量子计算总结

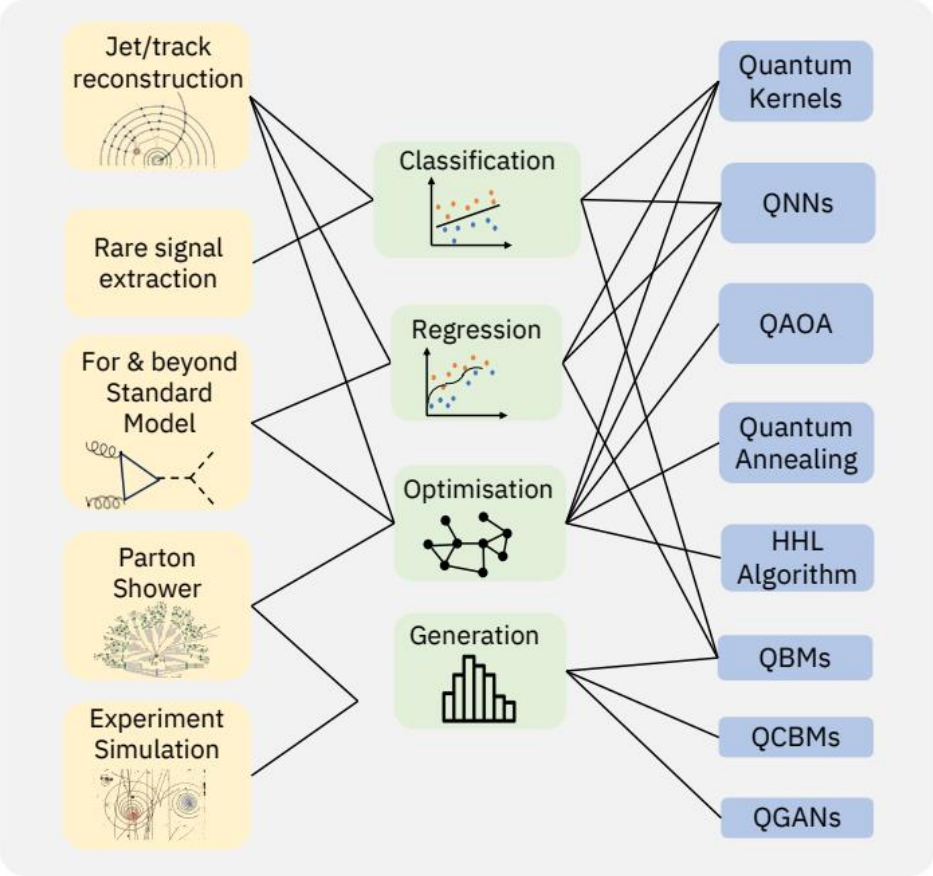
IHEP ML workshop and ML group kick-off, 2024年10月18日

大川英希

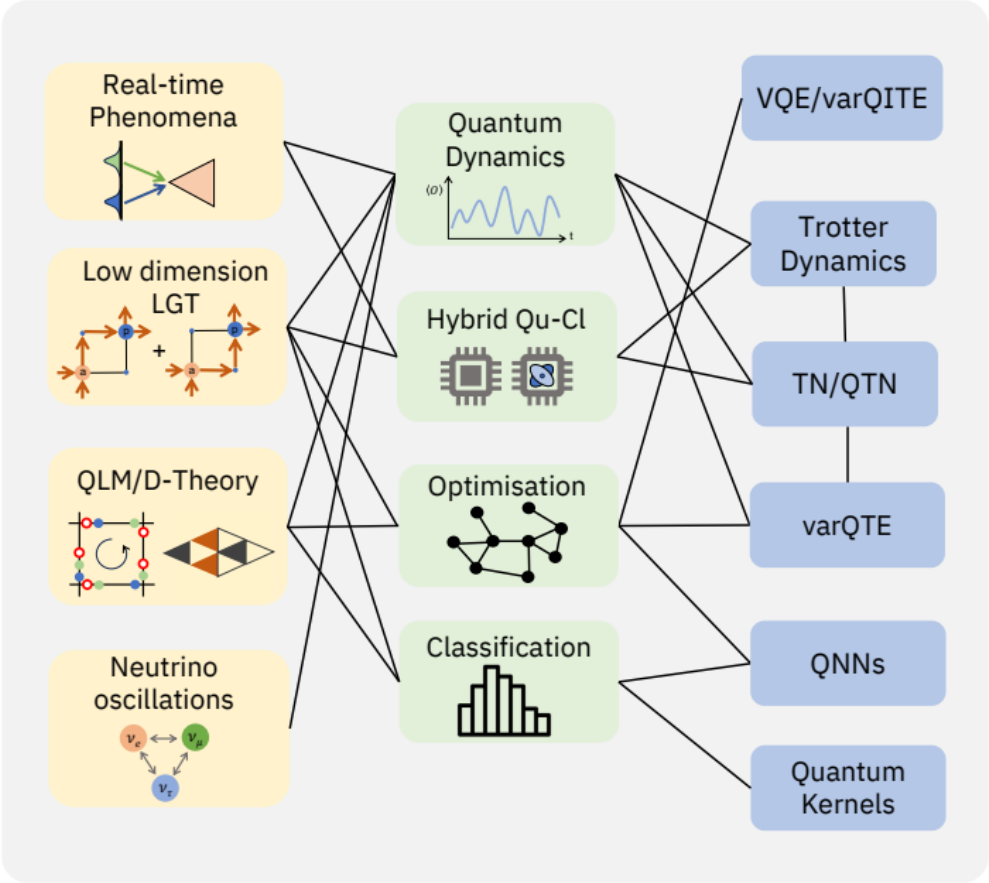
高能物理中的应用

QC4HEP Whitepaper

实验方面



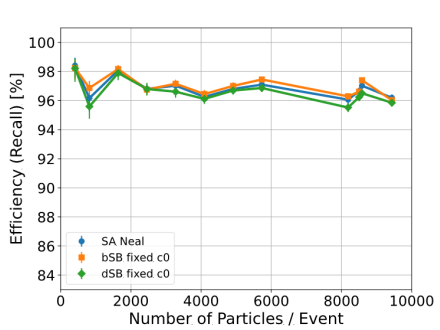
理论方面

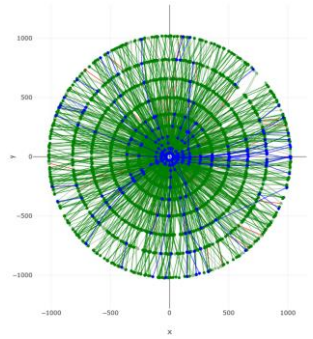


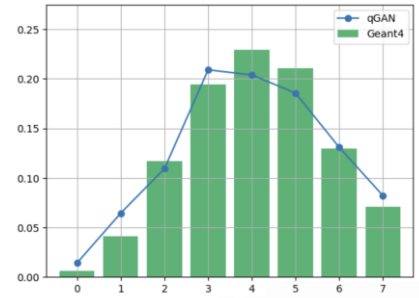
关于量子模拟还有C.W. Bauer et al., PRX Quantum 4 (2023) 2, 027001

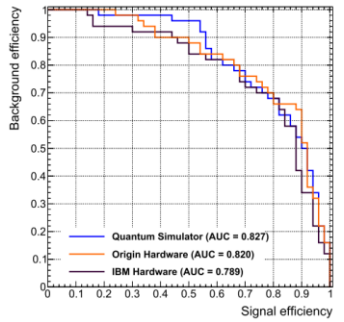
高能所的现有情况

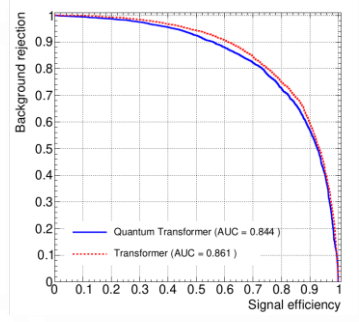
- 重建，优化：
  - 径迹重建，喷注重建
- 探测器模拟：
  - 量子生成对抗网络(Q-GAN)和量子角生成器(QAG)
- 物理分析，事例分类：
  - 量子SVM，量子transformer
  - CEPC ZH(→γγ)，BESIII PID, BESIII Zc(3900) 再发现
- 量子们设计优化
- 宇宙线对qubit阵列噪音的影响
- 量子模拟(quantum simulation)：格点QCD等
- 量子模拟器(quantum simulator)平台：计算中心的QuIHEP







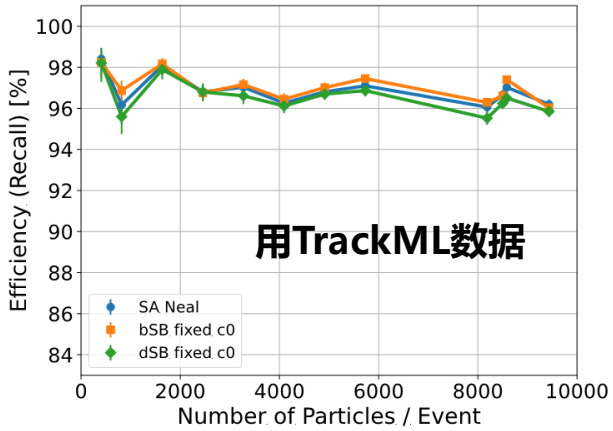


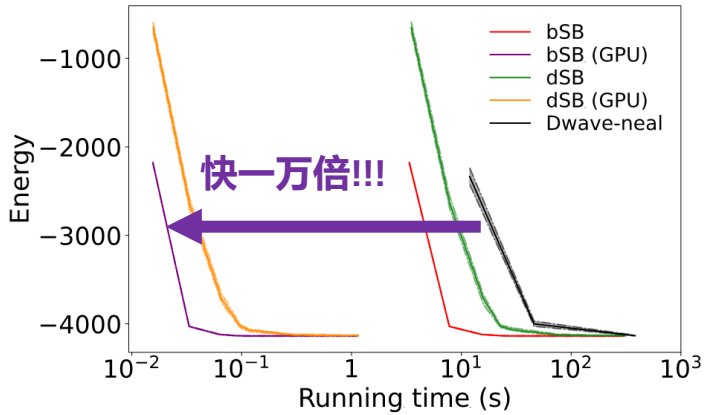


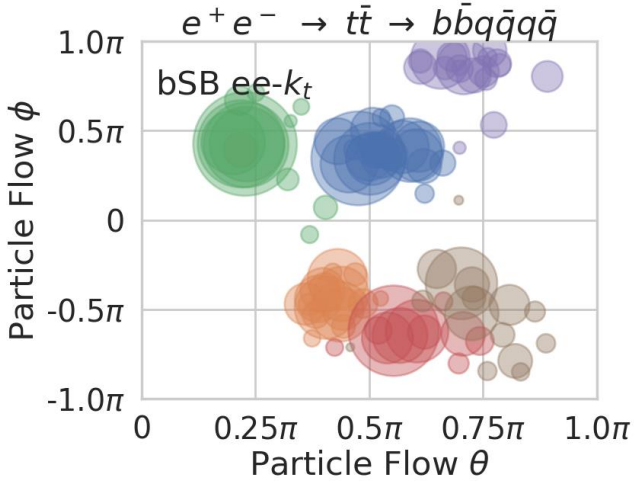
量子退火启发算法（径迹&喷注重建）

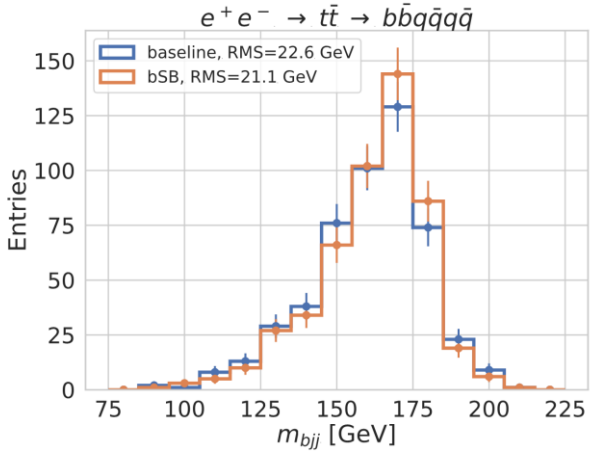
- **全球首次在高能物理中使用模拟分叉算法。**
  径迹重建性能很好(在HL-LHC最稠密条件，还保持效率>95%，纯度>85%)
- **比模拟退火算法快一万倍！这不是未来的算法，而是在正在运行的实验上就可以使用！(LHC, BESIII等)**

没有量子比特数的限制，可以处理巨大数据！



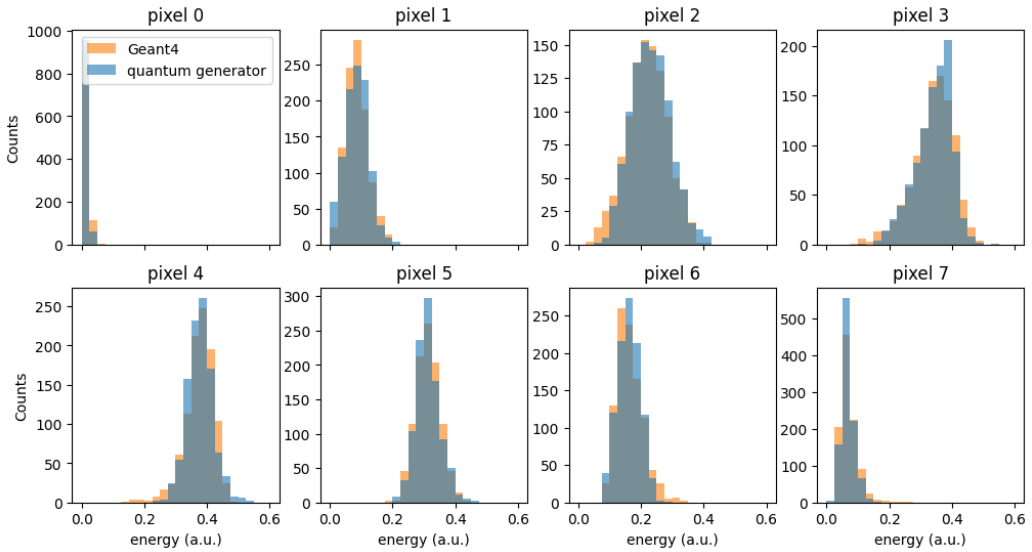


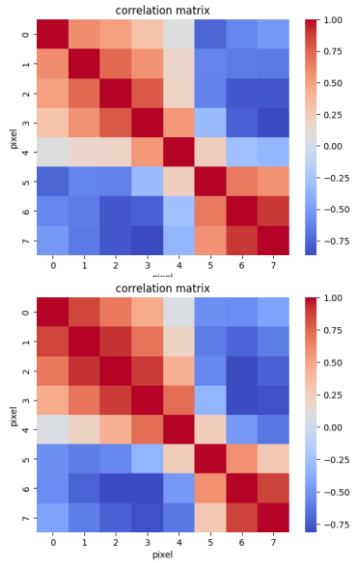




- **弹道模拟分叉算法和ee-kt距离可以解决多喷注重建！（量子退火和模拟退火不能）**
- **全球首次成功用QUBO重建多喷注事例。**
- **比FastJet质量分辨率也比较改善了。**

量能器模拟&量子们设计优化



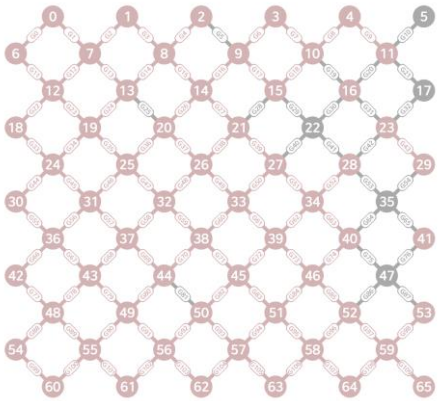


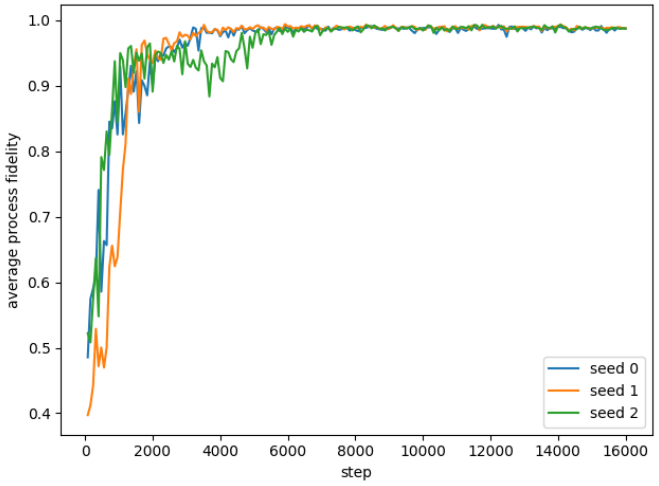
量能器模拟

- 改善了CERN和DESY开发的量子角度生成器（QAG）
- 通过数据重载提升模型的表达能力，像素点的能量沉积分布符合更好

量子们设计优化

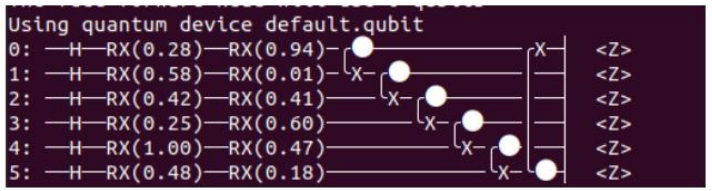
- 高保真量子门设计对各种量子技术至关重要。
- 现有的量子门设计算法主要是基于模型，但精确的模型往往不存在
- 强化学习算法并不依赖模型，适用于量子门设计。





量子Transformer

$$Attention(Q,K,V) = softmax_k(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}})V$$



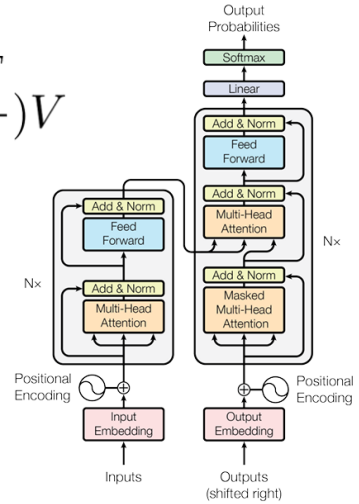
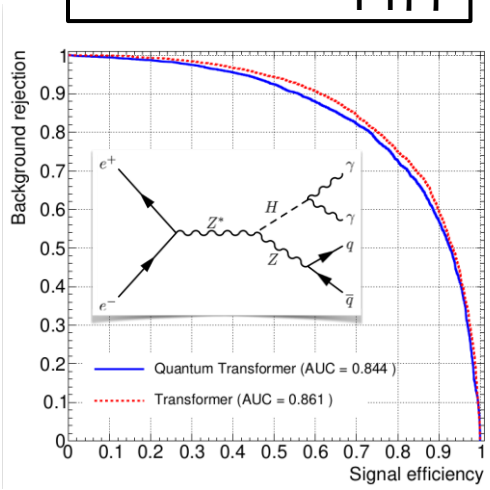


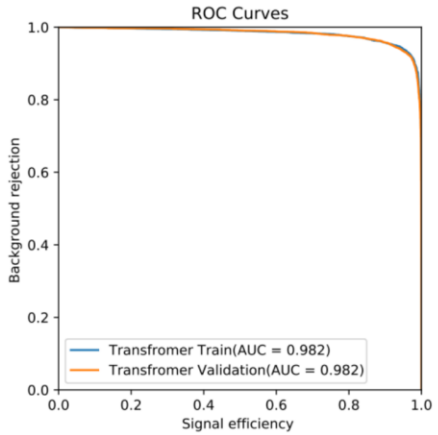
Figure 1: The Transformer - model architecture.

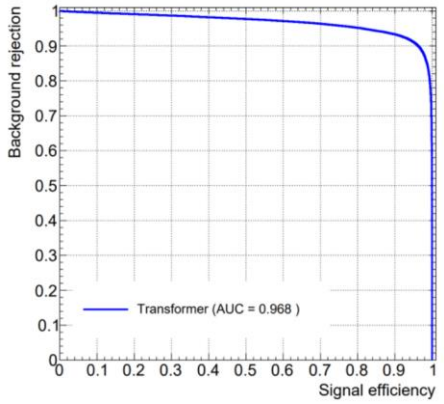
- 我们可以替换线性变换(W_Q,W_K,W_V)以及变分量子电路。
- 成功开发量子Transformer（用了量子模拟器）
- 目前经典Transformer的性能还高，而量子Transformer的运行时间很长。
- 有CEPC ZH→qqγγ和Zc(3900)再发现的初步结果。

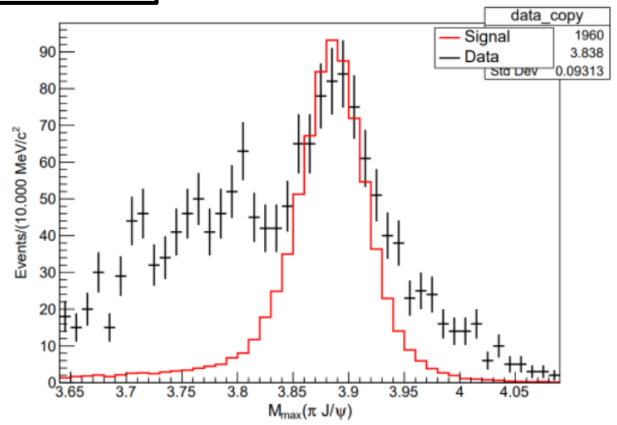
CEPC ZH→qqγγ



Zc(3900)再发现

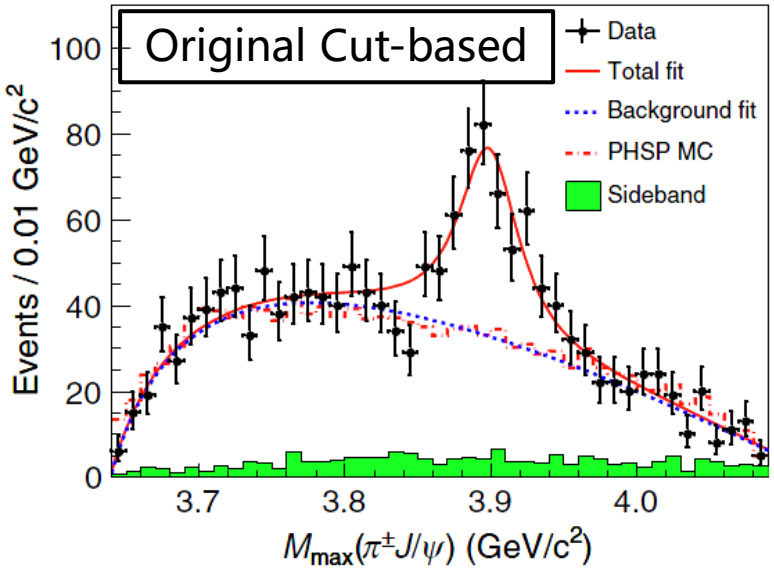


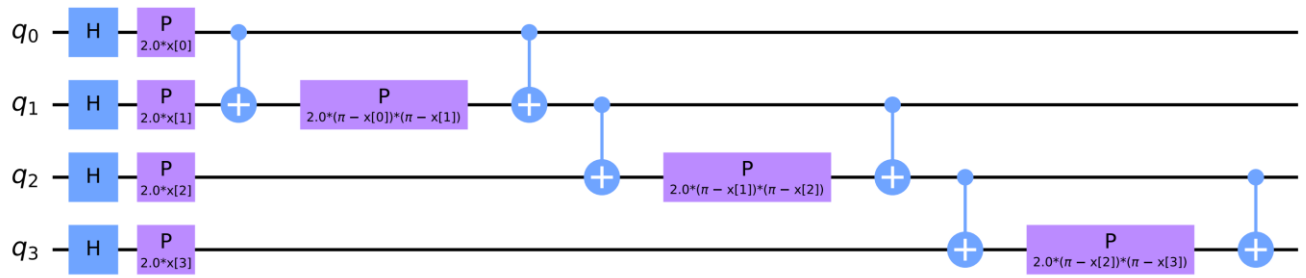




Data : 1960
Signal : 60789

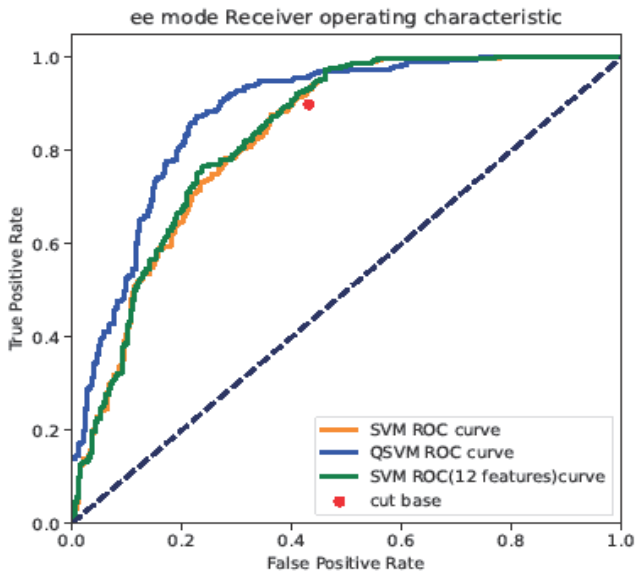
基于QSVM的BES3 Zc(3900)再发现

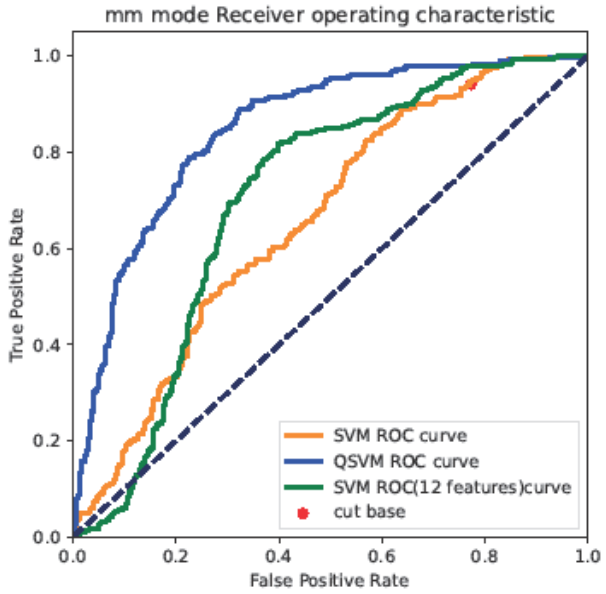




使用量子模拟器qiskit的embedded ZZFeatureMap

- 正在与BES3 Zc(3900)分析组成员沟通，打算选择更合适的训练数据集
- 要优化经典SVM为了公平比较

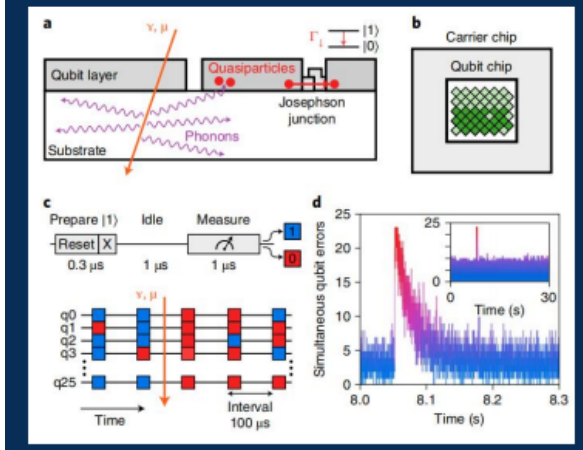




宇宙线对量子比特阵列噪音的影响

Google Sycamore

关联错误发生事件，大约10秒一次,每次持续约1毫秒,芯片尺寸：10mm*10mm

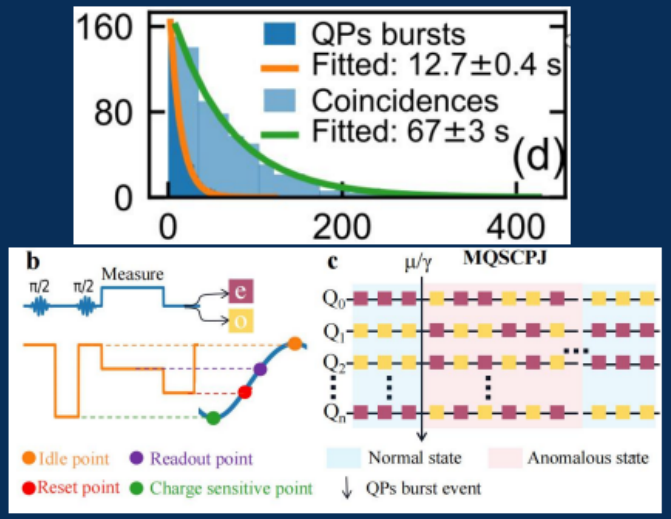


探测方法：利用多个比特状态同时翻转

McEwen, M. et al. Nature Physics 18, 107-111 (2022).

北京量子院/高能所

关联错误发生事件，总事件大约12.7秒 一次，缪子事件约67秒一次，芯片尺寸：15mm*15mm

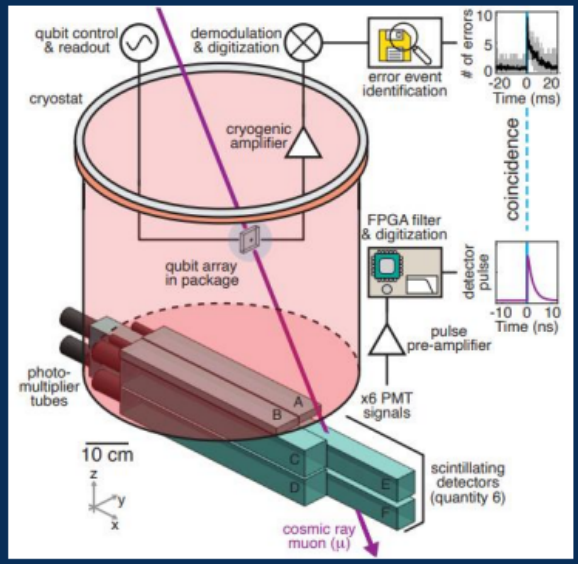


探测方法：利用多个比特电荷宇称同时翻转

Xue-Gang Li, et al., arXiv:2402.04245 (2024)

MIT group

关联错误发生事件，缪子事件约592秒一次，芯片尺寸：5mm*5mm



探测方法：利用多个比特状态同时翻转

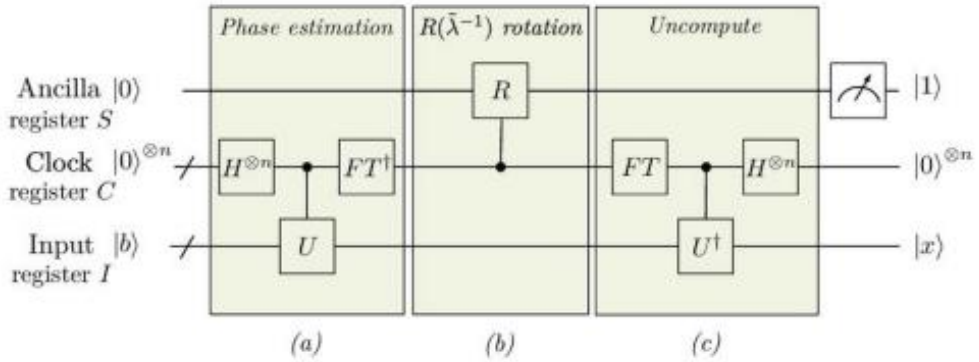
Patrick M. H., et al., arXiv:2402.03208 (2024)

格点场论

$$\langle O \rangle = \frac{1}{Z}\int \mathcal{D}U O'[U] \det M \, e^{-S_g}$$

Solve Mx=b

Hybrid Monte Carlo algorithm: most time consuming part in classical computing (~80%)



HiQuArC

CuFT

Classical high performance simulation based on Monte Carlo method

verification

CuPy

QuFT

Quantum simulation with quantum simulator and real hardware

quantum simulation

Qiskit PENNYLANE

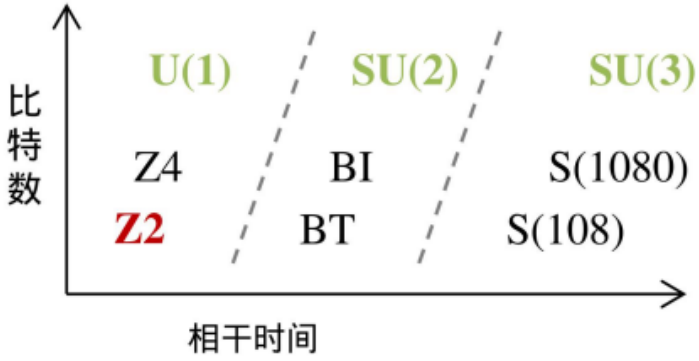
MLFT

Lattice field theory simulation based on machine learning

sampling

PyTorch

- 正在开发混合量子经典模拟。基于HHL(Harrow-Hassidim-Lloyd)算法，计算detM的部分（最耗时的）
- HiQuArC项目: 目标是开发格点场论模拟软件包。



讨论

- 国外的真实量子计算机基本上不能用。哪个国内量子计算机是免费的?
  - 北京量子院quafu（105量子比特），国盾量子骁鸿（66量子比特）。
  - 本源今年停止了免费服务。
- 宇宙线研究是全球”hot topic”
  - 美国Fermilab(加拿大SNOLAB)今年4月各自建立(批准)地下宇宙射线本底抑制实验室。
  - 北京量子院打算继续宇宙线研究和启动类似的地下测量。
  - 除了锦屏地下实验室，大亚湾也可能有用。
- 关于格点场论，理论中心和计算中心可以合作

总结

- 未来的对撞机会进入exabyte数据时代，需要巨大的计算资源。重建是最消耗计算资源的计算任务之一。
- 我们热切期待有新的数据处理方法来应对这一挑战。
- 量子机器学习还没有进入实践阶段，但量子启发算法已经开始提供创新！这两种类型的研究都必须进行。
- 量子模拟可以解决格点场论的符号问题（对模拟QCD动力学至关重要）。由于量子比特数的限制，正在进行简单的toy模型研究。
- 高能物理可以贡献量子计算机的噪声研究。
- 请期待进展！