**电磁力长程性的光子场组合波函数机制：基于大波长相干叠加的数学模型**

**作者：** 李志军，赵光耀

**摘要：**  
本文基于李志军ABC场组合理论，提出了一个解释电磁力长程性（理论上无限作用距离）的严格波动力学模型。核心论点为：电磁力的长程性源于其传播子——光子——的场组合波函数具有极大的特征波长（理论上无限大），这使得其等效势在远距离衰减缓慢（遵循库仑定律的 形式）。 本文构建了光子场组合波函数 的数学表述，其中主导的电磁涡旋场（A场）波函数 满足无质量波动方程，其解天然支持任意大波长的平面波模式。通过计算光子传播子的量子期望值在动量空间的表达式 ，并利用留数定理进行傅里叶变换，严格推导出其在坐标空间的库仑势形式 。该模型表明，电磁力的长程性是光子无质量属性在其场组合波函数动力学上的直接体现，与短程核力形成鲜明对比。

**关键词：** ABC场组合理论；电磁力；长程力；光子场组合波函数；传播子；库仑定律

1. **引言：电磁力长程性的谜题与波函数视角**

电磁力是自然界中作用距离最长的基本力之一，其势能随距离按 衰减，这与核力的短程性（）形成鲜明对比。传统量子电动力学（QED）将其归因于光子（电磁力的传播子）的零静止质量。本文从ABC场组合理论的波函数视角出发，提出一个更深刻的观点：电磁力的长程性，本质上是其传播子——光子——的场组合波函数中，主导的电磁涡旋场（A场）分量因其无质量属性而可以存在并相干叠加任意大波长（低动量）模式，这些长波模式在远距离相互作用中贡献了主要幅值。

1. **理论框架：光子的场组合波函数与动力学**

**2.1 光子的场组合波函数定义**

在ABC理论中，光子的场组合态可表述为：

其中：  
\* 是电磁涡旋场（A场）的波函数，它是光子能量的主要载体，表现为横波，描述光子的波动性和传播。其无质量特性（）是长程力的关键。  
\* 是色荷涡旋场（B场）的基态波函数，代表光子不携带色荷（色单态）。  
\* 是希格斯涡旋场（C场）的基态波函数，代表光子的有效静质量为零（）。

由于B场和C场处于基态且能量贡献极低，光子的物理性质主要由A场波函数 决定。

**2.2 光子A场波函数的动力学方程**

光子A场的自由演化由无质量的克莱因-戈登方程（或更精确地说，由其量子场论形式）描述：

其平面波解的形式为：

其中， 是四维波矢，满足无质量色散关系 ，即 。这个关系允许波矢 取任意小的值，对应着波长 可以任意大。这是长程力的数学根源。

当存在外源电流 时，A场的演化由耦合的麦克斯韦方程描述：

其中 。

1. **电磁力作为光子交换的波函数叠加过程**

两个带电粒子（如电子）间的电磁相互作用，是通过交换虚光子来实现的。这个过程在波函数层面可以理解为：一个电子发射的虚光子场组合波函数，传播到另一个电子位置并被其吸收。所有可能动量（即所有可能波长）的虚光子模式的贡献需要被相干叠加（即积分起来）。

**3.1 光子传播子与相互作用势**

在量子场论中，两个电流之间的相互作用振幅由光子传播子的期望值给出。在动量空间，光子传播子为：

其中 。由于光子无质量（），传播子在 处存在极点。这个极点意味着在低能标（小）下，传播子的值可以非常大，使得长波（大波长）的贡献显著。

两个静止点电荷（电荷分别为 和 ）之间的相互作用势能，可以通过计算光子传播子的傅里叶变换得到。在洛伦兹规范下，静态势 与传播子的关系为：

**3.2 库仑势的严格推导（长程性的数学证明）**

计算上述积分即可得到库仑势。采用球坐标系：

简化后：

先对 积分：

代入得：

已知积分 （对于 ）。因此：

这正是库仑定律的形式，势能随 衰减，力程为无穷远。 推导过程的关键在于光子无质量，导致传播子分母为 而非 ，使得积分收敛于 形式。若光子有质量（），传播子将变为 ，积分结果将是 Yukawa 势 ，力程有限。

1. **与短程核力的对比**

为了更清晰地展示电磁力长程性的独特机制，下表将其与核力进行对比。

| **特征** | **电磁力 (长程)** | **核力 (短程)** |
| --- | --- | --- |
| 传播子 | 光子 | 介子 (主要贡献者之一) |
| 传播子静质量 |  |  |
| 场组合波函数主导场 | A场 (电磁涡旋场) | B场 (色荷涡旋场) |
| 主导场波函数特征 | 无质量，支持任意大波长模式 | 与强相互作用关联，模式受色禁闭限制，有效波长较短 |
| 传播子动量空间形式 |  |  |
| 实空间势函数 | (库仑势) | (Yukawa 势) |
| 力程 | 理论上无限远 | 有限，约 |

1. **结论**

本文基于ABC场组合理论，建立了电磁力长程性的波动力学模型，得出以下结论：  
1. 本质根源：电磁力的长程性源于其传播子（光子）的无质量属性，这允许其场组合波函数（尤其是A场波函数）中存在并相干叠加任意大波长（低动量）的模式。  
2. 数学证明：通过计算无质量光子传播子的傅里叶变换，严格推导出库仑势 ，从第一性原理证明了其长程性。  
3. 物理图像：电磁相互作用是通过交换虚光子实现的，这些虚光子的波函数包含了所有可能的波长成分。那些波长极大的成分，能够有效地连接远距离的电荷，从而使得相互作用能够延伸到很远的距离。  
4. 统一视角：该模型将光子视为一个完整的场组合态，其长程特性由A、B、C三场各自的属性和组合方式共同决定，为理解基本相互作用提供了一个统一的波函数视角。

**参考文献**[1] Li, Z.J. “On the Wave-Function Mechanism of Long-Range Electromagnetic Force”. Preprint (2023).  
[2] Peskin, M.E., Schroeder, D.V. An Introduction to Quantum Field Theory. Westview Press (1995).  
[3] Jackson, J.D. Classical Electrodynamics (3rd ed.). Wiley (1999).  
[4] ’t Hooft, G. “Gauge Theories of the Forces between Elementary Particles”. Scientific American (1980).  
[5] Feynman, R.P. “The Theory of Positrons”. Physical Review (1949).