**核力短程性的微观起源：基于场组合波动力学与胶子交换的统一模型**

**作者：** 李志军，赵光耀

**摘要：**  
本文基于李志军ABC场组合理论，提出了一个描述核力短程性问题的统一理论框架。核心论点为：核力的短程性源于其微观机制的两个本质特征：1) 核子作为复合场组合态，其内禀的夸克-胶子波函数具有强局域化分布；2) 核力通过交换胶子实现，而胶子的有效传播被限制在由核子波函数局域性所决定的临界相干长度内。 本文首先给出了核子场组合波函数 的严格数学定义及其满足的非线性耦合薛定谔-狄拉克方程。进而，通过多体波函数重叠积分与胶子传播子的量子期望值计算，严格推导出质子-中子等效相互作用势 的表达式。数学计算表明，该势是核子内禀结构与胶子传播子共同作用的卷积结果，在 时必然呈现 的短程行为，其中 。该模型首次将核子的内禀结构与相互作用的交换机制统一于波动力学的数学框架下，为核力的短程性、饱和性与交换性提供了完整而自洽的解释。

**关键词：** ABC场组合理论；核力短程性；胶子交换；非线性薛定谔-狄拉克方程；波函数重叠；传播子

1. **引言：统一框架的构建**

核力的短程性（~1 fm）是核物理学的核心问题。传统理论将其归因于介子的有限质量。本文旨在提供一个更基本、更统一的微观解释：核力的短程性，既是核子作为复合粒子其内禀波函数结构（场组合波动力学）的涌现属性，也是强相互作用力通过交换胶子这一基本过程所表现出的量子场效应。 两者统一于量子波动力学的数学框架之下。

1. **理论框架：核子的内禀结构与相互作用机制**

**2.1 核子的场组合波函数与动力学方程**

一个核子（质子或中子）的场组合态由三个涡旋场的波函数直积构成：

其中：  
\* ：电磁涡旋场（A场）的狄拉克旋量波函数，描述电荷分布与电磁相互作用。

* ：色荷涡旋场（B场）的色旋量波函数，描述色荷分布与强相互作用。
* ：希格斯涡旋场（C场）的标量波函数，描述质量密度分布。

其演化由非线性耦合薛定谔-狄拉克方程组描述：

非线性项 是色禁闭的数学根源，导致B场波函数高度局域化。

**2.2 核力作为胶子交换的量子场效应**

核力是剩余强相互作用，由核子内部夸克之间交换胶子产生。两个核子间的等效相互作用势能源于其色流-色流关联：

其中：  
\* 是核子内的夸克色流密度，其分布由核子波函数 决定。

* 是胶子传播子，在QCD真空中其自由形式为 。

1. **核力短程性的统一推导**

核力短程性是内禀结构与传播机制共同作用的必然结果。

**3.1 核子内禀结构的局域性效应**

求解动力学方程可得核子的内禀密度分布：  
\* 色荷密度分布：。

* 该强局域化分布使得色流源 被限制在~1 fm的范围内。

**3.2 胶子传播的局域性修正**

核子内稠密的色荷分布会极化其周围的QCD真空，从而修饰胶子的传播行为。有效传播子不再是自由的，其动量空间形式修正为：

其中偏振函数 反映了核子内禀结构对胶子传播的屏蔽效应。对于局域化的源，有：

这导致传播子在实空间表现为Yukawa势形式：

**3.3 卷积与短程性的严格证明**

等效势是源分布与有效传播子的卷积：

代入 和 ，通过傅里叶变换与留数定理严格计算该积分，可得：

当 时，主导项为 。核力的短程性得证。

1. **结论**

本文建立了核力短程性的统一微观模型，得出以下结论：  
1. 双重起源：核力短程性既源于核子内禀波函数的强局域性（场组合波动力学），也源于胶子在极化真空中的有限力程传播（胶子交换机制）。  
2. 数学本质：核力势是局域化源分布与Yukawa型传播子的卷积结果，其数学形式 是这种卷积的必然产物。  
3. 参数确定：特征质量 并非基本粒子质量，而是由核子的内禀尺度 通过 决定，其值恰好与 同量级。  
4. 统一框架：该模型将核子的内部结构与外部相互作用纳入统一的波动力学框架，为理解强相互作用的短程性提供了完整、自洽且深刻的物理图像。

**参考文献**[1] Li, Z.J. “On the Unified Micro-Mechanism of Nuclear Force Short-Rangeness”. Preprint (2023).  
[2] Wilson, K.G. “The renormalization group and critical phenomena”. Rev. Mod. Phys. (1983).  
[3] Weinberg, S. “Nuclear forces from chiral Lagrangians”. Phys. Lett. B (1990).  
[4] ’t Hooft, G. “On the Phase Transition Towards Permanent Quark Confinement”. Nucl. Phys. B (1978).  
[5] Machleidt, R. “The high-precision, charge-dependent Bonn nucleon-nucleon potential”. Phys. Rev. C (2001).