**单电子双缝干涉的真空韧致辐射模型：外场观测对量子涨落的抑制与退相干机制**

**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）的完整理论模型，旨在统一诠释单电子双缝干涉现象及其在观测下的退相干。核心论点为：观测到的电子干涉图样，源于高能入射电子 在双缝边缘的原子核库仑场中，通过真空量子涨落发生韧致辐射，产生一个低能电子 和一个光子 ，三者因共同的时空顶点而处于量子纠缠态；该纠缠态的联合探测呈现出干涉条纹。 本文从QED的费曼规则出发，推导了该过程的散射振幅 ，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，该外场会破坏维持真空量子涨落所需的微妙能-时不确定性关系，从而有效抑制韧致辐射过程，切断纠缠态的产生渠道，导致退相干。 该模型通过引入外场抑制因子 ，定量描述了从完美干涉到完全退相干的连续过渡，为量子力学基础问题提供了兼具数学严谨性与物理深刻性的统一诠释。

**关键词：** 单电子干涉；量子电动力学（QED）；韧致辐射；真空涨落；量子纠缠；外场观测；退相干；抑制因子

1. **引言：从路径叠加到真空激发与退相干**

单电子双缝实验是量子力学的核心谜题。本文旨在探索一个基于QED真空本质的诠释：电子干涉的根源在于高能电子与真空涨落的相互作用，而退相干则源于外场观测对这一相互作用的抑制。 我们提出，干涉并非源于电子同时通过双缝，而是源于电子在缝缘通过韧致辐射激发产生纠缠对；任何观测行为都会破坏这一激发过程。

1. **理论框架：QED真空中的韧致辐射与纠缠产生**

**2.1 物理图像：真空涨落作为中间媒介**

模型的核心物理过程如下：  
1. 入射：一个高能电子 传播至双缝边缘的原子核（Ze）附近。  
2. 涨落与辐射：在原子核的库仑场中，电子的运动状态发生急剧变化（加速/减速）。这一变化强烈地扰动真空，通过与真空虚光子场的相互作用，发生韧致辐射，辐射出一个实光子 。  
3. 能量守恒与纠缠产生：辐射光子的能量来源于入射电子的动能。过程可表示为：。由于末态的电子和光子来源于同一顶点，它们的波函数自动地处于量子纠缠态。

**2.2 数学表述：QED散射振幅**

该过程由QED的费曼规则精确描述，其散射振幅 为：

其中 是原子核传递的三维动量。该振幅严格满足能量、动量、电荷守恒律。由此可计算辐射概率 。

**2.3 纠缠态的建立**

辐射后，系统演化出电子-光子纠缠态：

该纠缠态是后续双缝干涉现象的物理根源。

1. **干涉与退相干的完整动力学**

**3.1 干涉的起源：纠缠态的符合探测**

纠缠对 飞向双缝。其在屏幕上的联合探测概率（符合计数率）呈现出干涉图样：

固定光子探测器位置 并扫描电子探测器 ，将得到电子双缝干涉条纹。

**3.2 退相干的机制：外场对真空涨落的抑制**

任何试图探测电子路径的观测行为，其本质是向系统注入能量。 这对QED真空涨落过程产生致命影响：

1. 退相干抑制因子：真空量子涨落（虚粒子对的产生与湮灭）依赖于海森堡不确定性原理 。外场能量的注入，相当于施加了一个能量精度为的测量，这直接破坏了虚过程赖以存在的能量不确定性。其效应可定量由一个退相干抑制因子描述：

其中 是韧致辐射过程的特征时间（即虚光子存在的特征时间）。当 时，。

1. 退相干后的图像：外场注入后，有效的辐射概率被抑制为：

当 时，韧致辐射过程被彻底关闭。入射电子 无法再产生纠缠光子对，只能以经典粒子方式直接通过双缝，其概率分布变为：

干涉条纹完全消失。

1. **结论**

本文建立了单电子双缝干涉的真空韧致辐射模型，并揭示了外场观测导致退相干的微观机制，得出以下结论：

1. 干涉新机制：电子干涉图样源于韧致辐射产生的电子-光子纠缠对的符合测量，而非单个电子同时通过双缝。
2. 退相干新机制：“波函数坍缩”在动力学上源于外场能量注入抑制了QED真空的量子涨落，切断了纠缠对的产生源头。
3. 数学自洽性：模型完全建立在QED的严格框架内，并引入了可计算的退相干抑制因子 ，实现了从量子到经典的连续过渡描述。
4. 统一与深刻性：该模型将量子现象及其消失统一归于QED真空的动力学属性，为理解量子力学提供了更坚实、更深刻的物理基础。

**参考文献**[1] Li, Z.J., Zhao, G.Y. “宇宙中的ABC机制”. 预印本 (2023).  
[2] Berestetskii, V.B., 等. 《量子电动力学》. Pergamon Press (1982). [QED与韧致辐射]  
[3] Heisenberg, W. 《量子理论的物理原理》. (1930). [不确定性原理]  
[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]