

面相高能物理实验的量子计算进展 ----NISQ时代的方法、进展与挑战

李腾

山东大学

第十二届高能物理全国会议，广州

2026年7月16日

高能物理实验的算力困境

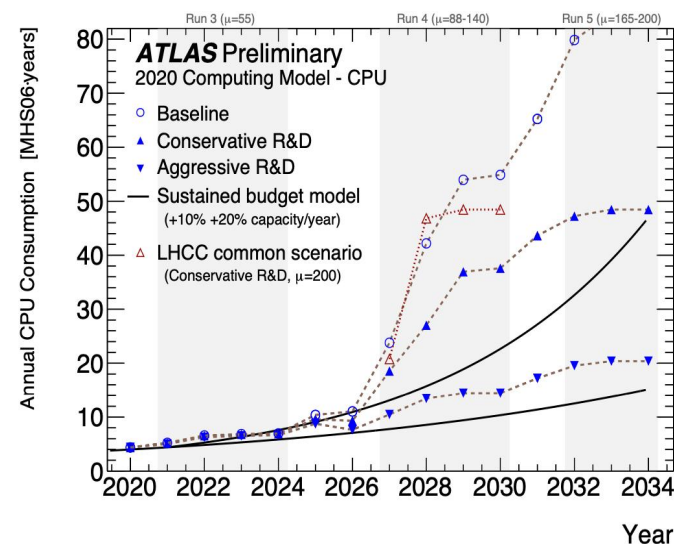
❖ 现代和未来高能物理实验的计算天花板

- HL-LHC束团对撞频率达到**40MHz**、峰值叠加碰撞可达**140-200次**
- LHC、FCC、STCF等实验年原始数据量达**百PB级**
- HL-LHC计算成本将提升**10-20倍**

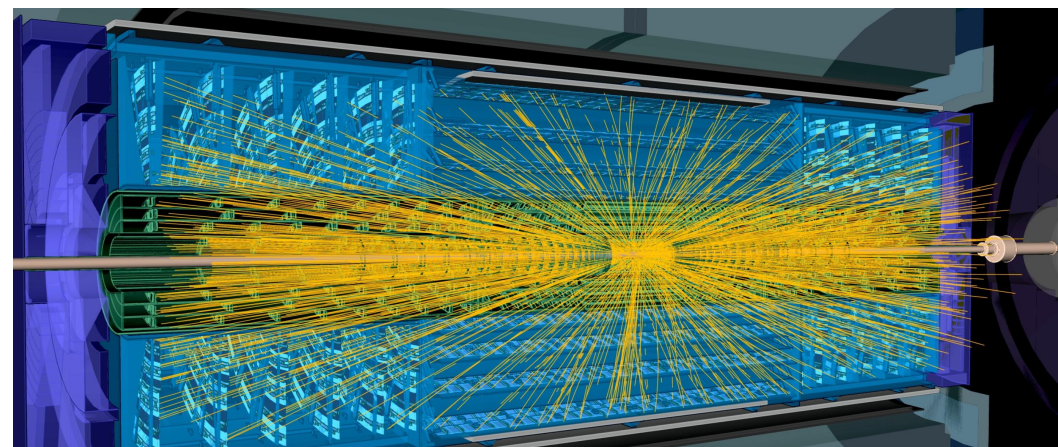
❖ 全流程计算压力：

- 触发：微秒级实时决策，需要过滤超过99.9%本底
- 探测器模拟：统计精度提升缓慢，高精度MC模拟算力消耗巨大
- （径迹）重建/模式识别：组合爆炸，经典算法耗时随事例复杂度快速增长
- 数据分析：大规模数据扫描

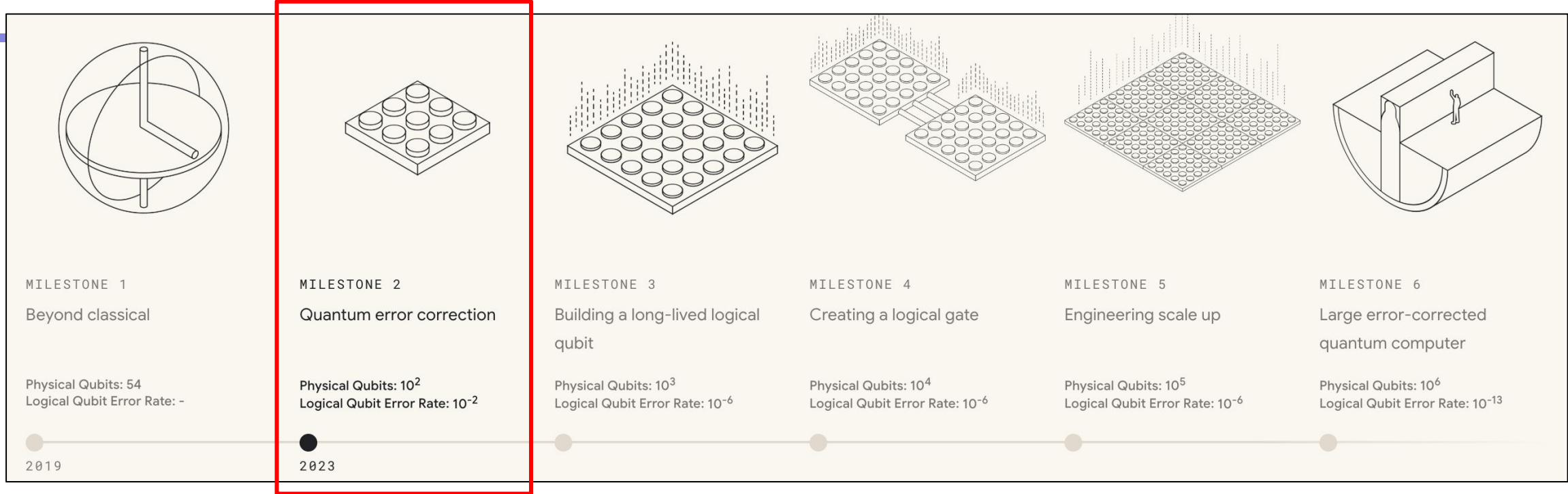
❖ 计算范式的革新将非常重要



超级陶粲装置
Super Tau-Charm Facility



量子计算：热潮与潜力



Article | Published: 23 October 2019

Quantum supremacy using a programmable superconducting processor

Frank Arute, Kunal Arya, Ryan Babbush, Dave Bacon, Joseph C. Bardin, Rami Barends, Rupak Biswas, ... David A. Buell, Brian Burkett, Yu Chen, Zijun Chen, Ben Chiaro, ... Andrew Dunsworth, Edward Farhi, Brooks Foxen, Austin Fowler, Craig Gidycz, ... John M. Martinis

谷歌2019

HOME > SCIENCE > VOL. 370, NO. 6523 > QUANTUM COMPUTATIONAL ADVANTAGE USING PHOTONS

九章2020

Quantum computational advantage using photons

HAN-SEN ZHONG, HUI WANG, YU-HAO DENG, MING-CHENG CHEN, LI-CHAO PENG, YI-HAN LUO, AND JIAN-WEI PAN, +14 authors

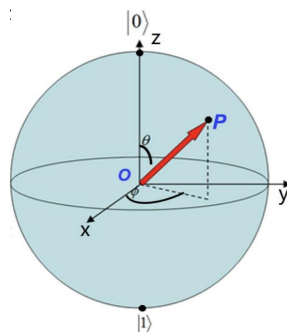
SCIENCE • 3 Dec 2020 • Vol 370, Issue 6523 • pp. 1460-1463 • DOI: 10.1126/science.abe8770

57,073 2,056

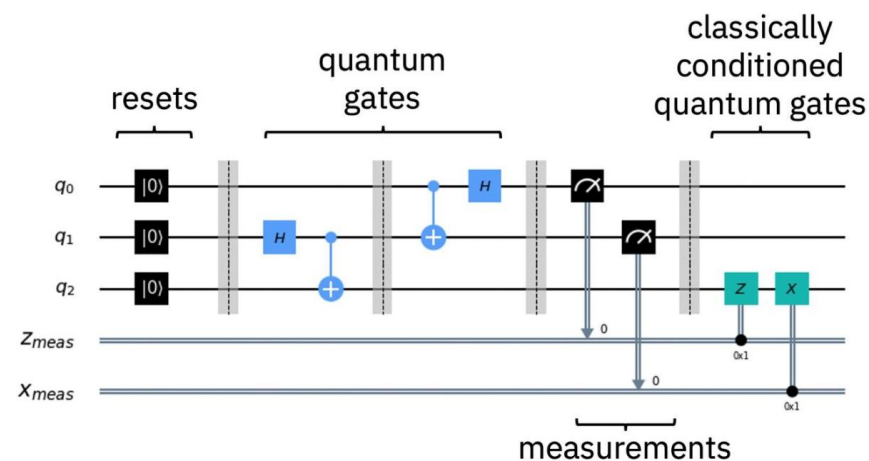
主流量子计算机

❖ 门模型量子计算（Gate-based Quantum Computing）

- 以量子比特为基本单元
- 通过基础量子门搭建量子线路
- 实现量子态么正演化
- NISQ 时代的主流研究平台
- 超导、离子阱、光量子等技术路线并存

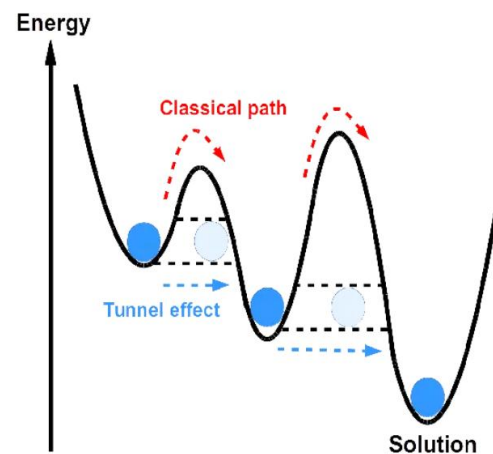


图片来自qiskit文档



❖ 量子退火（Quantum Annealing）

- 专用量子计算机，针对组合优化问题设计
- 基于量子绝热定理，系统稳定在基态，对应全局最优解
- 代表为加拿大D-Wave公司（超导量子）

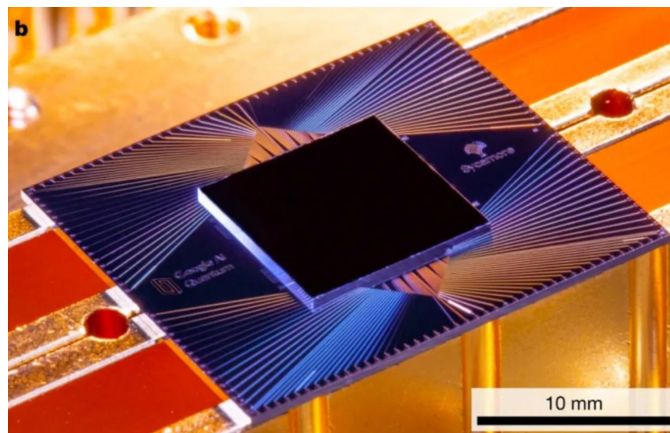


图片来自网络

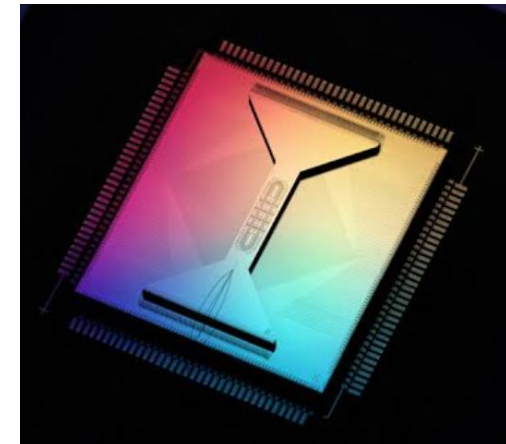
含噪声中等规模量子（NISQ）硬件



IBM鱼鹰, 1121 qubits, 2023, 超导



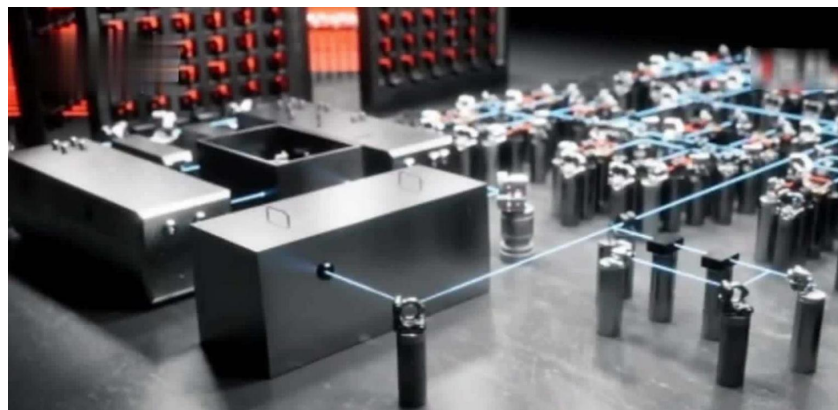
谷歌悬铃木, 53 qubits, 2019, 超导



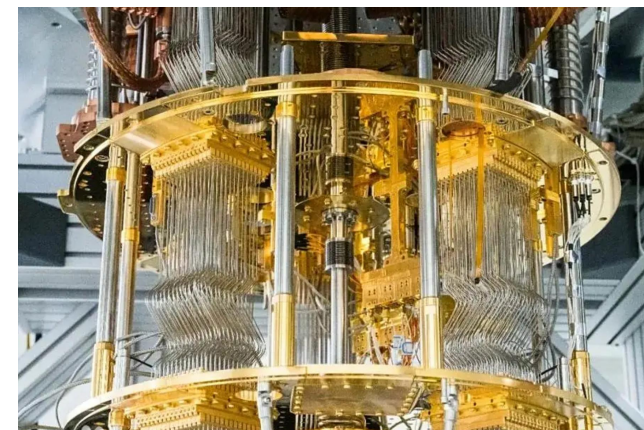
Quantinuum H2, 32 qubits, 2023, 离子阱



USTC 祖冲之三号, 105 qubits, 2025, 超导



USTC九章三号, 255 qubits, 2023, 光量子



本源悟空, 72 qubits, 2023, 超导

含噪声中等规模量子（NISQ）硬件，一般仅用于算法研究，几乎无法应用于生产系统

量子计算：高能物理的潜在新范式

❖ 量子模拟：天然适配性

- 经典计算用数值方法近似量子系统，开销巨大
- QC利用量子系统直接映射微观粒子的演化

❖ 量子计算：指数级表征能力

- N 个量子比特构建 2^N 维度希尔伯特状态空间，规模随比特数指数增长

❖ 全球逐步形成领域共识

- CERN QTI、QC4HEP工作组、美国DOE QuantISED等

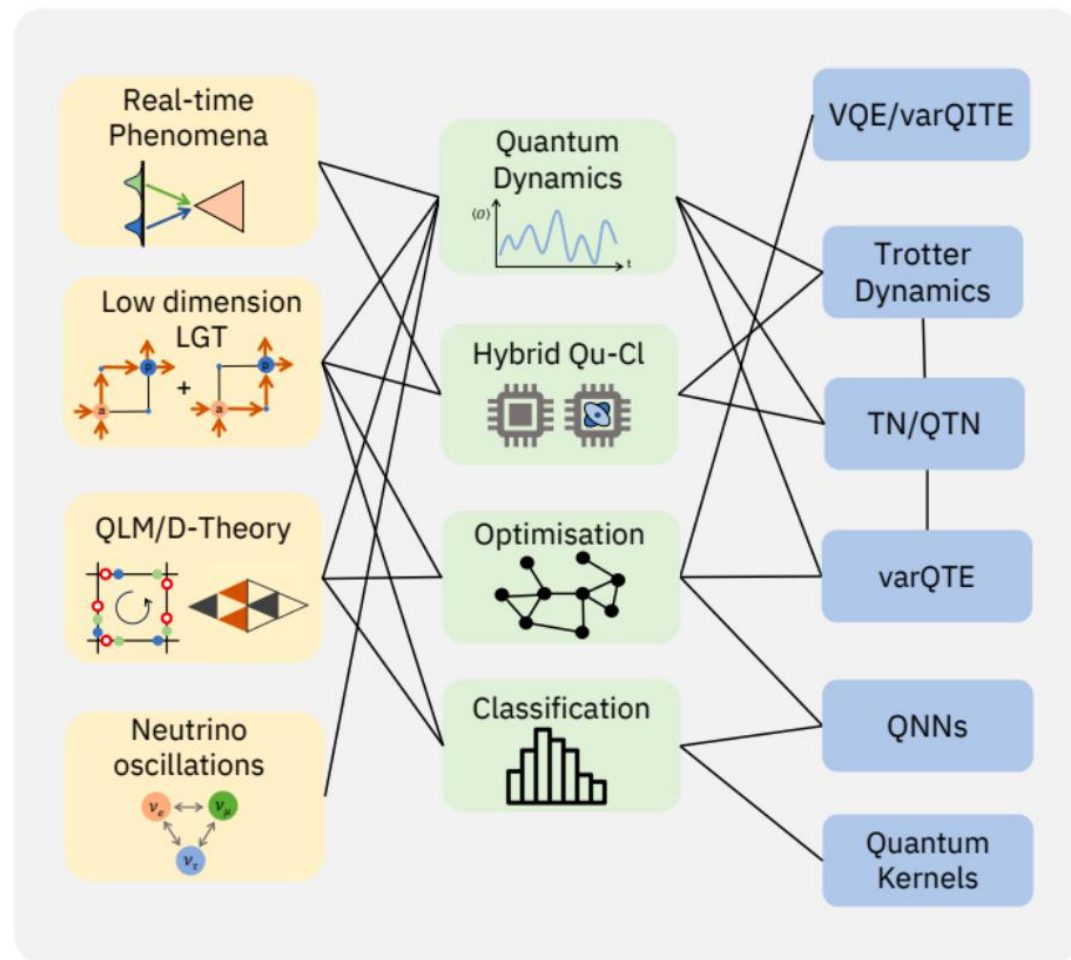
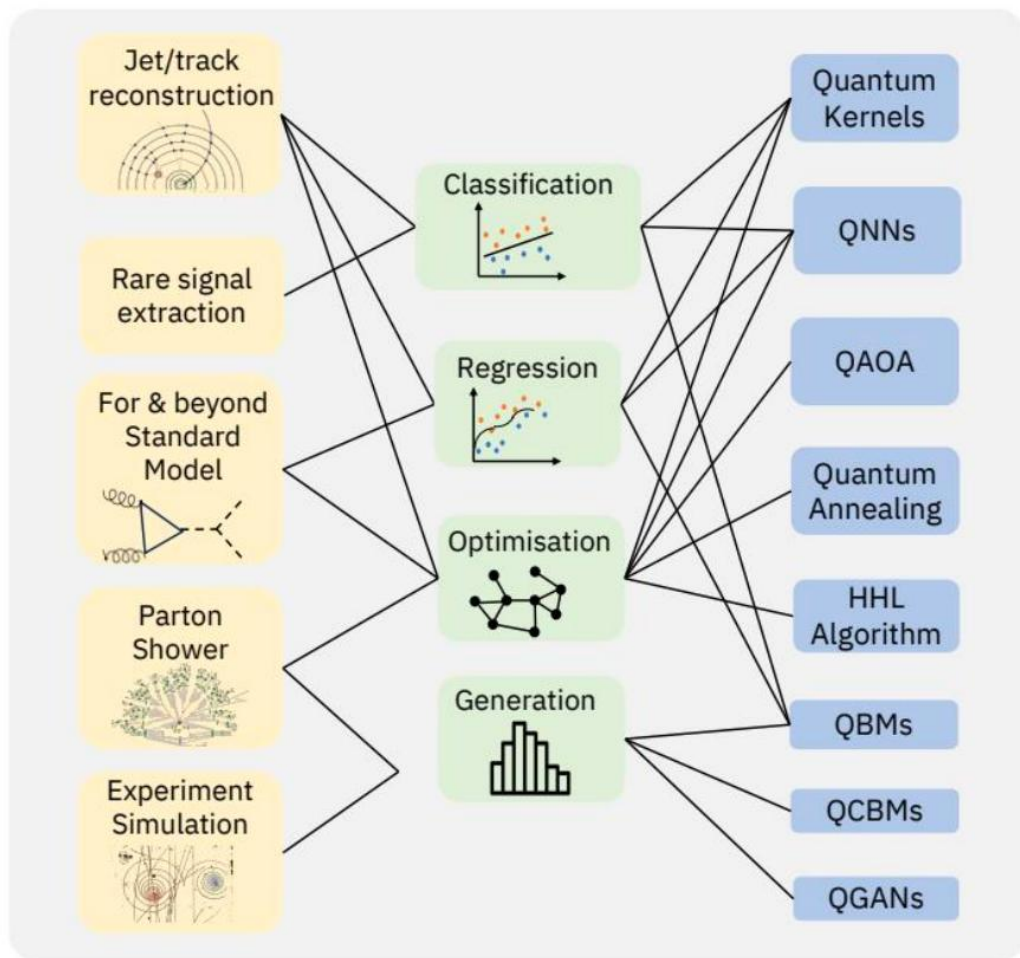
❖ 应用场景

- 量子模拟、组合优化问题、量子机器学习等
(量子分类/回归器、异常检测、量子生成模型等)
- 量子启发式算法（如模拟分叉）

Type of Algorithm			
		classical	quantum
Type of Data	classical	CC	CQ
	quantum	QC	QQ

https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_machine_learning

量子计算：高能物理的潜在新范式



图取自QC4HEP White Paper

量子组合优化

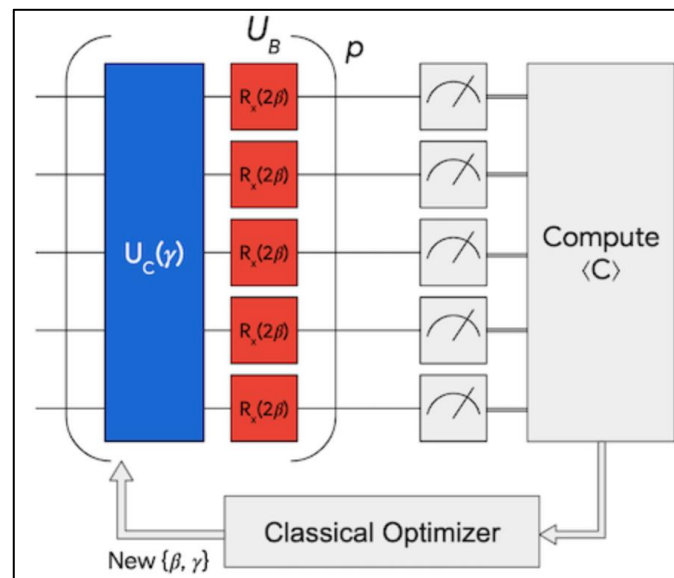
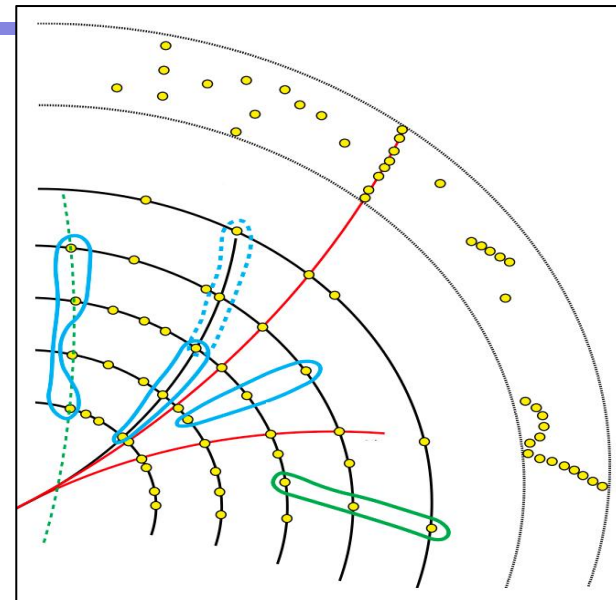
❖ 量子组合优化

- 以QUBO模型为代表，多用于tracking、jet clustering等离散组合问题

❖ 以tracking任务为例：

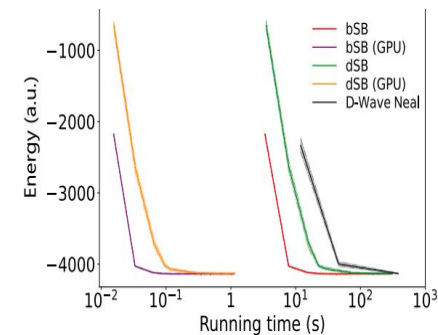
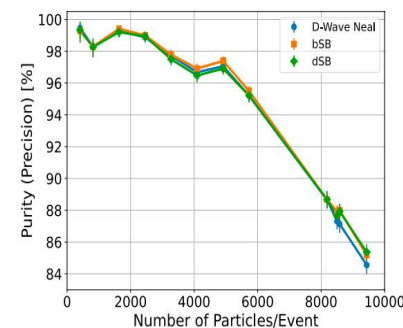
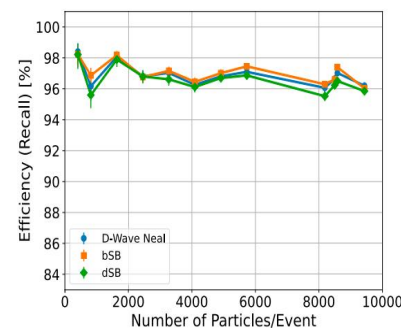
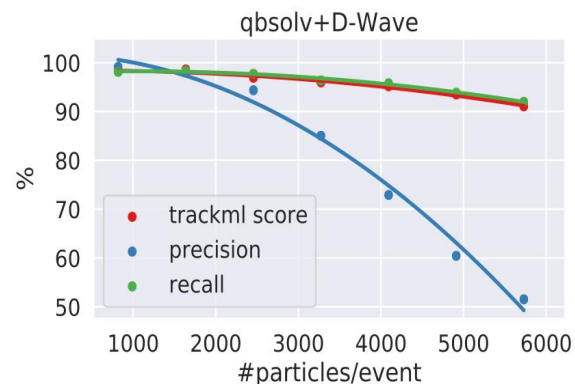
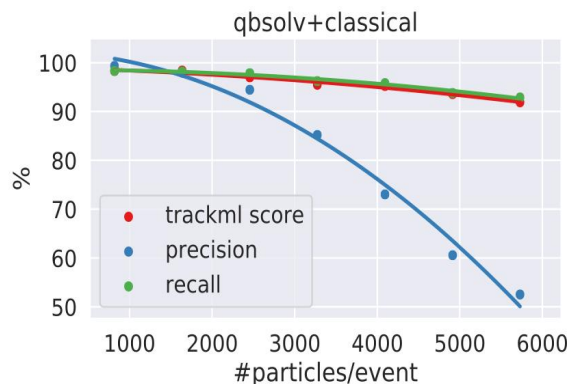
$$O(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^N a_i T_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j < i}^N b_{ij} T_i T_j$$

- 构建目标函数，兼顾单个径迹段质量、多个径迹段相互组合关系
- 利用量子计算机最小化目标函数
- QAOA算法；量子退火算法



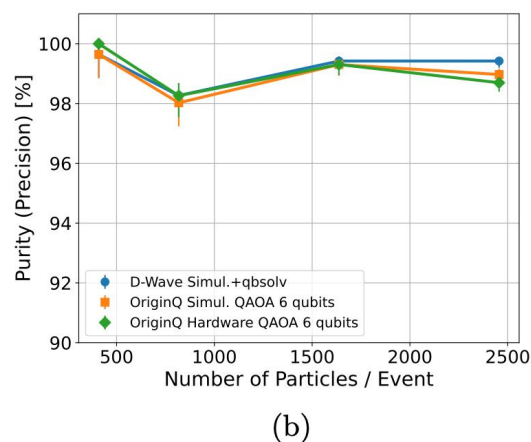
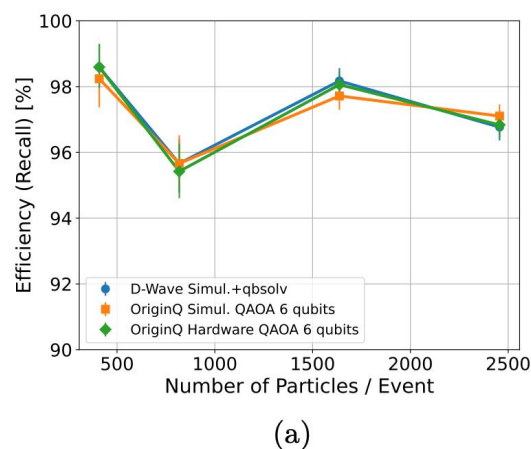
from google
quantum

案例：Tracking和顶点重建

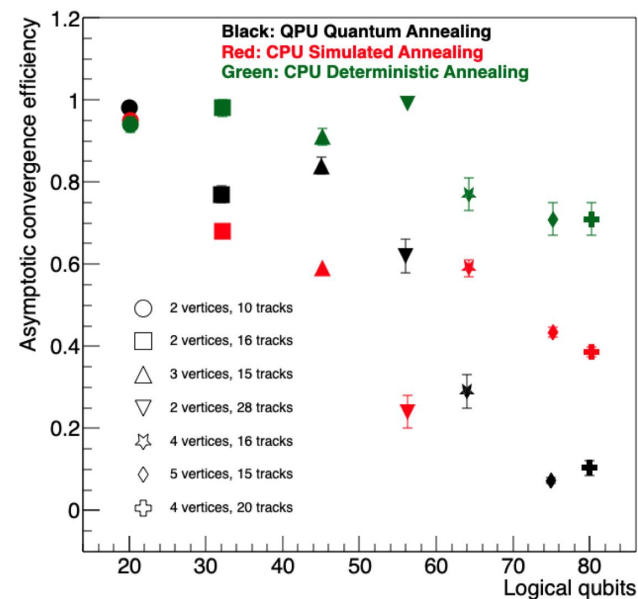


Bapst, F., Bhimji, W., Calafiura, P. et al, Comput Softw Big Sci 4, 1 (2020)
首次在DWave上验证QUBO算法

Okawa, H. et al., Comput Softw Big Sci 8, 16 (2024).
量子启发算法（经典），实现万倍加速

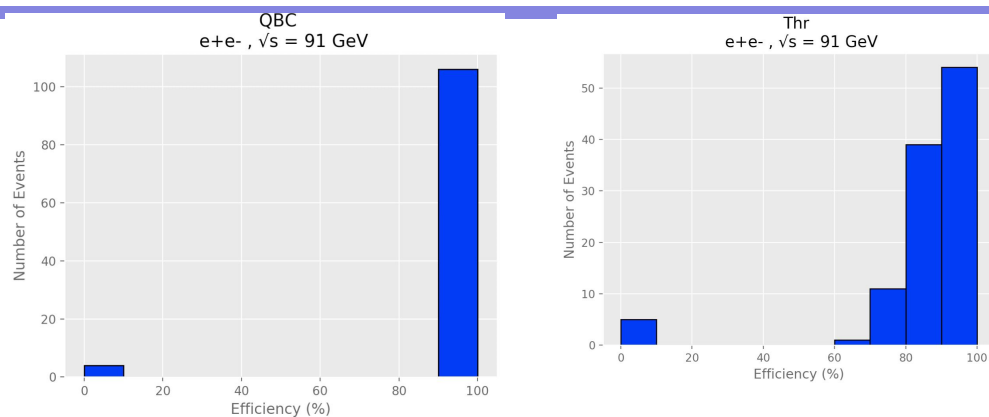


Okawa, H, IC 2023
首次使用中国量子计算机(本源悟源: 6量子比特)
计算性能没有因为硬件而下降

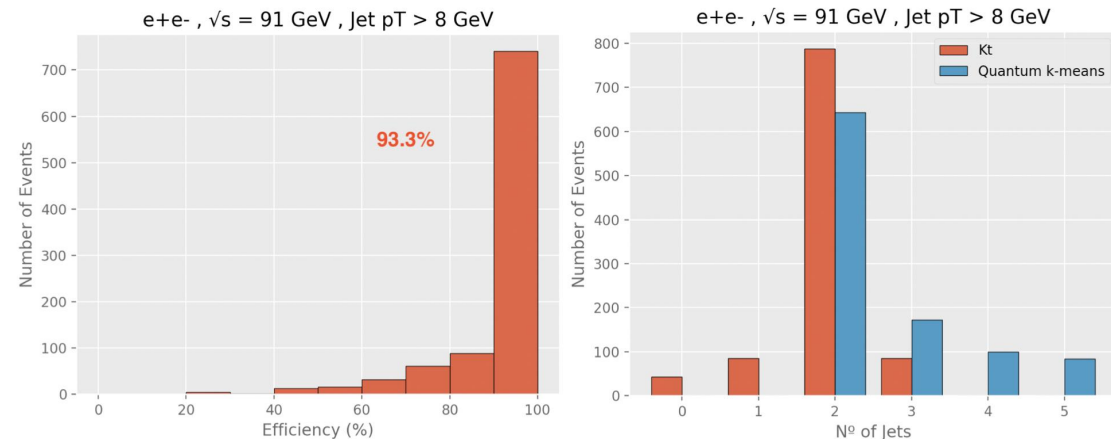


Souvik Das et al.,
arXiv:1903.08879 (2019)
CMS上利用QUBO实现
顶点重建

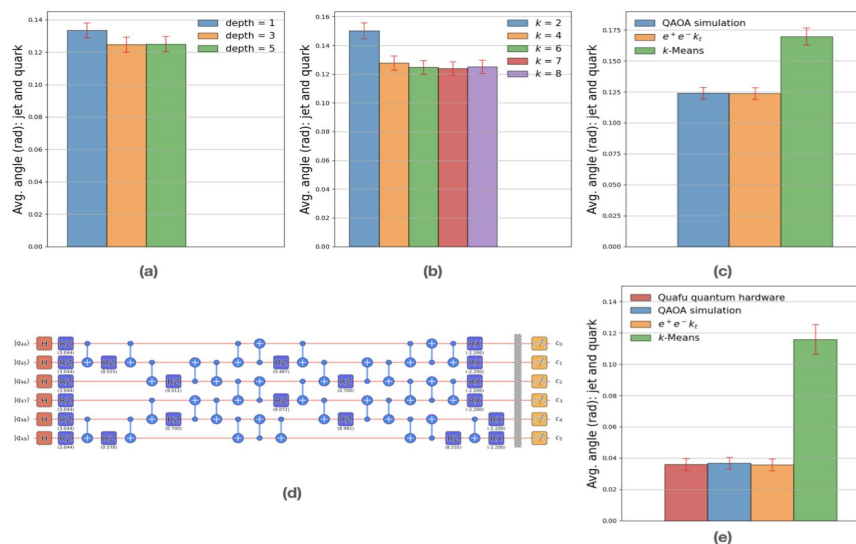
案例：Jet Clustering



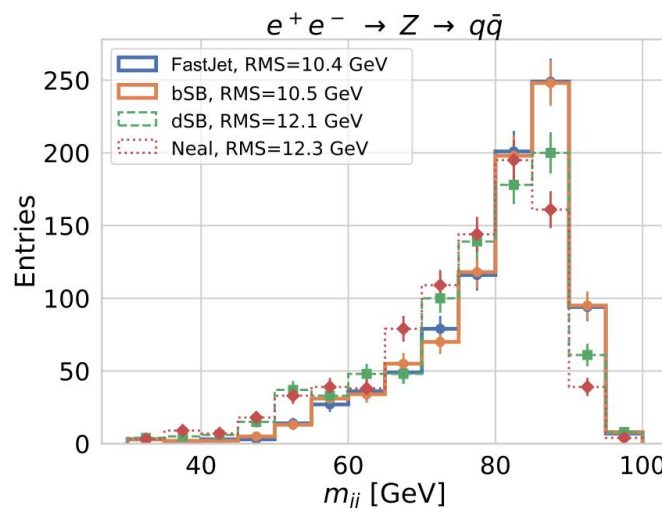
D. Pires, et al., arXiv:2012.14514 (2020)
基于量子退火的喷注聚类的早期探索性工作



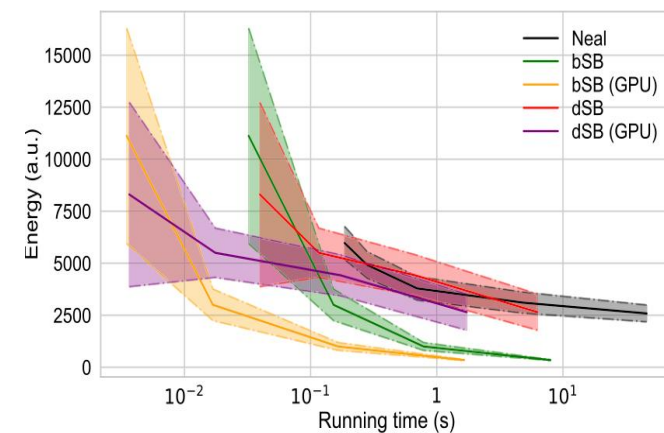
D. Pires, et al., arXiv:2101.05618
首个数字量子喷注聚类算法(Q-KMean)



Y. F. Zhu et al., Sci.Bull. 70 (2025) 4, 460-463
首次在国内量子计算机上实现Jet聚类



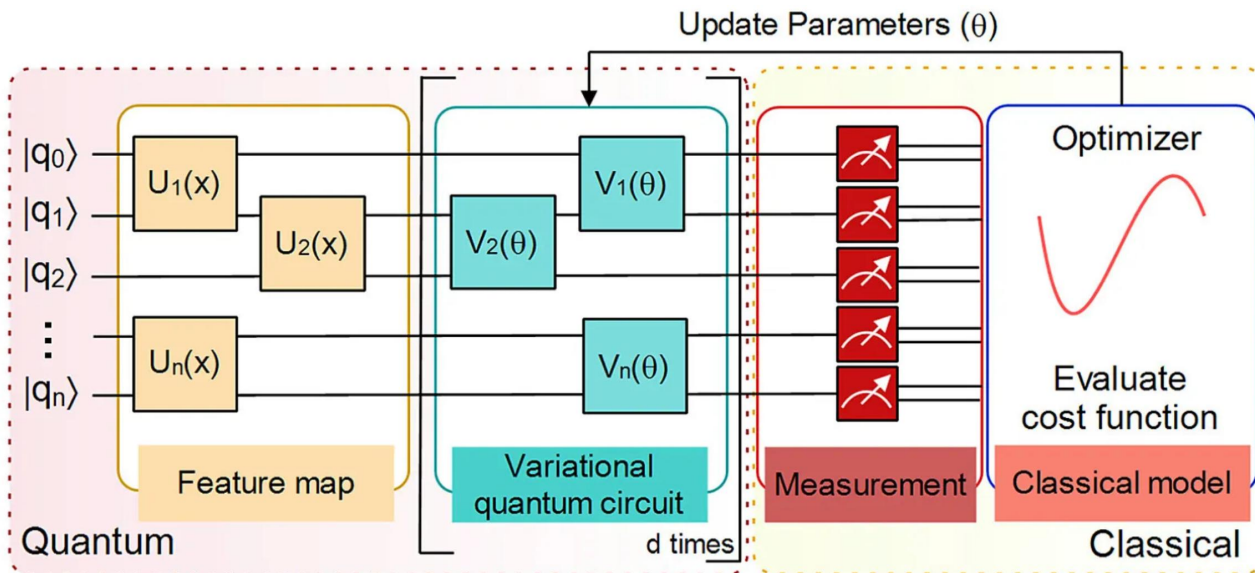
Hideki O. et al., Phys. Lett. B 864 (2025) 139393
利用量子启发算法 (SB) 实现Jet聚类



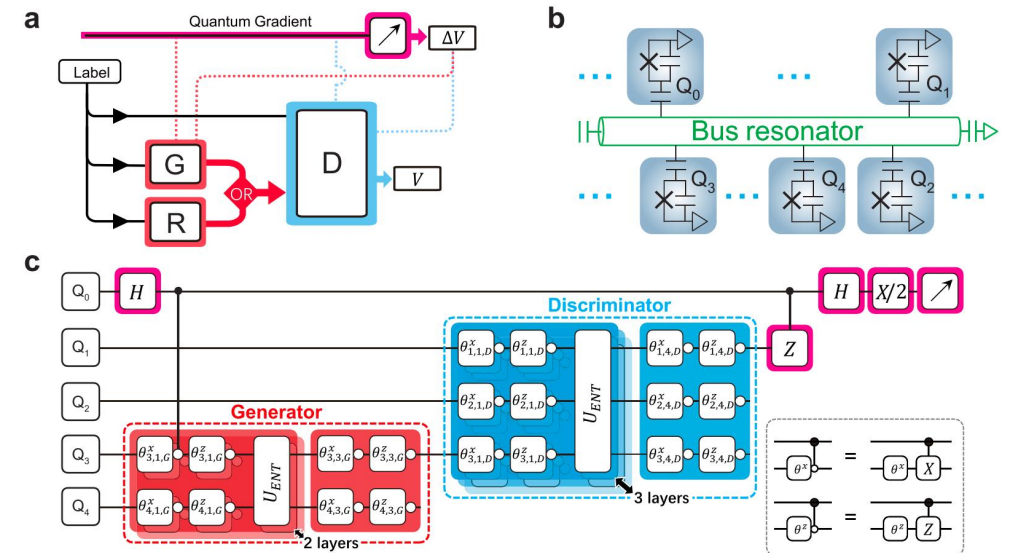
变分量子线路/量子神经网络

❖ 变分量子线路和量子神经网络

- 通过参数化量子门构成可训练模型，适配**分类、生成等**任务
- 利用经典优化器迭代更新门参数，NISQ时代主流方案之一
- 充分利用量子计算机强大的表达能力，探索优于传统ML的性能

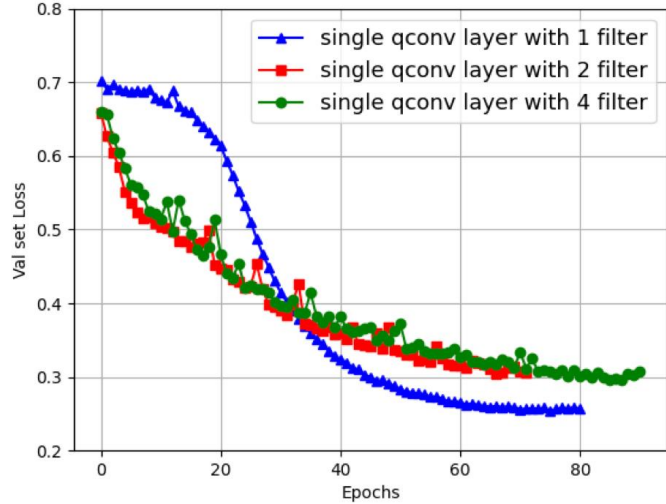
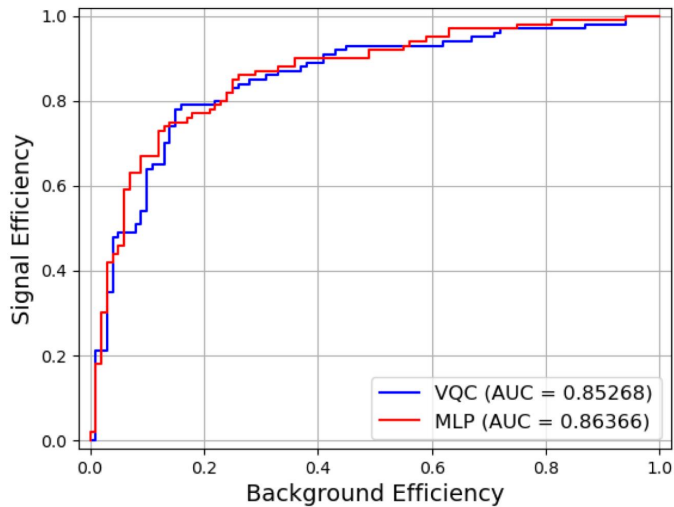


变分量子分类器VQC



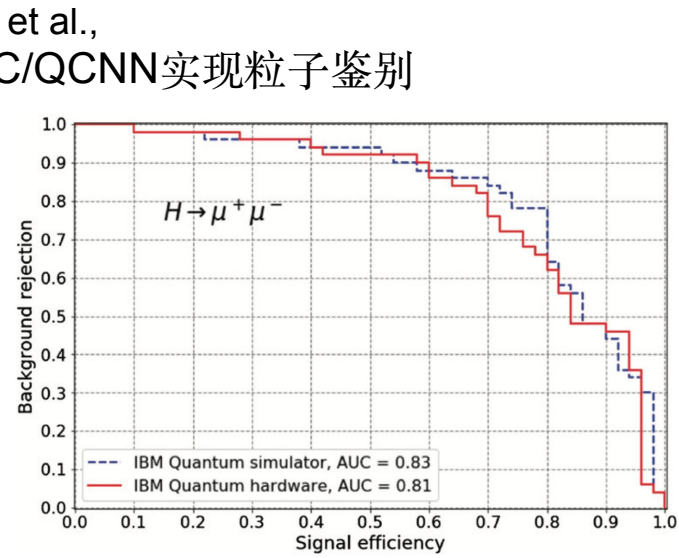
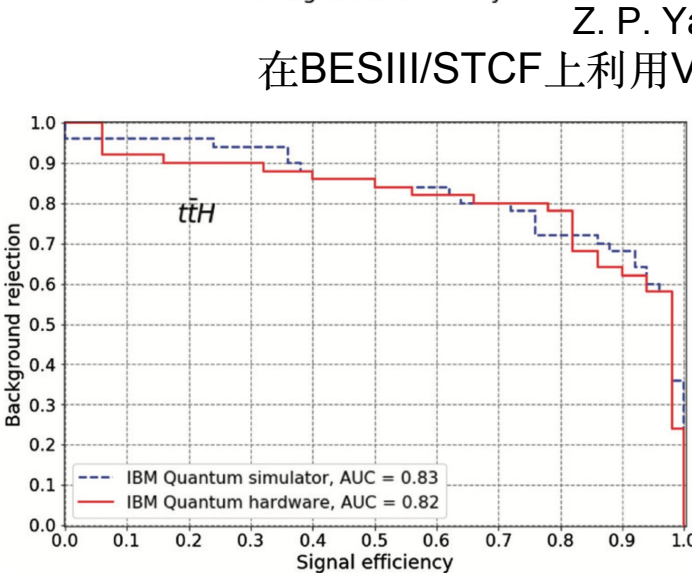
量子生成对抗神经网络 (QGAN)
Huang, K et al., npj Quantum Inf 7, 165 (2021) 11

案例：量子分类器

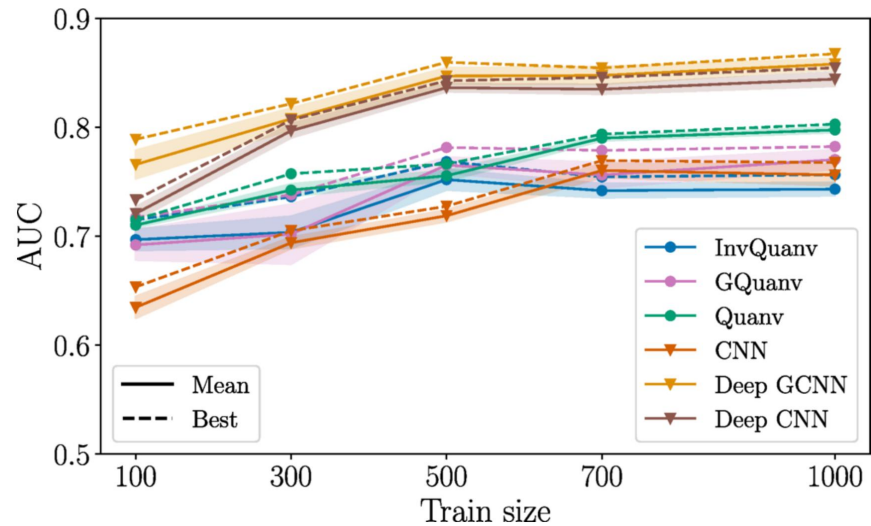


Model	Top AUC	Top ACC	JetNet AUC	JetNet ACC
Particle Transformer	0.946	0.868	0.889	0.656
Particle Net	0.953	0.885	0.896	0.669
Particle Flow Network	0.954	0.885	0.900	0.675
MPGNN - $n_M = 64$	0.961	0.896	0.903	0.683
MPGNN - $n_M = 6$	0.924	0.866	0.865	0.615
MPGNN - $n_M = 3$	0.922	0.864	0.757	0.475
QCGNN - $n_Q = 6$	0.932	0.868	0.822	0.543
QCGNN - $n_Q = 3$	0.919	0.864	0.796	0.505

Y. A. Chen and K. F. Chen, EPJ Web Conf. 337 (2025) 01285
利用Q-GNN实现Jet Tagging



Sau Lan Wu, et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 48 125003
利用IBM真机实现LHC上的事例分类

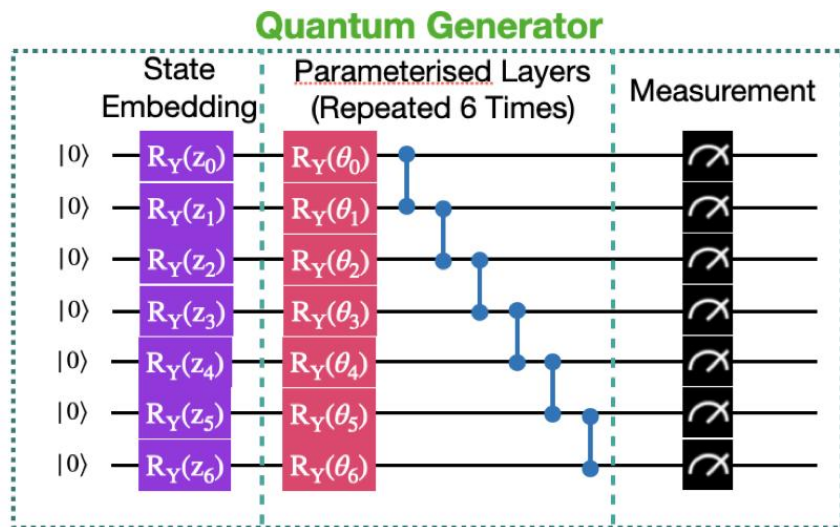


C. Duffy et al., Phys. Rev. D 112, 092006 (2025)
利用QCNN实现LArTPC实现粒子鉴别

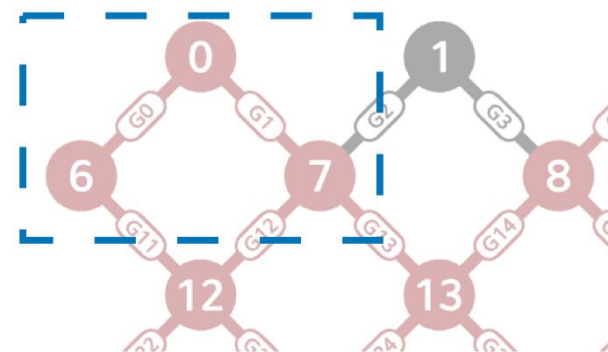
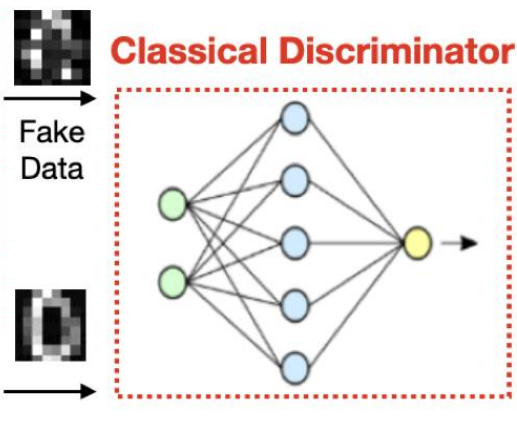
案例：量子生成模型

X. Z. Huang and W. D. Li

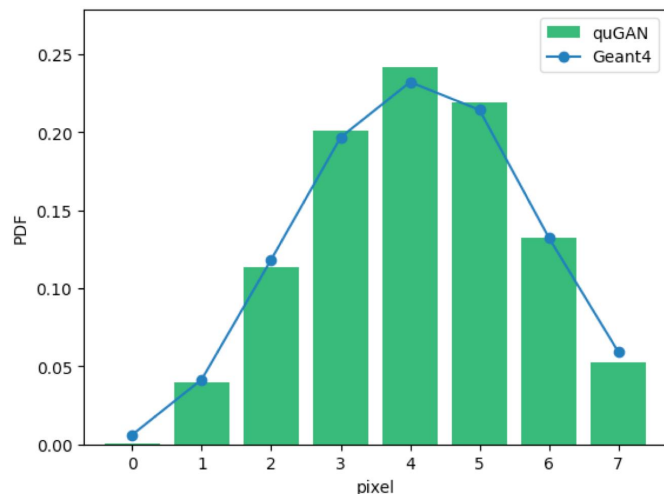
利用混合-量子生成对抗神经网络实现电磁量能器的快速模拟
振幅解码：仅生成平均簇射形状



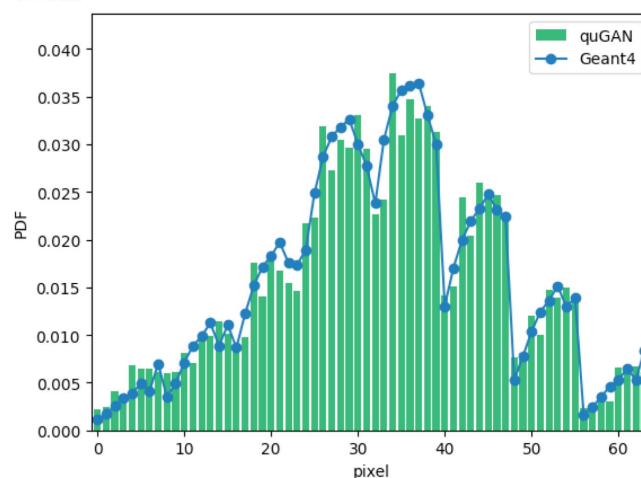
图像需进行大规模下采样



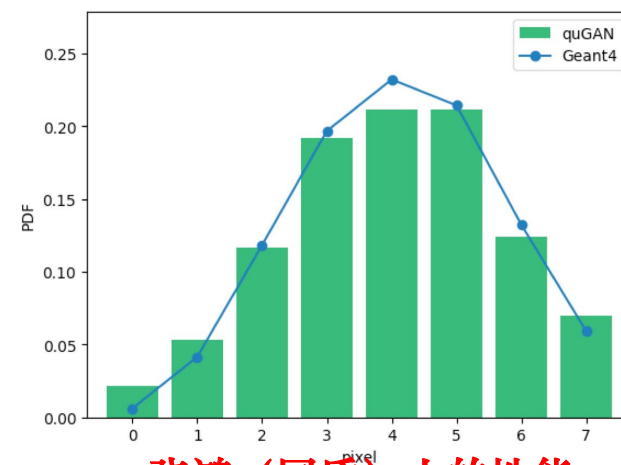
performance



一维数据生成

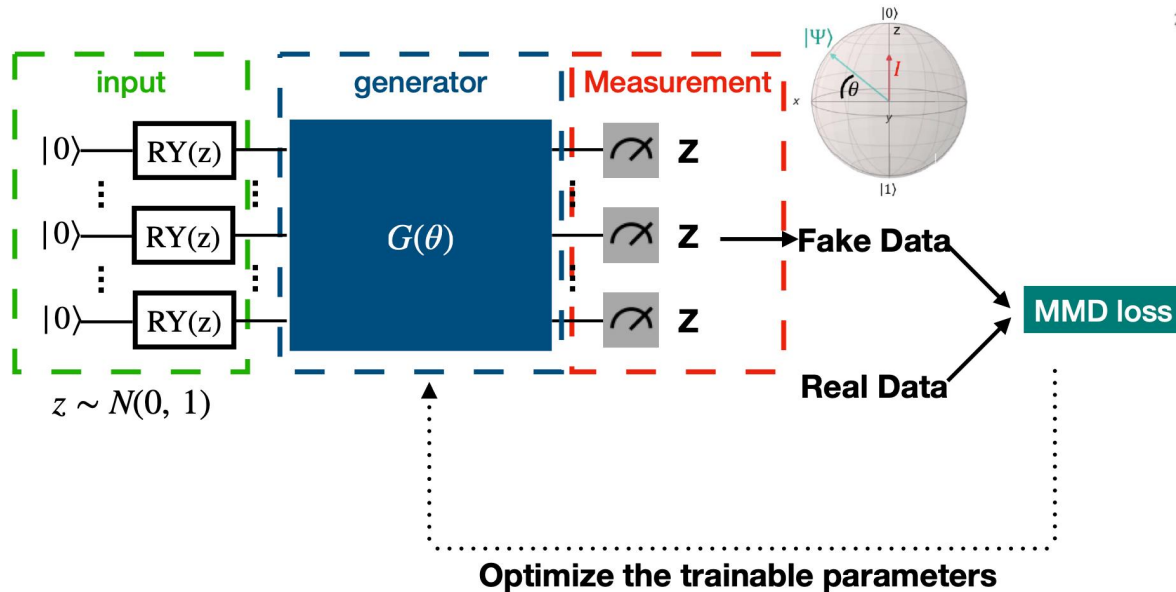


二维数据生成



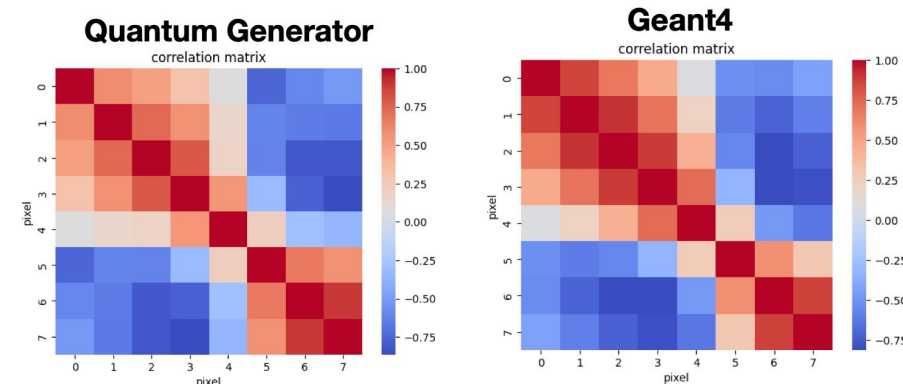
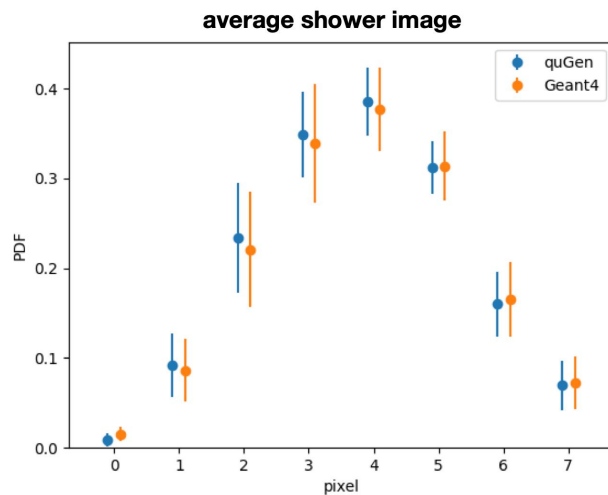
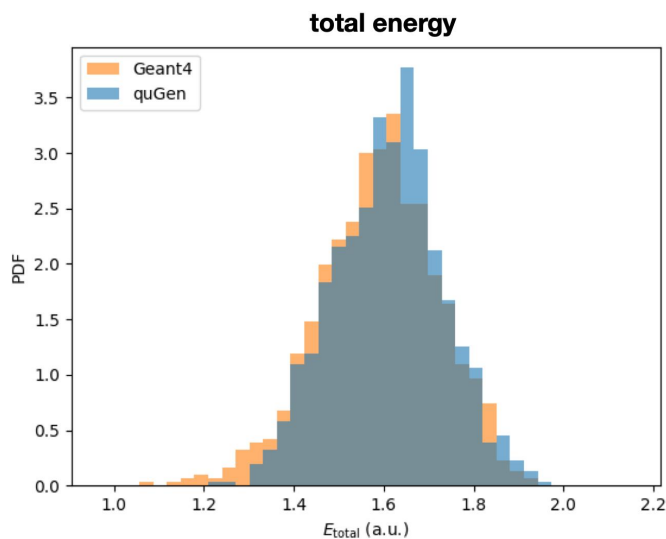
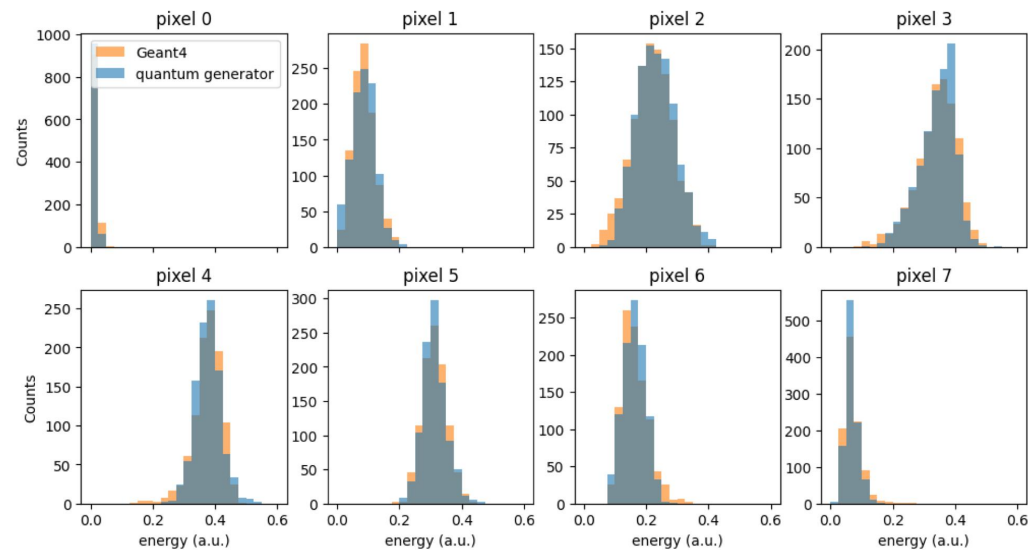
骁鸿（国盾）上的性能
与含噪模拟器相似

案例：量子生成模型



X. Z. Huang and W. D. Li

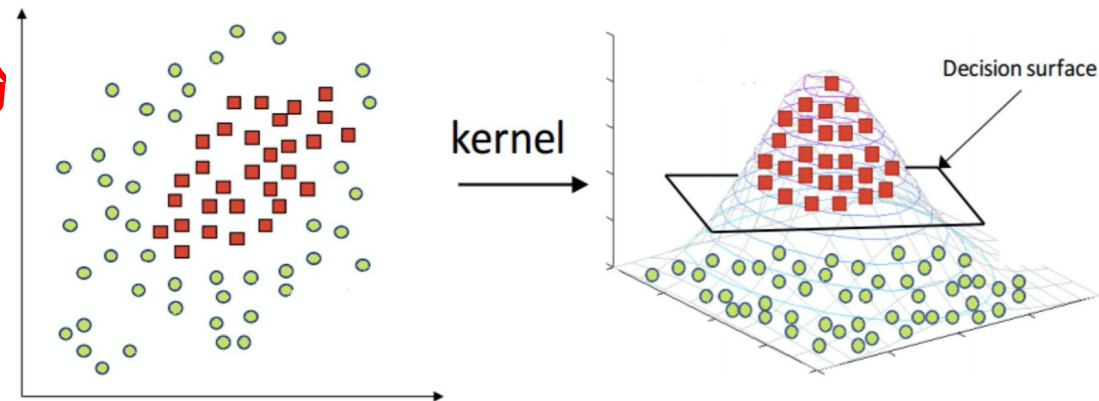
利用混合-量子生成对抗神经网络实现电磁量能器的快速模拟
角度解码：可生成单事例图像



量子核方法

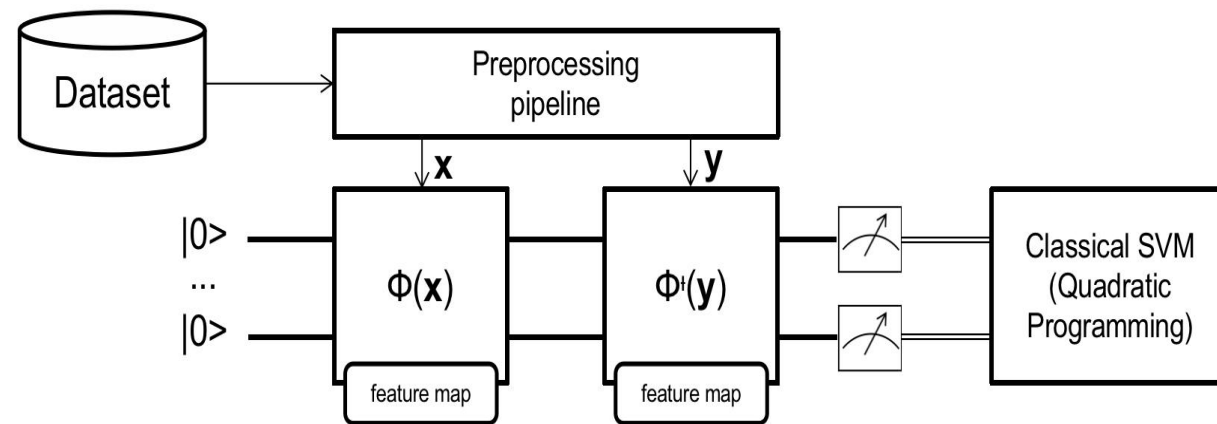
❖ 量子核方法 (Quantum Kernel)

- 利用量子态内积构造高维核函数，适配**小样本分类任务**
- 模型训练为经典二元规划（凸优化问题）
- 主要利用量子模型强大的表达能力

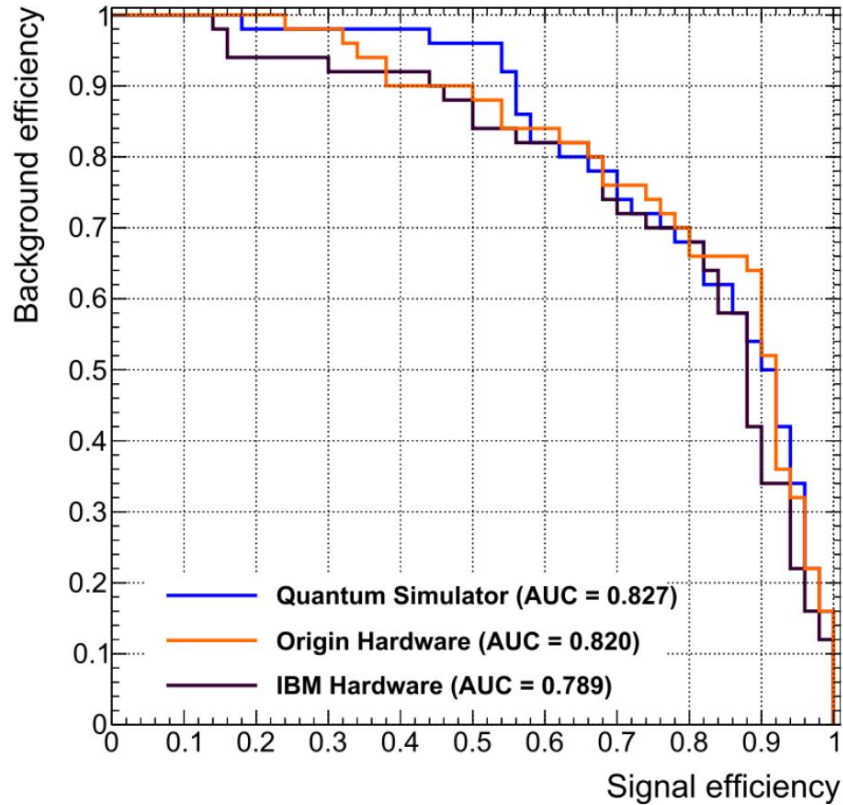


$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & L(\vec{\alpha}) = \sum_{i=1}^N y_i \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(\vec{x}_i, \vec{x}_j) \\ \text{subject to} \quad & \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \text{ and } \alpha_i \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

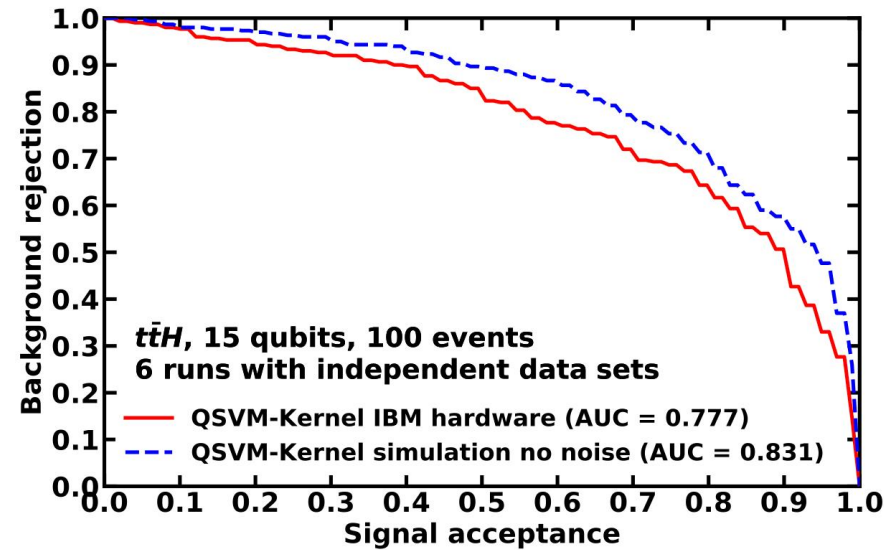
$$K(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = |\langle \Phi(\vec{x}_i) | \Phi(\vec{x}_j) \rangle|^2 = \left| \langle 0^{\otimes n} | \mathcal{U}_{\Phi(\vec{x}_j)}^\dagger \mathcal{U}_{\Phi(\vec{x}_i)} | 0^{\otimes n} \rangle \right|^2$$



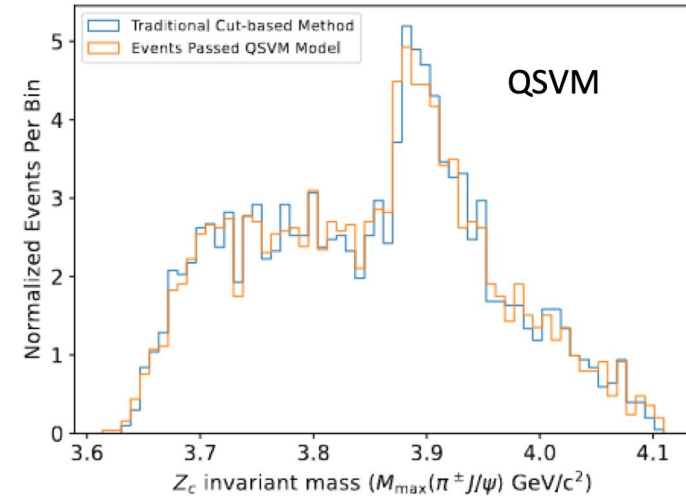
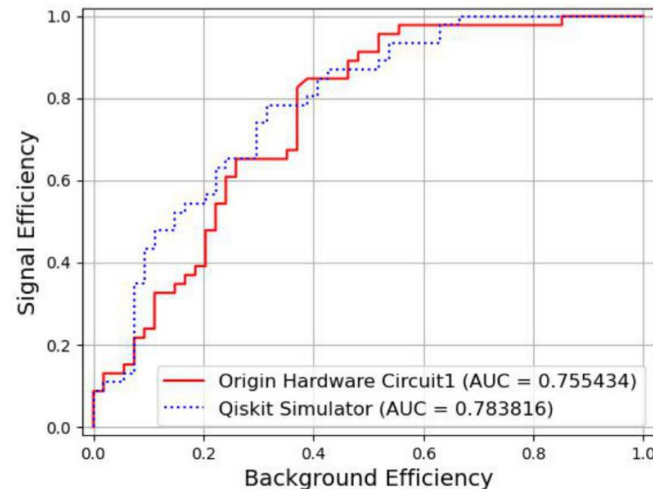
案例：量子核方法



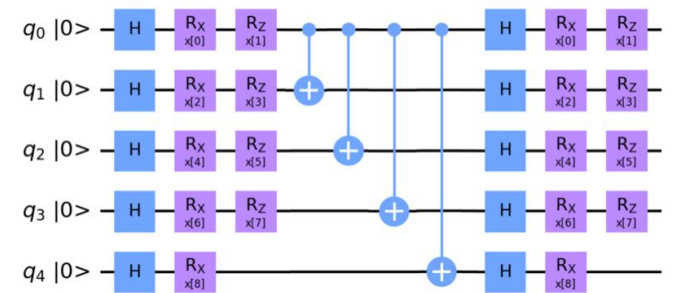
A. Fadol, Int.J.Mod.Phys.A 39 (2024) 01, 2450007
利用QSVM实现CEPC上的 $e^+e^- \rightarrow ZH$ 事例寻找
实现利用本源和IBM量子计算硬件



Sau Lan Wu, et al., Phys. Rev. Research 3, 033221 (2021)
利用QSVM实现LHC上的信号挑选



S. Y. Wu et al.
利用QSVM在BESIII上重新发现
 $Z_c(3900)$



T. Li et al., J. Phys.: Conf. Ser. 2438 012071
国内团队首次利用国产平台（本源）
实现粒子鉴别

挑战：硬件与算法的双重约束

❖ 硬件层面：

- NISQ设备可用量子比特数量少、拓扑连接结构简单、门错误率高、相干时间短，深线路性能快速退化
- 经典 - 量子数据加载存在输入瓶颈，易抵消量子计算收益
- 异构硬件易导致物理结果波动

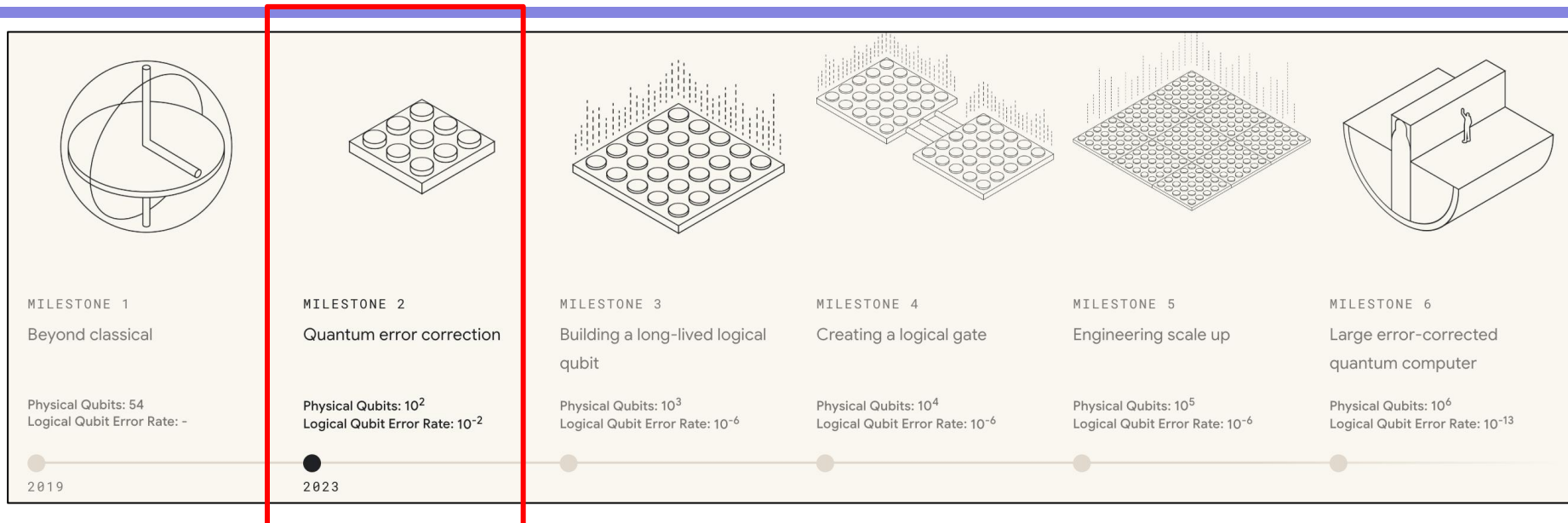
❖ 算法层面：

- 目前大部分算法尚无严格可证明的明显量子优越性，现有成果多为实证对比（迹象）
- 模型泛化性、可解释性弱于成熟经典算法
- 高能物理实验领域多为直接应用成熟算法，对于特定问题的算法设计不足
- 短时间内，量子启发算法可能有更强的应用价值

Hao, Y., Ding, Q., Yuan, X. et al., Sci. China Phys. Mech. Astron. 69, 250314 (2026)

❖ 量子计算在高能物理实验领域仍处于早期技术储备阶段

未来展望



- ❖ 短期（3-5年）：NISQ设备和容错设备上的混合算法研发，在特定子任务中作为经典算力补充
- ❖ 中期：可能进入容错量子时代，或者成功搭建逻辑比特？
- ❖ 远期： $O(10^6)$ 量子比特，有望实现大规模的算法落地

量子硬件形势变化迅速，需要时刻关注并积极进行算法研发

国内外已经成立大量研究组，开展量子计算的应用研究

总结

- ❖ 高能物理实验算力瓶颈日益凸显，QC是极具潜力的全新技术路径
- ❖ 国际上相关研究已经非常丰富，我国应积极启动量子计算应用研究
 - QC4SimRec工作组
- ❖ QC在事例分类、径迹重建、喷注重建、探测器模拟和物理分析等场景完成了大量原理验证
 - 高能物理实验中多以量子组合优化、QML、量子启发算法等研究为主
- ❖ 当前硬件性能仍处于NISQ早期阶段，当前阶段高能实验以算法研究为主，距离应用到生产环境仍有较大距离
- ❖ 引入物理先验与对称性的算法设计，可能是近期提升QC性能的核心方向

Quantum Computing
— AND —
Machine Learning
WORKSHOP

DATE
Aug 16 – 20, 2026

VENUE
Sun Yat-sen University
Shenzhen Campus · Guangdong, China

HOSTED BY
School of Science, Sun Yat-sen University
SHENZHEN CAMPUS

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

WORKSHOP OBJECTIVES

- Exchange progress and practical experience in AI, quantum computing, and advanced computing for high-energy physics and related fields.
- Strengthen the domestic community through cross-institution collaboration and a healthy research ecosystem.
- Review key advances in AI and quantum technologies, and discuss their applications in high-energy physics.
- Organize challenge-style benchmark tasks to promote reproducible and comparable methods.

ADVISORY COMMITTEE		SCIENTIFIC PROGRAM COMMITTEE				LOCAL ORGANIZING COMMITTEE	
Jun Cao	IHEP	Xiacong Ai	ZZU	Huulin Qu	SJTU	Jingde Chen	IHEP
Gang Chen	IHEP	Tianji Cai	Tongji	Manqi Ruan	IHEP	Ke Li	IHEP
Xingtao Huang	SDU	Xun Chen	SJTU	Hongtao Yang	USTC	Bingxuan Liu	SYSU
Weidong Li	IHEP	Congqiao Li	PKU	Junhao Yin	NKU	Tong Liu	IHEP
Xiaorui Lyu	UCAS	Teng Li	SDU	Rui Zhang	NJU	Yang Liu	SYSU
Fazhi Qi	IHEP	Yingying Li	IHEP	Zhengde Zhang	IHEP	Liaoshan Shi	SYSU
Shengsen Sun	IHEP	Tao Lin	IHEP	Chen Zhou	PKU	Yanjuan Tu	HKU
Hongxi Xing	SCNU	Hideki Okawa	IHEP	Qidong Zhou	SDU	Jin Zhang	SYSU

INDICO - REGISTRATION

<https://indico.ihep.ac.cn/event/29575/>

Workshop category, registration, and updates

INDICO QR

Scan for registration
Indico page

Fourth Quantum Computing and Machine Learning Workshop · 2026
School of Science, Sun Yat-sen University · Shenzhen, Guangdong, China

SUN YAT-SEN UNIVERSITY

第四届 量子计算与机器学习研讨会 8月16日-8月20日 中山大学（深圳） <https://indico.ihep.ac.cn/event/29575/>

- Overview of AI studies - Experiments
- Overview of AI studies - Theory
- AI progress from industry
- Quantum computing and quantum AI