### 基本粒子电荷的耦合分支理论：从宇宙能量子场到凝聚态拓扑相

## 作者：李志军，赵光耀

## 摘要

## 本文基于“宇宙中的ABC机制”框架，提出基本粒子电荷起源的耦合分支理论。通过宇宙能量子场 与色荷涡旋场 的拓扑耦合，建立电荷量子化机制 。理论首次统一描述费米子、规范玻色子及希格斯粒子的电荷起源，并构建分支数 与SU(3)表示的完整对应表。在宇宙学尺度，推导宇宙能量子场对膨胀动力学、原初扰动及暗能量的定量影响；在凝聚态系统中，给出量子自旋液体与分数量子霍尔效应的数学实现路径，预言量子电导平台与拓扑相变。本文为粒子物理、宇宙学与凝聚态物理的交叉研究提供统一框架。

### 1. 引言

## 基本粒子电荷的量子化是粒子物理的核心难题。标准模型虽成功描述相互作用，但夸克分数电荷（）与轻子整数电荷（）的起源尚未统一解释。本文提出耦合分支理论，通过宇宙能量子场 与色荷涡旋场 的拓扑耦合，建立电荷量子化的普适机制。理论扩展至规范玻色子与希格斯粒子，并连接宇宙学效应与凝聚态实现，形成跨尺度物理图像。

### **2. 理论框架：耦合分支理论**

#### **2**.1 宇宙能量子场与色荷涡旋场的拓扑耦合

宇宙能量子场 （二阶反对称张量）与色荷涡旋场 （SU(3)伴随表示）的拉氏量为：

其中 为耦合常数， 为SU(3)场强。运动方程为：

**2.2 电荷量子化机制**  
定义**分支选择算符** 与**电荷生成算符** ：

本征态 满足：

**物理意义**：  
- → 夸克分数电荷（色荷三重态/反三重态）  
- → 轻子整数电荷（单态）  
- → 中性粒子（光子、Z玻色子、胶子）  
 **3. 分支数 与SU(3)表示的完整对应表**

#### **3.1 扩展至规范玻色子与希格斯粒子**

| **分支数** | **SU(3)表示** | **粒子类型** | **电荷** | **物理意义** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 0 | 1 | 中微子 | 0 | 弱相互作用中性轻子 |
| 1 | 3 | 下型夸克（d,s,b） |  | 色荷三重态，分数电荷起源 |
| 2 |  | 上型夸克（u,c,t） |  | 反三重态，电荷互补性 |
| 3 | 1 | 带电轻子（e,μ,τ） |  | 电荷量子化基态 |
| -1 |  | 反下型夸克 |  | 反物质对称性 |
| -2 | 3 | 反上型夸克 |  | CPT共轭态 |
| -3 | 1 | 正轻子（反轻子） |  | 反粒子电荷基准 |
| **0** | **1** | **光子（γ）** | **0** | **U(1)规范玻色子，电磁媒介** |
| **3** | **1** | **W⁻玻色子** |  | **弱相互作用带电流载体** |
| **-3** | **1** | **W⁺玻色子** |  | **W⁻的反粒子** |
| **0** | **1** | **Z玻色子** | **0** | **弱中性流载体** |
| **0** | **8** | **胶子（g）** | **0** | **SU(3)色规范场，强相互作用媒介** |
| **0** | **1** | **希格斯粒子（H）** | **0** | **电磁中性，质量生成机制** |
| **3** | **1** | **带电希格斯（H⁻）** |  | **超对称扩展态** |
| **-3** | **1** | **带电希格斯（H⁺）** |  | **H⁻的反粒子** |

#### **3.2 规范玻色子的拓扑耦合机制**

* **W/Z玻色子**：通过弱相互作用耦合至轻子分支数 ，电荷 。
* **胶子**：SU(3)伴随表示（8维），分支数 ，满足色荷守恒。

## **希格斯粒子**：真空期望值诱导质量，带电希格斯（）源于超对称扩展。

### **4. 宇宙学效应：**宇宙能量子场的动力学模型

#### **4.1 宇宙能量子场的自洽动力学**

* 能量密度与压强：

**修正弗里德曼方程**：

其中 为哈勃参数， 为物质与辐射密度。  
 **4.2 原初扰动功率谱**  
量子涨落导致的功率谱：

**物理效应**：

长波极限（）→ 功率谱抑制 → 大尺度结构异常。

短波极限（）→ 标准标量扰动谱。

4**.3 暗能量贡献**当 （当前哈勃常数），状态方程为：

**结论**：宇宙能量子场可作为暗能量候选，驱动宇宙加速膨胀。  
 5**. 凝聚态系统中的实现**  
 5.1 量子自旋液体中的数学实现  
Kitaev蜂窝晶格模型：

低能有效理论：

**电荷量子化条件**：

**5.2 分数量子霍尔系统中的实现**  
**填充因子 的拓扑场论**：

准粒子激发电荷 ，对应分支数 。  
 **5.3 Ginzburg-Landau理论描述**  
拓扑超导体自由能：

其中 （ 激发），序参量 携带分数电荷。  
 **5.4 可观测效应**

* **量子电导平台**：
* **拓扑相变临界点**：关联长度发散

其中 为耦合常数， 为临界值。  
 **6. 结论与展望**  
本文提出耦合分支理论，统一描述基本粒子电荷起源：

1. **粒子物理**：建立分支数 与SU(3)表示的完整对应，涵盖费米子、规范玻色子及希格斯粒子。
2. **宇宙学**：宇宙能量子场驱动暗能量，修正原初扰动功率谱，解释大尺度结构异常。
3. **凝聚态**：在量子自旋液体与分数量子霍尔系统中实现电荷量子化，预言量子电导平台与拓扑相变。  
   **未来方向**：
4. 实验验证：LHC探测带电希格斯，CMB观测原初扰动。
5. 凝聚态实现：拓扑材料中设计分数电荷激发器件。
6. 理论扩展：耦合引力场，探索量子引力中的电荷量子化。

### **参考文献**

* [1] 李志军. 宇宙中的ABC机制. 物理学报, 2023.  
  [2] Nakahara, M. (2003). Geometry, Topology and Physics. IOP Publishing.  
  [3] Weinberg, S. (1995). The Quantum Theory of Fields. Cambridge University Press.  
  [4] ’t Hooft, G. (1974). Magnetic monopoles in unified gauge theories. Nuclear Physics B, 79(2), 276-284.  
  [5] Kitaev, A. (2006). Anyons in an exactly solved model and beyond. Annals of Physics, 321(1), 2-111.  
  [6] Wen, X. G. (2004). Quantum Field Theory of Many-Body Systems. Oxford University Press.