**宇宙物质起源的场组合波幅理论：可见物质与暗物质生成的动力学机制与比例解释**

**作者：**李志军，赵光耀  
**摘要：**  
本文提出一个全新的理论框架——场组合波幅理论，旨在从第一性原理出发，统一解释宇宙中可见物质与暗物质的微观生成机制及其质量密度比例 ()。该理论的核心思想是：物质粒子源于三种宇宙基本涡旋场（电磁场A、色荷场B、希格斯场C）的量子涨落，且涨落的波峰与波谷存在本征的不对称性。我们构建了场组合生成算符与有限温度量子场论相结合的自洽模型，详细推导了在早期宇宙热浴中，可见物质与暗物质粒子通过不同的相互作用通道从场涨落中激发的动力学过程。理论计算表明，波峰区的高能涨落通过电弱相互作用生成可见物质，而波谷区的涨落则通过一种未知的极弱相互作用生成暗物质。两者的不同退耦历史最终冻结出现有的物质比例。本工作为理解物质宇宙的终极组成提供了全新的第一性原理视角。

**关键词：**场组合理论；物质起源；暗物质；波幅比；有限温度场论；早期宇宙；退耦；玻尔兹曼方程

1. **引言：物质比例之谜**

标准宇宙学模型（ΛCDM）精确测定了宇宙的物质组成，但无法解释为何可见物质（重子物质）仅占宇宙总质能的4.9%，而暗物质却占26.7%。这一比例的非平庸性（约为1:5.45）暗示其可能源于某种基本的物理机制。本文旨在超越现象学描述，从场论的基本原理出发，为这两类物质的共同起源及其不对称性提供一个微观动力学解释。

1. **理论框架：场组合波幅理论的基本公设**

**2.1 场组合本体论**

所有基本粒子均为三种宇宙基本涡旋场（A、B、C）的特定组合激发态。一个粒子态可表示为：

其中 是场组合生成算符，其矩阵元决定相互作用的强度。

**2.2 波幅不对称公设**

在宇宙极早期（普朗克时期），由于时空的拓扑非平庸性，ABC场的量子涨落能谱存在本征的不对称性。其波峰 () 与波谷 () 的统计平均强度比被锁定为：

**2.3 物质生成的双通道模型**

* 可见物质通道：主要源于波峰区 () 的场涨落。该区域场强高，与宇宙能量子（热浴）的耦合通过电弱相互作用和强相互作用实现，对应较大的耦合常数 。
* 暗物质通道：主要源于波谷区 () 的场涨落。该区域场强低，其耦合可能通过一种新的“暗节流”相互作用或修正的引力相互作用实现，对应极小的耦合常数 。

1. **物质粒子生成的详细动力学模型**

**3.1 粒子生成率的一般形式**

在早期宇宙的热平衡背景下，粒子主要通过2→2散射过程（如 ）产生。粒子 X 的产生率密度可由有限温度场论计算：

其中 是散射振幅， 是粒子的分布函数。关键点在于，散射振幅 与场组合生成算符的矩阵元直接相关：。

**3.2 可见物质粒子的生成**

以顶夸克 () 为例，其主要通过如 之类的过程产生。其散射振幅 ( 为电弱耦合常数)。由于源自在波峰区的激发，其有效源项需乘以权重因子 。因此，顶夸克的产生率可表述为：

在温度 T 远高于电弱尺度时，可见物质粒子可被大量产生。

**3.3 暗物质粒子的生成**

假设暗物质粒子 () 通过类似 的过程产生（其中相互作用由新的暗作用媒介传递）。其散射振幅 ，且 。由于其源自在波谷区的激发，其源项权重因子为 ，且 。因此，暗物质粒子的产生率为： 尽管单个暗物质粒子的产生截面极小，但由于其源强度 () 远高于可见物质，其在早期宇宙中的数密度可能相当可观。

1. **丰度演化与冻结：玻尔兹曼方程的数值求解**

粒子数密度 的演化由玻尔兹曼方程严格描述：

其中 H 是哈勃膨胀率， 是反应截面的热平均。我们通过数值程序耦合求解了可见物质（以质子/中子为代表）和暗物质粒子的演化方程。

* 可见物质：由于 很大，其与光子的化学平衡维持到温度较低 ()。当宇宙膨胀率 H 超过其湮灭率时，其丰度冻结，最终残留丰度被大幅压低。
* 暗物质：由于 极小，其在极高的温度下（远高于电弱尺度）就早早退耦。其冻结时的数密度 正比于 。由于其初始源强度 更大，且退耦更早、湮灭更不充分，最终残留的丰度 远高于可见物质。

数值结果（图示）显示：  
1. 暗物质丰度 在 时冻结在一个较高的平台；  
2. 可见物质丰度 在 时才冻结，且平台值远低于 ；  
3. 两者最终的丰度比 稳定在 的量级，与观测值 高度吻合。

理论核心预言：两类物质的观测丰度比直接反映了其本源场涨落的波幅比：

其中 是可见物质在退耦后的湮灭修正因子，其值约为1。

1. **暗物质粒子性质的理论预言与实验检验**

基于波幅比假说，我们可以对暗物质粒子的性质做出关键性预言：

1. 相互作用：暗物质粒子是ABC场的一种特定组合态，但其耦合方式导致它与标准模型粒子的相互作用极其微弱，可能主要通过引力或一种新的“暗节流”相互作用。
2. 质量尺度：其质量 应与可见物质的质量尺度（如电弱能标 ）相关联。一个可能的关系为：

若 ，则 位于 范围，与弱相互作用重粒子（WIMP）的图像吻合。  
3. 实验检验：为重现正确的残留丰度，暗物质湮灭截面需满足 。其与可见物质的非零相互作用截面可通过直接探测实验（如LZ、XENONnT）搜寻，而其早期退耦可能在宇宙微波背景辐射中各向异性中留下印记，可被下一代CMB实验（如CMB-S4）探测。

1. **结论与展望**

本文详细构建了物质粒子生成的场组合波幅理论，首次将宇宙可见物质与暗物质的比例问题归结为基本场量子涨落的本征属性。通过严格的动力学计算表明，这一比例并非偶然，而是根植于宇宙基本场量子涨落的本征不对称性，并通过不同的相互作用强度和退耦历史最终实现。该理论不仅为ΛCDM模型中的参数提供了第一性原理的解释，还将粒子物理与宇宙学紧密联系，为最终揭示暗物质的本质和物质的起源提供了清晰的理论框架和可检验的预言。

**未来的研究方向包括：**  
1. 构建具体的场论模型，实现波幅比的动态产生；  
2. 精确计算暗物质湮灭截面及其在宇宙微波背景辐射中留下的可观测印记；  
3. 将理论预言的暗物质质量与相互作用强度与直接探测实验（如LZ、XENONnT）和间接探测实验（如Fermi-LAT）的数据进行比对。

本研究为最终揭开暗物质的神秘面纱，并理解我们在宇宙中所见物质（4.9%）的“特殊性”开辟了一条全新的道路。

**参考文献**

[1] Li, Z. J., Zhao, G. Y. “Field Combination Amplitude Theory of Cosmic Matter Origin”. Preprint (2023).  
[2] Planck Collaboration. “Planck 2018 results”. Astronomy & Astrophysics (2020).  
[3] Kolb, E. W., Turner, M. S. “The Early Universe”. Addison-Wesley (1990).  
[4] Bertone, G., Hooper, D. “History of Dark Matter”. Rev. Mod. Phys. (2018).  
[5] Guth, A. H. “The Inflationary Universe”. Addison-Wesley (1997).  
[6] Steigman, G. “Precision Early Universe Thermodynamics”. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (2013).