夸克禁闭的场组合机制：基于色荷场分支纠缠与拓扑约束的理论

作者： 李志军，赵光耀

摘要：  
本文基于李志军ABC理论，提出了一个关于夸克禁闭本质的全新阐释。核心论点为：夸克禁闭并非源于某种神秘的”禁闭力”，而是色荷涡旋场B的特定分支在强子尺度上发生拓扑纠缠与自相互作用后，所呈现出的必然的、整体的场组合状态。我们证明，单个夸克的场组合 无法作为渐近态存在，因其色荷场分支 是拓扑非平庸的，其场能密度 在空间无限远处发散。只有多个夸克的色荷场分支形成特定的整体纠缠态（如重子的 或介子的 ），才能构造出色单态，使得总色荷场在强子外部指数衰减，能量有限。我们构建了描述这一过程的色荷场分支的纠缠熵算符 ，并证明了禁闭的物理本质是色荷场分支的量子信息被局域化在强子内部，无法通过色荷流 传播到无穷远。该模型将禁闭视为一种整体性的、拓扑保护的量子现象，为理解强相互作用提供了更深刻的物理图像。

关键词： ABC理论；夸克禁闭；场组合；色单态；拓扑纠缠；量子信息局域化；色荷流

1. 引言：重新定义禁闭的物理图像

“夸克禁闭”是标准模型中最深远的问题之一。传统图像将其描述为”色力线”被挤压成”弦”并导致势能随距离线性增长 ()。然而，这种力的图像并未揭示其最本质的起源。本文基于ABC理论提出：禁闭的本质是色荷场B的量子态在强子外部存在拓扑性失稳，只有特定的多体纠缠态（色单态）才能形成稳定的、能量有限的场组合。

1. 理论框架：单个色荷场分支的拓扑非平庸性

2.1 单个夸克的场组合及其问题

一个夸克（如红色上夸克）的场组合为：

其色荷场部分 表示红色分支被激发。该激发态像一个”色荷源”，其场强在远处满足：

导致其场能：

发散！ 这意味着，一个带有非零净色荷的场组合态具有无限大的能量，在物理上是不可能稳定存在的渐近态。这就是禁闭的数学表述：非零色荷态无法被观测到。

2.2 禁闭的场组合判据

物理上允许的、能量有限的态，必须满足：

这就要求系统的总色荷为零，即整体是色单态。

1. 色单态的形成：色荷场分支的纠缠与中和

3.1 重子的色单态形成：分支的完全反对称纠缠

三个夸克（如质子uud）的原始直积态为：

该态不是色单态，其能量发散。

通过引入完全反对称纠缠（投影算符 ），我们得到物理的质子色波函数：

该态是群的单态：对于任意群元 ，有 。这意味着在强子外部，整体的色荷场激发相互抵消，场强指数衰减，能量有限。

3.2 介子的色单态形成：分支的正反中和

一个夸克-反夸克对的直积态为：

通过引入色中和纠缠（投影算符 ），得到物理的介子色波函数：

该态同样是色单态，整体无色。

1. 禁闭的动力学机制：胶子场与色荷流的角色

4.1 胶子场：色荷场分支的”粘合剂”

胶子场的组合 本身携带色荷。它们在夸克之间不断交换，其作用是维持整体色单态这一纠缠状态。

图像： 想象三个夸克，每个都试图发射带色的胶子。但胶子的发射和吸收必须使得整个系统始终处于色单态。任何试图将单个夸克拉走的操作，都会迫使连接它们的胶子场流管做出调整，消耗巨大的能量来维持整体无色性，表现为 的势能。

4.2 色荷流守恒与信息局域化

禁闭在动力学上由色流守恒保证。色流 的散度为零 。这意味着色荷无法被创造或毁灭，只能转移。

在ABC场组合理论中，这意味着色荷场分支的量子信息无法被局域化在单个夸克上。试图分离一个夸克，就是试图将编码在整体纠缠态中的色荷信息局域到一点，这需要无限的熵变 ，从信息论的角度看是不可能的。因此，色荷信息被永久地禁闭在强子内部。

1. 数学建模：色单态投影与能隙

5.1 色单态投影算符

重子的色单态投影算符为：

该算符将任何三夸克态投影到唯一的色单态上。

5.2 质量能隙的起源

禁闭意味着存在一个质量能隙 ：任何带色的激发（如一个单独的夸克）其能量至少为 ，而色单态（强子）的能量可以很低。

从场组合看，这是因为构造色单态需要特定的纠缠，而构造非单态则意味着要激发高能的色荷场模式。 本质上是色荷场B发生自相互作用并导致拓扑性稳定的特征能标。

1. 结论：禁闭作为整体性拓扑现象

本文基于ABC理论，揭示了夸克禁闭的全新物理本质：

1. 禁闭的根源： 单个色荷场分支的激发是拓扑非平庸的，其能量发散，故无法单独存在。
2. 解禁闭的条件： 只有多夸克的色荷场分支形成整体纠缠态（色单态），才能使总色荷为零，能量有限。
3. 禁闭的物理图像： 禁闭不是一种”力”，而是色荷信息无法从多体纠缠态中局域化的必然结果。强子是一个色荷信息的”黑洞”，信息无法以色荷的形式逃逸。
4. 胶子的角色： 胶子是色荷场分支的激发量子，其交换维持了整体色单态，并提供了禁闭势的线性项。

该模型将禁闭从一个唯象的力的问题，提升为一个关于量子场拓扑性与量子信息的基本物理问题，为最终理解强相互作用提供了更深刻的框架。

参考文献  
[1] Li, Z. J. (2023). The ABC Mechanism in the Universe.  
[2] Wilson, K. G. (1974). Confinement of Quarks. Physical Review D, 10(8), 2445–2459.  
[3] ’t Hooft, G. (1981). Topology of the Gauge Condition and New Confinement Phases in Non-Abelian Gauge Theories. Nuclear Physics B, 190(3), 455–478.  
[4] Nambu, Y. (1974). Strings, Monopoles, and Gauge Fields. Physical Review D, 10(12), 4262–4268.  
[5] Witten, E. (1979). Current Algebra, Baryons, and Quark Confinement. Nuclear Physics B, 160(1), 57–115.