arXiv:2601.00722v1 [hep-ph] 2 Jan 2026

量子比特与真空振幅 *

Germán Rodrigo

西班牙瓦伦西亚帕特纳市 Parc Científic，邮编 E-46980，粒子物理研究所（Institutode F´ısica Corpuscular），瓦伦西亚大学（Universitat de Val`encia）—西班牙国家研究委员会（Consejo Superior de Investigaciones Cient´ıficas）。

收稿日期：*2026*年*1*月*2*日

高能对撞机，例如欧洲核子研究中心的大型强子对撞机（LHC），本质上是量子机器。因此，秉承理查德·费曼最初提出量子计算的动机，在那里发生的散射过程天然适合在量子系统上进行模拟。潜在应用包括：用于对撞机数据分析的量子机器学习方法、更快速且更精确地计算复杂的多圈费曼图、更高效的喷注聚类、改进部分子簇射模拟，以及许多其他任务。本文将重点探讨两项具体应用：首先，识别多圈真空振幅的因果结构，这是圈树对偶的关键要素，并且与图论有着深刻联系；其次，对高维函数进行积分和采样。后者是实现能够在高微扰阶运行的成熟量子事件生成器的第一步。

1. 引言

高能物理正迈入一个实验精度前所未有的时代。欧洲核子研究中心大型强子对撞机（HL-LHC）的高亮度阶段即将到来，这将使我们能够以惊人的精度测量基本粒子的基本性质，例如希格斯玻色子的耦合。如此迅速的进步要求理论物理学界采取战略行动，以相应的速度提升理论预言水平。理论与实验之间的精度差距并非遥远的隐忧，而是迫在眉睫的挑战。ATLAS实验和CMS实验对HL-LHC的预测表明，对于若干关键测量，理论预言的不确定度将占总不确定度的重要部分，甚至可能是其中的主要部分。

* 发表于“物质至深处：基本相互作用物理学的最新进展”第四十六届国际理论物理会议，2025年9月14日至19日，波兰卡托维兹。

在确立任何关于潜在发现的可靠结论时，这种理论理解不如实验能力精确的情形是不可接受的，要求我们彻底改变生成理论预言所采用的计算技术。

大型强子对撞机等对撞机中发生的物理过程由量子场论（QFT）支配，因为粒子之间的相互作用本质上属于量子力学范畴。这为将对撞机视作量子机器提供了依据，尤其是，**大型强子对撞机是迄今建造的最大量子机器**。在这一背景下，量子计算（QC）成为开发用于对撞机物理的新算法和模拟工具最自然的框架。人们预计，许多与对撞机相关的计算本质上非常适合由量子计算机执行，而且与经典计算机相比，量子计算机有望更高效地完成这些计算。这一观点呼应了理查德·P·费曼的著名见解：自然不是经典的，见鬼；如果你想模拟自然，最好用量子方式来模拟。

利用量子场论作出理论预言时，核心计算难题是计算散射振幅。这类计算通常借助费曼图来组织；费曼图给出一种微扰展开，表示粒子可能发生相互作用的所有方式。每个费曼图或散射振幅都对应一个复杂的高维积分，其积分变量包括所有可能的中间态或虚粒子态的动量，以及末态粒子的相空间。高亮度大型强子对撞机所要求的精度，需要进行涉及多圈图和多个外部粒子的计算，因此这些积分的复杂度和维数会呈指数级增长。

2. 粒子物理学中的量子比特与因果性

支配理论计算的一项关键原则是因果性。物理过程必须符合因果性，也就是说，结果不能先于原因发生。物理上有效的过程对应于因果构型，其中没有粒子会回到过去。用费曼图的语言来说，这意味着动量流或传播路径必须满足一项特定约束：粒子不能沿着一个环形成闭合循环。在图论术语中，这些因果构型称为有向无环图（DAG）。相反，非因果的环状构型并不符合物理规律，因为它们意味着粒子返回其发射点，从而违反因果性。

散射振幅的费曼表示无需明确指定粒子的传播方向，因为其显式的洛伦兹协变性使我们能够将所有时间排序同时编码在一个紧凑的表达式中。

然而，由于这种表示包含循环构型，被积函数会出现虚假的奇点。圈-树对偶性（LTD）提供了一种解决方案：它具有显式的因果性，即只编码非循环或物理构型，因此得到的被积函数奇点更少，也更适合数值积分。一种特别有趣的策略是以真空振幅 [2, 3], 为基础进行理论计算，这样做在概念和技术层面都具有额外优势。

此时，我们引入一种**新型量子比特**：费曼传播子。费曼传播子编码了一个粒子在两个相互作用顶点之间沿两个方向传播的量子叠加态，因此可视为一个双态量子系统。用量子力学的符号表示法，可以引入如下类比：

$$G_{\mathrm{F}}(q_i) = \frac{1}{q_i^2 - m_i^2 + \imath 0} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|0\rangle + |1\rangle \right) \ , \tag{1}$$

其中， $|0\rangle$ 表示沿一个方向传播， $|1\rangle$表示沿相反方向传播。费曼图或散射振幅对应于 2^n 态的量子叠加，其中只有一部分是无环的，因而具有物理意义。分离出这些编码因果构型的无环态，可以清楚地展现因果性在 LTD 中的作用。反过来，固定传播方向后，便可在 LTD 中自举得到相应的被积函数表示。

3. 将费曼图映射为量子电路

在多圈费曼图的所有可能动量流构型中识别因果有向无环图子集这一挑战，可以重新表述为在指数规模的构型空间中进行无结构搜索问题。这使其自然适用于量子计算，具体而言，可采用基于 Grover 原理 [4, 5]的搜索算法。或者，同一问题也可以表述为最小化任务，目标是找到某个哈密顿量的基态，该哈密顿量的能量对应图中的环数。从这一角度看，可以采用变分量子本征求解器（VQE）方法 [6]。

鉴于当前量子硬件的局限，首要目标未必是在寻找具有物理意义的解方面取得显著加速，而是深入了解如何设计和优化量子预言机。基于 Grover 算法的一般工作流程及相应的量子电路概述如下。首先，需要一组核心量子比特，即边寄存器，其量子比特数量等于内部费曼传播子的数量。这些量子比特

被制备为 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 态的均匀叠加态，通常通过对每个量子比特施加哈达玛门来实现。在这种编码中，给定量子比特的状态 $|0\rangle$表示粒子沿预定方向在两个相互作用顶点之间传播，而状态 $|1\rangle$ 则表示粒子沿相反方向传播。

预言机的目标是通过应用条件相位翻转，在不改变量子比特底层概率分布的情况下，标记边寄存器中对应于有效有向无环图配置的纠缠态。这种标记可能需要额外的辅助量子比特来存储中间结果，或对边赋值进行算术和逻辑检查。预言机标记因果态后，将应用扩散算子。该算子在希尔伯特空间中执行变换，放大已标记态的概率幅，同时抑制未标记态的概率幅，从而使对边寄存器中量子比特的测量以更高概率选出一个有向无环图态。重复这一过程即可识别所有有向无环图配置。

参考文献 [7] 在预言机设计方面引入了一项重要创新，该预言机由多重受控托福利门构成。这种门作用于多个控制量子比特。如果所有控制量子比特都处于相同状态，即 $|1\rangle$ 态，它就会通过施加 X 门来翻转目标量子比特的状态；否则，目标量子比特的状态保持不变。换言之，费曼图中的环等价于多重受控托福利门，因为当且仅当所有相关传播子都朝同一方向定向时，所有控制量子比特才处于 $|1\rangle$ 态。除了为量子计算与费曼图之间的对应关系增添了一个有趣的新例子外，这种预言机构造还显著降低了某些类别图形的实现成本，大幅缩短了在量子模拟器上的实际运行时间，并有望在量子硬件上实现这一改进。

4. 使用图论原理优化预言机

基于格罗弗算法的搜索效率在很大程度上取决于其预言机的资源需求。通过应用图论原理来优化预言机的设计，可以实现重大改进 [8]。关键洞见在于分析不同环子句之间的关系，即定义一个环的各项条件，并确定哪些环子句彼此互斥。由此构建互斥子句（MEC）图，而优化预言机的问题随之转化为寻找最小团划分（MCP），即寻找覆盖 MEC 图中所有顶点所需的最少数量的完全连接子图（团）。

这种优化的效果是显著减少所需辅助量子比特的数

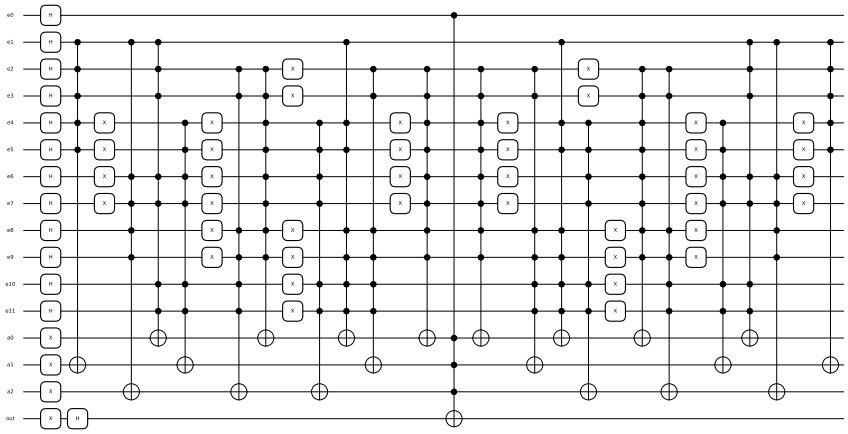


图1. 含有12个传播子的三圈拓扑的最优量子预言机，以量子比特 e_0 至 e_{11}表示。只需3个辅助量子比特（a_0 至 a_2）。

量。由于单个团中的所有子句都互斥，因此可以用一个辅助量子比特存储相关信息，而不必为每个子句各用一个量子比特。以一个三圈示例（图1）为例，这种方法将所需辅助量子比特的数量从7个减少到仅3个。辅助量子比特需求的减少，可能是让近程噪声中等规模量子（NISQ）设备能够分析具有物理意义的多圈图的关键一步。

将量子搜索的强大能力与复杂的图论优化相结合，可以设计出所需资源显著更少的高效量子预言机。这种方法使高阶计算中物理相关构型的识别成为可行的问题，为后续积分奠定了基础。

5. 散射振幅的量子积分

确定费曼图或散射振幅的因果构型后，下一个主要的计算难题便是求解相关的多维积分，尤其是在 LTD 中：多圈振幅被重新表述为性质良好且明确具有因果性的被积函数表示，特别适合采用经典和量子数值技术。针对这一挑战，已开发出两种新颖的量子算法：QFIAE [9]和 QAIS [10]。其他量子积分方法包括 [11, 12, 13, 14]。

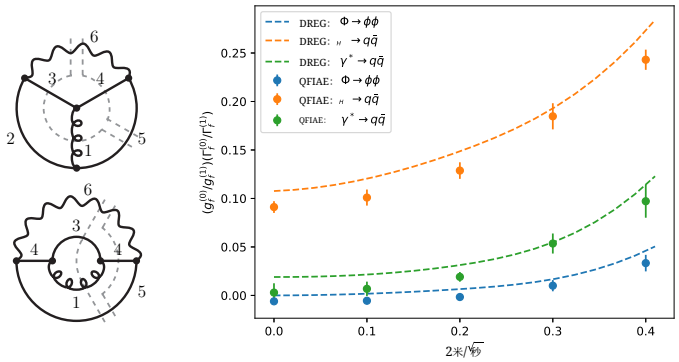


图2. 在 NLO 阶下，对衰变率 $\gamma^* \to q\bar{q}(g)$ 有贡献的真空图（左），以及使用 QFIAE 在量子硬件上进行部分计算后，积分结果随夸克质量变化的关系（右）。

5.1. 量子傅里叶迭代振幅估计（*QFIAE*）

QFIAE [9] 方法是一种将量子机器学习（QML）与量子振幅估计（QAE）相结合的混合方法。该过程包含两个主要步骤：1）首先训练量子神经网络（QNN），使其学习目标被积函数紧凑且准确的傅里叶级数表示。此步骤能有效地将一个可能较复杂的函数转换为若干较简单的三角函数分量之和。2）使用迭代量子振幅估计（IQAE） [15]算法——一种强大的Grover算法变体——对所学习傅里叶级数中的每个三角函数分量进行积分。最终积分为各个结果之和。

该方法已成功应用于计算费曼积分 [16] 以及多个物理过程的次领头阶（NLO）衰变率 [17], ，其中使用 LTD 中的真空振幅作为圈图和树级贡献的核。量子模拟器的结果与成熟的 DREG 方法高度吻合，验证了 QFIAE 方法。尽管硬件上的结果（图2）显示了当前设备噪声的影响，但它们证明了该算法在真实量子处理器上具有根本可行性。

5.2. 量子自适应重要性采样（*QAIS*）

经典的蒙特卡罗积分工具通常采用自适应重要性采样方法来提高效率，其中 VEGAS [18, 19, 20]最为突出且应用最广。然而，这些算法存在一个关键局限：

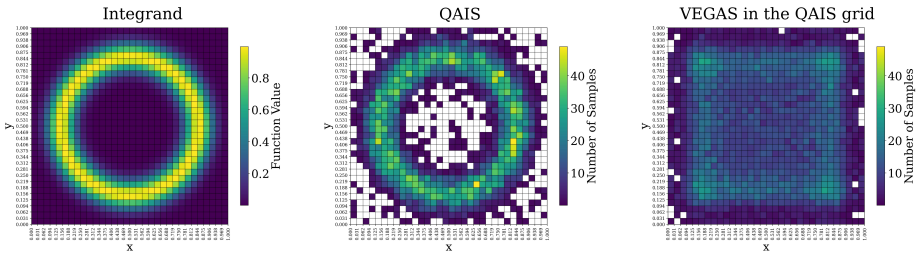


图3. 环形二维被积函数，以及 QAIS 和 VEGAS 中对应的概率密度函数。

由于积分网格的复杂度会随维数呈指数级增长，它们只能使用可分离网格；对于具有复杂相关结构且相关区域未与坐标轴对齐的被积函数，这种网格表现不佳（图3），往往会产生幻影峰，即过度采样但实际贡献很小的区域。

量子自适应重要性采样（QAIS）算法 [10] 专为克服这一局限而设计。在这种复杂度呈指数增长的情形下，量子计算方法有望带来真正的量子优势，尤其适用于超高维积分。QAIS 利用参数化量子电路（PQC）定义不可分离的提议概率密度函数（PDF），并对其进行训练，使其逼近目标被积函数，无论目标被积函数的复杂程度如何。这样，QAIS 就能将 PQC 测量次数集中在积分域中最相关的区域，从而最大限度地提高采样效率，大幅减少达到给定精度所需的函数评估次数，并自然适应可分离网格无法捕捉的相关结构。QAIS 还包含一个平铺组件，用于校正有限的测量次数导致 PQC 仅对完整积分域中受限区域进行采样时可能产生的偏差。该机制系统地覆盖网格中的其余区域，在保留学习得到的概率密度函数所带来的采样效率优势的同时，确保估计量无偏。

例如，通过比较 QAIS 与 VEGAS 在维度逐渐增加的多峰基准积分上的表现，以及它们在单圈五边形费曼积分上的表现（该积分在 LTD 中为三维），可以证明 QAIS 具有良好的扩展性。对于相同的测量次数，QAIS 始终能达到更低的不确定度，而且随着维度增加，性能差距也会逐渐扩大。

6. 结论

高能对撞机是真正的量子机器，其中的粒子相互作用受量子场论的概率性和复杂规律支配。因此，对撞机是设计和评估量子计算算法的自然且极具吸引力的领域。因果性是物理学的一项基本原理；在费曼图的语境中，它决定虚粒子在物理上有效的传播方向。用图论术语来说，物理构型对应于有向无环图。粒子物理学与量子计算之间存在一种对应关系：费曼传播子映射为量子比特，循环构型映射为多重受控托福利门。这一类比使得开发新的量子计算算法成为可能，并为利用图论概念优化量子电路设计提供了框架。我们开发并验证了两种量子积分算法 QFIAE 和 QAIS，它们都是应对高能物理中具有挑战性的多维积分的有效而强大的工具。尤其是 QAIS，凭借其捕捉高度相关被积函数的能力，以及随维度增加仍具优势的扩展性，在满足未来日益复杂的计算需求方面展现出尤为广阔的前景。

致谢

本研究得到西班牙政府和欧洲区域发展基金／欧盟—国家研究局 MCIN/AEI/10.13039/501100011033 的资助，资助项目编号为 PID2023-146220NB-I00、EUR2025-164820 和 CEX2023-001292-S；同时得到瓦伦西亚自治区政府资助，项目编号为 ASFAE/2022/009（I+D+i 补充计划，欧盟下一代）。

参考文献

[1] *M. Cepeda* 等，《第二工作组报告：高亮度大型强子对撞机和高能大型强子对撞机上的希格斯物理》，欧洲核子研究中心 *Yellow Rep. Monogr. 7 (2019) 221–584,*[1902.00134].[2] *S. Ramˊırez-Uribe, P. K. Dhani, G. F. R. Sborlini* 和 *G. Rodrigo*，《利用真空振幅重述对撞机上的理论预言》，*Phys. Rev. Lett. 133 (2024)* 211901, [2404.05491].[3] LTD 合作组，*S. Ramˊırez-Uribe* 等，《圈树对偶中的真空振幅与类时因果幺正性》，*JHEP 01 (2025) 103,*[2404.05492].[4] *L. K. Grover*，《量子力学助力从大海捞针》，*Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 325–*328, [*quant-ph/*9706033]。

[5] *S. Ramírez-Uribe, A. E. Rentería-Olivo, G. Rodrigo, G. F. R. Sborlini* 和 *L. Vale Silva*，《费曼圈积分的量子算法》，*JHEP 05 (2022)* 100, [2105.08703]. [6] *G. Clemente* 等，《用于因果圈费曼图和有向无环图的变分量子本征求解器》，*Phys. Rev. D 108 (2023) 096035*,[2210.13240].[7] *S. Ramírez-Uribe, A. E. Rentería-Olivo* 和 *G. Rodrigo*，《基于多重受控托福利门的量子查询：用于因果费曼圈构型和有向无环图》，*2404.03544*。[8] *S. A. Ochoa-Oregon, J. P. Uribe-Ramírez, R. J. Hernández-Pinto, S. Ramírez-Uribe* 和 *G. Rodrigo*，《基于图论的自动量子算法：高效查询无环与多圈因果构型》，*2508.04019*。[9] *J. J. M. de Lejarza, M. Grossi, L. Cieri* 和 *G. Rodrigo*，《量子傅里叶迭代振幅估计》，载于*2023*年量子计算与工程国际会议，电气电子工程师学会，*5*，*2023*。*2305.01686*。*DOI*。[10] *K. Pyretzidis, J. J. M. de Lejarza* 和 *G. Rodrigo*，《利用量子自适应重要性采样解锁多维积分》，*2506.19965*。[11] *H. Yi, K. Ban, M. Park* 和 *K. Kong*，《用于高效高能物理蒙特卡洛的量子积分网络》，*2510.10501*。[12] *I. Williams* 和 *M. Pellen*，《高能物理截面的量子积分通用方法》，*Quantum Sci. Technol. 10 (2025)*045017, [2502.14647].[13] *J. M. Cruz-Martinez, M. Robbiati* 和 *S. Carrazza*，《利用变分量子电路进行多变量积分》，*Quantum Sci. Technol. 9 (2024)* 035053, [2308.05657].[14] *G. Agliardi, M. Grossi, M. Pellen* 和 *E. Prati*，《基本粒子过程的量子积分》，*Phys. Lett. B 832 (2022) 137228*,[2201.01547].[15] *D. Grinko, J. Gacon, C. Zoufal* 和 *S. Woerner*，《迭代量子振幅估计》，*npj Quantum Inf. 7 (2021)* 52, [1912.05559]. [16] *J. J. M. de Lejarza, L. Cieri, M. Grossi, S. Vallecorsa* 和 *G. Rodrigo*，《量子计算机上的圈费曼积分》，*Phys. Rev. D 110 (2024)*074031, [2401.03023].[17] *J. J. M. de Lejarza, D. F. Rentería-Estrada, M. Grossi* 和 *G. Rodrigo*，《微扰理论二阶衰变率的量子积分》，*Quantum Sci. Technol. 10 (2025)* 025026, [2409.12236].[18] *G. P. Lepage*，《一种自适应多维积分新算法》，*J. Comput. Phys. 27 (1978) 192*。[19] *G. P. Lepage*，《自适应多维积分：增强型*VEGAS*》，*J. Comput. Phys. 439 (2021)* 110386, [2009.05112].[20] *T. Hahn*，《*CUBA*：多维数值积分库》，*Comput. Phys. Commun. 168 (2005) 78*–95, [*hep-ph*/0404043]。