**单光子双缝干涉的真空涨落对产生模型：外场观测导致退相干的机制**

**作者：** 李志军，赵光耀

**摘要：**  
本文提出了一个基于量子电动力学（QED）真空本质的全新理论模型，旨在诠释最纯粹条件下（无任何非线性晶体）的单光子双缝干涉现象及其退相干机制。核心论点为：观测到的单光子干涉图样，源于高能入射光子 在双缝附近的空间点，通过真空量子涨落，激发产生一个虚电子-正电子对 ，该虚对在双缝的边界条件下发生湮灭，重新转化为一对实低能光子 ；此对光子因其共同的时空起源而处于路径纠缠态，其符合计数呈现出干涉条纹。 本文构建了该过程的有效顶点算符 ，并证明了其满足所有守恒律。关键性突破在于：任何试图探测“哪个缝”的观测行为，都会向系统注入能量 ，破坏虚电子对 的精细平衡，从而切断双光子纠缠对的产生渠道，导致退相干。 该模型首次将双缝干涉与真空的动力学结构直接关联，为量子力学基础提供了源于QED的深刻见解。

**关键词：** 单光子干涉；量子电动力学（QED）；真空涨落；虚电子对；有效顶点；路径纠缠；退相干；外场扰动

1. **引言：回归真空本质的双缝干涉诠释**

单光子双缝实验是量子力学的核心谜题。现有理论均需引入外部介质（如非线性晶体）。本文旨在探索一个更基本的诠释：能否仅基于QED的真空本身来解释干涉？ 我们提出，双缝干涉的根源在于真空并非空无，而是充满虚粒子对的动态介质。干涉是入射光子与这一介质发生相互作用的结果。

1. **理论框架：基于真空涨落的双光子纠缠产生模型**

**2.1 物理图像：虚电子对的中间过程**

模型的核心物理图像如下：  
1. 入射：一个高能光子 传播至双缝附近。  
2. 涨落：在光子能量足够高 的条件下，其电磁场可强烈扰动真空，使得一个虚电子-正电子对 从真空涨落中“借”得能量 ，并在海森堡不确定性原理允许的时间 内存在。  
3. 湮灭与产生：该虚对在双缝提供的特殊边界条件下，并非简单地湮灭回真空，而是通过一个双缝诱导的相干湮灭过程，转化为两个实光子 和 ，即 。  
4. 纠缠：由于 和 来源于同一时空点（顶点）的同一过程，它们的路径信息是关联的，自动形成路径纠缠态 。

**2.2 数学表述：有效顶点与散射振幅**

该过程可由一个有效顶点描述，其相互作用拉氏量密度为：

其中 是有效耦合常数， 是电子场，、、 分别是泵浦光子和两个产生光子的电磁场。

该过程的散射振幅 正比于：

该振幅在双缝提供的特定动量传递下得以非零，从而允许此过程发生。

1. **干涉与退相干的动力学机制**

**3.1 干涉的起源：纠缠双光子的符合计数**

产生的纠缠双光子态 飞向双缝。其在屏幕上的符合计数率 (Coincidence Rate) 为：

固定一个探测器的位置 并扫描另一个 ，将得到标准的双缝干涉条纹。此即“单光子”干涉图样的真正起源。

**3.2 退相干的机制：外场能量注入与虚过程抑制**

退相干的本质在于：任何试图观测粒子路径的装置，都必然向系统注入能量 。

1. 退相干因子：外场能量的注入，破坏了虚电子对赖以存在的短暂的能量-时间不确定性关系。这等效于在散射振幅中引入一个退相干抑制因子：

其中 是虚电子对的特征存在时间。当 足够大时，。

1. 退相干后的图像：当 ，有效顶点过程 被彻底抑制。入射光子 只能以经典方式直接通过双缝，其概率分布变为：

干涉条纹完全消失。

1. **结论**

本文提出了一个基于QED真空涨落的单光子双缝干涉模型，得出以下结论：

1. 干涉新机制：“单光子”干涉图样实质上源于高能光子激发真空产生纠缠光子对的符合测量，而非同一光子同时通过双缝。
2. 退相干新诠释：“波函数坍缩”在动力学上源于外场观测的能量注入抑制了真空的虚过程，切断了纠缠对的产生渠道。
3. 理论自洽性：模型严格遵循能量、动量、电荷守恒律，且将双缝的作用定义为提供相干湮灭所需的特定边界条件。
4. 哲学突破：该模型将量子神秘性从“波粒二象性”的模糊性，成功地归结于QED真空的动力学属性，为理解量子实在提供了更坚实的物理基础。

**参考文献**[1] Li, Z.J., Zhao, G.Y. “宇宙中的ABC机制”. 预印本 (2023).  
[2] Heisenberg, W. 《量子理论的物理原理》. (1930). [不确定性原理]  
[3] Schwinger, J. “论规范不变性与真空极化”. 物理评论 (1951). [真空极化理论]  
[4] Zurek, W.H. “退相干与从量子到经典的过渡”. 《今日物理》 (1991). [退相干理论]