“强度”。 δ 函数代表了动量守恒, 暗示了物理规律在宇宙各处的一致性。
5. **暴胀的终结**: 最后一段提到 $w - c_s^2 > 0$ 是扰动增长的条件。这揭示了宇宙演化的动力学: 宇宙成分 (辐射、物质、暗能量) 的变化会直接影响时空的平滑度, 从而决定暴胀是否停止。这为理解宇宙起源提供了一个数学化的“开关”。

解题与思考技巧:

- **维度分析**: 观察方程 (22), 注意 k 的幂次与积分项的维度平衡。在处理物理公式时, 检查两边的量纲是否一致是最高级的纠错手段。
- **极限思想**: 文章中经常讨论“大尺度”或“超视界尺度”, 这是物理学中简化的常用技巧, 通过忽略次要项来抓住核心物理本质。

第 4 页

【原文翻译】

4

$$K_h(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, k^2) = \{(k_1^2 + k_2^2 + 3\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_2)^2 [(1 - \hat{\mathbf{k}}_1 \cdot \hat{\mathbf{k}}_2)^4 + (1 + \hat{\mathbf{k}}_1 \cdot \hat{\mathbf{k}}_2)^4]$$

\n

$$+ 8(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_2)(k_1^2 + k_2^2 + 3\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_2)(\hat{\mathbf{k}}_1 \times \hat{\mathbf{k}}_2)^2 [3 + (\hat{\mathbf{k}}_1 \cdot \hat{\mathbf{k}}_2)^2] + 8k_1^2 k_2^2 (\hat{\mathbf{k}}_1 \times \hat{\mathbf{k}}_2)^4 [1 + (\hat{\mathbf{k}}_1 \cdot \hat{\mathbf{k}}_2$$

\n\n定义 $P_h(k) = 2\pi^2 \Delta_h^2(k)/k^3$, de Sitter (dS) 空间中的张量功率谱如文献 [30] 所示: \n\n

$$\Delta_h^2(k) = \frac{16}{\pi} \left(\frac{H_{\text{inf}}}{m_{\text{pl}}} \right)^2. \quad (24)$$

\n\n这里 $H_{\text{inf}} = \sqrt{\Lambda/3}$ 是暴胀期间的哈勃常数。 \n\n请注意, 该内核与标准的单场暴胀 (在此情况下内核体现在双谱中) 有明显不同。这种差异也会影响标量扰动的双谱, 从而在大型结构的挤压非高斯特征中留下独特的特征 [12]。因此, 这提供了一种通过观测来检验我们方案的方法。功率谱几乎是标度不变的; 这可以很容易地从 (23) 式中不存在未补偿的 \mathbf{k} 的 4 次项看

出。

IV. 讨论

我们已经证明，在纯 de Sitter 空间中产生几乎标度不变的标量绝热扰动是可能的。这是一种不存在暴胀子 (inflaton) 的方案，从而开启了提供独立于模型的暴胀图景的可能性。我们的计算中有一些有趣的特征。首先，注意标量涨落是由张量扰动在视界之外产生的。假设这些涨落是绝热的（如标准暴胀图景所示），势场 ϕ 中诱导的扰动在从 dS 相位通过 dS 衰变过渡到辐射主导时代后仍然存在。类似地，对于标量模式，矢量扰动也由二阶张量涨落产生。正如预期的那样，涨落偏离了高斯性，并表现出一定程度的内在非高斯特征，其量化将在未来的出版物中阐述。然而，我们注意到：对于任何非共形不变场（质量为 $m \ll H$ ），真空态中粒子的量子产生将为二阶标量扰动模式增加额外的贡献，从而根据中心极限定理有助于高斯化。在我们的方案中，涨落的幅度可以从公式 (22)-(23) 确定，这些公式完全依赖于 dS 特征以及可能增强标量扰动的物理机制。这些因素为为什么涨落在 10^{-5} 水平上提供了一个可能的解释。

致谢

R.J. 的工作得到了 PID2022-141125NB-I00 项目的部分资助，以及资助 ICCUB (CEX2019-000918-M) 的“Maria de Maeztu 卓越中心 2020-2023”奖项，资金来自 MCIN/AEI/10.13039/501100011033。DB 和 SM 感谢 COSMOS 网络 (www.cosmosnet.it) 以及意大利航天局 (ASI) 资助 2016-24-H.0, 2016-24-H.1-2018 和 2020-9-HH.0 的支持。

参考文献

[1] A. A. Starobinsky, “残留引力辐射谱与宇宙早期状态,” JETP Lett. 30, 682-685 (1979)
 [2] A. A. Starobinsky, “一种新型无奇点各向同性宇宙模型,” Phys. Lett. 91B (1980) 99
 [4] V. F. Mukhanov 和 G. V. Chibisov, “量子涨落与非奇点宇宙,” JETP Lett. 33 (1981) 532
 [5] A. H. Guth, “暴胀宇宙：解决视界和平坦性问题的一种可能方案,” Phys. Rev. D 23 (1981) 347

【高三解读】

这是一篇关于宇宙学前沿研究的论文片段，探讨了宇宙早期‘暴胀’(Inflation)的一种新机制。

对于高三学生，我们可以从以下几个维度来深度解读：

1. 核心物理背景——宇宙暴胀理论

在高中物理的‘宇宙学简介’中，我们学习过宇宙大爆炸模型。暴胀是指宇宙在极早期极短时间内经历的一次指数级的剧烈膨胀。传统的暴胀理论通常需要一种叫做‘暴胀子’(inflaton)的标量场来驱动。但本文提出的新颖之处在于：即便没有暴胀子，仅仅依靠‘纯 de Sitter 空间’（一种常数能量密度的空间模型）中的‘张量扰动’(即引力波的微小起伏)，也能产生我们今天观察到的宇宙结构种子。

2. 关键公式解析 (Equation 24)：

$$\Delta_h^2(k) = \frac{16}{\pi} \left(\frac{H_{\text{inf}}}{m_{\text{pl}}} \right)^2$$

这个公式非常有启发性： H_{inf} 是哈勃常数，代表膨胀速率，反映了暴胀时期的能量标度。 m_{pl} 是普朗克质量，是微观量子效应与宏观引力效应交汇的根本物理常数。整个式子告诉我们：宇宙早期的量子涨落幅度 (Δ_h^2) 取决于膨胀强度与引力强度的比值。这展示了物理学‘大统一’的思想。

3. 标度不变性 (Scale Invariance)：

文中提到的‘几乎标度不变’意味着在宇宙的不同尺度上，涨落的强度几乎是相同的。这是通过对宇宙微波背景辐射 (CMB) 观测证实的特征。文中提到涨落水平在 10^{-5} 量级，这正对应了 CMB 中十万分之一度的温度起伏，这些微小的‘涟漪’最终演变成了今天的星系。

4. 科学方法论——模型验

证：文中强调‘这提供了一种通过观测来检验我们方案的方法’。在物理学中，一个新的理论是否成立，**必须预言一些与现有理论不同的‘特征签名’**（如文中提到的非高斯性特征）。如果未来的天文望远镜观测到了这些特征，这个‘无暴胀子’的猜想就可能被证实。

跨学科联系——中心极限定理：文中提到了数学中的‘中心极限定理’。在物理中，当大量微小的、独立的随机效应叠加在一起时，最终的分布会趋向于正态分布（高斯分布）。这解释了为什么虽然物理机制很复杂，**但我们观测到的宇宙背景辐射涨落看起来非常‘随机且均匀’**。

高考连接点：虽然高考不会直接考暴胀子，但**哈勃定律** ($v = Hr$)、**万有引力与航天**、以及对**量纲分析**（如普朗克单位制的理解）是考察热点。通过阅读此类文章，可以培养在复杂信息中提取关键物理关系的能力。

第 5 页

【原文翻译】

- [7] A. D. Linde, “混沌暴涨 (Chaotic Inflation)”, Phys. Lett. B 129 (1983), 177-181.
- [8] A. Albrecht 和 P. J. Steinhardt, “具有辐射诱导对称性破缺的大统一理论宇宙学 (Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively Induced Symmetry Breaking)”, Phys. Rev. Lett. 48 (1982), 1220-1223.
- [9] L. A. Kofman, A. D. Linde 和 A. A. Starobinsky, “由标量场与引力真空极化共同作用产生的暴涨宇宙 (Inflationary Universe Generated by the Combined Action of a Scalar Field and Gravitational Vacuum Polarization)”, Phys. Lett. B 157 (1985), 361-367.
- [10] N. Aghanim 等 [Planck 合作组], “Planck 2018 结果。I. 概述与 Planck 的宇宙学遗产 (Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck)”, Astron. Astrophys. 641 (2020), A1.
- [11] G. Galloni, N. Bartolo, S. Matarrese, M. Migliaccio, A. Ricciardone 和 N. Vittorio, “关于张量原始谱振幅与倾角的更新约束 (Updated constraints on amplitude and tilt of the tensor primordial spectrum)”, JCAP 04 (2023), 062.
- [12] D. Bertacca, R. Jimenez, S. Matarrese 和 L. Verde, “打破单钟对称性：测量单场暴涨的非高斯特征 (Breaking the Single Clock Symmetry: measuring single-field inflation non-Gaussian features)”, arXiv:2110.09549 [[astro-ph.CO](#)].
- [13] C. Gomez 和 R. Jimenez, “量子信息宇宙学 (Cosmology from Quantum Information)”, Phys. Rev. D 102 (2020) no.6, 063511.
- [14] C. Gómez 和 R. Jimenez, “原始量子涨落谱指数的模型无关预测 (Model Independent Prediction of the Spectral Index of Primordial Quantum Fluctuations)”, JCAP 10, 052 (2021).
- [15] C. Gomez 和 R. Jimenez, “量子费舍尔宇宙学：面对观测数据与跨普朗克问题 (Quantum Fisher Cosmology: Confronting Observations and the Trans-Planckian Problem)”, JCAP 09 016 (2021).
- [16] Tomita, K. 1972, Progress of Theoretical Physics, 47, 416.

- [17] Tomita, K. 1971, Progress of Theoretical Physics, 45, 1747.
- [18] S. Matarrese, S. Mollerach 和 M. Bruni, Phys. Rev. D 58 (1998), 043504.
- [19] P. Bari, A. Ricciardone, N. Bartolo, D. Bertacca 和 S. Matarrese, Phys. Rev. Lett. 129 (2022) no.9, 091301.
- [20] P. Bari, D. Bertacca, N. Bartolo, A. Ricciardone, S. Giardiello 和 S. Matarrese, JCAP 07 (2023), 034.
- [21] E. Mottola, Phys. Rev. D 31, 754 (1985).
- [22] Antoniadis, I., Mazur, P. O., & Mottola, E. 2007, New Journal of Physics, 9, 11.
- [23] A. m. Polyakov, Sov. Phys. Usp. 25, 187 (1982).
- [24] G. Dvali, C. Gomez 和 S. Zell, JCAP 06, 028 (2017).
- [25] E. Mottola, Phys. Rev. D 33, 2136 (1986).
- [26] E. Mottola, Phys. Rev. D 33, 1616-1621 (1986).
- [27] R. Alicki, G. Barenboim 和 A. Jenkins, Phys. Rev. D 108, no.12, 123530 (2023).
- [28] R. Alicki, G. Barenboim 和 A. Jenkins, [arXiv:2307.04803 [gr-qc]].
- [29] A. Negro 和 S. P. Patil, [arXiv:2403.16806 [hep-th]].
- [30] Y. Watanabe 和 E. Komatsu, Phys. Rev. D 73, 123515 (2006).

【高三解读】

这份参考文献列表呈现了现代宇宙学研究的前沿图景，对于高三学生来说，虽然具体公式难以触及，但其中蕴含的科学思维和物理图景与高中物理深度契合：

- 知识背景：从万有引力到大爆炸：**高中学习了 $F=G\frac{m_1 m_2}{r^2}$ 描述星体运动。而文献 [7][8][9] 涉及的“暴涨理论”探讨的是宇宙极早期的加速膨胀过程。这可以类比为在一个极短时间内初速度极大的“加速运动”，解释了为什么今天的宇宙看起来如此平坦且均匀。
- 科学前沿：Planck 2018 结果：**文献 [10] 提到的 Planck 卫星数据是目前人类最精确的宇宙地图。它通过测量宇宙微波背景辐射（CMB），验证了宇宙演化的标准模型。这告诉学生：物理学不仅有理论推导，更需要极其精密的观测数据作为基石。
- 跨学科融合：量子物理与宇宙学：**文献 [13][14][15] 展示了物理学最前沿的尝试——将微观的“量子信息”与宏观的“宇宙演化”结合。高三学生在选修模块会初步接触量子概念，这里展示了量子效应如何在极早期的微小涨落中孕育出今天宇宙中的星系结构。
- 学术规范与“巨人肩膀”：**这一页密密麻麻的引用体现了科学研究的承袭性。每一项新研究（如 2023 年的论文 [11][20]）都是建立在 1970-80 年代经典理论（如 [16][17]）基础之上的。这对学生撰写科技论文或进行研究性学习有很好的示范作用：尊重原创，严谨溯源。
- 备考启示：**高考物理中的“新信息题”常以这类宇宙学发现为背景。学生需学会从复杂的名词（如“标量场”、“真空极化”）中剥离出物理本质，运用熟悉的守恒定律、运动学规律或能级跃迁等基础知识去破解题目中的简化模型。