宇宙的终极演化：基于ABC理论的暗能量衰减、质子衰变与热寂之下的新平衡

作者： 李志军，赵光耀

摘要：  
本文基于李志军ABC理论，提出了一个关于宇宙终极命运的完整动力学模型。核心论点为：当前由暗能量（DE）和负质量暗物质（NMDM）共同驱动的加速膨胀并非永恒。暗能量密度 并非真正的常数，而是随希格斯场 真空的量子隧穿效应而缓慢衰减。同时，正质量物质（尤其是质子）将通过新的重子数破坏过程最终衰变。我们构建了暗能量状态方程的动力学模型

和质子衰变率与宇宙年龄的关系式 。通过求解包含源项的弗里德曼方程和物质密度演化方程，我们精确计算出宇宙将在 年后进入一个膨胀几乎停滞、物质极度稀薄的”低温平衡态”，其温度仅略高于绝对零度（）。该态并非传统意义上的热寂，而是一个由量子涨落和残余的暗物质拓扑缺陷主导的、永恒且动态的量子真空。模型预言了此过程中宇宙微波背景辐射（CMB）的频率红移、各向异性衰减和最终态的黑体谱形式，为在极端遥远的未来检验我们的理论提供了可想象的”观测”窗口。

关键词： ABC理论；宇宙终极命运；暗能量衰减；质子衰变；量子真空；热寂；CMB演化

1. **引言：超越热寂的宇宙图景**

标准宇宙学模型下的”热寂”结局是一个永恒膨胀、无限寒冷、所有有序结构瓦解的惰性状态。然而，在李志军ABC理论的框架下，暗能量和物质本身都是动态的场组合，它们的性质可能随宇宙年龄发生极其缓慢的变化。这为宇宙的终极命运提供了新的可能性：一个动态的、而非完全静止的最终态。

1. **理论框架：动态的暗能量与不稳定的物质**

**2.1 暗能量的动力学模型**

我们提出，暗能量并非真正的宇宙学常数，而是与希格斯场 真空的势能 相关联。该势能存在一个亚稳态的假真空，其可通过量子隧穿效应向真真空跃迁。

暗能量状态方程的参数化：

其中 是尺度因子（当前 ）， 是一个小的正参数（例如 ），表示暗能量会极其缓慢地变得”不那么像”宇宙学常数 ()。

其能量密度随尺度因子的演化方程为：

当 时，， 的衰减速度略快于常数情况。

**2.2 质子衰变的新机制**

在ABC理论中，重子数守恒可能并非绝对。我们提出一个通过量子引力效应或与暗物质 sector 的相互作用导致的重子数破坏项：

其中 是夸克场， 是暗物质场。该有效项可导致质子衰变，如 （其中 是某种暗物质粒子）。

质子寿命 可估算为：

通过调节耦合常数 ，可以使质子寿命与宇宙演化的时间尺度（ 年）相匹配。

1. **宇宙学演化方程的修订与求解**

**3.1 修订的弗里德曼方程**

包含动态暗能量和物质衰变的弗里德曼方程变为：

其中 是物质（重子）的衰变率，。

**3.2 长期演化数值解**

我们通过数值积分上述方程，得到了宇宙尺度因子 在极端时间尺度下的演化行为。

结果：

1. 加速膨胀减缓 (）：由于暗能量密度缓慢衰减，膨胀的加速度逐渐减小。
2. 膨胀停滞 (）：哈勃参数 降至极低值，宇宙进入一个近静态的、指数级缓慢膨胀的状态，，其中 。
3. 物质密度指数衰减 (）：质子衰变主导，物质密度 几乎降至零。
4. **宇宙微波背景辐射的终极命运**

CMB光子将忠实地记录宇宙的整个演化历史，直至最终态。

**4.1 频率的红移与冷却**

CMB温度随宇宙膨胀红移：

其中 。当宇宙尺度因子 趋于无穷大时，。然而，由于宇宙膨胀在 年后近乎停滞 ()，CMB温度将趋近于一个非零的极小值：

这意味着宇宙不会达到绝对的”热”寂 ()，而是会稳定在一个极低温状态。

**4.2 各向异性的衰减与均质化**

CMB的各向异性 源于宇宙早期的密度扰动。在宇宙近乎停滞膨胀后，光子不再经历显著的红移，CMB的图案将被”冻结”。然而，由于质子衰变等过程，散射源最终会消失，最后一批CMB光子将自由传播直至永恒，其各向异性图案将成为宇宙早期状态的永恒化石。

**4.3 光谱的最终形式**

即使到了 年，残余的CMB光子仍将保持其完美的黑体谱形状，因为宇宙已达到全局热平衡。其峰值波长将位于：

这束波长极长、温度极低的黑体辐射将是可观测宇宙存在的最后遗迹。

1. **宇宙的最终态：量子真空与拓扑涨落**

当物质几乎全部衰变，膨胀近乎停止后，宇宙并非空无一物。

1. 残余的暗物质拓扑结构：负质量暗物质可能形成稳定的拓扑缺陷（如暗弦、暗畴壁），这些结构由于其拓扑保护，几乎可以永恒存在。
2. 量子真空涨落：真空本身并非绝对空虚。量子涨落（如虚粒子对的产生和湮灭）将持续发生，成为宇宙中最后的”活动”。
3. 极低能的宇宙学现象：在 的温度下，任何残留粒子（如电子、光子）的热德布罗意波长将达到天文尺度（），量子效应将主导宇宙的最大尺度。

因此，宇宙的最终态是一个”量子真空海”，其中点缀着一些永恒的暗物质拓扑缺陷，并弥漫着一种温度极低、波长极长的化石黑体辐射。这是一个动态的、量子化的最终态，超越了经典的热寂概念。

1. **结论与展望**

本文基于ABC理论，描绘了一幅详尽的宇宙终极命运图景：

1. 暗能量衰减：导致宇宙加速膨胀最终停止。
2. 质子衰变：导致所有物质结构在极端时间尺度上瓦解。
3. 低温平衡：宇宙稳定在一个温度极低但非绝对零度的状态。
4. 量子真空：宇宙的最终态由量子涨落和拓扑缺陷主导。

**未来工作（理论上的）：**

1. 更精确地计算暗能量势能 的隧穿率。
2. 从更基本的理论推导出重子数破坏算符的具体形式。
3. 研究残余暗物质拓扑结构的稳定性和演化。

虽然这一切都发生在无法想象的遥远未来，但通过构建这样一个自洽的数学模型，我们得以从物理原理出发，理性地推断出宇宙的完整生命周期，从而更深刻地理解我们在宇宙中所处的位置和时间。

**参考文献**  
[1] Li, Z. J. (2023). The ABC Mechanism in the Universe.  
[2] Adams, F. C., & Laughlin, G. (1997). A Dying Universe: The Long-Term Fate and Evolution of Astrophysical Objects. Reviews of Modern Physics, 69(2), 337–372.  
[3] Frieman, J. A., Turner, M. S., & Huterer, D. (2008). Dark Energy and the Accelerating Universe. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 46(1), 385–432.  
[4] Weinberg, S. (1979). Cosmological Production of Baryons. Physical Review Letters, 42(13), 850–853.  
[5] Coleman, S., & De Luccia, F. (1980). Gravitational Effects on and of Vacuum Decay. Physical Review D, 21(12), 3305–3315.